



## Emissionsverhalten von Linienbussen – Teil 2

Dieselantrieb mit nachgerüstetem SCR-System  
kombiniert mit einem CRT-Partikelfilter

[LANUV-Fachbericht 19](#)



## **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

## 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](mailto: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](http://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

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>ZIELSETZUNG</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>VORGEHENSWEISE</b>	<b>8</b>
3.1	Allgemeines	8
3.2	Nachrüstsystem	9
3.3	Versuchsfahrzeug	10
3.3.1	Gelenkbus Mercedes O 530 GN 3 Citaro	10
3.4	Streckenauswahl	11
3.5	Messtechnik und Fahrzeugausrüstung	12
3.5.1	Messtechnik für gasförmige Komponenten	13
3.5.2	Messung des Abgasmassenstromes	17
3.5.3	Messung der Umgebungsdaten	18
3.5.4	Messung der geodätischen Daten	18
3.5.5	Drehmomentmessung	19
3.5.6	Geschwindigkeitsmessung	20
3.5.7	Messung der Motordrehzahl	21
<b>4</b>	<b>ERGEBNISSE</b>	<b>22</b>
4.1	Prüfstandsergebnisse	22
4.2	Fahrzyklus	23
4.2.1	Allgemeine Vorgehensweise	23
4.3	Zyklusentwicklung „Hagener Zyklus“	24
4.3.1	Vorbemerkung zur Besonderheit des Voith DIWA® Getriebes	25
4.3.2	Vorgehensweise	30
4.3.3	Referenzdatenbank	30
4.3.4	Normierung und Klassierung der Daten	32
4.3.5	Geschwindigkeitsverteilung, mittlere Geschwindigkeit	33
4.3.6	Beschleunigungsleistung	36
4.3.7	Fahrstreckenauswahl für den Referenzfahrzyklus	37
4.3.8	Repräsentativer Fahrzeugzyklus (v(t) - Fahrzyklus)	40
4.3.8.1	Analyse des Referenzfahrzyklus	40
4.3.8.2	Erstellung von Musterzyklen und Auswahl des repräsentativen Fahrzyklus	43
4.3.8.3	Vollendung des repräsentativen Fahrzyklus	46
4.3.9	Repräsentativer Motorzyklus ( $M_{rel}(n_{rel})$ -Zyklus)	48
4.3.10	Abschließende Zyklusbetrachtung	49

<b>4.4</b>	<b>Ergebnisse im Realbetrieb</b>	<b>50</b>
4.4.1	Allgemeine Vorgehensweise	50
4.4.2	Streckenbezogene Ergebnisse	51
4.4.3	Leistungsbezogene Ergebnisse	54
4.4.4	Geschwindigkeitsabhängige Darstellung der NO <sub>x</sub> -Emissionen	55
4.4.5	NO <sub>2</sub> -Emissionen	57
4.4.6	Geschwindigkeitsabhängige Darstellung der NO <sub>2</sub> -Emissionen	59
<b>5</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>62</b>
<b>6</b>	<b>LITERATUR</b>	<b>63</b>
<b>7</b>	<b>ANHANG</b>	<b>64</b>
7.1	Hagener Zyklus	64

# 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 Bundes-Immissionsschutzgesetzes (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<sub>x</sub>) 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/m<sup>3</sup> festgestellt. Dieser Messwert hat nicht nur den ab 2010 gültigen Jahresmittelgrenzwert für den NO<sub>2</sub> von 40 µg/m<sup>3</sup> deutlich überschritten, sondern lag auch über dem zulässigen Toleranzbereich (Grenzwert + Toleranzmarge) für das Jahr 2003, der bei 54 µg/m<sup>3</sup> liegt.

**Tabelle 1:** Grenzwerte für NO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub>, [Quelle: [2], Anhang II]

	Grenzwert	Toleranzmarge
1-Stunden-Grenzwert Gesundheitsschutz	200 µg/m <sup>3</sup> NO <sub>2</sub> 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 <sup>3</sup> NO <sub>2</sub> Kalenderjahres-mittelwert, einzuhalten ab 1.1.2010	50% ab Inkrafttreten bis 1.1.2010 in gleichen Jahresraten auf 0% zu mindern
Jahresgrenzwert Vegetationsschutz	30 µg/m <sup>3</sup> NO <sub>x</sub> (NO+NO <sub>2</sub> ), als Kalenderjahresmittelwert	Keine
Alarmschwelle	400 µg/m <sup>3</sup> NO <sub>2</sub> gemessen über 3 aufeinander folgende Stunden an repräsentativen Orten über mindestens 100 km <sup>2</sup> oder in ganzen Ballungsräumen, wenn sie kleiner sind	Keine

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

	<b>Grenzwert</b>	<b>Toleranzmarge</b>
24-Stunden-Grenzwert	50 µg/m <sup>3</sup> 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 <sup>3</sup> 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/m<sup>3</sup> für Partikel PM10 überschritten. Die für 2003 geltende Summe aus Grenzwert und Toleranzmarge (35 Überschreitungen des Tagesmittelwertes von 60 µg/m<sup>3</sup>) wird an dieser Station ebenfalls nicht eingehalten. Der ab 2005 gültige Jahresmittelwert von 40 µg/m<sup>3</sup> 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 Buspopulation der Hagener Straßenbahn weist, wie es in vielen Kommunen der Fall ist, eine sehr große Zahl von Fahrzeugen auf, die der Abgasnorm Euro III (1999/96/EG, Grenzwertezeile A) entsprechen, was einem Stickoxidgrenzwert von 5 g/kWh entspricht. Diese Fahrzeuge werden voraussichtlich noch für ca. 10 Jahre eingesetzt werden. Eine solche Situation zwingt zu Maßnahmen, die die NO<sub>x</sub>-Emissionen an bereits im Betrieb befindlichen Fahrzeugen reduzieren. Das hier beschriebene Projekt dokumentiert die Nachrüstung eines Busses mit einem Abgasnachbehandlungssystem 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 wurde auch eine entsprechende Verminderung der NO<sub>2</sub>-Emission erwartet. Um diese Ziele zu erreichen, müssten die vorhandenen Euro III Busse mit Nachrüsttechnologien ausgestattet werden, die die vorhandenen Stickoxidemissionen um deutlich mehr als 50 % reduzieren. Zielsetzung des Projektes ist der grundsätzliche Nachweis, dass das gewählte Nachrüstungssystem das Potential besitzt, die bestehenden NO<sub>x</sub>-Emissionen auf die gewünschten Zielwerte abzusenken. Darüber hinaus soll gezeigt werden, inwieweit die erreichte Emissionsreduktion im Realbetrieb der Busse dargestellt werden kann.

Um speziell die Bedingungen des Busbetriebes in Hagen darzustellen, ist ein weiteres Ziel die Entwicklung eines Fahrzyklus („Hagener Zyklus“), der für eine Stadt mit den topographischen und verkehrstechnischen Bedingungen, die man in Hagen vorfindet, repräsentativ ist, um die Möglichkeit zu eröffnen, vergleichende Untersuchungen auf einem Motorprüfstand durchzuführen.

## 3 Vorgehensweise

### 3.1 Allgemeines

Zur Erreichung der o.g. Projektziele wurde im Vorfeld ein Forschungsprojekt durch das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz bei der Rheinbahn in Düsseldorf durchgeführt, welches die Umrüstung zweier Busse mit einer Abgasnachbehandlung auf Basis einer Niederdruck-AGR zum Projektthema hatte (siehe [3]). Um die Kenntnisse um ein weiteres Nachrüstsysteem zu erweitern und um die besondere Situation bei der Hagener Straßenbahn, die ihre Busse mit Biodiesel betreibt, zu berücksichtigen, wurde ein weiteres Projekt veranlasst, bei der die Nachrüstung eines Gelenkbusses mit einem Abgasnachbehandlungssystem auf Basis eines SCR-Systems (Selectiv Catalytic Reduction), kombiniert mit einem CRT Partikelfilter (Continuously Regenerating Trap), in Kurzform SCRT, untersucht wurde. Zur Wiedererlangung der Betriebserlaubnis nach der Umrüstung wurden durch den Systemhersteller Messungen auf dem Motorprüfstand in den gesetzlich vorgeschriebenen Testzyklen durchgeführt.

Für die Vermessung des Busses im Realbetrieb der Hagener Straßenbahn wurde folgende Vorgehensweise gewählt:

Nach erfolgter Umrüstung des Fahrzeuges auf das Abgasnachbehandlungssystem wurde das Fahrzeug 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. Während der Vermessung wurden auch Daten zur Entwicklung des „Hagener Zyklus“ aufgenommen.

Auf eine explizite Dokumentation des Ausgangszustandes wurde verzichtet, da im Rahmen des oben beschriebenen Projektes des LANUV Messungen mit einem Bus gleichen Typs im Ausgangszustand durchgeführt worden waren. Jedoch traten bei der ersten Messfahrt Fehler auf, die die Eindüsung von Harnstoff blockierten. Die dadurch entstehende Emissionssituation entsprach nahezu einem Fahrzeug, welches nur mit einem CRT-System ausgerüstet ist.

### 3.2 Nachrüstsystem

Das für die Nachrüstung benutzte System besteht aus einem motornah verbauten CRT-System, einer Eindüsenstrecke für den als Reagens benutzten Harnstoff und dem nachgeschalteten SCR-Katalysator. Abbildung 1 verdeutlicht den prinzipiellen Aufbau des Systems.

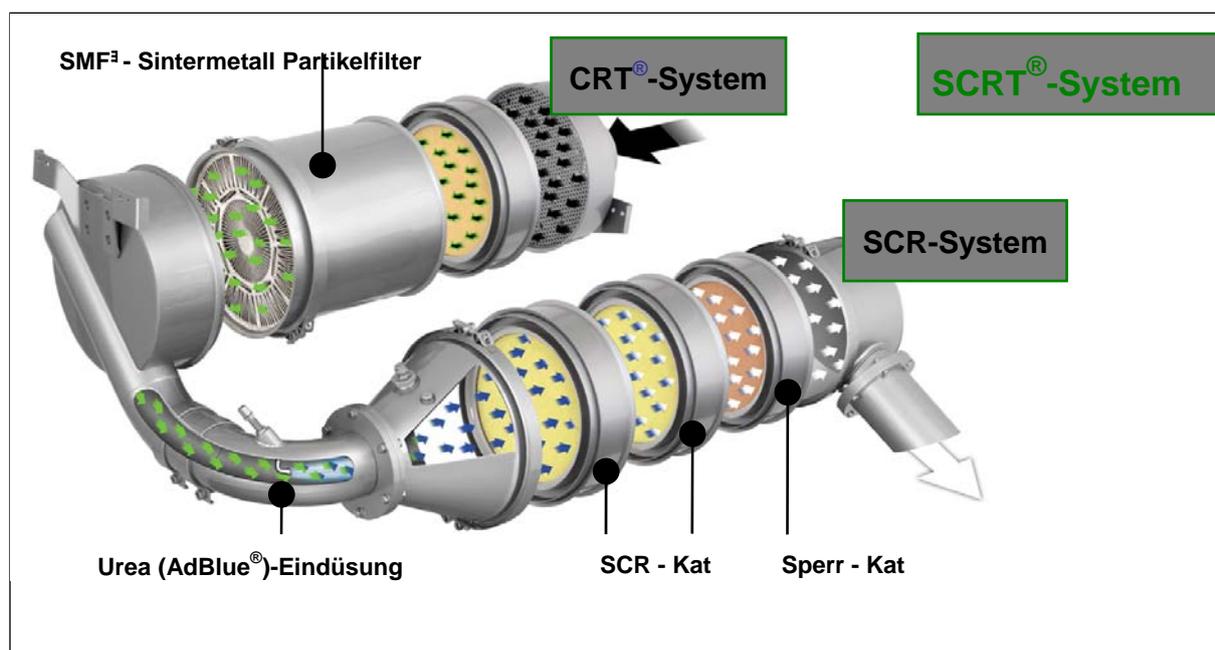


Abbildung 1: Prinzipbild SCRT, [Quelle: HJS Fahrzeugtechnik GmbH & Co KG]

### 3.3 Versuchsfahrzeug

Bei der Auswahl des Versuchsfahrzeuges waren die Buspopulation sowie der Einsatz der Fahrzeuge auf den als repräsentativ ausgewählten Strecken zu berücksichtigen. Darüber hinaus musste das Fahrzeug für die Verwendung eines SCRT-Systems geeignet sein. Das ausgewählte Fahrzeug besitzt eine Euro III Homologation.

#### 3.3.1 Gelenkbus Mercedes O 530 GN 3 Citaro

Beim ausgesuchten Versuchsfahrzeug handelt es sich um einen Gelenkbus O 530 GN 3 Citaro. Dieses Fahrzeug verfügt über keine serienmäßige Abgasrückführung.

Abbildung 2 zeigt das Versuchsfahrzeug. In der Tabelle 3 sind die technischen Daten des Fahrzeuges zusammengefasst.



**Abbildung 2:** Mercedes Gelenkbus O 530 GN 3 Citaro

**Tabelle 3:** Technische Daten O 530 GN 3 Citaro

<b>Fahrzeug</b>	<b>Gelenkbus MB O 530 GN 3 Citaro</b>
<b>Motortyp</b>	<b>OM 457 hLA 934 Euro III</b>
<b>Motorleistung</b>	<b>220 kW bei 2000 min<sup>-1</sup></b>
<b>Motordrehmoment</b>	<b>1250 Nm bei 1100 min<sup>-1</sup></b>
<b>Getriebe</b>	<b>Voith DIWA® 854.3 4-Gang Automatgetriebe</b>

Nach der ersten Messreihe wurde im Hause HJS die Entscheidung getroffen, ein neues Eindüsesystem der Firma Grundfos zu verwenden. In Absprache mit den Projektbeteiligten wurde entschieden, die weiteren beiden Messungen an einem typgleichen Fahrzeug mit der neuen Eindüsung durchzuführen. Daten, die von dem ersten Fahrzeug abweichen, sind im Folgenden in Klammern angegeben.

### 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 entsprachen. Mit dem Versuchsfahrzeug 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 4 zeigt die Strecken mit den zugeordneten Kennziffern (Strecken ID). Abbildung 3 bis Abbildung 4 zeigen die jeweiligen Streckenverläufe der befahrenen Linien.

**Tabelle 4:** Messablauf für das Versuchsfahrzeug

<b>ID_Strecke</b>	<b>Linie</b>	<b>Startstelle</b>	<b>Endstelle</b>
<b>1</b>	<b>512</b>	<b>Bathey</b>	<b>Wengeberg / Penninckweg</b>
<b>2</b>	<b>512</b>	<b>Wengeberg / Penninckweg</b>	<b>Bathey</b>
<b>3</b>	<b>514</b>	<b>Bathey</b>	<b>Hördenstrasse</b>
<b>4</b>	<b>514</b>	<b>Hördenstrasse</b>	<b>Bathey</b>

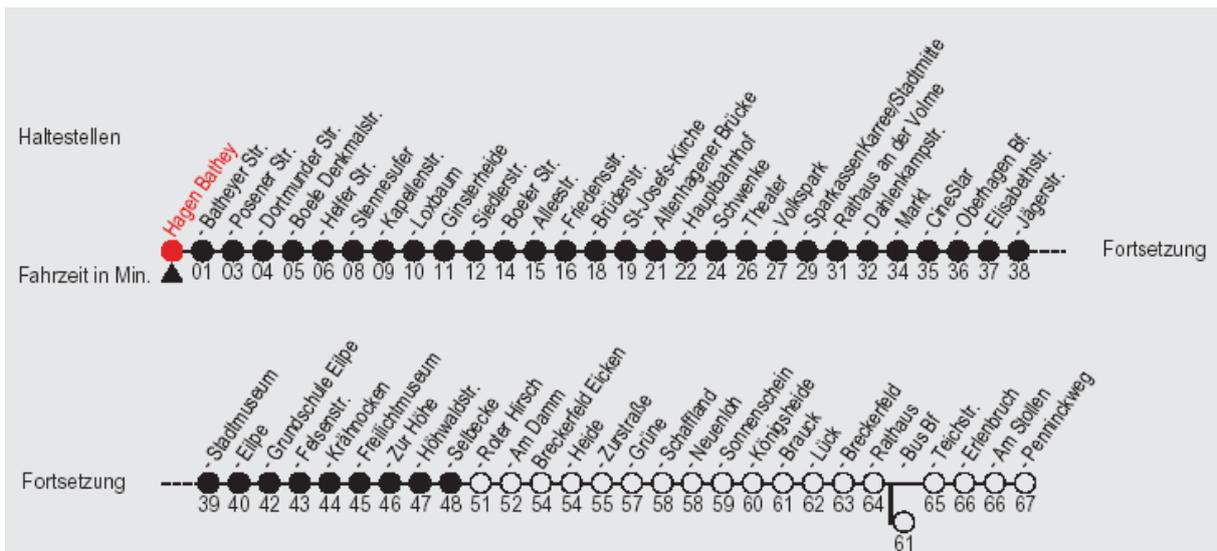


Abbildung 3: Streckenverlauf Linie 512, [Quelle: VRR AöR]

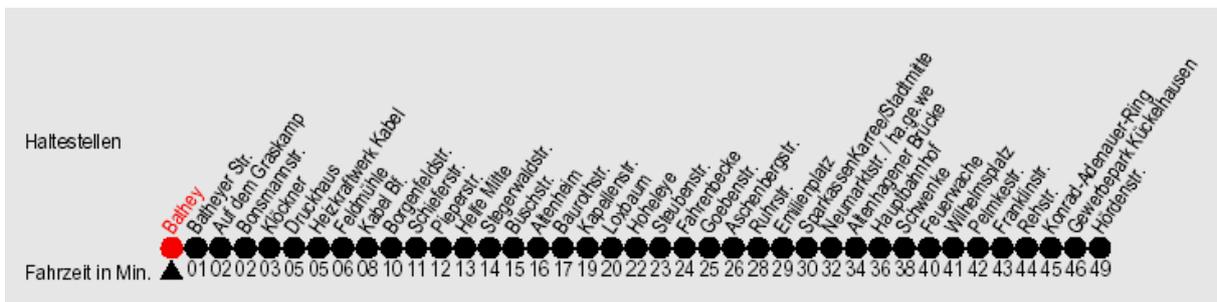


Abbildung 4: Streckenverlauf Linie 514, [Quelle: VRR AöR]

### 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.

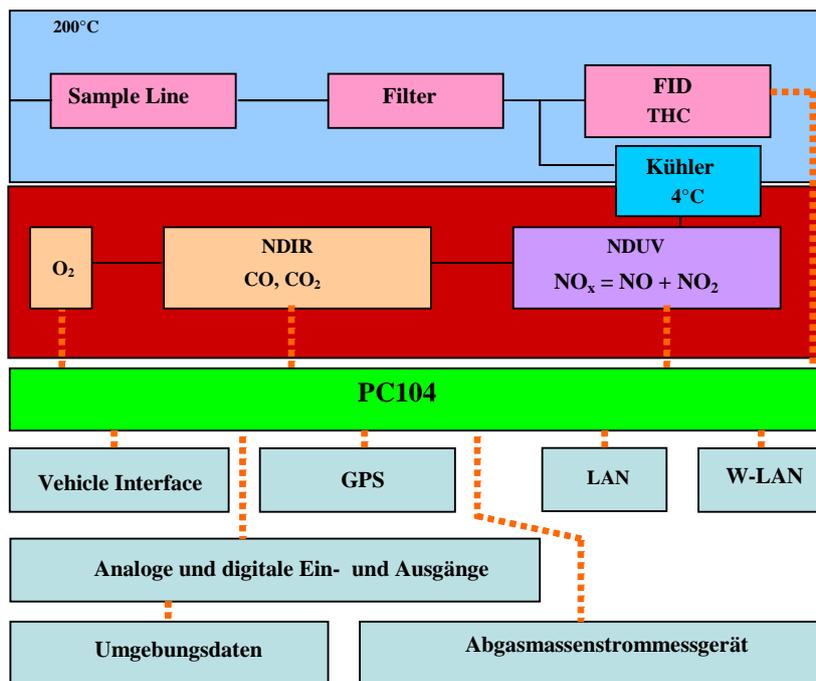
Die an dem Fahrzeug installierte Messtechnik wurde über ein eigenes Stromaggregat, welches bei den Messfahrten im Fahrzeug mitgeführt wurde, mit elektrischer Energie versorgt. Grundsätzlich wäre zwar auch eine Verbindung mit dem elektrischen Netz des Fahrzeuges möglich, aber es wurde darauf verzichtet, 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  $\text{NO}_x$ -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  $180^\circ\text{C}$  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  $\text{CO}$ - und  $\text{CO}_2$ -Konzentration, dem elektrochemischen  $\text{O}_2$ -Analysator und der NDUV-Messbank (Nicht-Dispersive-Ultraviolet-Messbank) zur Bestimmung von  $\text{NO}$  und  $\text{NO}_2$  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 5 bis Tabelle 8 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 5 zeigt das Messsystem SEMTECH D der Firma Sensors. Abbildung 6 verdeutlicht den grundsätzlichen Systemaufbau.



**Abbildung 5:** Semtech-Messgerät, [Quelle: Sensors Inc.]



**Abbildung 6:** Systemaufbau SEMTECH-D [Quelle: Sensors Inc.]

Die zum Betrieb des Messsystems notwendigen Gase wurden im Bus mitgeführt. Da der Gasverbrauch sehr gering ist, konnten 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 7:** Raum für Messtechnik und Gasflaschenaufbewahrung

**Tabelle 5:** 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 6:** Spezifikationen der NDIR-Messbank, [Quelle: Sensors Inc.]

Gas	CO	CO <sub>2</sub>	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 7:** Spezifikation der NDUV-Messbank, [Quelle: Sensors Inc.]

Gas	NO	NO <sub>2</sub>
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	1 ppm	1 ppm
Linearity	Intercept ≤ 0.5 % of range. 0.990 ≤ Slope ≤ 1.01 SEE ≤ 1.0 % of range $r^2 \geq 0.998$	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 8:** Spezifikation des elektrochemischen O<sub>2</sub>-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 Messung des Abgasmassenstromes

Zur Messung des Abgasmassenstromes wurde ein EFM (Electronic Flow Meter) der Firma SENSORS eingesetzt. Das System arbeitet nach dem Pitot-Rohr Prinzip, wobei über den dynamischen Staudruck im Vergleich zum statischen Druck die durchströmende Masse ermittelt wird. Abbildung 8 zeigt das Gesamtsystem mit Messrohr, Schlauchbündel und Auswerteeinheit. Die Tabelle 9 gibt einen Überblick über die Spezifikationen des Messsystems.

**Abbildung 8:** Electronic Flow Meter, [Quelle: Sensors Inc.]

**Tabelle 9:** 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 H <sub>2</sub> O (24.91 mbar)	1,700 SCFM (48.1 m <sup>3</sup> /min)
Flow rate at back-pressure of 15 inches H <sub>2</sub> O (37.36 mbar)	2,100 SCFM (59.5 m <sup>3</sup> /min)
Flow tube length	35" (889 mm)
Flow tube weight	12.2 lbs (5.5 kg)

### 3.5.3 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.

### 3.5.4 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.

### 3.5.5 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 äußerster Sorgfalt und Sachkenntnis verlangt. In Abbildung 9 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 Wheatstoneschen 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. Die Messdaten wurden dem SEMTECH-D als Analogwert zur Verfügung gestellt.



**Abbildung 9:** Dehnmessstreifen im Rohzustand

### 3.5.6 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 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 10 zeigt das Messsystem am Fahrzeug.



**Abbildung 10:** Geschwindigkeitsmesssystem am Fahrzeug

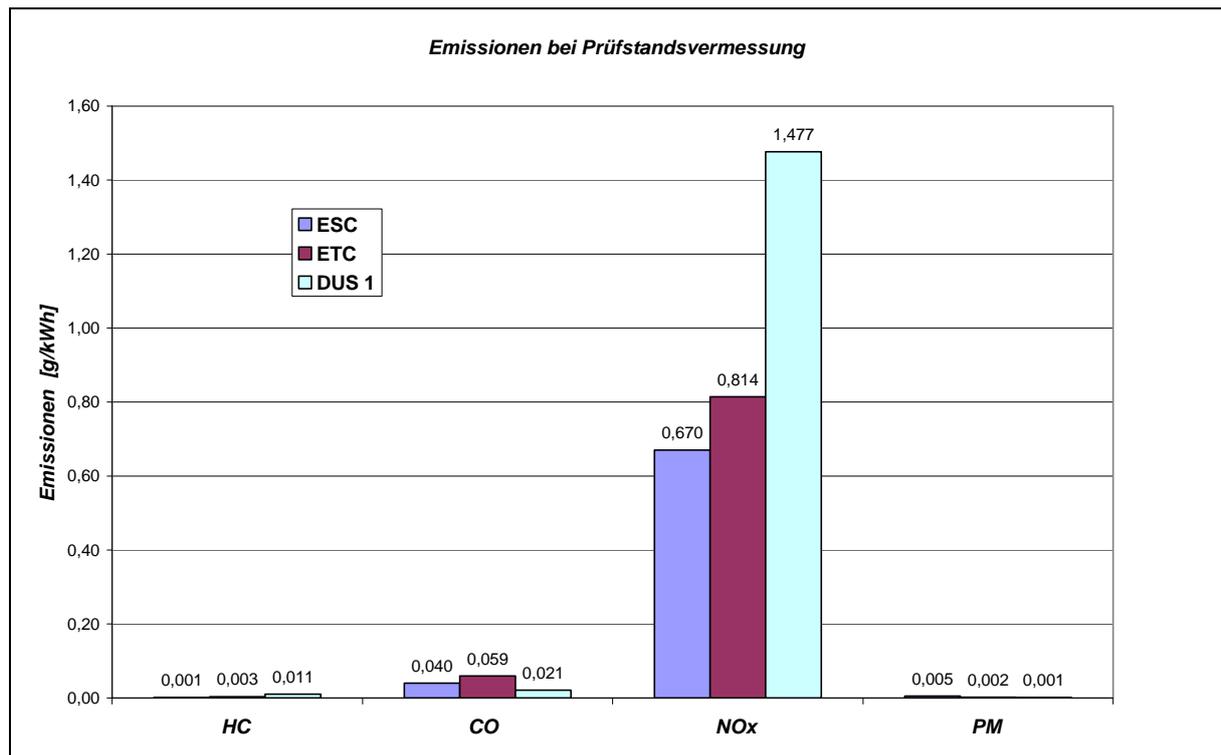
### **3.5.7 Messung der Motordrehzahl**

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 einer geeigneten Messdatenverarbeitung in ein Analogsignal umgeformt und an das SEMTECH-D weitergegeben.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Prüfstandsergebnisse

Durch den Systemhersteller wurden zur Wiedererlangung der Betriebserlaubnis Prüfstandsuntersuchungen durchgeführt, bei denen der Busmotor OM457 hLA mit 260 kW Leistung in Verbindung mit dem Nachrüst-SCRT-System in den gesetzlich vorgeschriebenen Prüfzyklen vermessen wurde.



**Abbildung 11:** Emissionen im ESC, ETC und Düsseldorfer Zyklus

Abbildung 11 zeigt die Ergebnisse der Messungen im ESC (European Stationary Cycle), ETC (European Transient Cycle) und dem Düsseldorfer Zyklus, wie er in dem vorangegangenen Vorhaben des LANUV entwickelt worden ist. Es ist zu erkennen, dass die 1 g/kWh-Grenze für die Stickoxidemissionen in den gesetzlichen Zyklen ESC und ETC unterschritten werden konnte. Der niedriglastige Düsseldorfer Zyklus liefert ein deutlich höheres NO<sub>x</sub>-Ergebnis.

Durch den Oxidationskatalysator und den Partikelfilter liegen die anderen Komponenten erwartungsgemäß auf niedrigstem Niveau.

## 4.2 Fahrzyklus

### 4.2.1 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 12 zeigt beispielhaft die zeitlichen Signalverläufe eines Fahrtabschnittes. Eine ähnliche Vorgehensweise wurde auch für die gasförmigen Emissionen ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HC}$ ,  $\text{NO}_x$ ) angewandt.

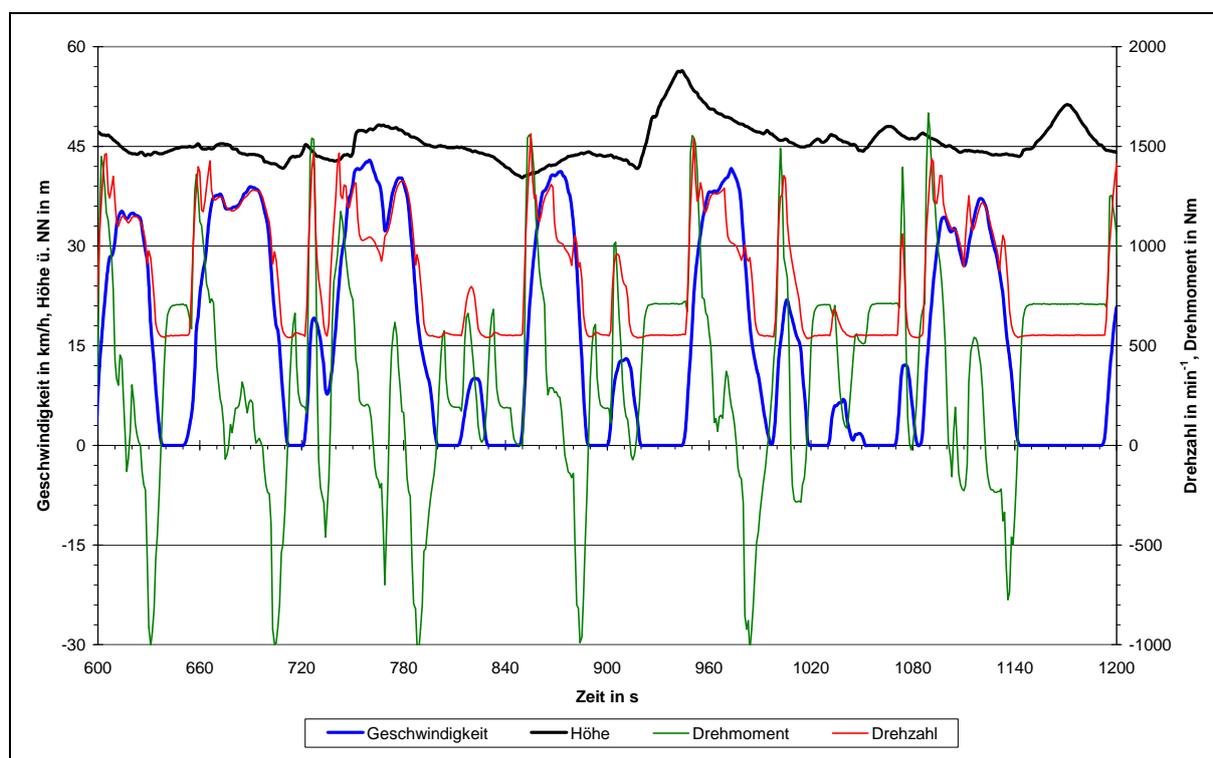


Abbildung 12: Exemplarischer Zeitverlauf

Um die relativen Motorbelastungen bestimmen zu können, musste für jede gemessene Motordrehzahl die entsprechende Motorleistung bei Volllast bekannt sein. Dazu wurden die vorliegenden Leistungswerte der Volllastkurve mittels eines Polynoms 6. Grades 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 Volllastleistung 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 (siehe Abbildung 15).

