



Emissionsverhalten von Linienbussen – Teil 3

Dieselantrieb mit werkseitigem Bluetec[®]-System
mit Partikelfilter und Hochdruck-AGR mit CRT[®]-System
im Vergleich

[LANUV-Fachbericht 20](#)



Emissionsverhalten von Linienbussen – Teil 3

Dieselantrieb mit werkseitigem Bluetec[®]-System mit Partikelfilter und
Hochdruck-AGR mit CRT[®]-System im Vergleich

LANUV-Fachbericht 20

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
Recklinghausen 2009

IMPRESSUM

Herausgeber: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NordrheinWestfalen (LANUV NRW)
Leibnizstraße 10, 45659 Recklinghausen
Telefon 02361 305-0
Telefax 02361 305-3215
E-Mail: poststelle@lanuv.nrw.de

Der vorliegende Fachbericht ist der Abschlussbericht eines Forschungsvorhabens, das der TÜV NORD Mobilität GmbH & Co. KG im Auftrag des LANUV NRW durchgeführt hat.



Autoren: Martin Kleinebrahm, Leif-Erik Schulte, Sergej Dreger
(TÜV NORD Mobilität GmbH & Co. KG, Institut für Fahrzeugtechnik und Mobilität, Fachgebiet Motoren/Nutzfahrzeuge)

Projektbetreuung: Dr. Andreas Brandt (LANUV NRW)

Fotos: TÜV NORD Mobilität GmbH & Co. KG, wenn nicht anders angegeben

ISSN: 1864-3930 LANUV-Fachberichte

Informations-
dienste: Informationen und Daten aus NRW zu Natur, Umwelt und Verbraucherschutz unter
• www.lanuv.nrw.de

Aktuelle Luftqualitätswerte zusätzlich im
• WDR-Videotext Tafeln 177 bis 179

Bereitschafts-
dienst: Nachrichtenbereitschaftszentrale des LANUV NRW
(24-Std.-Dienst): Telefon 0201 714488

Nachdruck – auch auszugsweise – ist nur unter Quellenangaben und Überlassung von Belegexemplaren nach vorheriger Zustimmung des Herausgebers gestattet.
Die Verwendung für Werbezwecke ist grundsätzlich untersagt.

INHALT	SEITE
1 EINLEITUNG	5
2 ZIELSETZUNG	7
3 VORGEHENSWEISE	8
3.1 Allgemeines	8
3.2 Betrachtete Abgasnachbehandlungskonzepte	8
3.2.1 Bluetec [®] -System mit Partikelfilter	8
3.2.2 Abgasrückführung mit CRTec [®] -System	10
3.3 Versuchsfahrzeuge	12
3.3.1 Gelenkbus Mercedes-Benz O 530 Citaro G	12
3.3.2 Gelenkbus MAN A23 Lion's City G	13
3.3.3 Solobus MAN A78 Lion's City T	14
3.4 Streckenauswahl	15
3.5 Messtechnik und Fahrzeugausrüstung	16
3.5.1 Messtechnik für gasförmige Komponenten	16
3.5.2 Partikelmesstechnik	19
3.5.3 Messung des Abgasmassenstromes	21
3.5.4 Messung der Umgebungsdaten	23
3.5.5 Messung der geodätischen Daten	23
3.5.6 Drehmomentmessung	23
3.5.7 Geschwindigkeitsmessung	24
3.5.8 Messung der Motordrehzahl	25
3.5.9 Messung weiterer Größen	25
4 ERGEBNISSE	27
4.1 Ergebnisse im Realbetrieb	27
4.1.1 Allgemeine Vorgehensweise	27
4.1.2 Streckenbezogene Ergebnisse	29
4.1.3 Leistungsbezogene Ergebnisse	35
4.1.4 Geschwindigkeitsabhängige Darstellung der NO _x -Emissionen	36
4.1.5 Geschwindigkeitsabhängige Darstellung der NO ₂ -Emissionen	40
5 ZUSAMMENFASSUNG	44
6 LITERATUR	45

1 Einleitung

Mit der EU-Rahmenrichtlinie über die Beurteilung und die Kontrolle der Luftqualität (RL 96/62/EG) und den zugehörigen Tochterrichtlinien (z.B. 1999/30/EG, 2000/69/EG, 2002/3/EG) werden Luftqualitätsziele zur Vermeidung oder Verringerung schädlicher Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt festgelegt. Die Beurteilung der Luftqualität in den Mitgliedstaaten der EU erfolgt nach einheitlichen Methoden und Kriterien [1].

Die Umsetzung dieser Richtlinien in deutsches Recht erfolgte durch Novellierung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (BImSchG) und der 22. Verordnung zum BImSchG im Jahr 2002.

Als Folge der Umsetzung der EU-Richtlinien gelten wesentlich schärfere Grenzwerte für die wichtigsten Luftschadstoffe. Die nachfolgende Tabelle 1 und Tabelle 2 geben einen Überblick über die Grenzwerte für Stickstoffoxide (NO_x) und Partikel (PM10). Die Richtlinie 96/62/EG schreibt zudem vor, dass die Belastungssituation regelmäßig durch Messung oder Modellrechnung zu ermitteln und zu beurteilen ist. Im Falle der Feststellung einer unzulässig hohen Umweltbelastung muss ein Luftreinhalteplan (LRP) aufgestellt werden.

Im Jahr 2003 wurde an der Messstation am Graf-von-Galen-Ring in Hagen ein Jahresmittelwert für Stickstoffdioxid von 66 µg/m³ festgestellt. Dieser Messwert hat nicht nur den ab 2010 gültigen Jahresmittelgrenzwert für den NO₂ von 40 µg/m³ deutlich überschritten, sondern lag auch über dem zulässigen Toleranzbereich (Grenzwert + Toleranzmarge) für das Jahr 2003, der bei 54 µg/m³ liegt.

Tabelle 1: Grenzwerte für NO₂ und NO_x, [Quelle: [2], Anhang II]

	Grenzwert	Toleranzmarge
1-Stunden-Grenzwert Gesundheitsschutz	200 µg/m ³ NO ₂ über 1 Stunde bei höchstens 18 Überschreitungen im Kalenderjahr, einzuhalten ab 1.1.2010	50% ab Inkrafttreten bis 1.1.2010 in gleichen Jahresraten auf 0% zu mindern
Jahresgrenzwert Gesundheitsschutz	40 µg/m ³ NO ₂ Kalenderjahresmittelwert, einzuhalten ab 1.1.2010	50% ab Inkrafttreten bis 1.1.2010 in gleichen Jahresraten auf 0% zu mindern
Jahresgrenzwert Vegetationsschutz	30 µg/m ³ NO _x (NO+NO ₂), als Kalenderjahresmittelwert	Keine
Alarmschwelle	400 µg/m ³ NO ₂ gemessen über 3 aufeinander folgende Stunden an repräsentativen Orten über mindestens 100 km ² oder in ganzen Ballungsräumen, wenn sie kleiner sind	Keine

Tabelle 2: Grenzwerte für Partikel (PM10), [Quelle: [2], Anhang III]

	Grenzwert	Toleranzmarge
24-Stunden-Grenzwert	50 µg/m ³ PM10 über 24 Stunden, höchstens 35 Überschreitungen im Jahr, einzuhalten ab 1.1.2005	50% bei Inkrafttreten, in gleichen Jahresraten zu mindern auf 0%
Jahresgrenzwert	40 µg/m ³ PM10 über 1 Kalenderjahr, einzuhalten ab 1.1.2005	20% bei Inkrafttreten, in gleichen Jahresraten zu mindern auf 0%

Neben der Überschreitung des zulässigen Jahresmittelwertes für Stickstoffdioxid wurde im Jahre 2003 an der Station Graf-von-Galen-Ring die ab dem 01.01.2005 einzuhaltende maximale Anzahl der Tage (35) mit einem Tagesmittelwert über 50 µg/m³ für Partikel PM10 überschritten. Die für 2003 geltende Summe aus Grenzwert und Toleranzmarge (35 Überschreitungen des Tagesmittelwertes von 60 µg/m³) wird an dieser Station ebenfalls nicht eingehalten. Der ab 2005 gültige Jahresmittelwert von 40 µg/m³ wird am Graf-von-Galen-Ring erreicht.

Aus diesen Gründen wurde die Aufstellung eines Luftreinhalteplanes für die Hagener Innenstadt für 2005 veranlasst, der aufgrund der zu erwartenden Überschreitungen in 2005 noch um einen Aktionsplan erweitert wurde.

Eine der Maßnahmen des Luftreinhalteplanes sieht eine vorzeitige Umrüstung der Busflotte der Hagener Straßenbahn auf verschärfte Abgasnormen vor. Die Möglichkeiten einer Umrüstung der vorhandenen Busflotte auf fortschrittliche Abgasnachbehandlungssysteme wurden bereits im Rahmen früherer Forschungsvorhaben des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz untersucht, siehe hierzu [3, 4].

Eine weitere Maßnahme ist der Austausch der alten Busse gegen neue, die mit den fortschrittlichsten Abgasnachbehandlungssystemen serienmäßig ausgestattet sind und die EEV-Abgasnorm (2005/55/EG; Grenzwertzeile C) erfüllen.

Ähnlich wie bei der Nachrüstung hat man bei der Neuanschaffung die Wahl zwischen grundsätzlich zwei unterschiedlichen Motor-/Abgasnachbehandlungskonzepten. Auf der einen Seite existieren Systeme am Markt, die mit Hilfe von Abgasrückführung (AGR) die NO_x-Emissionsgrenzwerte einhalten und im Regelfall über ein partikelabscheidendes Nachbehandlungssystem unterhalb der Partikelgrenzwerte bleiben. Hier gibt es Konzepte, die den EEV-Standard erreichen.

Der andere Weg führt über eine katalytische Abgasnachbehandlung mit einem SCR-Katalysator (Selective Catalytic Reduction) unter Verwendung von Harnstoff als Reagens. Diese Systeme können ebenfalls mit einem Partikelfilter kombiniert werden und erreichen ebenfalls EEV-Standard.

Um alle zurzeit verfügbare Technologien abdecken zu können, wurden in diesem Projekt je ein Gelenkbus mit SCR- und AGR-Technologie sowie ein Solobus mit AGR-Technologie, vermessen. Die Busse waren herstellereitig mit Abgasnachbehandlungssystemen ausgerüstet und entsprachen dem aktuellen Serienstand.

Das hier beschriebene Projekt dokumentiert die Vermessung von drei Bussen hinsichtlich der Abgasemissionen und die damit erzielten Ergebnisse.

2 Zielsetzung

Berechnungen des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen haben gezeigt, dass mit der derzeitigen Buspopulation eine deutliche Absenkung der Stickoxidemission der Busse des öffentlichen Nahverkehrs notwendig ist, um die Situation in der Innenstadt von Hagen zu verbessern. Die Absenkung sollte hierbei zumindest die Euro V-Grenzwerte 2 g/kWh, besser noch 1 g/kWh erreichen. Mit einer solchen, deutlichen Absenkung der Stickoxidemissionen wird auch eine entsprechende Verminderung der NO₂-Emission erwartet. Neben der Nachrüstung von in Betrieb befindlichen Fahrzeugen stellt der Ersatz alter Fahrzeuge durch neue eine Option dar. Das Thema der Nachrüstung wurde bereits in vorherigen Vorhaben untersucht. Zielsetzung dieses Projektes ist es, die Realemissionen von EEV-typgeprüften Fahrzeugen zu untersuchen.

3 Vorgehensweise

3.1 Allgemeines

Die Randbedingungen bei der Hagener Straßenbahn sahen folgende Vorgehensweise vor: Ein Fahrzeug aus dem Fuhrpark der Hagener Straßenbahn mit einem SCR-System (Selective Catalytic Reduction) wurde unter den normalen Betriebsbedingungen mit Biodiesel vermessen. Die beiden weiteren Fahrzeuge mit AGR und CRT[®] System stammten beide nicht aus dem Fuhrpark der Hagener Straßenbahn, sondern wurden durch die Paderborner Verkehrsbetriebe Padersprinter (Gelenkbus) und den Bushersteller (Solobus) zur Verfügung gestellt. Beide Fahrzeuge wurden mit Kraftstoff entsprechend EN 590 betrieben.

Die drei Fahrzeuge wurden auf zwei Strecken im Realbetrieb vermessen. Die hierzu benutzten Linienführungen wurden im Vorfeld durch die Hagener Straßenbahn ausgewählt. Die Streckenführung sollte als repräsentativ für den Busbetrieb in Hagen gelten.

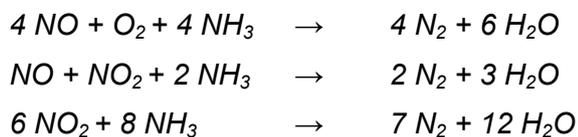
3.2 Betrachtete Abgasnachbehandlungskonzepte

3.2.1 Bluetec[®]-System mit Partikelfilter

Das Bluetec[®]-System in der EEV-Ausführung ist ein SCR-System mit einem vorgeschalteten, geschlossenen Russpartikelfilter (Sintermetallfilter SMF[®]). Abbildung 1 zeigt die Funktionsweise und den schematischen Aufbau des Systems.

Das Rohabgas strömt dabei zuerst durch den Oxidationskatalysator (DOC), in dem die gasförmigen Abgaskomponenten HC und CO weitgehend vollständig zu CO₂ und H₂O aufoxidiert werden. Der Oxidationskatalysator wandelt auch bis zu 50 % des vom Motor emittierten NO zu sehr reaktivem NO₂. Im Russpartikelfilter werden die Russpartikel abgeschieden und kontinuierlich verbrannt (CRT[®]-Prinzip). Zur Reaktion wird das zuvor im Oxidationskatalysator produzierte NO₂ benutzt.

Die Stickstoffoxide (NO und NO₂) werden im SCR-Katalysator reduziert. Hierzu wird vor dem SCR-Katalysator eine 32,5 %ige wässrige Harnstofflösung als Reagens in das Abgas eingedüst. Das dabei in einer Hydrolysereaktion entstehende Ammoniak NH₃ wird im SCR-Katalysator adsorbiert und reagiert mit den Stickstoffoxiden zu elementarem Stickstoff N₂ und Wasser H₂O. Die SCR-Reaktion verläuft im Wesentlichen gemäß den folgenden Reaktionsgleichungen [5]:



Hohe NO_x-Umsätze lassen sich mit Ammoniak NH₃ im Temperaturbereich von 180°C bis 450°C erreichen. Unter Berücksichtigung der vorgelagerten Hydrolysereaktion ist ein dauerhaft hoher Umsatz mit wässriger Harnstofflösung erst ab 250°C möglich [5].

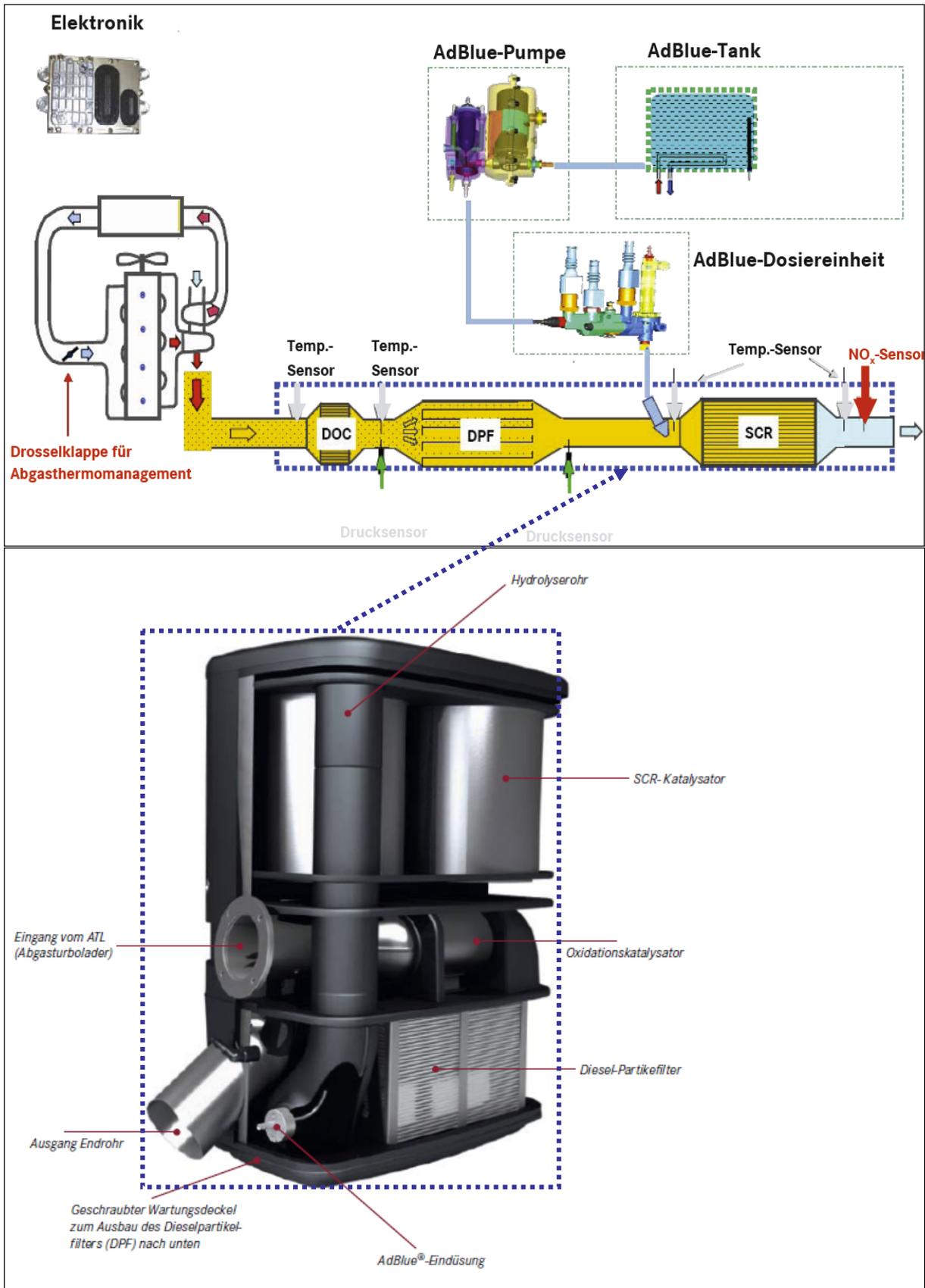


Abbildung 1: Bluetec®-System mit Partikelfilter, Aufbau, [Quelle: Evobus GmbH]

3.2.2 Abgasrückführung mit CRTec[®]-System

Ein anderes Konzept der NO_x-Minderung stellt die gekühlte, äußere Abgasrückführung dar. In der Abbildung 2 ist schematisch die Funktionsweise der Hochdruck-Abgasrückführung dargestellt.

Das Abgas wird an der Hochdruckseite der Turbine des Abgasturboladers entnommen. Die durch das pulsierende Abgas entstehenden Druckspitzen erreichen temporär Werte, die Abgas von der Hochdruckseite der Turbine durch das AGR-Modul, bestehend aus AGR-Regelventil, AGR-Kühler und Flatterventilen, in das Saugrohr des Motors strömen lassen. Rückströmungen werden durch die Flatterventile verhindert.

Die NO_x-reduzierende Wirkung der Abgasrückführung beruht auf der Senkung der Sauerstoffkonzentration der Zylinderladung durch den Zusatz von Abgas zur Frischluft. Um dennoch die Verbrennung jeder Kraftstoffeinheit zu sichern, muss die Flamme eine größere Ladungsmasse erfassen und aufheizen. Dadurch sinken Temperatur und Geschwindigkeit der Verbrennung. Wegen der exponentiellen Abhängigkeit der NO-Bildungsrate von der Temperatur ist das mit einer deutlichen Reduktion der NO_x-Emissionen verbunden. Eine weitere Temperatursenkung wird durch die größere spezifische Wärmekapazität des rückgeführten Abgases im Vergleich zu Luft hervorgerufen. Die Kühlung des zurückgeführten Abgases verstärkt diesen Effekt noch [6]. Zusätzlich wird durch die Kühlung des rückgeführten Abgases die Zylinderfüllung verbessert und die AGR-Verträglichkeit erhöht.

