



Harald Mayrhofer, BSc

RDE Entwicklung – Beitrag am Motorprüfstand

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplomingenieur
Masterstudium Maschinenbau
eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer:

Ing. Johannes Kregar
AVL List GmbH

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Hausberger
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Dipl.-Ing. Dr.techn. Martin Rexeis
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Graz, August 2016

Vorwort

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen von Untersuchungen der Firma AVL List GmbH Graz im Bereich Instrumentation and Test Systems erstellt. Für die Möglichkeit die Arbeit durchzuführen möchte ich mich bei Herrn DI Arnold Berger MBA bedanken.

Für die Betreuung und intensive Unterstützung der gesamten Arbeit bedanke ich mich bei Herrn Ing. Johannes Kregar und Ing. Gerald Hochmann MSc.

Seitens der TU Graz bedanke ich mich bei Herrn Prof. Hausberger und Dr. Rexeis für die Möglichkeit die Diplomarbeit am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik auszuführen.

Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen die mich während der gesamten Studienzeit sowie während der Erstellung der Diplomarbeit unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

FORMELZEICHEN, INDIZES UND ABKÜRZUNGEN	VI
EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	VIII
ZUSAMMENFASSUNG	IX
ABSTRACT.....	X
1 EINLEITUNG	1
2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN	7
2.1 BEWERTETE EMISSIONEN	7
2.1.1 Partikelemissionen	8
2.1.2 Stickoxidemissionen	9
2.1.3 Kohlenwasserstoff Emissionen.....	9
2.1.4 Kohlenmonoxid Emissionen	10
2.1.5 Kohlendioxid Emissionen.....	10
2.2 GESETZLICHE RDE BESTIMMUNGEN.....	10
2.2.1 Übersicht der Einführungsdaten festgelegter Abgasgesetzgebungsbestimmungen.....	12
2.2.2 Übersicht RDE Gesetzgebung	14
2.2.3 Datenauswertung	20
2.3 RDE ENTWICKLUNGSMETHODEN.....	24
2.3.1 Use Cases.....	27
2.4 ENTWICKLUNGSUMGEBUNGEN.....	29
2.4.1 Straßenmessung.....	29
2.4.2 Rollenprüfstand.....	30
2.4.3 Antriebsstrangprüfstand.....	31
2.4.4 Hardware in the Loop	32
2.5 ENTWICKLUNGSAUFGABEN AM MOTORPRÜFSTAND.....	34
2.5.1 Analyse der Einflussparameter auf Emissionen	34
2.5.2 Motorprüfstandsgebung	40
2.5.3 Generisches Konzept zur Umsetzung von RDE- Prüfaufgaben am Motorprüfstand.....	46
3 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN	49
3.1 REALFAHRT MESSUNGEN	49
3.1.1 Messsignalauswertungen der Realfahrt	50
3.1.2 Ableiten der Experimente	54
3.1.3 Versuchsaufbau.....	55
3.1.4 Versuchsdurchführung	62
4 ERGEBNISSE	71
4.1 DREHMOMENTVERLAUF	71
4.2 WIEDERHOLBARKEIT.....	72
4.2.1 Wiederholbarkeit gasförmiger Schadstoffemissionen	73
4.2.2 Wiederholbarkeit Partikelanzahlemissionen.....	77
4.3 GASFÖRMIGE EMISSIONEN	78
4.3.1 Vergleich der gasförmigen Schadstoffemissionen zwischen dyn. und konst. Motormedien	79
4.3.2 Übersicht der gasförmigen Emissionsdifferenzen	81
4.4 PARTIKELANZAHL	84
4.4.1 Übersicht der Partikelanzahl Emissionsdifferenzen.....	84
5 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK	86
5.1 INTERPRETATION DER MESSERGEBNISSE.....	86
5.2 VERSUCHSSPEZIFIKA	88
5.3 FAZIT.....	89
5.4 AUSBLICK.....	90
LITERATUR.....	91
6 ANHANG	99

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

Lateinische Formelzeichen

a	m/s ²	Beschleunigung
c	m/s	Geschwindigkeit
d_e	m	Aerodynamischer Durchmesser
d	m	Durchmesser
f	s ⁻¹	Frequenz
l	m	Länge
m	kg oder mol	Masse
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
M	g/mol	molare Masse
M_d	N·m	Drehmoment
p	bar, Pa	Druck
p^0		Standarddruck / $p^0 = 1 \text{ atm} = 1,013 \text{ bar}$
P	(k)W	Leistung
R	J/(kg·K)	spezifische Gaskonstante
R	Ω	elektrischer Widerstand
t	°C	Celsius-Temperatur
T	K	thermodynamische Temperatur
V	m ³	Volumen

Griechische Formelzeichen

α	° ; rad	Winkel
λ	–	Luftverhältnis, Luftzahl
$\varphi = p_a/p_a'$	–	relative Feuchte
ω	s ⁻¹	Winkelgeschwindigkeit

Weitere Indices und Abkürzungen

ACS	Air Conditioning System
AGR	Abgas Rückführung
AVG	Average, Mittelwert
BSQ	Block Sequencer
CLD	Chemilumineszenz-Detektor
CAIR	Combustion Air (dt. Verbrennungsluft)
CoV	Coefficient of Variation, Streumaß
COP21	21st Conference of the Parties
CONFIG	Testkonfiguration
CPC	Condensation Particle Counter
CVS	Constant Volume Sampling
DoE	Design of Experiment
DOC	Diesel Oxidation Catalyst
Diff	Differenz
DIN	Deutsches Institut für Normung
DPF	Diesel Partikel Filter
ECE	Economic Commission for Europe (United Nations)
ECU	Engine Control Unit

EFM	Exhaust Mass Flowmeter
EGR	Exhaust Gas Recirculation
EiL	Engine in the Loop
EN	Europäische Norm
engl	englisch
EU	Europäische Union
EUDC	Extra Urban Driving Cycle
FEM	Front End Module
GDI	Gasoline Direct Injection
ges	gesamt
ggf	gegebenenfalls
GTR	Global Technical Regulation
HiL	Hardware in the Loop
ISC	In Service Conformity
k	Kilo (10 ³)
konst	konstant
MAW	Moving Average Window
max	maximal
MiL	Model in the Loop
min	minimal
NEDC	New European Driving Cycle
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NMHC	Non Methan Hydrocarbons
NMVOG	Non-methane volatile organic compound
NO	Stickstoffmonoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO _x	Stickoxide
NT	Regelart Leistungsbremse / Motor: Drezhal / Drehmoment
NAlpha	Regelart Leistungsbremse / Motor: Drezhal / Fahrpedalstellung
NTE	Not to Exceed
PB	Power Binning
PEMS	Portable Emission Measurement System
PN	Particle Number
PM	Particle Matter
PMD	Paramagnetische Detektor
RDE	Real Driving Emissions
rel	relativ
SCR	Selective Catalytic Reduction
SiL	Software in the Loop
SSQ	Step Sequencer
STD	Standardabweichung
TDI	Turbocharged Diesel Direct Injection
THC	Total Hydrocarbons
THG	Treibhausgas
TWI	Kühlwasser Einlass Temperatur
TWO	Kühlwasser Auslass Temperatur
UDC	Urban Driving Cycle
UV-RAS	UV- Resonanz Absorption Spektrometer
WLTC	World Harmonized Light-Duty Vehicles Test Cycle
WLTP	World Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure

In Anlehnung an DIN 1304-1, DIN 1345, DIN 13 345 und ISO 80 000-5

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Harald Mayrhofer

Graz, August 2016

Zusammenfassung

Die Zertifizierung der Emissionen von Pkw Neuzulassungen wird in der momentan geltenden EU Gesetzgebung anhand eines genormten Testzyklus (NEFZ) am Rollenprüfstand vollzogen. Die zukünftige Europäische Emissionsgesetzgebung sieht einen neuen Testzyklus (WLTC) am Prüfstand, sowie zusätzlich einen Emissionstest auf offener Straße vor. Diese Überprüfung erfolgt im realen Fahrzeugbetrieb durch Messung der sogenannten „Real Driving Emissions“ (RDE) mit Portabler Emissionsmesstechnik im Fahrzeug. Dies erfordert grundlegende Änderungen in der Entwicklung von Motoren bzw. von Antriebssystemen. Um Untersuchungen in bestehenden Testumgebungen (Fahrzeug-Rollenprüfstand, Antriebsstrangprüfstand, Motorprüfstand) durchführen zu können, müssen neue Methoden entwickelt werden.