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.

### 4.3 Zyklusentwicklung „Hagener Zyklus“

Wie bereits vorher beschrieben, soll für die Stadt Hagen ein spezieller Fahrzyklus entwickelt werden, der folgende Merkmale aufweisen soll:

- Repräsentativität
- Nachfahrbarkeit auf dem Motorprüfstand
- Übertragbarkeit auf andere Städte mit ähnlichen Bedingungen
- Anwendbarkeit für andere, stadtbusspezifische Themen

Das Fahrprofil soll als Geschwindigkeit / Zeit-Profil [ $v(t)$ -Fahrprofil] und als Drehmoment / Drehzahl-Profil [ $M(n)$ -Fahrprofil] dargestellt werden und eine zeitliche Ausdehnung von 1800 Sekunden haben.

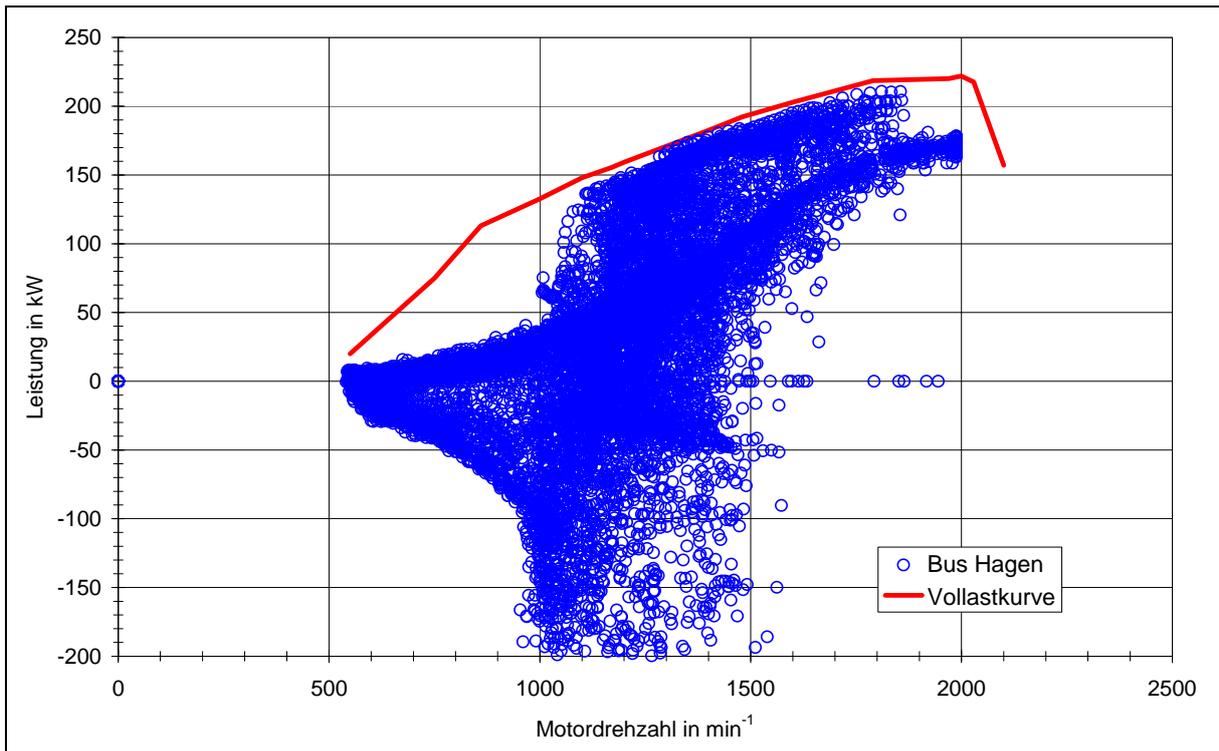
Zur Auswertung der gemessenen Daten war die Kenntnis der technischen Daten der Testfahrzeuge von großer Wichtigkeit. In der folgenden Tabelle 10 sind die für die Berechnung wichtigen technischen Daten noch einmal zusammengefasst.

**Tabelle 10:** Technische Daten des Versuchsfahrzeuges, [Quelle: Evobus GmbH]

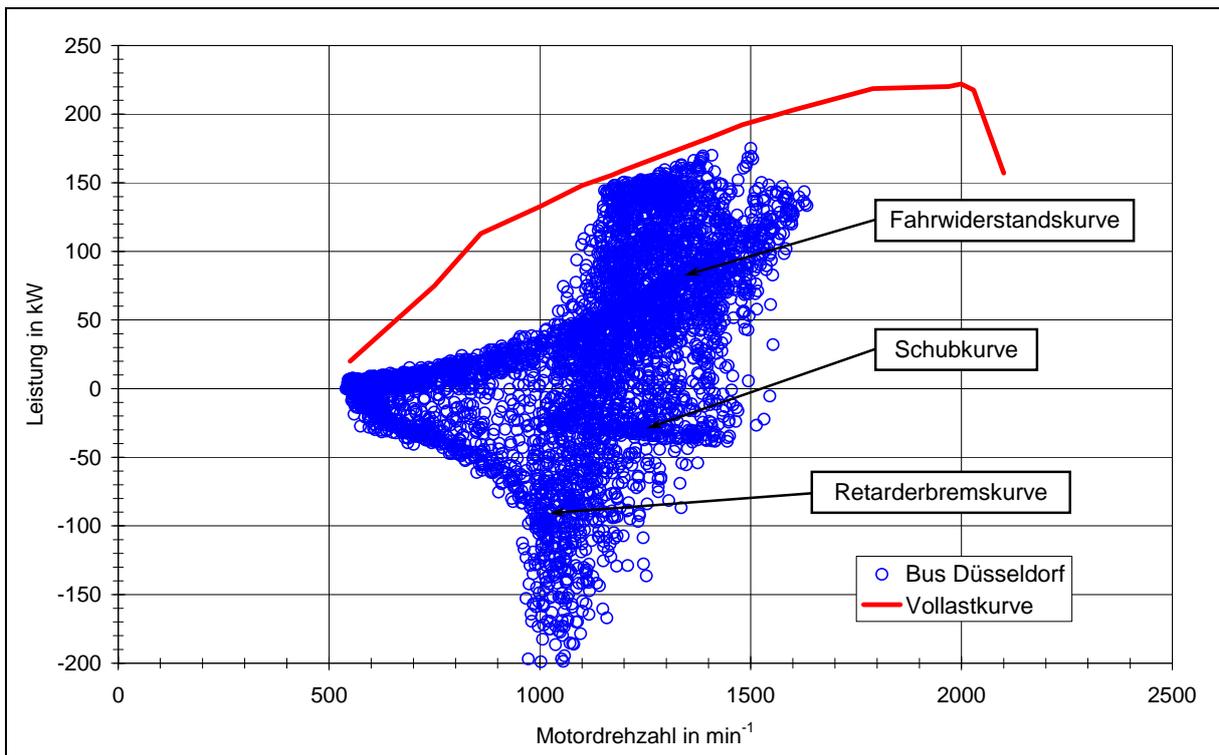
Fahrzeug	Gelenkbus MB O 530 GN 3 Citaro
Motorleistung	220 kW bei 2000 min <sup>-1</sup>
Motordrehmoment	1250 Nm bei 1100 min <sup>-1</sup>
Getriebeübersetzung	1.Gang: 4,9(nur im Anfahrpunkt) 2.Gang: 1,36 3.Gang: 1,0 4.Gang: 0,73 R-Gang: 4,1
Antriebsachse	Portalachse, Außenplanetenachse Achsübersetzung: 5,771 (6,21)
Bereifung	275/70 R 22,5
Zul. Gesamtmasse	28000 kg
Test-Gesamtmasse	ca. 22000 kg (20000 kg)
Höhe über alles	3076 mm
Breite	2550 mm

#### 4.3.1 Vorbemerkung zur Besonderheit des Voith DIWA® Getriebes

In der Abbildung 13 sind die realen Fahrwiderstandskurven des Gelenkbusses, d.h. der Leistungsbedarf, den das Fahrzeug zur Fahrt bei einer bestimmten Geschwindigkeit benötigt, durch die Projektion der einzelnen Betriebspunkte in das Leistungskennfeld sehr gut erkennbar. Auch die Motorschubkurve, die die vom Motor aufgenommene Leistung darstellt, wenn der Fahrer das Gaspedal nicht betätigt und der Motor vom Fahrzeug geschoben wird sowie die Retarderbremskurve, d.h. die von der ins Getriebe integrierten hydraulischen Bremse erzeugte Bremsleistung, sind sehr gut sichtbar. Abbildung 14 zeigt das gleiche Bild für Fahrten in Düsseldorf. Sehr deutlich zu erkennen ist der größere Volllastanteil bei den Fahrten in Hagen, der auf ausgeprägte Steigungsstrecken in die städtischen Randbezirke zurückzuführen ist. Darüber hinaus ist zu sehen, dass in Hagen Drehzahlbereiche erreicht werden, die in Düsseldorf nicht gefahren werden.

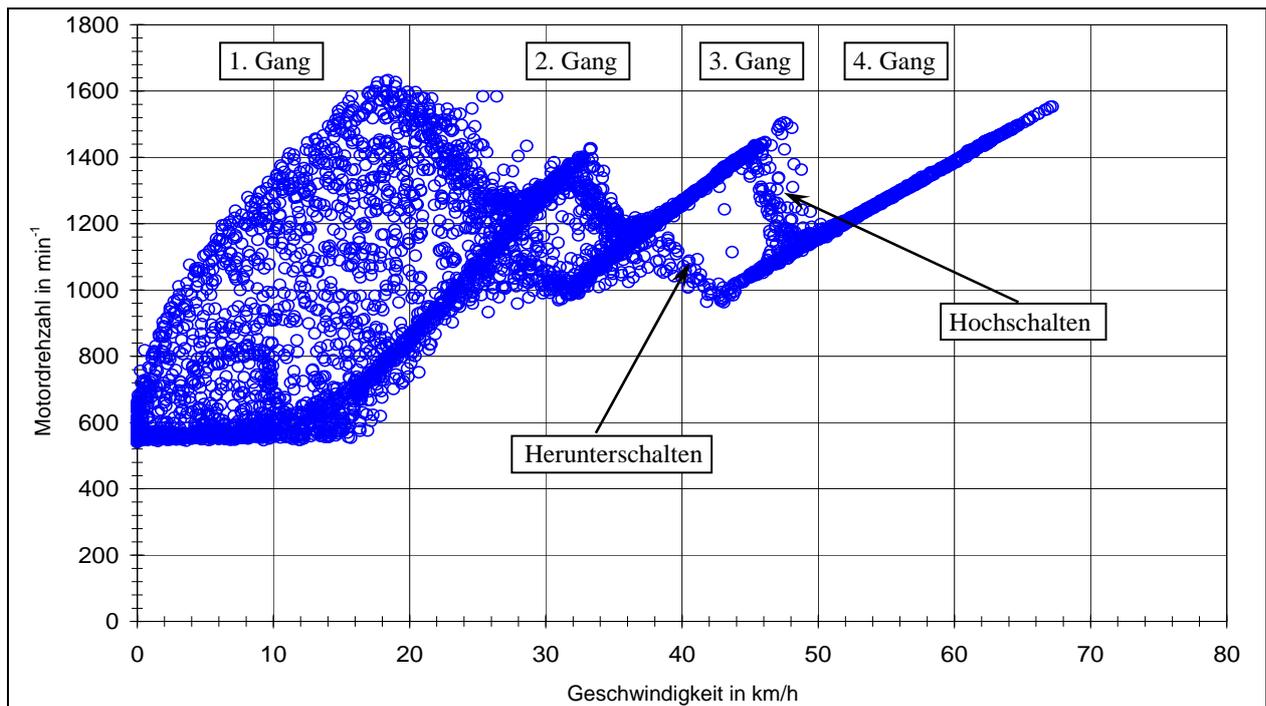


**Abbildung 13:** Leistungskennfeld (Fahrten in Hagen)



**Abbildung 14:** Leistungskennfeld (Fahrten in Düsseldorf)

Betrachtet man die Drehzahl / Geschwindigkeitsdarstellung in Abbildung 15 wird eine Besonderheit des verwendeten Busetriebes deutlich.

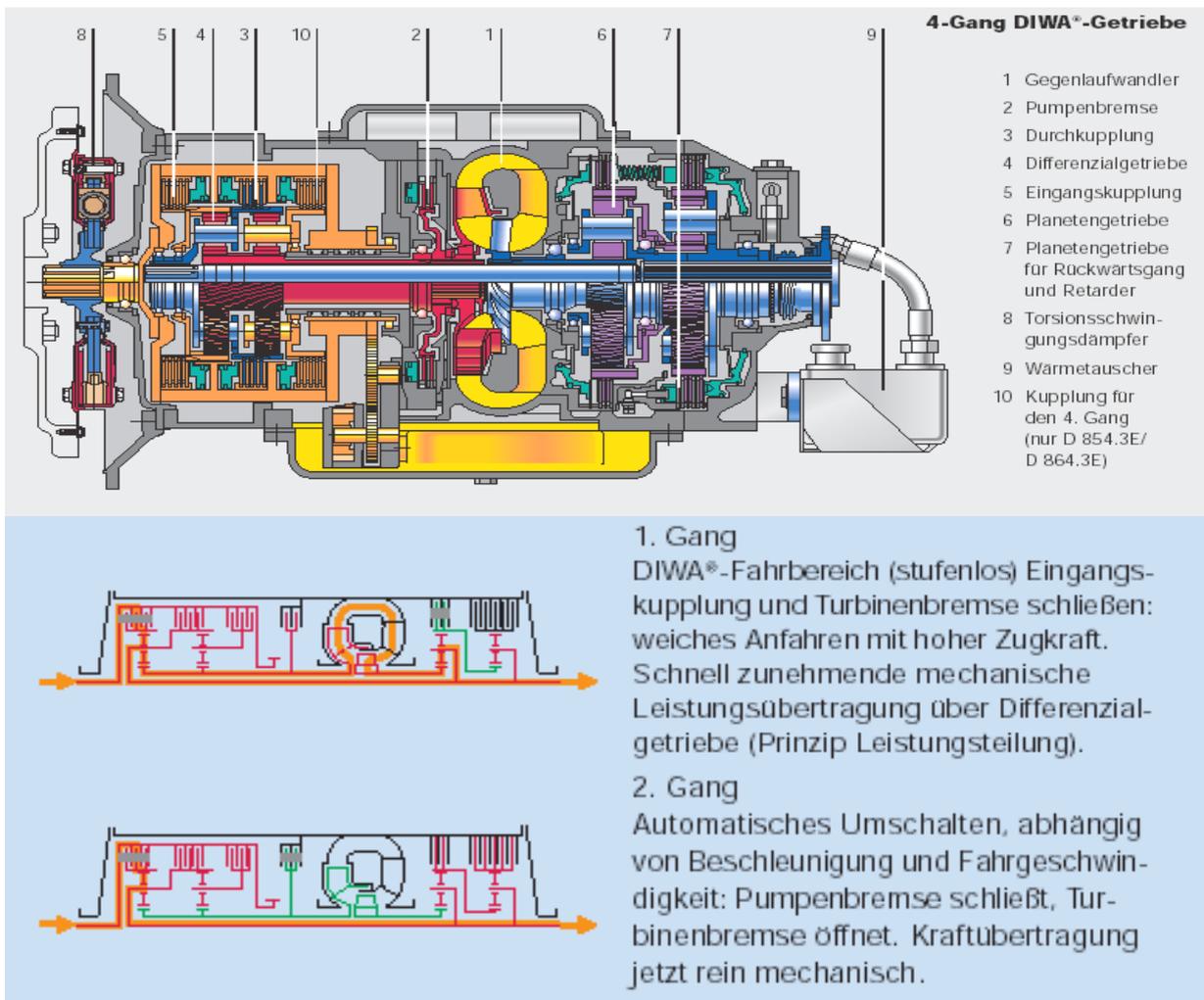


**Abbildung 15:** Drehzahl / Geschwindigkeitsdiagramm

Die technische Besonderheit dieses Getriebes ist der Differenzialwandler (DIWA). Vor dem hydrodynamischen Wandler befindet sich ein Planetendifferenzialgetriebe, welches die Motorleistung teilt.

Ein Teil der Motorleistung wird mechanisch, ein anderes Teil der Leistung hydraulisch übertragen. Mit steigender Fahrgeschwindigkeit wird der hydraulische Anteil kleiner, bis das Getriebe in den 2. Gang schaltet und die Leistung dann rein mechanisch übertragen wird. Dadurch ist das Übersetzungsverhältnis des 1. Ganges nur im Anfahrpunkt konstant, im weiteren Geschwindigkeitsbereich bis etwa 35 km/h ist das Übersetzungsverhältnis variabel und lastabhängig. Dies führt zu der in Abbildung 15 sichtbaren Punktwolke bei geringen Geschwindigkeiten.

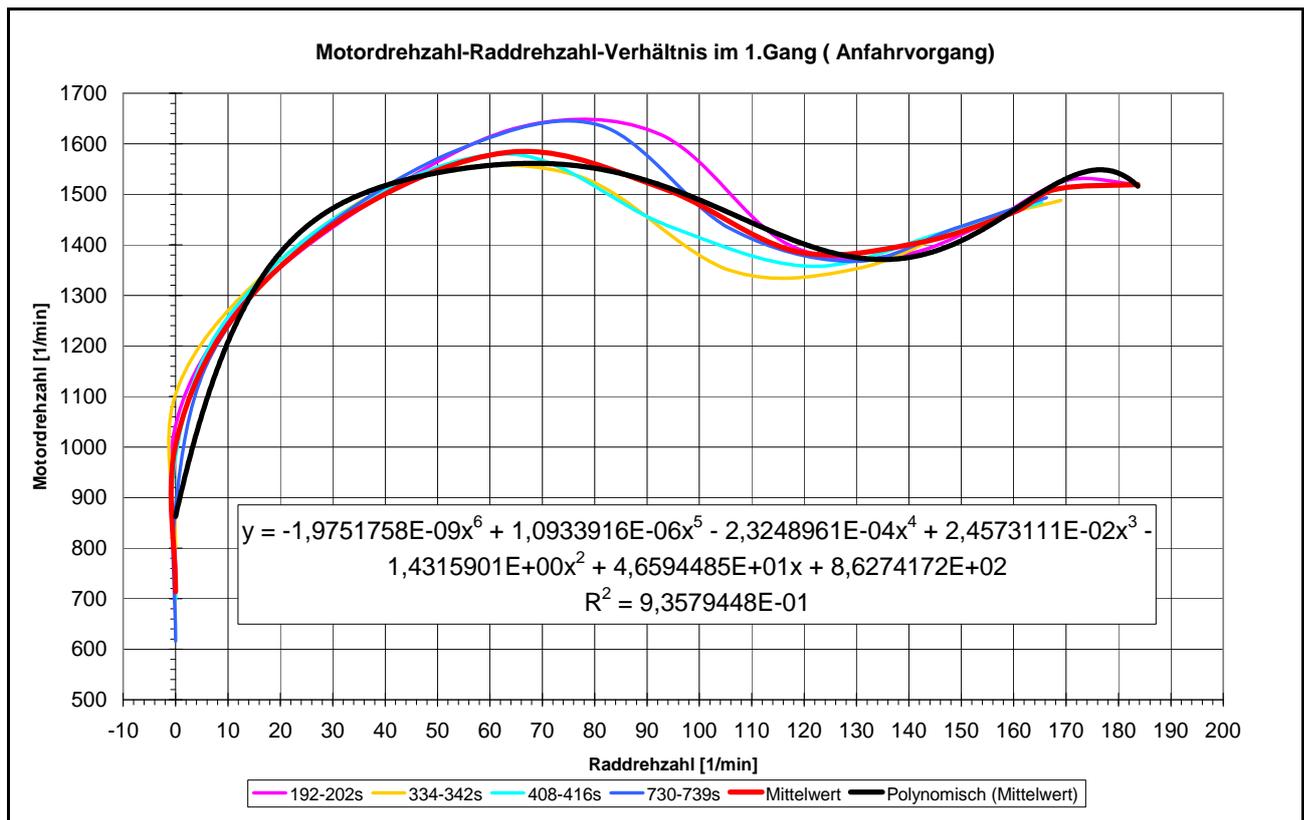
Die Abbildung 16 zeigt den inneren Aufbau des Getriebes und den Leistungsfluss im 1. und 2. Gang.



**Abbildung 16:** Voith DIWA® Automatgetriebe, [Quelle: Voith AG]

Im Drehzahl-Geschwindigkeits-Diagramm (Abbildung 15) sind die einzelnen Getriebestufen ersichtlich. Dabei sind die oberen Flanken die Hochschaltflanken und die unteren die Herunterschaltflanken. Durch die variable, lastabhängige Übersetzung ist der Bereich des ersten Ganges breit gestreut.

Um das Übersetzungsverhältnis des 1. Ganges mathematisch beschreiben zu können, wurden mehrere Anfahrvorgänge mit ähnlichen Charakteristiken ausgesucht und verglichen. Aus den Anfahrvorgängen wurde ein Mittelwert gebildet und darüber eine Trendfunktion gelegt. Die folgende Abbildung 17 zeigt die angenäherte Funktion des 1. Ganges.



**Abbildung 17:** Mathematische Funktion des 1. Ganges

Die Problematik des 1. Ganges, nämlich die Last- und Drehzahlabhängigkeit der Übersetzung, stellt auch hohe Anforderungen an die Motorenprüfstände. Der Motorenprüfstand muss hochdynamisch sein und die Fahrwiderstandskurve sowie Soll-Motormoment und Soll-Motordrehzahl aus dem  $v(t)$ -Fahrprofil berechnen können. Dazu müssen neben dem Fahrzeuggewicht und den Übersetzungen des Schaltgetriebes sowie des Achsgetriebes auch die Schaltpunkte des Schaltgetriebes bekannt sein.

Während beim Handschaltgetriebe die Schaltpunkte relativ einfach festzulegen sind, z.B. bei einer bestimmten Motordrehzahl und Fahrgeschwindigkeit, stellt die variable, lastabhängige Übersetzung des 1. Ganges des Voith DIWA® Automatgetriebes eine große Herausforderung für den Motorenprüfstand dar. Nicht alle Prüfstände können diese Aufgabe bewerkstelligen.

Aus der Tatsache, dass der Hagerer Fahrzyklus auf jedem vorschriftenkonformen dynamischen Motorenprüfstand nachfahrbar sein soll, resultiert der Schritt zur Entwicklung eines relativen  $M(n)$ -Fahrprofils, welches gleiche Anforderungen an die Motorenprüfstände wie der europäische Zulassungszyklus ETC (European Transient Cycle) stellt.

Somit kann der Hagerer Fahrzyklus auf jedem Motorenprüfstand gefahren werden, der die Anforderungen für den ETC erfüllt.

### **4.3.2 Vorgehensweise**

Bei der Entwicklung des repräsentativen Fahrzyklus wurde der folgende 4-Schritte-Ansatz verwendet:

1. Sammeln von Messdaten, Berechnung und Klassierung der zusätzlich notwendigen Daten wie mittlere Geschwindigkeit, Beschleunigung, Leistung etc.
2. Erzeugung einer Referenz-Datenbank, die alle Messdaten der Testfahrzeuge sowie wichtige Einflussparameter wie Stillstandsanteile, mittlere Geschwindigkeit und Beschleunigung, Leistung etc. beinhaltet. Bildung eines Referenzfahrzyklus aus der Referenzdatenbank.
3. Ableitung eines transienten Fahrzeugzyklus aus dem Referenzfahrzyklus in Form eines Geschwindigkeit-Zeit-Fahrprofils.
4. Transformation des transienten Fahrzeugzyklus in einen transienten Motorzyklus in Form eines relativen Drehmoment-Drehzahl-Fahrprofils.

### **4.3.3 Referenzdatenbank**

Die Messdaten wurden mit einer Frequenz von 1 Hz aufgezeichnet, d.h. pro Sekunde wurde jeweils ein Datensatz gespeichert. Dies führte zu einer relativ großen Datenmenge. Um die Handhabung der Messdaten bei der Weiterbearbeitung zu vereinfachen, wurden alle Daten in einer Access-Datenbank zusammengefasst. Neben den gemessenen Daten (Geschwindigkeit, Motordrehzahl, Drehmoment, gasförmige Emissionen) enthält die Datenbank wichtige gerechnete oder aus den Messwerten abgeleitete Daten. Die wichtigsten Parameter der Referenzdatenbank sind in der Tabelle 11 kurz erklärt.

**Tabelle 11:** Wichtige Parameter der Referenzdatenbank

Parameter	Beschreibung
veh_no	Fahrzeugnummer
ID_strecke	Streckenummer
ID_Fahrt_nr	Fahrtnummer
time	Zeit in s
M_cardan_korr	Korrigiertes, gemessenes Drehmoment in Nm
n_cardan	Kardanwellendrehzahl in min <sup>-1</sup> , gerechnet aus der Geschwindigkeit und Achsübersetzung
P_korr_kW	Korrigierte Leistung in kW, gerechnet aus n_cardan und M_cardan_korr
v_korr	Korrigierte, gemessene Geschwindigkeit in km/h
v_korr_kl	Gerundete Geschwindigkeit, klassiert in 5 km/h - Schritten
ag	Beschleunigung in m/s <sup>2</sup> , gerechnet aus der Geschwindigkeit
ag_kl	Gerundete Beschleunigung, klassiert in 0,1 m/s <sup>2</sup> - Schritten
P_rel	Relative Leistung in %
aP_rel	Änderung der P_rel pro Sekunde in %
P_rel_kl	Gerundete relative Leistung, klassiert in 10% - Schritten
P_norm	Normierte Leistung in %
P_norm_kl	Gerundete normierte Leistung, klassiert in 10% - Schritten
P_max	Maximale Leistung bei gegebener Drehzahl in kW
n	Gemessene Motordrehzahl in min <sup>-1</sup>
n_rel	Relative Motordrehzahl in %
n_rel_kl	Gerundete Relative Motordrehzahl, klassiert in 5% - Schritten
an_rel	Änderung der n_rel pro Sekunde in %

### 4.3.4 Normierung und Klassierung der Daten

Um die einzelnen Fahrabschnitte besser miteinander vergleichen zu können, wurden die wichtigsten fahrzyklusrelevanten Messgrößen wie die Geschwindigkeit, die Motordrehzahl, die Beschleunigung und die Leistung normiert und klassiert.

Die gemessenen Geschwindigkeitswerte wurden gerundet und in 5 km/h-Schritten klassiert.

Die Fahrzeugbeschleunigung  $a$  wurde aus der gemessenen Geschwindigkeit berechnet. Durch die zeitliche Auflösung von 1 Hz vereinfachte sich die Berechnungsformel für die Beschleunigung zu

$$a = \frac{\Delta v}{3,6}$$

Die gerechneten Beschleunigungswerte wurden ebenfalls gerundet und in 0,1 m/s<sup>2</sup>-Schritten klassiert.

Die Leistung  $P$  wurde aus der Kardanwellendrehzahl  $n_{cardan}$  und dem gemessenen Drehmoment an der Kardanwelle  $M_{cardan}$  nach der Formel

$$P \approx \frac{M_{cardan} \cdot n_{cardan}}{9549,3}$$

rechnerisch bestimmt. Das gemessene Kardanwellendrehmoment wurde noch um einen eventuell vorhandenen Nullpunkt-Offset korrigiert. Der Korrekturwert wurde aus dem Mittelwert der Drehmomentmesswerte gebildet, bei denen das Fahrzeug definitiv gestanden hat, der Motor im Leerlauf war und das Getriebe sich im ausgekuppelten Zustand (Neutralstellung) befand, d.h. die Kardanwelle entlastet sein müsste. Die Größenordnung der Korrektur lag hierbei deutlich unter 0,1 % der Maximaldrehmomente.

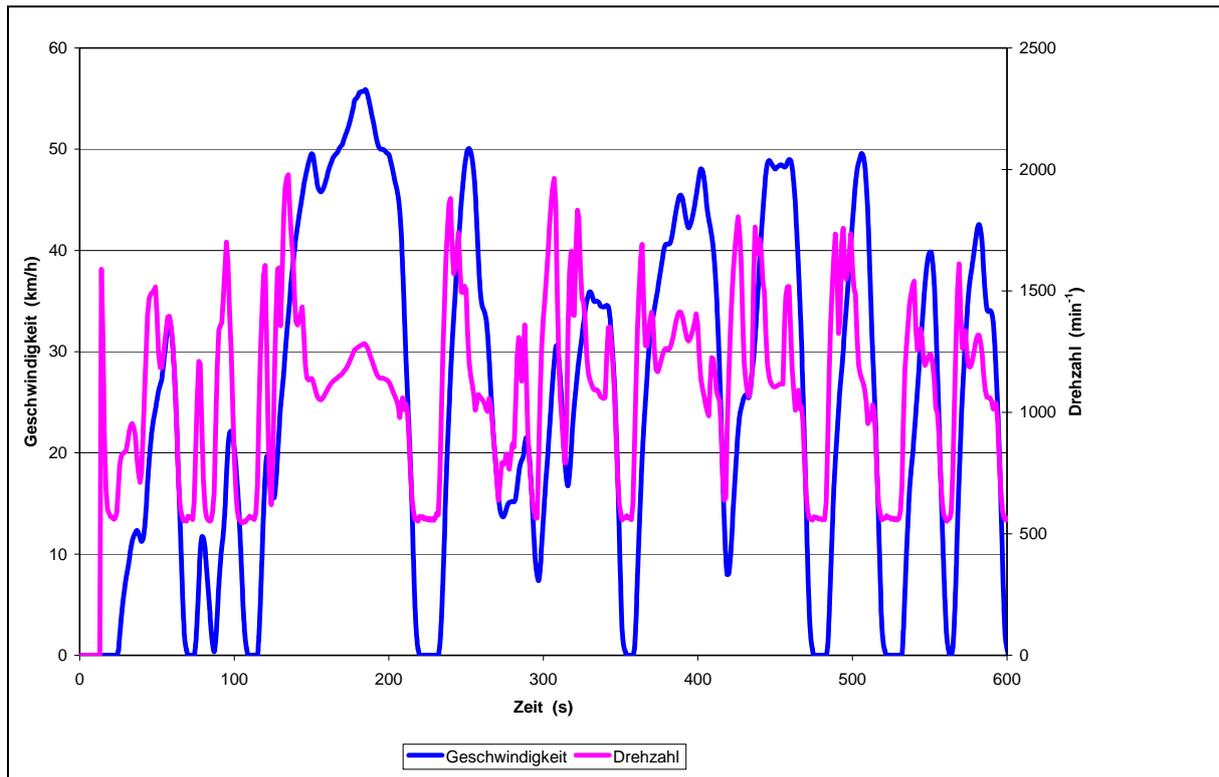
Die Kardanwellendrehzahl wurde aus der Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$ , dem Reifenabrollumfang  $U$  und der Hinterachsübersetzung  $i_A$  nach folgender Formel berechnet

$$n_{cardan} = \frac{v \cdot i_A}{U}$$

Die Normierung und Klassierung von Leistung und Drehzahl wurde wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben vorgenommen.

