



Realemissionen von ÖPNV-Neufahrzeugen mit EURO VI-Homologation

LANUV-Fachbericht 78

Realemissionen von ÖPNV-Neufahrzeugen mit EURO VI-Homologation

LANUV-Fachbericht 78

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
Recklinghausen 2017

IMPRESSUM

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

Der Fachbericht gibt den Abschlussbericht des TÜV Nord zum Forschungsvorhaben Nr. S-129.99.324.00 „Vermessung von Realemissionen in Betrieb befindlicher ÖPNV-Neufahrzeuge mit EURO VI-Homologation auf ausgewählten Strecken in Hagen und Düsseldorf“ des LANUV wider.

Autoren Martin Kleinebrahm, Sergej Dreger (TÜV NORD Mobilität GmbH & Co. KG, IFM – Institut für Fahrzeugtechnik und Mobilität)

Fachredaktion Dr. Andreas Brandt (LANUV)

Titelfoto TÜV NORD Mobilität GmbH & Co. KG, IFM – Institut für Fahrzeugtechnik und Mobilität

ISSN 1864-3930 LANUV-Fachberichte

Informationsdienste Informationen und Daten aus NRW zu Natur, Umwelt und Verbraucherschutz unter

- www.lanuv.nrw.de

Aktuelle Luftqualitätswerte zusätzlich im

- WDR-Videotext

Bereitschaftsdienst Nachrichtenbereitschaftszentrale des LANUV
(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

1	Einleitung	4
2	Zielsetzung	5
3	Vorgehensweise	5
3.1	Allgemeines	5
3.2	Versuchsfahrzeuge	6
3.2.1	Solobus SOLARIS Urbino12 EURO VI	6
3.2.2	Gelenkbus MAN A23 Lion's City G EURO VI	7
3.3	Streckenauswahl	8
3.3.1	Versuchsstrecken im Stadtgebiet Hagen	8
3.3.2	Versuchsstrecken im Stadtgebiet Düsseldorf	9
3.4	Messtechnik und Fahrzeugausrüstung	12
3.4.1	Messtechnik für gasförmige Komponenten	12
3.4.2	Partikelmesstechnik	14
3.4.3	Messung des Abgasmassenstromes	16
3.4.4	Messung der Umgebungsdaten	18
3.4.5	Messung der geodätischen Daten	18
3.4.6	Geschwindigkeitsmessung	18
3.4.7	Messung der Motordrehzahl	18
3.4.8	Messung weiterer Größen	19
3.4.9	Auslesen der CAN-Bus-Daten über die OBD-Schnittstelle	21
3.4.10	Messung des Kraftstoffverbrauchs	21
4	Ergebnisse im Realbetrieb	23
4.1	Allgemeine Vorgehensweise	23
4.2	Streckenbezogene Ergebnisse, Einsatzgebiet Hagen	24
4.3	Streckenbezogene Ergebnisse, Einsatzgebiet Düsseldorf	26
4.4	Arbeitsbezogene Ergebnisse, Einsatzgebiet Hagen	28
4.5	Arbeitsbezogene Ergebnisse, Einsatzgebiet Düsseldorf	30
4.6	Geschwindigkeitsverteilung	32
4.7	Geschwindigkeitsabhängige Darstellung der NO _x -Emissionen	34
4.8	Abgastemperaturverteilungen	38
4.9	Geschwindigkeitsabhängige Darstellung der NO ₂ -Emissionen	40
4.10	NO ₂ /NO _x -Verhältnisse	42
5	Zusammenfassung	45
6	Literatur	47
7	Anhang	48
7.1	Streckenbezogene Ergebnisse, Einsatzgebiet Hagen	48
7.2	Streckenbezogene Ergebnisse, Einsatzgebiet Düsseldorf	50
7.3	Arbeitsbezogene Ergebnisse, Einsatzgebiet Hagen	52
7.4	Arbeitsbezogene Ergebnisse, Einsatzgebiet Düsseldorf	54

1 Einleitung

Für die Luftreinhaltung stellt die hohe Immissionsbelastung durch NO_2 an vielen verkehrsnahen Messstellen ein massives Problem dar. Als Hauptursache sind Dieselfahrzeuge anzusehen. Stadtliniensbusse tragen neben Diesel-PKW signifikant zu der NO_x -Emission bei. In den Grenzwertstufen EURO III bis EURO V (EEV) konnte die Absenkung der Grenzwerte nicht analog bei den Realemissionen wiedergefunden werden. Je nach eingesetzter Technologie wurde sogar unter bestimmten Randbedingungen eine Zunahme der NO_x -Emissionen beobachtet. Auch lässt sich eine starke Zunahme des NO_2 -Anteils am NO_x (NO_2 -Direktemission) seit etwa dem Jahr 2000 bzw. der Stufe EURO III zeigen.

Im Dezember 2012 traten für die LKW- und Bus-Typprüfung die schärferen Abgasgrenzwerte der EURO VI-Norm in Kraft. Ab Dezember 2013 gelten die EURO VI-Anforderungen für alle neu zugelassenen LKW und Busse (VO (EG) 582/2011 [1]). Die NO_x -Emissionen aus Nutzfahrzeugmotoren werden auf 0,4 g/kWh (WHSC-Prüfung) bzw. 0,46 g/kWh (WHTC-Prüfung) begrenzt (Reduzierung ca. 80 % gegenüber der Norm EURO V). Der Grenzwert für die Partikelmasse von Nutzfahrzeug-Dieselmotorenemissionen wird ebenfalls in beiden Typprüfzyklen abgesenkt und auf 0,01 g/kWh festgelegt. Darüber hinaus gibt es Grenzwerte für die Partikelanzahl von $8,0 \times 10^{11}$ (WHSC) und $6,0 \times 10^{11}$ (WHTC).

Für die Typp Genehmigung ist die Einhaltung dieser Grenzwerte in zwei verschiedenen Typprüfzyklen (WHSC- und WHTC-Prüfung) nachzuweisen. Im Gegensatz zu früheren Prüfverfahren (ESC, ETC und ELR) für die Grenzwertstufen EURO III bis EURO V sind die für EURO VI vorgesehenen Prüfzyklen deutlich niedriglastiger. Hierdurch soll auch der Betrieb mit geringeren Abgastemperaturen einbezogen werden, der bisher als sehr problematisch galt. Die Emissionen im Realbetrieb lagen in den Grenzwertstufen EURO III bis EURO V häufig deutlich höher als die Grenzwerte.

Entscheidend für die Immissionssituation ist die Frage, ob und in welchem Umfang Emissionsreduzierungen bei EURO VI-Stadtliniensbussen im realen Fahrbetrieb im Vergleich zu EURO IV- und EURO V-Fahrzeugen festzustellen sind. Da viele Kommunen Probleme mit Überschreitungen der NO_2 -Immissionsgrenzwerte an stark verkehrsbelasteten innerstädtischen Straßen haben, ist bei den Kfz insbesondere eine erhebliche Minderung der NO_x -Emissionen in Innerortssituationen notwendig, um möglichst bald eine Einhaltung der Immissionsgrenzwerte erreichen zu können.

Abgasmessungen während des Fahrbetriebs können mit einem sogenannten Portable Emission Measurement System (PEMS) erfolgen. Die Emissionen werden dabei von Abgasmessgeräten erfasst, die im Fahrzeug installiert sind. Mit der Grenzwertstufe EURO VI sind solche Messungen bei realen Straßenfahrten mit PEMS-Messtechnik auch in der Abgasemissionsgesetzgebung für Nutzfahrzeuge verankert [1]. Neben einer Demonstrationsfahrt während des Typprüfprozesses muss der Fahrzeughersteller auch über die Gesamtdauer der Serienfertigung und darüber hinaus regelmäßig Fahrzeuge aus dem Feld mit diesem Verfahren vermessen und so die Richtlinienkonformität nachweisen.

2 Zielsetzung

Ziel dieses Projektes ist die Erfassung der Fahrzeugemissionen von EURO VI-Stadtlinienbussen (Solobus, Gelenkbus) unter Realbedingungen mit PEMS auf ausgewählten Versuchsstrecken in Hagen und Düsseldorf. Die auszuwählenden Versuchsstrecken sollen typischen Stadtlinienbusbetrieb widerspiegeln und eine Kontinuität zu vorherigen Vorhaben mit EURO III- bis EURO V (EEV)-Bussen aufweisen [2, 3, 4]. Die ermittelten Daten sollen anschließend auch für das Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA) [5] zur Verfügung gestellt werden.

3 Vorgehensweise

3.1 Allgemeines

Zur Erreichung der Projektziele wurden durch die Hagener Straßenbahn AG zwei Busse des Emissionsstandes EURO VI zur Verfügung gestellt. Diese beiden Busse wurden in den ausgesuchten Einsatzfällen (Hagener und Düsseldorfer Stadtverkehr) betrieben. Ausgerüstet mit PEMS-Technologie sind beide Fahrzeuge auf jeweils zwei Streckenführungen in den beiden Einsatzgebieten gefahren worden.

Die Auswahl der Einsatzgebiete basiert auf den Erfahrungen aus vorherigen Projekten mit Bussen der Emissionsstände EURO III bis EEV [2, 3, 4], sowie aus bereits veröffentlichten Ergebnissen von Untersuchungen zum Betrieb von Hybridbussen im Verkehrsverbund Rhein-Ruhr [6]. Hierbei gilt der Betrieb in der Stadt Hagen eher als problematisch für Fahrzeuge, die mit Abgasnachbehandlungssystemen ausgestattet sind, da die Streckenführungen typischer Buslinien große Bereiche von Betrieb im Schritttempo durch Fußgängerzonen beinhalten. Weiterhin gibt es viele Bereiche mit Tempo 30-Zonen, in denen auch, bedingt durch die Streckenführung, viele Abbiegemanöver vorhanden sind. Diese Randbedingungen führen zu vergleichsweise niedrigen Abgastemperaturen und somit zu schwierigen Verhältnissen für den Betrieb von Abgasnachbehandlungssystemen.

Der Betrieb in der Stadt Düsseldorf hat in den vorherigen Projekten deutlich günstigere Randbedingungen für die Effektivität von Abgasnachbehandlungssystemen gezeigt. Das höhere Niveau der Abgastemperaturen führte zu besseren Ergebnissen bei den Abgasemissionen.

3.2 Versuchsfahrzeuge

3.2.1 Solobus SOLARIS Urbino12 EURO VI

Beim ersten Versuchsfahrzeug handelt es sich um einen Solowagen vom Typ SOLARIS Urbino12. Abbildung 1 zeigt das Versuchsfahrzeug. In der Tabelle 1 sind die technischen Daten des Fahrzeuges zusammengefasst. Das Fahrzeug ist nach EURO VI-Abgasnorm (VO (EG) 582/2011 [1]; VO (EG) 64/2012 [7]) homologiert und ist serienmäßig mit einer SCRT-Anlage ausgerüstet.



Abbildung 1: Solobus SOLARIS Urbino12 EURO VI

Tabelle 1: Technische Daten SOLARIS Urbino12 EURO VI

Fahrzeug	Solobus, SOLARIS Urbino12 EURO VI
Amtliches Kennzeichen	HA-DF 794
Motortyp	DAF PACCAR MX-11 240 H1
Motorleistung	240 kW bei 1.650 min ⁻¹
Motordrehmoment	1.400 Nm bei 1.000-1.650 min ⁻¹
Getriebe	Voith DIWA 854.6, 4-Gang Automatgetriebe
Testmasse	14.540 kg

3.2.2 Gelenkbus MAN A23 Lion's City G EURO VI

Das zweite Versuchsfahrzeug war ein Gelenkbus vom Typ MAN A23 Lion's City G. Das Versuchsfahrzeug ist in Abbildung 2 dargestellt. Die technischen Daten sind in der Tabelle 2 zusammengefasst. Das Fahrzeug ist nach EURO VI-Abgasnorm (VO (EG) 582/2011 [1]; VO (EG) 64/2012 [7]) homologiert. Der Gelenkbus besitzt ebenfalls eine serienmäßige SCRT-Anlage.



Abbildung 2: MAN A23 Lion's City G

Tabelle 2: Technische Daten MAN A23 Lion's City G EURO VI

Fahrzeug	Gelenkbus. MAN A23 Lion's City G EURO VI
Motortyp	D 2066 LUH 52 EURO VI
Amtliches Kennzeichen	HA-DF 912
Motorleistung	265 kW bei 1.700 min ⁻¹
Motordrehmoment	1.800 Nm bei 1.000-1.300 min ⁻¹
Getriebe	ZF 6 AP 2000 B Ecolife, 6-Gang Automatgetriebe
Testmasse	20.650 kg

3.3 Streckenauswahl

3.3.1 Versuchsstrecken im Stadtgebiet Hagen

In vorangegangenen Projekten wurden von der Hagener Straßenbahn bereits zwei repräsentative Streckenführungen für die Emissionsmessungen ausgewählt (Linien 512 und 514). Für die Streckenauswahl wurden unterschiedliche Kriterien angesetzt. Zum einen sollten die gefahrenen Strecken die Situation in der Innenstadt von Hagen widerspiegeln, zum anderen auch die topographischen Bedingungen des Hagener Busbetriebs zum Tragen kommen. Darüber hinaus sollte auch ein Mischbetrieb zwischen Innenstadt und Ausfallstrecken in die Außenbezirke dargestellt werden

Zwischenzeitlich wurde allerdings die Streckenführung der Linie 514 geändert. Um die Vergleichbarkeit der Messergebnisse aus vorangegangenen Projekten mit den Ergebnissen des aktuellen Projektes sicherstellen zu können, wurden in diesem Vorhaben die Messungen auf der „alten“ Streckenführung der Linie 514 durchgeführt. Die Streckenführung der Linie 512 blieb unverändert.

Um hinreichend viele Daten zu erhalten, wurden bei der Messfahrt die Linien mehrfach durchfahren. Die Tabelle 3 zeigt die Strecken mit den zugeordneten Kennziffern (Strecken ID). Die Abbildung 3 bis Abbildung 4 zeigen die jeweiligen Streckenverläufe der befahrenen Linien.

Tabelle 3: Messablauf für das Stadtgebiet Hagen

ID Strecke	Linie	Startstelle	Endstelle	Streckenlänge
1	512	Bathey	Wengeberg / Penninckweg	23,4 km
2	512	Wengeberg / Penninckweg	Bathey	24,3 km
3	514	Bathey	Hördenstrasse	15,1 km
4	514	Hördenstrasse	Bathey	13,6 km

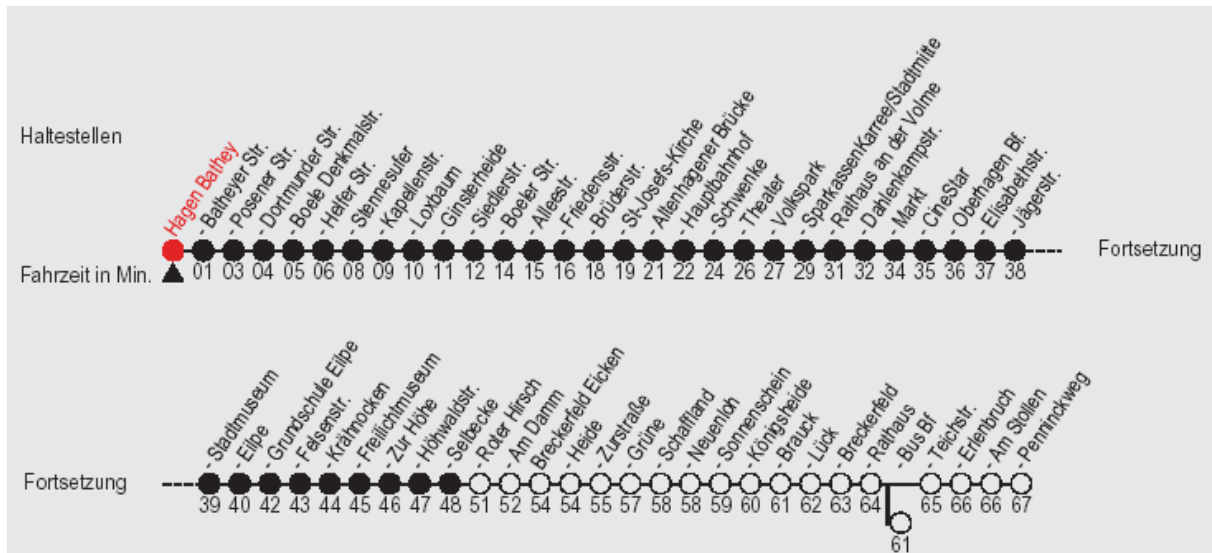


Abbildung 3: Streckenverlauf Linie 512 [Quelle: VRR AöR]

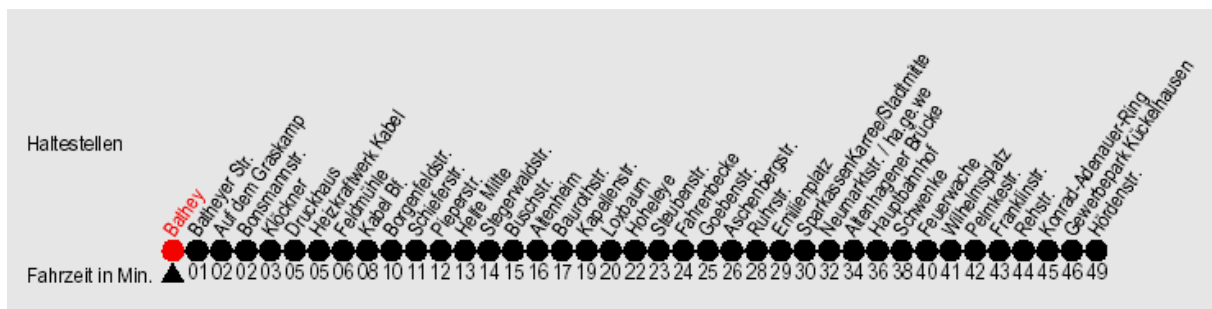


Abbildung 4: Streckenverlauf Linie 514 [Quelle: VRR AöR]

3.3.2 Versuchsstrecken im Stadtgebiet Düsseldorf

Nach gleichen Kriterien wie in Hagen wurden in vorangegangenen Forschungsvorhaben auch in Düsseldorf von der Rheinbahn unterschiedliche Streckenführungen für die Emissionsmessungen ausgewählt, die den gewünschten Kriterien bestmöglich entsprechen. Die Nahverkehrskonzepte in Düsseldorf beinhalten auch Strecken, die ausschließlich mit Solobussen befahren werden. Dies sind häufig Strecken, die in Außenbezirke führen bzw. in die benachbarten Gemeinden. Aus diesem Grund wurde auch eine Strecke ausgewählt, die nur mit dem Solobus gefahren wurde. Eine zweite Strecke wurde wiederum nur mit dem Gelenkbus gefahren. Die dritte ausgewählte Strecke wurde mit beiden Fahrzeugen befahren. Um hinreichend viele Daten zu erhalten, wurden bei allen Messfahrten die Linien mehrfach durchfahren. Die Tabelle 4 zeigt die Strecken. Die von beiden Busformen gemeinsam befahrene Strecke stellt im Wesentlichen den Innenstadtbetrieb dar und ist deutlich kürzer als die anderen Streckenführungen. Die Abbildung 5 bis Abbildung 7 zeigen die jeweiligen Streckenverläufe der befahrenen Linien.