Die hohen Einspritzdrücke (bis zu 1.800 bar) und die Verwendung der doppelten Abgas-Turboaufladung mit Zwischenkühlung der Ladeluft bewirken bei dem untersuchten System weitere Erhöhung der AGR-Verträglichkeit und somit auch die erhöhte NO_x-Minderung über weite Bereiche des Motorkennfeldes.

Der durch die AGR reduzierte Sauerstoffgehalt wirkt sich stets vermindern auf die NO_x-Emissionen und erhöhend auf die Rußemissionen aus [5]. Um den erhöhten Rußemissionen entgegen zu wirken, wird dem Motor ein elektronisch überwachtes, geschlossenes Rußpartikelfiltersystem CRTec[®] nachgeschaltet, welches nach dem im vorigen Kapitel beschriebenen CRT[®]-Prinzip funktioniert. Abbildung 3 zeigt den Aufbau und das Überwachungsschema des CRTec[®]-Systems.

Prinzipbedingt weisen die CRT[®]-Systeme durch Verwendung eines Oxidationskatalysators eine Erhöhung des natürlichen NO₂/NO_x-Verhältnisses des Rohabgases von 5-10 % bis zu 50 % auf.

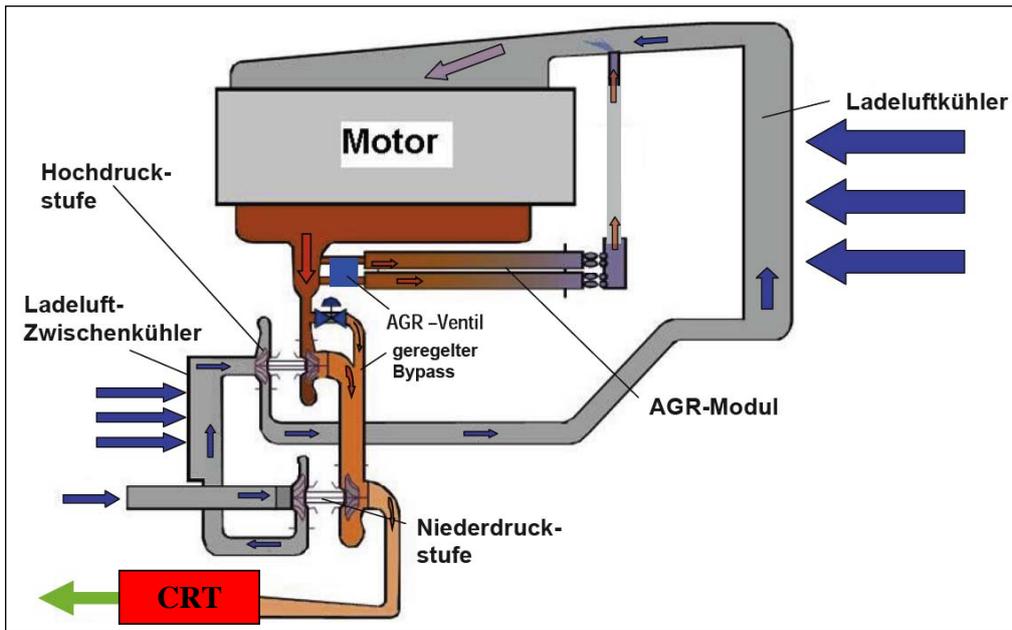


Abbildung 2: Hochdruck-AGR mit zweistufiger Turboaufladung, Schema, [Quelle: MAN AG]

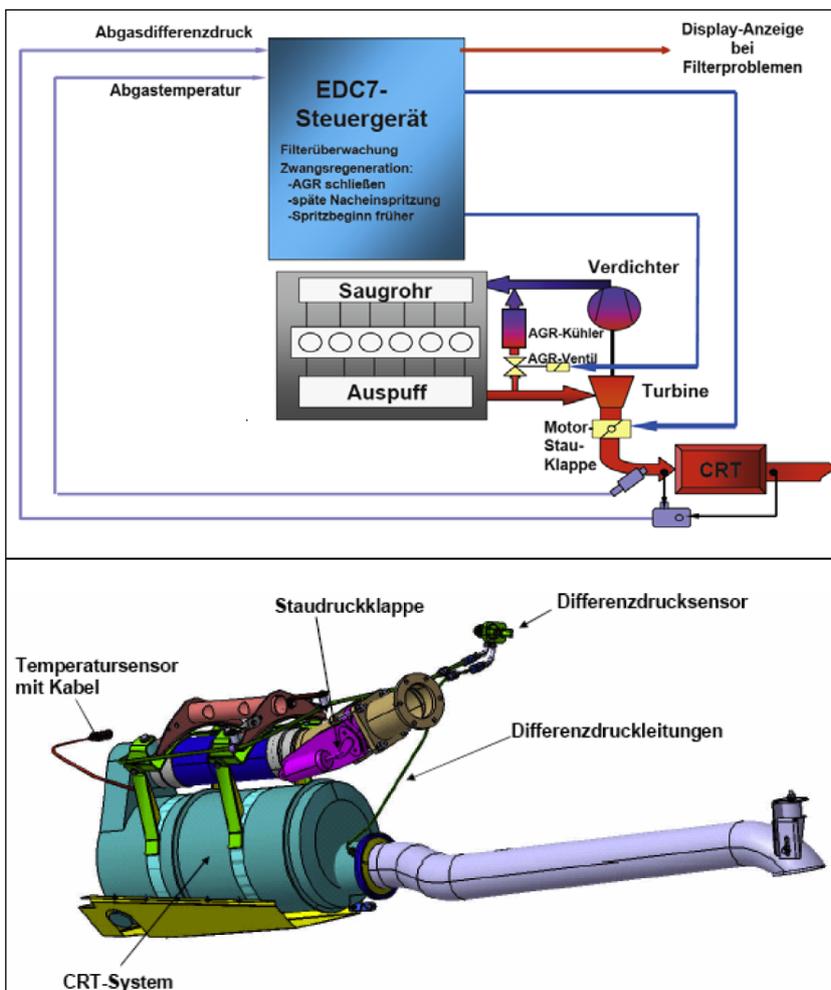


Abbildung 3: CRTEc®-System, Aufbau und Überwachungsschema, [Quelle: MAN AG]

3.3 Versuchsfahrzeuge

Bei der Auswahl des Versuchsfahrzeuges waren die Buspopulation sowie der Einsatz der Fahrzeuge auf den als repräsentativ ausgewählten Strecken zu berücksichtigen.

3.3.1 Gelenkbus Mercedes-Benz O 530 Citaro G

Beim ersten Versuchsfahrzeug handelt es sich um einen Gelenkbus Mercedes-Benz O 530 Citaro G. Abbildung 4 zeigt das Versuchsfahrzeug. In der Tabelle 3 sind die technischen Daten des Fahrzeuges zusammengefasst. Das Fahrzeug erreicht die EEV-Abgasnorm mit Hilfe von Bluetec®-System mit Partikelfilter.



Abbildung 4: Gelenkbus Mercedes-Benz O 530 Citaro G

Tabelle 3: Technische Daten Mercedes-Benz O 530 Citaro G

Fahrzeug	Gelenkbus MB O 530 Citaro G
Motortyp	OM457hLA.EEV/14
Motorleistung	220 kW bei 2000 min ⁻¹
Motordrehmoment	1250 Nm bei 1100 min ⁻¹
Getriebe	ZF HP 602 C, 6-Gang Automatgetriebe

3.3.2 Gelenkbus MAN A23 Lion's City G

Das zweite Versuchsfahrzeug war ein Gelenkbus MAN A23 Lion's City G. Das Versuchsfahrzeug ist in Abbildung 5 dargestellt. Die technischen Daten sind in der Tabelle 4 zusammengefasst. Die Reduktion der Stickstoffoxide erfolgt bei dem Fahrzeug mittels gekühlter Hochdruck-AGR, die Russpartikelreduktion mittels eines CRT[®]-Systems (CRTec[®]).



Abbildung 5: MAN A23 Lion's City G

Tabelle 4: Technische Daten MAN A23 Lion's City G

Fahrzeug	Gelenkbus MAN A23 Lion's City G
Motortyp	D 2066 LUH 43 EEV
Motorleistung	265 kW bei 1900 min ⁻¹
Motordrehmoment	1800 Nm von 1.000 min ⁻¹ bis 1.400 min ⁻¹
Getriebe	Voith DIWA [®] D 864.5E, 4-Gang Automatgetriebe

3.3.3 Solobus MAN A78 Lion's City T

Das dritte Versuchsfahrzeug war ein Solobus MAN A78 Lion's City T. Das Versuchsfahrzeug ist in Abbildung 6 dargestellt. Die technischen Daten sind in der Tabelle 5 zusammengefasst. Das Abgasnachbehandlungssystem des Solobusses entspricht dem des MAN Gelenk-busses.



Abbildung 6: MAN A78 Lion's City T

Tabelle 5: Technische Daten MAN A78 Lion's City T

Fahrzeug	Solobus MAN A78 Lion's City T
Motortyp	D 0836 LOH 60 EEV
Motorleistung	213 kW bei 2300 min ⁻¹
Motordrehmoment	1100 Nm bei 1200 min ⁻¹
Getriebe	ZF Ecolife 6 AP 1200 B, 6-Gang Automatgetriebe

3.4 Streckenauswahl

Für die Streckenauswahl wurden unterschiedliche Kriterien angesetzt. Zum einen sollten die gefahrenen Strecken die Situation in der Innenstadt von Hagen widerspiegeln, zum anderen sollten auch die topographischen Bedingungen des Hagener Busbetriebs zum Tragen kommen. Darüber hinaus sollte auch noch ein Mischbetrieb zwischen Innenstadt und Ausfallstrecken in die Außenbezirke dargestellt werden. Mit diesen Vorgaben wurden von der Hagener Straßenbahn zwei Streckenführungen ausgewählt, die den gewünschten Kriterien bestmöglich entsprechen. Mit den Versuchsfahrzeugen wurden in diesem Vorhaben auf den entsprechenden Strecken Messfahrten durchgeführt.

Um hinreichend viele Daten zu erhalten, wurden bei der Messfahrt die Linien mehrfach durchfahren. Die Tabelle 6 zeigt die Strecken mit den zugeordneten Kennziffern (Strecken ID). Die Abbildung 7 bis Abbildung 8 zeigen die jeweiligen Streckenverläufe der befahrenen Linien.

Tabelle 6: Messablauf für das Versuchsfahrzeug

ID Strecke	Linie	Startstelle	Endstelle
1	512	Bathey	Wengeberg / Penninckweg
2	512	Wengeberg / Penninckweg	Bathey
3	514	Bathey	Hördenstrasse
4	514	Hördenstrasse	Bathey

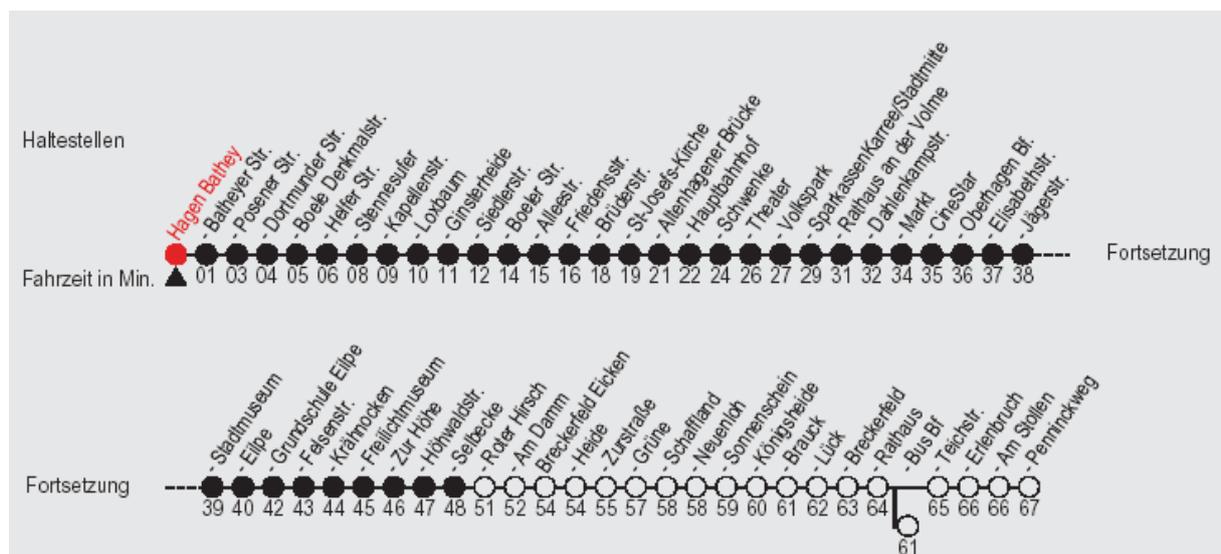


Abbildung 7: Streckenverlauf Linie 512, [Quelle: VRR AöR]

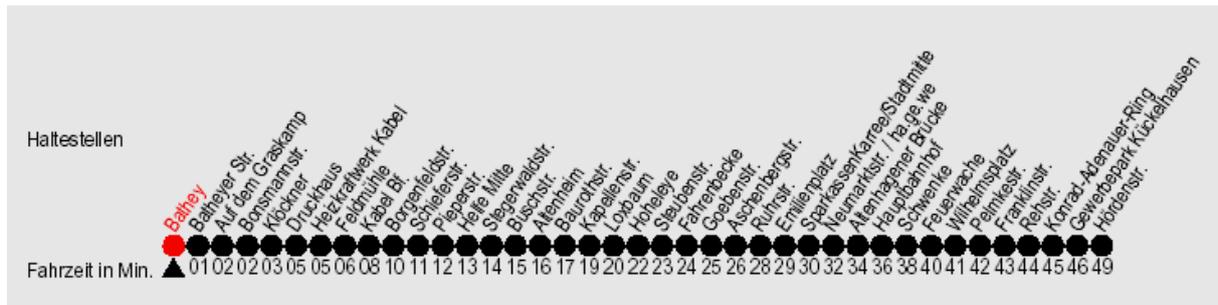


Abbildung 8: Streckenverlauf Linie 514, [Quelle: VRR AöR]

3.5 Messtechnik und Fahrzeugausrüstung

Ziel bei der Vermessung der Realemissionen von Fahrzeugen ist es, möglichst Ergebnisse zu erzeugen, die mit Messwerten aus Typprüfungen vergleichbar sind. Es ist nicht möglich, auf der Straße Typprüfbedingungen zu realisieren, so dass direkt vergleichbare Endergebnisse erzeugt werden können. Es ist aber sehr wohl möglich, Messdaten zu erhalten, die mit bestimmten Messsituationen an Prüfständen vergleichbar sind. Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass Messtechnik benutzt wird, die möglichst auf den gleichen physikalischen Prinzipien basiert wie Labormesstechnik, bzw. vergleichbare Ergebnisse liefert. Wie vorangegangene Vorhaben gezeigt haben, ist dies insbesondere für gasförmige Emissionen ein erreichter Stand der Technik.

Die an dem Fahrzeug installierte Messtechnik wurde über ein eigenes Stromaggregat, welches bei den Messfahrten im Fahrzeug mitgeführt wurde, mit elektrischer Energie versorgt. Grundsätzlich wäre zwar auch eine Verbindung mit dem elektrischen Netz des Fahrzeuges möglich, aber es wurde darauf verzichtet, um den Belastungszustand des Motors durch eine höhere Belastung der Lichtmaschine nicht zu verfälschen.

3.5.1 Messtechnik für gasförmige Komponenten

Für die Messung der gasförmigen Komponenten wurde das SEMTECH-D der Firma Sensors benutzt. Mit Ausnahme des NO_x -Analysators ist der prinzipielle Aufbau des Systems ähnlich der Messtechnik, die in den Regelwerken der EG zur Messung von Dieselmotoren im unverdünnten Abgas beschrieben ist. Hierbei gibt es einen beheizten Teil, der die Entnahmeleitung von der Messgassonde, ein beheiztes Filter und den FID (Flammen-Ionisations-Detektor) zur Bestimmung der Kohlenwasserstoffe beinhaltet. Die Beheizung auf mindestens 180°C ist notwendig, um Kondensation von Kohlenwasserstoffen zu verhindern. Ein Teilstrom des Messgases wird zur Trocknung über einen Kühler geführt und dann dem NDIR Analysator (Nicht-Dispersiver-Infrarot-Analysator) zur Bestimmung der CO - und CO_2 -Konzentration, dem elektrochemischen O_2 -Analysator und der NDUV-Messbank (Nicht-Dispersive-Ultraviolet-Messbank) zur Bestimmung von NO und NO_2 zugeführt. Die Trocknung ist notwendig, da diese Messgeräte nicht mit feuchtem Abgas betrieben werden können. Ein im Messsystem angeordneter Rechner verwaltet das Gesamtsystem und führt die Daten aus den unterschiedlichen Quellen zusammen. Tabelle 7 bis Tabelle 10 geben eine Übersicht über die Spezifikationsdaten der verwendeten Analysatoren. Neben dem eigentlichen Analysesystem können ebenfalls Daten aus einem GPS-System, einem Abgasmassensensor und diversen analogen und digitalen Eingängen gesammelt werden. Angeschlossen sind auch Sensoren zur Erfassung der atmosphärischen Daten. Zur Bedienung des Systems wird ein externer Rechner mit der entsprechenden Software über ein LAN angebunden. Abbildung 9 zeigt das Messsystem SEMTECH-D der Firma Sensors und verdeutlicht den grundsätzlichen Systemaufbau.

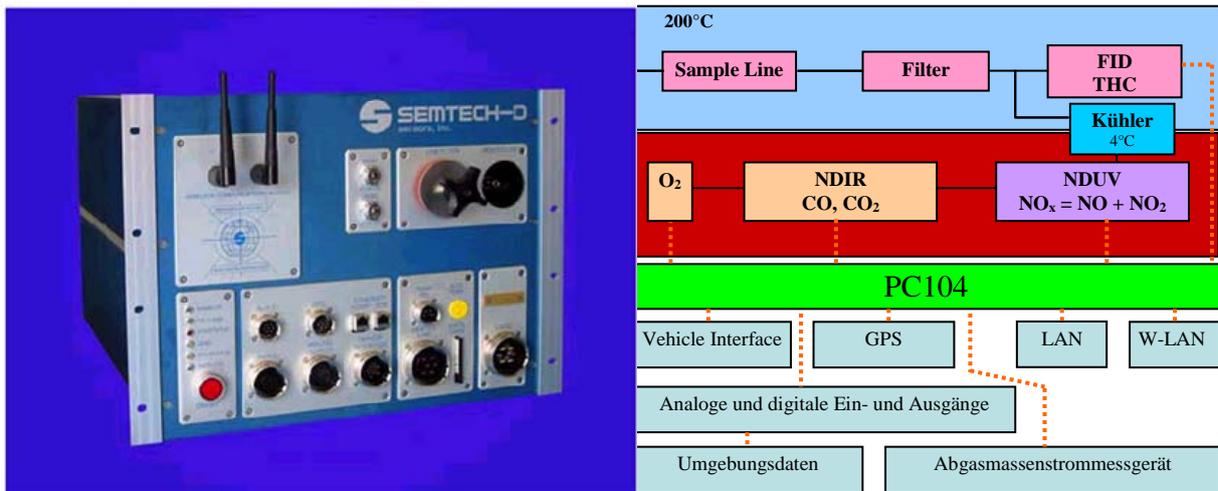


Abbildung 9: Systemaufbau SEMTECH-D, [Quelle: Sensors, Inc.]