Die Maximalleistung  $P_{max}(n)$  wurde durch die Annäherung der Motor-Volllastkurve mittels eines Polynoms 6. Ordnung bestimmt. Die folgende Abbildung 18 zeigt die Approximationsfunktion der Volllastkurve.





**Abbildung 19:** Geschwindigkeits- und Motordrehzahlverlauf (Ausschnitt über 600s)

Für alle Fahrten wurden die mittlere Geschwindigkeit und die Stillstandsanteile gerechnet. Als Stillstand wurden dabei die Fahrgeschwindigkeiten kleiner als 2 km/h festgelegt.

In Abbildung 20 ist die kumulierte Häufigkeitsverteilung der Fahrgeschwindigkeiten des Busses auf beiden Linien dargestellt. Aus dem Diagramm ist zu erkennen, dass die Geschwindigkeitscharakteristik der Buslinie 512 (orange Linien) sich von der der Linie 514 (grüne Linien) unterscheidet. Die Linie 512 wird mit größeren Geschwindigkeiten durchfahren als die Linie 514. Die Verteilungen beider Linien besitzen ein jeweils recht schmales Toleranzband, d.h., dass die Abweichungen von Fahrt zu Fahrt nur gering sind. Die Form der Darstellung als kumulierte Geschwindigkeit erlaubt eine einfache Beurteilung der Repräsentativität einer Fahrt. Eventuelle Störereignisse wie ungewöhnliche Staus oder auch unterschiedliche Fahrer mit stark voneinander abweichenden Fahrgewohnheiten sind gut zu erkennen.

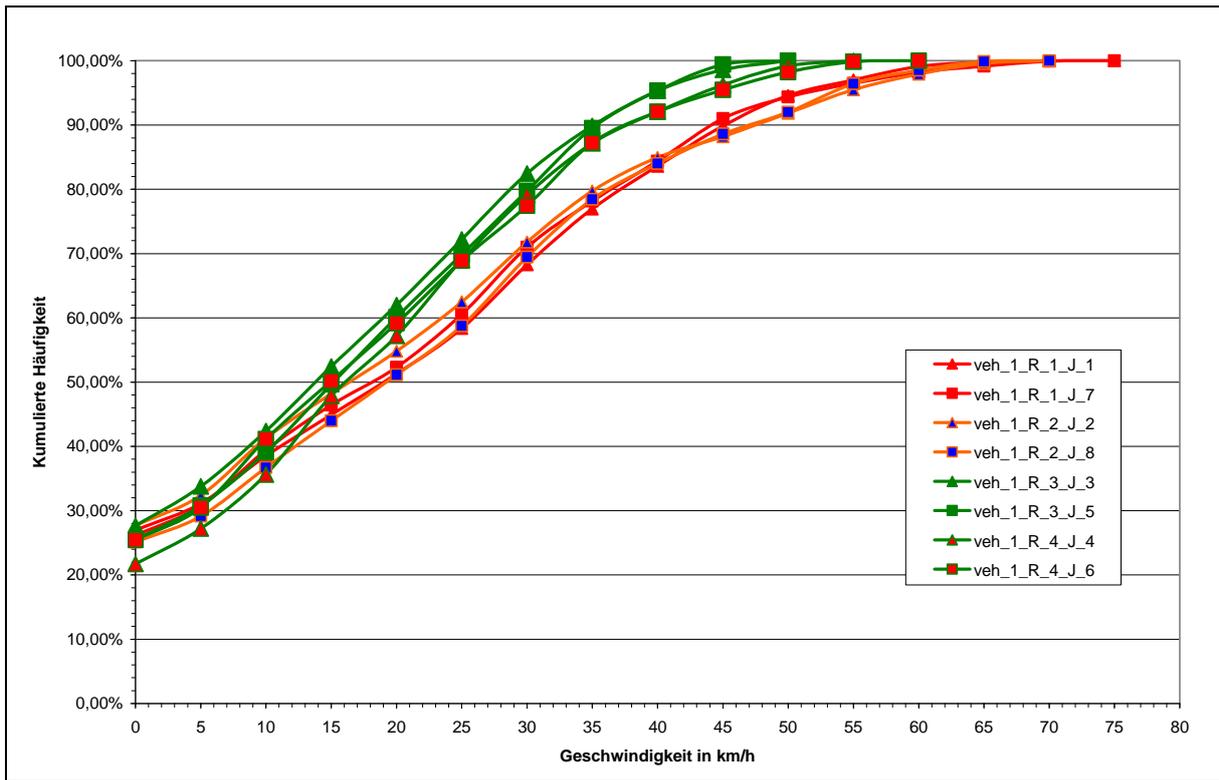


Abbildung 20: Kumulierte Geschwindigkeitsverteilung

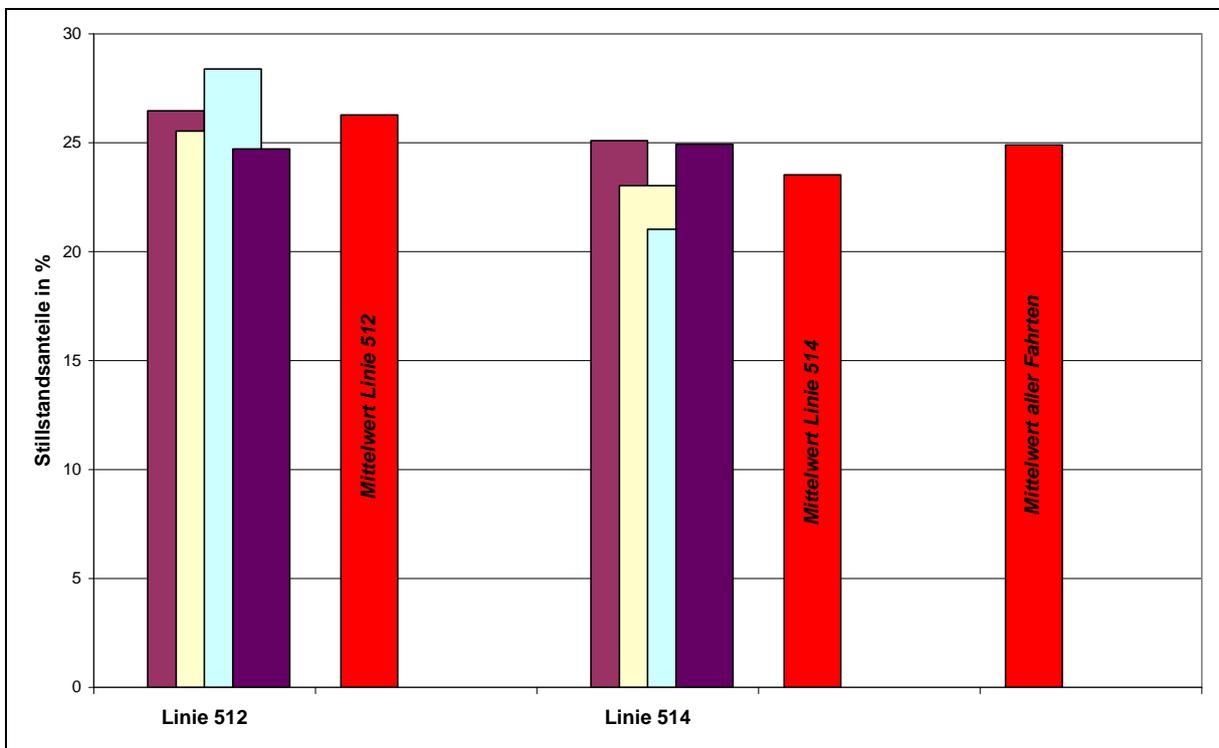
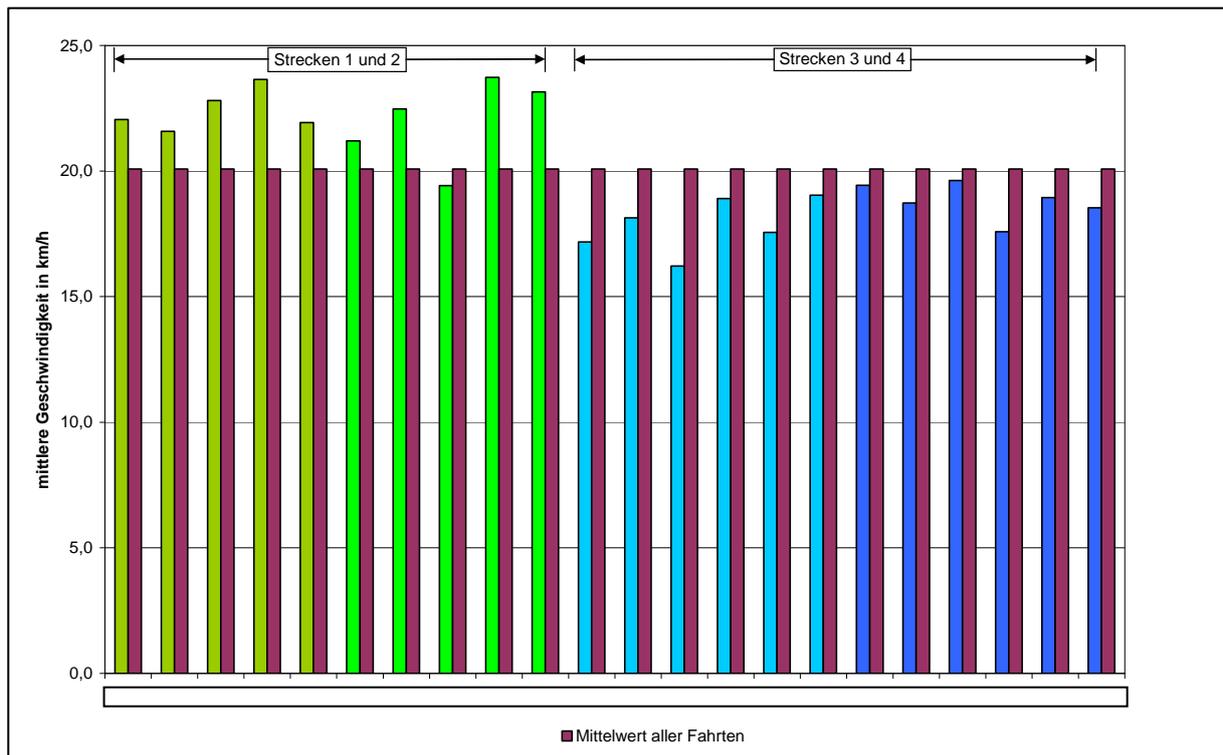


Abbildung 21: Stillstandsanteile der beiden Linien

In Abbildung 21 sind die prozentualen Stillstandsanteile von allen Fahrten dargestellt. Die mittlere Standzeit bei allen Linien beträgt durchschnittlich etwa 25 %. Die Standzeiten der einzelnen Linien liegen in einem kleinen Toleranzbereich, so dass alle Fahrten in die weiteren Betrachtungen mit einbezogen werden können.

In Abbildung 22 sind die Durchschnittsgeschwindigkeiten von allen Fahrten zusammengefasst. Hierbei ist ebenfalls zu erkennen, dass die Linie 514 (Strecken 3 u. 4) deutlich langsamer ist.

Die Durchschnittsgeschwindigkeit auf diesen Strecken beträgt etwa 18,3 km/h, während die mittlere Geschwindigkeit aller Fahrten bei ca. 20 km/h liegt.



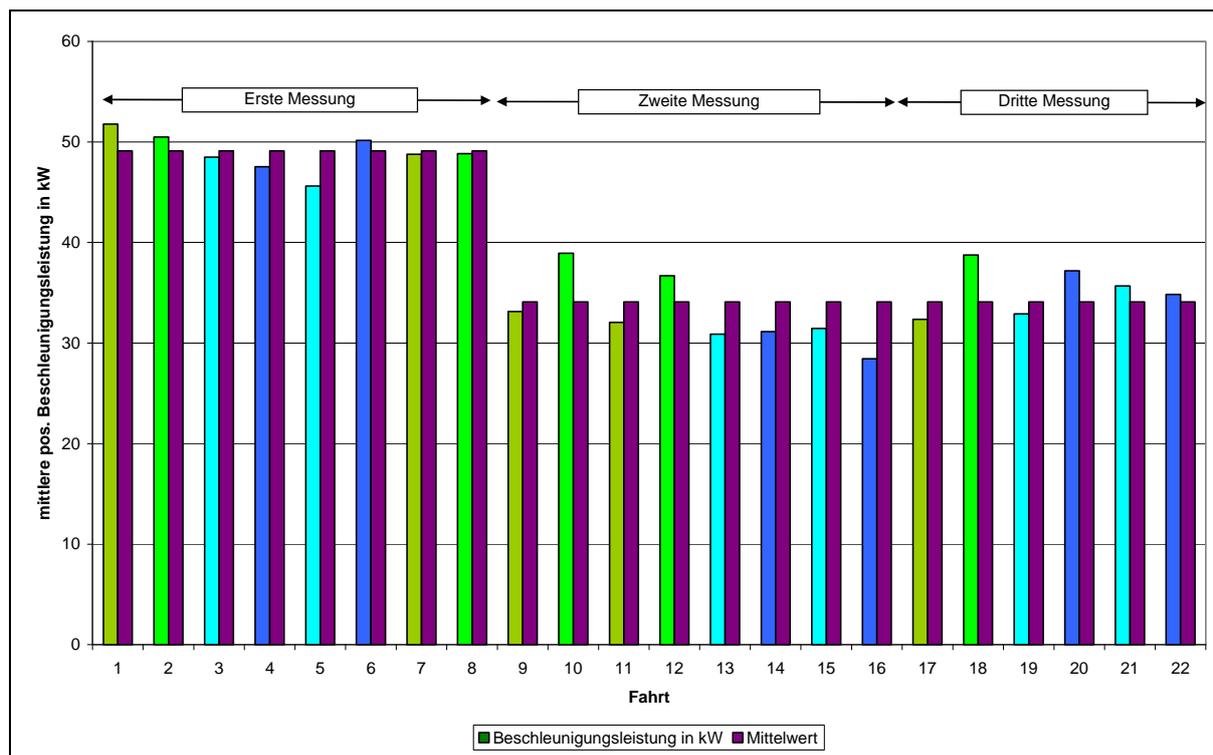
**Abbildung 22:** Mittlere Geschwindigkeiten der Testfahrzeuge

#### 4.3.6 Beschleunigungsleistung

Die maximal mögliche Fahrzeugbeschleunigung ist von der Fahrgeschwindigkeit und dem Leistungsgewicht des Fahrzeuges abhängig. Das Beurteilungsmaß der Fahrzeugbeschleunigung ist die Beschleunigungsleistung  $P_A$ , welche das Produkt aus Fahrgeschwindigkeit  $v$ , Fahrzeugbeschleunigung  $a$  und Fahrzeugmasse  $m$  darstellt

$$P_A = m \cdot a \cdot v$$

In Abbildung 23 sind die mittleren positiven Beschleunigungsleistungen ( $P_{a\_ave}$ ) aller Fahrten dargestellt. Die Unterschiede der einzelnen Fahrten resultieren hauptsächlich aus äußeren Verkehrssituationen.



**Abbildung 23:** Mittlere positive Beschleunigungsleistung

Die deutlichen Unterschiede zwischen der ersten und den beiden weiteren Messkampagnen sind in den unterschiedlichen angegebenen Ausladungen der Fahrzeuge zu suchen.

#### 4.3.7 Fahrstreckenauswahl für den Referenzfahrzyklus

Um die am besten passenden Fahrabschnitte zu selektieren, wurden alle Fahrten hinsichtlich ihrer Fahrgeschwindigkeit untersucht. Wie schon oben erwähnt unterscheiden sich die Strecken 1 und 2 von den anderen Strecken (Strecken ID siehe Tabelle 4). Nach dem Vergleich der Fahrgeschwindigkeitsverteilung der einzelnen Fahrten auf den Strecken 1 und 2 mit der durchschnittlichen Geschwindigkeitsverteilung aller Fahrten auf diesen Strecken haben sich die Fahrten 7 und 8 als die am Ähnlichsten dem Durchschnitt entsprechend herausgestellt (siehe Abbildung 24). Diese Fahrten wurden als repräsentativ für die Fahrstrecken 1 und 2 bewertet und für die Fahrzyklusentwicklung ausgewählt.

Analog zu den Fahrten auf den Strecken 1 und 2 wurden auch die Fahrten auf den Strecken 3 und 4 untersucht. Dabei wurden die Fahrten 5 und 6, die in etwa dem Durchschnitt aller Fahrten dieser Strecken entsprechen, ausgewählt. (siehe Abbildung 25).

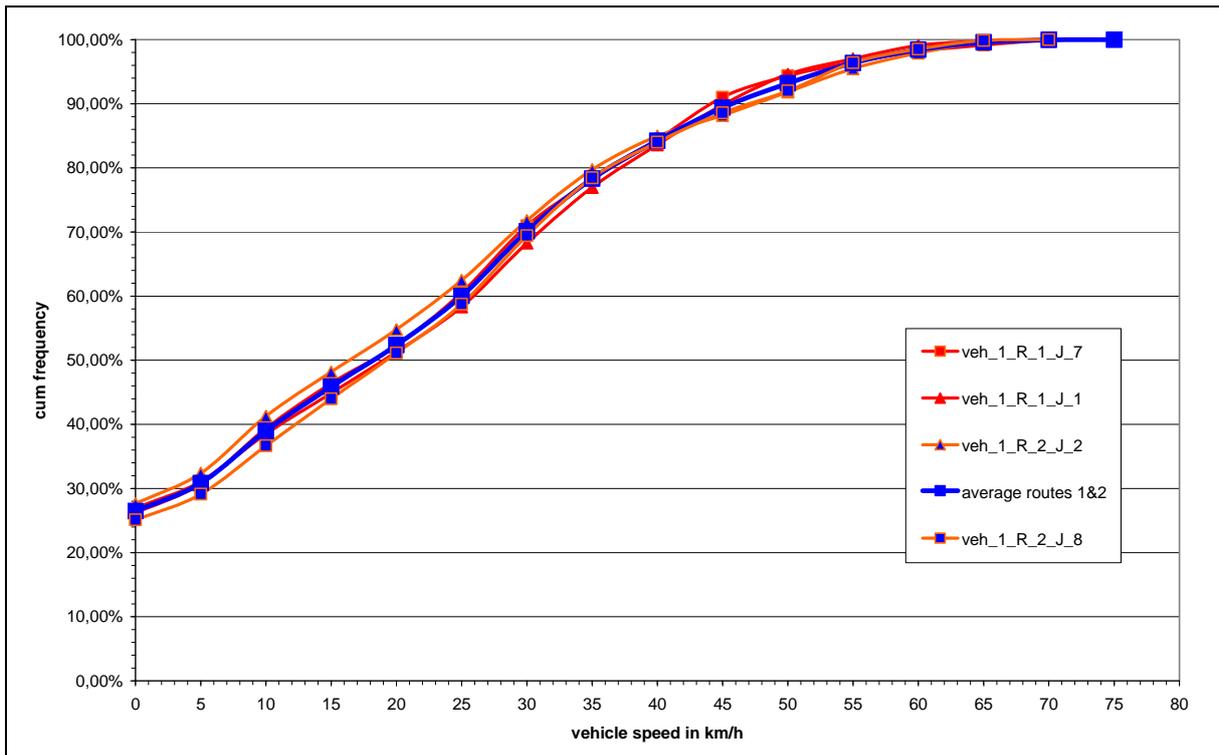


Abbildung 24: Fahrstreckenauswahl; Geschwindigkeitsverteilung Strecken 1 und 2

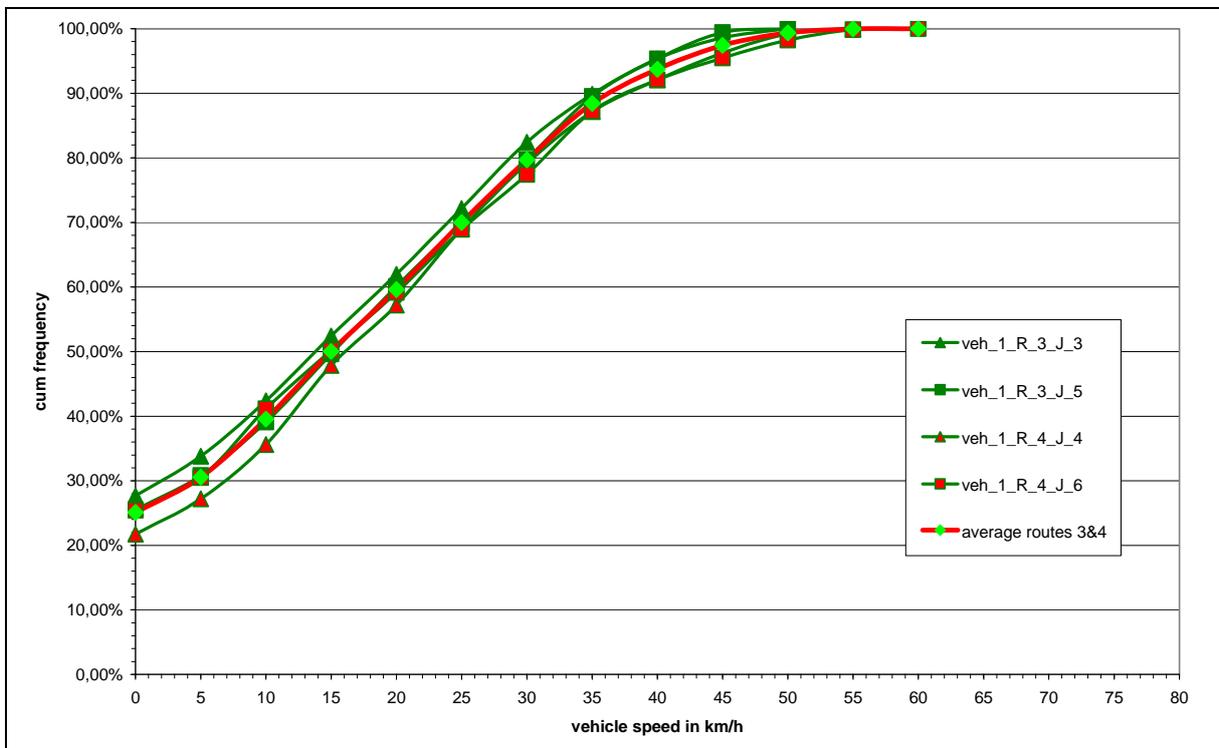
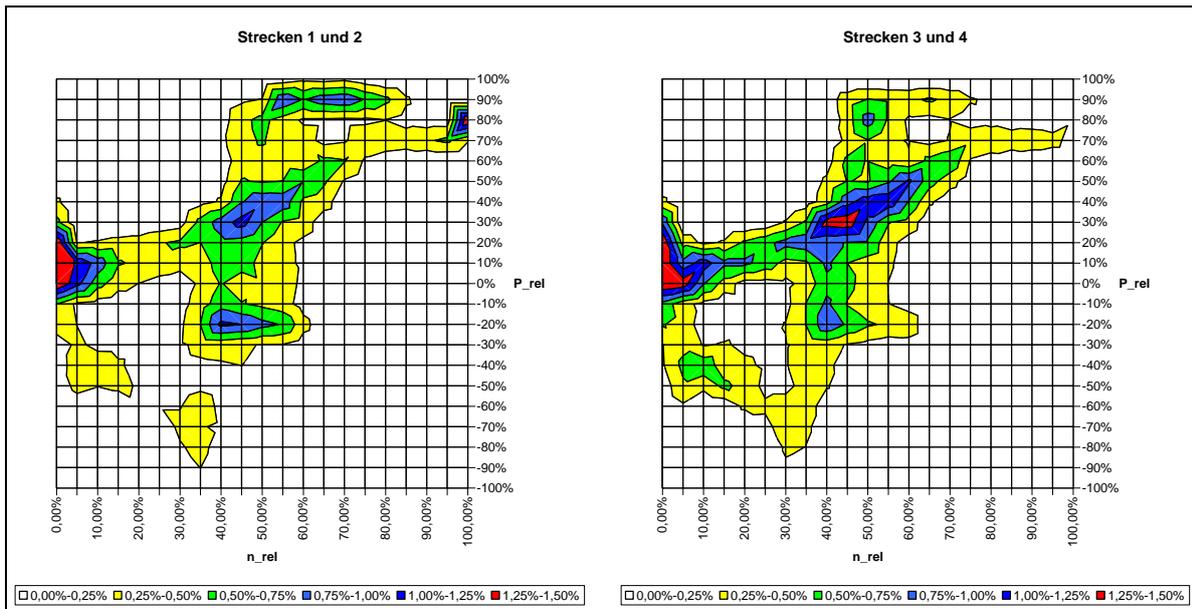


Abbildung 25: Fahrstreckenauswahl; Geschwindigkeitsverteilung Strecken 3 und 4



**Abbildung 26:** Streckenbezogene Verteilung der Motorbelastung

In Abbildung 26 ist die streckenbezogene Häufigkeitsverteilung der Motorbelastung dargestellt. Hierbei gilt: je dunkler die Farbe, desto häufiger befindet sich der Motor in dem Lastbereich.

Aus den Diagrammen ist ersichtlich, dass die beiden Streckenpaare 1/2 und 3/4 durchaus unterschiedliche Motorbelastungen hervorrufen. Dabei befindet sich der Motor auf dem Streckenpaar 1/2 deutlich häufiger an der Vollast und dies auch bei hohen Drehzahlen. Streckenpaar 3/4 weist hingegen Motorbelastungen auf, die meistens im mittleren Drehzahl- und Lastbereich angesiedelt sind.

Der Referenzfahrzyklus besteht somit aus 4 Fahrten und dauert 7.115 Sekunden. In der Tabelle 12 sind die Zeitdauern sowie Längen und Durchschnittsgeschwindigkeiten der einzelnen Fahrten zusammengefasst.

**Tabelle 12:** Zusammensetzung Referenzfahrzyklus

Fahrt	Strecke	Länge [m]	Dauer [s]	mittlere Geschwindigkeit [km/h]	Streckendistanz [km]
5	3	15245	3026	18,14	15,24
6	4	14315	2752	18,73	14,31
7	1	24813	4140	21,58	24,81
8	2	25855	4143	22,47	25,85
Gesamt:		80228	14061	20,23	80,23

### **4.3.8 Repräsentativer Fahrzeugzyklus (v(t) - Fahrzyklus)**

Der aus den Messdaten abgeleitete Referenzfahrzyklus ist zwar repräsentativ für das wirkliche Verhalten der Stadtomnibusse, jedoch ist er viel zu lang für die Untersuchungen am Motorenprüfstand. Deshalb wird aus dem Referenzfahrzyklus ein repräsentativer Fahrzyklus abgeleitet, der dieselben Charakteristiken zeigt wie der Referenzfahrzyklus. Die Fahrzyklusdauer wurde wie beim ETC auf 30 min (1800 s) begrenzt.

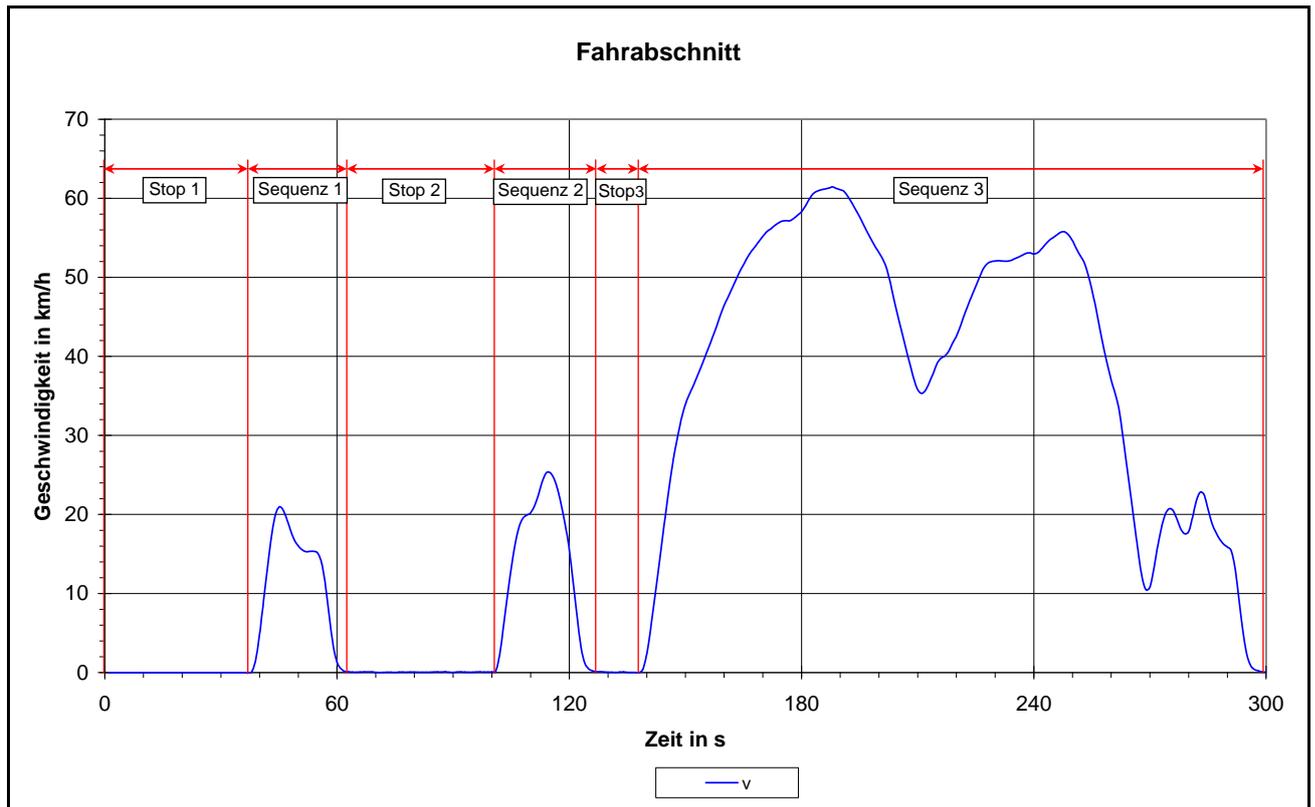
Für die Ableitung des repräsentativen Fahrzyklus wird folgende Vorgehensweise benutzt:

- Analyse des Referenzfahrzyklus
- Bildung von Musterzyklen (sample cycles)
- Statistischer Vergleich zwischen dem Referenzzyklus und den Musterzyklen und Auswahl des repräsentativen Fahrzyklus
- Vollendung des repräsentativen Fahrzyklus.