Tabelle 4: Messablauf für das Stadtgebiet Düsseldorf

ID Strecke	Linie	Startstelle	Endstelle	Streckenlänge
1	733	St. Vinzenz Krankenhaus	Am Püttkamp	14,2 km
2	733	Am Püttkamp	St. Vinzenz Krankenhaus	14,3 km
3	780	Heinrich-Heine-Allee	Werstener Dorfstr.	6,2 km
4	780	Werstener Dorfstr	Heinrich-Heine-Allee	5,6 km
5	725	Franziusstr.	Dreherstr.	10,8 km
6	725	Dreherstr.	Franziusstr.	10,7 km



Abbildung 5: Streckenverlauf Solobuslinie 733 [Quelle: VRR AöR]

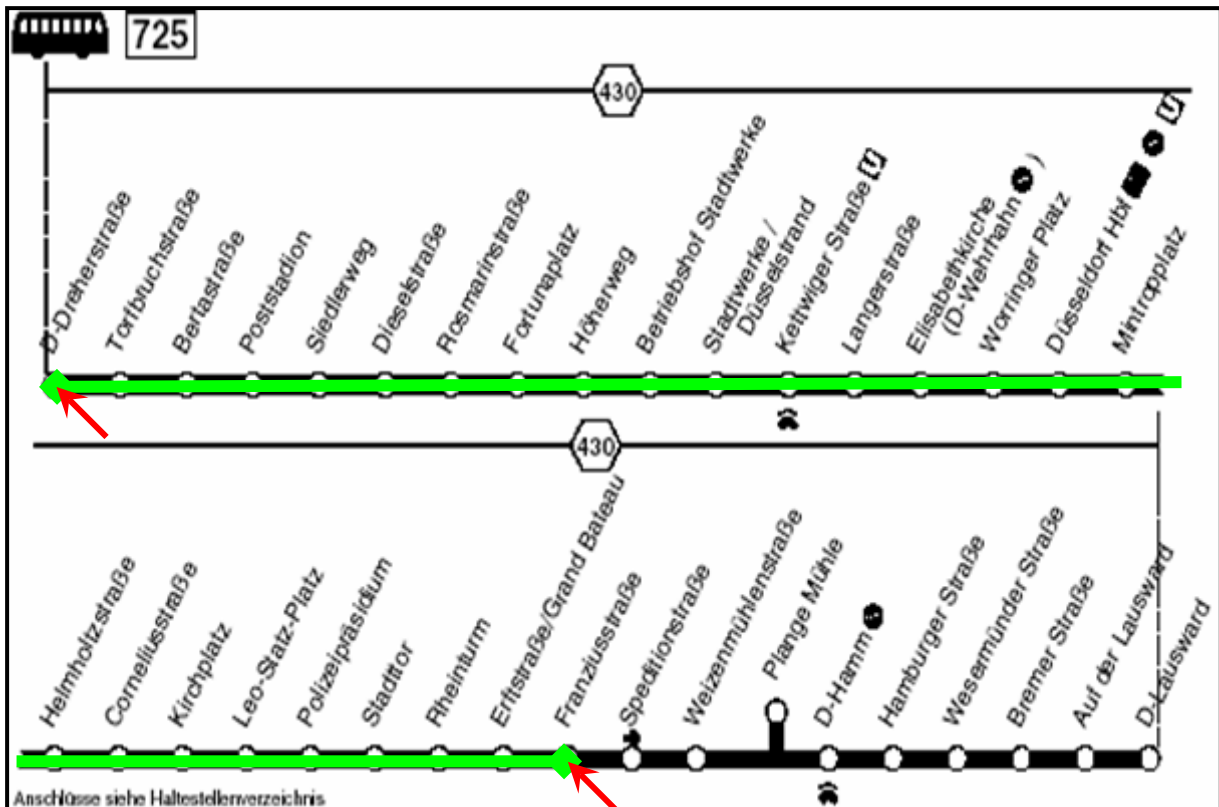


Abbildung 6: Streckenverlauf Gelenkbuslinie 725 [Quelle: VRR AöR]

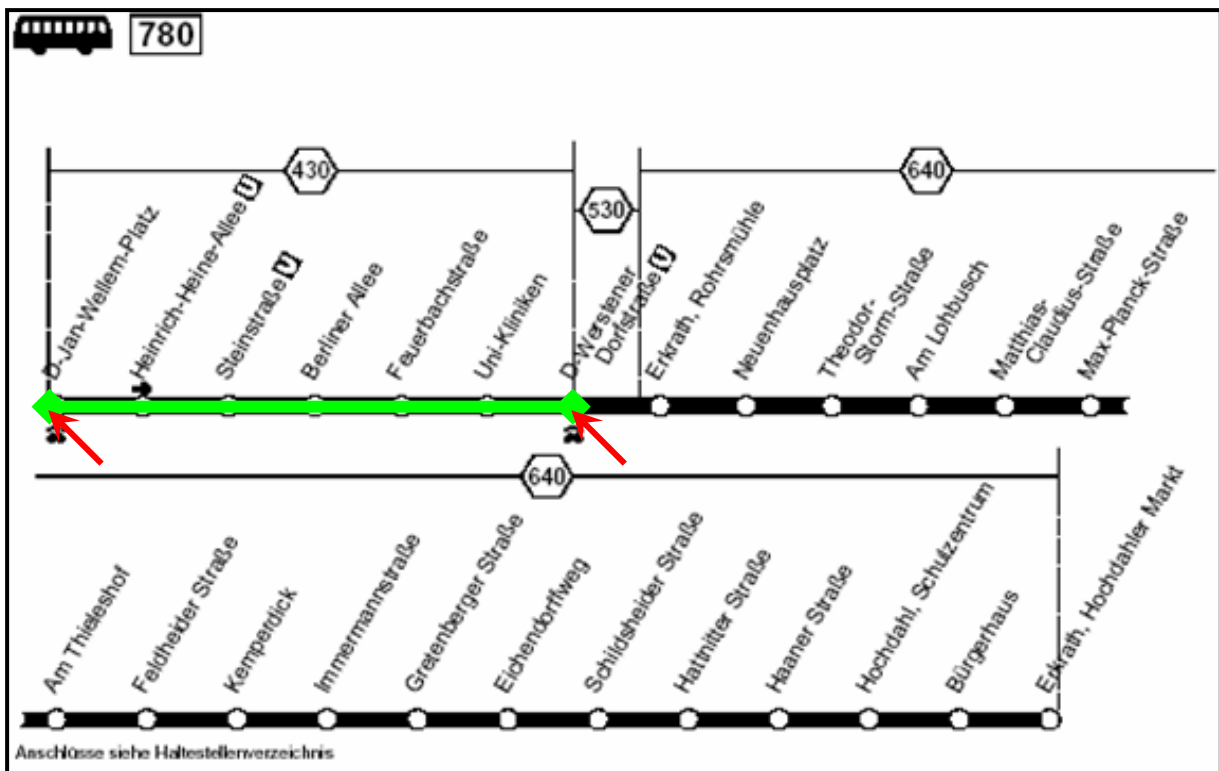


Abbildung 7: Streckenverlauf Solo- / Gelenkbuslinie 780 [Quelle: VRR AöR]

3.4 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 dieselbetriebenes 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. Um die Messergebnisse nicht zu beeinflussen, wurde das Abgas des Stromaggregates in einer hinreichend großen Entfernung von der Abgasprobeentnahme aus dem Fahrzeug herausgeführt.

3.4.1 Messtechnik für gasförmige Komponenten

Für die Messung der gasförmigen Komponenten wurde das SEMTECH-DS 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 und entspricht dem europäischen PEMS-Protokoll für Messungen zur „In-Service-Conformity“. Das System besitzt 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 CO₂-Konzentration, dem elektrochemischen O₂-Analysator und der NDUV-Messbank (Nicht-Dispersive-Ultraviolet-Messbank) zur Bestimmung von NO und NO₂ 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. Die Tabelle 5 gibt 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. Die Abbildung 8 zeigt das Messsystem SEMTECH DS der Firma Sensors und verdeutlicht den grundsätzlichen Systemaufbau.

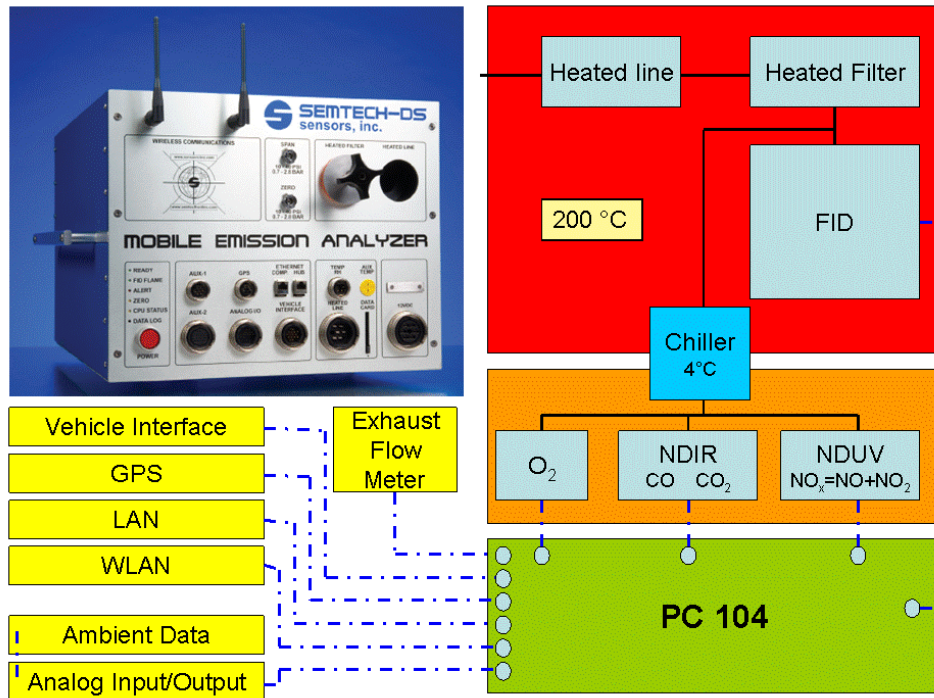


Abbildung 8: Semtech-DS-Messgerät [Quelle: Sensors]

Tabelle 5: Spezifikationen des SEMTECH-DS [Quelle: Sensors]

SEMTECH-DS System Specifications								
Gas	CO	CO2	NO	NO2	THC			
Range	0 - 8%	0 - 20%	0 - 3,000 ppm 0 - 900 ppm 0 - 300 ppm	0 - 500 ppm 0 - 300 ppm 0 - 100 ppm	0 - 100 ppmC	0 - 1,000 ppmC	0 - 10,000 ppmC	0 - 40,000 ppmC
Resolution	10 ppm	0.01%	0.1 ppm	0.1 ppm	0.1 ppmC	1 ppmC	1 ppmC	10 ppmC
Accuracy	±3% of reading or ± 50 ppm	±3% of reading or ± 0.1%	±2% of pt or ±2% of meas	±2% of pt or ±2% of meas	±2.0 % of reading or ±5 ppmC	±2.0 % of reading or ±5 ppmC	±2.0 % of reading or ±25 ppmC	±2.0 % of reading or ±100 ppmC
Linearity	Intercept ≤0.5 % of range 0.990 ≤Slope ≤1.01 SEE ≤1.0 % of range r ² ≥0.998			Intercept ≤1.0 % of range 0.985 ≤Slope ≤1.015 SEE ≤1.0 % of range r ² ≥0.998	Intercept ≤0.5 % of range 0.990 ≤Slope ≤1.01 SEE ≤1.0 % of range r ² ≥0.998			
Repeatability	±2 % of reading or 20 ppm	±2 % of reading or ±0.05 %	±1% of pt or ±1% of meas	±1% of pt or ±1% of meas	±1.0 % of reading or ±2 ppmC	±1.0 % of reading or ±2 ppmC	±1.0 % of reading or ±10 ppmC	±1.0 % of reading or ±40 ppmC
Noise	±20 ppm	±0.02%	±1% max	±1% max	± 2 ppmC	± 2 ppmC	± 10 ppmC	± 40 ppmC
Span Drift	±2 % of reading or 20 ppm	± 2 % of reading or 0.1 %	±2 % of span value	±2% of span value	±1.0 % of reading or 3 ppmC	±1.0 % of reading or 3 ppmC	±1.0 % of reading or 15 ppmC	±1.0 % of reading or 60 ppmC
Zero Drift	±0.005 % (50 ppm)	±0.1 %	± 2 ppm	± 2 ppm	± 5 ppmC	± 5 ppmC	± 10 ppmC	± 20 ppmC
Response Time	T90 ≤ 3 seconds	T90 ≤ 3 seconds	T90 ≤ 2 seconds	T90 ≤ 2 seconds	T90 ≤ 2 seconds	T90 ≤ 2 seconds	T90 ≤ 2 seconds	T90 ≤ 2 seconds
Flow Rate	2 lpm	2 lpm	3 lpm	3 lpm	2 lpm	2 lpm	2 lpm	2 lpm
Data Rate	0.833 Hz	0.833 Hz	1 Hz	1 Hz	up to 4 Hz	up to 4 Hz	up to 4 Hz	up to 4 Hz

Die zum Betrieb des Messsystems notwendigen Gase wurden im Bus mitgeführt. Da der gesamte Gasentnahmeweg sowie ein Teil des Messsystems auf 190°C beheizt wurden, ist vom Zeitpunkt des Einschaltens des Gerätes bis zur Betriebsbereitschaft mindestens eine Stunde Aufwärm- und Vorbereitungszeit erforderlich. Am Ende dieser Vorbereitung musste das System kalibriert werden. Die Kalibrierung der Analytoren wurde bei den Messungen dieses Projektes vor jeder Messfahrt durchgeführt und bei Zwischenstopps während der Fahrt nochmals überprüft.

Die Abbildung 9 zeigt beispielhaft die Messgeräteinstallation im Versuchsfahrzeug.

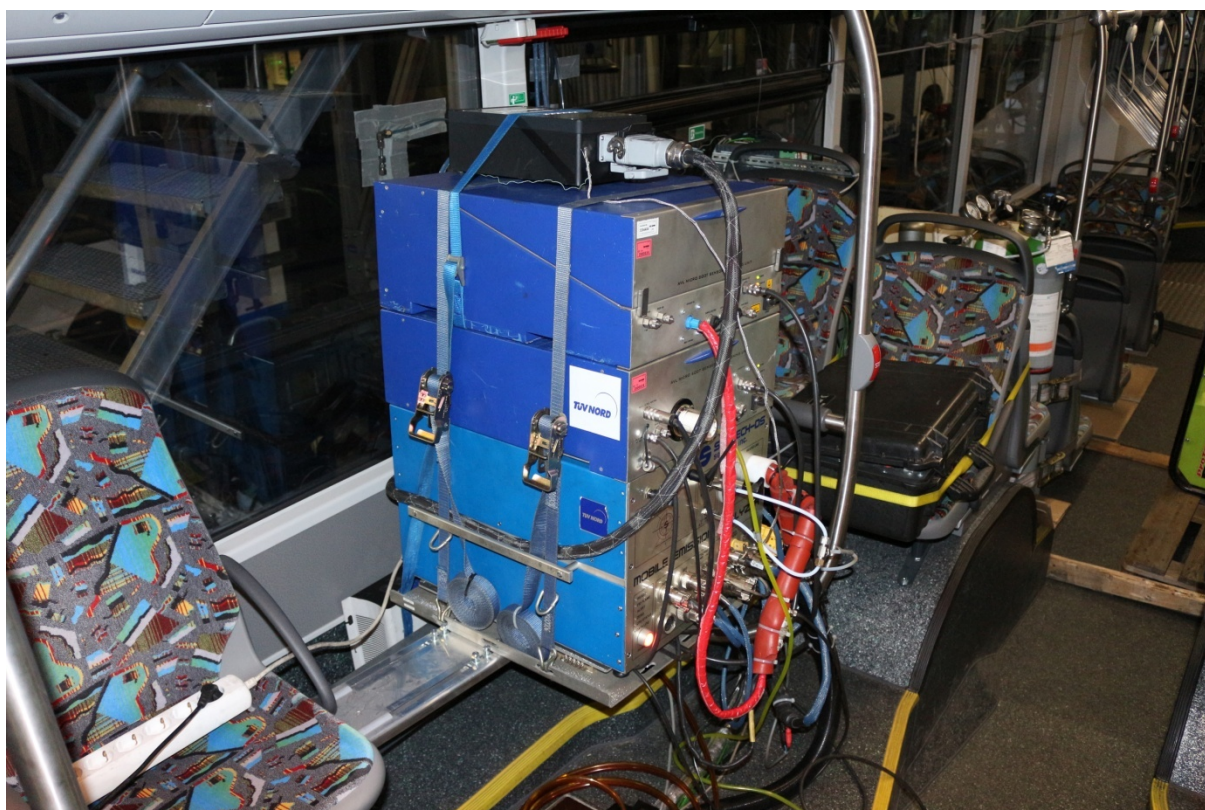


Abbildung 9: Emissionsmesstechnik im Fahrzeug

3.4.2 Partikelmesstechnik

Zur Messung der Partikelemissionen wurde AVL 483 Micro Soot Sensor der Firma AVL benutzt. Die Abbildung 10 zeigt das Messgerät. Das Messprinzip des Micro Soot Sensors 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 resultierende 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 11 sind das Funktionsprinzip der photoakustischen Spektroskopie (a) und der Aufbau einer fotoakustischen Zelle (b) dargestellt. In der Tabelle 6 sind die Spezifikationen des Messgerätes aufgeführt.



Abbildung 10: AVL 483 Micro Soot Sensor [Quelle: AVL]

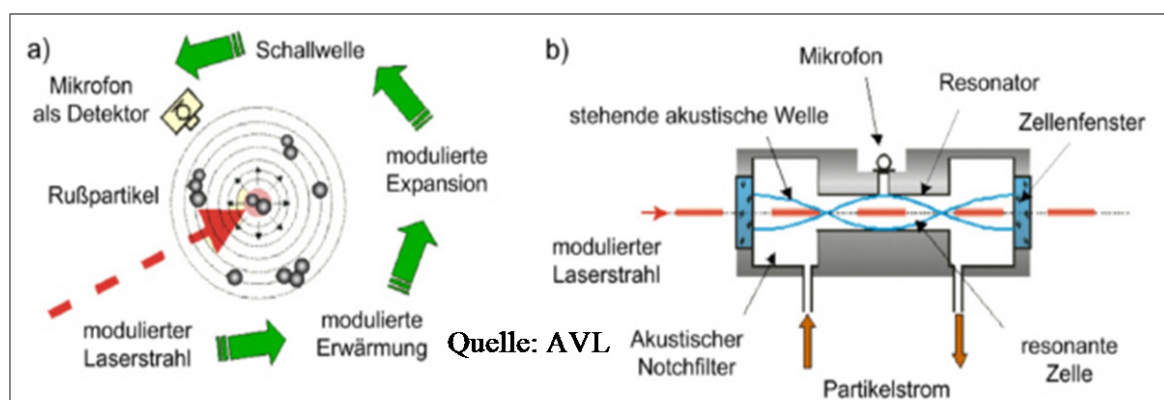


Abbildung 11: Funktionsprinzip und Aufbau einer fotoakustischen Messzelle [Quelle: AVL]

Tabelle 6: Spezifikationen des AVL 483 Micro Soot Sensors [Quelle: AVL]

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:	Lasergerät 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

3.4.3 Messung des Abgasmassenstromes

Zur Messung des Abgasmassenstromes kommt ein EFM (Electronic Flow Meter) der Firma SENSORS zum Einsatz. Das System arbeitet nach dem Prandtl'schem-Staurohr Prinzip, wobei über den dynamischen Staudruck im Vergleich zum statischen Druck die durchströmende Masse ermittelt wird. Die Abbildung 12 zeigt das Messrohr und die Auswerteeinheit. Die Tabelle 7 gibt einen Überblick über die Spezifikationen des Messsystems.

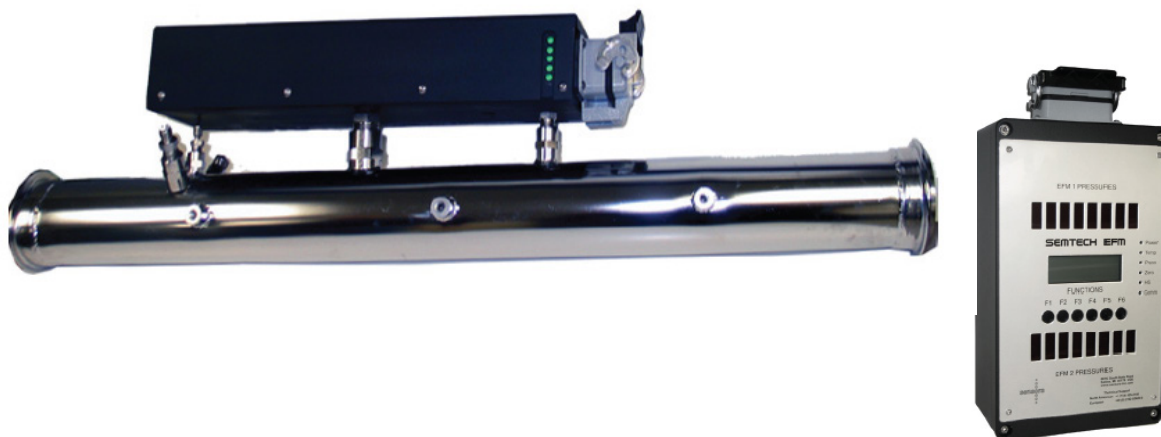


Abbildung 12: Electronic Flow Meter [Quelle: Sensors]

Tabelle 7: Spezifikationen des SEMTECH-EFM [Quelle: Sensors]

Exhaust temperature range:	-5°C to 700°C standard, higher temp capability available upon request
Exhaust temperature accuracy:	±1% of reading or ±2°C, whichever is greater
Flow measurement linearity:	< 1.0% of full scale exceeds 1065 Subpart D and ISO 16183 standards
Flow measurement accuracy:	±2% of reading or ±0.5% of full scale, whichever is greater
Warm up time:	< 5 minutes at 20°C ambient
System response time:	< 2 ms
Data rate:	5 Hz standard; 500 Hz with High Speed Option (100 Hz display rate)
Resolution:	0.1 SCFM
Power requirement:	12 VDC, 30 W; 110VAC
Communications:	RS232
Control module dimensions:	36cm x 18cm x 10cm (LxDxW)
Control module weight:	4 kg (9 lbs)

3.4.4 Messung der Umgebungsdaten

Zur Bestimmung der Korrekturfaktoren bei der Auswertung der Messungen ist die Kenntnis der Umgebungsdaten unbedingt erforderlich. Temperatur und Barometerstand sowie die relative Feuchte wurden durch geeignete Sensoren erfasst. Die Anordnung der Temperatur- und Feuchtemessstelle wurde hierbei so gewählt, dass sie nahe an der Ansaugung der Motorverbrennungsluft liegt. Es wurde ein handelsüblicher kombinierter Sensor zur Erfassung der Lufttemperatur und der relativen Feuchte benutzt und die Signale wurden über die analogen Eingänge des SEMTECH-DS geloggt.

3.4.5 Messung der geodätischen Daten

Zur Messung der geodätischen Größen diente ein GPS-System. Neben den Längen- und Breitengraden wurden die Geschwindigkeit über Grund sowie die Höhe über NN aufgezeichnet.

3.4.6 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 aufbereitet und über einen Analogeingang dem SEMTECH-DS zugeführt. Das Geschwindigkeitssignal wurde als redundantes System zum GPS-System benutzt, da durch Verbindungsausfälle des GPS-Systems Fehlsignale entstehen können.

3.4.7 Messung der Motordrehzahl

Um die ermittelten Massenemissionsergebnisse in einem motorischen Kennfeld einordnen zu können, bedarf es noch der Messung der Motordrehzahl. Hierzu kann keine einheitliche Messtechnik benutzt werden, da die Möglichkeiten des messtechnischen Abgriffes der Drehzahl für jedes Fahrzeug unterschiedlich sind. Das am Fahrzeug gefundene Motordrehzahl-signal wurde mit einer geeigneten Messdatenverarbeitung in ein Analogsignal umgeformt und an das SEMTECH-DS weitergegeben.