Die zum Betrieb des Messsystems notwendigen Gase wurden im Bus mitgeführt. Da der Gasverbrauch sehr gering ist, können grundsätzlich sehr kleine Druckgasflaschen benutzt werden, die teilweise auch im SEMTECH-D Gehäuse untergebracht werden können. Für die umfangreichen Messungen dieses Projektes war es jedoch sinnvoll, größere Flaschen zu verwenden.

Da der gesamte Gasentnahmeweg sowie ein Teil des Messsystems auf 190°C beheizt werden, ist vom Zeitpunkt des Einschaltens des Gerätes bis zur Betriebsbereitschaft mit mindestens einer Stunde Aufwärm- und Vorbereitungszeit zu rechnen. Am Ende dieser Vorbereitung steht die Kalibrierung des Systems. Dies wurde bei den Messungen dieses Projektes vor jeder Messfahrt durchgeführt und bei Zwischenstopps während der Fahrt nochmals überprüft.



Abbildung 10: Raum für Messtechnik und Gasflaschenaufbewahrung

Tabelle 7: Spezifikationen des FID, [Quelle: Sensors, Inc.]

Range of measurement	0 – 100, 0 – 1,000, and 0 – 10,000 ppmC User Selectable		
	0 – 100 ppmC Range	0 – 1,000 ppmC Range	0 – 10,000 ppmC Range
Accuracy	±2.0 % of reading or ±5 ppmC whichever is greater	±2.0 % of reading or ±5 ppmC whichever is greater	±2.0 % of reading or ±25 ppmC whichever is greater
Resolution	0.1 ppmC	1.0 ppmC	1.0 ppmC
Linearity	Intercept ≤ 0.5 % of range. 0.990 ≤ Slope ≤ 1.01 SEE ≤ 1.0 % of range $r^2 \geq 0.998$		
Repeatability	±1.0 % of reading or ±2 ppmC whichever is greater	±1.0 % of reading or ±2 ppmC whichever is greater	±1.0 % of reading or ±10 ppmC whichever is greater
Noise	±2 ppmC	±2 ppmC	±10 ppmC
Span drift (over 8 hours)	±1.0 % of reading or 3 ppmC whichever is greater	±1.0 % of reading or 3 ppmC whichever is greater	±1.0 % of reading or 15 ppmC whichever is greater
Zero drift (over 2 hours)	±5 ppmC	±5 ppmC	±10 ppmC
Response time	T90 ≤ 2 seconds	T90 ≤ 2 seconds	T90 ≤ 2 seconds
Flow rate	2 lpm	2 lpm	2 lpm
Data rate	Up to 4 Hz, configurable	Up to 4 Hz, configurable	Up to 4 Hz, configurable
Operating temperature	191 °C	191 °C	191 °C

Tabelle 8: Spezifikationen der NDIR-Messbank, [Quelle: Sensors, Inc.]

Gas	CO	CO ₂	HC
Range of measurement	0 – 8 %	0 – 20 %	0 – 2,000 ppm hexane 0 – 4,000 ppm propane
Accuracy	±3 % of reading or 50 ppm, whichever is greater	±3 % of reading or ±0.1%, whichever is greater	±3 % of reading or 4.0 ppmC6, whichever is greater
Resolution	10 ppm	0.01%	1 ppmC6
Linearity	Intercept ≤ 0.5 % of range. 0.990 ≤ Slope ≤ 1.01 SEE ≤ 1.0 % of range $r^2 \geq 0.998$		
Repeatability	±2 % of reading or 20 ppm, whichever is greater	±2 % of reading or ±0.05 %, whichever is greater	±2 % of reading or 2.0 ppmC6, whichever is greater
Noise	±20 ppm	±0.02%	±1 ppmC6
Span drift (over 8 hours)	±2 % of reading or 20 ppm, whichever is greater	±2 % of reading or 0.1 %, whichever is greater	±2 % of reading or 2.0 ppmC6, whichever is greater
Zero drift (over 2 hours)	±0.005 % (50 ppm)	±0.1 %	±4 ppmC6
Response time	T90 ≤ 3 seconds	T90 ≤ 3 seconds	T90 ≤ 3 seconds
Data rate	0.833 Hz	0.833 Hz	0.833 Hz
Flow rate	2 lpm	2 lpm	2 lpm

Tabelle 9: Spezifikation der NDUV-Messbank, [Quelle: Sensors, Inc.]

Gas	NO	NO ₂
Range of measurement	0 to 2,500 ppm	0 to 500 ppm
Accuracy	±3 % of reading or 15 ppm, whichever is greater	±3 % of reading or 10 ppm, whichever is greater
Resolution Linearity	1 ppm Intercept ≤ 0.5 % of range. 0.990 ≤ Slope ≤ 1.01 SEE ≤ 1.0 % of range $r^2 \geq 0.998$	1 ppm Intercept ≤ 1.0 % of range. 0.985 ≤ Slope ≤ 1.015 SEE ≤ 1.0 % of range $r^2 \geq 0.998$
Repeatability	±2 % of reading or 5 ppm, whichever is greater	±2 % of reading or 5 ppm, whichever is greater
Noise	±2 ppm	±2 ppm
Span drift (over 8 hours)	±2 % of reading or 20 ppm, whichever is greater	±10 ppm
Zero drift (over 2 hours)	±10 ppm	±10 ppm
Response time	T90 ≤ 2 seconds	T90 ≤ 2 seconds
Data Rate	Up to 4 Hz, configurable	Up to 4 Hz, configurable
Flow rate	3 lpm	3 lpm

Tabelle 10: Spezifikation des elektrochemischen O₂-Analysators, [Quelle: Sensors, Inc.]

Range of measurement	0 to 25 %
Accuracy	±1 % oxygen
Resolution	0.1 %
Linearity	±0.5 % of reading or ±0.5 % whichever is greater
Repeatability	±0.25 % of reading or ±0.3 % oxygen whichever is greater
Noise	±0.1 % oxygen
Span drift	±1.0 % of reading or ±0.5 % Oxygen whichever is greater
Response time	T90 < 6 seconds
Flow rate	0.5 to 3 lpm

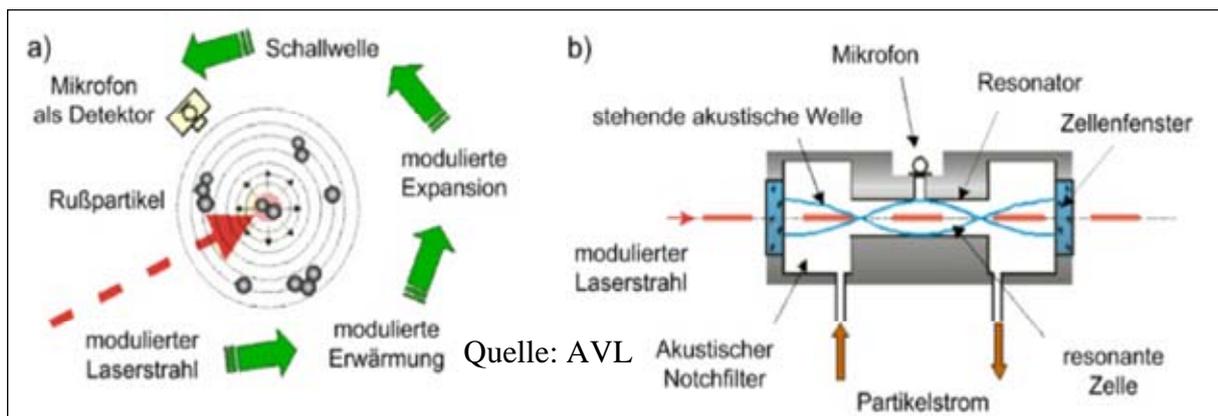
3.5.2 Partikelmesstechnik

Zur Messung der Partikelemissionen wurde AVL 483 Micro Soot Sensor der Firma AVL benutzt. Die Abbildung 11 zeigt das Messgerät. Das Messprinzip basiert auf der photoakustischen Spektroskopie. Das Messgas wird mit einem modulierten Laserlicht bestrahlt. Dadurch werden die schwarzen, stark absorbierenden Russpartikel periodisch erwärmt und wieder abgekühlt. Die daraus resultierenden Ausdehnungen und Kontraktionen des Trägergases verursachen zyklische Gasschwingungen, die mit einem empfindlichen Mikrofon detektiert werden. Partikelfreie Luft produziert kein Signal, bei russbeladener Luft ist das Signal proportional zur Konzentration des Rußes im Messgas. Da das Messgerät kohlenstoffsensitiv arbeitet, d.h. nur den elementaren Kohlenstoff detektiert, nicht aber die Gesamtheit der Partikel, sind die Messwerte nicht direkt mit den Werten aus gravimetrischen Messungen vergleichbar. In der Abbildung 12 sind das Funktionsprinzip der photo-akustischen Spektroskopie (a) und der Aufbau einer fotoakustischen Zelle (b) dargestellt. In der Tabelle 11 sind die Spezifikationen des Messgerätes aufgeführt.



Quelle: AVL

Abbildung 11: AVL 483 Micro Soot Sensor, [Quelle: AVL List GmbH]



Quelle: AVL

Abbildung 12: Funktionsprinzip und Aufbau einer fotoakustischen Messzelle, [Quelle: AVL List GmbH]

Tabelle 11: Spezifikationen des AVL 483 Micro Soot Sensors, [Quelle: AVL List GmbH]

MESSEINHEIT	
Messwert:	Rußkonzentration (mg/m ³ , µg/m ³) im verdünnten Abgas
Messbereich:	0 – 50 mg/m ³
Auflösung Anzeige:	0,001 mg/m ³
Erfassungsgrenze:	~ 5 mg/ m ³
Stellverhältnis:	1 : 5.000
Datenübertragungsrate:	Digital: 10 Hz
	Analog: 100 Hz
Anstiegszeit:	≤ 1 sec
Betriebstemperatur:	5 °C bis 43 °C
Durchfluss Sonde/Bypass:	~ 2 + 2 l/min
Schnittstellen:	RS232, Digital I/O, Analog I/O, Ethernet
Laserklasse:	Lasengerät Klasse 1
KONDITIONIEREINHEIT	
Verdünnungsverhältnis (DR):	Verstellbar von 2 – 10 und von 10 – 20
	Das tatsächliche Verdünnungsverhältnis wird mit der unten stehenden Genauigkeit angegeben
Datenübertragungsrate:	Digital: max. 5 Hz
	Analog: 50 Hz
Genauigkeit (DR Anzeige):	max. ± 3 % im Bereich von DR [2..10],
	max. ± 10 % im Bereich von DR [10..20]
Stromversorgung:	90 bis 230 V, 50/60 Hz
Druckluft:	Eingangsdruck 1 ± 0,2 bar Überdruck
Durchfluss:	> 4 l/min
Abgastemperatur:	Bis 1000 °C
Abgasgegendruck	Bis 2000 mbar
Druckpulsationen:	± 1000 mbar, aber max. 50 % des Abgasgegendrucks
Blowby-Menge	Abhängig vom Druck, ~ 20 l/min bei 1000 mbar
Stromversorgung:	90 bis 240 V AC, 50/60 Hz, 500 VA
Maße Gerät:	Messeinheit: B x H x T ~ 19" x 5HE x 530 mm
	Konditioniereinheit: B x H x T ~ 19" x 5HE x 530 mm
Gewicht Gerät:	Messeinheit: ~20 kg
	Konditioniereinheit: ~ 12 kg

3.5.3 Messung des Abgasmassenstromes

Zur Messung des Abgasmassenstromes wurde ein EFM (Electronic Flow Meter) der Firma SENSORS eingesetzt. Dieses Messgerät arbeitet nach dem Differenzdruckprinzip. Dabei wird mittels eines Prandtl'schen Staurohrs aus der Druckdifferenz an Vorder- und Rückseite der Messsonde der dynamische Staudruck und somit auch die Strömungsgeschwindigkeit ermittelt (Bernoulli-Gleichung). Mit Kenntnis der Strömungsgeschwindigkeit, der Abgasdichte und der definierten Querschnittsfläche der Abgasmessstrecke ist auch die durchströmende Abgasmasse bekannt (Kontinuitätsgleichung). Die Abgasdichte wird intern im Messgerät druck- und temperaturkorrigiert. Abbildung 13 zeigt das Gesamtsystem mit Messrohr, Schlauchbündel und Auswerteeinheit. Die Tabelle 12 gibt einen Überblick über die Spezifikationen des Messsystems.



Abbildung 13: SEMTECH-EFM, [Quelle: Sensors, Inc.]

Tabelle 12: Spezifikationen des SEMTECH-EFM, [Quelle: Sensors, Inc.]

Exhaust temperature range	Ambient to 700 °C
Exhaust temperature accuracy	± 1% of reading or ± 2 °C, whichever is greater
Flow measurement linearity	< 1.0 % full scale
Flow measurement accuracy	± 2.5 % of reading, or ± 1.5 % of full scale, whichever is greater
Warm-up time	15 minutes
Response time	T90 < 1 s
Data rate	1 – 4 Hz
Power requirements	12 VDC, 50 W
Communications	RS-232, CAN
Electronics module dimensions	LxWxH: 10,25x6,375x4,0 in (260x162x102 mm)
Electronics module weight	7.6 lbs (3.4 kg)
Flow Tube Outer Diameter	5" (127 mm)
Recommended vehicle application	Heavy-Duty Diesel 12 – 18 liters
Flow rate at back-pressure of 10 inches H2O (24.91 mbar)	1,700 SCFM (48.1 m3/min)
Flow rate at back-pressure of 15 inches H2O (37.36 mbar)	2,100 SCFM (59.5 m3/min)
Flow tube length	35" (889 mm)
Flow tube weight	12.2 lbs (5.5 kg)

3.5.4 Messung der Umgebungsdaten

Zur Bestimmung der Korrekturfaktoren bei der Auswertung der Messungen war die Kenntnis der Umgebungsdaten von großer Wichtigkeit. Temperatur und Barometerstand sowie die relative Feuchte wurden durch geeignete Sensoren erfasst. Die Anordnung der Temperatur- und Feuchtemessstelle war hierbei so gewählt, dass sie nahe an der Ansaugung der Motorverbrennungsluft lag. Es wurde ein handelsüblicher kombinierter Sensor zur Erfassung der Lufttemperatur und der relativen Feuchte benutzt und die Signale über die analogen Eingänge in das SEMTECH-D eingeschleust.

3.5.5 Messung der geodätischen Daten

Zur Messung der geodätischen Größen wurde ein GPS-System benutzt. Neben den Längen- und Breitengraden wurden die Geschwindigkeit über Grund sowie die Höhe über NN mitprotokolliert. Die Antenne für das GPS-System war auf dem Fahrzeugdach angebracht.

3.5.6 Drehmomentmessung

Um die Möglichkeit zu besitzen, leistungsbezogene Emissionsdaten zu ermitteln, bedurfte es der zeitaufgelösten Ermittlung eines Drehmomentes im Antriebsstrang. Die Applikation einer Drehmomentmessung an ein Serienfahrzeug ohne eine Änderung des Serienzustandes lässt nicht viele Möglichkeiten zu. In diesem Projekt wurde die Messung über Anbringung von Dehnmessstreifen (DMS) auf der Kardanwelle realisiert.

Die Anbringung der DMS ist ein sehr zeitaufwendiger Vorgang, der äußerste Sorgfalt und Sachkenntnis verlangt. In Abbildung 14 ist ein solcher aufgeklebter DMS im Rohzustand zu sehen. Zwei solcher Streifen wurden um jeweils 180° versetzt auf der Welle angeordnet. Die anschließende elektrische Verschaltung zu einer Wheatstone'schen Brücke, die Anbringung der Antenne und die Energieversorgung des Messsystems vervollständigen die Messanordnung. Das so applizierte System wird zum Schluss mit einem an der Welle angesetzten Hebelarm und Kalibriergewichten kalibriert (siehe Abbildung 15). Die Messdaten wurden dem SEMTECH-D als Analogwert zur Verfügung gestellt.

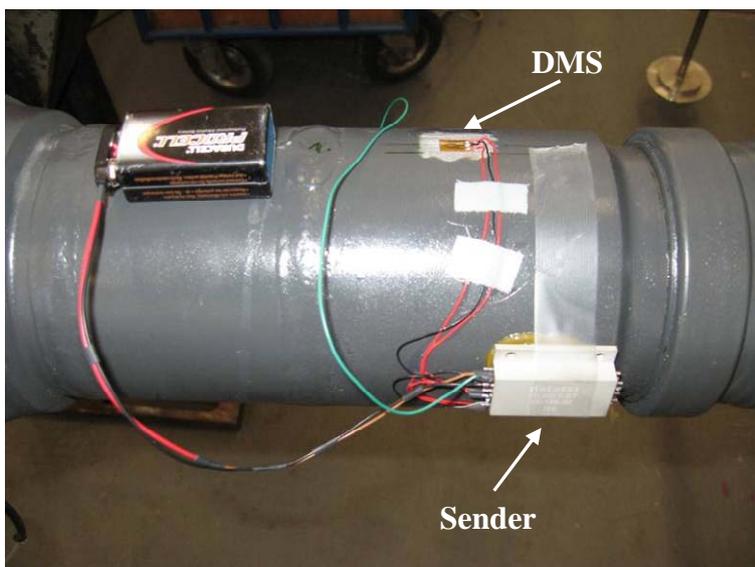


Abbildung 14: Dehnmessstreifen im Rohzustand



Abbildung 15: Kalibriereinrichtung für Kardanwellen

3.5.7 Geschwindigkeitsmessung

Neben der Geschwindigkeitsmessung über das GPS-System wurde parallel die Geschwindigkeit über ein optisches Messsystem der Firma Datron, Typ DLS 1, ermittelt. Das Signal des Systems wurde verarbeitet und über einen Analogeingang dem SEMTECH-D zugeführt. Das Geschwindigkeitssignal wurde als redundantes System zum GPS-System benutzt, da Verbindungsausfälle des GPS-Systems möglich sind und dann Fehlsignale entstehen können. Des Weiteren wird über die Geschwindigkeit, das Hinterachsübersetzungsverhältnis und die Reifendaten die Kardanwellendrehzahl ermittelt. Abbildung 16 zeigt das Messsystem am Fahrzeug.



Abbildung 16: Geschwindigkeitsmesssystem am Fahrzeug

3.5.8 Messung der Motordrehzahl

Um die ermittelten Massenemissionsergebnisse in einem motorischen Kennfeld einordnen zu können, bedurfte es noch der Messung der Motordrehzahl. Hierzu wurde in allen bisherigen Projekten keine einheitliche Messtechnik benutzt, da die Möglichkeiten des messtechnischen Abgriffes der Drehzahl an den Fahrzeugen unterschiedlich sind. Das jeweils am Fahrzeug gefundene Drehzahlsignal wird mit einem geeigneten Messumformer (f/U-Umformer) in ein Analogsignal umgeformt und an das SEMTECH-D weitergegeben.

3.5.9 Messung weiterer Größen

Um den Belastungszustand des Motors und die Betriebszustände des Abgasnachbehandlungssystems besser beschreiben zu können, wurden zusätzliche physikalische Größen gemessen und mit einem Datalogger aufgezeichnet. Soweit die Verhältnisse an den Testfahrzeugen es zuließen, wurden folgende Größen aufgezeichnet:

- Ladedruck
- Ladelufttemperatur
- Abgastemperatur vor und nach dem Abgasnachbehandlungssystem
- Differenzdruck über dem Partikelfilter

Abbildung 17 zeigt den Datalogger für zusätzliche Messsignale. In der Abbildung 18 sind die Messstellen für Druck und Temperatur vor und nach dem Russpartikelfilter dargestellt. Die Abbildung 19 zeigt die Messstelle für Ladedruck und Ladelufttemperatur.

Um die zeitliche Synchronisation der o.g. Größen mit den von Semtech aufgezeichneten Daten durchführen zu können, wurden mehrere Signale, z.B. Geschwindigkeit, Motordrehzahl, Drehmoment, von beiden Systemen (Semtech und Datalogger) parallel aufgezeichnet.