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Identifikation verschiedener Einflussfaktoren auf Emissionen um den Unterschied zwischen Emissionstest auf offener Straße und am Motorprüfstand minimieren zu können.

Im theoretischen Teil der Arbeit wird die Gesetzgebung in der die RDE Bestimmungen, sowie die Randbedingungen für eine gültige Messfahrt festgelegt sind, exzerpiert. Speziell die limitierten Schadstoffemissionen in der EU 6 Gesetzgebung werden genauer betrachtet. Um Motoren bestmöglich auf Emissionsbewertungen im realen Straßenbetrieb zu entwickeln, stehen unterschiedliche Entwicklungsumgebungen zur Verfügung. Diese werden in der Arbeit beschrieben und diskutiert. Eine spezielle Rolle nimmt hierbei der Motorenprüfstand ein. Am Motorprüfstand können in sehr frühen Entwicklungsstadien eingesetzte Technologien getestet und Emissionen unter verschiedenen Lastbedingungen analysiert werden, um möglichst ähnliche Bedingungen wie im Fahrzeugbetrieb herzustellen. Einflussparameter, die Auswirkungen auf Emissionen zeigen, wurden diskutiert.

Im experimentellen Teil der Arbeit wurden gemessene Motormedienparameter (Kühlwasser, Öl, Ansaugluft) sowie die Motorlast (Drehzahl, Drehmoment) während einer Realfahrt am Motorprüfstand nachgestellt. Um Einflussgrößen auf die Gas- und Partikelemissionen untersuchen zu können, wurden Medienparameter (Druck, Temperatur) abwechselnd dynamisch bzw. auf konstante Parameterwerte geregelt. Die dabei ausgestoßenen Schadstoffe wurden verglichen und die ermittelten Differenzen in Bezug auf die geltenden Schadstoffgrenzwerte betrachtet.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Dynamik der beobachteten Medien keinen Einfluss auf die Messung der CO₂, CO und HC Emissionen hatte. Bei Stickoxiden hingegen konnten streckenbezogene Massenabweichungen gemessen werden, deren Größenordnung ca. 1/4 des gesetzlichen Grenzwerts entsprechen. Die Versuche wurden an einem Dieselmotor mit EU5 Emissionsstandart durchgeführt, der einen vergleichsweise hohen NO_x Anteil in den Rohemissionen aufweist. Werden die Abweichungen als prozentueller Anteil der gesamten NO_x betrachtet, beträgt dies weniger als 3,5%.

In einem nächsten Schritt sollten die durchgeführten Untersuchungen auch bei Motoren mit geringeren Rohemissionen durchgeführt werden, um festzustellen, ob hier vergleichbare Beobachtungen gemacht werden können. Außerdem gilt es auch, Untersuchungen mit unterschiedlichen Brennverfahren bzw. Kraftstoffen zu unternehmen um die Dynamik der untersuchten Motormedien allgemein besser abschätzen zu können.

Abstract

Nowadays emission type approval for new vehicles on the European market is executed by a certain test cycle called New European Testcycle (NEDC). The future emission legislation will take a focus on vehicle emissions in real road operation called Real Driving Emissions (RDE) in addition to a new Test procedure on the Chassis Dynamometer called Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure (WLTP). Real driving Emissions will be observed with Portable Measurement Systems (PEMS) within the Vehicle. This means fundamental changes in Engine- and Powertrain development. In order to do RDE investigations within existing development environments (Chassis Dynamometer, Powertrain Testbed and Engine Test Bench) new development methods have to be applied.

The aim of this work was to identify different emission - influencing factors as well as a method to reproduce these parameters on the engine testbed in order to define impact magnitudes on the limited pollutants.

In the theoretical part of this thesis an excerpt of the given RDE Legislation including the defined boundary conditions for a valid RDE trip are given. The limited pollutants within the EU6 Legislation are discussed in detail. To develop engines for the real road emission evaluation different methods in different development environments are available. Different environments are described and their relations to RDE are discussed. In this context the engine testbed plays a specific role. In early stages of development, applied engine technologies can be tested- and emissions can be analyzed fully repeatable under specific load conditions. Therefore it is important to set realistic boundary conditions as given in the real world. Parameters influencing Emissions are analyzed.

In the practical part of this thesis engine load (speed, torque), cooling water- and oil temperature as well as atmospheric pressure were observed under real driving conditions. The observed behavior was reproduced on the engine testbed and the raw gas emissions were measured. Subsequent to the dynamic engine media also constant engine media parameter were set up. The deviation of the emissions in both case were compared and discussed in order to figure out the impact on limited emissions caused by the engine media dynamic.

Within the results, no impact on CO₂, CO and HC Emissions was observed. Conversely distance based nitrogen oxide (NO_x) mass emissions were measured in a magnitude which is approximately 1/4 of the given emission legislation limit. These measurements were conducted on a Diesel engine with a EU5 emission standard, which has a high amount of NO_x raw emissions compared to future EU6 Engines. If the observed deviation is considered to the total NO_x emissions the difference is smaller than 3.5%.

In a next step the performed examinations shall be done on engines with lower raw gas emissions, to figure out if comparable observation can be done there also. Furthermore to gain a better understanding of observed engine media impact on emissions, investigations shall be done as well on different fuels and combustion processes.

1 Einleitung

Der Verkehrssektor, ist am gegenwärtigen Gesamtausstoß der Treibhausgase für ca. 20% verantwortlich und spielt daher eine wesentliche Rolle [1] [2]. Die Hauptemittenten und dessen Anteile am Gesamtausstoß der Treibhausgase in Europa sind in Abbildung 1-1 dargestellt. Die rote Referenzlinie zeigt die aktuelle- und prognostizierte Reduktion gegenüber dem Ausstoß von 1990 mit den derzeit getroffenen Maßnahmen. Um die erklärten Klimaziele zu erreichen müssen zusätzliche Technologien eingesetzt werden. Wie sich die Treibhausgas-Emissionen unter zusätzlichen Maßnahmen entwickeln könnten, zeigt ebenfalls das Diagramm Abbildung 1-1. Es ist erkennbar, dass eine Reduktion der Treibhausgase um 80% gegenüber dem Ausstoß von 1990 möglich wäre. [3]

Die Kommission der Europäischen Union hat innerhalb der Strategie „Europa 2020“ Leitinitiativen für einen Ressourcen schonenden Umgang festgelegt. Ein Leitziel ist der achtsame Umgang mit Energiereserven und Klimarelevanten Gasen. Im Februar 2011 hat die Europäische Union das Ziel bestätigt, bis 2050 die Emission der Treibhausgase (Abk. THG) um 80% bis 95% im Vergleich zu 1990 zu verringern. Dadurch soll die Klimawandel bedingte Erwärmung der Erdatmosphäre auf +2°C gegenüber dem vorindustriellen Durchschnittswert beschränkt werden [4]. Dies ist ebenfalls eines der angestrebten Ziele des weltweiten Klimaschutzabkommen COP21 welches im Dez. 2015 in Paris, auch von der Europäischen Union unterzeichnet wurde [5]. Der Temperaturanstieg wird mit einer Wahrscheinlichkeit > 90% von anthropogenen Treibhausgasen beeinflusst. Ein stark Temperatur steigernder Effekt der anthropogenen Treibhausgase ist Kohlendioxid (CO₂) zuzuordnen [6] [7] [8].