3.4.8 Messung weiterer Größen

Um den Belastungszustand des Motors und die Betriebszustände des Abgasnachbehandlungssystem 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 13 zeigt den Datalogger für zusätzliche Messsignale. In der Abbildung 14 sind beispielhaft die Messstellen für Druck und Temperatur vor und nach dem Abgasnachbehandlungssystem dargestellt. Die Abbildung 15 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 von beiden Systemen (Semtech und Datalogger) parallel aufgezeichnet.

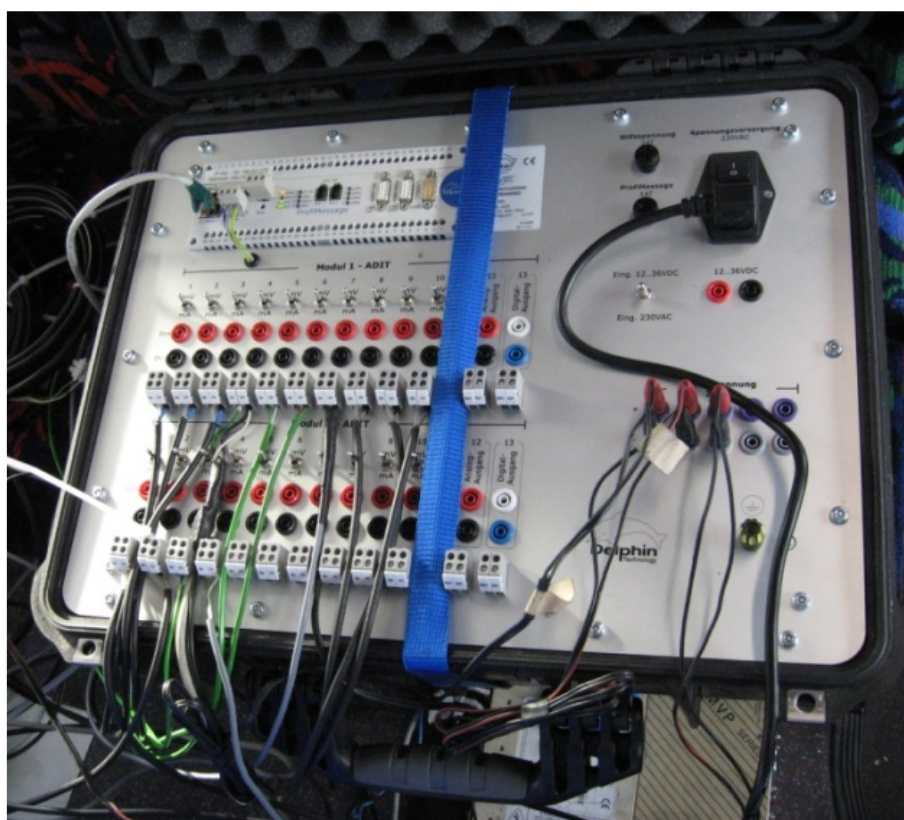


Abbildung 13: Datalogger für zusätzliche Messsignale

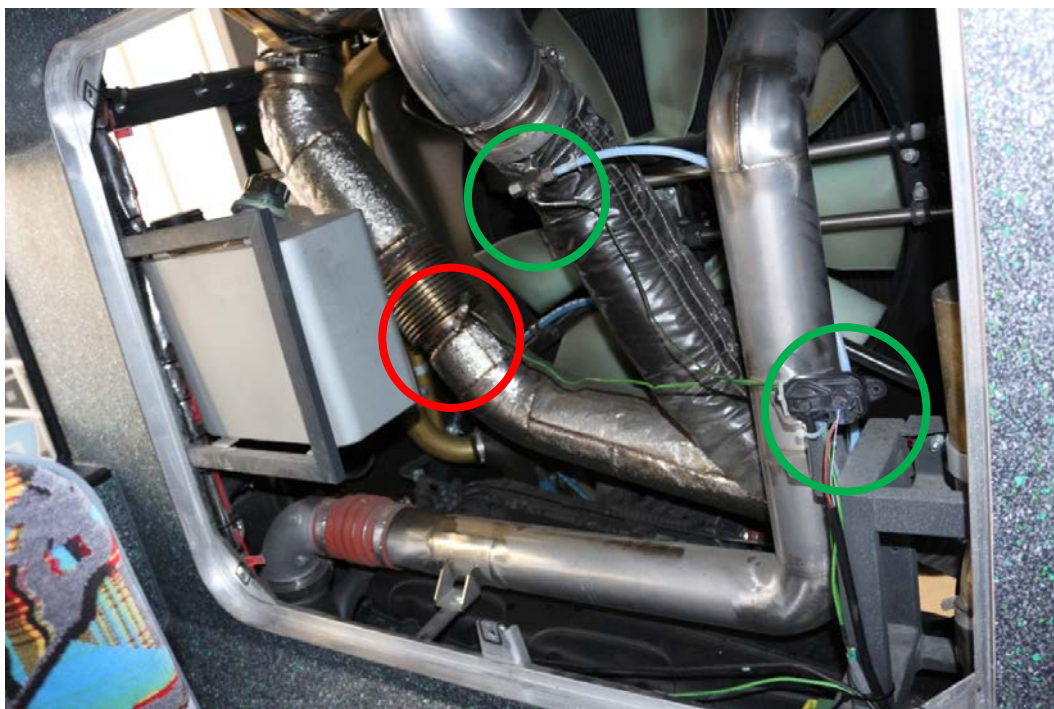


Abbildung 14: Abgasdruck- (grün) und Abgastemperaturmessung (rot)

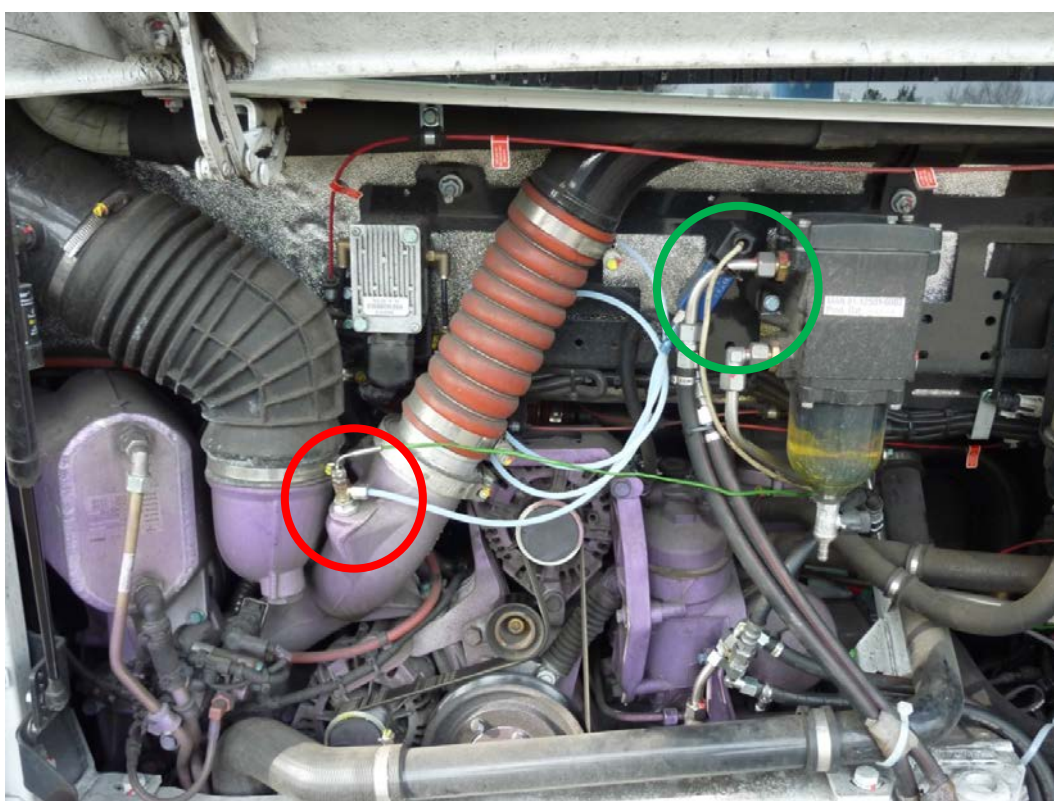


Abbildung 15: Ladedruck- (grün) und Ladelufttemperaturmessung (rot)

3.4.9 Auslesen der CAN-Bus-Daten über die OBD-Schnittstelle

Mit Einführung des Emissionsstandes EURO VI wurden auch PEMS-Messungen in das Regelwerk einbezogen. Die Messungen im Fahrzeug im realen Straßenbetrieb fallen hierbei in das Kapitel OCE (Off Cycle Emission) und werden als ISC Prüfungen (In Service Conformity) bezeichnet. Da für die Beurteilung der Messergebnisse die Kenntnis der geleisteten Arbeit notwendig ist, wurde für EURO VI die OBD-Schnittstelle neu definiert. Es liegen nun auch Signale vor, die es erlauben, die Motorleistung zeitaufgelöst zu erfassen. Die Validierung der Qualität dieser Signale wird im Rahmen des Typprüfverfahrens durchgeführt.

Im Rahmen dieses Projektes wurden über die OBD-Schnittstelle neben den Motorleistungs-Informationen auch noch andere Daten erfasst und aufgezeichnet. Im Einzelnen waren dies:

- Fahrzeuggeschwindigkeit
- Motordrehzahl
- Motorlast bzw. Motordrehmoment
- Kraftstoffeinspritzmenge
- Kühlmitteltemperatur
- Öltemperatur

3.4.10 Messung des Kraftstoffverbrauchs

Zur Messung des volumetrischen Kraftstoffverbrauchs wurde ein AIC-6004-Swissline-UniflowMaster-Verbrauchsmessgerät der Firma AIC Systems SA benutzt. Das Messgerät wurde durch eine Schlauchverbindung direkt in die Kraftstoffversorgung des Versuchsfahrzeuges eingebunden. Das Messgerät besteht aus einem Wärmetauscher, einer Umwälzpumpe und einer Messzelle. Der Wärmetauscher bildet dabei zwei unabhängige Kraftstoffschleifen, die tankseitige Primärschleife und die motorseitige Sekundärschleife, die durch die Verbrauchsmesszelle miteinander verbunden sind.

Zum Anschluss des Messsystems an das Kraftstoffversorgungssystem des Fahrzeuges mussten die Vor- und die Rücklaufleitung an einer geeigneten Stelle aufgetrennt werden. Die Primärseite des Wärmetauschers des Verbrauchsmessgerätes wurde dabei an die tankseitige Vor- und Rücklaufleitungen angeschlossen. Der kühle, aus dem Tank kommende Kraftstoff wurde von der Umwälzpumpe des Messgerätes ständig durch die Primärseite des Wärmetauschers im Umlauf gepumpt, dadurch wurde der auf der Sekundärschleife aus dem Motorrücklauf kommende warme Kraftstoff wieder abgekühlt. Die Sekundärseite wurde an die motorseitige Vor- und Rücklaufleitungen angeschlossen. Der vom Motor aus der Sekundärschleife verbrauchte Kraftstoff wurde durch die Messzelle aus der Primärschleife gesaugt. Somit stellte der von der Messzelle erfasste Kraftstoffvolumenstrom den tatsächlichen Kraftstoffverbrauch des Motors dar.

Um die Kraftstoffverbräuche sinnvoll vergleichen zu können, musste der gemessene, volumetrische Verbrauch dichtekorrigiert und in den gravimetrischen Verbrauch umgerechnet werden. Dazu wurden auch die Kraftstofftemperaturen am Eingang und am Ausgang des Verbrauchsmessgerätes gemessen und aufgezeichnet.

In der Tabelle 8 sind die technischen Spezifikationen des AIC-6004 zusammengefasst. Die Abbildung 16 zeigt exemplarisch die Anbringung des Kraftstoffverbrauchsmesssystems am Versuchsfahrzeug.

Tabelle 8: Spezifikationen des AIC-6004 [Quelle: AIC]


Typ:	AIC 6004	
Messbereich:	1 bis 120 L/h	
Pulsrate:	2.000 Pulse/Liter	
Signal:	Rechteck, NPN Open Collector, Pulsweite 0,7ms	
Messgenauigkeit:	± 1 %	
Wiederholbarkeit:	± 0,2 %	
Druckbereich:	-1 bis 20 bar	
Temperaturbereich:	-30 bis 90 °C	
Max. Viskosität:	100 mPa·s	
Rücklaufeinspeisung	drucklos	
Elektrische Spannungsversorgung:	24 V	
IP-Schutzklasse:	IP 65	
Maße (Höhe x Breite x Tiefe):	390 x 135 x 310 mm (mit Kraftstofffilter)	
Gewicht:	13,8 kg (mit Kraftstofffilter)	



Abbildung 16: Anbringung des Kraftstoffverbrauchsmesssystems im Fahrzeug

4 Ergebnisse im Realbetrieb

4.1 Allgemeine Vorgehensweise

Die aufgezeichneten Messdaten wurden auf ihre Plausibilität hin überprüft und gegebenenfalls mit geeigneten Verfahren nachbehandelt, um offensichtliche Ausreißer zu eliminieren. Aus den zeitlichen Signalverläufen der gasförmigen Emissionen (CO, CO₂, HC, NO_x) und des Abgasmassenstromes wurden anschließend die emittierten Schadstoffmassen berechnet.

In der folgenden Ergebnisdiskussion wird im Wesentlichen auf die Untersuchungen der NO_x-NO₂ Ergebnisse eingegangen, da diese im Fokus der aktuellen Luftreinhalte-Diskussion stehen. Die graphischen Darstellungen beschränken sich auf die CO₂- und 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. Aus dem gleichen Grund sind die bei einzelnen wenigen Messfahrten vorgekommenen kurzzeitigen Ausfälle der THC- und Rußpartikelmesstechnik für die ganzheitliche Betrachtung der Messergebnisse irrelevant. Es sind jeweils streckenbezogene und arbeitsbezogene Werte dargestellt. Die Darstellung der streckenbezogenen Emissionen ist eher geeignet, immissionsseitige Fragestellungen zu diskutieren, da hier die Emissionen eines Fahrzeuges beim Durchfahren einer Strecke dargestellt werden, während die arbeitsbezogenen Darstellung eher einen Vergleich zu den Typprüfwerten eines Motors erlauben, da in der Abgasemissionsgesetzgebung für Nutzfahrzeuge stets auf die Arbeit bezogen wird.

Eine vollständige Zusammenstellung der Ergebnisse aller Parameter befindet sich im Anhang.

4.2 Streckenbezogene Ergebnisse, Einsatzgebiet Hagen

Tabelle 9: Ergebnisse Solobus SOLARIS Urbino12 EURO VI [g/km], Linie 512

Datum	Einsatzgebiet	Linie	Runde	Dauer	Streckendistanz	Mittlere Geschwindigkeit	Emissionen, [g/km]			Kraftstoffverbrauch, gemessen	NO ₂ /NO _x -Verhältnis
							NO _x	NO ₂	CO ₂		
				[s]	[m]	[km/h]	[l/100 km]	[%]			
23.02.2015	HA	512	3	6634	47977,4	26,0	0,47	0,16	1003,16	40,6	35%
23.02.2015	HA	512	4	7184	47654,9	23,9	1,65	0,66	1104,61	44,6	40%
24.02.2015	HA	512	1	7452	47847,0	23,1	3,17	1,23	1076,86	43,3	39%
Min				6634,0	47654,9	23,1	0,47	0,16	1003,16	40,6	35%
Max				7452,0	47977,4	26,0	3,17	1,23	1104,61	44,6	40%
Mittelwert				7090,0	47826,4	24,3	1,76	0,68	1061,54	42,9	38%
Standardabweichung				417,0	162,2	1,5	1,35	0,53	52,43	2,0	3%
Varianz				173908,0	26310,1	2,3	1,8	0,3	2748,7	4,2	0,07%
Variationskoeffizient				5,88%	0,34%	6,22%	76,76%	78,23%	4,94%	4,78%	7,21%

Tabelle 10: Ergebnisse Solobus SOLARIS Urbino12 EURO VI [g/km], Linie 514

Datum	Einsatzgebiet	Linie	Runde	Dauer	Streckendistanz	Mittlere Geschwindigkeit	Emissionen, [g/km]			Kraftstoffverbrauch, gemessen	NO ₂ /NO _x -Verhältnis
							NO _x	NO ₂	CO ₂		
				[s]	[m]	[km/h]	[l/100 km]	[%]			
23.02.2015	HA	514	2	5612	29051,3	18,6	2,03	1,01	1206,53	49,0	50%
24.02.2015	HA	514	2	5387	29066,6	19,4	2,42	1,52	1155,77	47,1	63%
24.02.2015	HA	514	3	5429	28927,8	19,2	1,80	1,19	1053,99	43,0	66%
Min				5387,0	28927,8	18,6	1,80	1,01	1053,99	43,0	50%
Max				5612,0	29066,6	19,4	2,42	1,52	1206,53	49,0	66%
Mittelwert				5476,0	29015,2	19,1	2,08	1,24	1138,76	46,4	60%
Standardabweichung				119,6	76,1	0,4	0,31	0,26	77,68	3,0	9%
Varianz				14313,0	5795,4	0,2	0,1	0,1	6034,3	9,3	0,74%
Variationskoeffizient				2,18%	0,26%	2,12%	15,05%	20,82%	6,82%	6,58%	14,39%

Tabelle 11: Ergebnisse Gelenkbus MAN A23 Lion's City G EURO VI [g/km], Linie 512

Datum	Einsatzgebiet	Linie	Runde	Dauer	Streckendistanz	Mittlere Geschwindigkeit	Emissionen, [g/km]			Kraftstoffverbrauch, gemessen	NO ₂ /NO _x -Verhältnis
							NO _x	NO ₂	CO ₂		
				[s]	[m]	[km/h]	NO _x	NO ₂	CO ₂	[l/100 km]	[%]
17.04.2015	HA	512	1	7532	47634,9	22,8	1,02	0,23	1307,03	50,6	23%
17.04.2015	HA	512	2	7442	47624,4	23,0	1,10	0,27	1329,52	51,9	24%
17.04.2015	HA	512	3	7359	47544,0	23,3	1,18	0,31	1286,00	50,4	26%
Min				7359,0	47544,0	22,8	1,02	0,23	1286,00	50,4	23%
Max				7532,0	47634,9	23,3	1,18	0,31	1329,52	51,9	26%
Mittelwert				7444,3	47601,1	23,0	1,10	0,27	1307,52	50,9	25%
Standardabweichung				86,5	49,8	0,2	0,08	0,04	21,76	0,8	2%
Varianz				7486,3	2476,9	0,1	0,0	0,0	473,5	0,6	0,04%
Variationskoeffizient				1,16%	0,10%	1,07%	7,33%	15,28%	1,66%	1,58%	7,99%

Tabelle 12: Ergebnisse Gelenkbus MAN A23 Lion's City G EURO VI [g/km], Linie 514

Datum	Einsatzgebiet	Linie	Runde	Dauer	Streckendistanz	Mittlere Geschwindigkeit	Emissionen, [g/km]			Kraftstoffverbrauch, gemessen	NO ₂ /NO _x -Verhältnis
							NO _x	NO ₂	CO ₂		
				[s]	[m]	[km/h]	NO _x	NO ₂	CO ₂	[l/100 km]	[%]
21.04.2015	HA	514	1	5612	28983,7	18,6	1,93	0,58	1499,28	57,8	30%
21.04.2015	HA	514	2	5913	28388,3	17,3	1,76	0,50	1502,26	58,7	28%
21.04.2015	HA	514	3	5494	28268,2	18,5	1,65	0,39	1485,47	58,8	24%
Min				5494,0	28268,2	17,3	1,65	0,39	1485,47	57,8	24%
Max				5913,0	28983,7	18,6	1,93	0,58	1502,26	58,8	30%
Mittelwert				5673,0	28546,7	18,1	1,78	0,49	1495,67	58,4	27%
Standardabweichung				216,1	383,2	0,7	0,14	0,10	8,96	0,6	3%
Varianz				46681,0	146825,8	0,5	0,0	0,0	80,3	0,3	0,11%
Variationskoeffizient				3,81%	1,34%	4,06%	8,03%	19,84%	0,60%	0,96%	12,27%

4.3 Streckenbezogene Ergebnisse, Einsatzgebiet Düsseldorf

Tabelle 13: Ergebnisse Solobus SOLARIS Urbino12 EURO VI [g/km], Linie 733

Datum	Einsatzgebiet	Linie	Runde	Dauer	Streckendistanz	Mittlere Geschwindigkeit	Emissionen, [g/km]			Kraftstoffverbrauch, gemessen	NO ₂ /NO _x -Verhältnis
							NO _x	NO ₂	CO ₂		
				[s]	[m]	[km/h]	[l/100 km]	[%]			
25.02.2015	D	733	1	5531	28616,7	18,6	0,30	0,11	1250,23	51,2	37%
25.02.2015	D	733	2	4649	28476,0	22,1	0,20	0,09	1231,55	50,6	45%
25.02.2015	D	733	3	4706	28337,8	21,7	0,09	0,02	1281,72	52,9	20%
Min				4649,0	28337,8	18,6	0,09	0,02	1231,55	50,6	20%
Max				5531,0	28616,7	22,1	0,30	0,11	1281,72	52,9	45%
Mittelwert				4962,0	28476,8	20,8	0,20	0,07	1254,50	51,6	34%
Standardabweichung				493,6	139,5	1,9	0,10	0,05	25,35	1,2	13%
Varianz				243633,0	19451,8	3,5	0,0	0,0	642,7	1,4	1,66%
Variationskoeffizient				9,95%	0,49%	9,04%	53,18%	66,62%	2,02%	2,29%	38,02%