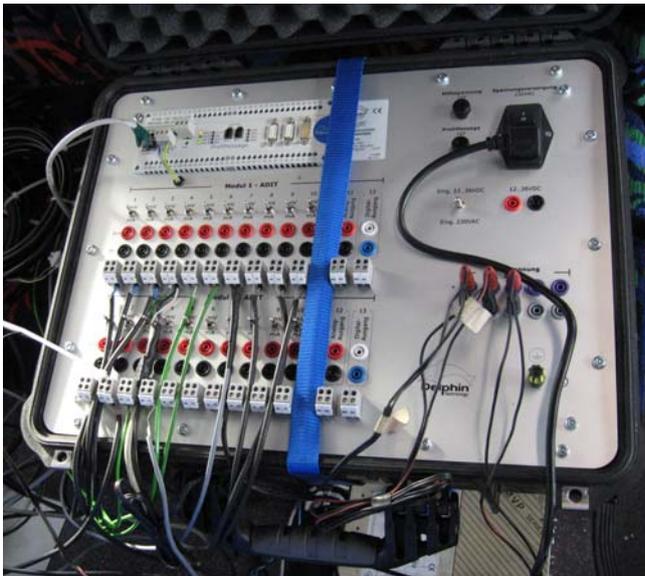


Abbildung 17: Datalogger für zusätzliche Messsignale

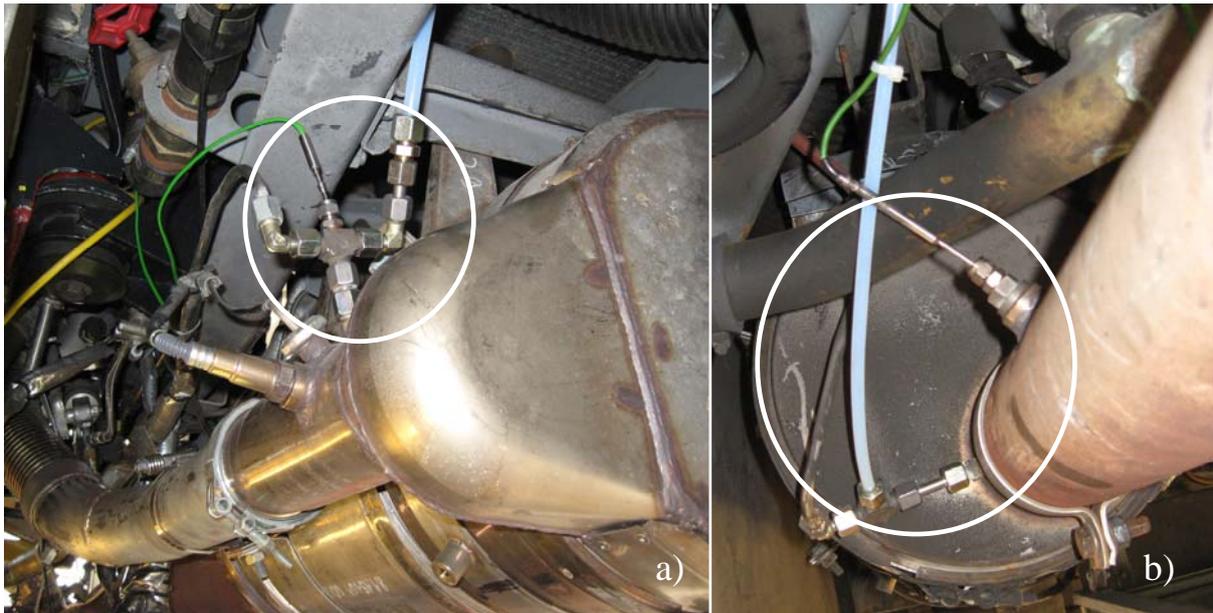


Abbildung 18: Druck- und Temperaturmessung vor DPF (a) und nach DPF (b)

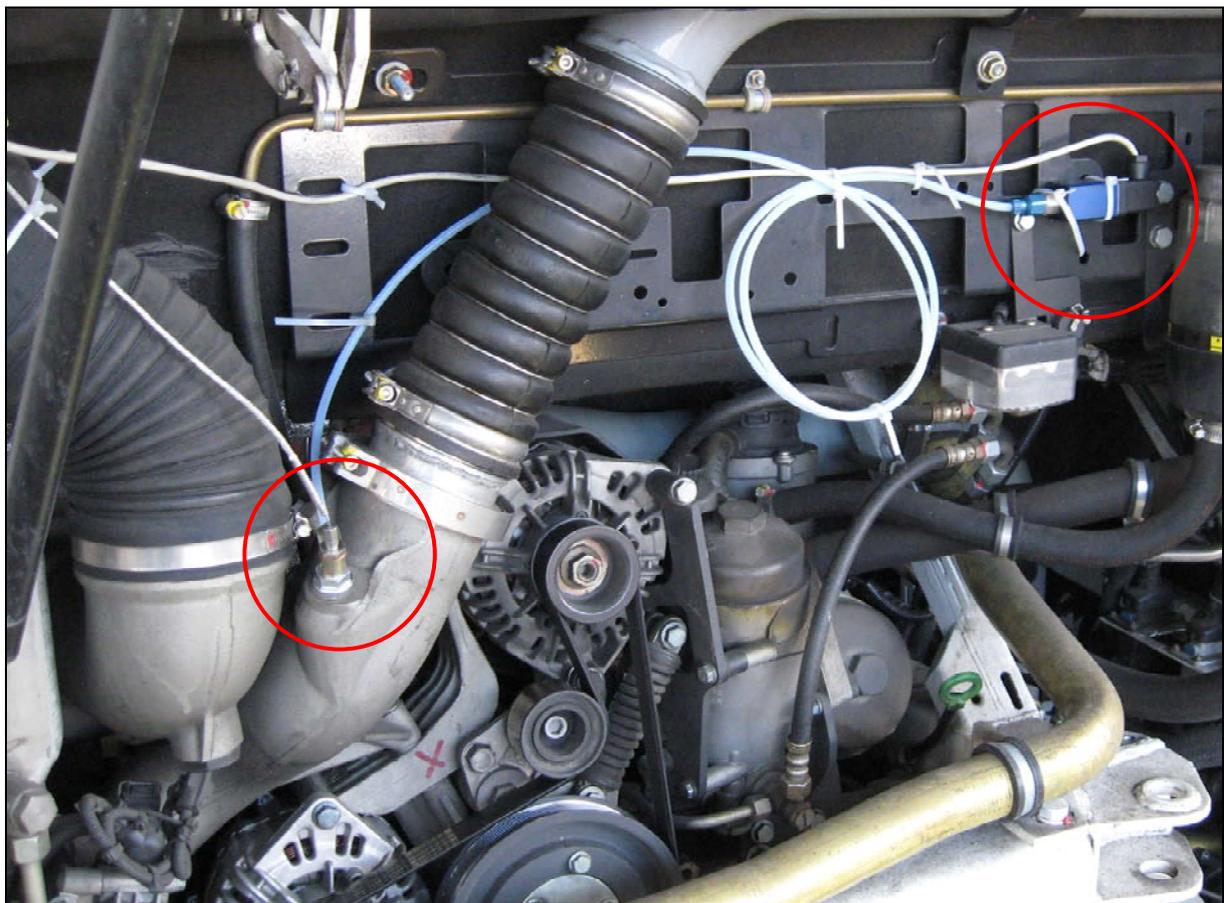


Abbildung 19: Ladedruck- und Ladelufttemperaturmessung

4 Ergebnisse

4.1 Ergebnisse im Realbetrieb

4.1.1 Allgemeine Vorgehensweise

Die aufgezeichneten Messdaten wurden in eine Access-Datenbank überführt und als erstes auf die Plausibilität überprüft. Dazu wurden die Zeitverläufe von Geschwindigkeit, Motordrehzahl, Drehmoment und Höhenprofil für jede Fahrt graphisch dargestellt und manuell auf Fehler überprüft. Die fehlerhaften Bereiche wurden markiert und für die weitere Auswertung nicht berücksichtigt. Abbildung 20 zeigt beispielhaft die zeitlichen Signalverläufe eines Fahrtabschnittes. Ähnliche Vorgehensweise wurde auch für die gasförmigen Emissionen (CO, CO₂, HC, NO_x) angewandt.

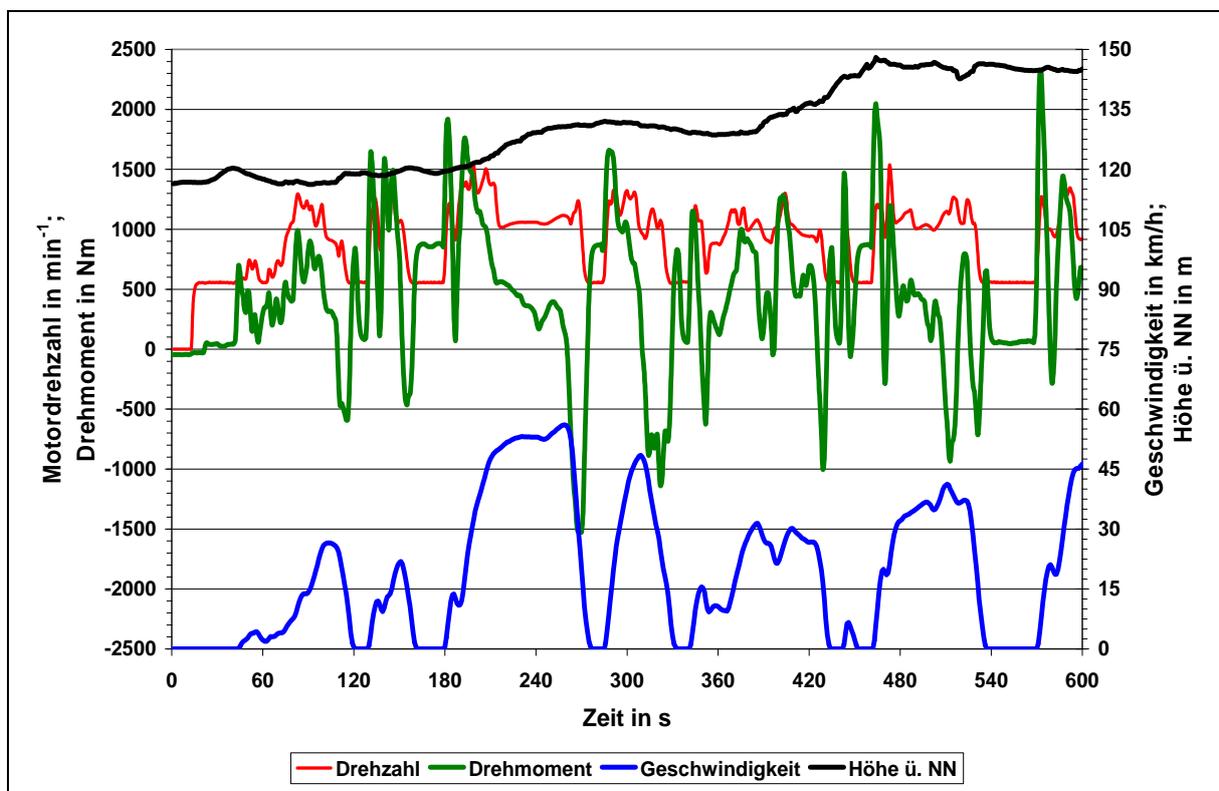


Abbildung 20: Exemplarischer Zeitverlauf

Um die relativen Motorbelastungen bestimmen zu können, muss für jede gemessene Motordrehzahl die entsprechende Motorleistung bei Vollast bekannt sein. Dazu wurden die für jeden Motor vorliegenden Leistungswerte der Vollastkurve mittels einer kubischen Spline-Interpolation angenähert. Für die weitere Auswertung wurden zwei normierte Leistungswerte bestimmt:

- relative Leistung P_{rel}
- normierte Leistung P_{norm}

Die relative Leistung P_{rel} ist das Verhältnis der aktuell gemessenen Leistung P_{akt} zur Vollastleistung bei der entsprechenden Motordrehzahl $P_{max}(n)$:

$$P_{rel} = \frac{P_{akt}}{P_{max}(n)}$$

Die normierte Leistung P_{norm} ist das Verhältnis der aktuell gemessenen Leistung P_{akt} zur Nennleistung des Motors P_{nenn} :

$$P_{norm} = \frac{P_{akt}}{P_{nenn}}$$

Die Werte der beiden normierten Leistungen wurden in 5 %-Schritten klassiert.

Die gemessenen Motordrehzahlen wurden zunächst zur Plausibilisierung in Drehzahl-Geschwindigkeitsdiagrammen dargestellt (Abbildung 21).

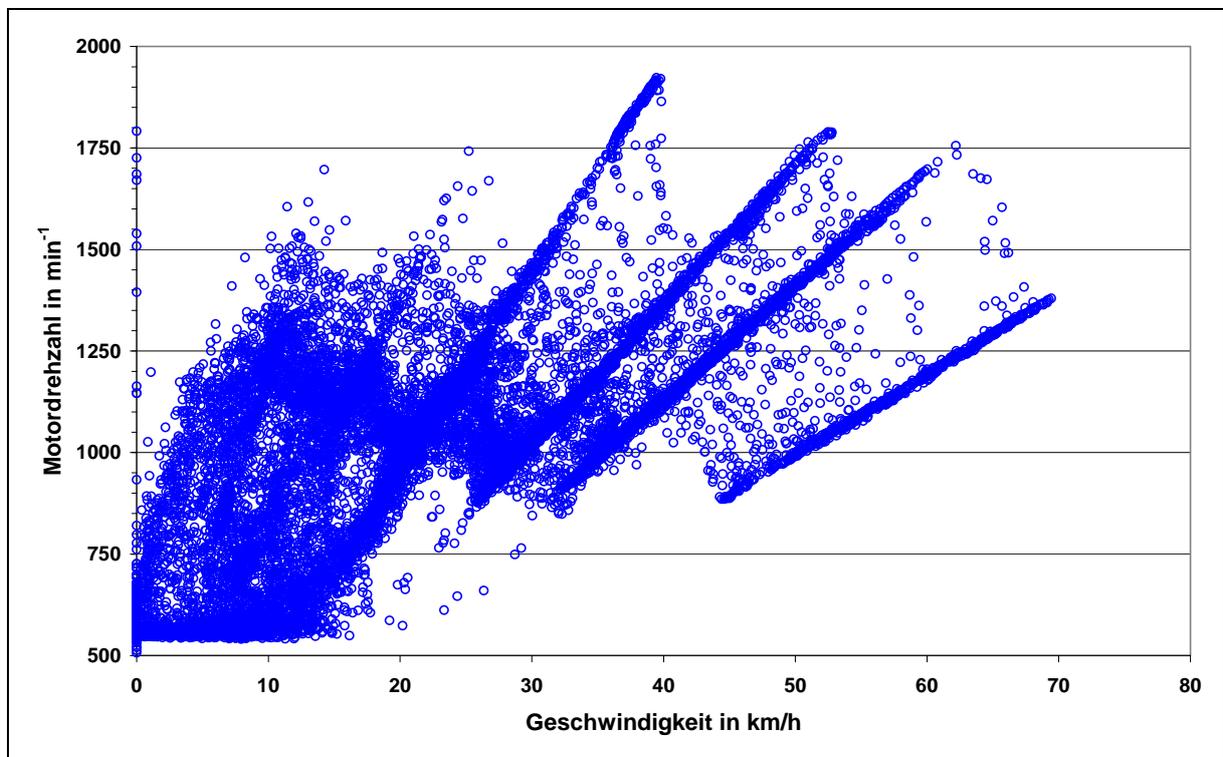


Abbildung 21: Drehzahl / Geschwindigkeitsdiagramm

Für die Auswertung wurde ebenfalls eine normierte, relative Drehzahl n_{rel} bestimmt:

$$n_{rel} = \frac{(n - n_{idle})}{(s - n_{idle})}$$

Dabei ist:

n : aktuell gemessene Motordrehzahl

n_{idle} : Leerlaufdrehzahl

s : Nennleistungsdrehzahl

Die Werte der normierten Drehzahl wurden ebenfalls in 5 %-Schritten klassiert.

Die nachfolgenden Tabellen geben einen Überblick über die Ergebnisse aller Messungen. Es sind jeweils streckenbezogene und leistungsbezogene Werte dargestellt. Der direkte Vergleich von leistungsbezogenen Ergebnissen aus Straßenfahrten und Prüfstandsvermessungen ist nur sehr bedingt möglich und mit Unsicherheiten behaftet, da z.B. die vorschriftskonforme Ermittlung der Motorleistung im Fahrzeug nicht möglich ist. Hierfür müssten zeitaufgelöst die Leistungsaufnahmen aller Hilfsantriebe, wie Lüfter, Kompressor, Lenkhilfepumpe usw. bekannt sein. Aus diesen Gründen wird auf die grafische Darstellung eines direkten Vergleiches der Ergebnisse verzichtet, da die Gefahr von Fehlinterpretationen sehr groß ist. Während der Vermessung des Mercedes-Benz Gelenkbusses mit SCR-System stand der AVL Micro Soot Sensor wegen eines Defektes nicht zur Verfügung. Aus diesem Grund fehlen in den nachfolgenden Tabellen die Russemissionswerte (PM) für das o.g. Fahrzeug.

Die späteren Darstellungen beschränken sich auf die NO_x-Emissionen, da die oxidierbaren Komponenten HC und CO sowie die Partikelemission aufgrund des eingesetzten Oxidationskatalysators bzw. des Partikelfilters eine absolut untergeordnete Bedeutung haben.