#### **4.3.8.1 Analyse des Referenzfahrzyklus**

Ein wichtiges Element für die Analyse ist die Zeitdauer der Fahrsequenzen und der Stopps. Eine Fahrsequenz ist definiert als ein Geschwindigkeitsabschnitt zwischen zwei Stopps. Ein Stopp ist definiert als ein Zeitabschnitt mit durchgehender Geschwindigkeit gleich Null (bzw.  $< 2$  km/h). Die Abbildung 27 zeigt als Beispiel einen kurzen Zyklus, bestehend aus 3 Fahrsequenzen und 3 Stopps aus den aufgenommenen Messdaten.

Die Anzahl der Stopps ist normalerweise gleich der Anzahl der Fahrsequenzen. Allerdings wurde bei den Vermessungsfahrten die Datenaufzeichnung immer mit einem Stopp begonnen und mit einem Stopp beendet. Dadurch ist die Anzahl der Stopps beim Referenzzyklus um 5 höher als die der Fahrsequenzen.



**Abbildung 27:** Beispiel Fahrabschnitt

Die Analyse des Referenzzyklus beginnt mit der Separation der Fahrsequenzen (microtrips) und der Stopps. Dabei werden die Geschwindigkeitsabschnitte immer zusammen mit den (relativen) Motorleistungsabschnitten betrachtet. Im nächsten Schritt werden die durchschnittlichen Dauern der Fahrsequenzen und der Stopps berechnet. Mit der Kenntnis der durchschnittlichen Dauern lässt sich die Anzahl der Fahrsequenzen  $n_{seq}$  und der Stopps  $n_{stop}$  des repräsentativen Fahrzyklus nach folgender Formel errechnen:

$$n_{seq} = n_{stop} = \frac{t_{Zykl}}{(t_{ave,seq} + t_{ave,stop})}$$

Mit der gewünschten Fahrzyklusdauer  $t_{Zykl} = 1800$  s und der durchschnittlichen Sequenzdauer  $t_{ave,seq} = 58$  s sowie der durchschnittlichen Stoppdauer  $t_{ave,stop} = 19$  s beträgt die theoretische Anzahl der Fahrsequenzen und der Stopps 23. In der Tabelle 13 sind die einzelnen Dauern der Fahrsequenzen und der Stopps des Referenzfahrzyklus zusammengefasst.

**Tabelle 13:** Dauern der Fahrsequenzen und der Stopps (Referenzzyklus)

Nr.	Dauer der Fahrsequenzen in s				Dauer der Stopps in s			
	Fahrt 5	Fahrt 6	Fahrt 7	Fahrt 8	Fahrt 5	Fahrt 6	Fahrt 7	Fahrt 8
1	67	35	39	103	44	35	177	32
2	43	52	69	91	11	1	10	22
3	103	64	110	84	14	5	3	7
4	27	52	45	33	2	13	19	19
5	1	55	15	93	4	12	39	2
6	81	33	39	107	8	6	4	20
7	111	16	68	253	7	6	20	11
8	16	126	56	137	12	23	4	52
9	89	40	38	196	63	55	12	2
10	25	33	57	49	12	13	15	33
11	47	42	8	156	9	22	13	7
12	38	23	52	58	14	36	9	19
13	31	18	60	34	7	11	5	38
14	59	49	14	110	15	9	12	25
15	56	54	44	74	11	49	4	26
16	63	27	57	38	8	21	14	13
17	62	69	70	74	17	5	7	94
18	85	143	62	113	10	66	14	28
19	22	38	24	61	1	20	22	36
20	46	55	35	108	11	27	15	27
21	15	31	19	25	17	11	6	14
22	97	84	39	24	31	9	28	29
23	62	86	24	33	9	11	69	43
24	31	12	52	28	9	11	15	9
25	39	82	94	45	7	11	20	30
26	15	36	20	18	11	11	12	53
27	46	69	44	24	14	8	9	17
28	65	78	44	14	4	7	76	8
29	15	37	52	70	1	15	13	21
30	73	48	70	69	30	11	7	34
31	62	44	24	50	44	8	10	21
32	75	37	31	33	39	38	22	23
33	14	28	37	28	27	7	9	22
34	72	50	47	16	25	3	10	11
35	27	8	40	44	20	35	2	28
36	24	164	21	45	50	16	4	2
37	103	39	62	54	7	9	18	20
38	57	36	7	28	28	1	24	7
39	48	73	89	63	9	23	5	15
40	50		52	9	14	5	5	26
41	172		90	42	6		14	6
42	44		45	46	32		9	14
43			75	98	33		6	7
44			112	30			8	6
45			213	111			68	14
46			225	80			51	10
47			160	28			23	10
48			49				24	2
49			71				15	
50			29				6	
51			69				19	
52			79				11	
53			36				10	
54							10	

Der repräsentative Fahrzyklus muss eine ähnliche Verteilung der Fahrsequenz- und Stoppdauern zeigen, wie der Referenzzyklus. Dadurch, dass der Referenzzyklus im Allgemeinen eine viel größere Anzahl an Sequenzen besitzt, lässt sich dessen Verteilung nicht direkt auf den repräsentativen Fahrzyklus übertragen. Die Verteilung der Sequenzen- und Stoppdauern des repräsentativen Fahrzyklus wird mit Hilfe des Gaußschen Prinzips der kleinsten Quadrate angenähert.

#### 4.3.8.2 Erstellung von Musterzyklen und Auswahl des repräsentativen Fahrzyklus

Nachdem die Verteilung der Fahrsequenzdauern bekannt ist, werden Musterzyklen erstellt, die aus verschiedenen Sequenzen der vorher berechneten Sequenzendauern zusammengesetzt werden. Um die richtigen Fahrsequenzen zu finden, wird ein Satz von Sequenzen für jede berechnete Dauer zusammengestellt. Diese Sequenzen werden aus den Messdaten des Referenzfahrzyklus ausgewählt. Die Sequenzen der ähnlichen Dauern müssen möglichst große Variation an Fahrgeschwindigkeiten zeigen, um möglichst viele verschiedene Musterzyklen erzeugen zu können. Die Stopps werden zum Musterzyklus in einer späteren Phase hinzugefügt.

Nachdem für jede berechnete Sequenzlänge ein Satz von Fahrsequenzen ausgewählt ist, werden mehrere Musterzyklen der gewünschten Länge erstellt. Aus diesen Kombinationen von Sequenzen wird diejenige ausgewählt, die mit dem Referenzzyklus am vergleichbarsten ist. Die Kriterien, die zum Vergleich verwendet werden, müssen noch definiert werden.

Als Vergleichskriterium für die Fahrgeschwindigkeitsmuster wird die Fahrgeschwindigkeit-Beschleunigungs-Matrix (*v-a*-Matrix) verwendet. Dies ist die beste Charakterisierung der Fahrmuster, denn aus der *v-a*-Matrix lassen sich alle Zyklusparameter ableiten.

Für den Vergleich der Motorleistung wird eine zweidimensionale Matrix der relativen Motorleistung und der Änderung der relativen Motorleistung pro Zeiteinheit (hier: 1 s) („ $P_{rel} - dP_{rel}/dt$ “-Matrix) verwendet.

Die  $P_{rel} - dP_{rel}/dt$ - sowie die *v-a*-Matrix des Referenzzyklus kann aufgestellt werden, sobald der Referenzzyklus entwickelt ist. Die Matrixzellen enthalten die zeitlichen Anteile der Wertekombination aus der relativen Motorleistung und der Änderung der relativen Motorleistung (bzw. Fahrgeschwindigkeit- und Beschleunigungswerte). Die Zellenwerte der Matrizen des Referenzzyklus werden durch die Gesamtdauer des Referenzzyklus geteilt und mit der gewünschten Fahrzyklusdauer multipliziert. Das ergibt dann die Zeitdauer, die eine bestimmte Kombination aus  $P_{rel}$  und  $dP_{rel}/dt$  (bzw. aus *v* und *a*) in dem repräsentativen Fahrzyklus zeigen sollte. In Tabelle 14 und Tabelle 15 sind die *v-a*- und  $P_{rel} - dP_{rel}/dt$ - Sollmatrizen für den Fahrzyklus dargestellt. Die Werte für die Fahrgeschwindigkeit, Beschleunigung, relative Leistung und die Änderung der relativen Leistung sind dabei, wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben, klassiert. Die Zyklusdauer beträgt 1498 Sekunden (exklusive Stopps).

Wenn die *v-a*- und  $P_{rel} - dP_{rel}/dt$ - Matrizen des Musterzyklus ein ähnliches Häufigkeitsverteilungsmuster wie die Sollmatrizen zeigen, sind alle wichtigen Zyklusparameter und -Eigenschaften vergleichbar mit dem Referenzzyklus und somit repräsentativ für den wirklichen Straßenverkehr.

Die Auswahl des repräsentativen Fahrzyklus erfolgt mittels eines statistischen Vergleichs zwischen den beiden Matrizen des Referenzzyklus und denen des jeweiligen Musterzyklus. Der statistische Vergleich wird mit dem Chi-Quadrat-Anpassungstest durchgeführt. Dabei werden die beobachteten Häufigkeitswerte des Musterzyklus mit den Häufigkeitswerten des Referenzzyklus verglichen. Je besser die Übereinstimmung der Häufigkeitswerte des Muster- und des Referenzzyklus ist, desto kleiner wird die Testgröße  $X^2$ . Die Testgröße  $X^2$  wird nach folgender Formel berechnet:

$$X^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(N_i - n_i^*)^2}{n_i^*}$$

- $X^2$ : Chi-Quadrat-Testgröße  
 $N_i$ : beobachtete Werte (Musterzyklus)  
 $n_i^*$ : erwartete Werte (Referenzzyklus)

Die beobachteten Häufigkeitswerte werden vom Musterzyklus und die erwarteten Werte vom Referenzzyklus (auf die gewünschte Zyklusdauer umgerechnet) berechnet.

**Tabelle 14:** v-a-Sollmatrix für den Fahrzyklus (Zeit in [s], ohne Stopps)

a [m/s <sup>2</sup> ]	v [km/h]															
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
1,8																
1,7			1													
1,4		2	2	2	1											
1,3		5	3	2	1											
1,2		2	2			2										
1,1		3	4	1	2	1	1	1								
1	1	3	1	6	3		1	1	1							
0,9	2	2		3	1	5	1			1						
0,8		3	1	4	4	1	4	6								
0,7		2	3	4	6	1	5	2	2	1						
0,6		2	1	3	5	7		4	1	2			1			
0,5	1	3	3	7	3	7	6		4	1		2	2	1		
0,4		3	8	6	4	6	10	2	5	9	8	6	8	3	1	
0,3	1	2	9	1	4	8	3	13	16	8	14	9	5	2	2	
0,2			5	1	3	6	9	12	14	14	12	9	1	3	5	
0,1		2	26	3	4	5	26	9	8	26	6	12	7	6	3	
0		4	81	12	4	2	99	11	12	25	8	17	14	4	3	2
-0,1			22		1	7	22	10	13	24	23	24	6	8	12	1
-0,2		1	2	1	5	11	10	10	14	6	15	22	10	7	5	
-0,3			3	1	5	3	2	3	5	6	4	4	7	5	1	
-0,4	3	1	4	3	2	8	7	8	5	5	4		2			
-0,5		6	1	3	4	3	5	4	2	5	1		1			
-0,6		4	2	3	3	2	2	4	1		1					
-0,7		3	1	2	7	1		2	5	3	1		1			
-0,8		6	5	4	2	3	2	2	2	1		1				
-0,9		4	2	6	3	1	1			2						
-1		6	7	3		1	2		1							
-1,1			2	1	1	1	1	1								
-1,2		1	4	5	4	3	3	1	1	1		1				
-1,3			1		2	1	1									
-1,4			3	2	1	4	2	1								
-1,5			1	1	1		1	2	1							
-1,6				1						1	1					
-1,7																
-1,8																
-1,9																
-2																

**Tabelle 15:**  $P_{rel} - dP_{rel} / dt$  -Sollmatrix für den Fahrzyklus (Zeit in [s], ohne Stopps)

$dP_{rel} / dt$	$P_{rel}$																													
	-190%	-180%	-170%	-160%	-150%	-140%	-130%	-120%	-110%	-100%	-90%	-80%	-70%	-60%	-50%	-40%	-30%	-20%	-10%	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	
80%																														
75%			1																											
65%																														
60%																														
55%																														
50%																														
45%																														
40%																														
35%																														
30%																														
25%																														
20%																														
15%																														
10%																														
5%																														
0%																														
-5%																														
-10%																														
-15%																														
-20%																														
-25%																														
-30%																														
-35%																														
-40%																														
-45%																														
-50%																														
-55%																														
-60%																														
-65%																														
-70%																														

Nach dem statistischen Vergleich wurde der in Abbildung 28 dargestellte Fahrzyklus ausgewählt.

Die Zusammensetzung des Fahrzyklus ist in der folgenden Tabelle 16 dargestellt.

**Tabelle 16:** Zusammensetzung des Fahrzyklus

Musterzyklus				Referenzzyklus				
Fahrtabschnitt Nr.	t_start	t_end	Dauer	Strecke	Fahrt Nr.	t_start	t_end	Dauer
1	1	25	25	1	7	844	868	25
2	26	52	27	1	7	989	1015	27
3	53	151	99	2	8	2273	2371	99
4	152	273	122	2	8	2376	2497	122
5	274	442	169	2	8	2620	2788	169
6	443	544	102	2	8	2818	2919	102
7	545	725	181	2	8	3316	3496	181
8	726	782	57	2	8	3224	3280	57
9	783	919	137	3	5	178	314	137
10	920	948	29	3	5	528	556	29
11	949	1076	128	3	5	1393	1520	128
12	1077	1219	143	4	6	1935	2077	143
13	1220	1418	199	4	6	1504	1702	199
14	1419	1547	129	3	5	580	708	129
15	1548	1682	135	2	8	489	623	135
16	1683	1800	118	2	8	3900	4017	118
Summe:			1800	Summe:			1800	

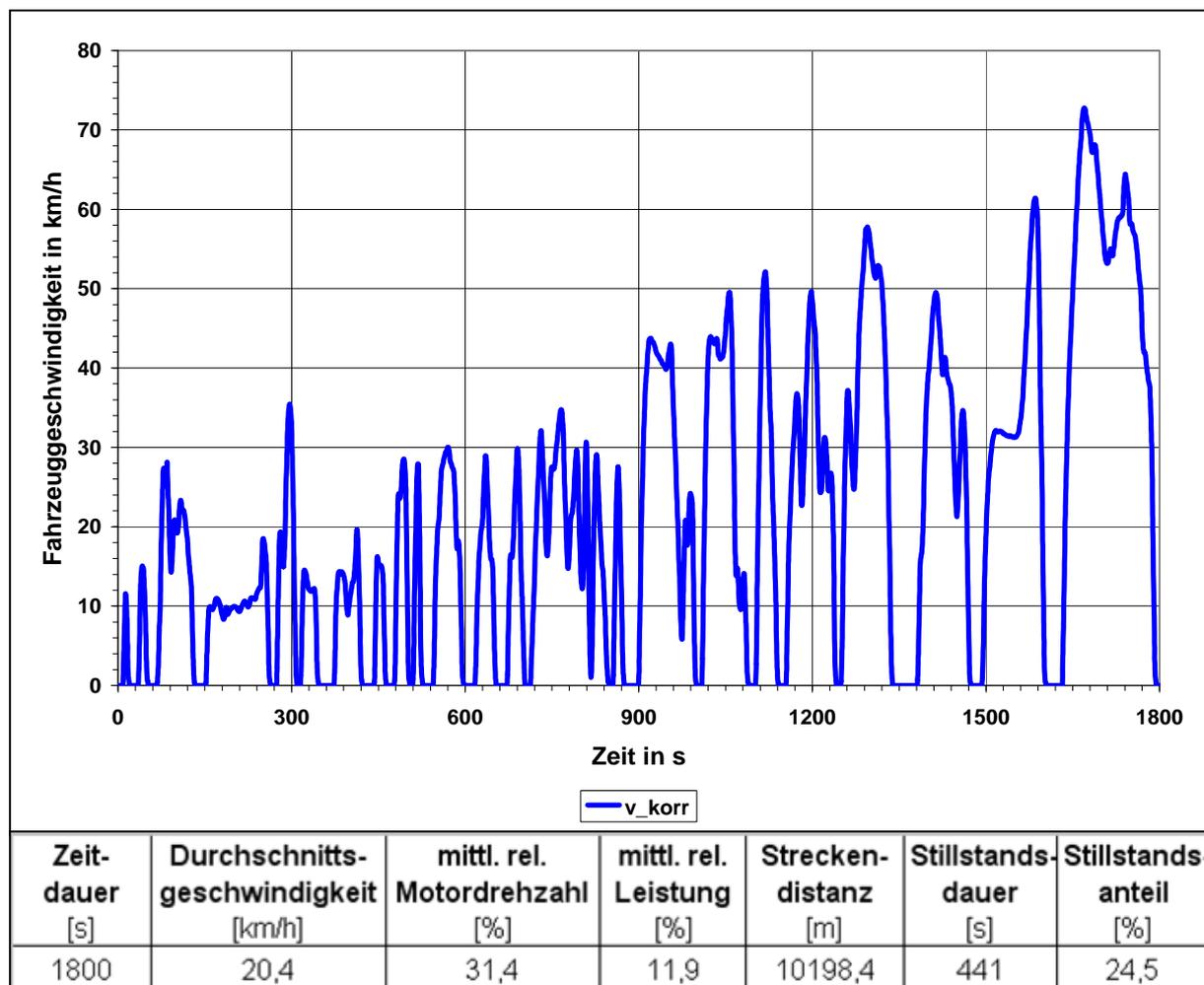


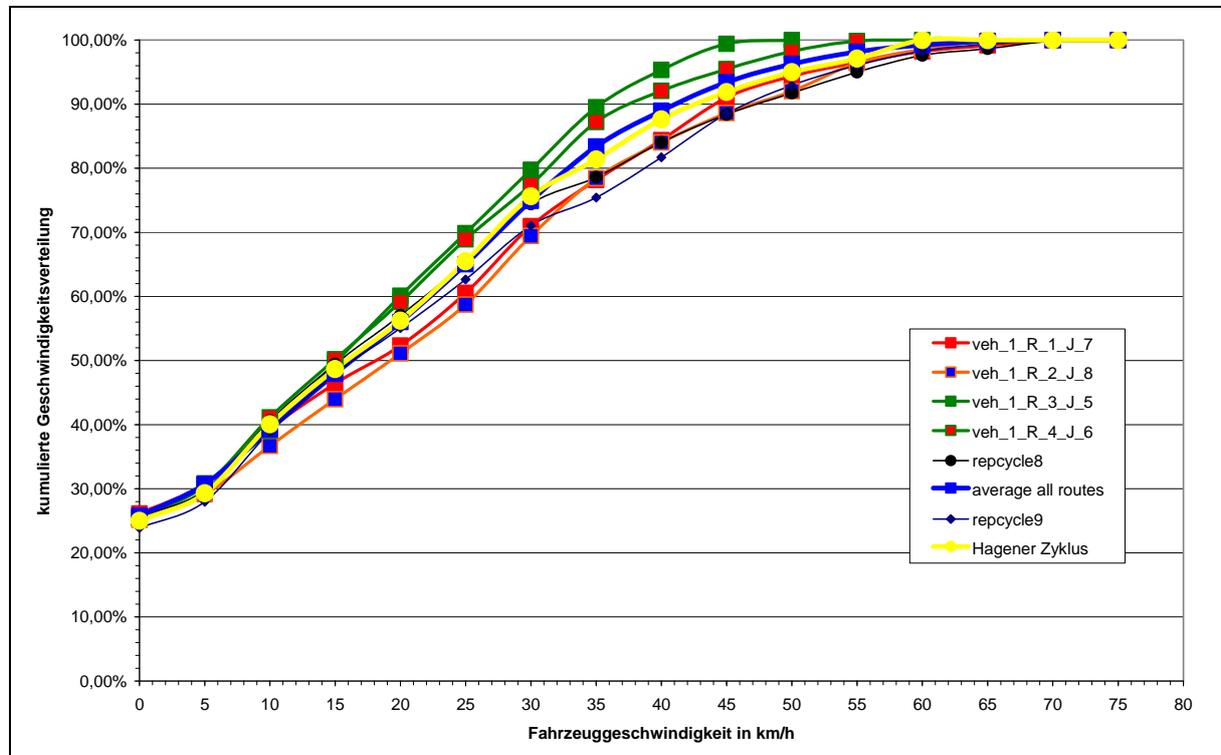
Abbildung 28: Ausgewählter repräsentativer Fahrzyklus

#### 4.3.8.3 Vollendung des repräsentativen Fahrzyklus

Nachdem der repräsentative Zyklus ausgewählt ist, werden die Fahrsequenzen und die Stopps sinnvoll geordnet. Bei der Anordnung der Fahrsequenzen wird das wirkliche Verhalten der Stadtbusse im Straßenverkehr berücksichtigt. Der Fahrzyklus wird dabei in drei Teile aufgeteilt, die folgende städtische Straßen repräsentieren:

1. Straßen im Stadtkern oder in Wohngebieten mit einer zulässigen Geschwindigkeit von max. 30 km/h (Zone 30). Dieses Fahrzyklusteil enthält kurze Fahrsequenzen mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit < 15 km/h mit häufigen Haltestellenstopps. Am Ende dieses Zyklusabschnitts ist ein längerer Stopp angeordnet, der das Warten an einer ampelgeregelten Straßenkreuzung bzw. an einer unregelmäßig regulierten Kreuzung der Neben- und Hauptstraßen repräsentieren soll.
2. Innerstädtische Hauptstraßen mit einer zulässigen Geschwindigkeit von 50 km/h. Dieses Zyklusteil enthält längere Fahrsequenzen mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von ca. 25 km/h und wenigen Haltestellenstopps.
3. Das dritte Zyklusteil repräsentiert die gut ausgebauten inner- oder außerstädtischen Straßen mit einer Geschwindigkeitsbegrenzung von mindestens 70 km/h (z.B. mehrspurige Landstraßen oder Stadtautobahnen). Dieses Zyklusteil enthält lange Fahrsequenzen mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von etwa 40 km/h und wenigen Haltestellenstopps.

Bevor die richtige Anordnung der Fahrsequenzen durchgeführt werden kann, muss der ausgewählte Fahrzyklus eventuell noch von Hand korrigiert werden. Um eine solche Notwendigkeit zu prüfen, werden wieder die kumulierten Geschwindigkeitsverteilungen betrachtet. (siehe Abbildung 29). Der gelb dargestellte repräsentative Fahrzyklus zeigt eine gute Übereinstimmung mit dem Mittelwert aller benutzten Fahrten. Die dünn dargestellten Linien zeigen weitere untersuchte Fahrzyklen, die jedoch nicht so gute Ergebnisse lieferten.



**Abbildung 29:** Vergleich der Geschwindigkeitsverteilung

Der in Abbildung 28 dargestellte Fahrzyklus ist schon in sinnvoller Form sortiert, so dass er die endgültige Version darstellt.

An dieser Stelle wäre die Aufgabenstellung der Fahrzyklusentwicklung erfüllt, wenn es die Problematik der variablen Übersetzung des ersten Ganges nicht gäbe. Diese Problematik macht den repräsentativen Fahrzeugzyklus für viele Motorenprüfstände nutzlos, denn sie können die variable Übersetzung nicht simulieren.

Aus diesem Grund wird im nächsten Abschnitt ein repräsentativer Motorzyklus in Form eines relativen  $M(n)$  - Fahrprofils aus dem repräsentativen Fahrzeugzyklus entwickelt. Der große Vorteil des relativen Fahrprofils ist seine universelle Anwendbarkeit für jeden Motor. Man kann für jeden Motor das normierte Fahrprofil entnormieren, indem man auf dem Prüfstand eine Vollast- und eine Schleppkurve des Motors fährt und dann die absoluten Werte für das Motordrehmoment und die Motordrehzahl bestimmt.

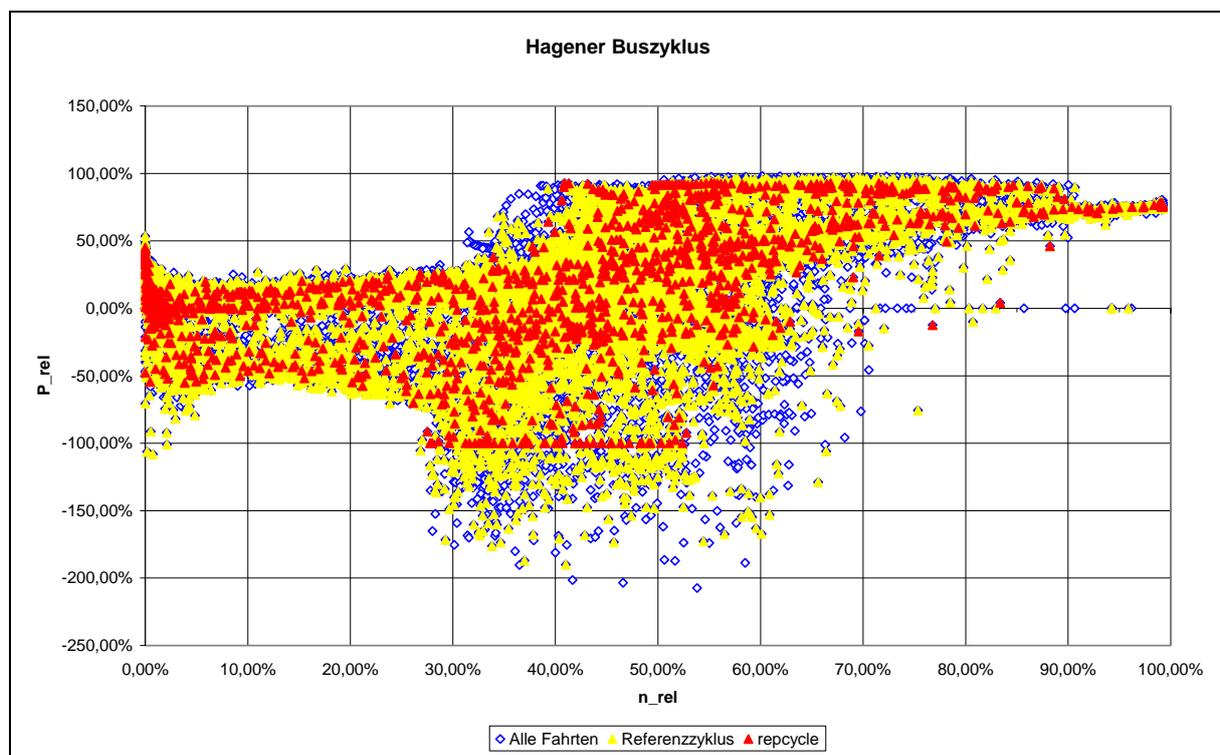
### 4.3.9 Repräsentativer Motorzyklus ( $M_{rel}(n_{rel})$ -Zyklus)

Der repräsentative Motorzyklus wurde aus dem repräsentativen Fahrzeugzyklus abgeleitet. Da für jeden Punkt des Fahrzeugzyklus auch die entsprechende Motordrehzahl und das Kardanwellendrehmoment vorlagen, konnte die Transformation des Fahrzeugzyklus in den Motorzyklus relativ einfach durchgeführt werden.

Aus dem Kardanwellendrehmoment wurde die Leistung bestimmt. Die absoluten Motordrehzahl- und Leistungswerte mussten noch, wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben, normiert werden. Da die Motorleistung proportional zum Motordrehmoment bei der jeweiligen Motordrehzahl ist, konnten die Werte der relativen Leistung  $P_{rel}$  unverändert für das relative Drehmoment  $M_{rel}$  übernommen werden.

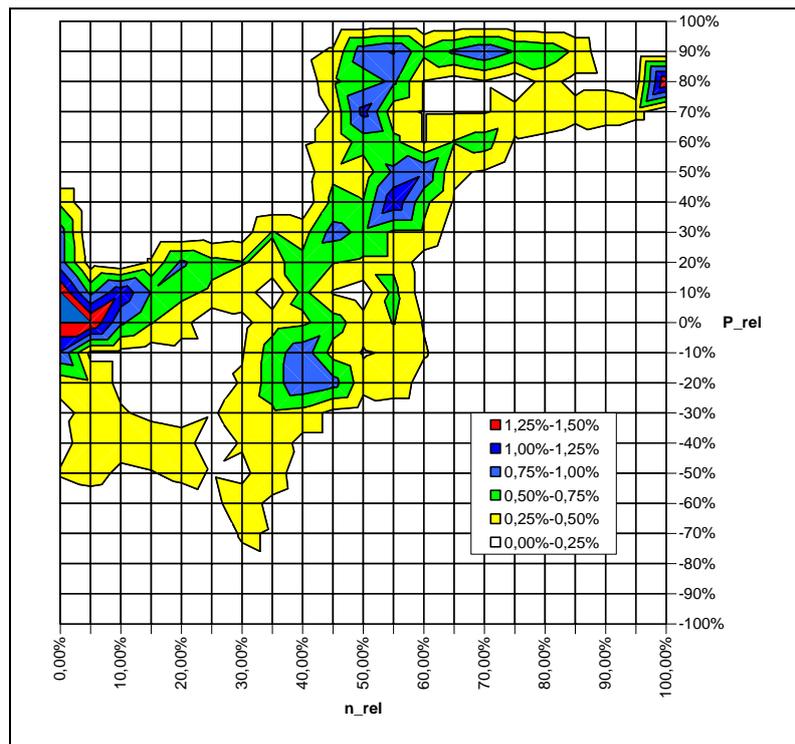
Bedingt dadurch, dass die Busse mit einem hydrodynamischen Retarder ausgestattet waren, wurden die relativen Schleppmomente von -150 % und mehr gemessen. Für den Fahrzyklus wurden die maximalen, relativen Schleppmomente von Hand auf -100 % gesetzt.

In Abbildung 30 sind die Punkte des relativen Motorzyklus als rote Dreiecke dargestellt (repcycle). Die blaue Punktwolke ist die gemessene relative Leistung aus allen Fahrten des Busses.



**Abbildung 30:** Der Hagerer Fahrzyklus ( $M_{rel}(n_{rel})$ -Diagramm)

Die Abbildung 31 stellt das Belastungsschaubild des Hagerer Fahrzyklus als Häufigkeitsverteilung der bestimmten Kombinationen aus relativem Moment  $M_{rel}$  und relativer Drehzahl  $n_{rel}$  dar. Je dunkler die Farbe, desto häufiger kommt eine bestimmte Kombination im Zyklus vor.