Tabelle 14: Ergebnisse Solobus SOLARIS Urbino12 EURO VI [g/km], Linie 780

Datum	Einsatzgebiet	Linie	Runde	Dauer	Streckendistanz	Mittlere Geschwindigkeit	Emissionen, [g/km]			Kraftstoffverbrauch, gemessen	NO ₂ /NO _x -Verhältnis
							NO _x	NO ₂	CO ₂		
				[s]	[m]	[km/h]	[l/100 km]	[%]			
26.02.2015	D	780	1	2381	11911,9	18,0	0,60	0,45	1356,20	55,6	75%
26.02.2015	D	780	2	2142	11908,6	20,0	0,18	0,16	1244,36	51,2	86%
26.02.2015	D	780	3	1979	11927,8	21,7	0,10	0,09	1144,43	47,1	86%
Min				1979,0	11908,6	18,0	0,10	0,09	1144,43	47,1	75%
Max				2381,0	11927,8	21,7	0,60	0,45	1356,20	55,6	86%
Mittelwert				2167,3	11916,1	19,9	0,29	0,23	1248,33	51,3	83%
Standardabweichung				202,2	10,3	1,8	0,27	0,19	105,95	4,3	6%
Varianz				40882,3	105,1	3,4	0,1	0,0	11224,5	18,1	0,39%
Variationskoeffizient				9,33%	0,09%	9,27%	90,79%	83,35%	8,49%	8,30%	7,54%

Tabelle 15: Ergebnisse Gelenkbus MAN A23 Lion's City G EURO VI [g/km], Linie 725

Datum	Einsatzgebiet	Linie	Runde	Dauer	Streckendistanz	Mittlere Geschwindigkeit	Emissionen, [g/km]			Kraftstoffverbrauch, gemessen	NO ₂ /NO _x -Verhältnis
							NO _x	NO ₂	CO ₂		
				[s]	[m]	[km/h]	[l/100 km]	[%]			
22.04.2015	D	725	1	5417	21317,7	14,2	3,45	0,94	1799,30	71,7	27%
22.04.2015	D	725	2	4761	21437,7	16,2	2,80	0,69	1714,50	67,9	25%
22.04.2015	D	725	3	4687	21669,1	16,6	2,59	0,62	1683,30	66,8	24%
Min				4687,0	21317,7	14,2	2,59	0,62	1683,30	66,8	24%
Max				5417,0	21669,1	16,6	3,45	0,94	1799,30	71,7	27%
Mittelwert				4955,0	21474,8	15,7	2,95	0,75	1732,37	68,8	25%
Standardabweichung				401,8	178,6	1,3	0,45	0,17	60,03	2,6	2%
Varianz				161452,0	31898,2	1,7	0,2	0,0	3603,2	6,6	0,03%
Variationskoeffizient				8,11%	0,83%	8,44%	15,25%	22,21%	3,47%	3,74%	6,69%

Tabelle 16: Ergebnisse Gelenkbus MAN A23 Lion's City G EURO VI [g/km], Linie 780

Datum	Einsatzgebiet	Linie	Runde	Dauer	Streckendistanz	Mittlere Geschwindigkeit	Emissionen, [g/km]			Kraftstoffverbrauch, gemessen	NO ₂ /NO _x -Verhältnis
							NO _x	NO ₂	CO ₂		
				[s]	[m]	[km/h]	[l/100 km]	[%]			
23.04.2015	D	780	1	2495	11621,8	16,8	3,90	1,16	1501,63	59,9	30%
23.04.2015	D	780	2	2555	11750,5	16,6	4,19	1,13	1548,57	61,9	27%
23.04.2015	D	780	3	2392	11527,6	17,3	3,67	0,98	1552,20	60,9	27%
23.04.2015	D	780	4	2554	12008,9	16,9	4,30	1,06	1445,76	57,3	25%
Min				2392,0	11527,6	16,6	3,67	0,98	1445,76	57,3	25%
Max				2555,0	12008,9	17,3	4,30	1,16	1552,20	61,9	30%
Mittelwert				2499,0	11727,2	16,9	4,01	1,08	1512,04	60,0	27%
Standardabweichung				76,7	208,8	0,3	0,28	0,08	49,83	2,0	2%
Varianz				5875,3	43602,1	79,7	0,4	0,01	327477	3,9	0,04%
Variationskoeffizient				3,07%	1,78%	1,99%	7,04%	7,07%	3,30%	3,28%	7,50%

4.4 Arbeitsbezogene Ergebnisse, Einsatzgebiet Hagen

Tabelle 17: Ergebnisse Solobus SOLARIS Urbino
12 EURO VI [g/kWh], Linie 512

Datum	Einsatzgebiet	Linie	Runde	Emissionen, [g/kWh]			Arbeit [kWh]
				NO _x	NO ₂	CO ₂	
23.02.2015	HA	512	3	0,30	0,10	637,80	75,46
23.02.2015	HA	512	4	1,06	0,42	704,68	74,70
24.02.2015	HA	512	1	2,02	0,78	685,10	75,21
Min				0,30	0,10	637,80	74,70
Max				2,02	0,78	704,68	75,46
Mittelwert				1,12	0,43	675,86	75,12
Standardabweichung				0,86	0,34	34,39	0,39
Varianz				0,742	0,115	1182,46	0,15
Variationskoeffizient				76,70%	78,17%	5,09%	0,52%

Tabelle 18: Ergebnisse Solobus SOLARIS Urbino
12 EURO VI [g/kWh], Linie 514

Datum	Einsatzgebiet	Linie	Runde	Emissionen, [g/kWh]			Arbeit [kWh]
				NO _x	NO ₂	CO ₂	
23.02.2015	HA	514	2	1,10	0,55	656,12	53,42
24.02.2015	HA	514	2	1,37	0,86	651,12	51,59
24.02.2015	HA	514	3	1,09	0,72	636,01	47,94
Min				1,09	0,55	636,01	47,94
Max				1,37	0,86	656,12	53,42
Mittelwert				1,19	0,71	647,75	50,99
Standardabweichung				0,16	0,15	10,47	2,79
Varianz				0,024	0,024	109,66	7,79
Variationskoeffizient				13,16%	21,70%	1,62%	5,48%

Tabelle 19: Ergebnisse Gelenkbus MAN A23
Lion's City G EURO VI [g/kWh], Linie 512

Datum	Einsatzgebiet	Linie	Runde	Emissionen, [g/kWh]			Arbeit [kWh]
				NO _x	NO ₂	CO ₂	
17.04.2015	HA	512	1	0,60	0,14	766,51	81,23
17.04.2015	HA	512	2	0,62	0,15	754,85	83,88
17.04.2015	HA	512	3	0,69	0,18	750,90	81,42
Min				0,60	0,14	750,90	81,23
Max				0,69	0,18	766,51	83,88
Mittelwert				0,64	0,16	757,42	82,18
Standardabweichung				0,05	0,02	8,11	1,48
Varianz				0,002	0,001	65,80	2,19
Variationskoeffizient				7,43%	15,38%	1,07%	1,80%

Tabelle 20: Ergebnisse Gelenkbus MAN A23
Lion's City G EURO VI [g/kWh], Linie 514

Datum	Einsatzgebiet	Linie	Runde	Emissionen, [g/kWh]			Arbeit [kWh]
				NO _x	NO ₂	CO ₂	
21.04.2015	HA	514	1	1,02	0,31	788,08	55,14
21.04.2015	HA	514	2	0,92	0,26	780,15	54,66
21.04.2015	HA	514	3	0,84	0,20	755,02	55,62
Min				0,84	0,20	755,02	54,66
Max				1,02	0,31	788,08	55,62
Mittelwert				0,92	0,25	774,42	55,14
Standardabweichung				0,09	0,05	17,26	0,48
Varianz				0,008	0,003	297,84	0,23
Variationskoeffizient				9,68%	21,43%	2,23%	0,86%

4.5 Arbeitsbezogene Ergebnisse, Einsatzgebiet Düsseldorf

Tabelle 21: Ergebnisse Solobus SOLARIS
Urbino12 EURO VI [g/kWh], Linie 733

Datum	Einsatzgebiet	Linie	Runde	Emissionen, [g/kWh]			Arbeit [kWh]
				NO _x	NO ₂	CO ₂	
25.02.2015	D	733	1	0,16	0,06	672,24	53,22
25.02.2015	D	733	2	0,11	0,05	658,73	53,24
25.02.2015	D	733	3	0,04	0,01	651,83	55,72
Min				0,04	0,01	651,83	53,22
Max				0,16	0,06	672,24	55,72
Mittelwert				0,10	0,04	660,94	54,06
Standardabweichung				0,06	0,03	10,38	1,44
Varianz				0,003	0,001	107,77	2,07
Variationskoeffizient				54,97%	67,69%	1,57%	2,66%

Tabelle 22: Ergebnisse Solobus SOLARIS
Urbino12 EURO VI [g/kWh], Linie 780

Datum	Einsatzgebiet	Linie	Runde	Emissionen, [g/kWh]			Arbeit [kWh]
				NO _x	NO ₂	CO ₂	
26.02.2015	D	780	1	0,33	0,25	745,94	21,66
26.02.2015	D	780	2	0,10	0,09	720,20	20,58
26.02.2015	D	780	3	0,06	0,05	710,21	19,22
Min				0,06	0,05	710,21	19,22
Max				0,33	0,25	745,94	21,66
Mittelwert				0,17	0,13	725,45	20,48
Standardabweichung				0,14	0,10	18,43	1,22
Varianz				0,020	0,011	339,80	1,49
Variationskoeffizient				86,30%	78,65%	2,54%	5,96%

Tabelle 23: Ergebnisse Gelenkbus MAN A23Lion's City G EURO VI [g/kWh], Linie 725

Datum	Einsatzgebiet	Linie	Runde	Emissionen, [g/kWh]			Arbeit [kWh]
				NO _x	NO ₂	CO ₂	
22.04.2015	D	725	1	1,48	0,40	770,45	49,78
22.04.2015	D	725	2	1,24	0,31	755,98	48,62
22.04.2015	D	725	3	1,16	0,28	752,95	48,44
Min				1,16	0,28	752,95	48,44
Max				1,48	0,40	770,45	49,78
Mittelwert				1,29	0,33	759,79	48,95
Standardabweichung				0,17	0,07	9,36	0,73
Varianz				0,028	0,004	87,53	0,53
Variationskoeffizient				12,94%	19,87%	1,23%	1,49%

Tabelle 24: Ergebnisse Gelenkbus MAN A23 Lion's City G EURO VI [g/kWh], Linie 780

Datum	Einsatzgebiet	Linie	Runde	Emissionen, [g/kWh]			Arbeit [kWh]
				NO _x	NO ₂	CO ₂	
23.04.2015	D	780	1	2,02	0,60	778,37	22,42
23.04.2015	D	780	2	2,09	0,56	773,55	23,52
23.04.2015	D	780	3	1,85	0,50	782,27	22,87
23.04.2015	D	780	4	2,42	0,60	813,66	21,34
Min				1,85	0,50	773,55	21,34
Max				2,42	0,60	813,66	23,52
Mittelwert				2,09	0,56	786,96	22,54
Standardabweichung				0,24	0,05	18,15	0,92
Varianz				0,056	0,002	329,49	0,85
Variationskoeffizient				11,34%	8,66%	2,31%	4,08%

4.6 Geschwindigkeitsverteilung

Die Abbildung 17 zeigt die kumulierten Geschwindigkeitsverteilungen der Testfahrzeuge auf einzelnen Strecken in Hagen. Hierbei ist zu beobachten, dass die Linie 512 bedingt durch viele Überlandanteile deutlich schneller ist als die Linie 514. Dies drückt sich durch das Abknicken der Kurven oberhalb von 35 km/h aus. Diese Geschwindigkeitsanteile sind vornehmlich den Bereichen außerhalb des Innenstadtverkehrs zuzuordnen. In den unteren Geschwindigkeitsbereichen unterscheiden sich die Linien kaum. Die hier sichtbaren Abweichungen der beiden Streckenführungen in der kumulierten Häufigkeitsverteilung sind im Wesentlichen auf unterschiedliche Stillstandsanteile zurückzuführen.

In Abbildung 18 ist die Geschwindigkeitsverteilung der Testfahrzeuge auf den Streckenführungen in Düsseldorf dargestellt. Im Vergleich mit der Darstellung für die Stadt Hagen fällt auf, dass die Stillstandsanteile in Düsseldorf höher sind als in Hagen. Der weitere Kurvenverlauf zeigt sich in Düsseldorf eher flacher. Dies bedeutet, dass der Streckenbetrieb eher mit höheren Geschwindigkeitsanteilen gefahren wird.

Eine zweite Auffälligkeit ist die Tatsache, dass in Hagen die Kurvenverläufe der kumulierten Häufigkeitsverteilung eindeutig streckenabhängig sind. D.h., dass beide Fahrzeuge auf den unterschiedlichen Linienführungen ganz ähnlich fahren. Betrachtet man hingegen die Kurvenverläufe in Düsseldorf, ist zu erkennen, dass die von beiden Bussen befahrene Streckenführung der Linie 780 bei den beiden Fahrzeugen deutlich unterschiedliche Verläufe besitzt. Der Gelenkbus hat einen deutlich höheren Stillstandsanteil und auch einen steileren Anstieg bei den geringen Geschwindigkeiten. Dies zeigt eindeutig, dass für dieses Fahrzeug ein höherer Stop and Go-Anteil vorlag. Dies deckt sich mit der Beobachtung von größeren Behinderungen durch Baustellen- und Verkehrssituation bei der Messung des MAN Gelenkbusses. Die zweite Gelenkbuslinie (Linie 725) hat zwar die gleichen Stillstandsanteile wie die beiden Solobuslinien, zeigt sich aber im weiteren Verlauf als sehr langsame Linienführung. Die Auswertungen der Geschwindigkeitsdiagramme sind für die spätere Beurteilung des Emissionsverhaltens wichtig.

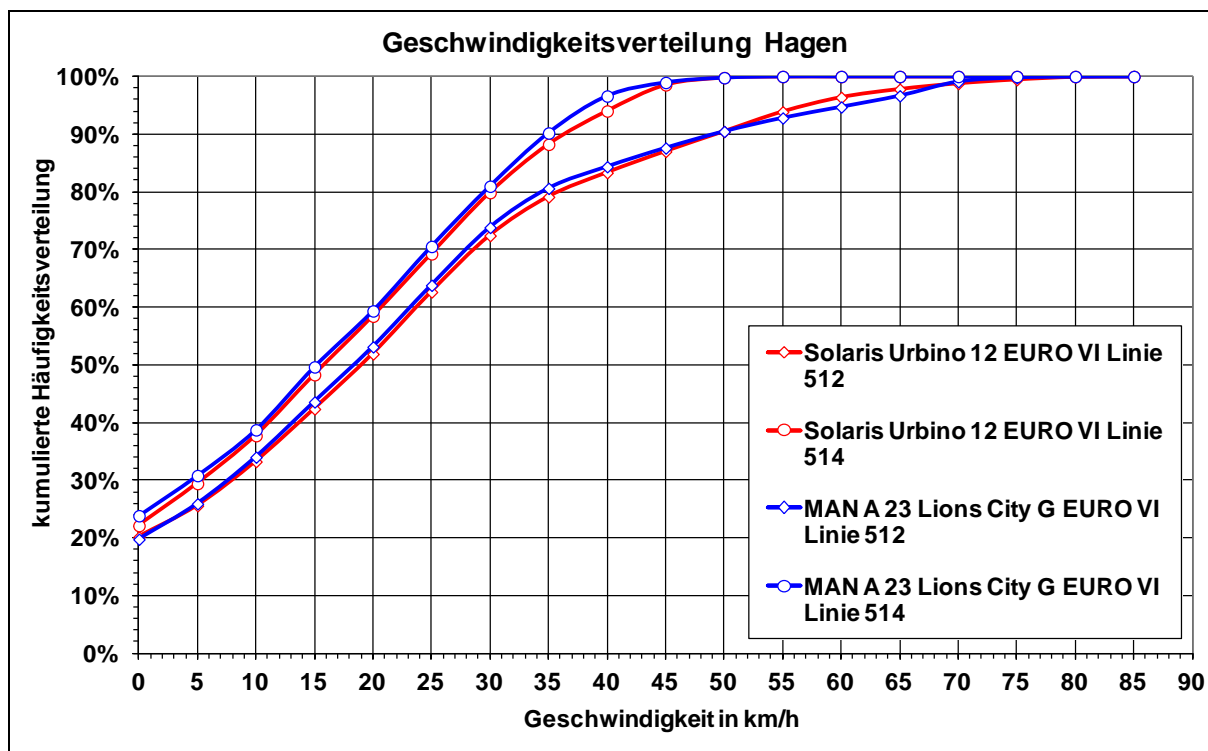


Abbildung 17: kumulierte Geschwindigkeitshäufigkeiten, Einsatzgebiet Hagen

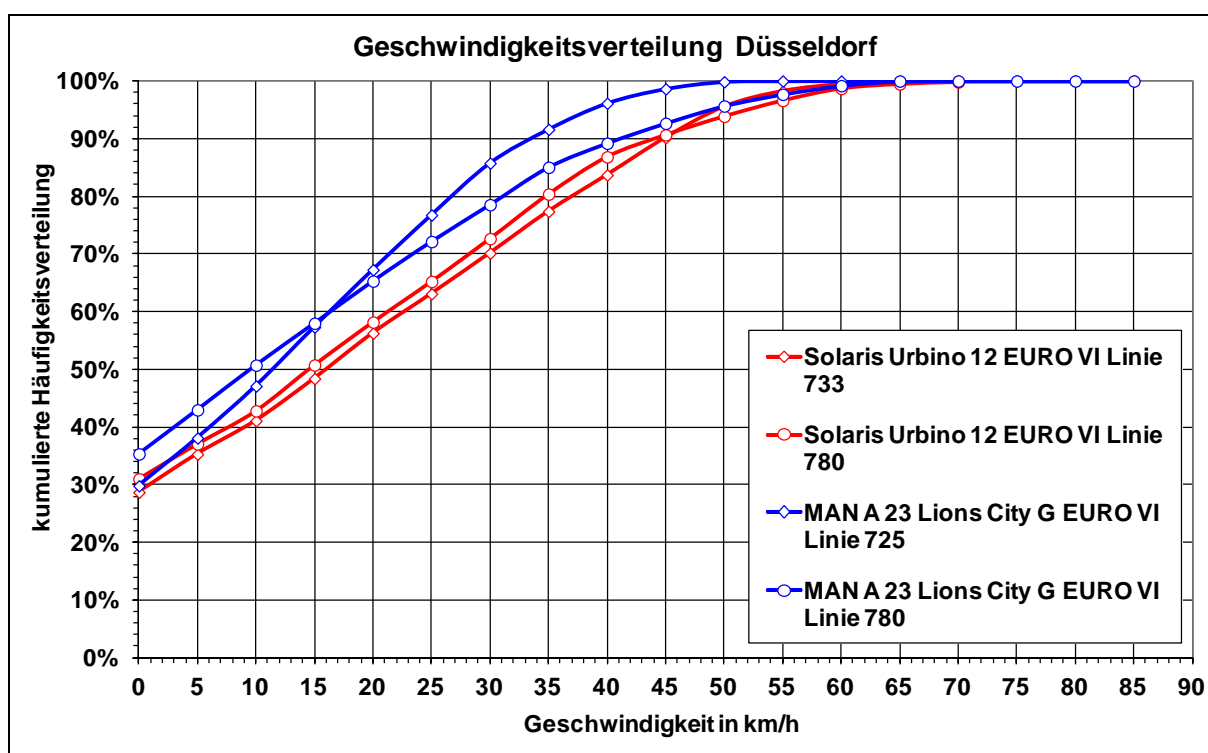


Abbildung 18: kumulierte Geschwindigkeitshäufigkeiten, Einsatzgebiet Düsseldorf

4.7 Geschwindigkeitsabhängige Darstellung der NO_x-Emissionen

Abbildung 19 zeigt die NO_x-Emissionen der Testfahrzeuge auf den Streckenführungen in Hagen in [g/km] dargestellt über der mittleren Geschwindigkeit für alle Fahrten. Zum Vergleich sind zusätzlich die Emissionen der EEV-Fahrzeuge, die in früheren Forschungsvorhaben des LANUV [4] auf den gleichen Strecken vermessen wurden, aufgetragen.