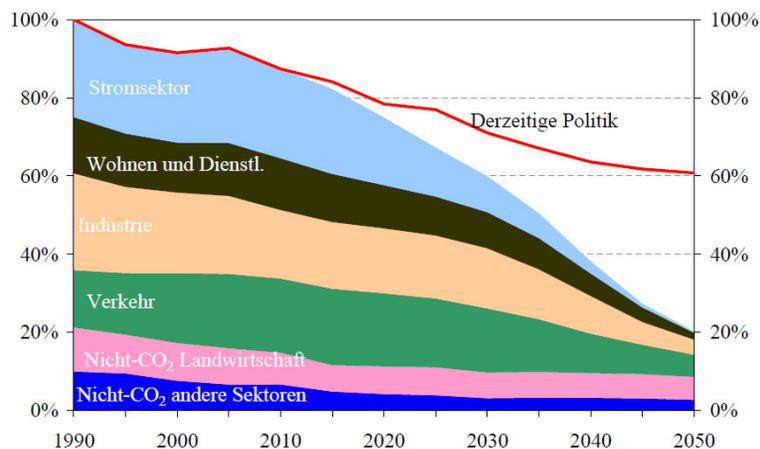


Abbildung 1-1: Aufteilung der Treibhausgas Emittenten [3]

Neben den Treibhausgasen wie beispielsweise Kohlendioxid und Methan werden von Fahrzeugen mit Verbrennungskraftmaschinen auch eine Reihe anderwärtiger Schadstoffe ausgestoßen. Abbildung 1-2 zeigt fünf Gruppen mit den größten Anteilen dieser Emissionen. Im Detail sind diese Gruppen Kohlendioxid, Partikel (Feinstaub), Stickoxide (NO_x), flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (engl. Non-Methane volatile organic compound Abk. NMVOC) und Schwefeldioxid (SO₂). In der Darstellung wird die Entwicklung der einzelnen Komponenten ausgehend von der Basis 1995 bis 2013 dargestellt. 100% Prozent entsprechen hierbei dem durchschnittlichen Ausstoß der jeweiligen Komponenten im Jahr 1995. Es ist daraus ersichtlich das speziell Schwefeloxid Emissionen durch Verbesserungen der Kraftstoffqualität in Europa um mehr als 92% gesenkt werden konnten [7]. Trotz signifikanter

Reduktionen einzelner Schadstoffkomponenten gibt es speziell in Ballungszentren mit starkem Verkehrsaufkommen nach wie vor Probleme mit Stickstoffdioxid (NO₂) und Partikel (PM10) Belastungen. [8]

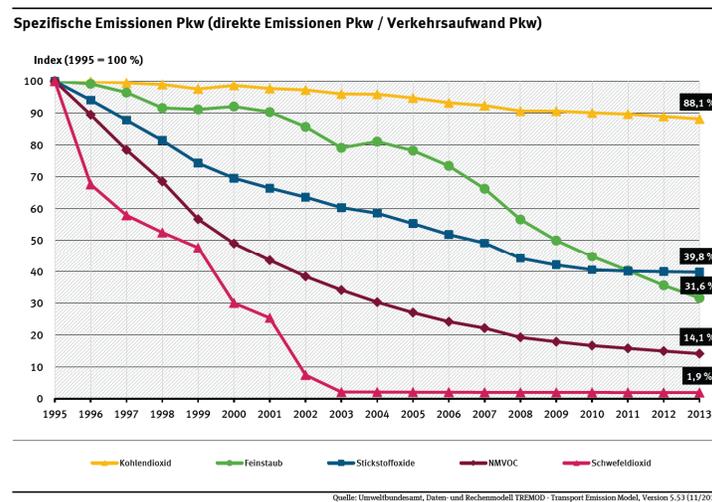


Abbildung 1-2: Entwicklung der Schadstoffkomponenten [7]

Die Abgasemissionen von Personenkraftwagen werden im Zuge der Europäischen Typzulassung (EG Betriebserlaubnis) aktuell auf Grundlage der Richtlinie ECE-R83 überprüft [9] [10]. Die Beurteilung der emittierten Stoffe wird anhand sechs verschiedener Prüfungen vorgenommen. Jede Prüfung zieht Emissionen einer speziellen Herkunft unter Betracht. In der Type I Prüfung wird die Menge der emittierten Stoffe am Abgas-Endrohr unter definierten Betriebszuständen gemessen. Typ II betrachtet Schadstoffe unter Leerlaufbedingungen. Kurbelgehäuse- und Ausdampfungs-evaporative Emissionen werden in Typ III und IV bestimmt. Die Überprüfung der Dauerhaltbarkeit der Abgasnachbehandlungssysteme sowie der der Emissionen bei Niedertemperatur erfolgt im Typ V und VI [11]. Die absolut betrachtet größte Menge an Schadstoffen entsteht im Fahrbetrieb durch die interne Verbrennung, die nach der Abgasnachbehandlung am Endrohr in die Atmosphäre emittiert werden. Aus diesem Grund wird der Type I Prüfung eine große Bedeutung zugewiesen [12].

Die Typ I Prüfung wird auf einem Rollenprüfstand durchgeführt. Das Fahrzeug steht dabei mit seinen Antriebsachsen auf Rollen die durch eine E-Maschine gebremst wird. Der Anspruch eines Rollenprüfstandes ist, möglichst realitätsnahe Fahrzustände einer Geradeausfahrt zu erzeugen. Die fahrzeugspezifischen Fahrwiderstände werden in einem Auslaufversuch ermittelt und der Rollensteuerung übergeben [13]. Dadurch kann das Versuchsfahrzeug am Prüfstand möglichst vergleichbar wie auf ebener Straße betrieben werden, ohne sich lokal zu bewegen. Einerseits können Messpunkte am Fahrzeug mit entsprechenden Messgeräten verbunden werden, andererseits können dadurch Randbedingungen wie Temperatur, Druck, Luftfeuchtegrad etc. in der Prüfstandszelle möglichst konstant und somit reproduzierbar gehalten werden. Dies ist insbesondere in der Fahrzeugentwicklung und Steuergerätebedatung (Applikation) ein wesentlicher Faktor. Durch möglichst wiederholbare und reproduzierbare Messergebnisse können Auswirkungen durch Veränderungen in der Hard- u.o. Software ermittelt werden. [14]

Auch bei der Typzulassung (Homologierung) sind vergleichbare Messergebnisse von großer Bedeutung [15]. Zu diesem Zweck sind in der ECE Richtlinie Vorschriften bezüglich der Fahrzeug Temperatur- und Luftfeuchtigkeitskonditionierung vor und während dem Test festgelegt. Um einen Vergleich der Emissionen und deren Grenzwerte zu ermöglichen, muss

das Fahrzeug entsprechend einem genormten Fahrprofil betrieben werden. Das Fahrprofil ist ein Geschwindigkeitsverlauf über der Zeit in Sekunden. Der genormte Geschwindigkeitsverlauf wird aktuell in der Europäischen Gesetzgebung als Neuer Europäischer Fahrzyklus (Abk. NEFZ) beziehungsweise engl. New European Driving Cycle (Abk. NEDC) bezeichnet [16]. Der NEFZ soll den durchschnittlichen Betrieb im Innenstadtbereich von Großstädten sowie die Fahrt auf Landstraßen und Autobahnen repräsentieren [17]. Der NEFZ Geschwindigkeitsverlauf ist in Abbildung 1-3 über der Zeit dargestellt. Der Testzyklus setzt sich aus dem Stadtteil (engl. Urban Drive Cycle Abk. UDC) und der Überlandsequenz zusammen (engl. Extra Urban Drive Cycle Abk. EUDC) zusammen und nimmt in Summe 20 Minuten in Anspruch [18].