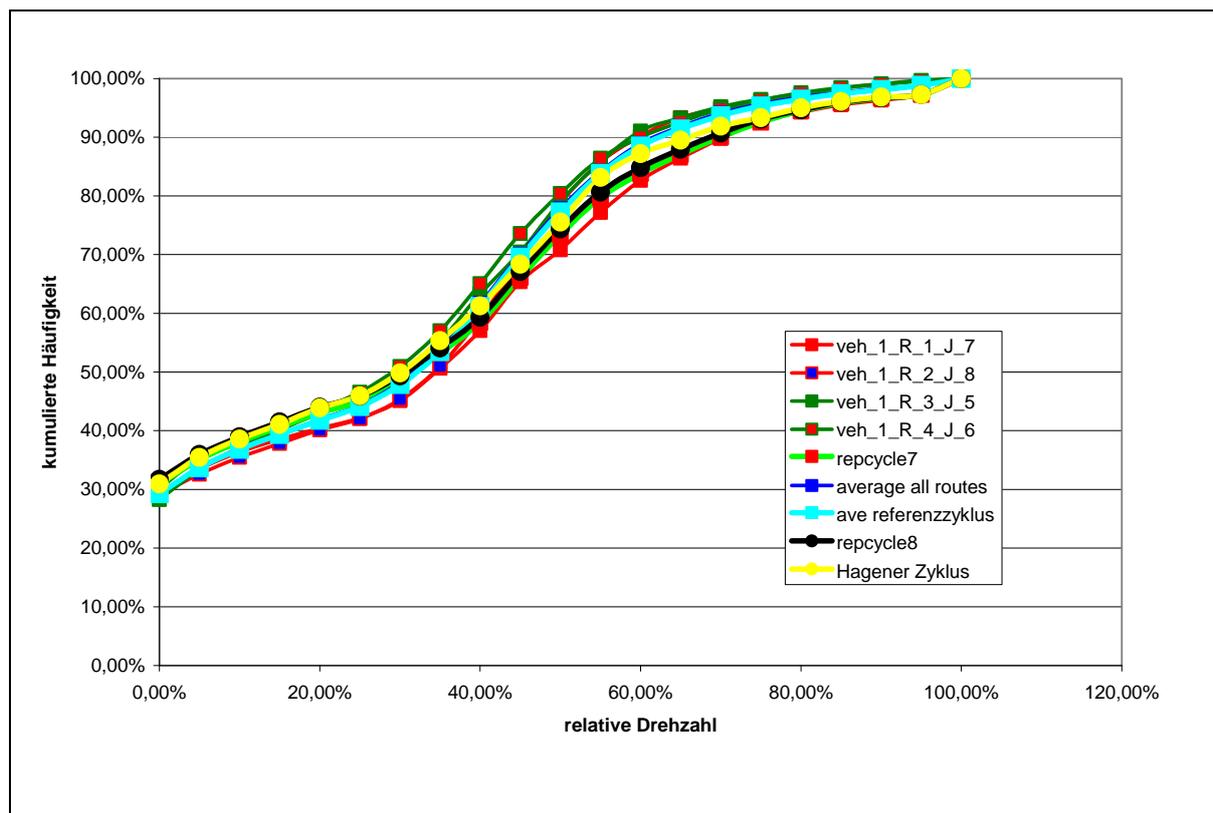


**Abbildung 31:** Belastungsschaubild des Hagener Fahrzyklus

#### 4.3.10 Abschließende Zyklusbetrachtung

Der statistische Vergleich der Geschwindigkeitsverteilungen des Hagener Fahrzyklus und aller Fahrten des Messvorhabens zeigt, wie in Abbildung 29 abgebildet, dass der Fahrzyklus dem Durchschnitt aller Fahrten sehr gut entspricht und somit als repräsentativ angesehen werden kann.

Auch der statistische Vergleich der Häufigkeitsverteilungen der relativen Drehzahl (Abbildung 32) zeigt, dass der Hagener Fahrzyklus ungefähr die Drehzahlverteilungen aller Fahrten widerspiegelt.



**Abbildung 32:** Gegenüberstellung der Verteilungen der relativen Drehzahl

## 4.4 Ergebnisse im Realbetrieb

### 4.4.1 Allgemeine Vorgehensweise

Die aufgezeichneten Messdaten wurden in eine Access-Datenbank überführt und im ersten Schritt auf die Plausibilität überprüft.

Bei der weiteren Auswertung wurde die im Kapitel 4.2.1 beschriebene Vorgehensweise angewandt.

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, Lenkhelpumpe 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.

Die späteren Darstellungen beschränken sich auf die  $\text{NO}_x$ -Emissionen, da die oxidierbaren Komponenten HC und CO sowie die Partikelemission aufgrund des eingesetzten Oxidationskatalysators bzw. des Partikelfilters eine absolut untergeordnete Bedeutung haben.

### 4.4.2 Streckenbezogene Ergebnisse

Tabelle 17: Ergebnisse Gelenkbus mit SCRT [g/km]

	Fahrzeug	Fahrt	Strecke	Dauer	mittl. Geschwindigkeit	Emissionen, [g/km]						NO <sub>x</sub> /NO <sub>2</sub> -Verhältnis		
						s	km/h	NO <sub>x</sub>	NO	NO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>		HC	CO
1.Messung	1	1	1	4058	22,0	3,250	1,646	1,604	1895,663	0,004	1,463	49,345		
	1	2	2	4386	21,2	2,623	1,653	0,970	1277,160	0,010	1,562	36,979		
	1	3	3	3196	17,2	5,851	2,602	3,250	1766,072	0,000	1,245	55,538		
	1	4	4	2587	19,4	4,194	2,180	2,014	1511,950	0,000	0,365	48,020		
	1	5	3	3026	18,1	3,143	1,630	1,513	1737,017	0,000	1,763	48,125		
	1	6	4	2752	19,7	3,977	1,948	2,029	1637,620	0,001	1,479	51,015		
	1	7	1	4140	21,6	3,149	1,659	1,490	1895,930	0,001	1,646	47,324		
	1	8	2	4143	22,5	4,313	2,199	2,114	1229,859	0,012	1,107	49,006		
2.Messung	2	9	1	3925	22,8	6,321	5,493	0,828	1528,443	0,000	1,003	13,105		
	2	10	2	4785	19,4	7,744	6,910	0,834	1105,570	0,016	1,568	10,775		
	2	11	1	3782	23,6	7,363	6,353	1,010	1575,253	0,005	1,498	13,714		
	2	12	2	3915	23,7	7,019	6,093	0,926	1045,231	0,007	1,222	13,195		
	2	13	3	3384	16,2	10,507	9,208	1,300	1347,891	0,000	2,578	12,369		
	2	14	4	2585	19,6	10,569	9,130	1,440	1114,450	0,000	1,421	13,622		
	2	15	3	2901	18,9	8,280	7,427	0,852	1237,184	0,002	2,362	10,293		
	2	16	4	2886	17,6	12,218	10,881	1,337	1147,952	0,000	1,927	10,944		
3.Messung	2	17	1	4080	21,9	6,926	6,247	0,679	1598,263	0,030	1,390	9,809		
	2	18	2	4017	23,2	6,471	5,682	0,789	1048,018	0,001	0,872	12,192		
	2	19	3	3133	17,6	7,882	6,603	1,079	1388,522	0,032	1,475	14,046		
	2	20	4	2687	18,9	4,116	3,748	0,368	1353,922	0,006	1,101	8,936		
	2	21	3	2899	19,0	3,073	2,719	0,355	1468,932	0,009	1,645	11,542		
	2	22	4	2718	18,5	3,716	3,344	0,372	1358,968	0,006	1,311	10,012		
							Min	3,073	2,719	0,355	1048,018	0,000	0,872	8,936
							Max	12,218	10,881	1,440	1598,263	0,032	2,578	14,046
						Mittelwert	7,356	6,499	0,857	1306,400	0,009	1,608	11,376	
						Standardabweichung	3,125	2,726	0,419	169,516	0,012	0,538	1,683	
						Varianz	9,767	7,430	0,175	28735,791	0,000	0,289	2,832	
						Variationskoeffizient	42,5%	41,9%	48,9%	13,0%	139,1%	33,4%	14,8%	

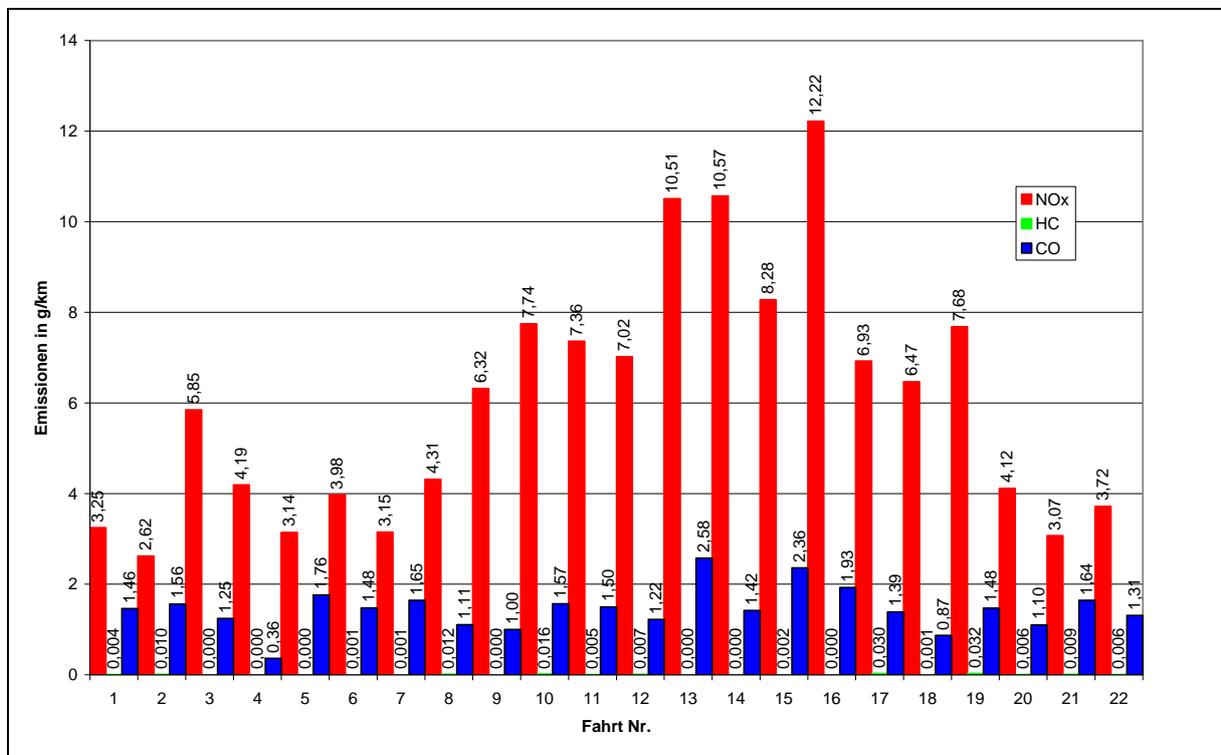
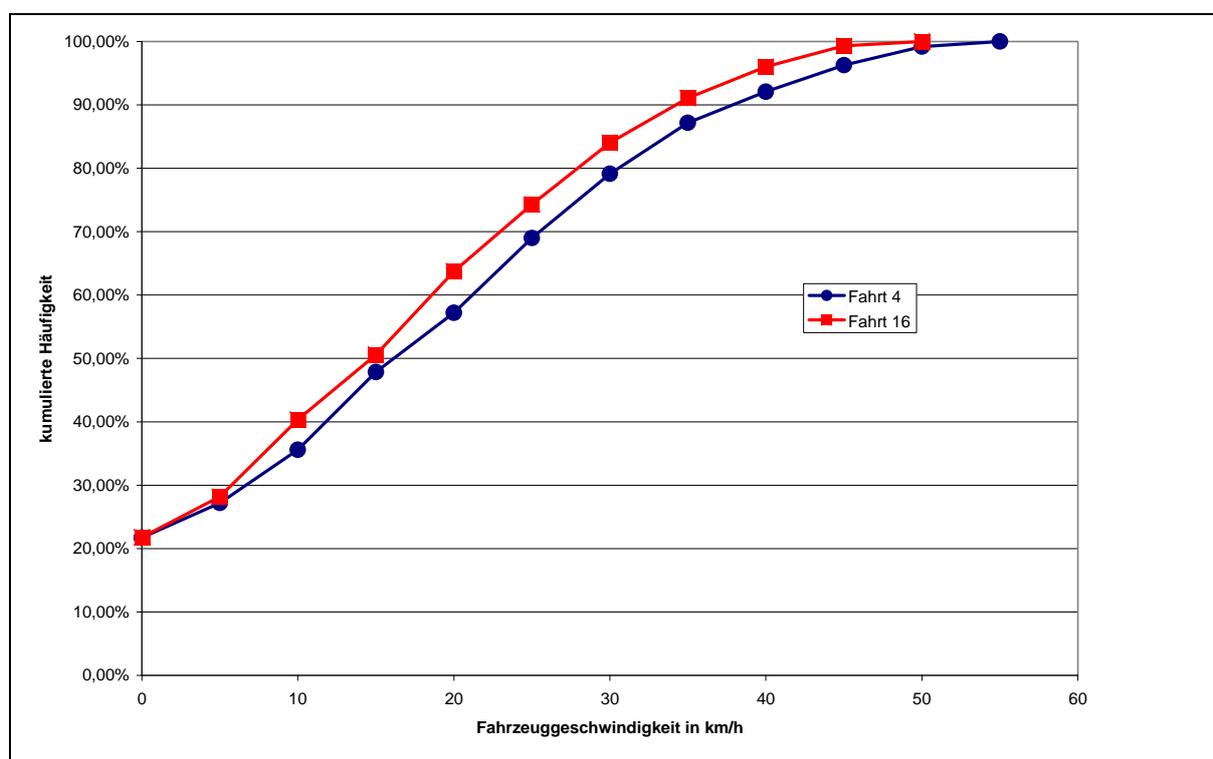


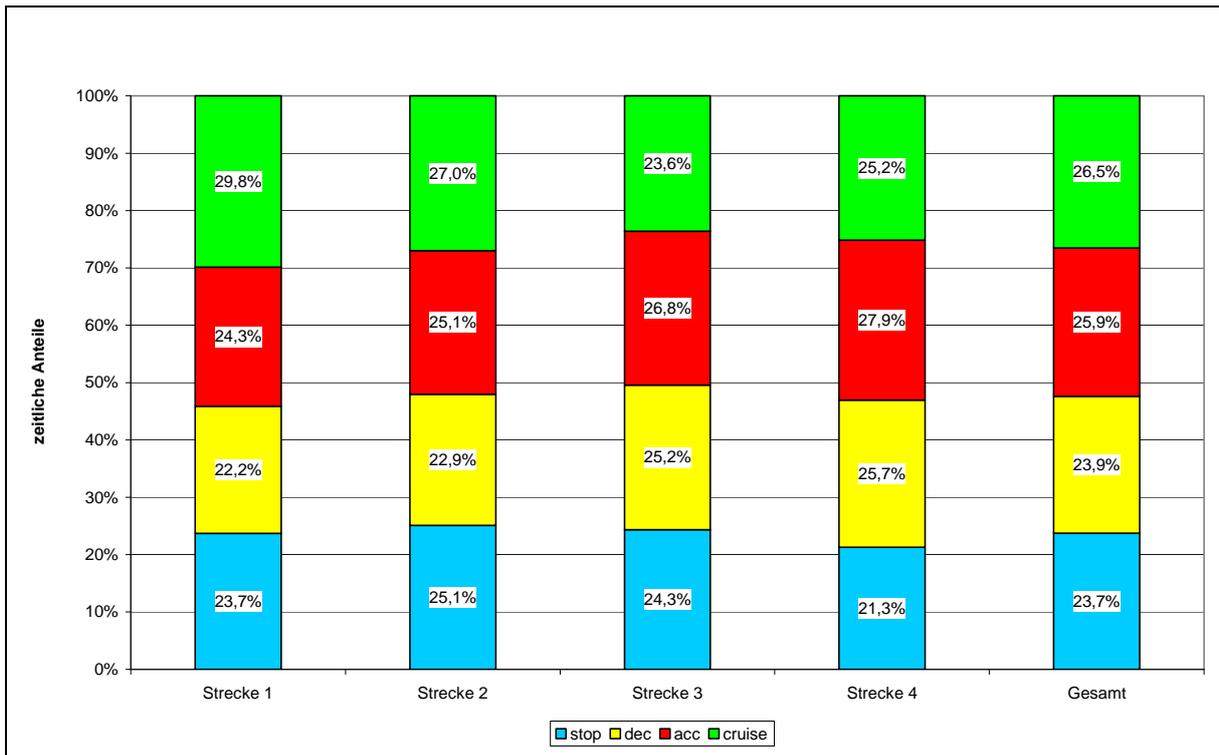
Abbildung 33: Streckenbezogene Emissionen in grafischer Darstellung

Abbildung 33 zeigt die drei limitierten gasförmigen Komponenten in grafischer Darstellung. Sehr gut zu erkennen sind die großen Streuungen der Ergebnisse bei den unterschiedlichen Fahrten. Als Beispiel seien hier die Fahrten 4 und 16 zu nennen, die beide auf der gleichen Strecke gefahren wurden. Zurückzuführen sind diese großen Streuungen auf Stillstandszeiten, die das Abgasreinigungssystem auskühlen lassen. Bei der anschließenden Weiterfahrt kann erst wieder nach Erreichen der Eindüsekriterien das System aktiviert werden, was sich in den Ergebnissen deutlich widerspiegelt. Indiz hierfür ist auch die geringste Durchschnittsgeschwindigkeit. Die Abbildung 34 verdeutlicht diese Unterschiede noch einmal. Die kumulierten Geschwindigkeiten der Fahrten 4 und 16 zeigen, dass Fahrt 4 schneller ist als Fahrt 16.

Betrachtet man die einzelnen Streckenverläufe und stellt die zeitlichen Anteile von Beschleunigung [**acceleration**], Verzögerung [**deceleration**], Stillstand [**stop**] und gleichmäßiger Fahrt [**cruise**] dar, ergibt sich Abbildung 35.

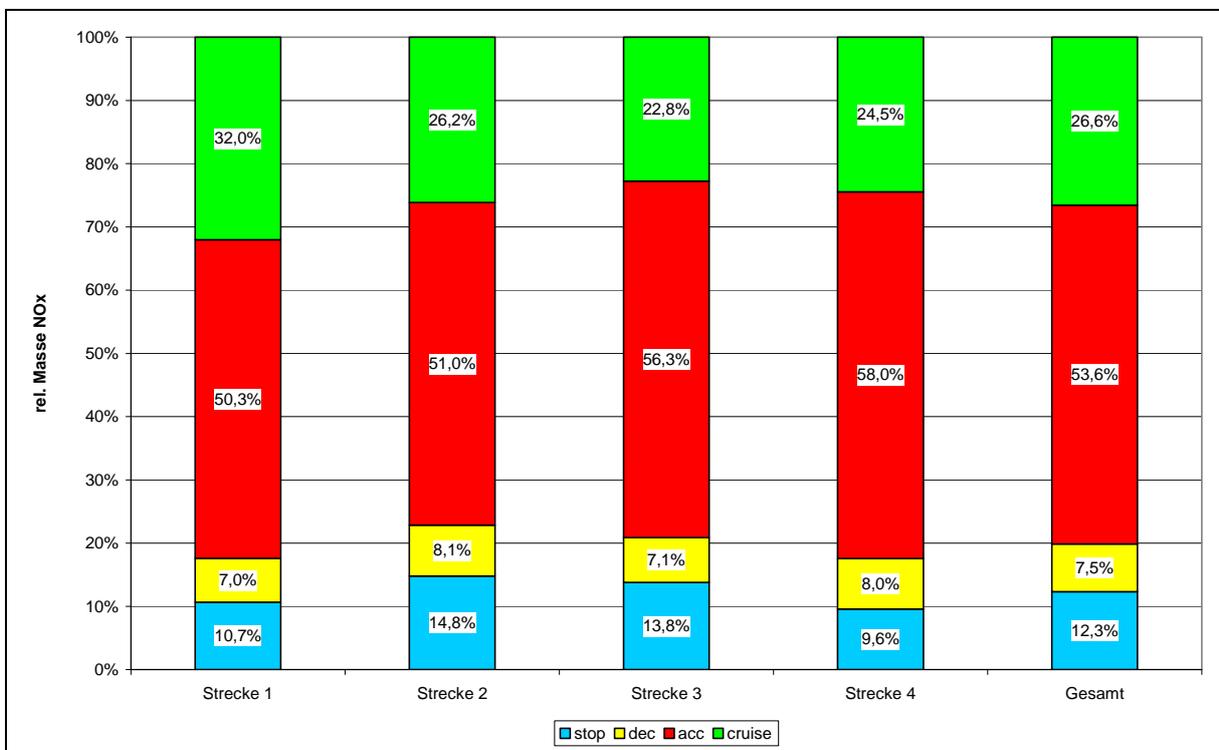


**Abbildung 34:** Kumulierte Geschwindigkeitshäufigkeiten Fahrt 4 und 16



**Abbildung 35:** Zeitliche Anteile einzelner Betriebsphasen

Ordnet man nun den einzelnen Betriebsphasen die NO<sub>x</sub>-Massenemission zu, ergibt sich Abbildung 36.



**Abbildung 36:** Relative NO<sub>x</sub>-Massenemissionen auf den unterschiedlichen Strecken

### 4.4.3 Leistungsbezogene Ergebnisse

Tabelle 18: Ergebnisse Gelenkbus mit SCRT-System [g/kWh]

	Fahrzeug	Fahrt	Strecke	Dauer	mittl. Geschwindigkeit	Emissionen, [g/kWh]						NO <sub>x</sub> /NO <sub>y</sub> -Verhältnis	
						s	km/h	NO <sub>x</sub>	NO	NO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>		HC
1.Messung	1	1	1	2312	27,9	1,250	0,677	0,574	796,116	2,276E-04	0,535	45,879	
	1	2	2	2003	22,4	1,558	1,065	0,493	878,346	3,230E-03	0,819	31,668	
	1	3	3	1677	20,2	2,662	1,309	1,353	879,284	0,000E+00	0,545	50,827	
	1	4	4	1358	20,9	2,217	1,218	0,999	849,481	5,309E-06	0,204	45,059	
	1	5	3	1586	20,9	1,469	0,828	0,641	878,675	9,885E-05	0,725	43,644	
	1	6	4	1405	21,2	1,966	1,036	0,930	884,585	2,924E-04	0,660	47,288	
	1	7	1	2318	26,3	1,211	0,687	0,524	824,629	3,820E-04	0,615	43,271	
	1	8	2	1868	23,6	2,801	1,513	1,288	879,279	1,995E-04	0,656	45,971	
2.Messung	2	9	1	2298	28,5	2,864	2,504	0,360	736,391	1,235E-04	0,436	12,554	
	2	10	2	1906	24,2	5,386	4,819	0,567	841,014	6,573E-03	0,906	10,530	
	2	11	1	2298	28,3	3,419	2,972	0,447	783,621	1,791E-03	0,664	13,066	
	2	12	2	1968	23,9	5,216	4,558	0,659	840,798	3,110E-03	0,790	12,628	
	2	13	3	1868	19,3	5,439	4,858	0,581	794,884	1,260E-04	1,265	10,685	
	2	14	4	1383	21,3	6,807	5,935	0,872	773,866	5,490E-05	0,778	12,813	
	2	15	3	1708	22,1	4,104	3,720	0,383	658,387	6,303E-04	1,024	9,343	
	2	17	1	2405	27,5	2,908	2,636	0,273	691,760	1,046E-02	0,541	9,381	
3.Messung	2	18	2	1894	24,6	4,261	3,760	0,501	758,711	3,708E-04	0,526	11,748	
	2	19	3	1619	21,4	4,008	3,535	0,473	758,125	1,194E-02	0,679	11,793	
	2	20	4	1330	21,7	2,396	2,196	0,200	749,351	2,135E-03	0,510	8,353	
	2	21	3	1308	21,3	2,292	2,066	0,227	997,157	3,651E-03	1,016	9,888	
						Min	2,292	2,066	0,200	658,387	5,490E-05	0,510	8,353
						Max	8,807	5,935	0,872	997,157	1,194E-02	1,265	12,813
					Mittelwert	4,027	3,588	0,439	772,780	3,671E-03	0,792	10,500	
					Standardabweichung	1,545	1,327	0,222	101,028	4,820E-03	0,281	1,521	
					Varianz	2,386	1,762	0,049	10206,628	2,323E-05	0,079	2,313	
					Variationskoeffizient	38,4%	37,0%	50,7%	13,1%	131,3%	35,5%	14,5%	

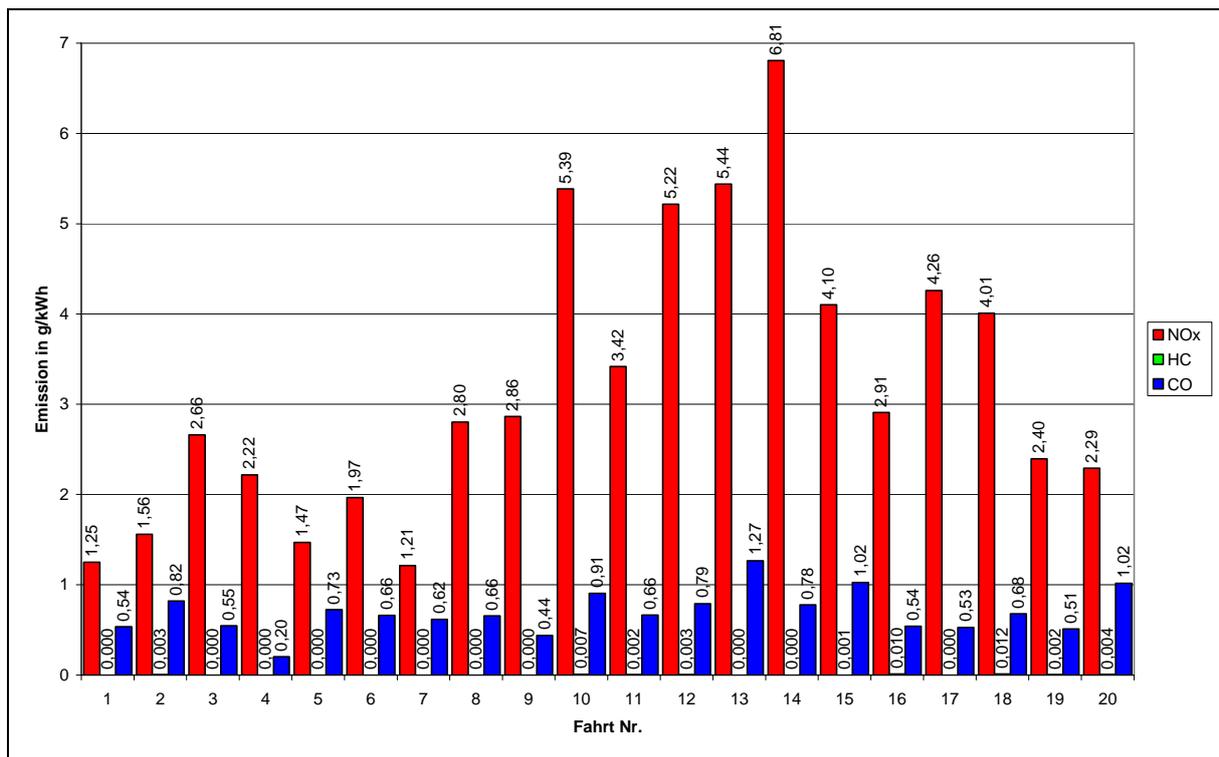
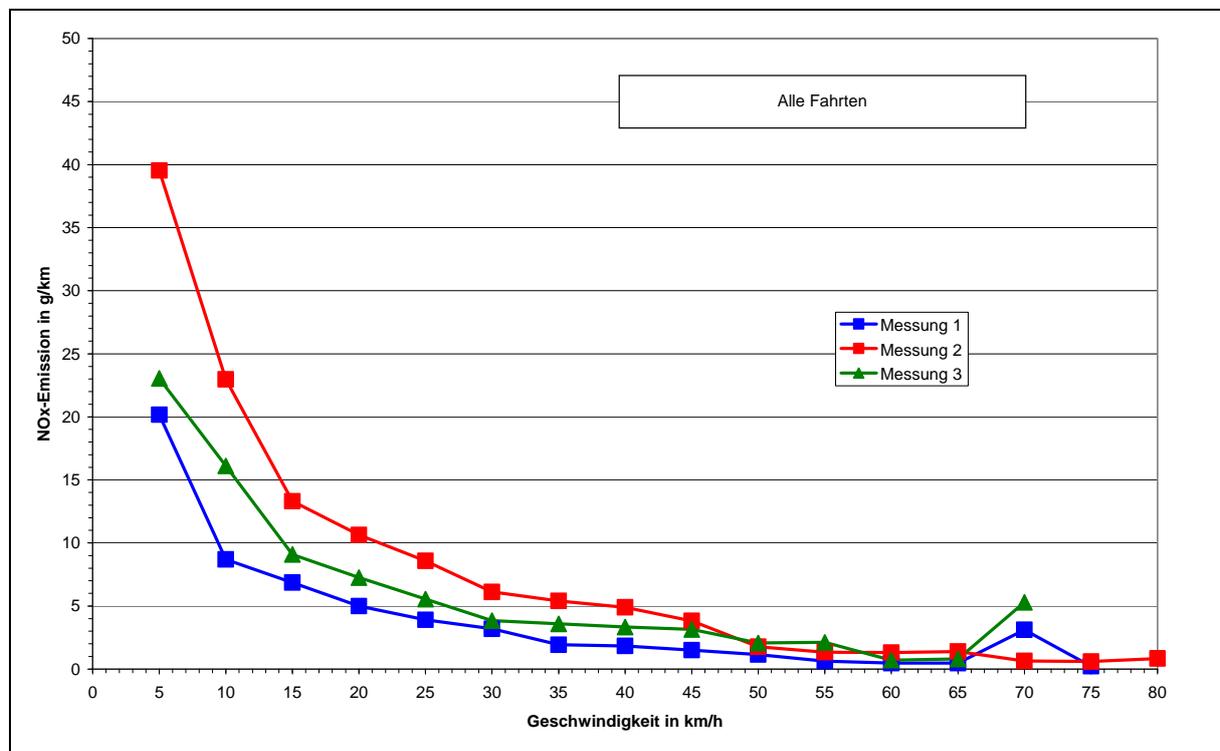


Abbildung 37: Leistungsbezogene Emissionen in grafischer Darstellung

Tabelle 18 und Abbildung 37 zeigen die Fahrzeugemissionen in unterschiedlichen Darstellungen. Die in Kapitel 4.4.2 erläuterten Einflüsse gelten analog für die leistungsbezogene Darstellung. Trotz der beschriebenen Einschränkungen beim Vergleich von leistungsbezo-

genen Ergebnissen aus Straßenmessungen und Messungen auf dem Prüfstand ist eindeutig erkennbar, dass im realen Straßenbetrieb Emissionen entstehen, die sich deutlich von Prüfstandsmessungen unterscheiden. Siehe hierzu auch Abbildung 11.