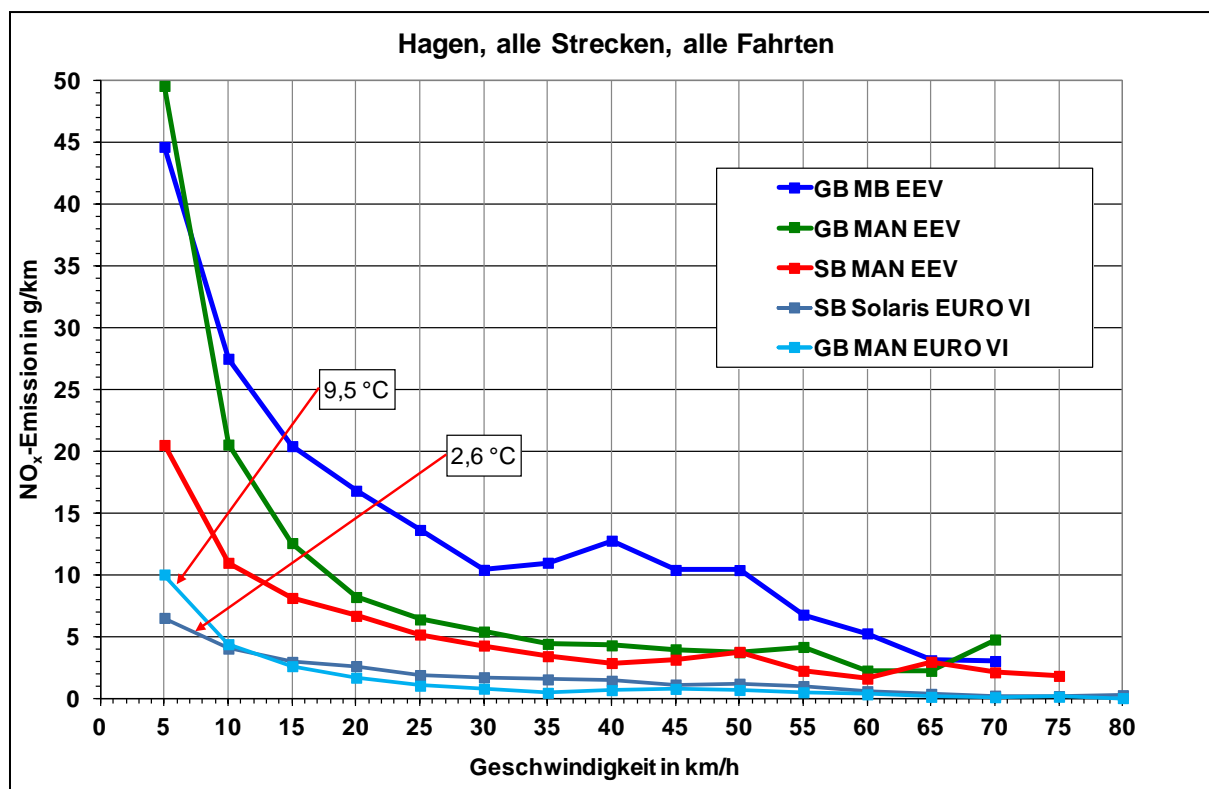


Abbildung 19: NO_x-Emissionen in [g/km] in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit, Einsatzgebiet Hagen

Die Darstellung in Abbildung 19 zeigt die mittleren NO_x-Emissionen aufgetragen über Geschwindigkeitsklassen und gibt einen guten Überblick über das Gesamtemissionsverhalten in der Stadt Hagen. Es ist zu erkennen, dass die beiden EURO VI-Fahrzeuge insbesondere in den niedrigen Geschwindigkeitsbereichen des innerstädtischen Verkehrs deutlich geringere Emissionen zeigen als alle vermessenen EEV-Fahrzeuge. Auffällig ist auch, dass der Gelenkbus mit Ausnahme der kleinsten Geschwindigkeitsklasse gleiche oder geringere Emissionen im Vergleich zum Solobus aufweist. Betrachtet man noch die äußeren Bedingungen ist zu erkennen, dass bedingt durch die geringe mittlere Außentemperatur die Verhältnisse für den Solobus noch etwas ungünstiger sind als für den Gelenkbus.

Möchte man die Frage beantworten, wie sich die Emissionen im Vergleich zu den Typprüfergebnissen verhalten, muss man eine Darstellung der Emissionen bezogen auf die geleistete Arbeit wählen. Da das Motorleistungssignal erst für EURO VI-Fahrzeuge verfügbar ist, fehlt in der Darstellung der Vergleich mit den EEV-Fahrzeugen. Als Orientierung sind noch die Grenzwerte in den Typprüfzyklen mit 2 g/kWh für die EEV-Fahrzeuge und 460 mg/kWh für EURO VI-Fahrzeuge eingetragen. Zu erkennen ist die deutliche Unterschreitung der EEV Grenzwerte über nahezu den gesamten Geschwindigkeitsbereich, wobei die 460 mg/kWh erst bei höheren Geschwindigkeiten unterschritten werden.

Interessanterweise stellt sich in Hagen der Gelenkbus trotz höherer Masse als günstiger heraus. Der Solobus zeigt, wahrscheinlich bedingt durch die geringere Außentemperatur und die allgemein schwierigen Randbedingungen in Hagen, ein schlechteres Abgasverhalten. Wie schon in den früheren Untersuchungen gezeigt [4], hängt die Effektivität der Abgasnachbehandlungssysteme, betrachtet über den realen Fahrstrecken direkt von der Abgas-temperaturverteilung und der Häufigkeit der Erfüllung der Harnstoffeindüsebedingungen ab. Für den Solobus scheinen unter den Hagener Randbedingungen die Eindüsebedingungen deutlich seltener erfüllt zu sein.

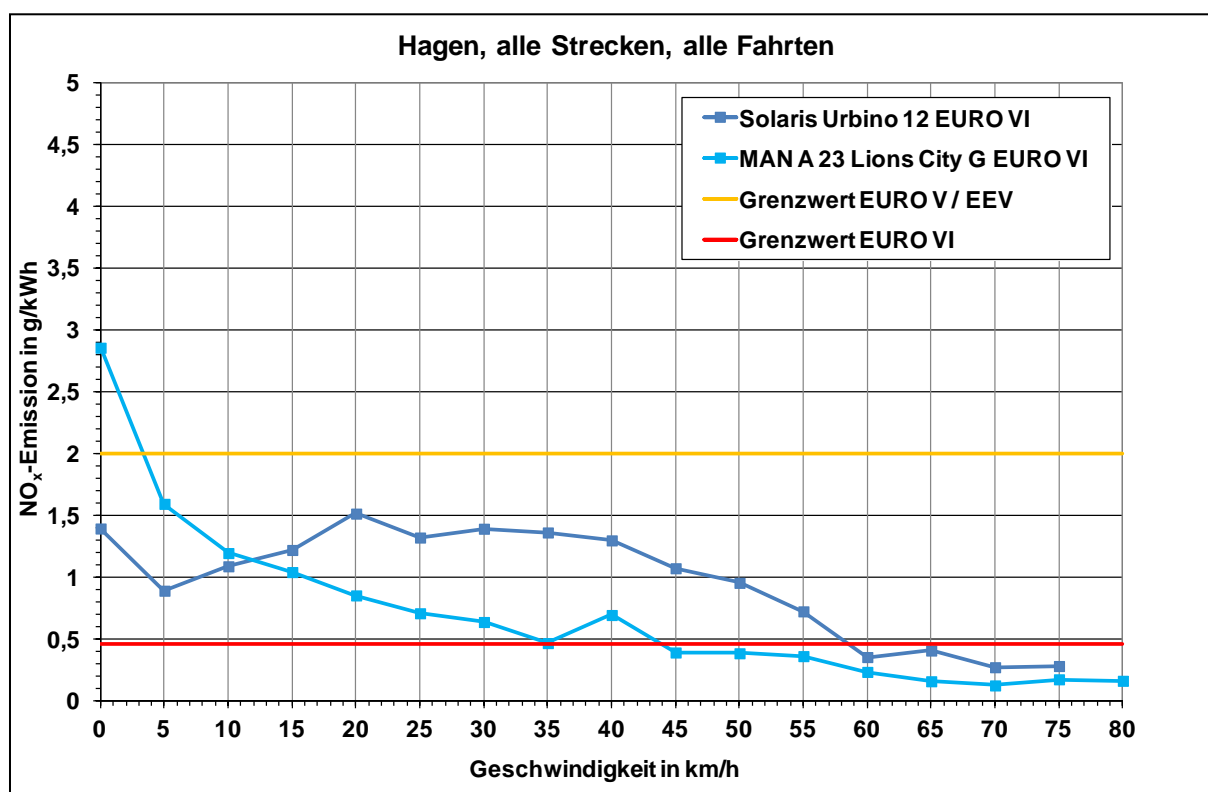


Abbildung 20: NO_x-Emissionen in [g/kWh] in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit, Einsatzgebiet Hagen

Stellt man das Emissionsverhalten in gleicher Form für Düsseldorf dar, ergeben sich Abbildung 21 und Abbildung 22. Leider können hier nicht Ergebnisse für EEV-Fahrzeuge gegenübergestellt werden, da diese Untersuchungen nur in Hagen durchgeführt wurden [4]. Wie erwartet wirken sich die günstigeren Randbedingungen des Düsseldorfer Busbetriebs günstig aus, dies allerdings nur für den Solobus. Das Emissionsverhalten des Solobusses zeigt über den gesamten Geschwindigkeitsbereich sehr niedrige Werte. Sehr deutlich wird dies auch bei Betrachtung der leistungsbezogenen Darstellung. Über den gesamten Geschwindigkeitsbereich emittiert das Fahrzeug weit unterhalb der EURO VI-Zyklusgrenzwerte. Es ist noch darauf hinzuweisen, dass auch in Düsseldorf mit 5,8°C durchschnittlicher Umgebungstemperatur immer noch eher winterliche Temperaturverhältnisse während der Messfahrt geherrscht haben. Trotz dieser widrigen Umstände scheint das Abgasnachbehandlungssystem sehr gut zu funktionieren.

Betrachtet man die Ergebnisse des Gelenkbusses, entsprechen diese nicht den Erwartungen im Vergleich zu den Ergebnissen in Hagen. Zwar liegen die leistungsbezogenen Emissionen nahezu überall deutlich unterhalb der EEV-Grenzwerte, jedoch oberhalb der EURO VI Grenzwerte. Auf der Suche nach den Gründen für dieses Verhalten können die Erkenntnisse aus den Geschwindigkeitsverteilungsbetrachtungen weiterhelfen. Der nachgewiesene größere Anteil an Stop and Go-Verkehr und die „langsamen“ Streckenführungen führen zu geringen Durchschnittsgeschwindigkeiten, wie auch in Tabelle 15 und Tabelle 16 erkennbar.

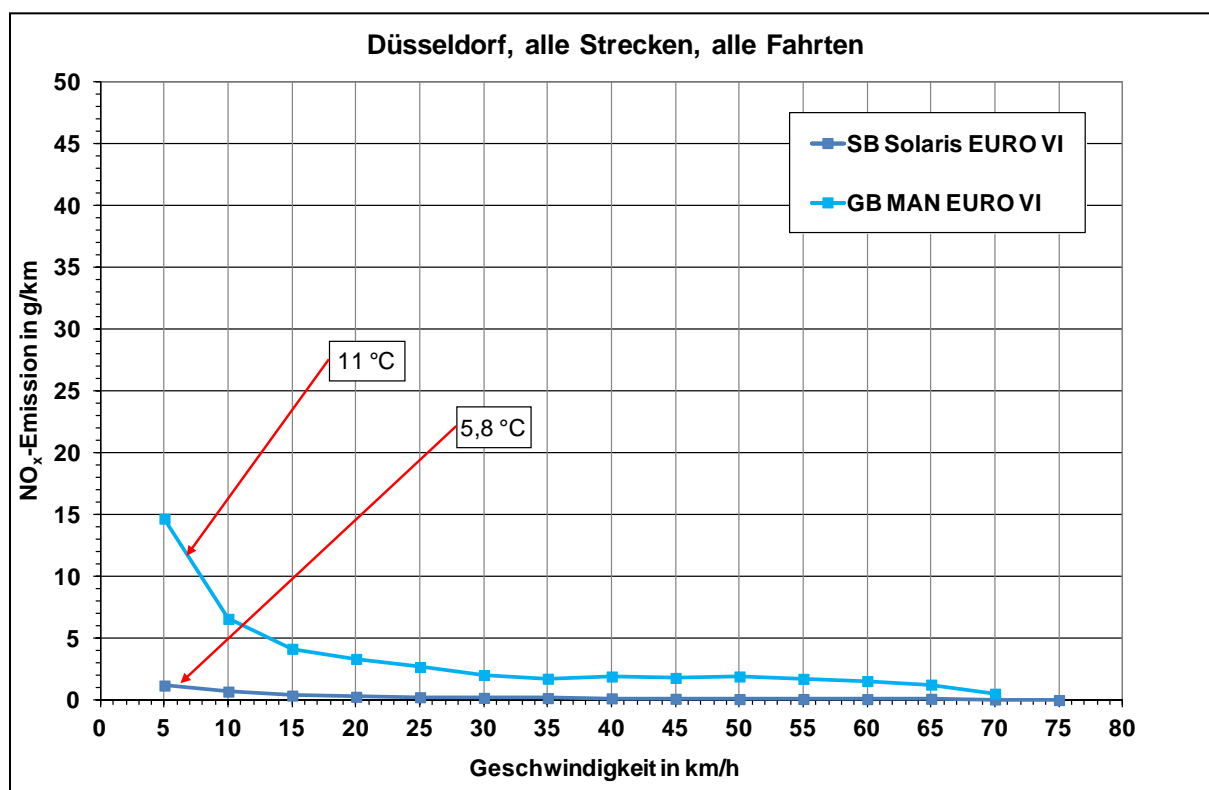


Abbildung 21: NO_x-Emissionen in [g/km] in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit, Einsatzgebiet Düsseldorf

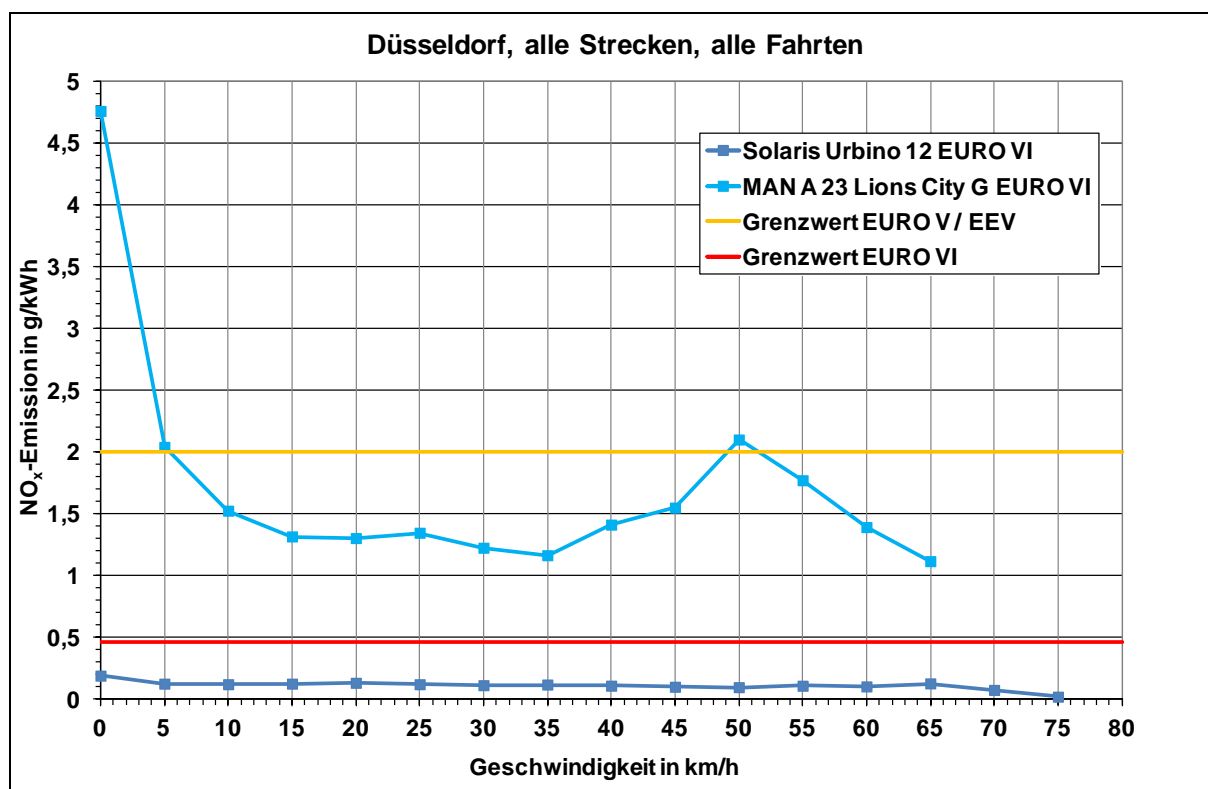


Abbildung 22: NO_x-Emissionen in [g/kWh] in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit, Einsatzgebiet Düsseldorf

Diese Überlegungen werden durch Abbildung 22 bestätigt. Der starke Anstieg der Emissionen in den kleinsten Geschwindigkeitsklassen ist dem Stop and Go-Verkehr geschuldet. Der weitere langsame Fahrtverlauf (siehe Abbildung 18) lässt das Abgasnachbehandlungssystem nicht optimale Betriebsbedingungen erreichen.

4.8 Abgastemperaturverteilungen

Die Abbildung 23 und die Abbildung 24 zeigen die kumulierte Häufigkeitsverteilung der Abgastemperatur vor der Abgasnachbehandlung für beide Fahrzeuge und alle gefahrenen Linien in Hagen und Düsseldorf. Für den Solobus (Solaris) ist hier deutlich der Unterschied zwischen den beiden Einsatzorten Hagen und Düsseldorf zu erkennen. Die Fahrten in Hagen verlaufen zu großen Zeitanteilen bei niedrigeren Abgastemperaturen als die Fahrten in Düsseldorf. Nachvollziehbar ist, dass die Eindüselfreigabebedingungen für den Harnstoff in Hagen seltener erreicht werden als in Düsseldorf. Die Veränderung zwischen Hagen und Düsseldorf reicht aber auf jeden Fall aus, um in Düsseldorf ein gut funktionierendes Abgasnachbehandlungssystem vorzufinden.

Bei der Betrachtung der Temperaturverteilungen für den MAN-Gelenkbus ist zunächst erkennbar, dass alle Kurvenverläufe in einem relativ schmalen Schwankungsbereich liegen. Dies passt zu der Beobachtung, dass die Emissionen in Hagen und Düsseldorf nicht sehr weit auseinander liegen. Offensichtlich reichen diese Temperaturverläufe nicht aus, die Abgasnachbehandlung mit dem gewünscht hohen Wirkungsgrad funktionieren zu lassen.

Ein Indiz dafür, dass die Fahrten auf der Linie 780 mit dem Gelenkbus nicht als typisch zu bezeichnen sind, ist in der Temperaturänderung zwischen den Linienführungen 514 in Hagen und 780 in Düsseldorf beim Solobus zu finden. Die Betriebsunterschiede machen hier einen ganz wesentlichen Unterschied in der kumulierten Häufigkeitsverteilung der Abgastemperatur aus. Eine ähnliche Veränderung wäre auch beim Gelenkbus zu erwarten, ist aber nicht existent. Hätte die Linienführung 780 mit beiden Fahrzeugen mit einer Geschwindigkeitsverteilung gefahren werden können, wie sie beim Solobus vorzufinden war (siehe Abbildung 18), wären auch für den Gelenkbus andere Emissionsergebnisse zu erwarten gewesen, was aber leider nicht belegt werden kann, da keine Messungen in einem ungestörten Betrieb auf der Linie 780 vorliegen. Die Analyse der Betriebsrandbedingungen konnte die obigen Ergebnisse bestätigen. So liegen die Durchschnittsgeschwindigkeiten bei den Gelenkbusfahrten auf der Linie 780 deutlich unterhalb der Geschwindigkeiten des Solobus. Auch die Stopanteile sind für den Gelenkbus höher. Dies bestätigt den subjektiven Eindruck, dass bei den Befahrungen der Linie 780 mit dem Gelenkbus mehr Störungen durch Baustellen und sonstige Verkehrsstörungen vorlagen. Zusammenfassend kann man sagen, dass der Solobus die Erkenntnisse aus den vorherigen LANUV-Untersuchungen [3, 4] zu den Betriebsunterschieden zwischen Hagen und Düsseldorf bestätigt und dies auch deutlich in der Abgastemperaturverteilung zu erkennen ist. Dieser Unterschied ist beim Gelenkbus nicht in der erwarteten Form erkennbar, was sich auch in den Emissionsergebnissen zeigt.