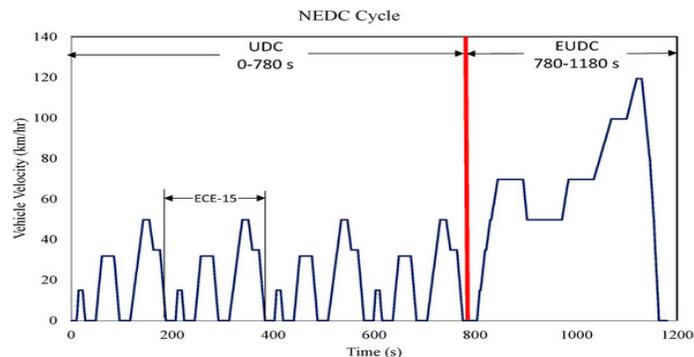


Abbildung 1-3: Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ) [18]

Die Bewertung der Emissionen am Abgas-Endrohr die während dem NEFZ Betrieb am Fahrzeug ausgestoßen werden, erfolgt in der Typ I Prüfung. Gemessen wird die ausgestoßene Menge der gesetzlich limitierten Schadstoffe während des gesamten Prüflaufs anhand der Vollstromverdünnungs-, engl. Constant Volume Sampling (Abk. CVS) Methode. Die CVS Methode ermöglicht mit verhältnismäßig einfachen Mitteln die Menge der Schadstoffe zu bestimmen [19]. Die Emissionen werden vom Fahrzeug in einen Tunnel, der als Mischstrecke dient, geleitet und mit Umgebungsluft verdünnt. Aus dem verdünnten Emissionsgas wird ein kontinuierlicher Volumenstrom entnommen und in einem beheizten Messgasbeutel zugeführt und gespeichert. Parallel wird ein Beutel mit reiner Verdünnungsluft befüllt um die Hintergrund Verunreinigung der Verdünnungsluft zu bestimmen. Die Schadstoffkonzentration im Emissions-Beutel abzüglich der gemessenen Schadstoffkonzentration der Verdünnungsluft entspricht der emittierten Fahrzeug Schadstoffkonzentration [20]. Die Konzentrationen (ppm oder Vol%) können mittels dem Abgasmassenstrom in Schadstoffmassen umgerechnet werden. Wobei sich der Abgasmassenstrom wiederum auf Basis des angewandten CVS-Prinzips einfach ermitteln lässt. Mit der gefahrenen Wegstrecke am Rollenprüfstand, bei Typ I Prüfung mit der Weglänge im NEFZ, kann die streckenbezogene Masse Schadstoff in mg/km mit dem im Gesetz festgelegten Höchstwerten, ebenfalls in der Einheit mg/km verglichen werden [21].

Die vom Europäischen Gesetzgeber vorgegebenen Schadstoffgrenzwerte wurden im Lauf der Jahre stetig gesenkt. Beispielsweise wurden ab Juli 1992, mit Einführung der Abgasnorm Euro 1, für Diesel Pkws Kohlenmonoxid Emissionen von 2,72g/km erlaubt. Mit der Norm Euro 5, gültig seit September 2009 auf 0,5g/km reduziert [22]. Seit 2012 sind spezifische CO₂ Emissionen im durchschnittlichen Flottenverbrauch auf 130g/km limitiert. Das bedeutet dass Fahrzeughersteller nicht den Ausstoß einzelner Fahrzeuge, sondern den durchschnittlichen CO₂ Ausstoß der insgesamt hergestellten Fahrzeugflotte zur Bewertung herangezogen werden müssen. Weitere Verringerungen auf 95g/km bis 2021 sind vorgesehen [23]. Analog sind die NO_x Emissionen von Diesel Pkws von Euro 3 (ab 01.2000) 500mg/km über Euro 4 (ab 01.2005) 250mg/km und Euro 5 (ab 09.2009) 180mg/km bis hin zu Euro 6 (ab 09.2014) auf 80mg/km

limitiert worden [24]. Die Entwicklung der Stickoxid- und Partikel- Grenzwerte beginnend bei Euro 3 sind in Abbildung 1-4 dargestellt.

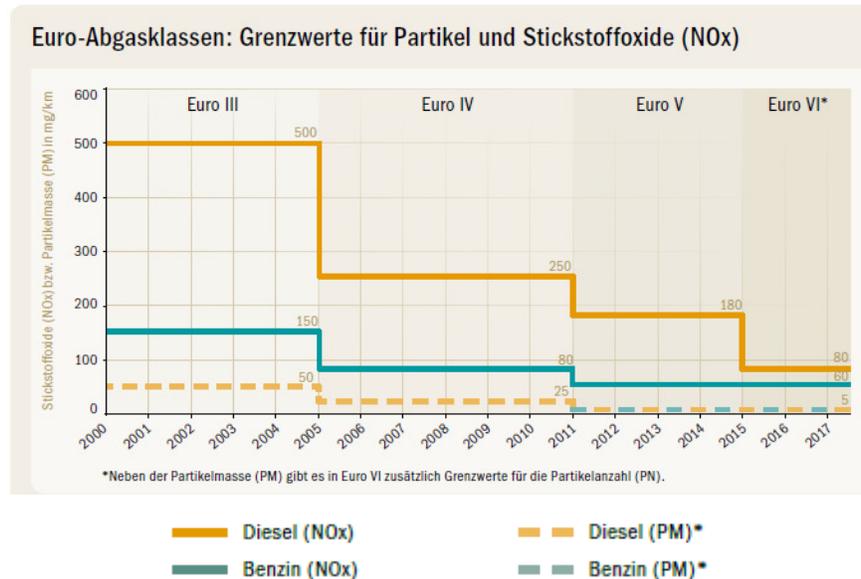


Abbildung 1-4: Entwicklung der Grenzwerte Euro 3 – Euro 6 [25]

Die Einführung immer strengerer Schadstoffgrenzwerte führte bei Otto Motoren zum flächendeckenden Einsatz von 3-Wege Katalysatoren. Um die Grenzwerte für Motoren mit Kompressionszündung (engl. CI – Compression Ignition) zu erreichen haben sich bei Dieselmotoren Oxidationskatalysatoren in Verbindung mit Partikelfilter etabliert. Durch die Abgasnachbehandlungssysteme konnten Kohlenwasserstoffe- (HC), Kohlenmonoxide- (CO) und Partikelemissionen im genormten Fahrzyklus erheblich reduziert werden. Die Grenzwerte der Stickoxide (NO_x) konnten bis Euro 5 durch optimierte Brennverfahren erreicht werden. Mit Einführung der EU6 Schadstofflimits erfolgte bei Dieselmotoren ergänzend eine verbreitete Anwendung von Stickoxid Nachbehandlungssystemen wie Selective Catalytic Reaction (Abk. SCR) Systemen oder NO_x Speicherkatalysatoren [26].

Trotz signifikanter Reduktion der spezifischen Grenzwerte in der Typzulassung konnten Luftgütwerte nicht im selben Ausmaß gesenkt werden [17] [18] [28]. Die Änderungen der Abgasnormen von Euro 1 bis Euro 5 betrafen im Wesentlichen Senkungen der Schadstoffgrenzwerte wobei die Prüfmethode sowie der Prüfzyklus unverändert blieben. Untersuchungen der Dachorganisation Transport and Environment (TE) und der gemeinnützige Organisation International Council on Clean Transportation (ICCT) haben die Diskrepanz zwischen staatlichen Zulassung- bzw. Überprüfungszyklen und den Real Emissionen gezeigt [29]–[31]. Die Gründe für messbare Unterschiede sind vielschichtig. Einige davon wären:

- Ein Hauptgrund ist der streng reproduzierbare Labortest, der aus Gründen der Vergleichbarkeit, konstante Temperatur und Luftfeuchtigkeit, sowie auch keine Straßensteigungen vorschreibt, die aber in Realität Schwankungen unterworfen sind [32].
- Die überprüfte Motorlast im NEFZ Zyklus ist im Vergleich zu den realen Lastanforderungen im Straßenverkehr beschränkt [26].
- Die Bestimmung der Fahrwiderstandswerte (Fahrwiderstandspolynom) aus dem genormten Auslauftest, spiegelt nicht zur Gänze die realen Fahrwiderstände wider [33].