#### 4.4.4 Geschwindigkeitsabhängige Darstellung der NO<sub>x</sub>-Emissionen



**Abbildung 38:** NO<sub>x</sub>-Emissionen in [g/km] in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit

Abbildung 38 zeigt die NO<sub>x</sub>-Emissionen in [g/km] bezogen auf die mittlere Geschwindigkeit für alle Fahrten. Im Vergleich zu dem vorangegangenen Projekt des LANUV ist der gleiche grundsätzliche Verlauf zu erkennen. 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. Was aber bei Vergleich der unterschiedlichen Messkampagnen auffällt, ist der Unterschied bei kleinen und mittleren Geschwindigkeiten, der erst ab ca. 50 km/h in ungefähr der gleichen Größenordnung mündet. Weitere Betrachtungen haben gezeigt, dass hierfür Temperaturunterschiede durch die unterschiedlichen Jahreszeiten verantwortlich sind. Da die Temperaturgrenze für die Harnstoffeindüsung bei 200°C liegt, findet man in Wintermonaten deutlich höhere Zeitanteile ohne Eindüsung. Mit wachsender mittlerer Geschwindigkeit wird dieser Einfluss immer geringer. Stellt man in der gleichen Form die unterschiedlichen Betriebszustände „Quasi Stationärfahrt“, „Leichte Beschleunigung“ und „Hohe Beschleunigung“ dar, ergeben sich die Abbildung 39 bis Abbildung 41. Auch hier ist der gleiche Effekt erkennbar, zeigt sich allerdings in etwas anderen Ausprägungen.

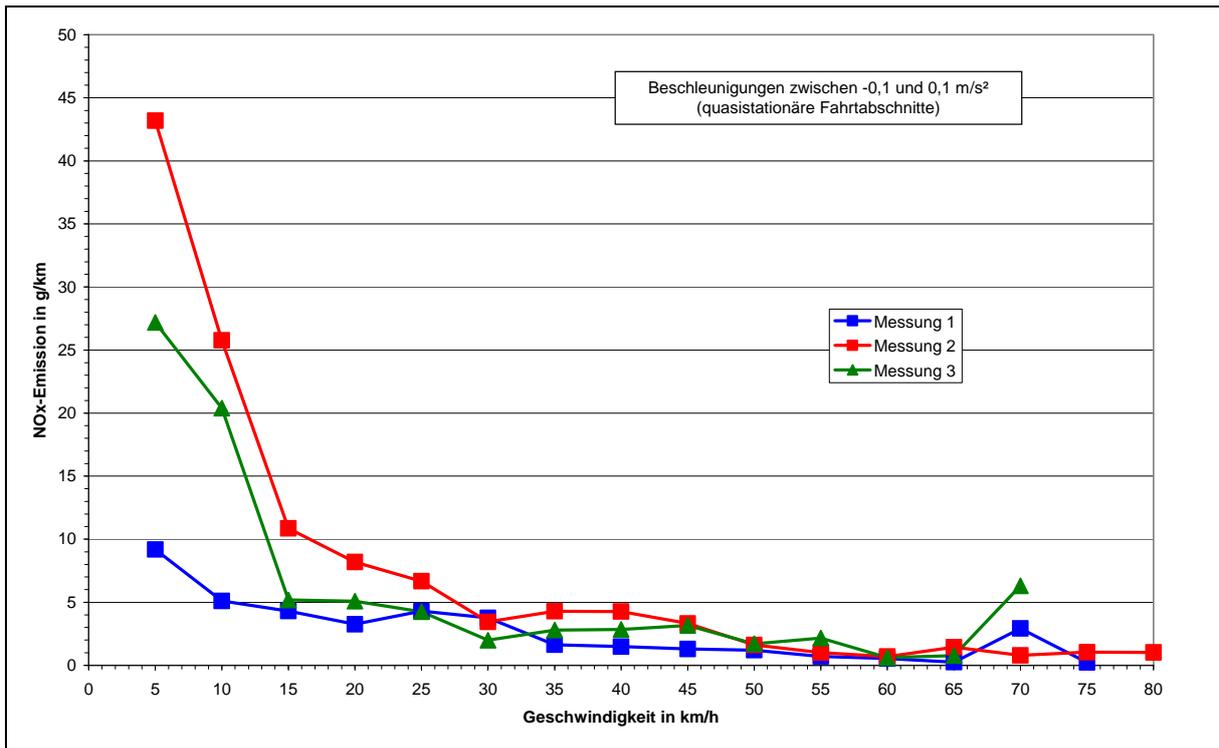


Abbildung 39: NO<sub>x</sub>-Emissionen in [g/km] für quasi stationäre Zustände

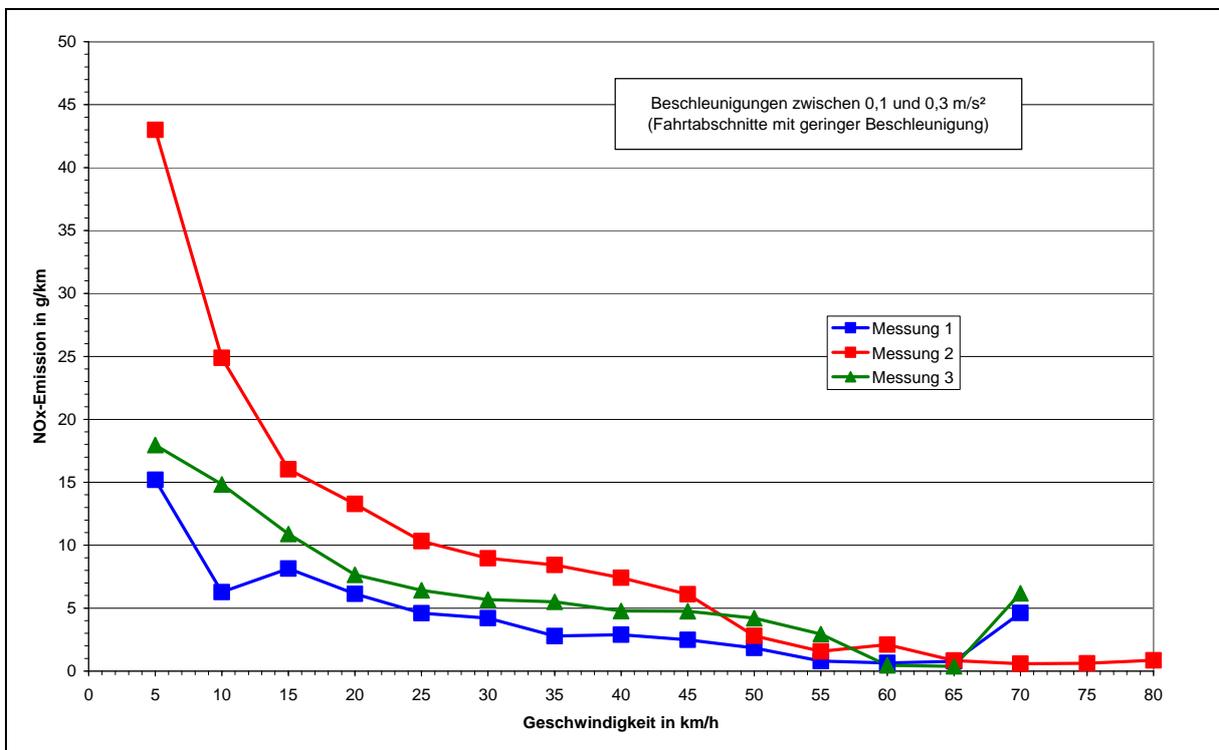


Abbildung 40: NO<sub>x</sub>-Emissionen in [g/km] für geringe Beschleunigung

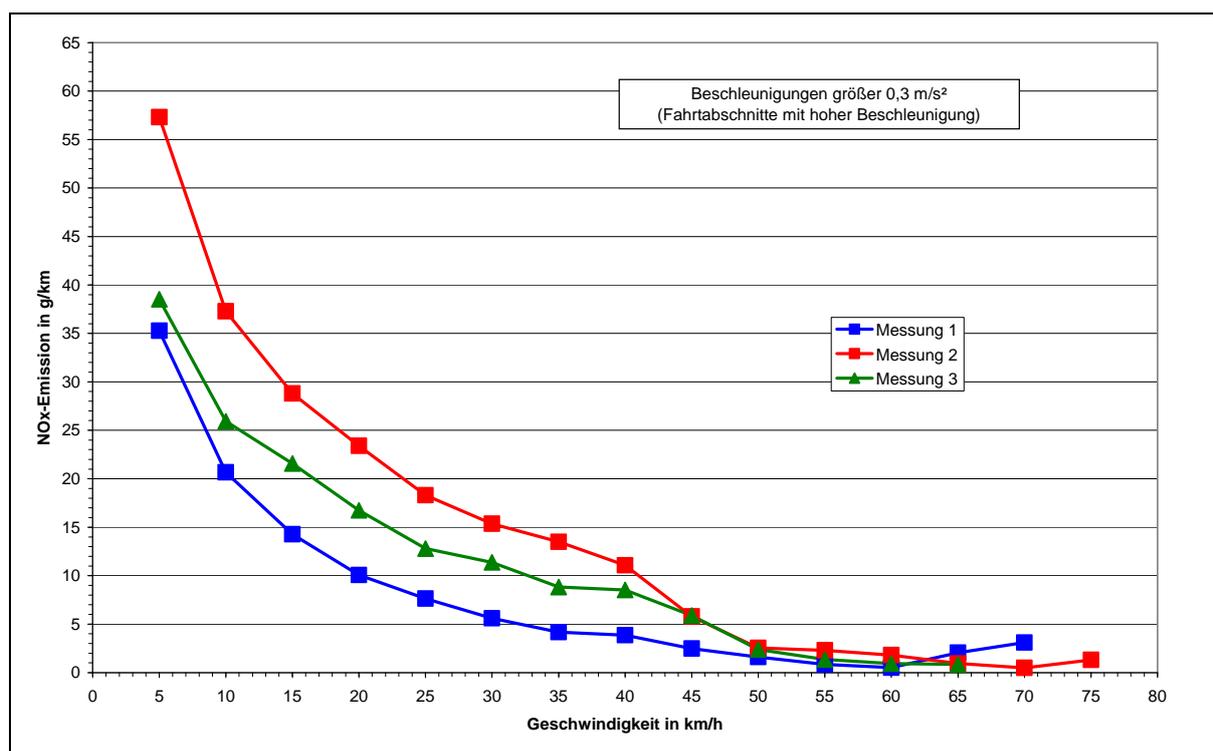


Abbildung 41: NO<sub>x</sub>-Emissionen in [g/km] für hohe Beschleunigung

#### 4.4.5 NO<sub>2</sub>-Emissionen

Abbildung 42 zeigt das NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> Verhältnis im nachgerüsteten Zustand. Auffällig ist der deutliche Unterschied zwischen der ersten und den beiden anderen Messkampagnen. Da es, wie oben beschrieben, einen Fahrzeugwechsel zwischen der ersten und den beiden anderen Messungen gab, der im Wechsel des Eindüsesystems begründet ist, ist die genaue Ursache dieser Unterschiede schwer nachvollziehbar. Gegenüber Fahrzeugen ohne Abgasnachbehandlung ist ein deutlicher Anstieg des prozentualen NO<sub>2</sub>-Anteils im Abgas feststellbar, der durch die katalytischen Prozesse im CRT-System und im Sperrkatalysator des SCR-Systems erklärbar ist und somit prinzipbedingt ist. Da in den vorliegenden Untersuchungen kein Fahrzeug im Ausgangszustand ohne eine Abgasnachbehandlung vermessen wurde, ist ein direkter Vergleich der NO<sub>2</sub>-Emissionen mit und ohne Nachbehandlung nicht möglich. Während der ersten Messkampagne wurden allerdings Messungen ohne eine Eindüsung von Harnstoff gemacht. Abgesehen von dem erhöhten NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Anteil durch das CRT-System stellen diese einen Anhaltspunkt für die Emissionen ohne Nachbehandlung dar. Da für die Betrachtung der Emissionssituation nicht der relative NO<sub>2</sub>-Anteil, sondern die absolute NO<sub>2</sub>-Massenemission die relevante Größe ist, ist in Abbildung 43 die streckenbezogene NO<sub>2</sub>-Emission des nachgerüsteten Busses im Vergleich zum Bus ohne Harnstoffeindüsung dargestellt. Deutlich zu erkennen ist die Reduktion der NO<sub>2</sub>-Massenemission um ca. 94 %.

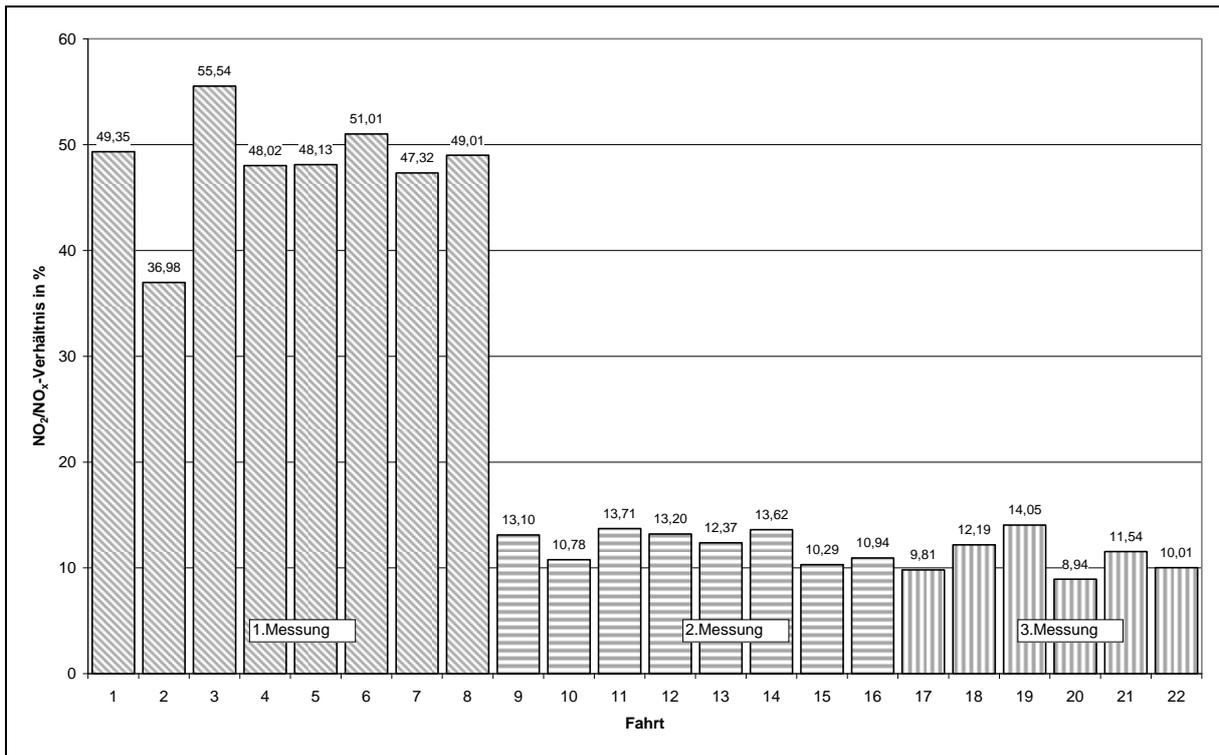


Abbildung 42: NO<sub>2</sub> / NO<sub>x</sub> Verhältnis

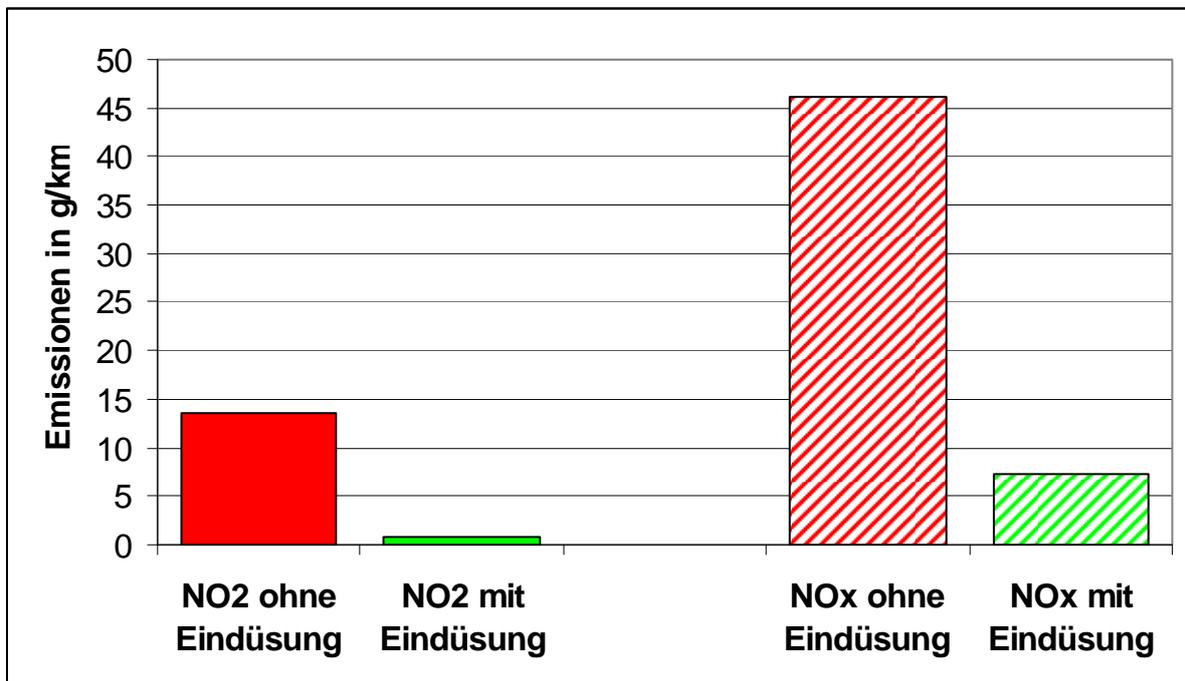


Abbildung 43: NO<sub>2</sub>-Emission in [g/km]

#### 4.4.6 Geschwindigkeitsabhängige Darstellung der NO<sub>2</sub>-Emissionen

Die nachfolgende Abbildung 44 zeigt die streckenbezogenen NO<sub>2</sub>-Emissionen über der mittleren Geschwindigkeit für alle Fahrten in gleicher Darstellung wie in Kapitel 4.4.4. Auch hier ist die große Differenz zwischen der ersten und den beiden anderen Messkampagnen deutlich erkennbar. Wie bereits in Kapitel 4.4.5 beschrieben, ist die genaue Ursache hierfür aufgrund des erfolgten Wechsels des Eindüsesystems schwer nachvollziehbar. Vergleicht man die Messkampagnen 2 und 3, so fällt der Unterschied bei kleinen und mittleren Geschwindigkeiten bis ca. 45 km/h auf. Dieser Effekt ist auf die unterschiedlichen Umgebungstemperaturen der beiden Messkampagnen zurückzuführen (siehe Kapitel 4.4.4).

Abbildung 45 bis Abbildung 47 zeigen die streckenbezogenen NO<sub>2</sub>-Emissionen über der mittleren Geschwindigkeit, differenziert nach Fahr- bzw. Betriebszuständen „Quasi Stationärfahrt“, „Leichte Beschleunigung“ und „Hohe Beschleunigung“. Auch bei dieser Darstellung ist der o.g. Effekt der Abhängigkeit der NO<sub>2</sub>-Emissionen von der Umgebungstemperatur bei geringen Fahrgeschwindigkeiten zu beobachten.

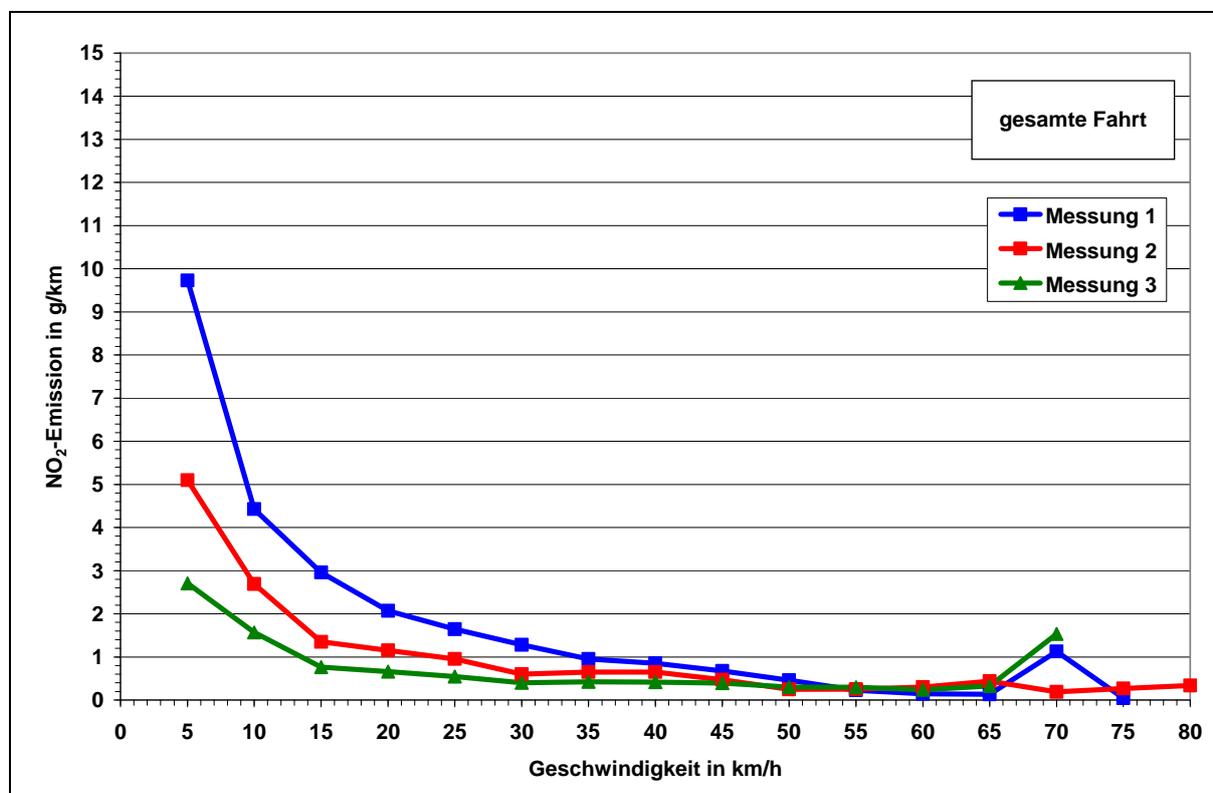


Abbildung 44: NO<sub>2</sub>-Emissionen in [g/km] in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit

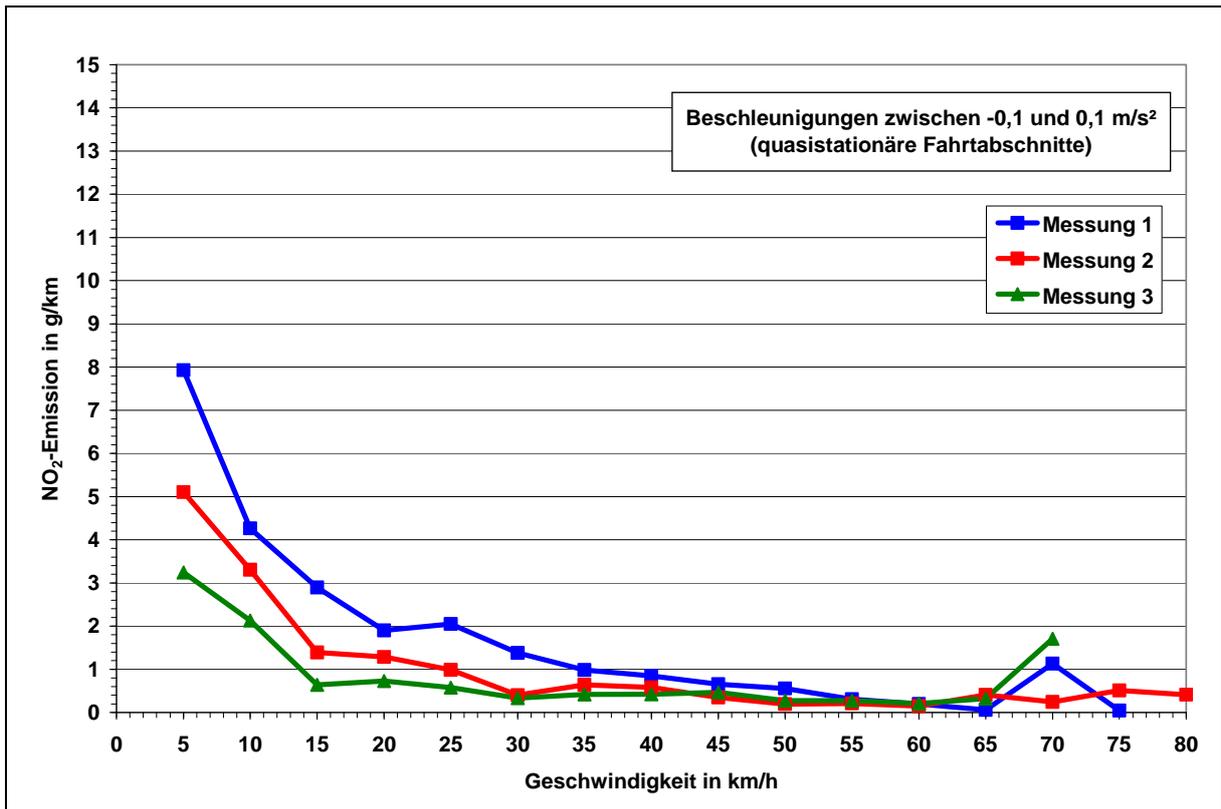


Abbildung 45: NO<sub>2</sub>-Emissionen in [g/km] für quasistationäre Zustände

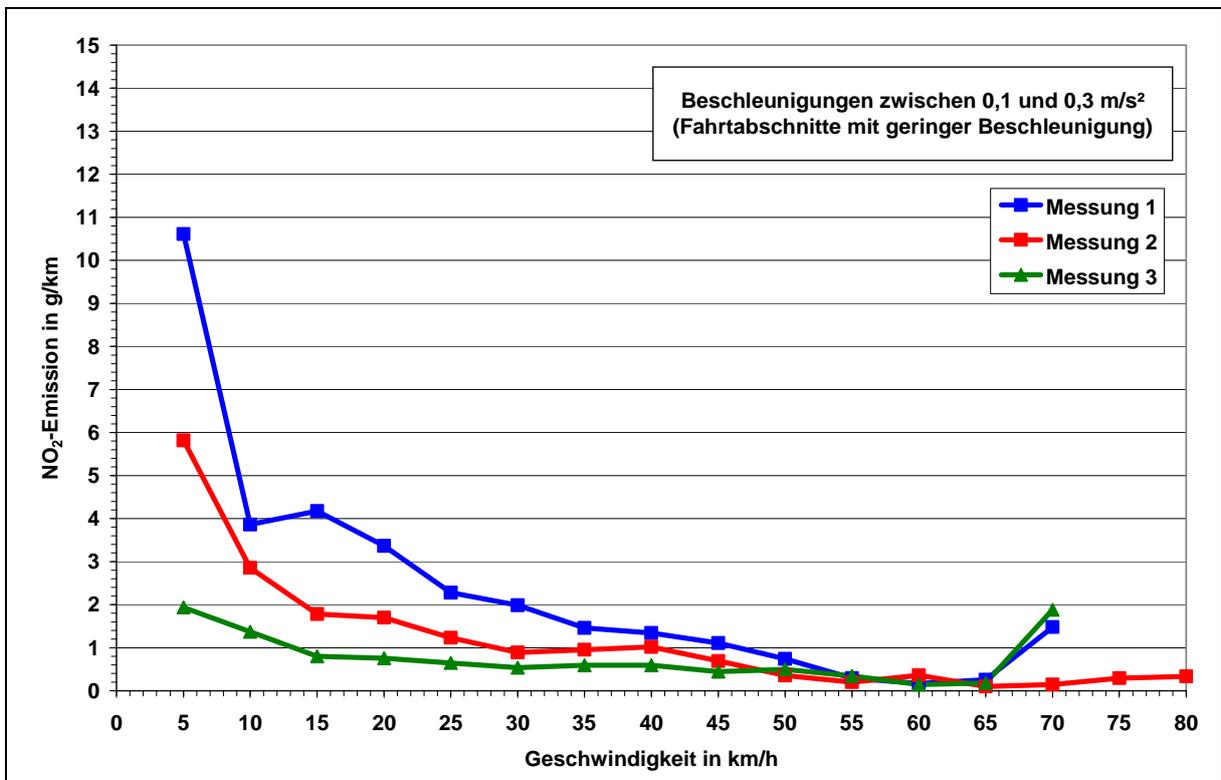


Abbildung 46: NO<sub>2</sub>-Emissionen in [g/km] für geringe Beschleunigung

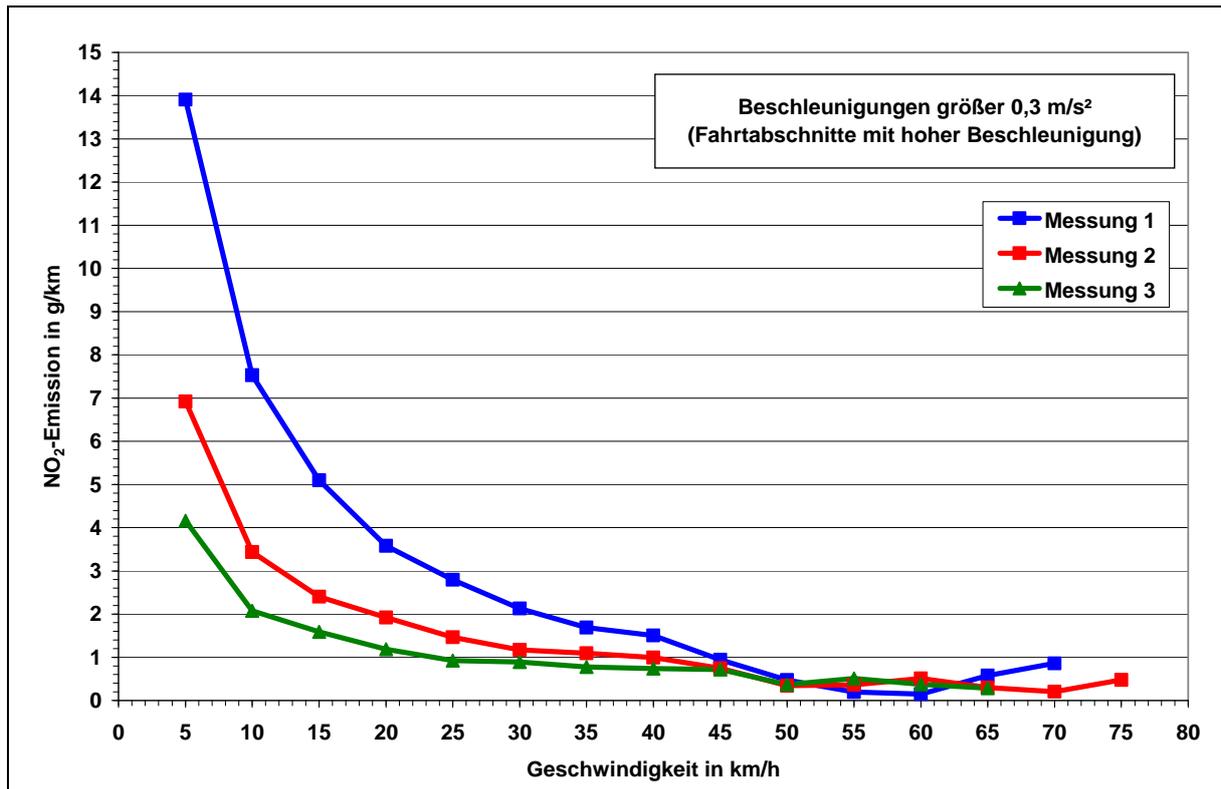


Abbildung 47: NO<sub>2</sub>-Emissionen in [g/km] für hohe Beschleunigung

## 5 Zusammenfassung

Im vorliegenden Bericht wird die messtechnische, wissenschaftliche Begleitung eines Projektes zur Nachrüstung von in Betrieb befindlichen Bussen des öffentlichen Nahverkehrs auf fortschrittliche Abgasnachbehandlungstechniken 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. Eine Nachrüstung mit einem SCRT-System soll das Versuchsfahrzeug in seinen  $\text{NO}_x$ -Emissionen deutlich verbessern. Nach Applikation des Systems an einem Mercedes Euro III-Motor für einen Gelenkbus wurden durch den Systemhersteller Prüfstandsmessungen zur Dokumentation der Emissionssituation durchgeführt. In den Typprüfzyklen konnten Werte deutlich unter 1 g/kWh realisiert werden. Der Grenzwert für Euro III Motoren liegt bei 5 g/kWh.