4.1.2 Streckenbezogene Ergebnisse

Tabelle 13: Ergebnisse Gelenkbus MB O 530 Citaro G [g/km], SCR

Fahrzeug	Fahrt	Strecke	Dauer	mittl. Geschwindigkeit	Emissionen, [g/km]							NO ₂ /NO _x -Verhältnis	NO ₂ /NO _x -Verhältnis (Mittelwert)
					NO _x	NO	NO ₂	CO ₂	HC	CO	PM	%	%
			s	km/h									
1	1	1	3971	22,4	15,921	14,277	1,644	1616,920	0,000	2,425		10,329	11,901
1	2	2	4518	20,5	14,931	13,359	1,572	1100,477	0,013	1,172		10,530	
1	3	3	3297	16,7	16,443	14,351	2,092	1576,736	0,019	1,389		12,724	
1	4	4	2716	18,4	15,952	13,712	2,239	1260,775	0,001	0,885		14,038	
1	5	3	3182	17,4	14,314	12,617	1,697	1506,012	0,012	1,518		11,857	
1	6	4	2811	17,8	16,202	14,269	1,933	1416,965	0,012	1,411		11,930	
Minimum					14,314	12,617	1,572	1100,477	0,000	0,885		10,329	
Maximum					16,443	14,351	2,239	1616,920	0,019	2,425		14,038	
Mittelwert					15,627	13,764	1,863	1412,981	0,009	1,467		11,901	
Standardabweichung					0,824	0,685	0,268	198,949	0,008	0,521		1,385	
Varianz					0,679	0,469	0,072	39580,577	0,000	0,271		1,920	
Variationskoeffizient					5,3%	5,0%	14,4%	14,1%	80,4%	35,5%		11,6%	

Tabelle 14: Ergebnisse Gelenkbus MAN A23 Lion's City G[g/km], AGR/CRT

Fahrzeug	Fahrt	Strecke	Dauer	mittl. Geschwindigkeit	Emissionen, [g/km]							NO ₂ /NO _x -Verhältnis	NO ₂ /NO _x -Verhältnis (Mittelwert)
					NO _x	NO	NO ₂	CO ₂	HC	CO	PM	%	%
			s	km/h									
2	1	1	4409	20,4	10,356	6,170	4,187	1732,747	0,039	1,526	6,990E-04	40,426	43,240
2	2	2	4300	21,8	6,392	3,330	2,585	1144,739	0,012	0,735	4,647E-04	40,439	
2	3	3	3116	17,9	9,375	5,339	4,036	1643,420	0,005	1,184	7,463E-04	43,046	
2	4	4	2853	17,7	8,413	4,716	3,697	1465,283	0,016	0,831	6,558E-04	43,945	
2	5	3	3457	16,1	9,137	4,875	4,263	1637,872	0,016	0,919	7,579E-04	46,649	
2	6	4	2821	17,8	7,480	4,119	3,361	1411,111	0,012	0,795	6,144E-04	44,936	
Minimum					6,392	3,330	2,585	1144,739	0,005	0,735	4,647E-04	40,426	
Maximum					10,356	6,170	4,263	1732,747	0,039	1,526	7,579E-04	46,649	
Mittelwert					8,526	4,758	3,688	1505,862	0,017	0,998	6,564E-04	43,240	
Standardabweichung					1,422	0,979	0,636	213,944	0,012	0,303	1,084E-04	2,482	
Varianz					2,021	0,959	0,405	45771,918	0,000	0,092	1,174E-08	6,159	
Variationskoeffizient					16,67%	20,58%	17,25%	14,21%	70,27%	30,32%	16,51%	5,74%	

Tabelle 15: Ergebnisse Solobus MAN A78 Lion's City T [g/km], AGR/CRT

Fahrzeug	Fahrt	Strecke	Dauer	mittl. Geschwindigkeit	Emissionen, [g/km]							NO ₂ /NO _x -Verhältnis	NO ₂ /NO _x -Verhältnis (Mittelwert)
					NO _x	NO	NO ₂	CO ₂	HC	CO	PM		
			s	km/h								%	%
3	1	1	4312	20,9	5,763	3,182	2,581	1365,746	0,026	1,262	5,641E-04	44,785	46,622
3	2	2	4560	20,5	4,104	2,118	1,986	861,928	0,008	0,493	3,996E-04	48,388	
3	3	3	3131	17,8	6,186	3,447	2,739	1200,772	0,015	0,572	5,470E-04	44,277	
3	4	4	3001	16,9	5,697	3,058	2,639	1175,423	0,008	0,708	5,549E-04	46,319	
3	5	3	3175	17,6	5,846	2,925	2,920	1195,521	0,011	1,005	3,319E-04	49,957	
3	6	4	3080	16,5	5,788	3,125	2,663	1204,584	0,017	0,602	5,379E-04	46,007	
Minimum					4,104	2,118	1,986	861,928	0,008	0,493	3,319E-04	44,277	
Maximum					6,186	3,447	2,920	1365,746	0,026	1,262	5,641E-04	49,957	
Mittelwert					5,564	2,976	2,588	1167,329	0,014	0,774	4,892E-04	46,622	
Standardabweichung					0,736	0,454	0,318	164,928	0,007	0,298	9,838E-05	2,172	
Varianz					0,541	0,206	0,101	27201,238	0,000	0,089	9,678E-09	4,717	
Variationskoeffizient					13,22%	15,27%	12,27%	14,13%	48,06%	38,54%	20,11%	4,66%	

Die Abbildung 22 zeigt die kumulierten Geschwindigkeitsverteilungen der drei Testfahrzeuge auf einzelnen Strecken und den Mittelwert der kumulierten Geschwindigkeitsverteilung für alle Strecken. Hierbei ist zu beobachten, dass die Strecken 1 und 2 deutlich schneller sind als die Strecken 3 und 4. Bei der Betrachtung des Mittelwertes der kumulierten Geschwindigkeitsverteilung ist festzustellen, dass die Busse ca. 78 % der Betriebszeit langsamer als 30 km/h fahren, der Stillstandsanteil beträgt 26,5 %. Siehe hierzu auch die Abbildung 23.

Betrachtet man für jedes Fahrzeug die einzelnen Streckenverläufe und stellt die zeitlichen Anteile von Beschleunigung [**acceleration**], Verzögerung [**deceleration**], Stillstand [**stop**] und gleichmäßiger Fahrt [**cruise**] dar, ergeben sich Abbildung 24 bis Abbildung 26.

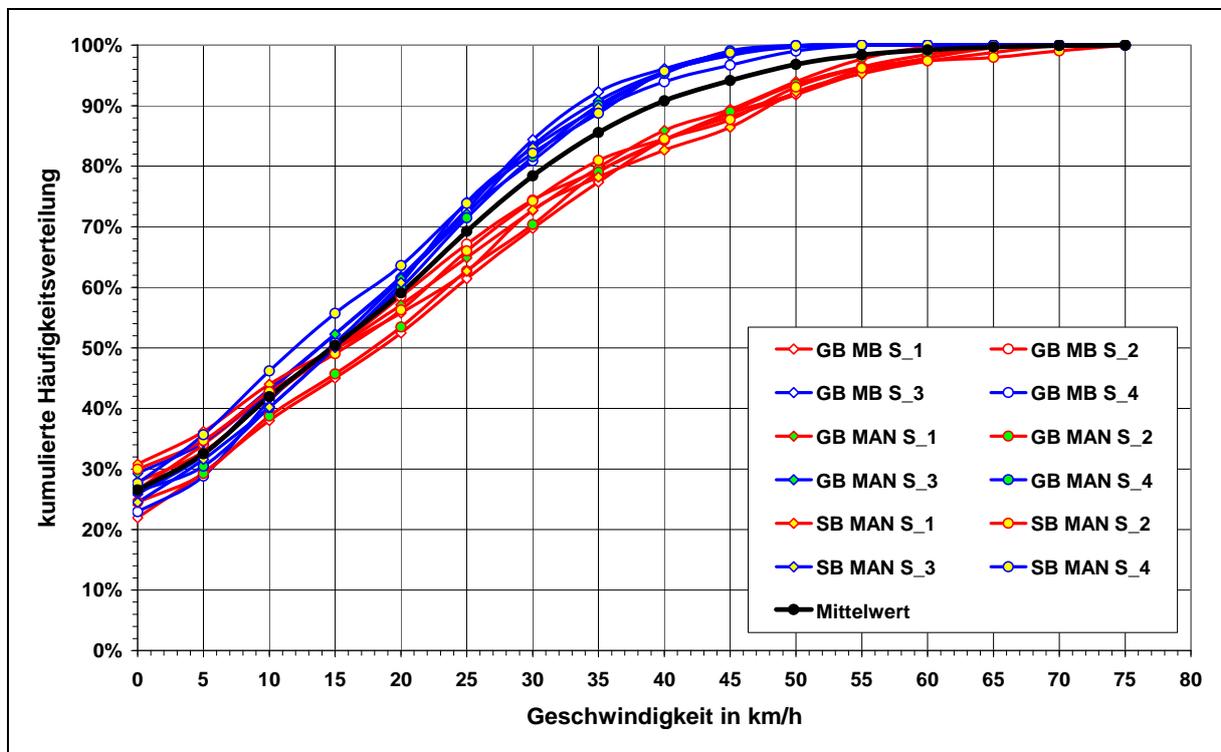


Abbildung 22: Kumulierte Geschwindigkeitshäufigkeiten

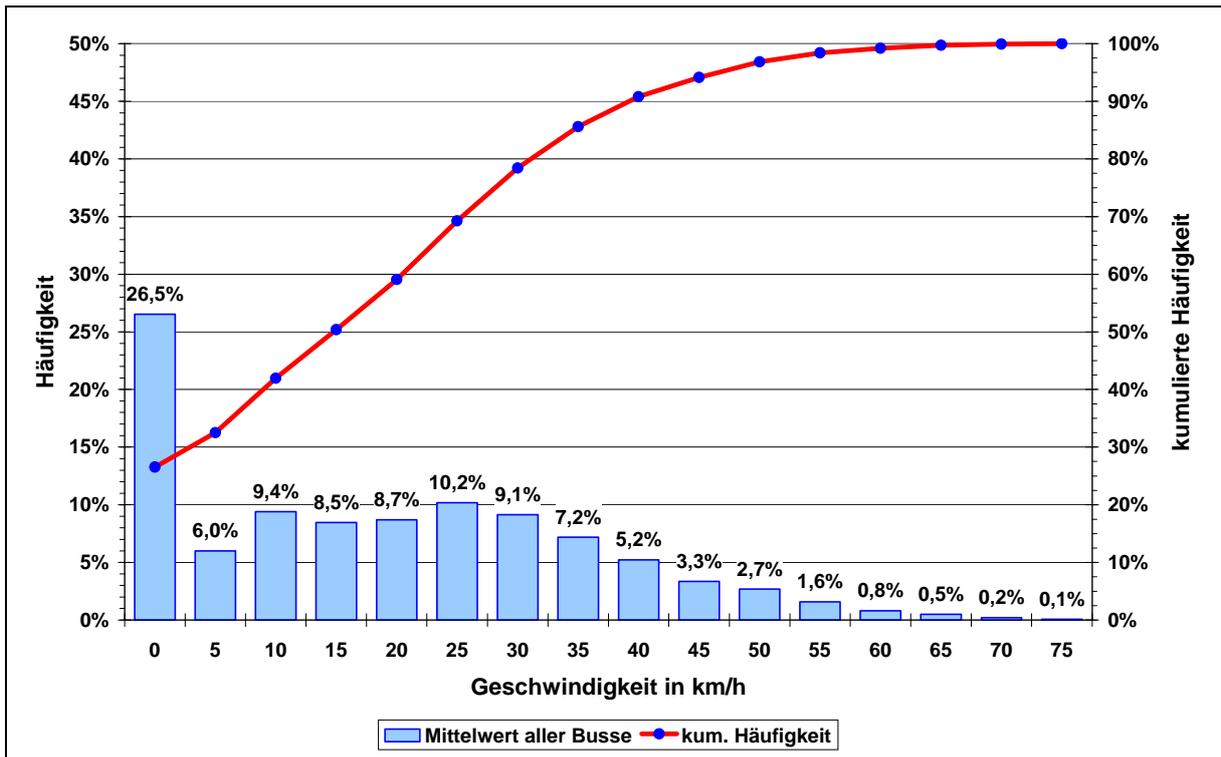


Abbildung 23: Geschwindigkeitshäufigkeiten für alle Busse

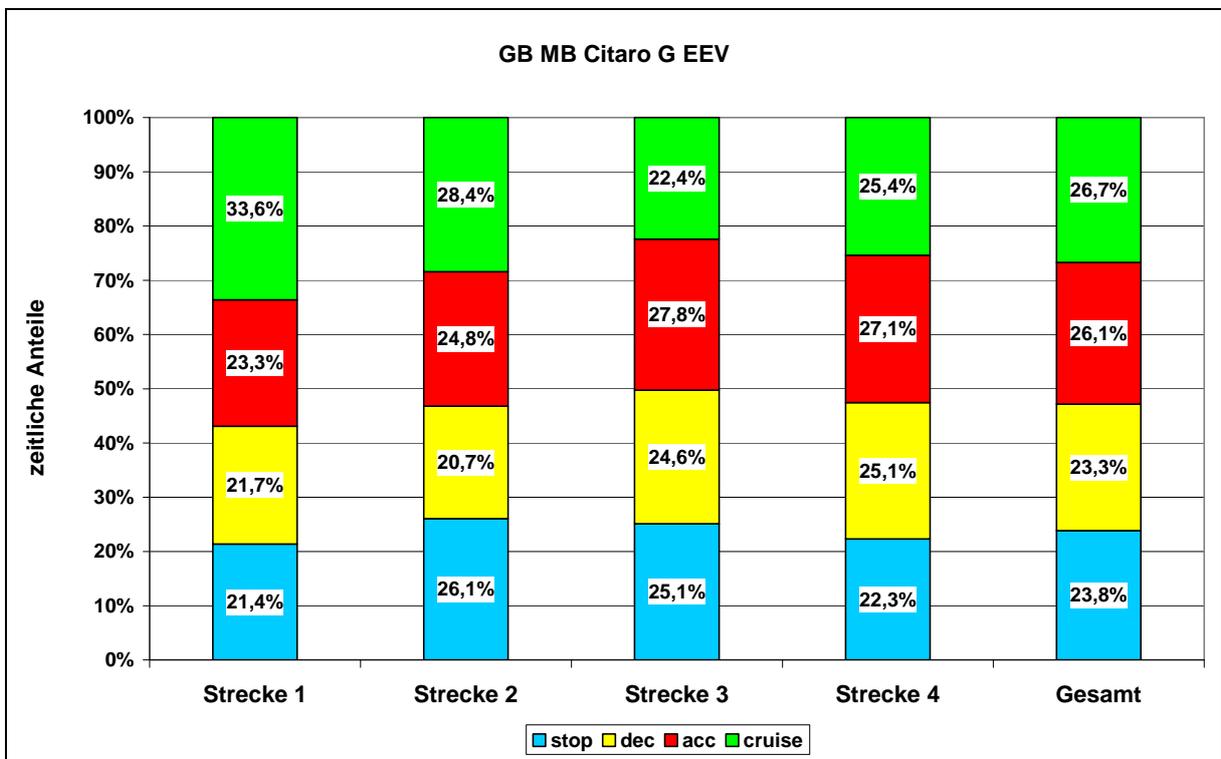


Abbildung 24: Zeitliche Anteile einzelner Betriebsphasen Gelenkbus MB, SCR

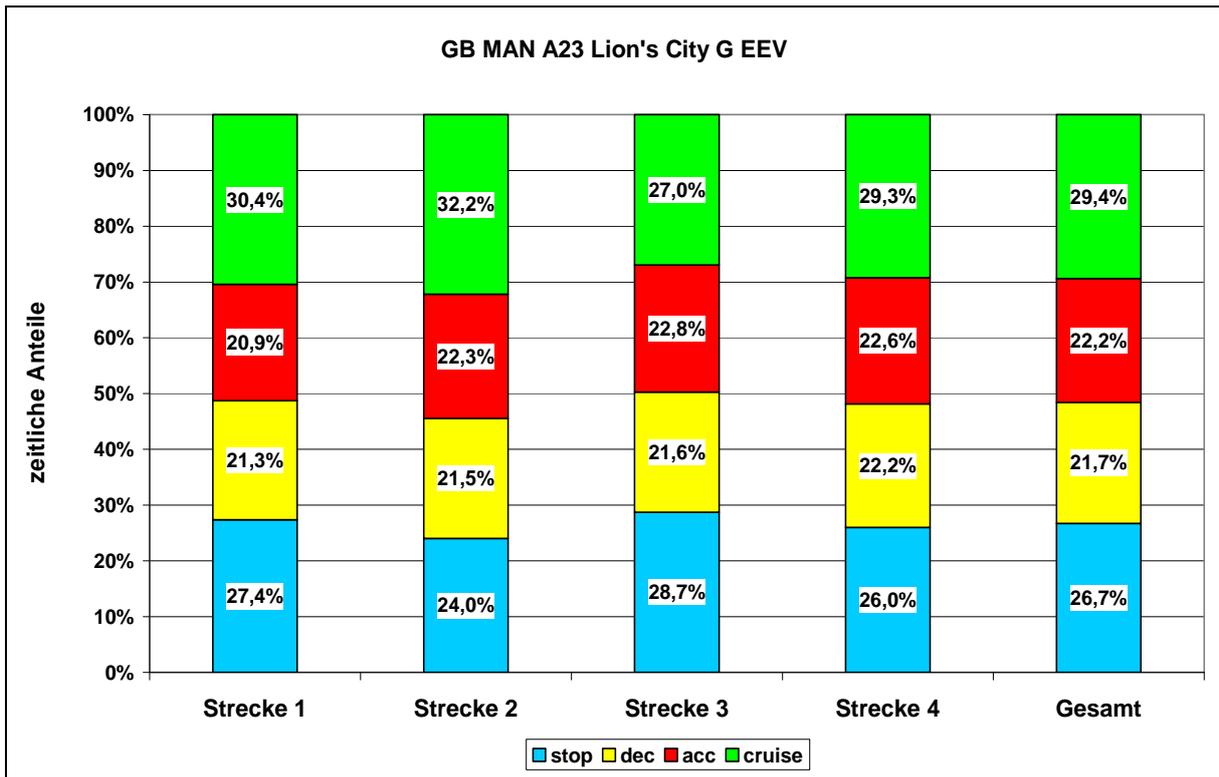


Abbildung 25: Zeitliche Anteile einzelner Betriebsphasen Gelenkbus MAN, AGR / CRT

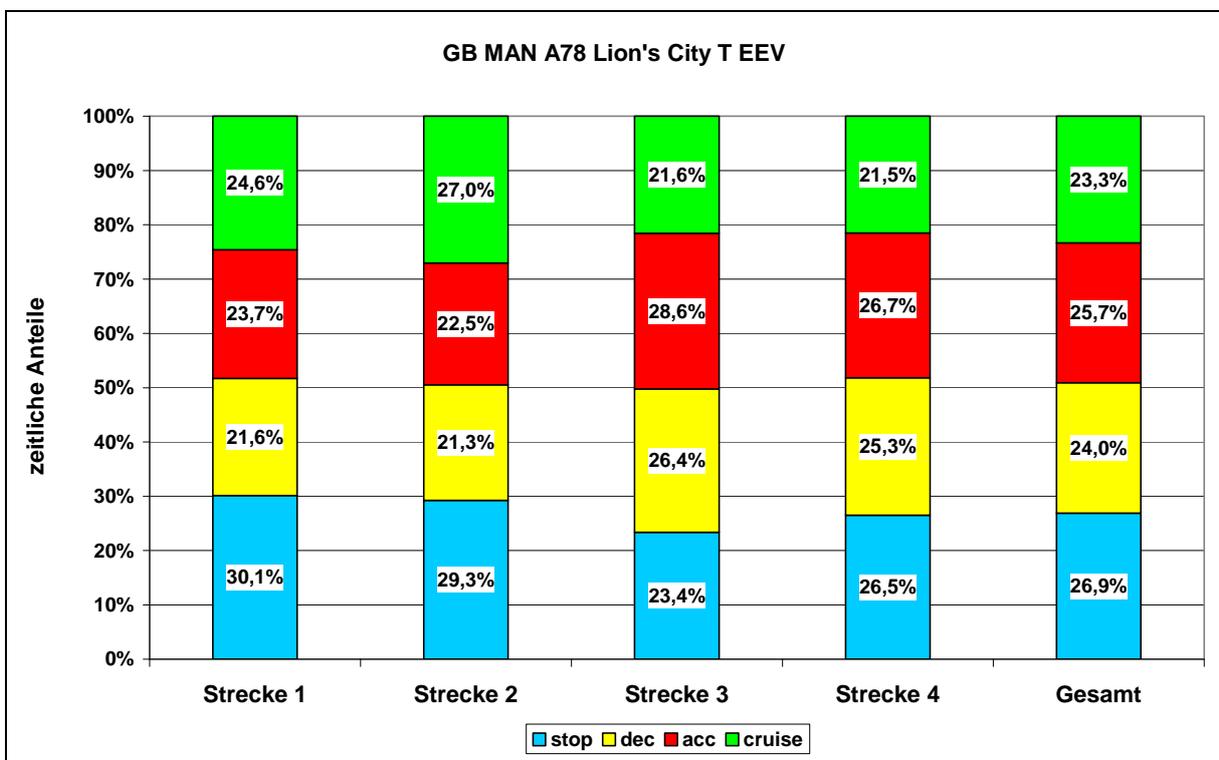


Abbildung 26: Zeitliche Anteile einzelner Betriebsphasen Solobus MAN, AGR / CRT

Ordnet man nun den einzelnen Betriebsphasen die NO_x-Massenemission zu, ergeben sich Abbildung 27 bis Abbildung 29.