- Unter dem Gesichtspunkt der Vergleichbarkeit wurde laut Vorschrift für die Europäische Typzulassung die Abschaltung zusätzlicher Nebenaggregate und Verbraucher wie z.B. Klimaanlage und Sitzheizungen, Radio etc. festgelegt [34].
- Automobilhersteller haben außerdem Strategien entwickelt Überprüfungszyklen zu erkennen und mittels hinterlegter Routinen in der Motorsteuerung bestmögliche Emissionswerte innerhalb der Typprüfung zu erlangen [13].
- Lt. der Verordnung (EG) Nr. 715/2007 Kap. II Artikel 5 Absatz 2a ist es erlaubt die Wirksamkeit von Emissionskontrollsystemen zu verringern um Beschädigungen am Motor oder Unfälle zu verhindern. [35]

Im Jahr 2000 wurde das Europäische Forschungsprojekt ARTEMIS (Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems) eingerichtet. Ziel des Projekts war die Erstellung eines Fahrzyklus der eine reale Fahrzeugnutzung repräsentiert. Basis der Untersuchungen waren statistische Analysen von üblichen Fahrmustern im Europäischen Raum. Ein Ergebnis der Untersuchungen war der Common Artemis Driving Cycle (CADC) mit einer Stadt-, Land- und Autobahnbetriebssequenz. Der CADC deckt einen höheren Lastbereich ab, besitzt mehr Dynamik als der zur Typprüfung vorgeschriebene NEFZ [36].

In Abbildung 1-5 ist der Stickoxid Ausstoß während des realitätsnahen CADC Zyklus mit Diesel Fahrzeugen unterschiedlicher Emissionsklassen dargestellt. Im direkten Vergleich sind die dazugehörigen vorgeschriebenen Grenzwerte eingezeichnet. Wie beschrieben wurden die Schadstoffgrenzwerte kontinuierlich reduziert, wobei der Ausstoß im CADC Betrieb ungleich verringert wurde [37]. Die limitierten NO_x entsprechen der Summe von Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO_2) [38]. Auffällig im Diagramm ist, dass mit Einführung von Euro 3 und dessen notwendiger Einsatz von Abgasnachbehandlungssystem wie Dieselpartikelfilter (DPF) und Oxidationskatalysatoren der NO_2 Anteil erheblich zugenommen hat [39].

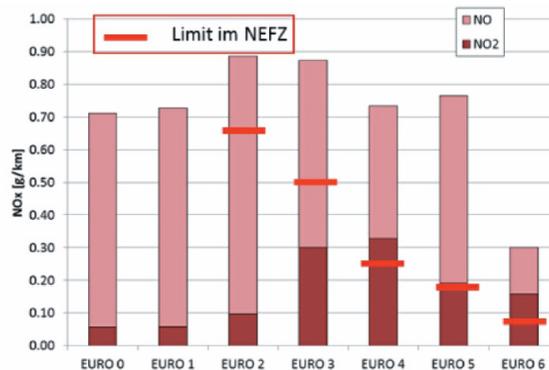


Abbildung 1-5: Vergleich Dieselmotor Stickoxid Emissionen im NEFZ und CADC [37]

Neben den Stickoxiden von Dieselmotoren sind Partikelemissionen von direkteinspritzenden Ottomotoren (engl. Gasoline Direct Injection, Abk. GDI) Treiber für eine Erweiterung der Prüfverfahren [37]. Partikel sind aufgrund ihrer sehr kleinen aerodynamischen Durchmesser lungengängig und verschiedenste angelagerte Stoffe stellen ein hohes Gesundheitsrisiko dar [39].

Um die erhebliche Differenz zwischen dem gesetzlich limitierten Ausstoß im Fahrzyklus und den Emissionen im realen Straßenbetrieb zu minimieren, wurde im Jänner 2011 von der Europäischen Union eine Arbeitsgruppe eingesetzt. Diese Arbeitsgruppe „Real-Driving

Emissions – Light-Duty Vehicle“ erarbeitete bis 2012 Möglichkeiten Emissionen mit dem Anspruch auf realitätsnahe Abgaswerte zu eruieren. Zwei grundlegende Methoden wurden erarbeitet. Während eine Methode auf Rollenprüfstandtests mit einer zufälligen Auswahl an Prüfzyklen unter Laborbedingungen aufbaut, wurde eine zweite Methode entwickelt die Abgasmessungen im realen Fahrbetrieb mit Portablen Emissions Messtechnik (engl. Portable Emission Measurement System – Abk. PEMS) vorsieht. Beide Methoden wurden untersucht und für technisch umsetzbar befunden. Die Methode mit Zufallszyklen unter Laborbedingungen kann eine große Bandbreite an Fahrbedingungen garantieren. Die zweite Methode erschwert das Erkennen eines Prüfstandtests und damit den Zugriff auf speziell hinterlegte Strategien zur Einhaltung der Emissionsgrenzen während des Prüfzyklus [28]. Es wurde der Prüfung mittels Portabler Emissionsmesstechnik der Vorzug gegeben, da diese Methode besser geeignet schien die unterschiedlichen Fahr- und Umweltbedingungen abzudecken. Als die Methode ausgereift war, wurde der Vorschlag der Europäischen Kommission dem zuständigen Regelungsausschuss (TCMV) vorgelegt welcher dann im Mai 2015 beschlossen wurde [40]. Das neue Prüfverfahren wurde im Mai 2015 vom Technischen Ausschuss „Kraftfahrzeuge“, in dem alle Mitgliedsstaaten vertreten sind, befürwortet und gilt seit Jänner 2016 [41].

Die Prüfung der „Real Driving Emissions“, Abk. RDE ergänzt das bestehende Verfahren eines Rollenprüfstandtests im Labor. Mittels der gewählten Methode soll überprüft werden, ob gemessene Stickoxide und Partikelanzahl den Grenzwert sowohl im Labor als auch im realen Straßenbetrieb nicht überschreiten. Die beobachteten Diskrepanzen zwischen Labor und Straßentest sollen so minimiert werden. Zudem kann auch die Manipulation durch Abschaltvorrichtungen frühzeitig erkannt werden [40]. Die Randbedingungen für eine gültige Bewertung legen Grenzwerte der Umgebungstemperatur, Fahrbahnsteigungen und Höhenfahrten fest. Zudem werden getrennte Beurteilungen einzelner Streckenabschnitte durch die Unterteilung von Stadt-, Land und Autobahnanteil eingeführt [42].

Die neue Prüfmethode erfordert einen grundlegend neuen Zugang in der Antriebstrangentwicklung zukünftiger Pkws. Dadurch werden auch der Straßenmessung vorgelagerte Entwicklungsumgebungen wie beispielsweise Motorprüfstand, Antriebsstrangprüfstand und Rollenprüfstand eine große Bedeutung zugewiesen [43].

Eine Aufgabestellung der vorliegenden Arbeit ist einen Überblick über die festgeschriebenen Bestimmungen der Emissionsgesetzgebung zu geben. Dazu werden in Kapitel 2 die gesetzlichen Grundlagen der neuen Prüfmethode, sowie der dazugehörigen Auswertemethoden, exzerpiert und ein Überblick über der verschiedenen Entwicklungsumgebungen und deren Bezug auf RDE-Untersuchungen beschrieben. Ein besonderer Schwerpunkt hierbei ist dem Motorprüfstand gewidmet. Es werden emissionsrelevante Einflussfaktoren am Motorprüfstand identifiziert. Eine zentrale Frage ist dabei, welchen Einfluss Motormedien in Bezug auf Emissionen im realen Fahrbetrieb haben. Im empirischen Teil (Kapitel 3) der Arbeit wird dazu der Einfluss verschiedener Motormedienparameter auf limitierte Schadstoffe untersucht und die Ergebnisse diskutiert.

In der gesamten Arbeit werden Fahrzeuge mit konventionellen Antrieben durch Verbrennungskraftmaschinen beschrieben. Alternative Antriebskonzepte, wie auch Elektrische oder Hybridantriebe, werden in allen Betrachtungen dieser Arbeit ausgeklammert.

2 Theoretische Grundlagen

Im Kapitel Theoretische Grundlagen werden die in der Europäischen Gesetzgebung limitierten Schadstoffe und deren Entstehungsmechanismen beschrieben. Eine Übersicht der gesetzlichen Bestimmungen einer RDE Prüfung und dessen Bewertungsmethoden wird in 2.1 gegeben. Üblicherweise gehen der RDE Prüfung am Fahrzeug mit Portabler Emissionsmesstechnik im Zuge der Entwicklung eines Pkws eine Reihe an Applikationsarbeiten voraus. Die Applikationsarbeiten betreffen den gesamten Antriebsstrang, und werden in verschiedenen Entwicklungsumgebungen ausgeführt. Ein allgemeiner Zugang möglicher RDE Entwicklungsmethoden wird in Kapitel 2.2 vorgestellt. Darüber hinaus werden die betreffenden Entwicklungsumgebungen in den Punkten 2.4.1 bis 2.4.4 aufgelistet und deren Zusammenhang mit RDE Applikationsarbeiten beschrieben.