Ein Linienbus wurde mit SCRT-System nachgerüstet. Um die Realemissionen ermitteln zu können, wurde es mit mobiler Messtechnik ausgestattet und auf repräsentativen Strecken emissionsseitig vermessen.

Die Ergebnisse der Emissionsmessungen zeigen, dass die auf dem Motorprüfstand ermittelten Emissionsverbesserungen bei den Realmessungen bestätigt werden können. Genaue Analysen der Messergebnisse zeigen, dass auch die  $\text{NO}_2$ -Massenemission deutlich abgesenkt wird. Bei Betrieb unter den Bedingungen der Stadt Hagen sind mit dem hier untersuchten System deutliche Verbesserungen zu erreichen, die aber systembedingt stark unterschiedlich sind. Grund hierfür sind äußere Einflüsse wie z.B. die Außentemperatur. Da in Hagen keine Messungen ohne Nachrüstsystem durchgeführt wurden, können keine genauen Aussagen über Umsatzraten im Realverkehr gemacht werden. Legt man die Rohemissionen aus Messungen in Düsseldorf zugrunde, sind im Mittel über alle Messungen Reduktionen der  $\text{NO}_x$ -Emissionen in einer Größenordnung von > 50 % 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

## 7 Anhang

### 7.1 Hagener Zyklus

time_cycle	n_rel	P_rel
1	0,00%	0,00%
2	0,00%	0,00%
3	0,00%	0,00%
4	0,00%	0,00%
5	0,00%	0,00%
6	0,00%	0,00%
7	0,00%	0,00%
8	0,00%	0,00%
9	17,38%	3,82%
10	31,01%	17,53%
11	38,35%	28,18%
12	33,96%	27,84%
13	15,28%	20,20%
14	5,96%	15,24%
15	2,43%	17,92%
16	0,38%	33,93%
17	0,36%	27,48%
18	0,15%	13,17%
19	0,85%	3,93%
20	0,00%	0,00%
21	0,00%	0,00%
22	0,00%	0,00%
23	0,00%	0,00%

time_cycle	n_rel	P_rel
24	0,00%	0,00%
25	0,00%	0,00%
26	0,00%	0,00%
27	0,00%	0,00%
28	0,00%	0,00%
29	0,00%	0,00%
30	0,00%	0,00%
31	0,00%	0,00%
32	0,00%	0,00%
33	0,00%	0,00%
34	0,00%	0,00%
35	0,00%	0,00%
36	21,28%	11,12%
37	37,11%	25,43%
38	45,40%	35,33%
39	40,96%	30,97%
40	33,00%	22,14%
41	17,84%	11,46%
42	8,08%	0,28%
43	3,27%	-8,89%
44	2,02%	-12,59%
45	0,31%	-7,26%
46	0,38%	6,15%
47	0,00%	28,41%
48	0,14%	34,14%
49	0,00%	39,39%

time_cycle	n_rel	P_rel
50	0,51%	15,98%
51	0,21%	7,86%
52	0,00%	0,00%
53	0,00%	0,00%
54	0,00%	0,00%
55	0,00%	0,00%
56	0,00%	0,00%
57	0,00%	0,00%
58	0,00%	0,00%
59	0,00%	0,00%
60	0,00%	0,00%
61	0,00%	0,00%
62	0,00%	0,00%
63	0,00%	0,00%
64	0,00%	0,00%
65	0,00%	0,00%
66	0,00%	0,00%
67	0,00%	0,00%
68	3,15%	2,20%
69	11,01%	8,32%
70	18,71%	16,10%
71	22,16%	20,45%
72	29,03%	25,64%
73	46,58%	39,35%
74	63,39%	55,14%
75	68,75%	64,90%
76	58,86%	71,39%

time_cycle	n_rel	P_rel
77	47,71%	60,19%
78	45,00%	23,98%
79	43,42%	-3,68%
80	41,79%	-13,83%
81	39,98%	-17,23%
82	38,02%	-18,46%
83	36,31%	-18,83%
84	34,67%	-20,29%
85	32,92%	-21,25%
86	30,84%	-24,65%
87	27,27%	-34,39%
88	21,43%	-40,55%
89	13,39%	-41,43%
90	6,55%	-36,58%
91	10,86%	-5,82%
92	26,35%	16,44%
93	40,45%	26,23%
94	49,35%	31,29%
95	51,19%	29,51%
96	44,36%	19,17%
97	32,71%	6,29%
98	19,89%	-10,51%
99	11,74%	-25,71%
100	6,92%	-38,39%
101	4,43%	-45,48%
102	8,30%	-19,50%
103	22,21%	5,55%

time_cycle	n_rel	P_rel
104	37,37%	19,19%
105	50,25%	29,29%
106	56,81%	32,27%
107	55,12%	25,66%
108	47,02%	14,50%
109	32,68%	-1,54%
110	25,47%	-8,89%
111	32,46%	2,55%
112	40,26%	10,03%
113	37,78%	6,43%
114	30,43%	-1,27%
115	25,89%	-5,19%
116	23,03%	-6,23%
117	21,14%	-5,90%
118	19,30%	-5,36%
119	16,13%	-6,86%
120	10,65%	-12,56%
121	5,10%	-20,43%
122	2,21%	-25,46%
123	0,66%	-27,76%
124	0,31%	-23,06%
125	0,40%	-15,14%
126	0,48%	-5,01%
127	0,26%	7,19%
128	0,00%	25,05%
129	0,00%	42,95%
130	0,00%	32,31%

time_cycle	n_rel	P_rel
131	0,06%	15,09%
132	0,85%	3,84%
133	0,00%	0,00%
134	0,00%	0,00%
135	0,00%	0,00%
136	0,00%	0,00%
137	0,00%	0,00%
138	0,00%	0,00%
139	0,00%	0,00%
140	0,00%	0,00%
141	0,00%	0,00%
142	0,00%	0,00%
143	0,00%	0,00%
144	0,00%	0,00%
145	0,00%	0,00%
146	0,00%	0,00%
147	0,00%	0,00%
148	0,00%	0,00%
149	0,00%	0,00%
150	0,00%	0,00%
151	0,00%	0,00%
152	10,12%	1,75%
153	20,76%	9,45%
154	27,46%	19,48%
155	26,73%	23,00%
156	23,55%	21,55%
157	17,87%	18,04%

time_cycle	n_rel	P_rel
158	12,23%	14,59%
159	10,42%	12,68%
160	9,40%	12,22%
161	9,26%	12,00%
162	8,96%	12,00%
163	9,18%	12,10%
164	12,17%	13,23%
165	15,99%	15,27%
166	18,31%	15,95%
167	18,43%	15,45%
168	16,74%	14,07%
169	15,13%	13,04%
170	14,18%	12,45%
171	12,87%	11,50%
172	10,48%	10,34%
173	9,00%	10,17%
174	8,54%	10,37%
175	8,01%	10,32%
176	6,02%	10,17%
177	3,79%	10,41%
178	2,08%	11,76%
179	1,45%	12,72%
180	1,02%	13,81%
181	0,97%	13,67%
182	0,65%	13,89%
183	0,79%	12,62%
184	0,69%	12,00%

time_cycle	n_rel	P_rel
185	0,84%	10,12%
186	0,64%	9,33%
187	0,72%	9,21%
188	0,43%	13,12%
189	0,70%	14,20%
190	0,55%	15,17%
191	0,74%	13,99%
192	0,57%	14,28%
193	0,71%	13,67%
194	0,52%	13,98%
195	0,73%	12,97%
196	0,58%	13,31%
197	0,71%	12,62%
198	0,55%	12,64%
199	0,70%	11,98%
200	0,56%	12,51%
201	0,67%	12,18%
202	0,56%	12,62%
203	0,62%	12,44%
204	0,53%	13,20%
205	0,65%	13,26%
206	0,48%	14,28%
207	0,63%	14,09%
208	0,56%	14,59%
209	0,57%	14,70%
210	0,64%	14,21%
211	0,64%	13,77%

time_cycle	n_rel	P_rel
212	0,73%	12,92%
213	0,68%	12,42%
214	0,65%	11,67%
215	0,71%	10,75%
216	0,69%	10,39%
217	0,61%	10,20%
218	0,70%	9,64%
219	0,60%	9,85%
220	0,68%	9,87%
221	0,54%	10,92%
222	0,66%	11,32%
223	0,52%	12,32%
224	1,63%	12,28%
225	4,87%	12,44%
226	9,72%	12,27%
227	12,65%	12,56%
228	14,05%	12,60%
229	12,09%	11,58%
230	7,01%	9,07%
231	3,36%	7,81%
232	1,69%	7,72%
233	1,17%	7,93%
234	0,80%	8,42%
235	0,78%	8,25%
236	0,51%	8,85%
237	2,36%	8,72%
238	6,72%	10,10%

time_cycle	n_rel	P_rel
239	9,51%	10,22%
240	8,31%	8,37%
241	6,60%	6,98%
242	5,17%	5,86%
243	3,34%	3,75%
244	1,51%	1,83%
245	1,00%	0,70%
246	7,04%	12,46%
247	26,84%	25,80%
248	46,95%	36,93%
249	52,75%	38,03%
250	39,13%	23,44%
251	18,83%	2,27%
252	8,25%	-17,82%
253	3,72%	-34,49%
254	1,77%	-45,90%
255	0,46%	-54,49%
256	0,00%	-47,65%
257	0,00%	-21,31%
258	0,00%	8,85%
259	0,00%	35,06%
260	0,00%	42,42%
261	0,00%	27,45%
262	0,36%	10,68%
263	0,86%	2,87%
264	0,00%	0,00%
265	0,00%	0,00%

time_cycle	n_rel	P_rel
266	0,00%	0,00%
267	0,00%	0,00%
268	0,00%	0,00%
269	0,00%	0,00%
270	0,00%	0,00%
271	0,00%	0,00%
272	0,00%	0,00%
273	0,00%	0,00%
274	0,00%	0,00%
275	31,84%	12,24%
276	49,49%	35,10%
277	60,30%	51,15%
278	62,09%	50,86%
279	57,20%	38,76%
280	46,16%	23,92%
281	27,92%	5,60%
282	14,25%	-10,05%
283	6,45%	-22,50%
284	4,39%	-20,95%
285	11,90%	2,05%
286	29,63%	17,54%
287	46,15%	27,29%
288	57,93%	34,80%
289	61,98%	47,05%
290	54,80%	62,48%
291	49,85%	70,48%
292	52,45%	71,25%

time_cycle	n_rel	P_rel
293	56,59%	60,55%
294	54,18%	44,89%
295	44,94%	31,95%
296	40,22%	14,47%
297	38,13%	-3,33%
298	36,35%	-23,56%
299	33,74%	-45,61%
300	30,07%	-59,36%
301	29,24%	-70,24%
302	29,17%	-63,92%
303	20,72%	-51,29%
304	10,61%	-42,52%
305	4,45%	-35,71%
306	1,58%	-3,89%
307	0,67%	17,09%
308	0,49%	11,98%
309	1,09%	3,43%
310	0,00%	0,00%
311	0,00%	0,00%
312	0,00%	0,00%
313	0,00%	0,00%
314	0,00%	0,00%
315	0,00%	0,00%
316	12,60%	6,26%
317	26,32%	17,52%
318	37,01%	28,10%
319	41,45%	32,86%

time_cycle	n_rel	P_rel
320	33,87%	28,49%
321	17,16%	16,55%
322	6,72%	4,43%
323	2,99%	-3,14%
324	1,73%	-6,41%
325	0,95%	-6,69%
326	0,77%	-4,10%
327	0,50%	-1,42%
328	1,04%	1,08%
329	3,47%	4,73%
330	6,70%	5,95%
331	5,39%	4,53%
332	2,17%	1,91%
333	0,93%	0,66%
334	0,80%	0,49%
335	0,64%	0,44%
336	0,74%	0,59%
337	0,77%	0,81%
338	0,73%	0,87%
339	0,68%	1,06%
340	0,59%	2,93%
341	0,43%	10,39%
342	0,00%	27,38%
343	0,00%	44,95%
344	0,05%	30,10%
345	0,24%	13,25%
346	0,63%	3,66%

time_cycle	n_rel	P_rel
347	0,00%	0,00%
348	0,00%	0,00%
349	0,00%	0,00%
350	0,00%	0,00%
351	0,00%	0,00%
352	0,00%	0,00%
353	0,00%	0,00%
354	0,00%	0,00%
355	0,00%	0,00%
356	0,00%	0,00%
357	0,00%	0,00%
358	0,00%	0,00%
359	0,00%	0,00%
360	0,00%	0,00%
361	0,00%	0,00%
362	0,00%	0,00%
363	0,00%	0,00%
364	0,00%	0,00%
365	0,00%	0,00%
366	0,00%	0,00%
367	0,00%	0,00%
368	0,00%	0,00%
369	0,00%	0,00%
370	0,00%	0,00%
371	0,00%	0,00%
372	0,00%	0,00%
373	0,00%	0,00%

time_cycle	n_rel	P_rel
374	17,18%	5,11%
375	31,18%	18,53%
376	36,99%	28,07%
377	34,26%	27,76%
378	28,15%	21,55%
379	25,66%	17,14%
380	23,35%	13,87%
381	15,74%	8,52%
382	6,73%	0,52%
383	3,19%	-5,12%
384	5,56%	0,48%
385	11,60%	5,72%
386	12,68%	5,59%
387	9,69%	2,49%
388	4,69%	-3,72%
389	2,38%	-8,04%
390	1,38%	-10,03%
391	0,88%	-9,55%
392	0,62%	-6,71%
393	1,29%	-0,28%
394	1,71%	3,95%
395	0,72%	7,17%
396	1,34%	11,21%
397	7,61%	14,25%
398	17,27%	16,95%
399	17,94%	16,00%
400	11,84%	12,86%

time_cycle	n_rel	P_rel
401	10,16%	12,95%
402	16,35%	16,39%
403	21,54%	18,66%
404	22,25%	17,60%
405	21,41%	15,61%
406	20,19%	13,90%
407	22,36%	15,42%
408	29,02%	19,34%
409	35,42%	22,38%
410	43,28%	27,38%
411	51,15%	32,29%
412	48,76%	27,69%
413	34,03%	4,66%
414	20,93%	-24,28%
415	11,74%	-38,70%
416	4,97%	-54,33%
417	1,94%	-48,70%
418	0,55%	-14,49%
419	0,17%	20,12%
420	0,12%	18,31%
421	0,92%	5,91%
422	0,00%	0,00%
423	0,00%	0,00%
424	0,00%	0,00%
425	0,00%	0,00%
426	0,00%	0,00%
427	0,00%	0,00%

time_cycle	n_rel	P_rel
428	0,00%	0,00%
429	0,00%	0,00%
430	0,00%	0,00%
431	0,00%	0,00%
432	0,00%	0,00%
433	0,00%	0,00%
434	0,00%	0,00%
435	0,00%	0,00%
436	0,00%	0,00%
437	0,00%	0,00%
438	0,00%	0,00%
439	0,00%	0,00%
440	0,00%	0,00%
441	0,00%	0,00%
442	0,00%	0,00%
443	11,48%	2,13%
444	33,87%	15,94%
445	52,18%	39,51%
446	55,49%	49,33%
447	41,04%	34,09%
448	26,48%	17,86%
449	19,15%	8,14%
450	14,85%	2,82%
451	11,73%	0,04%
452	9,44%	-1,21%
453	8,32%	-0,71%
454	7,72%	0,38%

time_cycle	n_rel	P_rel
455	6,34%	-0,34%
456	3,90%	-3,58%
457	2,18%	-4,98%
458	1,22%	1,19%
459	0,53%	17,01%
460	0,00%	40,72%
461	0,00%	36,90%
462	0,03%	18,39%
463	0,77%	6,31%
464	0,00%	0,00%
465	0,00%	0,00%
466	0,00%	0,00%
467	0,00%	0,00%
468	0,00%	0,00%
469	0,00%	0,00%
470	0,00%	0,00%
471	0,00%	0,00%
472	0,00%	0,00%
473	0,00%	0,00%
474	0,00%	0,00%
475	0,00%	0,00%
476	0,00%	0,00%
477	0,00%	0,00%
478	13,56%	3,16%
479	35,38%	18,02%
480	52,61%	40,21%
481	65,32%	58,01%

time_cycle	n_rel	P_rel
482	75,47%	66,46%
483	75,38%	64,52%
484	59,35%	42,34%
485	41,90%	7,11%
486	34,18%	-8,38%
487	31,22%	-8,79%
488	38,60%	6,76%
489	51,02%	27,33%
490	49,83%	41,71%
491	44,44%	48,23%
492	44,57%	45,45%
493	45,58%	35,12%
494	45,74%	21,28%
495	44,36%	1,24%
496	41,42%	-17,10%
497	36,19%	-30,98%
498	26,62%	-35,67%
499	14,65%	-33,72%
500	5,80%	-22,50%
501	1,90%	4,31%
502	0,89%	14,33%
503	0,80%	6,36%
504	1,55%	1,29%
505	0,00%	0,00%
506	0,00%	0,00%
507	0,00%	0,00%
508	0,00%	0,00%

time_cycle	n_rel	P_rel
509	0,00%	0,00%
510	20,84%	4,18%
511	42,53%	22,52%
512	57,63%	45,95%
513	68,50%	61,69%
514	77,53%	69,52%
515	83,16%	70,48%
516	74,61%	63,27%
517	56,50%	47,28%
518	49,54%	26,06%
519	44,42%	-6,46%
520	34,55%	-25,94%
521	20,56%	-29,40%
522	8,49%	-22,28%
523	2,94%	-2,45%
524	1,05%	13,39%
525	0,76%	9,57%
526	1,22%	2,82%
527	0,00%	0,00%
528	0,00%	0,00%
529	0,00%	0,00%
530	0,00%	0,00%
531	0,00%	0,00%
532	0,00%	0,00%
533	0,00%	0,00%
534	0,00%	0,00%
535	0,00%	0,00%

time_cycle	n_rel	P_rel
536	0,00%	0,00%
537	0,00%	0,00%
538	0,00%	0,00%
539	0,00%	0,00%
540	0,00%	0,00%
541	0,00%	0,00%
542	0,00%	0,00%
543	0,00%	0,00%
544	0,00%	0,00%
545	0,00%	0,00%
546	0,00%	0,00%
547	0,00%	0,00%
548	0,00%	0,00%
549	0,00%	0,00%
550	0,00%	0,00%
551	0,00%	0,00%
552	0,00%	0,00%
553	0,00%	0,00%
554	19,19%	4,11%
555	40,29%	20,98%
556	56,17%	44,68%
557	68,38%	61,79%
558	76,83%	67,98%
559	71,15%	69,98%
560	52,74%	69,58%
561	44,16%	70,95%
562	44,09%	67,59%

time_cycle	n_rel	P_rel
563	46,24%	60,46%
564	48,78%	60,21%
565	51,62%	64,28%
566	54,77%	67,82%
567	58,07%	73,13%
568	61,40%	79,74%
569	61,29%	81,38%
570	54,05%	81,25%
571	46,66%	84,51%
572	44,95%	84,90%
573	45,42%	84,46%
574	46,56%	82,61%
575	47,67%	79,22%
576	48,58%	73,45%
577	49,21%	67,49%
578	49,70%	64,62%
579	50,17%	64,94%
580	50,88%	69,85%
581	51,73%	69,53%
582	51,97%	51,09%
583	50,85%	22,13%
584	48,33%	-1,86%
585	45,09%	-11,74%
586	41,63%	-14,44%
587	38,08%	-14,90%
588	34,36%	-15,09%
589	30,22%	-21,85%

time_cycle	n_rel	P_rel
590	32,28%	-28,06%
591	38,53%	-30,60%
592	35,55%	-41,96%
593	27,47%	-47,49%
594	16,87%	-44,84%
595	7,84%	-43,95%
596	3,30%	-41,45%
597	1,16%	-5,65%
598	0,32%	19,89%
599	0,62%	11,17%
600	3,24%	6,27%
601	14,02%	10,49%
602	29,23%	20,64%
603	42,20%	32,49%
604	51,05%	41,46%
605	57,61%	46,44%
606	63,01%	48,82%
607	67,70%	49,60%
608	69,08%	46,06%
609	66,00%	36,78%
610	63,84%	31,68%
611	59,50%	39,72%
612	51,89%	54,84%
613	50,78%	59,80%
614	53,64%	53,21%
615	56,31%	34,80%
616	57,50%	16,01%

time_cycle	n_rel	P_rel
617	57,55%	7,76%
618	57,10%	5,78%
619	56,61%	7,00%
620	55,79%	1,30%
621	52,70%	-18,92%
622	45,58%	-39,68%
623	35,79%	-50,40%
624	25,19%	-49,47%
625	17,31%	-29,78%
626	24,89%	9,46%
627	45,41%	32,24%
628	62,16%	48,84%
629	76,51%	62,14%
630	86,64%	67,66%
631	92,84%	70,33%
632	91,85%	74,37%
633	79,98%	81,99%
634	68,40%	67,73%
635	63,51%	26,61%
636	59,33%	-3,03%
637	55,18%	-14,36%
638	51,36%	-17,56%
639	47,78%	-18,22%
640	42,06%	-22,88%
641	30,24%	-27,31%
642	15,91%	-23,76%
643	6,86%	-20,07%

time_cycle	n_rel	P_rel
644	2,70%	-1,00%
645	1,02%	11,93%
646	1,08%	6,19%
647	1,36%	1,59%
648	0,00%	0,00%
649	0,00%	0,00%
650	0,00%	0,00%
651	0,00%	0,00%
652	0,00%	0,00%
653	0,00%	0,00%
654	0,00%	0,00%
655	0,00%	0,00%
656	0,00%	0,00%
657	0,00%	0,00%
658	0,00%	0,00%
659	0,00%	0,00%
660	0,00%	0,00%
661	0,00%	0,00%
662	0,00%	0,00%
663	0,00%	0,00%
664	0,00%	0,00%
665	24,55%	8,05%
666	44,85%	28,67%
667	59,46%	49,62%
668	70,76%	63,07%
669	70,93%	70,67%
670	57,25%	73,96%

time_cycle	n_rel	P_rel
671	48,61%	72,56%
672	49,52%	68,20%
673	53,24%	60,35%
674	57,04%	49,92%
675	60,10%	40,02%
676	60,84%	33,76%
677	54,67%	37,43%
678	45,49%	50,82%
679	43,15%	58,96%
680	43,16%	46,42%
681	42,70%	18,27%
682	41,17%	-9,80%
683	38,69%	-33,04%
684	34,89%	-53,54%
685	31,95%	-70,65%
686	33,53%	-67,54%
687	36,07%	-32,82%
688	35,71%	0,18%
689	36,01%	25,05%
690	37,77%	45,67%
691	41,32%	62,49%
692	46,05%	72,04%
693	51,70%	78,89%
694	53,66%	83,53%
695	48,11%	86,44%
696	43,66%	88,34%
697	44,19%	87,75%

time_cycle	n_rel	P_rel
698	46,37%	81,12%
699	48,65%	65,79%
700	50,40%	54,54%
701	51,59%	42,86%
702	51,70%	17,61%
703	50,43%	-6,66%
704	48,51%	-15,10%
705	46,43%	-17,52%
706	44,41%	-18,04%
707	42,54%	-17,93%
708	40,09%	-29,16%
709	36,55%	-51,09%
710	32,00%	-72,70%
711	30,18%	-85,68%
712	28,93%	-71,25%
713	20,18%	-54,97%
714	10,04%	-46,42%
715	4,37%	-49,32%
716	2,03%	-36,27%
717	0,63%	-15,01%
718	0,28%	7,65%
719	0,09%	16,37%
720	0,39%	11,30%
721	0,37%	5,77%
722	0,00%	0,00%
723	0,00%	0,00%
724	0,00%	0,00%

time_cycle	n_rel	P_rel
725	0,00%	0,00%
726	0,00%	0,00%
727	0,00%	0,00%
728	0,00%	0,00%
729	0,00%	0,00%
730	0,00%	0,00%
731	0,00%	0,00%
732	0,00%	0,00%
733	0,00%	0,00%
734	0,00%	0,00%
735	0,00%	0,00%
736	0,00%	0,00%
737	0,00%	0,00%
738	0,00%	0,00%
739	0,00%	0,00%
740	0,00%	0,00%
741	0,00%	0,00%
742	0,00%	0,00%
743	0,00%	0,00%
744	28,60%	8,11%
745	44,53%	25,36%
746	57,07%	44,96%
747	65,68%	58,97%
748	65,08%	58,60%
749	55,47%	43,79%
750	48,77%	34,24%
751	45,85%	31,20%

time_cycle	n_rel	P_rel
752	46,85%	34,02%
753	55,54%	45,05%
754	61,70%	51,08%
755	64,56%	50,84%
756	69,21%	52,66%
757	66,96%	63,57%
758	54,22%	75,71%
759	49,18%	71,15%
760	49,63%	52,37%
761	50,00%	23,24%
762	48,52%	-4,53%
763	45,15%	-21,92%
764	39,27%	-38,20%
765	30,20%	-46,08%
766	19,03%	-43,73%
767	9,57%	-42,95%
768	4,42%	-43,69%
769	2,37%	-18,43%
770	0,99%	5,30%
771	0,26%	28,89%
772	0,00%	38,53%
773	0,22%	21,41%
774	0,23%	9,05%
775	0,00%	0,00%
776	0,00%	0,00%
777	0,00%	0,00%
778	0,00%	0,00%

time_cycle	n_rel	P_rel
779	0,00%	0,00%
780	0,00%	0,00%
781	0,00%	0,00%
782	0,00%	0,00%
783	0,00%	0,00%
784	6,62%	2,98%
785	13,73%	10,05%
786	18,67%	16,72%
787	19,23%	19,47%
788	19,92%	20,40%
789	28,20%	25,17%
790	40,12%	31,81%
791	47,77%	34,97%
792	52,80%	35,92%
793	57,55%	37,14%
794	61,36%	37,44%
795	65,17%	38,28%
796	64,00%	48,71%
797	54,71%	60,79%
798	49,18%	63,29%
799	50,05%	61,48%
800	52,89%	57,19%
801	55,41%	42,01%
802	55,75%	12,03%
803	53,19%	-17,90%
804	48,63%	-30,92%
805	43,93%	-25,96%

time_cycle	n_rel	P_rel
806	39,66%	-25,30%
807	35,01%	-32,07%
808	29,80%	-39,98%
809	23,49%	-46,06%
810	16,95%	-45,01%
811	11,21%	-33,28%
812	9,88%	-12,61%
813	23,37%	12,92%
814	42,65%	26,92%
815	53,11%	32,51%
816	60,38%	35,84%
817	61,26%	43,12%
818	53,06%	45,89%
819	46,40%	29,18%
820	44,46%	4,46%
821	43,14%	-12,28%
822	42,11%	-18,07%
823	41,47%	-20,31%
824	40,90%	-21,31%
825	40,95%	-10,59%
826	42,21%	4,50%
827	44,27%	7,32%
828	46,49%	6,21%
829	48,40%	4,20%
830	50,31%	3,84%
831	52,56%	5,95%
832	55,16%	9,21%

time_cycle	n_rel	P_rel
833	57,58%	3,31%
834	59,23%	-7,13%
835	60,50%	-8,34%
836	61,52%	-9,70%
837	61,92%	-14,55%
838	61,18%	-19,89%
839	59,32%	-28,43%
840	55,79%	-43,01%
841	49,48%	-60,72%
842	41,15%	-68,78%
843	33,57%	-52,61%
844	27,86%	-36,62%
845	22,44%	-36,81%
846	17,01%	-39,06%
847	11,41%	-33,20%
848	16,12%	-1,54%
849	31,20%	14,43%
850	41,86%	20,94%
851	48,40%	23,92%
852	48,27%	21,21%
853	43,32%	14,26%
854	39,90%	9,47%
855	41,97%	10,89%
856	50,87%	19,54%
857	60,91%	29,23%
858	58,89%	38,35%
859	48,06%	45,02%

time_cycle	n_rel	P_rel
860	44,18%	49,77%
861	44,88%	60,03%
862	47,05%	61,16%
863	48,62%	45,21%
864	47,66%	15,08%
865	43,71%	-16,96%
866	37,53%	-37,23%
867	29,44%	-47,21%
868	20,75%	-49,47%
869	12,09%	-48,24%
870	5,70%	-48,88%
871	7,40%	-20,69%
872	14,35%	3,70%
873	24,03%	14,32%
874	36,25%	21,76%
875	48,99%	29,41%
876	59,47%	42,39%
877	56,77%	59,35%
878	50,28%	72,48%
879	45,95%	50,76%
880	38,64%	-8,27%
881	37,41%	-44,23%
882	34,81%	-55,14%
883	24,96%	-51,70%
884	12,96%	-43,55%
885	5,08%	-31,38%
886	1,79%	-2,81%