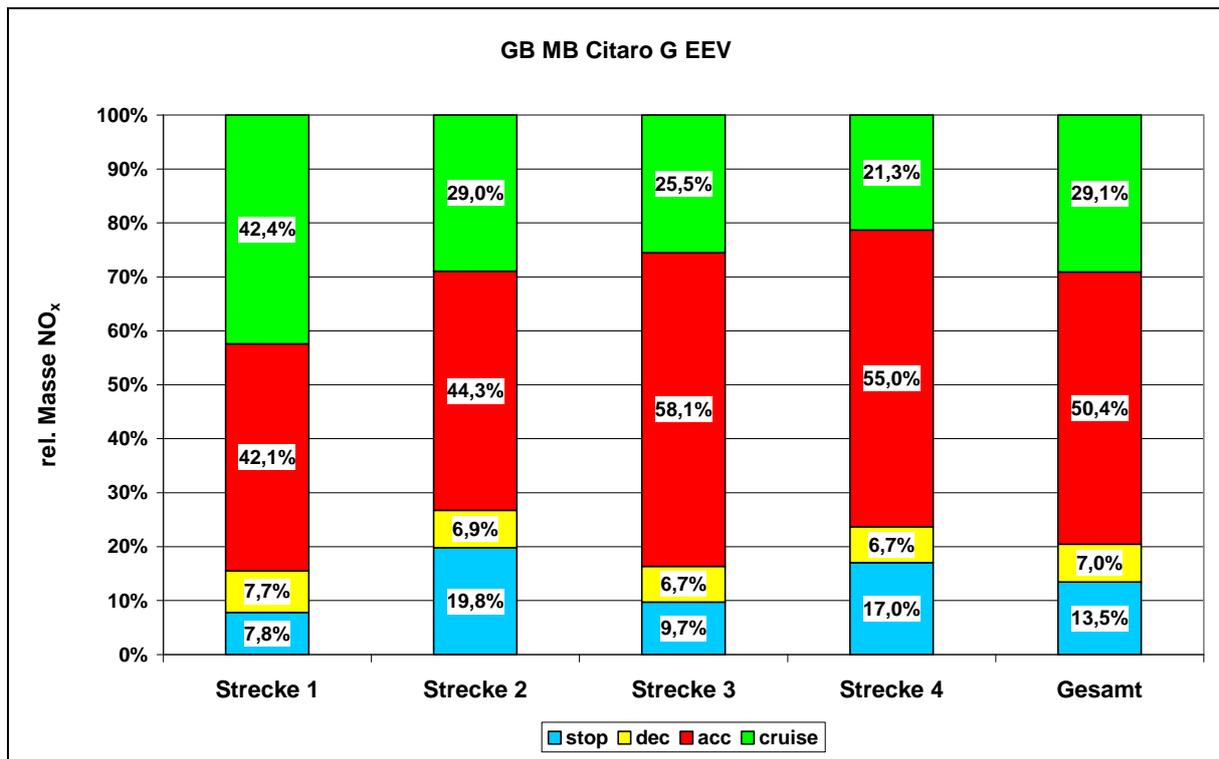


Abbildung 27: Relative NO_x-Massenemissionen Gelenkbus MB, SCR

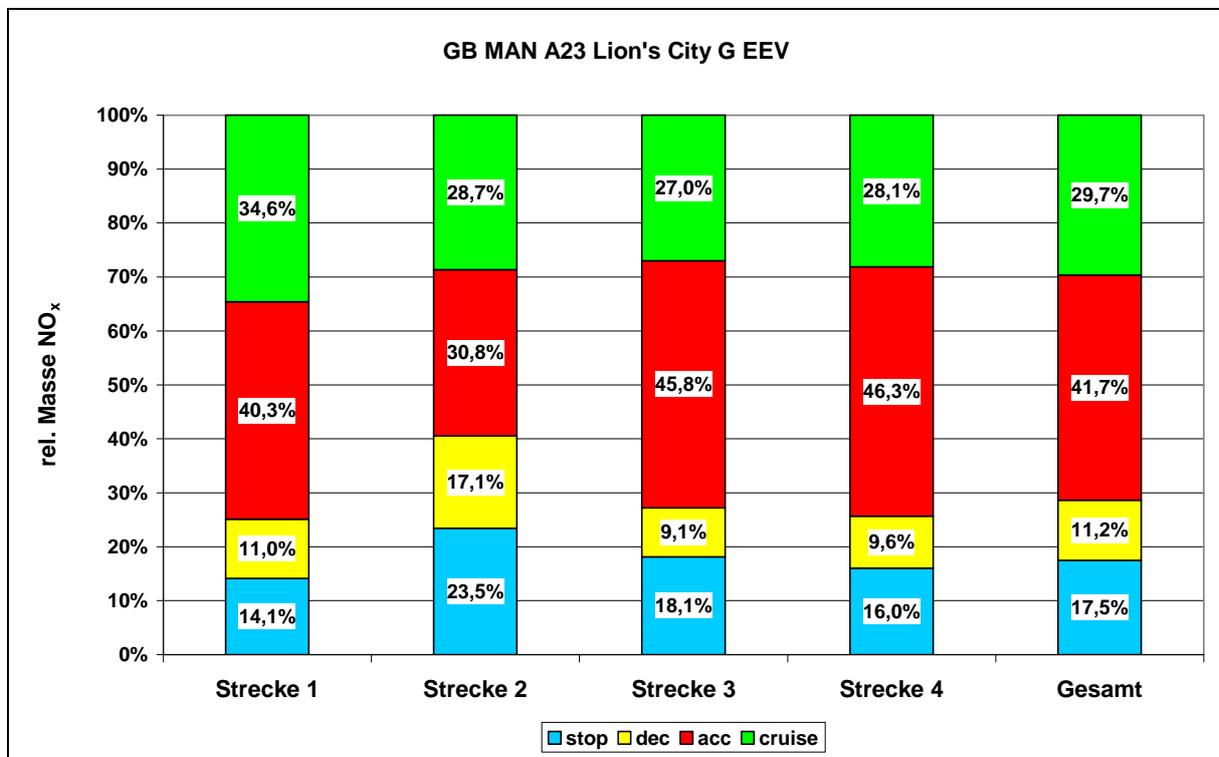


Abbildung 28: Relative NO_x-Massenemissionen Gelenkbus MAN, AGR / CRT

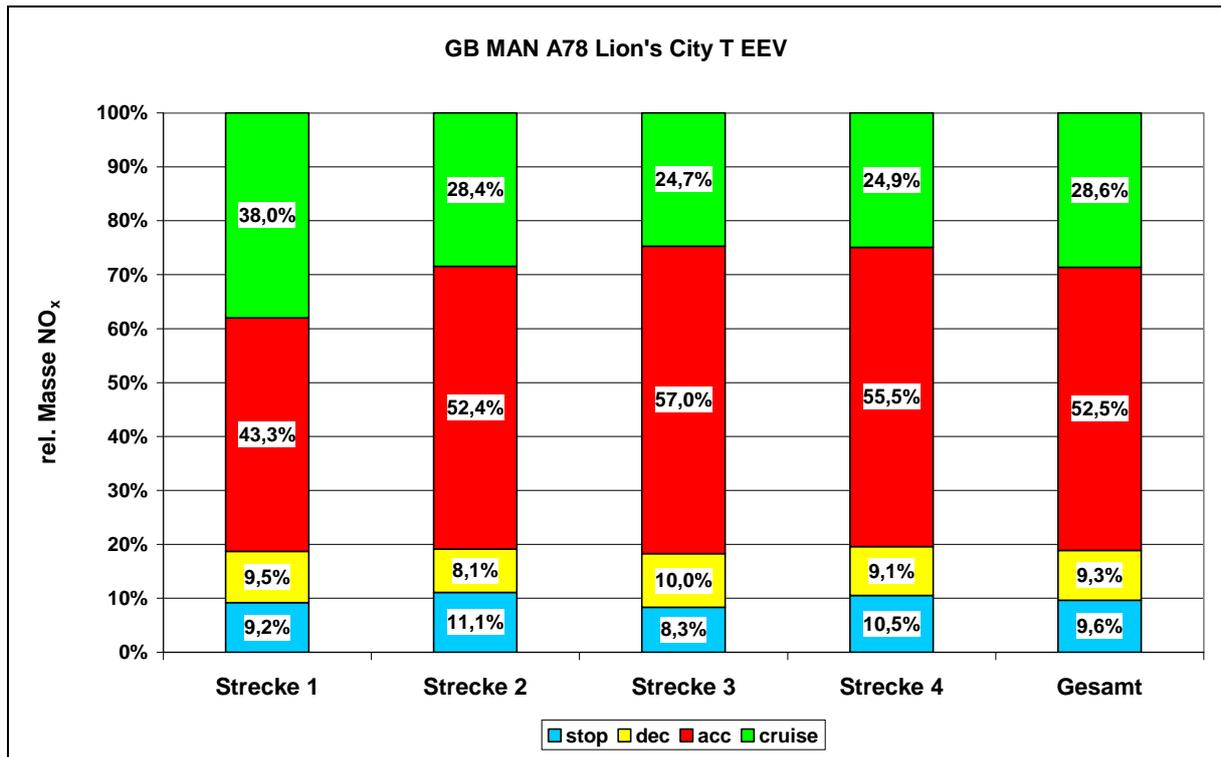


Abbildung 29: Relative NO_x-Massenemissionen Solobus MAN, AGR / CRT

4.1.3 Leistungsbezogene Ergebnisse

Tabelle 16: Ergebnisse Gelenkbus MB O 530 Citaro G [g/kWh], SCR

Fahrzeug	Fahrt	Strecke	Dauer	mittl. Geschwindigkeit	Emissionen, [g/kWh]							NO ₂ /NO _x -Verhältnis	NO ₂ /NO _x -Verhältnis (Mittelwert)
					s	km/h	NO _x	NO	NO ₂	CO ₂	HC		
1	1	1	3971	22,4	8,122	7,283	0,839	824,830	3,154E-06	1,237		10,329	11,901
1	2	2	4518	20,5	13,286	11,887	1,399	979,221	1,186E-02	1,043		10,530	
1	3	3	3297	16,7	10,047	8,769	1,278	963,439	1,159E-02	0,849		12,724	
1	4	4	2716	18,4	10,509	9,034	1,475	830,636	3,380E-04	0,583		14,038	
1	5	3	3182	17,4	8,751	7,713	1,038	920,702	7,267E-03	0,928		11,857	
1	6	4	2811	17,8	11,325	9,974	1,351	990,501	8,166E-03	0,986		11,930	
Minimum					5,448	3,190	2,202	911,500	2,845E-03	0,586		0,000	
Maximum					13,286	11,887	1,475	990,501	1,186E-02	1,237		14,038	
Mittelwert					10,340	9,110	1,230	918,221	6,537E-03	0,938		11,901	
Standardabweichung					1,855	1,665	0,243	74,012	5,257E-03	0,218		1,385	
Varianz					3,442	2,774	0,059	5477,841	2,763E-05	0,047		1,920	
Variationskoeffizient					17,9%	18,3%	19,8%	8,1%	80,4%	23,2%		11,6%	

Tabelle 17: Ergebnisse Gelenkbus MAN A23 Lion's City G [g/kWh], AGR / CRT

Fahrzeug	Fahrt	Strecke	Dauer	mittl. Geschwindigkeit	Emissionen, [g/kWh]							NO ₂ /NO _x -Verhältnis	NO ₂ /NO _x -Verhältnis (Mittelwert)
					s	km/h	NO _x	NO	NO ₂	CO ₂	HC		
2	1	1	4409	20,4	5,448	3,246	2,202	911,500	2,036E-02	0,803	3,677E-04	40,426	43,240
2	2	2	4300	21,8	7,250	3,777	2,932	1298,390	1,337E-02	0,833	5,271E-04	40,439	
2	3	3	3116	17,9	5,601	3,190	2,411	981,853	2,845E-03	0,707	4,459E-04	43,046	
2	4	4	2853	17,7	5,935	3,327	2,608	1033,741	1,108E-02	0,586	4,627E-04	43,945	
2	5	3	3457	16,1	6,223	3,320	2,903	1115,486	1,074E-02	0,626	5,162E-04	46,649	
2	6	4	2821	17,8	6,031	3,321	2,710	1137,661	9,894E-03	0,641	4,954E-04	44,936	
Minimum					5,448	3,190	2,202	911,500	2,845E-03	0,586	3,677E-04	40,426	
Maximum					7,250	3,777	2,932	1298,390	2,036E-02	0,833	5,271E-04	46,649	
Mittelwert					6,081	3,363	2,628	1079,772	1,138E-02	0,699	4,691E-04	43,240	
Standardabweichung					0,639	0,210	0,284	135,973	5,661E-03	0,100	5,854E-05	2,482	
Varianz					0,408	0,044	0,081	18488,560	3,205E-05	0,010	3,427E-09	6,159	
Variationskoeffizient					10,51%	6,24%	10,81%	12,59%	49,73%	14,33%	12,48%	5,74%	

Tabelle 18: Ergebnisse Solobus MAN A78 Lion's City T [g/kWh], AGR / CRT

Fahrzeug	Fahrt	Strecke	Dauer	mittl. Geschwindigkeit	Emissionen, [g/kWh]							NO ₂ /NO _x -Verhältnis	NO ₂ /NO _x -Verhältnis (Mittelwert)
					s	km/h	NO _x	NO	NO ₂	CO ₂	HC		
3	1	1	4312	20,9	3,684	2,034	1,650	873,137	1,656E-02	0,807	3,606E-04	44,785	46,622
3	2	2	4560	20,5	4,316	2,227	2,088	906,479	8,703E-03	0,519	4,202E-04	48,388	
3	3	3	3131	17,8	4,394	2,449	1,946	852,990	1,047E-02	0,407	3,885E-04	44,277	
3	4	4	3001	16,9	4,327	2,323	2,004	892,729	5,769E-03	0,538	4,214E-04	46,319	
3	5	3	3175	17,6	4,146	2,075	2,071	847,937	8,110E-03	0,713	2,354E-04	49,957	
3	6	4	3080	16,5	4,393	2,372	2,021	914,172	1,296E-02	0,457	4,082E-04	46,007	
Minimum					5,448	3,190	2,202	911,500	2,845E-03	0,586	3,677E-04	40,426	
Maximum					4,394	2,449	2,088	914,172	1,656E-02	0,807	4,214E-04	49,957	
Mittelwert					4,210	2,247	1,963	881,241	1,043E-02	0,573	3,724E-04	46,622	
Standardabweichung					0,273	0,166	0,162	27,664	3,850E-03	0,155	7,090E-05	2,172	
Varianz					0,075	0,027	0,026	765,271	1,482E-05	0,024	5,027E-09	4,717	
Variationskoeffizient					6,48%	7,37%	8,24%	3,14%	36,91%	26,97%	19,04%	4,66%	

4.1.4 Geschwindigkeitsabhängige Darstellung der NO_x-Emissionen

Abbildung 30 zeigt die NO_x-Emissionen in [g/km] bezogen auf die mittlere Geschwindigkeit für alle Fahrten, zusätzlich sind die mittleren Abgastemperaturen eingezeichnet.

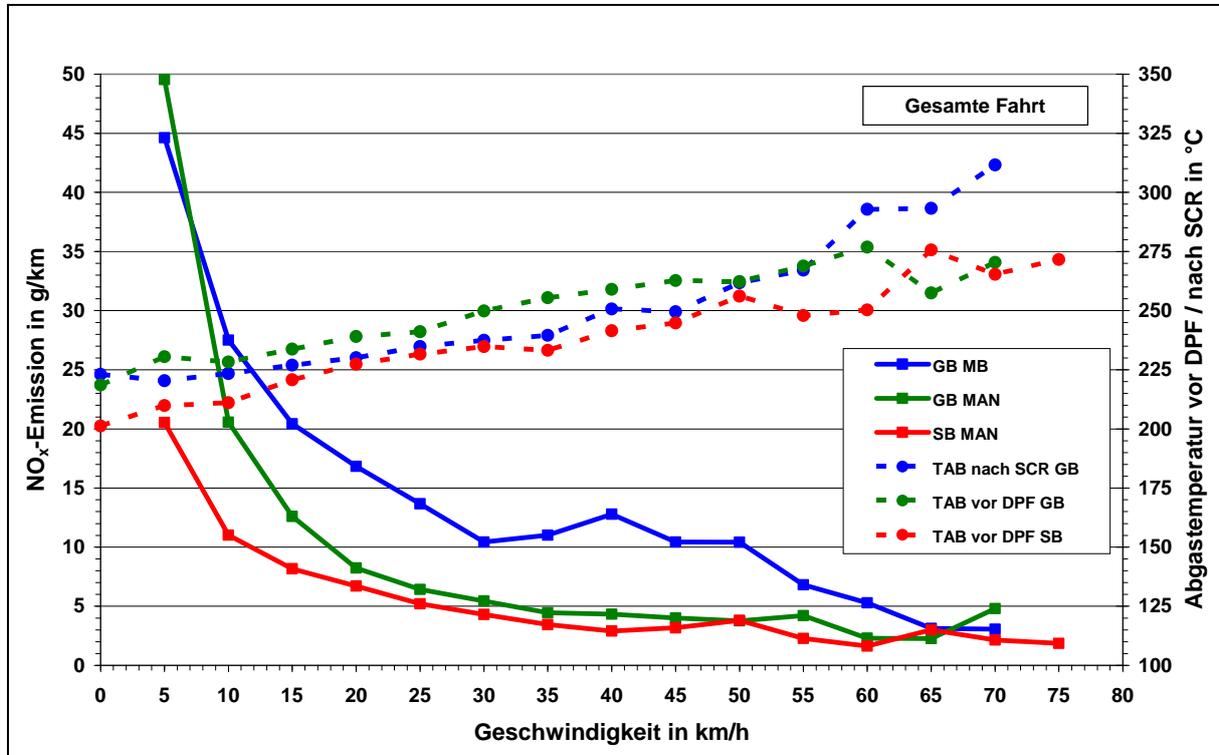


Abbildung 30: NO_x-Emissionen in [g/km] in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit

Es ist der gleiche grundsätzliche Verlauf zu erkennen, der auch schon in vorangegangenen Projekten des LANUV festgestellt wurde. Die zu höheren Geschwindigkeiten niedriger werdenden Emissionen sind über den größeren Leistungsbedarf, die damit höher werdenden Temperaturen im System und dem somit höheren Wirkungsgrad erklärbar. Auffällig sind die deutlich höheren NO_x-Emissionen des Mercedes Gelenkbusses mit SCR-System im Vergleich zu den beiden anderen Bussen mit AGR-Technik. Ursache hierfür sind die verkehrstechnischen Besonderheiten des Busbetriebes in Hagen. Die Busse fahren sehr oft und sehr langsam durch Fußgängerzonen und verkehrsberuhigte Gebiete (Zone 30) (vgl. hierzu Abbildung 22 und Abbildung 23). Dadurch kühlt die Abgasanlage aus, die Abgastemperatur am SCR-Katalysator sinkt unter die Temperaturgrenze für die Harnstoffeindüsung (ca. 220°C) ab. Folglich erfolgt keine Harnstoffeindüsung und der Motor emittiert seine NO_x-Rohemission, die bei dem verbrauchsoptimierten Motor relativ hoch sind. Wie in Kapitel 3.2.1 bereits beschrieben, erfolgt ein dauerhaft hoher NO_x-Umsatz mit wässriger Harnstofflösung erst ab einer Abgastemperatur von 250°C. Betrachtet man in der Abbildung 31 die kumulierte Häufigkeitsverteilung der Abgastemperatur bei dem Gelenkbus mit SCR-Technik, ist zu beobachten, dass die Abgastemperatur nach SCR-Katalysator rund 78 % der Betriebszeit unterhalb 250°C liegt.

Die leichten Unterschiede bei den NO_x-Emissionen der beiden AGR-Fahrzeuge sind mit dem höheren Leistungsbedarf des Gelenkbusses erklärbar.

Die Abbildung 32 und die Abbildung 33 zeigen die Häufigkeitsverteilungen der Abgastemperatur für die beiden AGR-Busse.