2.1 Bewertete Emissionen

In der Abgasgesetzgebung werden einzelne Komponenten der innermotorischen Verbrennung limitiert. Dies betrifft Komponenten der unvollständigen Verbrennung wie HC, CO, und Partikel aber auch CO₂ und NO_x die auch bei vollständiger Verbrennung als Reaktionsprodukt entstehen. Abbildung 2-1 zeigt tabellarisch die Grenzwerte nach Euro 6 für Personenkraftwagen für jede Komponente (ohne CO₂) abhängig der Fahrzeugklasse. Wie in Verordnung (EC) 715/2007 Anhang I Tabelle 2 festgelegt wurde. Dabei entspricht Fahrzeugkategorie M Kraftwägen mit min. vier Rädern zur Personenbeförderung (Personenkraftwagen Abk. Pkw). Fahrzeugkategorie N1 betrifft leichte Nutzfahrzeuge (NFZ.) bis 3500kg höchst zulässiges Gesamtgewicht. Vollständigkeitshalber ist zu erwähnen dass Kategorie N2 NFZ. mit höchst zulässigem Gesamtgewicht zwischen 3500kg – 12000kg beinhaltet. N2 unterliegt jedoch nicht den hier beschriebene RDE Gesetzgebung. Für schwere Nutzfahrzeug ist abweichend eine eigene Gesetzgebung festgeschrieben. [35]

Grenzwert L1 limitiert die spezifische Kohlenmonoxid Masse pro Kilometer [mg/km]. L2 begrenzt die spezifische Masse aller ausgestoßenen Kohlenwasserstoffverbindungen (Abk. THC = Total Hydrocarbons). Der Grenzwert L3 NMHC, entspricht dem Grenzwert L2 abzüglich der Methanemission (Abk. NMHC = Non Methan Hydrocarbons). L4 definiert die spezifische ausgestoßene Stickoxid (NO_x) Masse pro Kilometer. Die Summe aus L2 und L4 ist zusätzlich begrenzt. Die Partikelmasse mit Direkt Einspritzung (engl. Direct Injection) ist durch Grenzwert L5 Limitiert. Parallel zur Partikelmasse ist auch die Partikelanzahl durch Grenzwert L6 begrenzt. Die Partikelanzahl ist ebenfalls wie alle limitierten Abgaskomponenten spezifisch auf einen Kilometer Fahrtstrecke bezogen. [35]

EURO 6		Reference mass (RM) (kg)	Limit values													
			CO		THC		NMHC		NO _x		THC + NO _x		PM ¹		(PN)	
			L1 (mg/km)		L2 (mg/km)		L3 (mg/km)		L4 (mg/km)		L2 + L4 (mg/km)		L5 (mg/km)		L6 (#/km)	
Category	Class		PI	CI	PI	CI	PI	CI	PI	CI	PI	CI	PI ²	CI	PI ^{2,3}	CI
M	—	All	1000	500	100	—	68	—	60	80	—	170	5.0/4.5	5.0/4.5	6.0 x 10 ¹¹	6.0 x 10 ¹¹
N1	I	RM ≤ 1305	1000	500	100	—	68	—	60	80	—	170	5.0/4.5	5.0/4.5	6.0 x 10 ¹¹	6.0 x 10 ¹¹
	II	1305 < RM ≤ 1760	1810	630	130	—	90	—	75	105	—	195	5.0/4.5	5.0/4.5	6.0 x 10 ¹¹	6.0 x 10 ¹¹
	III	1760 < RM	2270	740	160	—	108	—	82	125	—	215	5.0/4.5	5.0/4.5	6.0 x 10 ¹¹	6.0 x 10 ¹¹
N2	—	All	2270	740	160	—	108	—	82	125	—	215	5.0/4.5	5.0/4.5	6.0 x 10 ¹¹	6.0 x 10 ¹¹

Key: PI = Positive Ignition, CI = Compression Ignition

(¹) A limit of 3.0 mg/km for the mass of particulate emissions applies to vehicles type approved to the emission limits of this table with the previous particulate mass measurement protocol, before 1.9.2011.

(²) Positive ignition particulate mass and number limits shall apply only to vehicles with direct injection engines.

(³) Until three years after the dates specified in Article 10(4) and (5) for new type approvals and new vehicles respectively, a particle number emission limit of 6.0×10^{12} #/km shall apply to Euro 6 PI direct injection vehicles upon the choice of the manufacturer. Until those dates at the latest a type approval test method ensuring the effective limitation of the number of particles emitted by vehicles under real driving conditions shall be implemented.

Abbildung 2-1: Übersicht der Emissionsgrenzwerte EURO 6 [35]

Die Aufteilung PI und CI unterscheidet den Grenzwert für Motoren mit Fremdzündung (PI) wie beispielsweise Ottomotoren und Selbstzündung (CI) wie Dieselmotoren [35].

2.1.1 Partikelemissionen

Als Partikel werden alle festen- und flüssigen Bestandteile in Abgasen verstanden. Partikel (engl. Particulate Matter, Abk. PM) als Emission von Verbrennungskraftmaschinen sind hauptsächlich Kohlenstoff (Ruß) mit angelagerten Substanzen [44]. Nach der EU-Richtlinie 88/77EWG gelten alle Stoffe, die bei einer Maximaltemperatur von 52°C (325°K), durch Umgebungsluft verdünntes Abgas, mit einem Glasfaserfilter bestimmter Dimension abgeschieden werden können, als Partikel [34].

Partikel werden nach ihrer Entstehung und deren Größe unterschieden. Die innermotorische Entstehung von Partikeln bei unvollständiger Verbrennung basiert primär auf Nukleation (Keimbildung) von reinem Kohlenstoff. Derartige Primärpartikel verändern sich durch Aggregation bzw. Agglomeration (= Zusammenschluss) und Oxidation zu unterschiedlichen Größen. An den Kohlenstoffkernen sammeln sich hauptsächlich Kondensate, organischer Substanzen, Metalle sowie teiloxydierte Kohlenwasserstoffe. Die Größe der unterschiedlichen Partikelformen und verschiedener Dichten wird durch den aerodynamischen Durchmesser beschrieben [44]. Der aerodynamische Durchmesser (d_{ae}) entspricht dem Durchmesser einer Kugel mit einer Dichte von 1g/cm^3 die in ruhender oder laminar strömender Luft die gleiche Sinkgeschwindigkeit aufweist wie das beschriebene Partikel [46]. Die Unterteilung der Größe wird nach dem Entstehungsprozess unterschieden. Im Nukleationsmodus werden Partikelkeime mit einer Größenverteilung von wenigen Nanometern durch Kondensation in der Gasphase beschrieben. Im Akkumulationsbereich sind Partikel durch Oberflächenwachstum und Zusammenschluss angewachsene Partikel mit einer Größe von $50\text{nm} < d_{ae} < 2,5\mu\text{m}$ zusammengefasst. Für grobe Partikel wird ein Grenzwert von $d_{ae} < 10\mu\text{m}$ (PM₁₀) festgelegt [44]. Als PM₁₀ wird Staubfraktion bezeichnet dessen 50% Anteil einen Durchmesser von $10\mu\text{m}$ und der größere verbleibende Anteil kleiner als $10\mu\text{m}$ Durchmesser aufweist [47]. Die gesundheitliche Relevanz von Partikel ist stark unterschiedlich. Abhängig von angelagerten Stoffen können Partikel gleicher Größe unterschiedliche Auswirkungen auf den Menschlichen Organismus haben [39].

2.1.2 Stickoxidemissionen

Unter Stickoxidemissionen (Abk. NO_x) wird die Summe aus Stickstoffmonoxid (Abk. NO) und Stickstoffdioxid (Abk. NO_2) zusammengefasst [48]. NO ist ein farb- und geruchsloses Atemgift und Reizgas das in der Atmosphäre unter Sonnenlicht zu Stickstoffdioxid (NO_2) oxidiert. NO_2 ist ein stark toxisches Reizgas, das zudem eine Vorläufersubstanz von Ozon ist [49].