time_cycle	n_rel	P_rel
887	0,71%	15,96%
888	0,58%	10,52%
889	9,77%	6,89%
890	29,66%	19,23%
891	47,31%	36,53%
892	60,45%	50,37%
893	65,31%	60,89%
894	56,27%	61,33%
895	46,33%	51,04%
896	45,45%	42,89%
897	46,75%	22,69%
898	46,70%	-4,56%
899	44,50%	-24,68%
900	39,30%	-42,27%
901	33,01%	-42,72%
902	28,57%	-34,24%
903	24,41%	-34,23%
904	19,17%	-37,32%
905	14,37%	-43,66%
906	9,25%	-50,29%
907	6,10%	-42,04%
908	6,80%	-17,33%
909	5,54%	-8,32%
910	2,88%	-3,25%
911	1,29%	5,73%
912	0,50%	14,42%
913	0,23%	23,56%

time_cycle	n_rel	P_rel
914	0,00%	34,56%
915	0,07%	33,48%
916	0,23%	24,14%
917	0,46%	13,65%
918	0,49%	5,33%
919	0,64%	6,32%
920	0,00%	0,00%
921	0,00%	0,00%
922	0,00%	0,00%
923	0,00%	0,00%
924	0,00%	0,00%
925	0,00%	0,00%
926	0,00%	0,00%
927	22,04%	6,67%
928	43,28%	26,24%
929	58,31%	47,71%
930	69,47%	62,25%
931	76,25%	70,24%
932	67,41%	79,42%
933	51,51%	85,10%
934	47,11%	76,97%
935	45,71%	41,87%
936	41,99%	0,42%
937	35,90%	-20,95%
938	27,15%	-32,87%
939	16,56%	-35,58%
940	8,09%	-39,09%

time_cycle	n_rel	P_rel
941	3,83%	-41,37%
942	1,50%	-18,95%
943	0,42%	8,69%
944	0,22%	14,51%
945	0,42%	7,38%
946	0,00%	0,00%
947	0,00%	0,00%
948	0,00%	0,00%
949	0,00%	0,00%
950	0,00%	0,00%
951	0,00%	0,00%
952	0,00%	0,00%
953	0,00%	0,00%
954	0,00%	0,00%
955	0,00%	0,00%
956	0,00%	0,00%
957	0,00%	0,00%
958	0,00%	0,00%
959	0,00%	0,00%
960	0,00%	0,00%
961	0,00%	0,00%
962	0,00%	0,00%
963	0,00%	0,00%
964	0,00%	0,00%
965	0,00%	0,00%
966	0,00%	0,00%
967	0,00%	0,00%

time_cycle	n_rel	P_rel
968	0,00%	0,00%
969	0,00%	0,00%
970	0,00%	0,00%
971	18,88%	5,33%
972	40,84%	23,09%
973	57,39%	45,62%
974	68,52%	60,79%
975	77,63%	68,51%
976	85,60%	71,17%
977	91,92%	71,73%
978	94,35%	73,73%
979	84,97%	78,28%
980	72,52%	86,44%
981	70,29%	88,40%
982	72,28%	89,53%
983	75,36%	90,46%
984	78,39%	90,81%
985	81,19%	90,30%
986	84,16%	89,82%
987	87,11%	88,71%
988	88,97%	82,67%
989	80,87%	81,60%
990	66,97%	89,41%
991	60,59%	91,03%
992	58,20%	91,91%
993	57,13%	92,32%
994	56,55%	92,31%

time_cycle	n_rel	P_rel
995	56,13%	92,30%
996	55,79%	92,55%
997	55,50%	92,83%
998	55,18%	92,99%
999	54,70%	92,75%
1000	54,20%	92,31%
1001	53,75%	92,08%
1002	53,33%	91,77%
1003	52,92%	91,52%
1004	52,60%	91,58%
1005	52,34%	91,79%
1006	52,03%	91,96%
1007	51,71%	91,79%
1008	51,39%	91,57%
1009	51,11%	91,77%
1010	50,83%	91,74%
1011	50,55%	91,44%
1012	50,27%	91,35%
1013	49,98%	91,27%
1014	49,74%	91,11%
1015	49,46%	91,20%
1016	49,70%	88,28%
1017	60,46%	84,11%
1018	74,58%	86,05%
1019	78,85%	89,76%
1020	81,29%	90,86%
1021	83,06%	91,25%

time_cycle	n_rel	P_rel
1022	84,64%	91,02%
1023	86,08%	90,47%
1024	87,39%	89,86%
1025	88,63%	88,80%
1026	89,64%	81,00%
1027	88,24%	46,02%
1028	83,37%	4,17%
1029	76,77%	-12,40%
1030	69,56%	-17,25%
1031	62,88%	-9,99%
1032	57,53%	3,22%
1033	52,79%	1,83%
1034	47,39%	-8,40%
1035	41,50%	-13,04%
1036	35,74%	-17,64%
1037	29,77%	-25,74%
1038	23,25%	-28,27%
1039	16,59%	-25,41%
1040	10,13%	-32,14%
1041	4,74%	-49,94%
1042	2,18%	-52,11%
1043	0,90%	-25,49%
1044	0,19%	10,70%
1045	5,86%	19,65%
1046	23,66%	24,62%
1047	44,61%	36,25%
1048	59,15%	51,27%

time_cycle	n_rel	P_rel
1049	69,16%	61,88%
1050	72,15%	61,01%
1051	62,83%	45,72%
1052	41,34%	20,88%
1053	22,91%	1,99%
1054	22,50%	4,22%
1055	37,76%	19,97%
1056	54,45%	32,24%
1057	61,56%	34,85%
1058	55,48%	24,17%
1059	40,74%	4,85%
1060	29,12%	-12,71%
1061	24,09%	-22,01%
1062	21,30%	-26,79%
1063	20,41%	-38,07%
1064	19,20%	-45,44%
1065	12,57%	-39,80%
1066	4,79%	-28,26%
1067	1,70%	1,17%
1068	0,81%	13,76%
1069	0,48%	9,66%
1070	1,05%	2,66%
1071	0,00%	0,00%
1072	0,00%	0,00%
1073	0,00%	0,00%
1074	0,00%	0,00%
1075	0,00%	0,00%

time_cycle	n_rel	P_rel
1076	0,00%	0,00%
1077	0,00%	0,00%
1078	0,00%	0,00%
1079	0,00%	0,00%
1080	0,00%	0,00%
1081	36,45%	18,45%
1082	54,46%	42,16%
1083	67,03%	58,11%
1084	78,66%	66,97%
1085	87,67%	69,40%
1086	89,48%	73,50%
1087	73,84%	84,87%
1088	71,37%	85,19%
1089	75,60%	71,52%
1090	78,15%	49,43%
1091	65,32%	46,49%
1092	58,74%	24,78%
1093	56,57%	2,64%
1094	56,32%	7,78%
1095	56,15%	6,35%
1096	55,93%	5,04%
1097	55,60%	0,49%
1098	55,15%	3,99%
1099	54,84%	32,78%
1100	54,69%	38,90%
1101	54,17%	47,69%
1102	54,22%	71,38%

time_cycle	n_rel	P_rel
1103	54,80%	82,86%
1104	55,36%	87,11%
1105	55,76%	84,41%
1106	55,60%	76,98%
1107	54,26%	47,35%
1108	52,18%	42,88%
1109	51,40%	67,17%
1110	51,13%	68,69%
1111	50,86%	67,71%
1112	50,85%	76,05%
1113	51,23%	76,75%
1114	51,55%	73,20%
1115	51,86%	73,45%
1116	52,42%	74,90%
1117	53,26%	80,26%
1118	54,72%	85,40%
1119	56,32%	87,98%
1120	58,06%	89,27%
1121	59,93%	90,20%
1122	61,85%	91,38%
1123	63,68%	91,64%
1124	65,48%	92,13%
1125	66,82%	92,62%
1126	68,26%	90,50%
1127	66,98%	72,75%
1128	52,04%	63,34%
1129	42,68%	25,29%

time_cycle	n_rel	P_rel
1130	37,51%	0,04%
1131	33,36%	-12,33%
1132	28,57%	-62,85%
1133	35,15%	-70,89%
1134	29,62%	-94,39%
1135	28,57%	-98,60%
1136	26,15%	-70,28%
1137	16,22%	-46,73%
1138	15,19%	-3,00%
1139	35,15%	28,72%
1140	52,67%	44,36%
1141	43,04%	31,68%
1142	22,77%	18,76%
1143	17,67%	14,75%
1144	22,49%	19,00%
1145	28,17%	21,74%
1146	28,64%	20,45%
1147	23,83%	16,26%
1148	14,10%	11,46%
1149	6,54%	6,81%
1150	2,82%	1,47%
1151	2,02%	-6,55%
1152	0,96%	-13,85%
1153	1,19%	-11,33%
1154	0,00%	1,04%
1155	0,29%	14,46%
1156	0,00%	34,10%

time_cycle	n_rel	P_rel
1157	0,08%	33,81%
1158	0,00%	34,04%
1159	0,49%	12,51%
1160	0,32%	4,88%
1161	0,00%	0,00%
1162	0,00%	0,00%
1163	0,00%	0,00%
1164	0,00%	0,00%
1165	0,00%	0,00%
1166	0,00%	0,00%
1167	0,00%	0,00%
1168	0,00%	0,00%
1169	0,00%	0,00%
1170	0,00%	0,00%
1171	0,00%	0,00%
1172	0,00%	0,00%
1173	0,00%	0,00%
1174	30,29%	14,42%
1175	50,77%	38,24%
1176	66,81%	59,84%
1177	78,32%	68,59%
1178	87,29%	70,59%
1179	77,91%	81,66%
1180	70,26%	85,22%
1181	74,24%	85,22%
1182	79,23%	82,62%
1183	68,54%	89,06%

time_cycle	n_rel	P_rel
1184	65,59%	72,14%
1185	50,65%	40,03%
1186	44,92%	3,96%
1187	43,55%	-10,40%
1188	43,56%	-15,45%
1189	44,13%	-21,06%
1190	43,73%	-64,08%
1191	42,41%	-100,00%
1192	39,99%	-100,00%
1193	36,76%	-100,00%
1194	32,52%	-100,00%
1195	34,01%	-100,00%
1196	38,90%	-100,00%
1197	36,79%	-100,00%
1198	34,81%	-83,15%
1199	32,15%	-75,48%
1200	27,53%	-91,37%
1201	34,15%	-81,76%
1202	31,50%	-68,45%
1203	25,45%	-61,45%
1204	21,18%	-57,64%
1205	15,52%	-51,78%
1206	6,80%	-49,43%
1207	3,86%	-55,23%
1208	1,00%	-44,98%
1209	0,77%	-5,90%
1210	0,00%	9,91%

time_cycle	n_rel	P_rel
1211	0,63%	6,47%
1212	0,11%	3,36%
1213	0,00%	0,00%
1214	0,00%	0,00%
1215	0,00%	0,00%
1216	0,00%	0,00%
1217	0,00%	0,00%
1218	0,00%	0,00%
1219	0,00%	0,00%
1220	0,00%	0,00%
1221	0,00%	0,00%
1222	0,00%	0,00%
1223	0,00%	0,00%
1224	0,00%	0,00%
1225	0,00%	0,00%
1226	30,05%	6,64%
1227	47,92%	28,15%
1228	58,94%	47,32%
1229	68,01%	61,15%
1230	73,33%	65,68%
1231	75,23%	62,89%
1232	77,97%	61,39%
1233	80,91%	61,06%
1234	83,52%	62,92%
1235	69,54%	78,23%
1236	53,93%	83,88%
1237	51,74%	85,54%

time_cycle	n_rel	P_rel
1238	52,99%	86,78%
1239	55,54%	87,64%
1240	58,70%	88,43%
1241	62,35%	88,89%
1242	66,12%	86,41%
1243	67,06%	65,74%
1244	52,79%	45,80%
1245	44,69%	30,77%
1246	40,68%	13,46%
1247	37,50%	-8,12%
1248	34,14%	-31,99%
1249	30,42%	-52,07%
1250	34,46%	-54,57%
1251	30,81%	-39,96%
1252	39,35%	-0,36%
1253	58,59%	26,55%
1254	65,80%	44,74%
1255	52,90%	66,38%
1256	60,98%	59,50%
1257	84,32%	64,13%
1258	78,53%	79,88%
1259	71,74%	84,94%
1260	73,07%	86,85%
1261	77,74%	87,42%
1262	82,54%	86,78%
1263	75,26%	88,24%
1264	65,95%	90,32%

time_cycle	n_rel	P_rel
1265	64,71%	89,20%
1266	64,90%	73,68%
1267	54,40%	71,54%
1268	45,44%	61,83%
1269	41,76%	22,05%
1270	39,67%	-2,59%
1271	38,11%	-11,27%
1272	36,53%	-14,85%
1273	35,09%	-14,90%
1274	34,04%	-0,21%
1275	32,65%	-10,24%
1276	31,21%	-25,48%
1277	30,14%	-76,74%
1278	40,09%	-71,79%
1279	40,45%	-77,94%
1280	35,82%	-100,00%
1281	27,99%	-100,00%
1282	33,37%	-94,54%
1283	33,02%	-71,42%
1284	32,43%	-24,11%
1285	36,31%	-8,73%
1286	40,24%	-0,06%
1287	53,10%	20,14%
1288	47,46%	38,55%
1289	47,46%	41,45%
1290	49,92%	36,01%
1291	52,40%	19,55%

time_cycle	n_rel	P_rel
1292	53,26%	-7,00%
1293	52,73%	-17,40%
1294	51,31%	-29,42%
1295	48,41%	-40,22%
1296	44,48%	-50,87%
1297	39,56%	-59,18%
1298	34,58%	-42,50%
1299	32,87%	-14,36%
1300	32,74%	3,61%
1301	34,44%	29,74%
1302	37,98%	41,95%
1303	39,92%	9,51%
1304	39,05%	-18,83%
1305	35,60%	-29,57%
1306	29,11%	-38,44%
1307	19,07%	-42,68%
1308	8,40%	-38,48%
1309	2,54%	-25,84%
1310	0,92%	5,91%
1311	0,35%	10,43%
1312	0,84%	4,78%
1313	0,00%	0,00%
1314	0,00%	0,00%
1315	0,00%	0,00%
1316	0,00%	0,00%
1317	0,00%	0,00%
1318	0,00%	0,00%

time_cycle	n_rel	P_rel
1319	0,00%	0,00%
1320	0,00%	0,00%
1321	17,17%	2,94%
1322	38,84%	20,86%
1323	55,16%	43,03%
1324	67,56%	59,93%
1325	78,00%	68,01%
1326	86,43%	70,00%
1327	92,81%	71,06%
1328	90,36%	75,12%
1329	72,72%	86,11%
1330	68,57%	86,52%
1331	70,73%	79,91%
1332	71,56%	39,15%
1333	69,03%	22,91%
1334	50,19%	0,98%
1335	40,88%	-10,96%
1336	35,01%	-15,27%
1337	28,79%	-17,18%
1338	34,95%	-28,35%
1339	38,79%	-22,17%
1340	37,29%	-20,77%
1341	34,41%	-19,98%
1342	32,19%	-10,70%
1343	31,81%	10,10%
1344	33,96%	37,85%
1345	39,31%	64,06%

time_cycle	n_rel	P_rel
1346	46,44%	73,67%
1347	51,46%	76,97%
1348	44,86%	84,16%
1349	45,66%	83,93%
1350	49,66%	77,69%
1351	54,40%	56,32%
1352	58,27%	39,24%
1353	60,98%	25,14%
1354	54,34%	18,99%
1355	44,90%	-2,57%
1356	42,48%	-13,59%
1357	42,60%	-17,01%
1358	43,60%	-18,58%
1359	44,89%	-20,30%
1360	46,61%	-20,18%
1361	48,35%	-20,29%
1362	50,31%	-22,79%
1363	51,55%	-56,32%
1364	51,58%	-86,54%
1365	51,83%	-63,01%
1366	52,05%	-81,05%
1367	51,70%	-97,68%
1368	51,12%	-100,00%
1369	50,29%	-100,00%
1370	49,30%	-100,00%
1371	48,28%	-100,00%
1372	47,20%	-100,00%

time_cycle	n_rel	P_rel
1373	46,34%	-100,00%
1374	45,38%	-100,00%
1375	44,47%	-100,00%
1376	43,70%	-100,00%
1377	43,04%	-100,00%
1378	42,38%	-100,00%
1379	41,91%	-100,00%
1380	41,82%	-91,85%
1381	41,93%	-72,82%
1382	43,03%	-44,76%
1383	43,77%	-63,61%
1384	44,26%	-75,06%
1385	44,44%	-80,57%
1386	44,30%	-84,46%
1387	43,98%	-85,94%
1388	43,41%	-85,79%
1389	42,59%	-86,63%
1390	41,71%	-89,07%
1391	40,59%	-96,28%
1392	39,01%	-100,00%
1393	37,21%	-100,00%
1394	34,90%	-100,00%
1395	32,16%	-100,00%
1396	27,77%	-100,00%
1397	37,08%	-96,26%
1398	39,75%	-86,56%
1399	37,72%	-83,32%

time_cycle	n_rel	P_rel
1400	33,84%	-82,78%
1401	30,06%	-95,41%
1402	33,30%	-74,97%
1403	25,51%	-56,93%
1404	14,63%	-42,01%
1405	5,62%	-52,51%
1406	3,02%	-34,62%
1407	0,40%	-1,62%
1408	0,83%	8,89%
1409	0,04%	6,00%
1410	0,00%	0,00%
1411	0,00%	0,00%
1412	0,00%	0,00%
1413	0,00%	0,00%
1414	0,00%	0,00%
1415	0,00%	0,00%
1416	0,00%	0,00%
1417	0,00%	0,00%
1418	0,00%	0,00%
1419	0,00%	0,00%
1420	0,00%	0,00%
1421	0,00%	0,00%
1422	0,00%	0,00%
1423	0,00%	0,00%
1424	0,00%	0,00%
1425	0,00%	0,00%
1426	0,00%	0,00%

time_cycle	n_rel	P_rel
1427	0,00%	0,00%
1428	0,00%	0,00%
1429	0,00%	0,00%
1430	0,00%	0,00%
1431	0,00%	0,00%
1432	0,00%	0,00%
1433	0,00%	0,00%
1434	0,00%	0,00%
1435	0,00%	0,00%
1436	0,00%	0,00%
1437	0,00%	0,00%
1438	0,00%	0,00%
1439	0,00%	0,00%
1440	0,00%	0,00%
1441	0,00%	0,00%
1442	0,00%	0,00%
1443	0,00%	0,00%
1444	0,00%	0,00%
1445	0,00%	0,00%
1446	0,00%	0,00%
1447	0,00%	0,00%
1448	0,00%	0,00%
1449	0,00%	0,00%
1450	0,00%	0,00%
1451	0,00%	0,00%
1452	0,00%	0,00%
1453	18,88%	3,48%

time_cycle	n_rel	P_rel
1454	37,76%	17,93%
1455	52,84%	38,06%
1456	61,34%	51,23%
1457	60,39%	49,75%
1458	54,41%	39,01%
1459	52,61%	33,60%
1460	56,75%	36,09%
1461	64,57%	43,10%
1462	69,61%	52,80%
1463	61,34%	65,89%
1464	50,42%	76,84%
1465	50,81%	80,94%
1466	54,19%	81,79%
1467	50,95%	83,68%
1468	44,62%	87,81%
1469	44,36%	86,15%
1470	45,72%	65,78%
1471	46,67%	48,17%
1472	47,89%	58,41%
1473	49,72%	68,49%
1474	51,87%	75,11%
1475	54,23%	81,37%
1476	56,74%	86,28%
1477	59,18%	89,20%
1478	61,46%	90,60%
1479	58,58%	90,75%
1480	49,50%	90,94%

time_cycle	n_rel	P_rel
1481	43,14%	92,22%
1482	41,30%	92,55%
1483	40,87%	92,85%
1484	40,81%	89,82%
1485	40,61%	80,11%
1486	39,94%	56,56%
1487	38,63%	21,25%
1488	36,81%	-3,16%
1489	34,93%	-12,09%
1490	33,34%	-15,26%
1491	31,95%	-29,90%
1492	29,42%	-57,49%
1493	31,91%	-80,28%
1494	39,49%	-85,10%
1495	43,13%	-63,61%
1496	44,40%	-36,99%
1497	45,68%	-17,02%
1498	47,60%	4,44%
1499	49,53%	5,39%
1500	50,45%	-18,06%
1501	49,69%	-45,48%
1502	47,76%	-58,86%
1503	46,16%	-48,59%
1504	45,32%	-31,40%
1505	44,66%	-24,11%
1506	43,99%	-20,53%
1507	43,67%	-6,37%

time_cycle	n_rel	P_rel
1508	43,58%	2,90%
1509	43,27%	1,65%
1510	42,57%	0,63%
1511	41,23%	-9,86%
1512	38,85%	-26,53%
1513	35,46%	-46,04%
1514	31,35%	-60,24%
1515	32,70%	-62,49%
1516	36,83%	-44,25%
1517	35,19%	-27,46%
1518	31,54%	-20,96%
1519	27,72%	-9,95%
1520	37,95%	10,45%
1521	60,16%	34,17%
1522	73,01%	54,12%
1523	79,31%	59,67%
1524	75,79%	69,94%
1525	61,85%	81,70%
1526	54,24%	84,32%
1527	55,35%	83,97%
1528	55,87%	79,44%
1529	49,13%	70,46%
1530	41,48%	59,17%
1531	38,85%	45,13%
1532	36,97%	21,19%
1533	34,17%	-13,01%
1534	32,70%	-42,42%

time_cycle	n_rel	P_rel
1535	35,23%	-53,95%
1536	35,78%	-56,77%
1537	30,22%	-57,60%
1538	21,09%	-50,74%
1539	11,19%	-44,51%
1540	4,49%	-37,22%
1541	1,57%	-9,02%
1542	0,56%	14,81%
1543	0,35%	11,84%
1544	1,00%	3,13%
1545	0,00%	0,00%
1546	0,00%	0,00%
1547	0,00%	0,00%
1548	0,00%	0,00%
1549	0,00%	0,00%
1550	0,00%	0,00%
1551	0,00%	0,00%
1552	0,00%	0,00%
1553	0,00%	0,00%
1554	0,00%	0,00%
1555	0,00%	0,00%
1556	0,00%	0,00%
1557	0,00%	0,00%
1558	0,00%	0,00%
1559	0,00%	0,00%
1560	0,00%	0,00%
1561	0,00%	0,00%

time_cycle	n_rel	P_rel
1562	0,00%	0,00%
1563	0,00%	0,00%
1564	0,00%	0,00%
1565	26,33%	6,35%
1566	44,97%	23,88%
1567	56,58%	42,94%
1568	65,02%	57,25%
1569	71,89%	66,31%
1570	77,74%	70,81%
1571	82,20%	72,47%
1572	85,71%	73,10%
1573	88,61%	73,20%
1574	91,00%	73,38%
1575	93,14%	73,98%
1576	94,90%	74,66%
1577	96,23%	75,13%
1578	97,39%	75,63%
1579	98,38%	76,42%
1580	98,88%	77,55%
1581	99,07%	78,32%
1582	99,12%	78,14%
1583	99,15%	77,59%
1584	99,15%	76,94%
1585	99,15%	76,18%
1586	99,15%	75,47%
1587	99,15%	75,18%
1588	99,15%	75,21%

time_cycle	n_rel	P_rel
1589	99,15%	75,26%
1590	99,15%	75,34%
1591	99,15%	75,48%
1592	99,15%	75,48%
1593	99,15%	75,27%
1594	99,15%	75,17%
1595	99,15%	75,41%
1596	99,15%	75,53%
1597	99,15%	75,42%
1598	99,15%	75,40%
1599	99,15%	75,57%
1600	99,15%	75,80%
1601	99,15%	75,90%
1602	99,15%	76,09%
1603	99,15%	76,17%
1604	99,15%	76,26%
1605	99,15%	76,36%
1606	99,15%	76,41%
1607	99,15%	76,54%
1608	99,15%	76,73%
1609	99,15%	76,83%
1610	99,15%	76,74%
1611	99,15%	76,55%
1612	99,15%	76,61%
1613	99,15%	76,72%
1614	99,15%	76,79%
1615	99,15%	76,86%

time_cycle	n_rel	P_rel
1616	99,15%	76,90%
1617	99,15%	77,20%
1618	99,15%	77,35%
1619	99,15%	77,44%
1620	99,15%	77,43%
1621	99,15%	77,47%
1622	99,15%	77,37%
1623	99,15%	77,27%
1624	99,15%	77,21%
1625	99,15%	76,81%
1626	99,15%	76,19%
1627	99,15%	75,44%
1628	97,31%	74,83%
1629	86,13%	78,17%
1630	70,80%	87,79%
1631	65,68%	88,77%
1632	65,21%	88,97%
1633	66,72%	89,07%
1634	68,98%	89,07%
1635	71,74%	89,15%
1636	75,17%	89,44%
1637	78,92%	89,49%
1638	82,88%	88,32%
1639	82,14%	87,77%
1640	72,83%	90,21%
1641	64,92%	91,64%
1642	64,03%	91,39%

time_cycle	n_rel	P_rel
1643	65,87%	91,36%
1644	68,74%	91,63%
1645	71,87%	91,35%
1646	75,06%	90,87%
1647	78,57%	90,11%
1648	81,96%	88,27%
1649	79,35%	84,11%
1650	68,43%	78,21%
1651	60,59%	71,72%
1652	58,42%	64,14%
1653	58,17%	58,04%
1654	58,53%	55,39%
1655	59,10%	51,48%
1656	59,14%	29,89%
1657	58,41%	-2,07%
1658	57,42%	-15,07%
1659	56,25%	-19,16%
1660	54,49%	-39,80%
1661	50,98%	-80,73%
1662	45,44%	-100,00%
1663	37,43%	-100,00%
1664	32,94%	-100,00%
1665	32,68%	-100,00%
1666	31,23%	-100,00%
1667	32,70%	-90,57%
1668	26,67%	-63,54%
1669	15,27%	-46,23%

time_cycle	n_rel	P_rel
1670	6,17%	-31,75%
1671	2,16%	-8,03%
1672	0,93%	8,42%
1673	0,47%	7,67%
1674	0,95%	2,40%
1675	0,00%	0,00%
1676	0,00%	0,00%
1677	0,00%	0,00%
1678	0,00%	0,00%
1679	0,00%	0,00%
1680	0,00%	0,00%
1681	0,00%	0,00%
1682	0,00%	0,00%
1683	0,00%	0,00%
1684	19,95%	5,57%
1685	42,75%	24,90%
1686	58,88%	48,02%
1687	70,52%	62,85%
1688	79,98%	69,63%
1689	87,58%	71,46%
1690	92,22%	73,54%
1691	85,01%	78,71%
1692	72,39%	87,16%
1693	71,52%	88,02%
1694	75,88%	88,46%
1695	81,22%	85,99%
1696	78,04%	86,46%

time_cycle	n_rel	P_rel
1697	68,03%	91,91%
1698	66,45%	92,24%
1699	68,36%	92,35%
1700	71,55%	92,63%
1701	75,23%	92,80%
1702	78,81%	89,89%
1703	76,10%	88,50%
1704	65,39%	84,80%
1705	57,82%	49,50%
1706	54,91%	20,57%
1707	54,29%	39,72%
1708	54,88%	58,00%
1709	55,63%	53,65%
1710	56,00%	36,87%
1711	56,16%	25,09%
1712	56,03%	16,89%
1713	55,53%	4,54%
1714	54,73%	-8,88%
1715	53,79%	-12,20%
1716	53,07%	2,83%
1717	52,54%	10,83%
1718	51,93%	-7,61%
1719	51,30%	-13,88%
1720	51,00%	-6,11%
1721	51,21%	14,00%
1722	51,85%	33,50%
1723	52,89%	49,51%

time_cycle	n_rel	P_rel
1724	54,10%	53,99%
1725	55,29%	49,28%
1726	56,32%	37,91%
1727	56,85%	17,02%
1728	57,01%	1,21%
1729	57,21%	6,56%
1730	57,62%	20,03%
1731	57,92%	11,26%
1732	57,89%	-6,64%
1733	57,67%	-15,02%
1734	57,33%	-17,87%
1735	56,79%	-26,87%
1736	55,41%	-57,25%
1737	52,41%	-100,00%
1738	48,44%	-100,00%
1739	46,13%	-46,21%
1740	46,51%	28,74%
1741	48,19%	63,56%
1742	50,57%	78,89%
1743	53,11%	80,50%
1744	55,19%	60,40%
1745	56,26%	22,98%
1746	56,53%	-4,25%
1747	56,51%	-14,76%
1748	56,30%	-18,29%
1749	56,07%	-19,93%
1750	55,13%	-44,13%

time_cycle	n_rel	P_rel
1751	52,78%	-92,28%
1752	49,11%	-100,00%
1753	44,55%	-100,00%
1754	40,70%	-100,00%
1755	37,12%	-100,00%
1756	31,61%	-100,00%
1757	29,66%	-100,00%
1758	33,23%	-100,00%
1759	33,54%	-100,00%
1760	34,80%	-100,00%
1761	33,76%	-77,14%
1762	27,80%	-63,69%
1763	21,55%	-48,70%
1764	19,10%	-21,85%
1765	20,14%	1,90%
1766	22,86%	9,39%
1767	26,55%	8,82%
1768	30,10%	3,88%
1769	33,25%	-1,05%
1770	35,69%	-7,21%
1771	36,94%	-14,52%
1772	37,50%	-17,63%
1773	37,79%	-18,98%
1774	37,90%	-19,68%
1775	38,21%	-15,57%
1776	39,25%	-6,65%
1777	40,64%	-5,92%

time_cycle	n_rel	P_rel
1778	41,62%	-13,29%
1779	42,00%	-17,90%
1780	42,07%	-19,50%
1781	42,02%	-20,13%
1782	41,90%	-20,47%
1783	42,11%	-13,73%
1784	43,28%	0,74%
1785	44,77%	1,23%
1786	45,11%	-14,40%
1787	43,72%	-27,19%
1788	41,24%	-29,80%
1789	38,32%	-29,55%
1790	34,14%	-37,94%
1791	27,98%	-42,30%
1792	18,50%	-40,26%
1793	8,89%	-34,29%
1794	3,56%	-20,76%
1795	1,12%	7,95%
1796	0,62%	12,31%
1797	0,76%	5,47%
1798	0,00%	0,00%
1799	0,00%	0,00%
1800	0,00%	0,00%

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

[www.lanuv.nrw.de](http://www.lanuv.nrw.de)