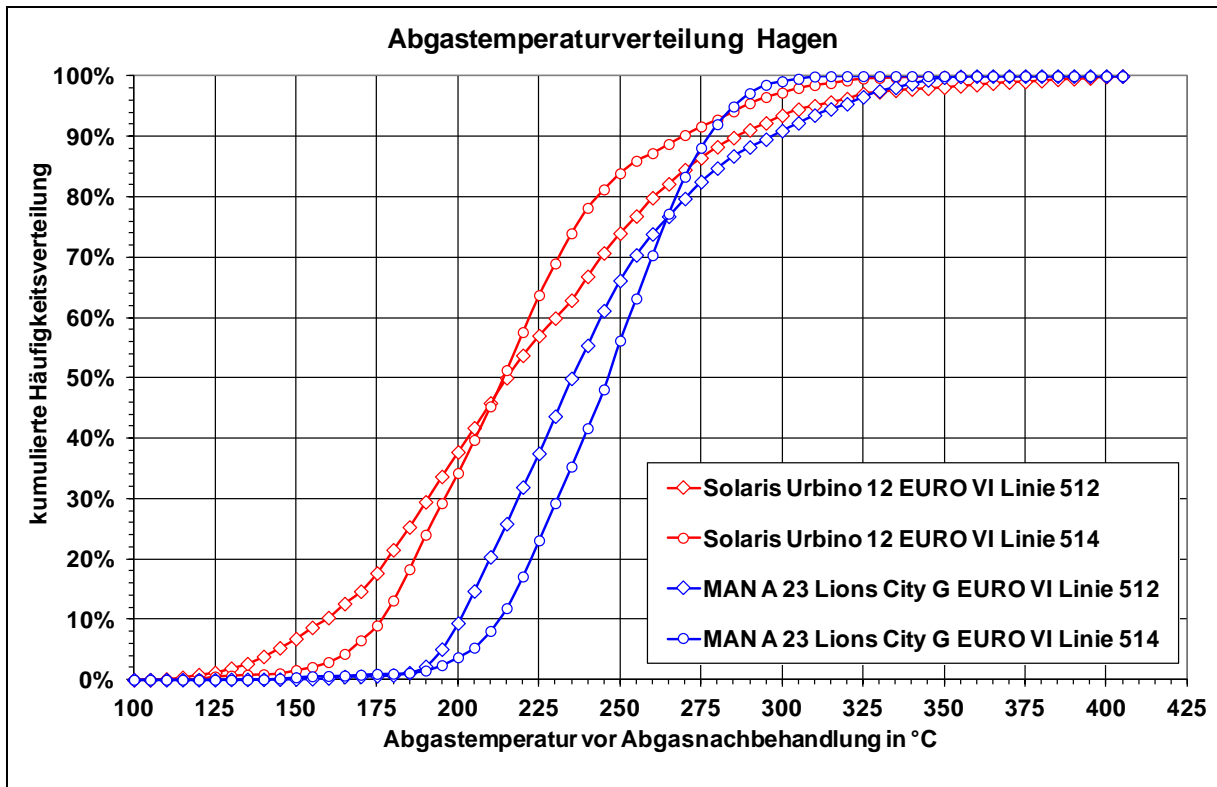


Abbildung 23: Abgastemperaturverteilung auf allen gefahrenen Linien in Hagen

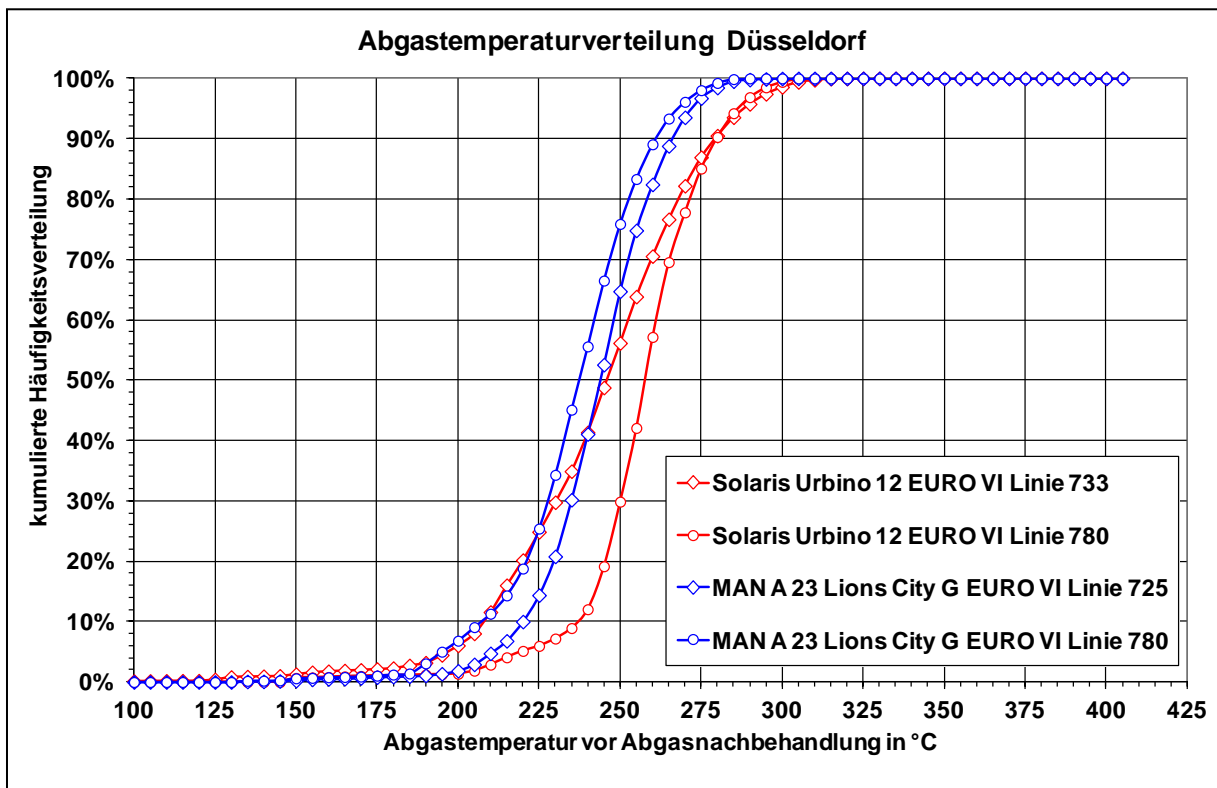


Abbildung 24: Abgastemperaturverteilung auf allen gefahrenen Linien in Düsseldorf

4.9 Geschwindigkeitsabhängige Darstellung der NO₂-Emissionen

Stellt man in gleicher Form wie Abbildung 19 die NO₂-Emissionen dar, ergibt sich Abbildung 25. Auch bei NO₂ zeigen die beiden EURO VI-Fahrzeuge deutlich geringere Emissionen als die in Hagen vermessenen EEV-Fahrzeuge. Für die Betrachtung in Düsseldorf fehlt der Vergleich zu den EEV-Fahrzeugen, da diese nur in Hagen vermessen wurden (siehe Abbildung 26). Für den Solobus ist auch bei der NO₂-Emission die deutlich bessere Funktionalität der Abgasnachbehandlung auf den Streckenführungen in Düsseldorf zu erkennen.

Die arbeitsbezogenen Darstellungen sind in Abbildung 27 und Abbildung 28 sehen.

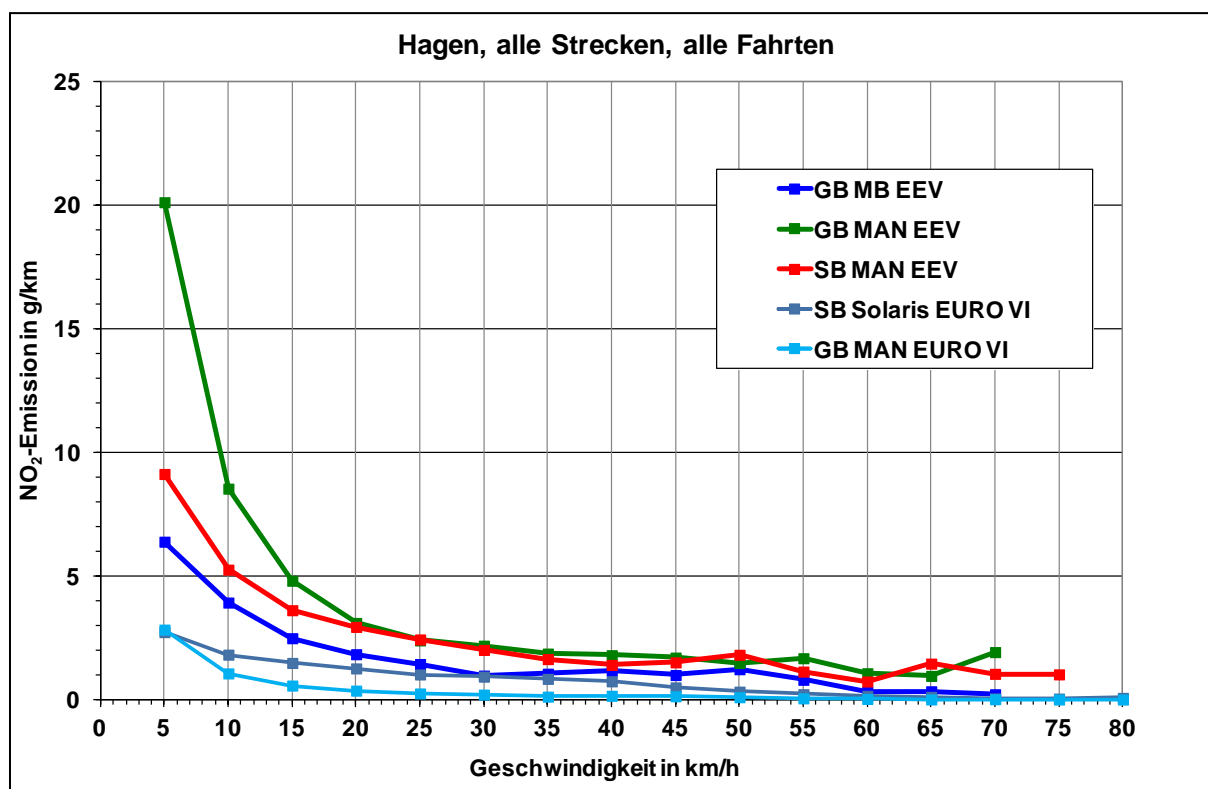


Abbildung 25: NO₂-Emissionen in [g/km] in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit, Einsatzgebiet Hagen

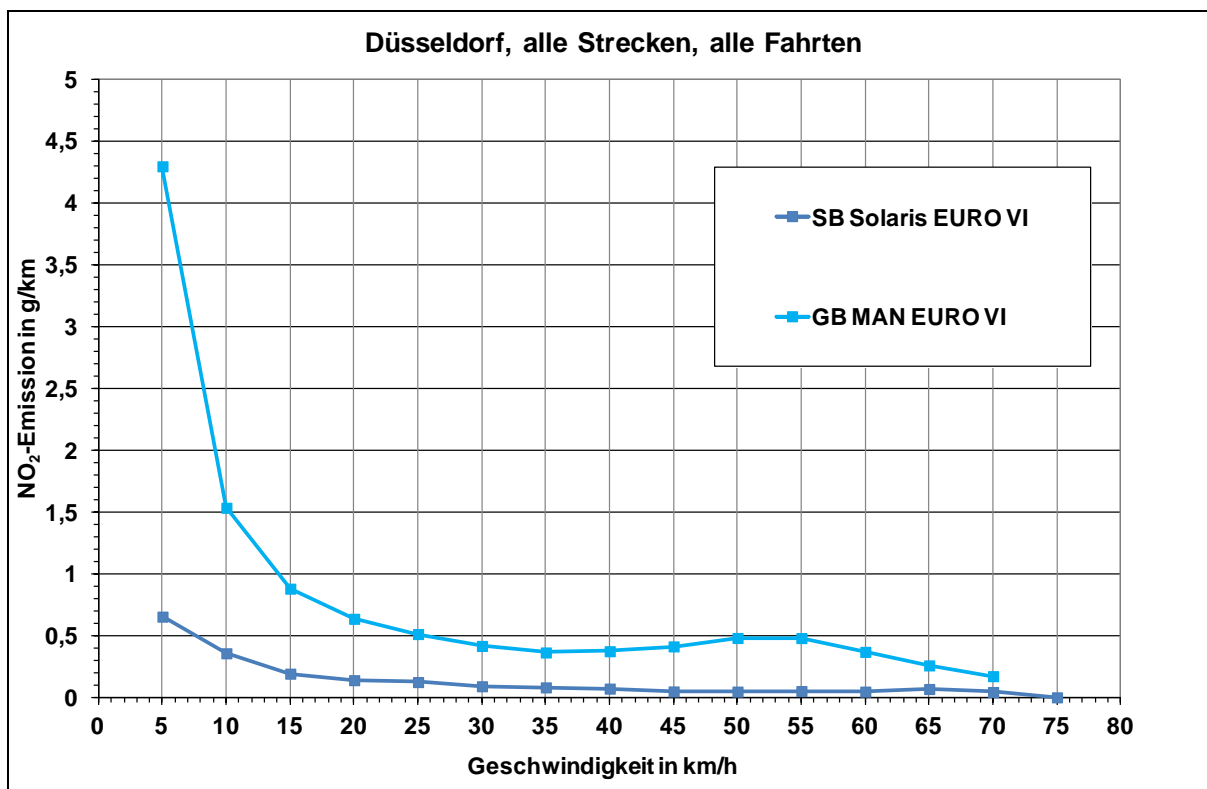


Abbildung 26: NO₂-Emissionen in [g/km] in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit, Einsatzgebiet Düsseldorf

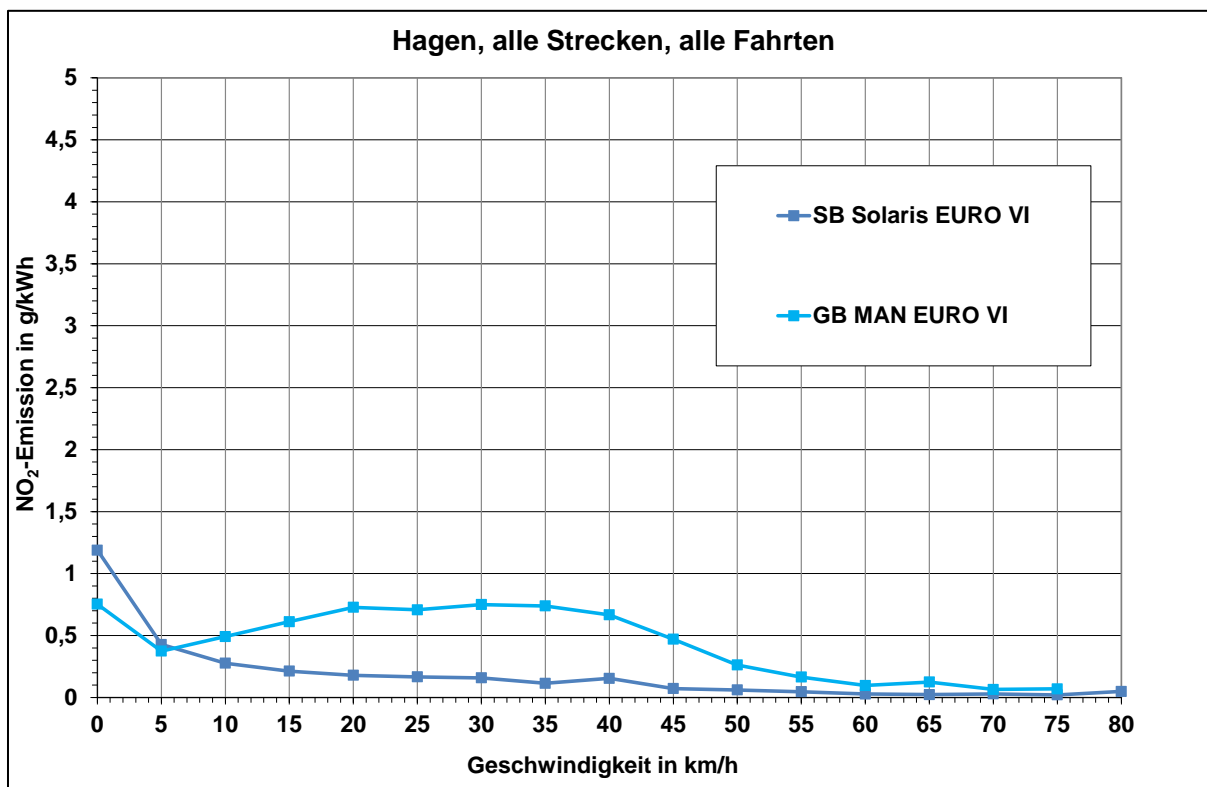


Abbildung 27: NO₂-Emissionen in [g/kWh] in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit, Einsatzgebiet Hagen

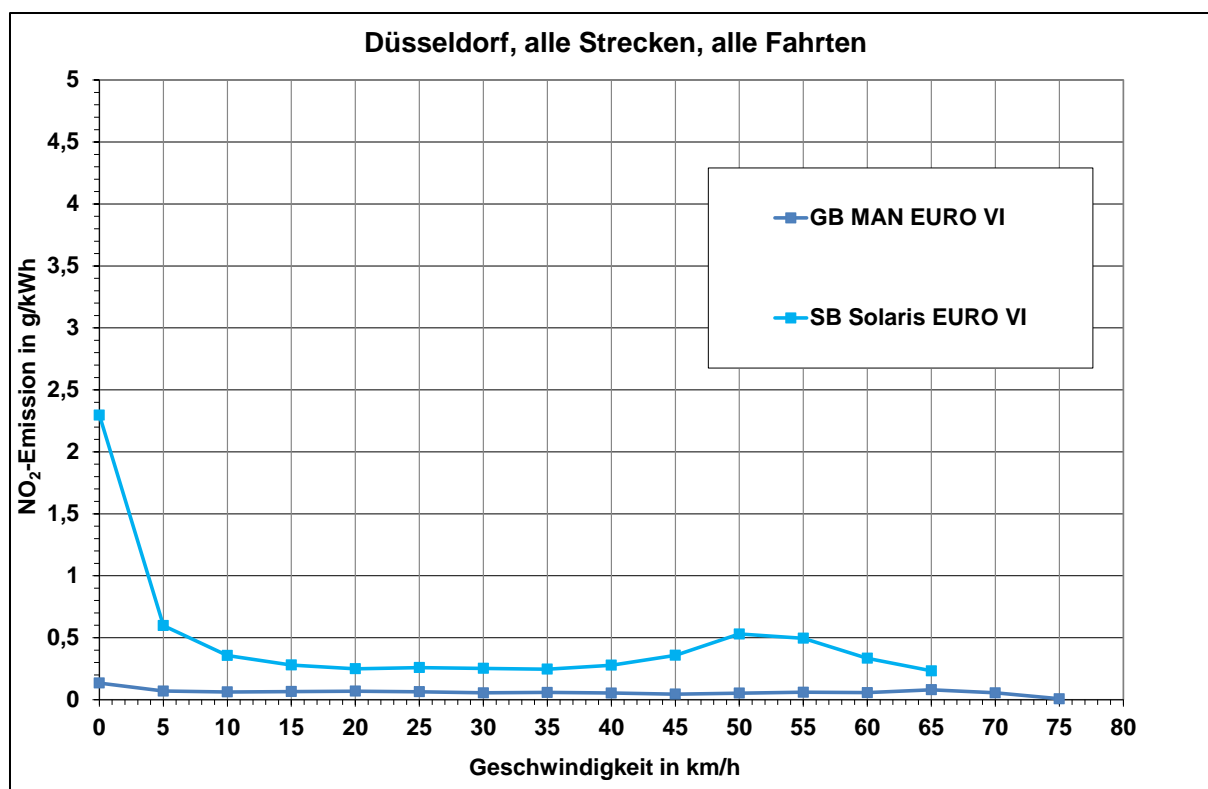


Abbildung 28: NO₂-Emissionen in [g/kWh] in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit, Einsatzgebiet Düsseldorf

4.10 NO₂/NO_x-Verhältnisse

Die NO₂/NO_x-Verhältnisse im Rohabgas eines Dieselmotors liegen üblicherweise unter 10%. Durch katalytische Oxidation von NO zu NO₂ in der Abgasnachbehandlung steigt dieses Verhältnis. Die höheren NO₂-Anteile sind aus zwei Gründen erwünscht. So wird für die passive Regeneration des Partikelfilters NO₂ als Sauerstofflieferant für die Kohlenstoffoxidation bei niedrigen Temperaturen benötigt, darüber hinaus wird zum optimalen Betrieb des SCR-Katalysators ein NO₂/NO_x-Verhältnis von ca. 50% vor dem Katalysator angestrebt. Die letztendlich gemessenen NO₂/NO_x-Verhältnisse sind also immer das Ergebnis des Zusammenspiels von Oxidationskatalysator, Partikelfilter und SCR-Katalysator.

Abbildung 29 zeigt die mittleren NO₂/NO_x-Verhältnisse der beiden Versuchsfahrzeuge auf den unterschiedlichen Streckenführungen. Zu erkennen ist, dass das Solofahrzeug durchweg mit höheren NO₂/NO_x-Verhältnissen aufwartet. Dies deutet auf eine hohe Oxidationsleistung hin. Die gezeigten Verhältnisse sagen allerdings nichts über die absolute Höhe der Emissionen aus.

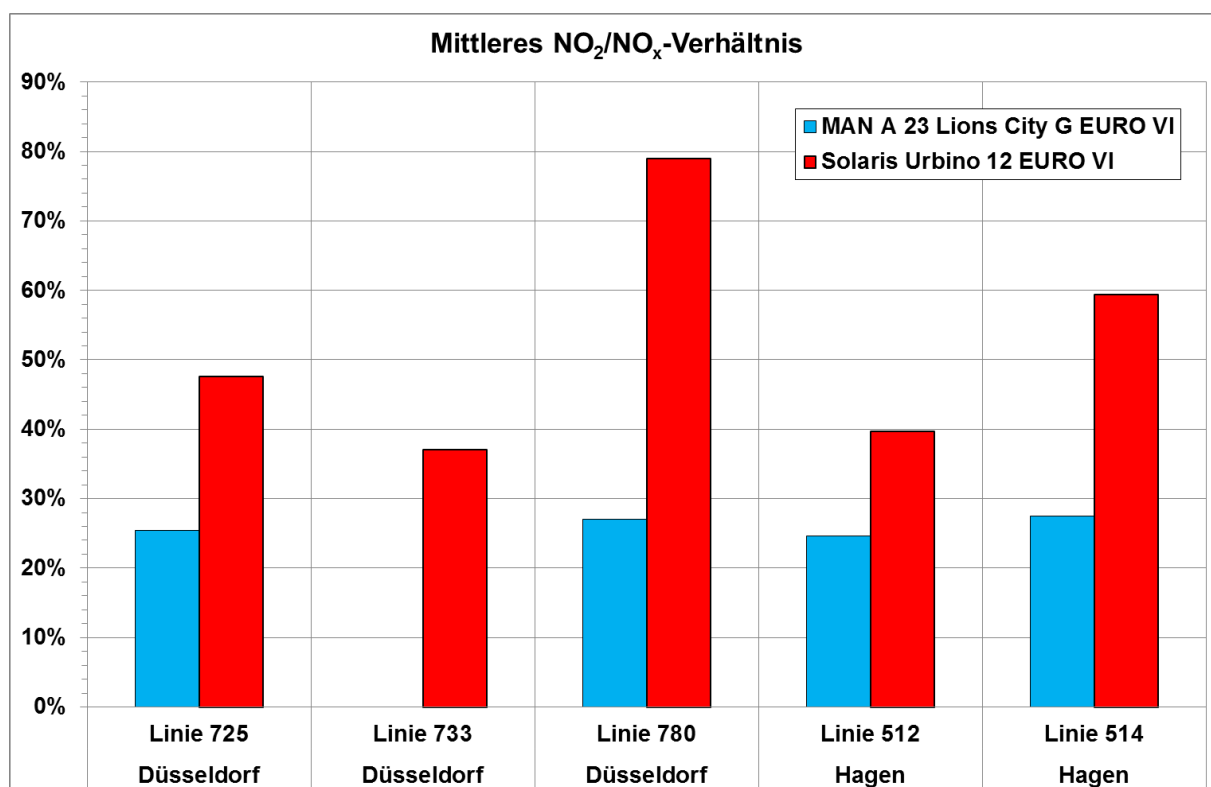


Abbildung 29: Vergleich der mittleren NO₂/NO_x-Verhältnisse für Solobus und Gelenkbus auf allen Linienführungen

Abbildung 30 und Abbildung 31 zeigen die sekundlichen Emissionsmassen für NO₂ und NO jeweils für die Linie 512 in Hagen und die Linie 780 in Düsseldorf. Auch in diesen Bildern ist sehr gut der Unterschied zwischen den beiden Einsatzorten für das Solofahrzeug zu erkennen. Während in Hagen noch nicht die beste Effektivität der Abgasnachbehandlung erreicht ist, erkennt man in Düsseldorf deutlich die hohen Umsatzraten. Für den Gelenkbus bestätigen auch diese Darstellungen, dass das Nachbehandlungssystem in Hagen sogar günstigere Emissionen bewirkt als beim Solobus, die Umsatzleistung in Düsseldorf allerdings nicht gesteigert werden konnte.