Bei der innermotorischen Verbrennung von fossilen Brennstoffen entsteht hauptsächlich NO. Allerdings wird bereits bei katalytisch beschichteten Abgasnachbehandlungssystemen ein großer Anteil der NO Emissionen zu NO_2 oxidiert. Dies betrifft speziell Dieselaugasnachbehandlungssysteme wie Oxidationskatalysatoren und Partikelfilter. Zur Regeneration von Partikelfilter ist ein ausreichend hoher Anteil NO_2 notwendig, allerdings sind NO_x Rohemissionen unerwünscht da diese schädlicher als NO sind und auch im Immissionsgesetz Luft limitiert sind. In der europäischen Emissionsgesetzgebung für Kraftfahrzeuge (Euro 6) ist aber gegenwärtig nur die Summe aus NO + NO_2 in Form von NO_x Emissionen limitiert [39].

Die Entstehung von Stickoxid bei innermotorischen Verbrennungen erfolgt im Wesentlichen aus drei unterschiedlichen Mechanismen. Bei der Innermotorischen Verbrennung von Diesel bzw. Benzin trägt den größten Anteil (90-95%) der Prozess der thermischen Stickoxidbildung. Hierbei erfolgt in Gebieten mit Luftüberschuss eine Oxidation des in der Verbrennungsluft enthaltenen Stickstoffs hauptsächlich zu Stickstoffmonoxid. Dieser Prozess läuft unter Einwirkung hoher Temperaturen ab, die während der Verbrennung entstehen. Ein weiterer Mechanismus ist die Prompte NO Bildung. 5-10% des entstehenden NO_x bei der innermotorischen Verbrennung von Diesel bzw. Benzin werden durch die Prompte NO Bildung erzeugt. Hierbei werden in kraftstoffreichen Gebieten der Flamme unter spezifischen Voraussetzungen aus Kohlenstoff-Stickstoff Verbindungen Stickoxide gebildet. Dieser Bildungsmechanismus spielt, ebenso wie die Entstehung von NO aus stickstoffhaltigem Kraftstoff die als dritte Entstehung zu nennen ist, eine untergeordnete Rolle im Vergleich zur thermischen Stickoxidbildung. [50] [51]

2.1.3 Kohlenwasserstoff Emissionen

Fossile Brennstoffe sind im Wesentlichen aus Kohlenwasserstoffketten unterschiedlicher Länge aufgebaut [52]. Bei unvollständiger Verbrennung fossiler Brennstoffe können mehr als 1000 unterschiedlicher Kohlenwasserstoff (Abk. HC) Verbindungen entstehen. Unvollständige Verbrennung entsteht insbesondere bei Verbrennung an den Zündgrenzen, oder bei Flammenauslöschung an den Zylinderwänden oder durch Streckung bzw. Dilatation aus den Folgen intensiver Turbulenzen [50].

Kohlenstoff Atome besitzen die Fähigkeit eine Vielzahl an verschiedenen Verbindungen einzugehen. HC-Verbindungen können Moleküle in Form von Ketten unterschiedlicher Länge aber auch Ringe bilden [53]. Dabei ist die Schädlichkeit einzelner Verbindungen stark unterschiedlich. Während offenkettige (aliphatische) Kohlenwasserstoffverbindungen wie beispielsweise Methan (CH_4) als ungiftig für den menschlichen Organismus betrachtet werden können, müssen zyklische Kohlenwasserstoffe (z.B. Benzol, Toluol) oder Polyzyklisch Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH) als bedenklich eingestuft werden [54]. Allerdings haben auch hier verschiedene PAH Verbindungen stark unterschiedliche Eigenschaften. Aus diesem Grund wird die Konzentration von Leitsubstanzen untersucht von denen eine nachgewiesene Gesundheitsgefährdung ausgeht [39]. Als Leitsubstanz ist Benzo(a)pyren (BaP) anzuführen. Von Benzo(a)pyren geht eine ausgewiesene Kanzerogenität aus und ist darüber hinaus eine Vorläufersubstanz der Rußkeimbildung. Kohlenwasserstoff Immissionen in der Atmosphäre in Verbindung mit Stickoxiden und der Aktivierungsenergie durch

Sonnenstrahlung ist unter anderem ein Grund zu Entstehung von Smog [15].

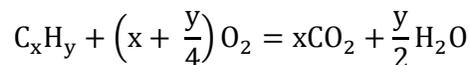
2.1.4 Kohlenmonoxid Emissionen

Kohlenmonoxid (CO) ist ein Atemgift welches im Bluthämoglobin die Bindungsplätze für Sauerstoff besetzt und zu einem Sauerstoffmangel im Organismus führt. Kohlenmonoxid ist farb- und geruchslos. CO entsteht hauptsächlich als Zwischenstufe der Kohlendioxidbildung unter Luftmangel, allerdings kann es durch Dissoziation (chem. Trennung von Verbindungen) bei mageren Motorbetrieb ebenfalls zu CO Entstehung kommen. Benzinmotoren ohne Katalysator sind Hauptemittenten von Kohlenmonoxid. Durch die flächendeckende Anwendung von geregelten 3-Wege Katalysatoren mit ausreichend hohen Konvertierungsraten stellen Kohlenmonoxid Emissionen keine Belastung dar. [55] [39]

2.1.5 Kohlendioxid Emissionen

Bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffhaltigen Brennstoffen werden im Idealfall der vollständigen Verbrennung alle verfügbaren Kohlenstoffe zu Kohlendioxid und die Wasserstoffanteile zu Wasser oxidiert. Das bedeutet, dass in jedem Fall bei der Verbrennung Fossiler Brennstoffe Kohlendioxid und Wasser als Verbrennungsprodukte entstehen [50]. Die Kohlendioxid (CO₂) Emissionen hängen vom Kohlenstoff-Massenanteil und dem Heizwert des Kraftstoffes ab. Diesel und Benzin Kraftstoffe verfügen durchschnittlich über einen Kohlenstoff Massenanteil von 86% [19].

Bei vollständiger (stöchiometrischer) Verbrennung werden die im Kraftstoff vorhandenen Kohlenwasserstoffe mit Sauerstoff oxidiert, sodass als Reaktionsprodukt nur Kohlendioxid und Wasser entstehen. Formel 2-1 zeigt den Zusammenhang der Massen bzw. Molanteile aller beteiligten Komponenten der vollständigen Verbrennung. Der inerte Stickstoff Anteil (~79%) in der Verbrennungsluft wird hier nicht berücksichtigt da der Stickstoffanteil auf beiden Seiten der Reaktionsgleichung in gleichem Ausmaß vorhanden wäre.



Formel 2-1: Oxidationsgleichung

CO₂ leistet einen großen Anteil zum Treibhauseffekt. Infolge der starken Nutzung fossiler Energieträger ist die CO₂ Konzentration in den letzten Jahrzehnten stark angestiegen. Ausgehend von einer Konzentration von 280ppm vor der Industrialisierung ist bis 2011 die Konzentration auf 391ppm angestiegen. Sollte die weltweite CO₂ Emissionsrate gleich bleiben wird lt. Prognosen der Klimaforschung die Erderwärmung noch bis Mitte dieses Jahrhunderts um 2°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau ansteigen. Die Tragweite der weltweiten Folgen einer derartigen Erwägung ist schwer abzusehen [56].

2.2 Gesetzliche RDE Bestimmungen

Die grundlegenden Bestimmungen zu den Abgasgesetzgebungen Euro 5 und Euro 6 sind in der Verordnung 715/2007 festgeschrieben. Die darauf aufbauende Rechtsakte 692/2008 spezifiziert die Durchführung als auch Änderungen der Verordnung 715/2007. Anhang III der Verordnung 692/2008 legt den Rahmen der Type 1 Prüfung zur durchschnittlichen Abgasemissionen Messung bei Umgebungsbedingungen fest. In der Erweiterung Anhang IIIA wird die RDE Test Prozedur festgelegt.