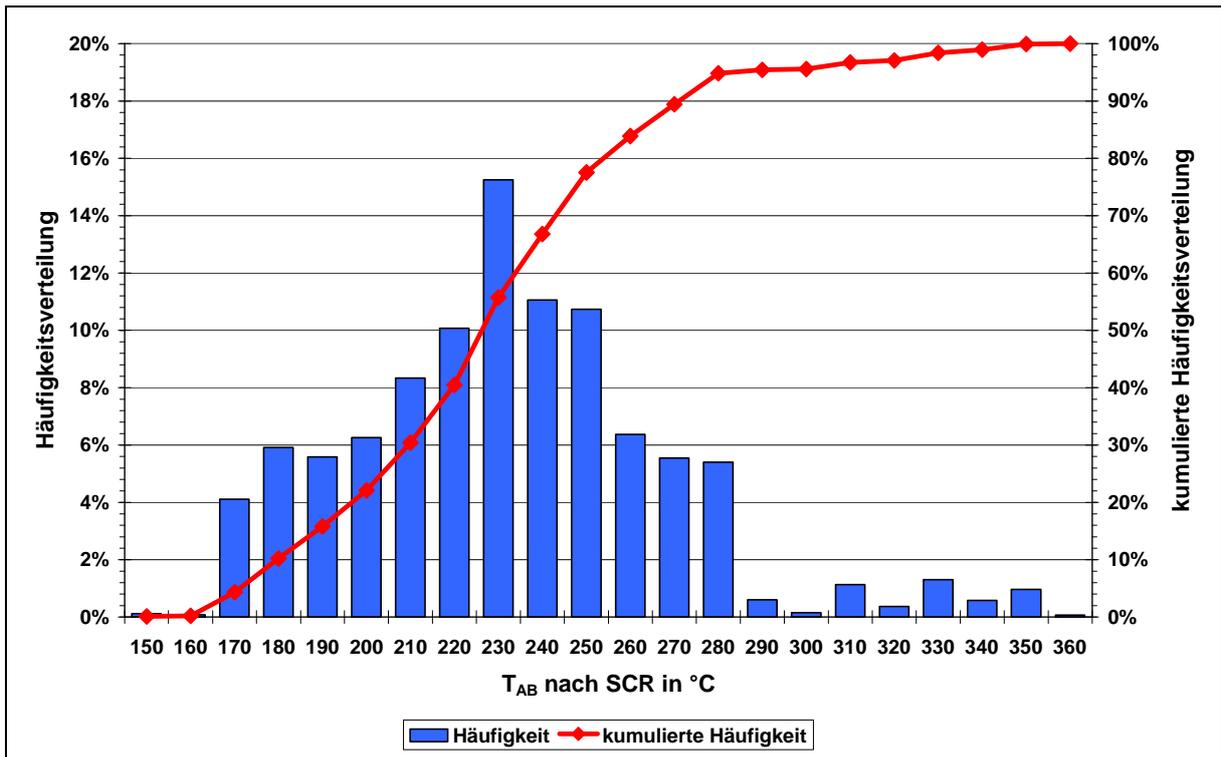


Abbildung 31: Häufigkeitsverteilung Abgastemperatur Gelenkbus MB, SCR

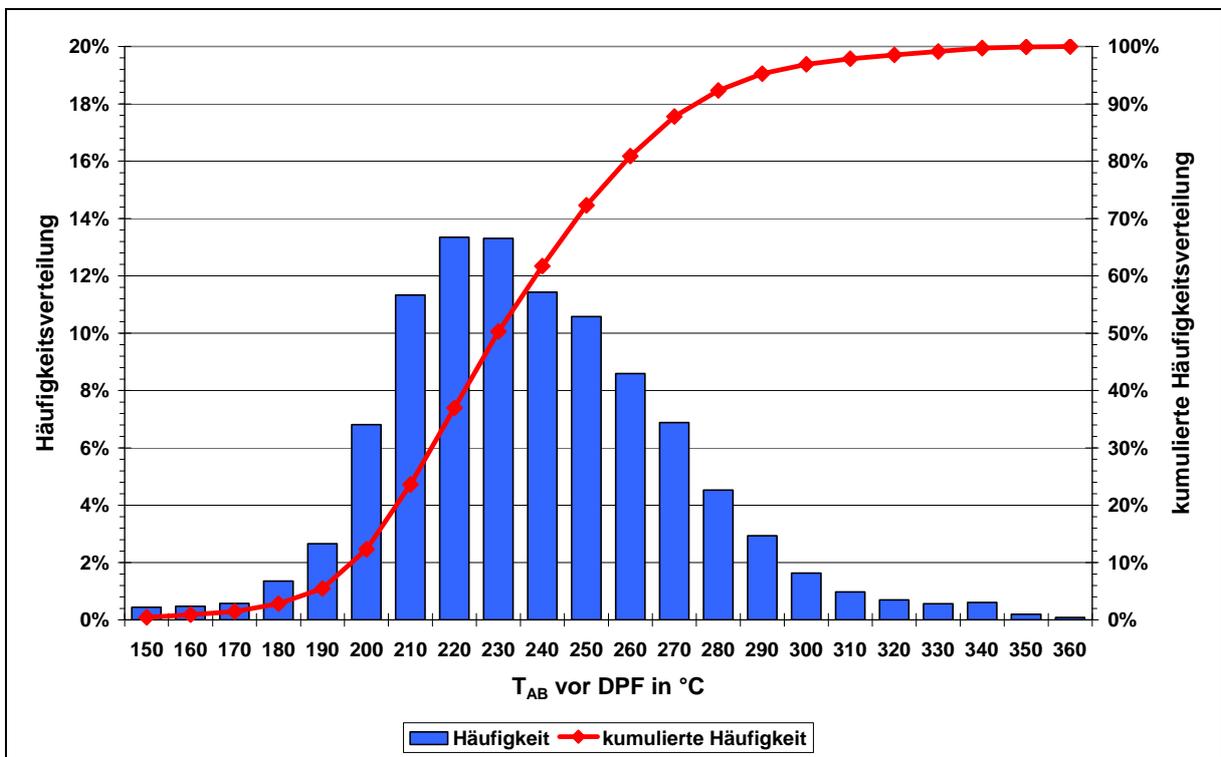


Abbildung 32: Häufigkeitsverteilung Abgastemperatur Gelenkbus MAN, AGR / CRT

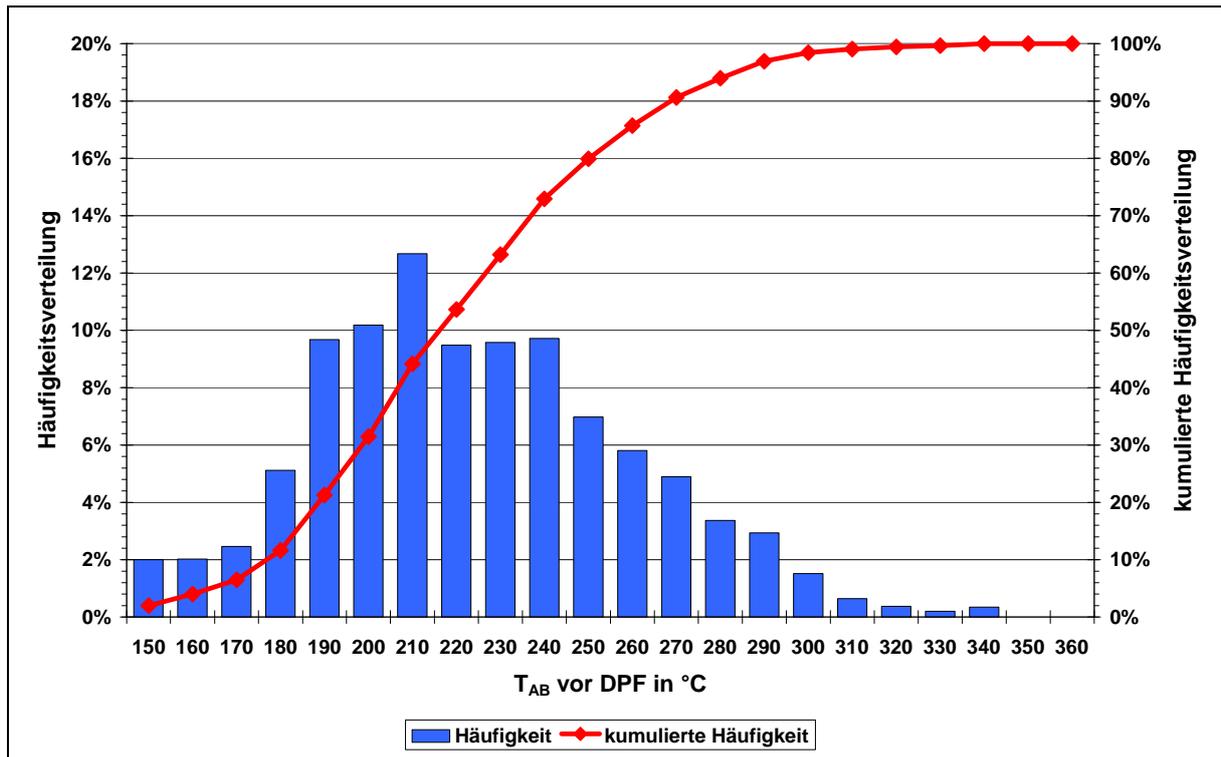


Abbildung 33: Häufigkeitsverteilung Abgastemperatur Solobus MAN, AGR / CRT

Stellt man in der gleichen Form wie in Abbildung 30 die unterschiedlichen Betriebszustände „Quasi Stationärfahrt“, „Leichte Beschleunigung“ und „Hohe Beschleunigung“ dar, ergeben sich die Abbildung 34 bis Abbildung 36. Auch hier ist der gleiche Effekt erkennbar, zeigt sich allerdings in etwas anderen Ausprägungen.

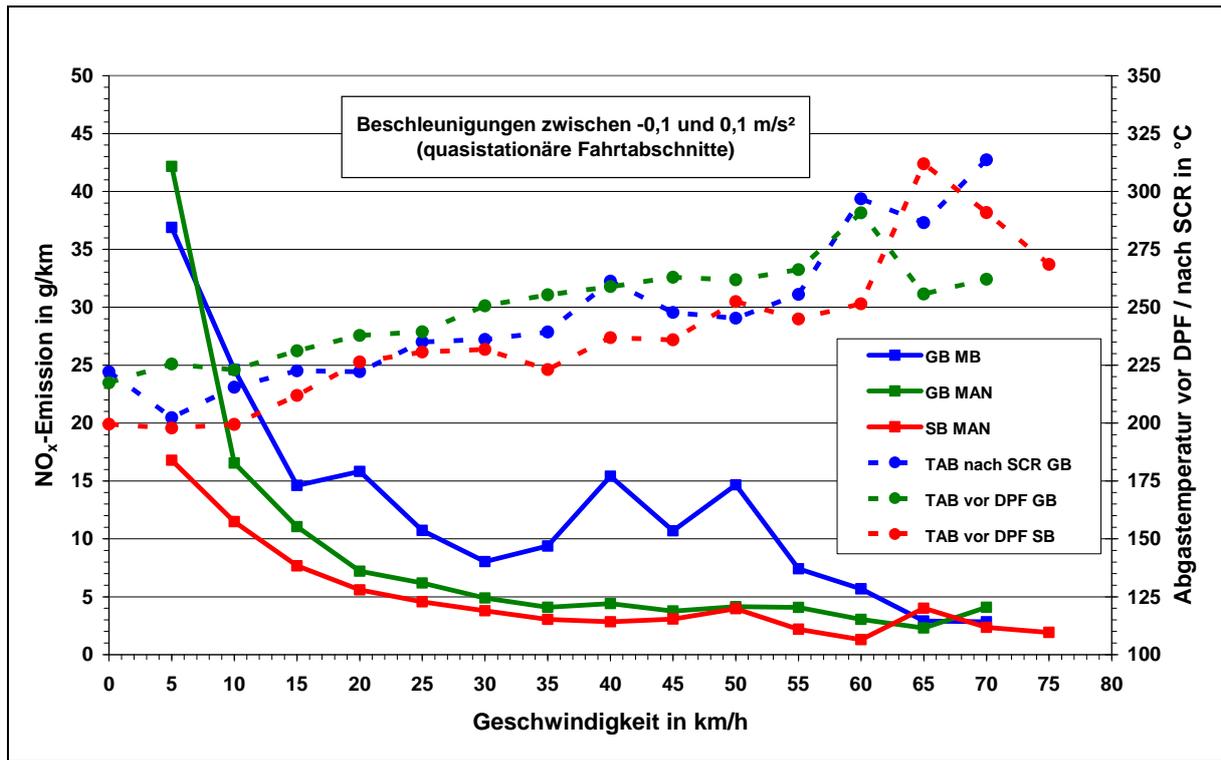


Abbildung 34: NO_x-Emissionen in [g/km] für quasistationäre Zustände

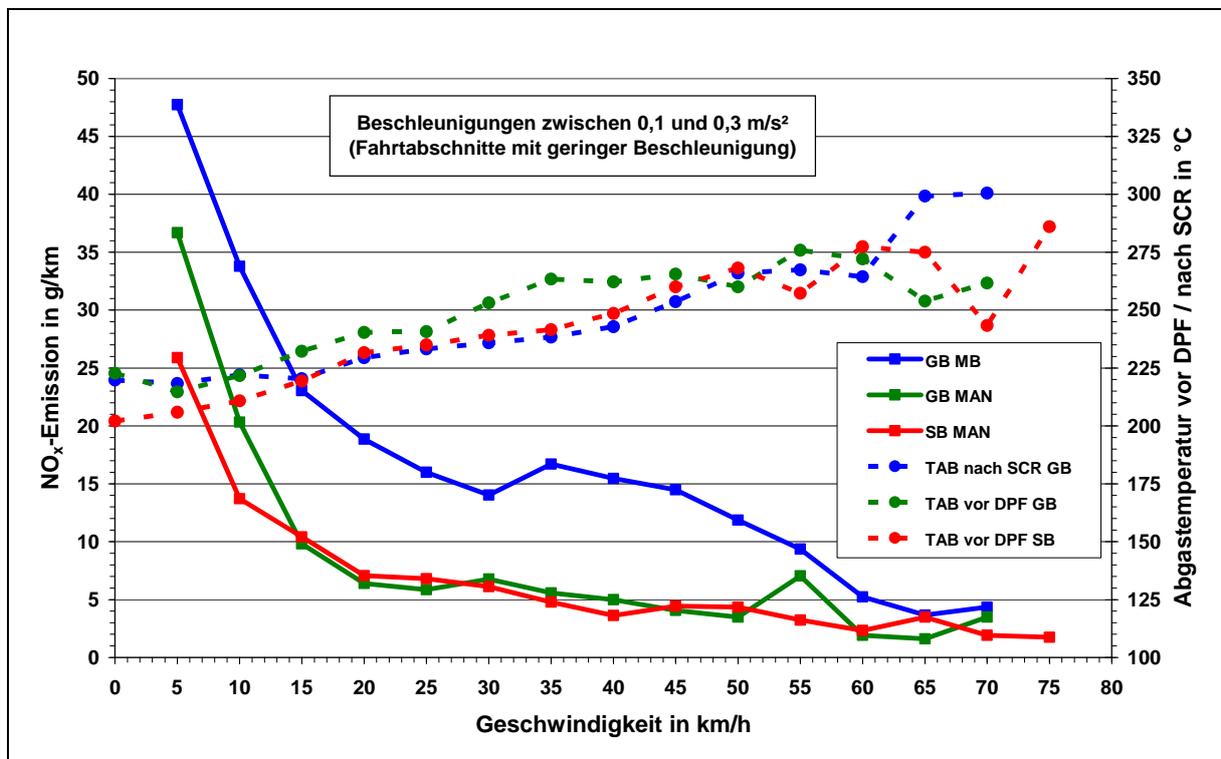


Abbildung 35: NO_x-Emissionen in [g/km] für geringe Beschleunigung

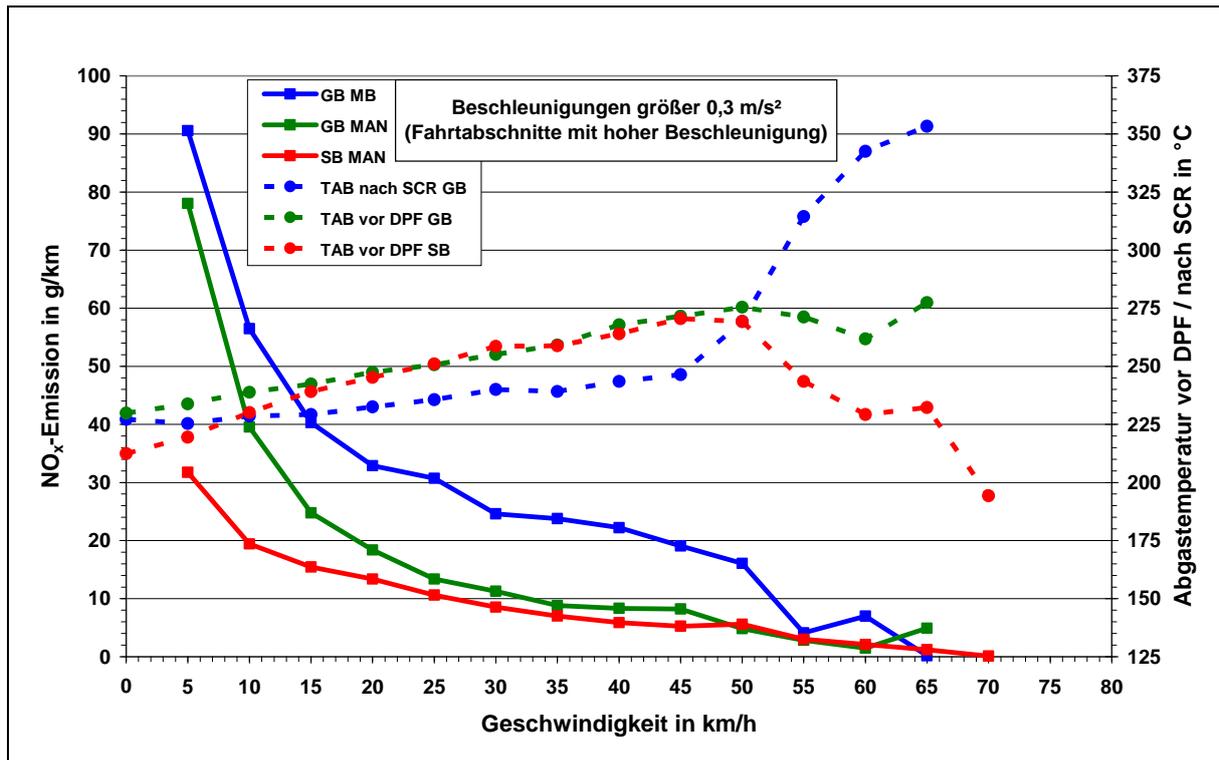


Abbildung 36: NO_x-Emissionen in [g/km] für hohe Beschleunigung

4.1.5 Geschwindigkeitsabhängige Darstellung der NO₂-Emissionen

Die Abbildung 37 zeigt die streckenbezogenen NO₂-Emissionen über der mittleren Geschwindigkeit für alle Fahrten in gleicher Darstellung wie in Kapitel 4.1.4. Auffällig sind die durchweg höheren NO₂-Emissionen der beiden AGR-Busse. Die Ursache für den höheren NO₂-Ausstoß ist im Funktionsprinzip eines CRT[®]-Systems begründet. Für die kontinuierliche Regeneration eines Partikelfilters wird eine deutlich höhere Menge an NO₂ benötigt, als im Rohabgas enthalten ist. Die erforderliche NO₂-Menge wird durch einen vorgeschalteten Oxidationskatalysator, welcher NO zu NO₂ aufoxidiert, erreicht. Der Oxidationskatalysator verschiebt das natürliche NO₂/NO_x-Verhältnis von 5-10% auf bis zu 50%. Die Abbildung 38 zeigt die mittlere NO₂/NO_x-Verhältnisse der drei Fahrzeuge.

Abbildung 39 bis Abbildung 41 zeigen die streckenbezogenen NO₂-Emissionen über der mittleren Geschwindigkeit, differenziert nach Fahr- bzw. Betriebszuständen „Quasi Stationärfahrt“, „Leichte Beschleunigung“ und „Hohe Beschleunigung“.