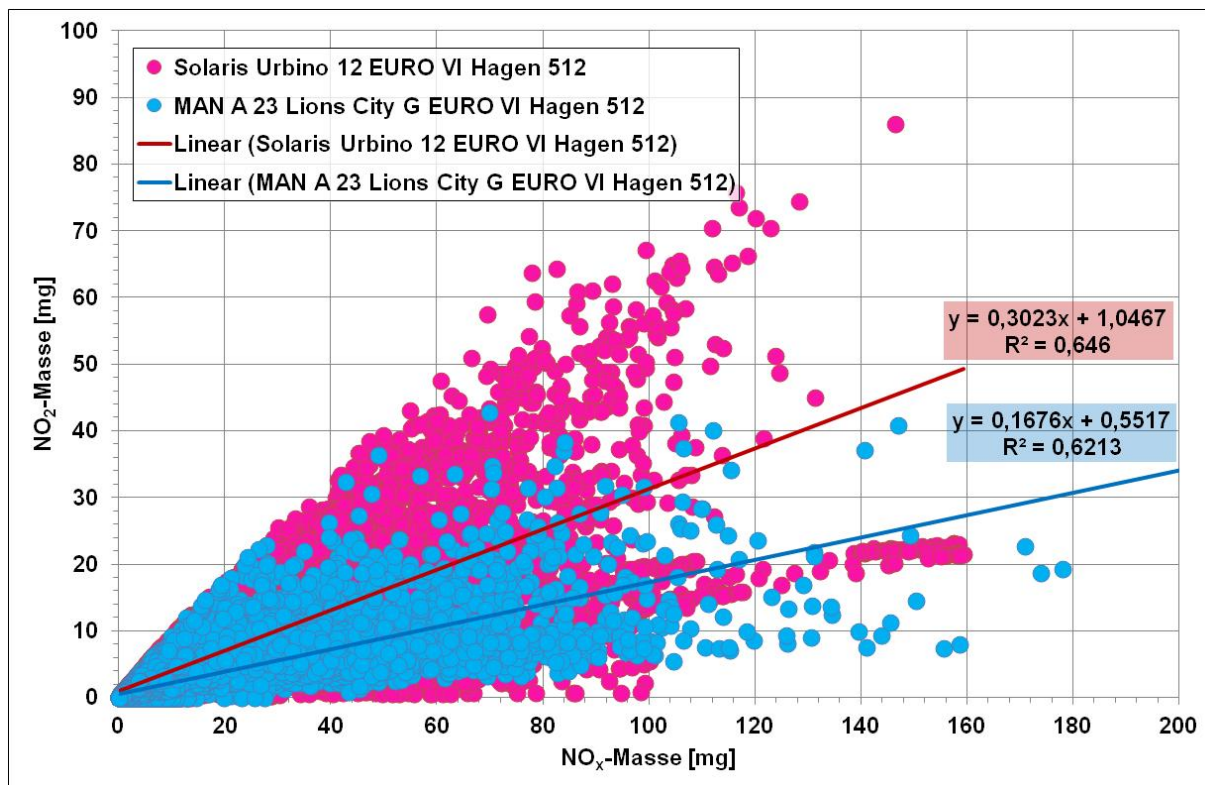


Abbildung 30: NO_x- und NO₂-Massen auf der Linie 512, Hagen

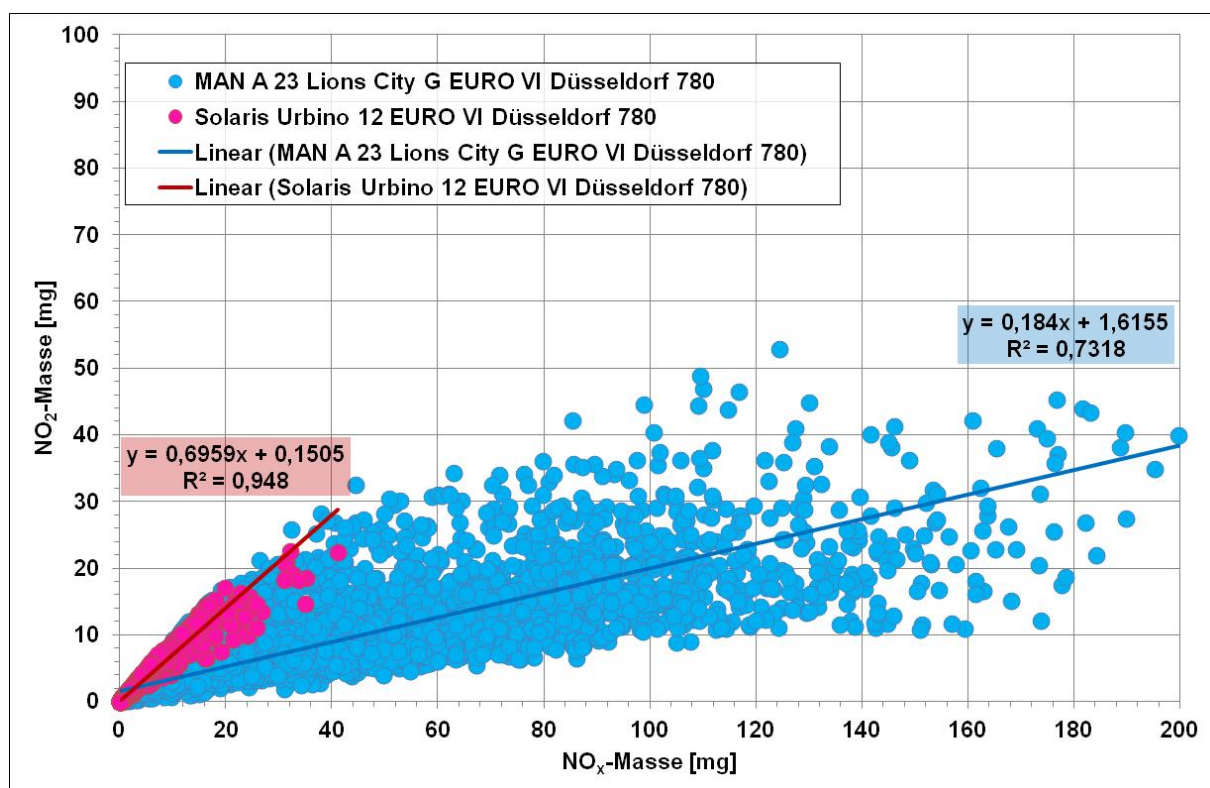


Abbildung 31: NO- und NO₂-Massen auf der Linie 780, Düsseldorf

5 Zusammenfassung

In vorhergehenden LANUV-Projekten wurden die Realemissionen von Nahverkehrsbussen mit älteren EU-Emissionsstandards vermessen [2, 3, 4]. Als Fortsetzung dieses Projektes wurden nunmehr Realemissionen von Bussen des öffentlichen Nahverkehrs mit dem Emissionsstandard EURO VI untersucht. Die Untersuchung erfolgte mit einem Solobus (Solaris Urbino 12) und einem Gelenkbus (MAN A23 Lion's City G), jeweils mit serienmäßiger Abgasnachbehandlungsanlage, auf Linienführungen in Hagen und Düsseldorf.

Die Streckenführungen in Hagen und Düsseldorf weisen starke Unterschiede in ihren Betriebsrandbedingungen auf. Schon in den früheren Projekten konnte gezeigt werden, dass diese Randbedingungen sich deutlich auf das Emissionsverhalten der Versuchsfahrzeuge auswirken. Für die Emissionskomponenten CO, HC und Partikel liegen alle gemessenen Werte auf sehr niedrigen Niveaus, was auf die Oxidationskatalysatoren und die verbauten geschlossenen Partikelfilter zurückzuführen ist. Aus Sicht der Luftreinhalteplanung sind Stickoxidemissionen kritisch zu betrachten, weshalb die Beurteilung der Fahrzeuge daher im Wesentlichen auf Basis der Emissionsergebnisse für Stickoxide erfolgte.

Allgemein wurden für die EURO VI-Busse auch unter eher winterlichen Bedingungen Emissionen beobachtet, die deutlich unter den bekannten Ergebnissen von EEV-Fahrzeugen liegen. In Hagen liegen Betriebsrandbedingungen vor, die geringe Abgastemperaturen zur Folge haben (Schritttempo in Fußgängerzonen). Dies macht den Betrieb von Abgasnachbehandlungssystemen sehr anspruchsvoll. Der schwerere Gelenkbus zeigt hier im realen Fahrbetrieb günstigere mittlere Emissionswerte als das Solofahrzeug. Die mittleren Emissionswerte beider Fahrzeuge liegen deutlich unterhalb der EURO V- / EEV-Grenzwerte, unterschreiten aber erst bei höheren Geschwindigkeiten die EURO VI-Grenzwerte (Solobus ab 60 km/h, Gelenkbus ab 35 km/h).

Im Gegensatz hierzu stehen die Emissionsergebnisse in Düsseldorf. Das Solofahrzeug erreicht Abgastemperaturen, mit denen die Abgasnachbehandlungssysteme mit hohen Wirkungsgraden betrieben werden können. Die Emissionsergebnisse liegen sehr niedrig und sind bei der arbeitsbezogenen Darstellung in allen Geschwindigkeitsbereichen deutlich unter den Zyklusgrenzwerten der EURO VI-Abgasnorm. Diese Unterschiede in den Emissionsergebnissen zwischen Hagen und Düsseldorf aufgrund der Betriebsrandbedingungen beim Solobus bestätigen die Ergebnisse früherer Untersuchungen [3, 4]. Für das Gelenkfahrzeug konnten diese deutlichen Unterschiede zwischen Hagen und Düsseldorf nicht beobachtet werden. Beim Gelenkbus liegen die Emissionsergebnisse in Düsseldorf in ähnlichen Größenordnungen wie in Hagen. Auf einer Strecke überschreitet die mittlere Emission des Gelenkbusses den Abgasgrenzwert nach EURO V / EEV. Die Analyse der Betriebsrandbedingungen beim Betrieb des Gelenkbusses in Düsseldorf zeigte deutlich größere Störeinflüsse wie Baustellen und weitere Verkehrsstörungen. Es konnte gezeigt werden, dass dieses störungsbedingte Abgastemperaturverhalten in Düsseldorf mit dem betriebsbedingten Verhalten in Hagen vergleichbar war.

Die direkte Vergleichbarkeit der beiden Fahrzeuge auf der gleichen Streckenführung in Düsseldorf ist hierdurch leider nicht gegeben.

NO₂/NO_x-Verhältnisse im Rohabgas eines Dieselmotors liegen üblicherweise unter 10%. Durch katalytische Oxidation von NO zu NO₂ in der Abgasnachbehandlung steigt dieses Verhältnis. Zum optimalen Betrieb eines SCR-Katalysators wird ein NO₂/NO_x-Verhältnis von

ca. 50% vor dem Katalysator angestrebt. Die Untersuchung der NO_2/NO_x -Verhältnisse zeigen Höchstwerte für den Solobus von geringfügig unter 80%. Diese Werte wurden bei Fahrten in Düsseldorf mit sehr hohen Umsatzraten der Nachbehandlung ermittelt. Die absoluten Emissionsmassen sind nicht höher als bei Fahrten mit deutlich geringeren NO_2/NO_x -Verhältnissen.

EURO VI-Nahverkehrsbusse zeigen auch im Realbetrieb ein deutlich verbessertes Emissionsverhalten gegenüber EURO V- / EEV-Fahrzeugen. Die Emissionen liegen bei den Betriebsrandbedingungen von Hagen bei unter 50% der Emissionen der besten gemessenen EEV-Fahrzeuge und unter 20% der Emissionen der schlechtesten EEV-Fahrzeuge. Unter typischen Nahverkehrsbedingungen, wie sie z.B. in Düsseldorf vorliegen, können im Fahrbetrieb Emissionsdaten nachgewiesen werden, die unterhalb der EURO VI-Grenzwerte liegen. Ungünstige Randbedingungen führen aber auch bei EURO VI-Fahrzeugen zu Überschreitungen des NO_x -Emissionsgrenzwertes für den Prüfstandstypprüfetest bei Betrieb im Realverkehr. In der Abbildung 32 sind die Mittelwerte (mit Spannweiten) der NO_x -Emissionen im Realbetrieb im Vergleich zum NO_x -Emissionsgrenzwerten der Abgasstufen EURO VI und EURO V / EEV dargestellt.

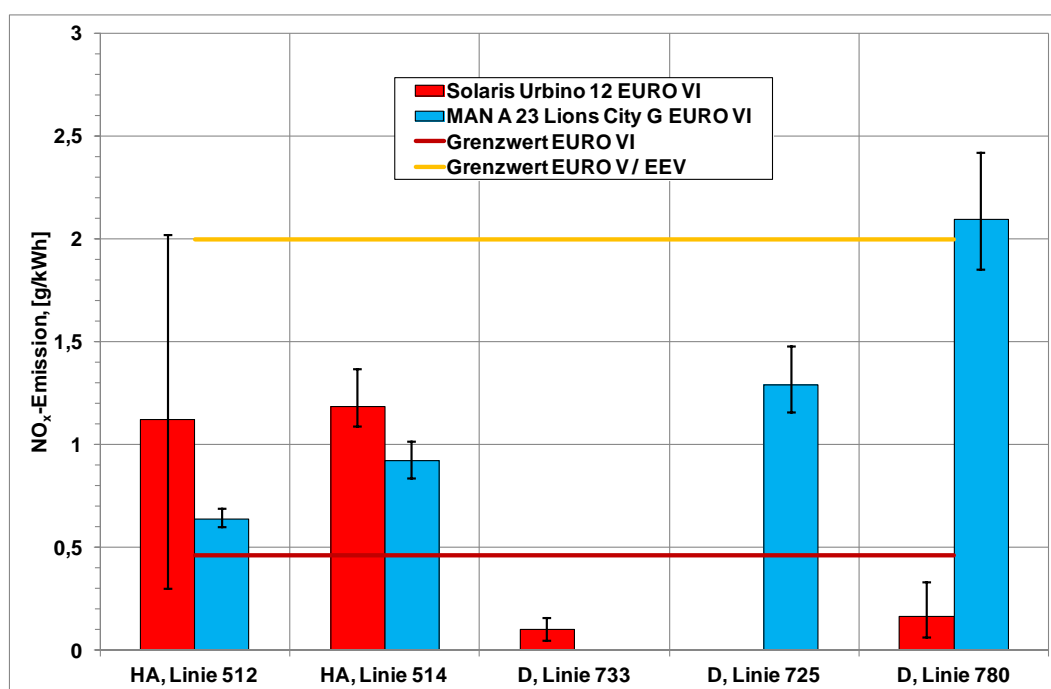


Abbildung 32: Übersicht der mittleren NO_x -Emissionen bei Betrieb im Realverkehr im Vergleich zum NO_x -Emissionsgrenzwert.

6 Literatur

- [1] VERORDNUNG (EG) Nr. 582/2011 der Kommission vom 25. Mai 2011 zur Durchführung und Änderung der Verordnung (EG) Nr. 595/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen (EURO VI) und zur Änderung der Anhänge I und III der Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates. ABl. L 167/1 vom 25.06.2011.
- [2] LANUV 2009 a: Emissionsverhalten von Linienbussen, Teil 1: Dieselantrieb mit nachgerüstetem Abgasrückführungssystem und Erdgasantrieb im Vergleich, LANUV-Fachbericht 14, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Recklinghausen, 2009
- [3] LANUV 2009 b: Emissionsverhalten von Linienbussen, Teil 2: Dieselantrieb mit nachgerüstetem SCR-System kombiniert mit einem CRT-Partikelfilter, LANUV-Fachbericht 19, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Recklinghausen, 2009
- [4] LANUV 2009 c 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
- [5] HBEFA 2014: The Handbook of Emission Factors for Road Transport, Version 3.2, Umweltbundesamt, Dessau, 2014
- [6] IKA 2011: Gemeinsamer Schlussbericht im Rahmen des Projekts „Forschungsbegleitung für den Einsatz von Hybridlinienbussen im Verkehrsverbund Rhein-Ruhr“, Bericht Nr. 93381, Institut für Kraftfahrzeuge – RWTH Aachen University, TÜV Nord Mobilität GmbH & Co.KG, Verkehrsverbund Rhein-Ruhr AöR, Aachen, 2011
- [7] VERORDNUNG (EU) Nr. 64/2012 der Kommission vom 23. Januar 2012 zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 582/2011 zur Durchführung und Änderung der Verordnung (EG) Nr. 595/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen (Euro VI), ABl. 28/1, 31.01.2012

7 Anhang

7.1 Streckenbezogene Ergebnisse, Einsatzgebiet Hagen

Tabelle 25: Ergebnisse Solobus SOLARIS Urbino12 EURO VI [g/km], Linie 512

Datum	Einsatzgebiet	Linie	Runde	Dauer	Streckendistanz	Mittlere Geschwindigkeit	Emissionen, [g/km]							Kraftstoffverbrauch, gemessen	NO ₂ /NO _x -Verhältnis
							[s]	[m]	[km/h]	NO _x	NO	NO ₂	CO ₂		
23.02.2015	HA	512	3	6634	47977,4	26,0	0,47	0,31	0,16	1003,16	0,01	1,73	4,92E-04	40,6	35%
23.02.2015	HA	512	4	7184	47654,9	23,9	1,65	1,00	0,66	1104,61	0,00	1,39	3,72E-03	44,6	40%
24.02.2015	HA	512	1	7452	47847,0	23,1	3,17	1,94	1,23	1076,86	0,16	1,62	2,05E-03	43,3	39%
Min				6634,0	47654,9	23,1	0,47	0,31	0,16	1003,16	0,00	1,39	4,917E-04	40,6	35%
Max				7452,0	47977,4	26,0	3,17	1,94	1,23	1104,61	0,16	1,73	3,719E-03	44,6	40%
Mittelwert				7090,0	47826,4	24,3	1,76	1,08	0,68	1061,54	0,06	1,58	2,088E-03	42,9	38%
Standardabweichung				417,0	162,2	1,5	1,35	0,82	0,53	52,43	0,09	0,17	1,614E-03	2,0	3%
Varianz				173908,0	26310,1	2,3	1,834	0,675	0,284	2748,7	0,008	0,030	2,605E-06	4,194	0,07%
Variationskoeffizient				5,88%	0,34%	6,22%	76,76%	75,87%	78,23%	4,94%	151,26%	11,01%	77,30%	4,78%	7,21%

Zeitweise keine THC-Messung!

Tabelle 26: Ergebnisse Solobus SOLARIS Urbino12 EURO VI [g/km], Linie 514

Datum	Einsatzgebiet	Linie	Runde	Dauer	Streckendistanz	Mittlere Geschwindigkeit	Emissionen, [g/km]							Kraftstoffverbrauch, gemessen	NO ₂ /NO _x -Verhältnis
							[s]	[m]	[km/h]	NO _x	NO	NO ₂	CO ₂		
23.02.2015	HA	514	2	5612	29051,3	18,6	2,03	1,01	1,01	1206,53	0,03	1,84	7,40E-04	49,0	50%
24.02.2015	HA	514	2	5387	29066,6	19,4	2,42	0,90	1,52	1155,77	0,03	2,07	8,31E-04	47,1	63%
24.02.2015	HA	514	3	5429	28927,8	19,2	1,80	0,61	1,19	1053,99	0,03	1,69	8,51E-04	43,0	66%
Min				5387,0	28927,8	18,6	1,80	0,61	1,01	1053,99	0,03	1,69	7,404E-04	43,0	50%
Max				5612,0	29066,6	19,4	2,42	1,01	1,52	1206,53	0,03	2,07	8,510E-04	49,0	66%
Mittelwert				5476,0	29015,2	19,1	2,08	0,84	1,24	1138,76	0,03	1,87	8,074E-04	46,4	60%
Standardabweichung				119,6	76,1	0,4	0,31	0,21	0,26	77,68	0,00	0,20	5,892E-05	3,0	9%
Varianz				14313,0	5795,4	0,2	0,098	0,044	0,067	6034,3	0,000	0,038	3,472E-09	9,301	0,74%
Variationskoeffizient				2,18%	0,26%	2,12%	15,05%	24,83%	20,82%	6,82%	10,32%	10,49%	7,30%	6,58%	14,39%

Tabelle 27: Ergebnisse Gelenkbus MAN A23 Lion's City G EURO VI [g/km], Linie 512

Datum	Einsatzgebiet	Linie	Runde	Dauer	Streckendistanz	Mittlere Geschwindigkeit	Emissionen, [g/km]						Kraftstoffverbrauch, gemessen	NO ₂ /NO _x -Verhältnis	
							[s]	[m]	[km/h]	NO _x	NO	NO ₂			CO ₂
17.04.2015	HA	512	1	7532	47634,9	22,8	1,02	0,79	0,23	1307,03	0,02	0,97	2,30E-04	50,6	23%
17.04.2015	HA	512	2	7442	47624,4	23,0	1,10	0,83	0,27	1329,52	0,03	0,71	2,22E-04	51,9	24%
17.04.2015	HA	512	3	7359	47544,0	23,3	1,18	0,87	0,31	1286,00	0,04	1,03	2,20E-04	50,4	26%
Min				7359,0	47544,0	22,8	1,02	0,79	0,23	1286,00	0,02	0,71	2,204E-04	50,4	23%
Max				7532,0	47634,9	23,3	1,18	0,87	0,31	1329,52	0,04	1,03	2,296E-04	51,9	26%
Mittelwert				7444,3	47601,1	23,0	1,10	0,83	0,27	1307,52	0,03	0,90	2,238E-04	50,9	25%
Standardabweichung				86,5	49,8	0,2	0,08	0,04	0,04	21,76	0,01	0,17	5,010E-06	0,8	2%
Varianz				7486,3	2476,9	0,1	0,006	0,002	0,002	473,5	0,000	0,029	2,510E-11	0,646	0,04%
Variationskoeffizient				1,16%	0,10%	1,07%	7,33%	4,73%	15,28%	1,66%	22,51%	18,94%	2,24%	1,58%	7,99%

Tabelle 28: Ergebnisse Gelenkbus MAN A23 Lion's City G EURO VI [g/km], Linie 514

Datum	Einsatzgebiet	Linie	Runde	Dauer	Streckendistanz	Mittlere Geschwindigkeit	Emissionen, [g/km]						Kraftstoffverbrauch, gemessen	NO ₂ /NO _x -Verhältnis	
							[s]	[m]	[km/h]	NO _x	NO	NO ₂			CO ₂
21.04.2015	HA	514	1	5612	28983,7	18,6	1,93	1,35	0,58	1499,28	0,005	0,77	4,99E-04	57,8	30%
21.04.2015	HA	514	2	5913	28388,3	17,3	1,76	1,27	0,50	1502,26	0,003	0,84	2,06E-04	58,7	28%
21.04.2015	HA	514	3	5494	28268,2	18,5	1,65	1,26	0,39	1485,47	0,02	1,01	2,44E-04	58,8	24%
Min				5494,0	28268,2	17,3	1,65	1,26	0,39	1485,47	0,00	0,77	2,064E-04	57,8	24%
Max				5913,0	28983,7	18,6	1,93	1,35	0,58	1502,26	0,02	1,01	4,991E-04	58,8	30%
Mittelwert				5673,0	28546,7	18,1	1,78	1,29	0,49	1495,67	0,01	0,88	3,164E-04	58,4	27%
Standardabweichung				216,1	383,2	0,7	0,14	0,05	0,10	8,96	0,01	0,12	1,593E-04	0,6	3%
Varianz				46681,0	146825,8	0,5	0,020	0,003	0,009	80,3	0,000	0,015	2,538E-08	0,316	0,11%
Variationskoeffizient				3,81%	1,34%	4,06%	8,03%	3,87%	19,84%	0,60%	105,03%	13,95%	50,36%	0,96%	12,27%

7.2 Streckenbezogene Ergebnisse, Einsatzgebiet Düsseldorf

Tabelle 29: Ergebnisse Solobus SOLARIS Urbino12 EURO VI [g/km], Linie 733

Datum	Einsatzgebiet	Linie	Runde	Dauer	Streckendistanz	Mittlere Geschwindigkeit	Emissionen, [g/km]							Kraftstoffverbrauch, gemessen [l/100 km]	NO ₂ /NO _x -Verhältnis [%]
							[s]	[m]	[km/h]	NO _x	NO	NO ₂	CO ₂		
25.02.2015	D	733	1	5531	28616,7	18,6	0,30	0,19	0,11	1250,23	0,04	1,48	5,35E-04	51,2	37%
25.02.2015	D	733	2	4649	28476,0	22,1	0,20	0,11	0,09	1231,55	0,02	1,48	4,87E-04	50,6	45%
25.02.2015	D	733	3	4706	28337,8	21,7	0,09	0,07	0,02	1281,72	0,03	1,78	6,35E-04	52,9	20%
Min				4649,0	28337,8	18,6	0,09	0,07	0,02	1231,55	0,02	1,48	4,865E-04	50,6	20%
Max				5531,0	28616,7	22,1	0,30	0,19	0,11	1281,72	0,04	1,78	6,349E-04	52,9	45%
Mittelwert				4962,0	28476,8	20,8	0,20	0,12	0,07	1254,50	0,03	1,58	5,522E-04	51,6	34%
Standardabweichung				493,6	139,5	1,9	0,10	0,06	0,05	25,35	0,01	0,17	7,565E-05	1,2	13%
Varianz				243633,0	19451,8	3,5	0,011	0,004	0,002	642,7	0,000	0,030	5,723E-09	1,395	1,66%
Variationskoeffizient				9,95%	0,49%	9,04%	53,18%	48,27%	66,62%	2,02%	34,84%	10,89%	13,70%	2,29%	38,02%

Zeitweise keine Rußmessung!

Tabelle 30: Ergebnisse Solobus SOLARIS Urbino12 EURO VI [g/km], Linie 780

Datum	Einsatzgebiet	Linie	Runde	Dauer	Strecken-distanz	Mittlere Geschwindigkeit	Emissionen, [g/km]							Kraftstoffverbrauch, gemessen [l/100 km]	NO ₂ /NO _x -Verhältnis [%]
							[s]	[m]	[km/h]	NO _x	NO	NO ₂	CO ₂		
26.02.2015	D	780	1	2381	11911,9	18,0	0,60	0,15	0,45	1356,20	0,03	1,22	8,85E-04	55,6	75%
26.02.2015	D	780	2	2142	11908,6	20,0	0,18	0,02	0,16	1244,36	0,01	1,14	7,30E-04	51,2	86%
26.02.2015	D	780	3	1979	11927,8	21,7	0,10	0,01	0,09	1144,43	0,02	1,23	6,89E-04	47,1	86%
Min				1979,0	11908,6	18,0	0,10	0,01	0,09	1144,43	0,01	1,14	6,890E-04	47,1	75%
Max				2381,0	11927,8	21,7	0,60	0,15	0,45	1356,20	0,03	1,23	8,851E-04	55,6	86%
Mittelwert				2167,3	11916,1	19,9	0,29	0,06	0,23	1248,33	0,02	1,20	7,681E-04	51,3	83%
Standardabweichung				202,2	10,3	1,8	0,27	0,07	0,19	105,95	0,01	0,05	1,034E-04	4,3	6%
Varianz				40882,3	105,1	3,4	0,071	0,005	0,037	11224,5	0,000	0,002	1,069E-08	18,122	0,39%
Variationskoeffizient				9,33%	0,09%	9,27%	90,79%	119,10%	83,35%	8,49%	56,02%	3,88%	13,46%	8,30%	7,54%

Tabelle 31: Ergebnisse Gelenkbus MAN A23 Lion's City G EURO VI [g/km], Linie 725

Datum	Einsatzgebiet	Linie	Runde	Dauer	Streckendistanz	Mittlere Geschwindigkeit	Emissionen, [g/km]							Kraftstoffverbrauch, gemessen	NO ₂ /NO _x -Verhältnis
							[s]	[m]	[km/h]	NO _x	NO	NO ₂	CO ₂		
22.04.2015	D	725	1	5417	21317,7	14,2	3,45	2,52	0,94	1799,30	0,02	1,57	3,59E-04	71,7	27%
22.04.2015	D	725	2	4761	21437,7	16,2	2,80	2,11	0,69	1714,50	0,04	1,46	2,92E-04	67,9	25%
22.04.2015	D	725	3	4687	21669,1	16,6	2,59	1,97	0,62	1683,30	0,03	1,53	2,98E-04	66,8	24%
Min				4687,0	21317,7	14,2	2,59	1,97	0,62	1683,30	0,02	1,46	2,917E-04	66,8	24%
Max				5417,0	21669,1	16,6	3,45	2,52	0,94	1799,30	0,04	1,57	3,588E-04	71,7	27%
Mittelwert				4955,0	21474,8	15,7	2,95	2,20	0,75	1732,37	0,03	1,52	3,161E-04	68,8	25%
Standardabweichung				401,8	178,6	1,3	0,45	0,28	0,17	60,03	0,01	0,05	3,709E-05	2,6	2%
Varianz				161452,0	31898,2	1,7	0,202	0,080	0,028	3603,2	0,000	0,003	1,376E-09	6,614	0,03%
Variationskoeffizient				8,11%	0,83%	8,44%	15,25%	12,88%	22,21%	3,47%	35,99%	3,51%	11,73%	3,74%	6,69%

Tabelle 32: Ergebnisse Gelenkbus MAN A23 Lion's City G EURO VI [g/km], Linie 780

Datum	Einsatzgebiet	Linie	Runde	Dauer	Streckendistanz	Mittlere Geschwindigkeit	Emissionen, [g/km]							Kraftstoffverbrauch, gemessen	NO ₂ /NO _x -Verhältnis
							[s]	[m]	[km/h]	NO _x	NO	NO ₂	CO ₂		
23.04.2015	D	780	1	2495	11621,8	16,8	3,90	2,74	1,16	1501,63	0,03	0,92	2,85E-04	59,9	30%
23.04.2015	D	780	2	2555	11750,5	16,6	4,19	3,06	1,13	1548,57	0,05	1,38	2,54E-04	61,9	27%
23.04.2015	D	780	3	2392	11527,6	17,3	3,67	2,69	0,98	1552,20	0,04	1,41	2,31E-04	60,9	27%
23.04.2015	D	780	4	2554	12008,9	16,9	4,30	3,23	1,06	1445,76	0,10	1,47	2,72E-04	57,3	25%
Min				2392,0	11527,6	16,6	3,67	2,69	0,98	1445,76	0,03	0,92	2,306E-04	57,3	25%
Max				2555,0	12008,9	17,3	4,30	3,23	1,16	1552,20	0,10	1,47	2,849E-04	61,9	30%
Mittelwert				2499,0	11727,2	16,9	4,01	2,93	1,08	1512,04	0,06	1,30	2,605E-04	60,0	27%
Standardabweichung				76,7	208,8	0,3	0,28	0,26	0,08	49,83	0,03	0,25	2,355E-05	2,0	2%
Varianz				5875,3	43602,1	0,1	0,080	0,068	0,006	2482,7	0,001	0,063	5,545E-10	3,877	0,04%
Variationskoeffizient				3,07%	1,78%	1,99%	7,04%	8,87%	7,07%	3,30%	52,39%	19,36%	9,04%	3,28%	7,50%

7.3 Arbeitsbezogene Ergebnisse, Einsatzgebiet Hagen

Tabelle 33: Ergebnisse Solobus SOLARIS Urbino12 EURO VI [g/kWh], Linie 512

Datum	Einsatzgebiet	Linie	Runde	Emissionen, [g/kWh]							Arbeit [kWh]
				NO _x	NO	NO ₂	CO ₂	HC	CO	PT	
23.02.2015	HA	512	3	0,30	0,19	0,10	637,80	0,01	1,10	3,13E-04	75,46
23.02.2015	HA	512	4	1,06	0,64	0,42	704,68	0,00	0,89	2,37E-03	74,70
24.02.2015	HA	512	1	2,02	1,24	0,78	685,10	0,10	1,03	1,31E-03	75,21
Min				0,30	0,19	0,10	637,80	0,00	0,89	3,126E-04	74,70
Max				2,02	1,24	0,78	704,68	0,10	1,10	2,372E-03	75,46
Mittelwert				1,12	0,69	0,43	675,86	0,04	1,01	1,330E-03	75,12
Standardabweichung				0,86	0,52	0,34	34,39	0,06	0,11	1,030E-03	0,39
Varianz				0,742	0,273	0,115	1182,459	0,003	0,012	1,061E-06	0,150
Variationskoeffizient				76,70%	75,80%	78,17%	5,09%	151,27%	10,84%	77,43%	0,52%

Zeitweise keine THC-Messung!

Tabelle 34: Ergebnisse Solobus SOLARIS Urbino12 EURO VI [g/kWh], Linie 514

Datum	Einsatzgebiet	Linie	Runde	Emissionen, [g/kWh]							Arbeit [kWh]
				NO _x	NO	NO ₂	CO ₂	HC	CO	PT	
23.02.2015	HA	514	2	1,10	0,55	0,55	656,12	0,02	1,00	4,03E-04	53,42
24.02.2015	HA	514	2	1,37	0,51	0,86	651,12	0,02	1,17	4,68E-04	51,59
24.02.2015	HA	514	3	1,09	0,37	0,72	636,01	0,02	1,02	5,14E-04	47,94
Min				1,09	0,37	0,55	636,01	0,02	1,00	4,026E-04	47,94
Max				1,37	0,55	0,86	656,12	0,02	1,17	5,135E-04	53,42
Mittelwert				1,19	0,48	0,71	647,75	0,02	1,06	4,614E-04	50,99
Standardabweichung				0,16	0,10	0,15	10,47	0,00	0,09	5,574E-05	2,79
Varianz				0,024	0,009	0,024	109,656	0,000	0,009	3,107E-09	7,795
Variationskoeffizient				13,16%	20,19%	21,70%	1,62%	5,30%	8,69%	12,08%	5,48%

Tabelle 35: Ergebnisse Gelenkbus MAN A23 Lion's City G EURO VI [g/kWh], Linie 512

Datum	Einsatzgebiet	Linie	Runde	Emissionen, [g/kWh]							Arbeit [kWh]
				NO _x	NO	NO ₂	CO ₂	HC	CO	PT	
17.04.2015	HA	512	1	0,60	0,46	0,14	766,51	0,01	0,57	1,35E-04	81,23
17.04.2015	HA	512	2	0,62	0,47	0,15	754,85	0,02	0,40	1,26E-04	83,88
17.04.2015	HA	512	3	0,69	0,51	0,18	750,90	0,02	0,60	1,29E-04	81,42
Min				0,60	0,46	0,14	750,90	0,01	0,40	1,258E-04	81,23
Max				0,69	0,51	0,18	766,51	0,02	0,60	1,346E-04	83,88
Mittelwert				0,64	0,48	0,16	757,42	0,02	0,52	1,297E-04	82,18
Standardabweichung				0,05	0,02	0,02	8,11	0,00	0,11	4,517E-06	1,48
Varianz				0,002	0,001	0,001	65,800	0,000	0,011	2,040E-11	2,187
Variationskoeffizient				7,43%	4,89%	15,38%	1,07%	23,08%	20,40%	3,48%	1,80%

Tabelle 36: Ergebnisse Gelenkbus MAN A23 Lion's City G EURO VI [g/kWh], Linie 514

Datum	Einsatzgebiet	Linie	Runde	Emissionen, [g/kWh]							Arbeit [kWh]
				NO _x	NO	NO ₂	CO ₂	HC	CO	PT	
21.04.2015	HA	514	1	1,02	0,71	0,31	788,08	0,00	0,41	2,62E-04	55,14
21.04.2015	HA	514	2	0,92	0,66	0,26	780,15	0,00	0,44	1,07E-04	54,66
21.04.2015	HA	514	3	0,84	0,64	0,20	755,02	0,01	0,51	1,24E-04	55,62
Min				0,84	0,64	0,20	755,02	0,00	0,41	1,072E-04	54,66
Max				1,02	0,71	0,31	788,08	0,01	0,51	2,623E-04	55,62
Mittelwert				0,92	0,67	0,25	774,42	0,00	0,45	1,644E-04	55,14
Standardabweichung				0,09	0,04	0,05	17,26	0,00	0,06	8,517E-05	0,48
Varianz				0,008	0,001	0,003	297,842	0,000	0,003	7,255E-09	0,226
Variationskoeffizient				9,68%	5,38%	21,43%	2,23%	103,60%	12,20%	51,79%	0,86%

7.4 Arbeitsbezogene Ergebnisse, Einsatzgebiet Düsseldorf

Tabelle 37: Ergebnisse Solobus SOLARIS Urbino12 EURO VI [g/kWh], Linie 733

Datum	Einsatzgebiet	Linie	Runde	Emissionen, [g/kWh]							Arbeit [kWh]
				NO _x	NO	NO ₂	CO ₂	HC	CO	PT	
25.02.2015	D	733	1	0,16	0,10	0,06	672,24	0,02	0,80	2,88E-04	53,221
25.02.2015	D	733	2	0,11	0,06	0,05	658,73	0,01	0,79	2,60E-04	53,238
25.02.2015	D	733	3	0,04	0,04	0,01	651,83	0,01	0,91	3,23E-04	55,721
Min				0,04	0,04	0,01	651,83	0,01	0,79	2,602E-04	53,221
Max				0,16	0,10	0,06	672,24	0,02	0,91	3,229E-04	55,721
Mittelwert				0,10	0,07	0,04	660,94	0,01	0,83	2,903E-04	54,060
Standardabweichung				0,06	0,03	0,03	10,38	0,00	0,06	3,141E-05	1,439
Varianz				0,003	0,001	0,001	107,766	0,000	0,004	9,867E-10	2,070
Variationskoeffizient				54,97%	50,30%	67,69%	1,57%	35,87%	7,68%	10,82%	2,66%

Zeitweise keine Rußmessung!

Tabelle 38: Ergebnisse Solobus SOLARIS Urbino12 EURO VI [g/kWh], Linie 780

Datum	Einsatzgebiet	Linie	Runde	Emissionen, [g/kWh]							Arbeit [kWh]
				NO _x	NO	NO ₂	CO ₂	HC	CO	PT	
26.02.2015	D	780	1	0,33	0,08	0,25	745,94	0,01	0,67	4,87E-04	21,657
26.02.2015	D	780	2	0,10	0,01	0,09	720,20	0,00	0,66	4,23E-04	20,576
26.02.2015	D	780	3	0,06	0,01	0,05	710,21	0,01	0,76	4,28E-04	19,220
Min				0,06	0,01	0,05	710,21	0,00	0,66	4,226E-04	19,220
Max				0,33	0,08	0,25	745,94	0,01	0,76	4,868E-04	21,657
Mittelwert				0,17	0,03	0,13	725,45	0,01	0,70	4,457E-04	20,484
Standardabweichung				0,14	0,04	0,10	18,43	0,01	0,06	3,572E-05	1,221
Varianz				0,020	0,002	0,011	339,796	0,000	0,003	1,276E-09	1,491
Variationskoeffizient				86,30%	115,70%	78,65%	2,54%	52,41%	7,89%	8,02%	5,96%

Tabelle 39: Ergebnisse Gelenkbus MAN A23 Lion's City G EURO VI [g/kWh], Linie 725

Datum	Einsatzgebiet	Linie	Runde	Emissionen, [g/kWh]							Arbeit [kWh]
				NO _x	NO	NO ₂	CO ₂	HC	CO	PT	
22.04.2015	D	725	1	1,48	1,08	0,40	770,45	0,01	0,67	1,54E-04	49,78
22.04.2015	D	725	2	1,24	0,93	0,31	755,98	0,02	0,64	1,29E-04	48,62
22.04.2015	D	725	3	1,16	0,88	0,28	752,95	0,01	0,69	1,33E-04	48,44
Min				1,16	0,88	0,28	752,95	0,01	0,64	1,286E-04	48,44
Max				1,48	1,08	0,40	770,45	0,02	0,69	1,536E-04	49,78
Mittelwert				1,29	0,96	0,33	759,79	0,01	0,67	1,385E-04	48,95
Standardabweichung				0,17	0,10	0,07	9,36	0,00	0,02	1,332E-05	0,73
Varianz				0,028	0,010	0,004	87,528	0,000	0,000	1,773E-10	0,531
Variationskoeffizient				12,94%	10,58%	19,87%	1,23%	36,81%	3,18%	9,61%	1,49%

Tabelle 40: Ergebnisse Gelenkbus MAN A23 Lion's City G EURO VI [g/kWh], Linie 780

Datum	Einsatzgebiet	Linie	Runde	Emissionen, [g/kWh]							Arbeit [kWh]
				NO _x	NO	NO ₂	CO ₂	HC	CO	PT	
23.04.2015	D	780	1	2,02	1,42	0,60	778,37	0,01	0,48	1,48E-04	22,42
23.04.2015	D	780	2	2,09	1,53	0,56	773,55	0,03	0,69	1,27E-04	23,52
23.04.2015	D	780	3	1,85	1,35	0,50	782,27	0,02	0,71	1,16E-04	22,87
23.04.2015	D	780	4	2,42	1,82	0,60	813,66	0,05	0,83	1,53E-04	21,34
Min				1,85	1,35	0,50	773,55	0,01	0,48	1,162E-04	21,34
Max				2,42	1,82	0,60	813,66	0,05	0,83	1,532E-04	23,52
Mittelwert				2,09	1,53	0,56	786,96	0,03	0,68	1,360E-04	22,54
Standardabweichung				0,24	0,21	0,05	18,15	0,02	0,15	1,736E-05	0,92
Varianz				0,056	0,042	0,002	329,489	0,000	0,021	3,013E-10	0,846
Variationskoeffizient				11,34%	13,40%	8,66%	2,31%	58,48%	21,45%	12,76%	4,08%

Landesamt für Natur, Umwelt und
Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Leibnizstraße 10
45659 Recklinghausen
Telefon 02361 305-0
poststelle@lanuv.nrw.de

www.lanuv.nrw.de