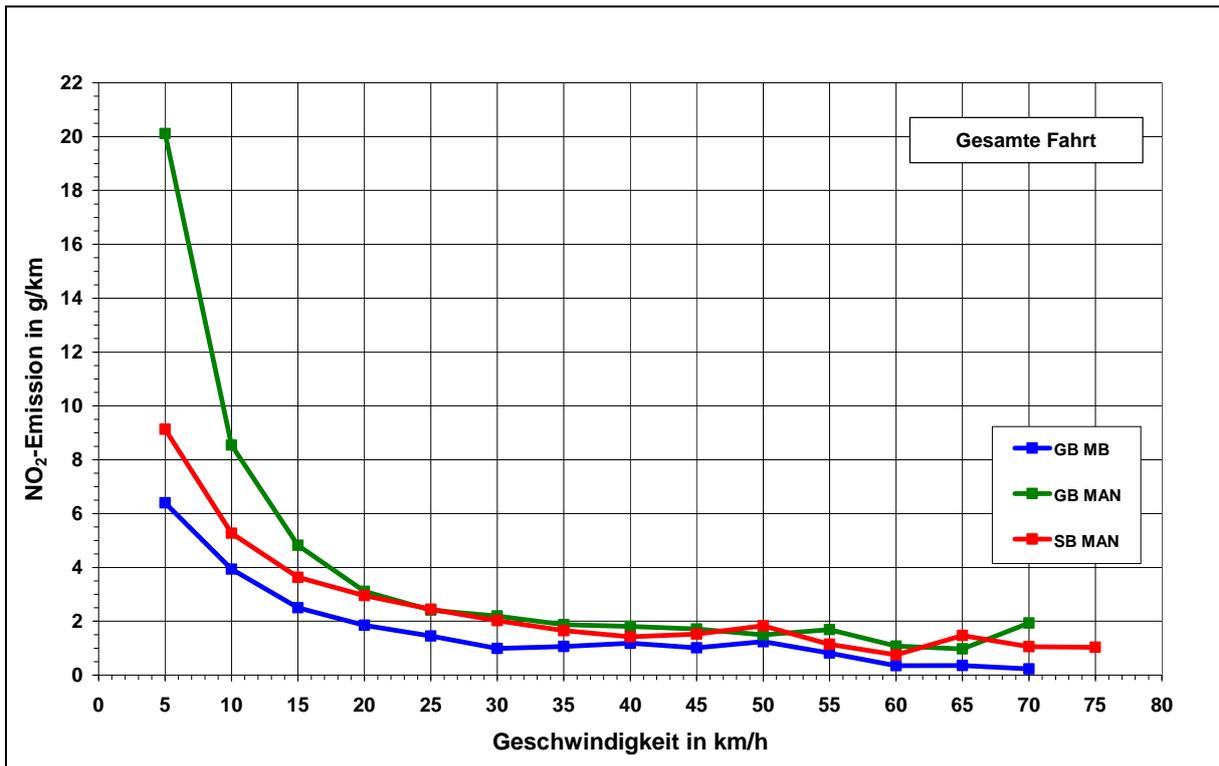


Abbildung 37: NO₂-Emissionen in [g/km] in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit

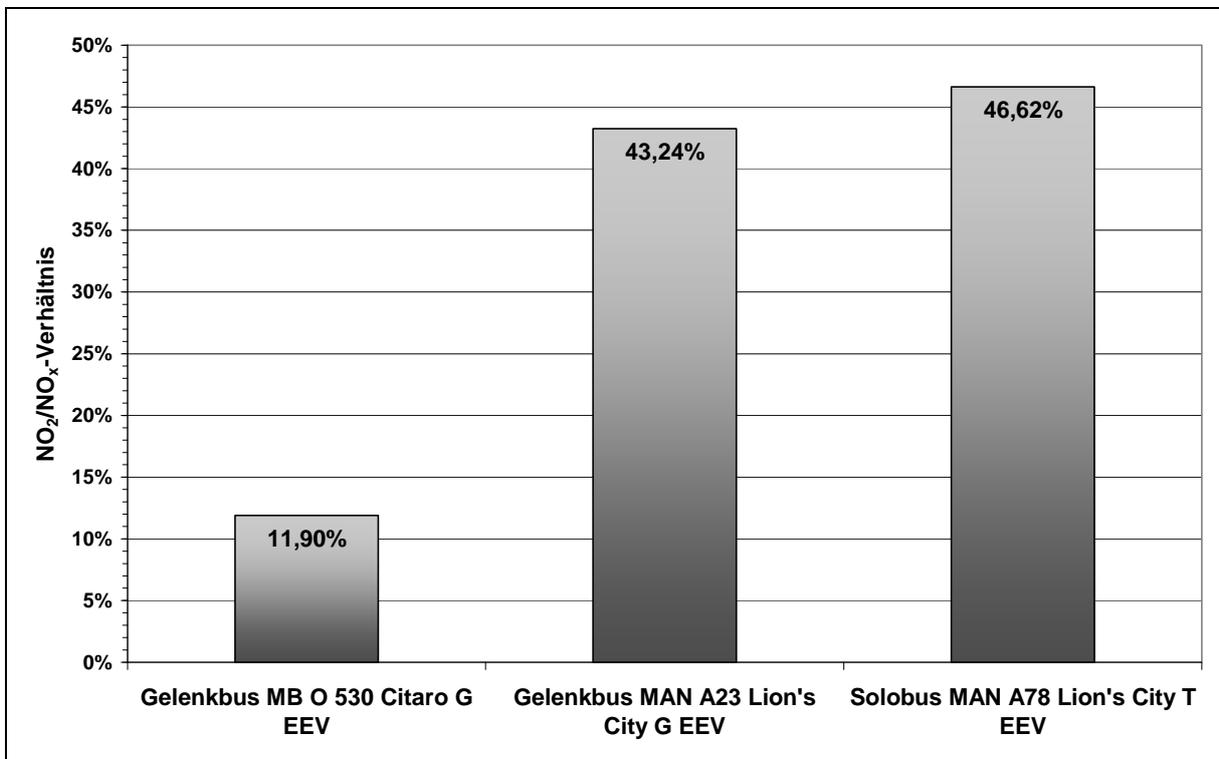


Abbildung 38: NO₂/NO_x-Verhältnis, Mittelwerte

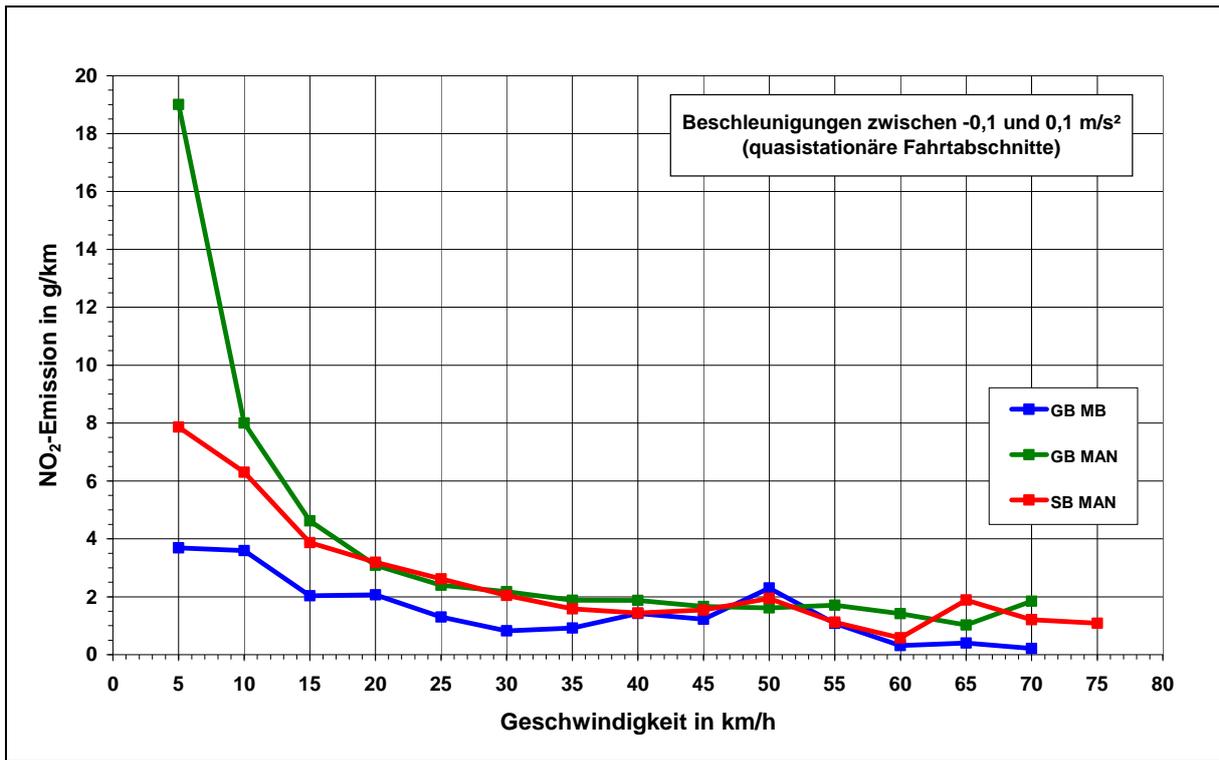


Abbildung 39: NO₂-Emissionen in [g/km] für quasistationäre Zustände

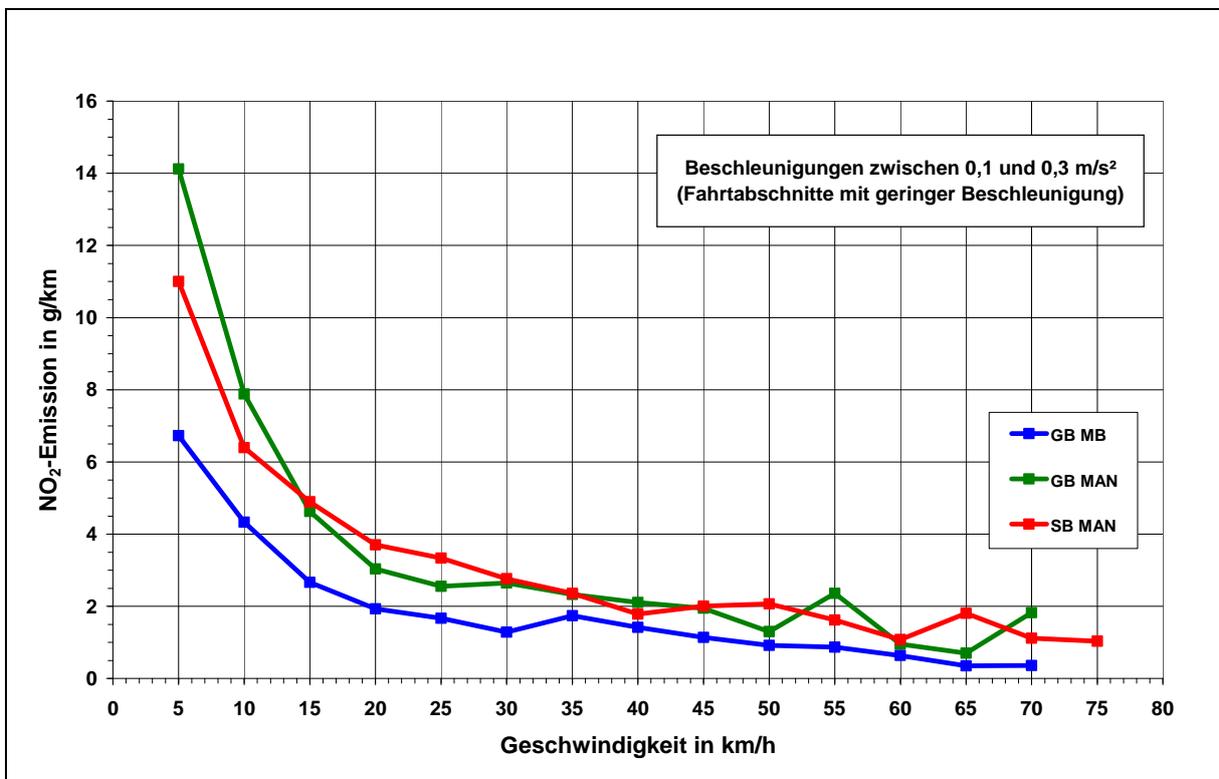


Abbildung 40: NO₂-Emissionen in [g/km] für geringe Beschleunigung

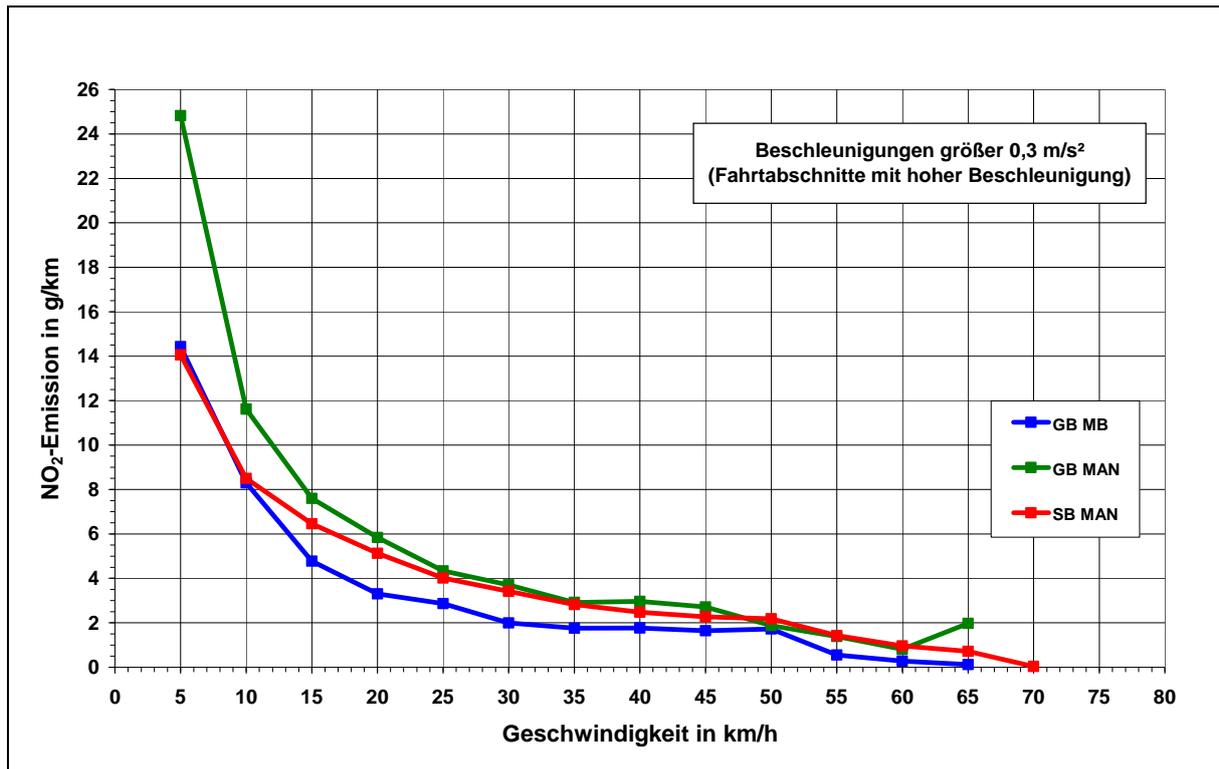


Abbildung 41: NO₂-Emissionen in [g/km] für hohe Beschleunigung

5 Zusammenfassung

Im vorliegenden Bericht wird die Vermessung von Realemissionen von Bussen des öffentlichen Nahverkehrs im Betrieb beschrieben. Mit der EU-Rahmenrichtlinie über die Beurteilung und die Kontrolle der Luftqualität (RL 96/62/EG) und den zugehörigen Tochterrichtlinien (z.B. 1999/30/EG, 2000/69/EG, 2002/3/EG) werden Luftqualitätsziele zur Vermeidung oder Verringerung schädlicher Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt festgelegt. Im Rahmen der Umsetzung der Richtlinie sind auch in Hagen Überschreitungen der jetzigen und zukünftigen Immissionsgrenzwerte festgestellt worden. Analysen der unterschiedlichen Emittenten kamen zu dem Ergebnis, dass auch die Busse des öffentlichen Nahverkehrs signifikant zu der Immissionssituation beitragen. Neben einer Nachrüstung von Bussen der bestehenden Fahrzeugflotte ist auch die Erneuerung von Fahrzeugen eine gangbare Option. Das beschriebene Vorhaben hat die Vermessung von drei Fahrzeugen mit einer EEV-Typprüfung zum Inhalt. Hierbei wurde ein Fahrzeug mit einer Kombination eines Partikelfilters und eines SCR Systems und zwei Fahrzeuge mit gekühlter Abgasrückführung und CRT[®]-System vermessen.

Zur Ermittlung der Realemissionen der Fahrzeuge im Betrieb wurden diese mit mobiler Messtechnik ausgerüstet und auf repräsentativen Strecken auf ihre Emissionen hin vermessen.

Die Ergebnisse der Emissionsmessungen, sowie die Ergebnisse aus den vorangegangenen Vorhaben zeigen, dass insbesondere die reagensgestützten Systeme in großer Abhängigkeit der Betriebsrandbedingungen funktionieren. Geringe Außentemperaturen oder Betriebsrandbedingungen, die das Auskühlen des Abgassystems begünstigen, führen zu erhöhten NO_x-Emissionen, da über größere Zeiträume die notwendigen Randbedingungen für den Betrieb des Abgasnachbehandlungssystems nicht gegeben sind. In der Stadt Hagen liegen durch die Besonderheiten des Busverkehrs (Durchfahrten von Fußgängerzonen im Schrittempo, häufige Fahrten durch 30-Zonen, häufige Abbiegemanöver in Nebenstraßen usw.) für große Zeiträume solche Bedingungen vor. Prinzipbedingt gelten diese Einschränkungen für Fahrzeuge mit AGR nicht in dieser Form. Bei diesen Fahrzeugen stellen sich die NO_x-Emissionen auf dem erwarteten niedrigen Niveau ein. Durch den Betrieb des CRT[®]-Systems, das durch Vorschalten eines Oxidationskatalysators das NO₂/NO_x-Verhältnis des Rohabgases zu deutlich höheren NO₂-Gehalten verschiebt, sind bei diesen Fahrzeugen höhere NO₂-Emissionen zu beobachten.

6 Literatur

- [1] Richtlinie 96/62/EG des Rates
über die Beurteilung und die Kontrolle der Luftqualität vom 27. September 1996
- [2] Richtlinie 1999/30/EG des Rates
über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel
und Blei in der Luft vom 22. April 1999
- [3] Kleinebrahm, M.; Schulte, L.-E.; Dreger, S.:
Emissionsverhalten von Linienbussen – Teil 1, Dieselantrieb mit nachgerüstetem
Abgasrückführungssystem und Erdgasantrieb im Vergleich. LANUV-
Fachbericht 14, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nord-
rhein-Westfalen, Recklinghausen, 2009
- [4] Kleinebrahm, M.; Schulte, L.-E.; Dreger, S.:
Emissionsverhalten von Linienbussen – Teil 2, Dieselantrieb mit
nachgerüstetem SCR-System (Selective Catalytic Reduction) kombiniert mit
einem CRT Partikelfilter (Continuously Regenerating Trap). LANUV-
Fachbericht 19, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nord-
rhein-Westfalen, Recklinghausen, 2009
- [5] Mollenhauer, K.; Tschoke, H.:
„Handbuch Dieselmotoren“, 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007, S.
499-510
- [6] Hoepke, E.; Breuer, S. (Hrsg.) et al. :
„Nutzfahrzeugtechnik: Grundlagen, Systeme, Komponenten“, 5. Auflage, Vie-
weg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2008, S. 352

Landesamt für Natur, Umwelt
und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen
Leibnizstraße 10
45659 Recklinghausen
Telefon 02361 305-0
poststelle@lanuv.nrw.de

www.lanuv.nrw.de