Die Einführung der Bestimmungen erfolgt in vier Teilabschnitten sogenannte Maßnahmenpakete:

Maßnahmenpaket 1:

Im ersten Maßnahmenpaket ist im Wesentlichen die Testprozedur und Vorgehensweise niedergeschrieben. Außerdem ist in diesem Paket festgesetzt worden welchen gasförmigen Schadstoffe bewertet werden. Der Umfang dieser Maßnahmen wurde am 10. März 2016 in der Verordnung (EU) 2016/427 der Kommission zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 6) festgelegt. [57]

Maßnahmenpaket 2:

Im zweiten Maßnahmenpaket sind Einführungstermine und NTE (Abk. Not-To-Exceed) Grenzwerte für gasförmige Emissionen festgeschrieben worden. Darüber hinaus ist die Einführung von Conformity Faktoren (Abk. CF) und der Transfer Funktion (Abk. TF) bestimmt worden. Die Transfer Funktion wurde implementiert um eventuell später verschiedene Straßenbedingungen stärker oder schwächer bewerten zu können. Zur Zeit der Veröffentlichung des zweiten Maßnahmenpakets wurde die TF mit dem Wert 1 bestimmt. Ebenfalls in diesem Paket sind Fehleranalysen und zusätzliche dynamische Randbedingungen eingeräumt. Beispielsweise wurden die relative positive Beschleunigung oder die Summe der positiven Höhenzunahme während der Testfahrt limitiert. [58]

Maßnahmenpaket 3:

Im dritten Maßnahmenpaket werden alle Randbedingungen und Anforderungen zur Durchführung und Bewertung der Partikelanzahl-Messung festgelegt. Dazu werden ebenfalls Conformity Faktoren festgesetzt werden. Aller Voraussicht wird der NTE Partikel Grenzwert analog wie beim NO_x Limit ein CF von 1 + einem noch festzulegenden Toleranzwert aufgrund von Messungenauigkeiten festgelegt. Ebenfalls im dritten Paket werden Kaltstart-Bedingungen und spezielle Bestimmungen für Hybridantriebe ausgeführt werden. Ein Entwurf des 3. Maßnahmenpakets wird im Jahr 2016 erwartet. [58] [59]

Maßnahmenpaket 4:

Anforderungen an Fahrzeugen welche bereits die vorgeschriebenen Limits bei RDE-Überprüfungen zur Typzulassung erfüllen konnten und somit am Europäischen Markt zugelassen wurden, werden darüber hinaus im Betrieb bezgl. deren Emissionen überwacht werden. Diese Überprüfung, welche bei Nutzfahrzeugen schon seit Euro 5 bereits Praxis ist, wird mittels dem Begriff In-Service Compliance (Abk. ISC) gehandhabt. Genaue Bestimmungen zur Durchführung und Technisches Regelwerk werden im vierten Maßnahmenpaket erwartet. Ebenfalls im vierten Maßnahmenpaket werden die Bestimmungen der Transferfunktion erwartet. Das vierte Maßnahmenpaket wird voraussichtlich im Frühjahr 2017 veröffentlicht. [58] [59] [60]

2.2.1 Übersicht der Einführungsdaten festgelegter Abgasgesetzgebungsbestimmungen

Die Einführung der neuen Abgasgesetzgebung wird stufenweise vorgenommen. Eine zeitliche Übersicht mit den Einführungsdaten der vorgesehenen Normen wird in Abbildung 2-2 gezeigt.

Grundlegend wurde Euro 6 für Personenkraftwagen mit der Bezeichnung Euro 6b im September 2014 eingeführt [61]. Zu Beginn wurde die zweite Euro 6 Stufe, welche mit September 2017 eingeführt wird mit Euro 6c benannt. Mit Euro 6c wurde die Einführung der Real Driving Bestimmungen vorgesehen. Im Laufe der Zeit hat es Änderungen in Bezug der RDE Bestimmungen und Einführungsdaten gegeben.

Aktuell wurde die Vereinbarung getroffen, dass ab 20. April 2016 bis Sept. 2017 eine RDE Monitoringphase stattfindet. Dabei müssen PKW und leichte NFZ. Neuzulassungen parallel zum Labortest am Rollenprüfstand eine RDE-Überprüfungsfahrt absolvieren. Die dabei aufgezeichneten Daten werden nach beiden Bewertungsmethoden (CLEAR bzw. EMROAD) ausgewertet und müssen der nationalen Behörde übergeben werden, dabei ist das Erreichen der NTE Werte in diesem Zeitraum nicht notwendig.

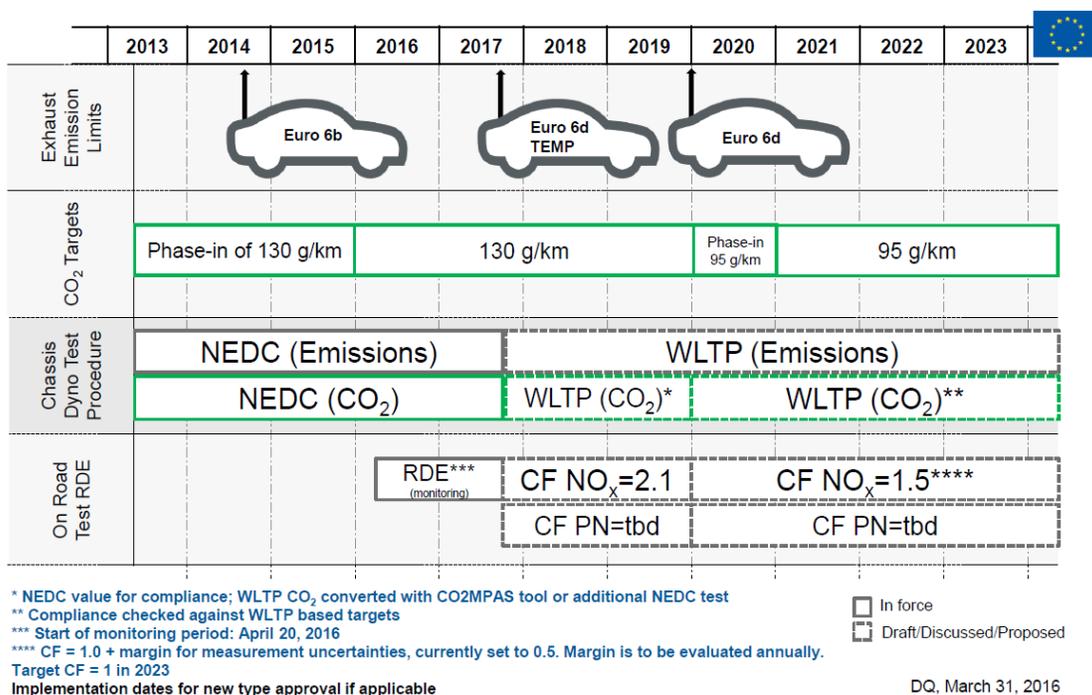


Abbildung 2-2: Zeitliche Übersicht [62]

Dem Rollenprüfstandtests wird ab Sept. 2017 anstatt dem NEDC- der WLTP Testzyklus zugrunde gelegt, welcher in der Global Technical Regulation No. 15 (GTR No. 15) definiert ist. Es sei angemerkt dass in der Übergangsphase bis Jänner 2020 die CO₂ Emissionen mit dem NEDC Zyklus gemessen und anhand der CO2MPASS Konvertierungsmethode die CO₂ Emissionen auf WLTC Niveau berechnet werden können. [58]

Die Gesetzgebungsbestimmung zur Emissionsüberprüfung (Typprüfung) ab September 2017 wurde umbenannt von Euro 6c auf Euro 6d TEMP. Euro 6d Temp beschreibt im Wesentlichen dieselbe Vorgehensweise wie die darauffolgende Euro 6d Regelung ab Jänner 2020, allerdings mit erweiterten Toleranzlimits. Diese werden festgelegt durch die Conformity Faktoren die ab Einführungsdatum mit 2,1 und ab Jänner 2020 mit 1,5 für den Stickoxid Grenzwert festgelegt

wurden. Diese Daten ($CF_{NOx}=2,1$ ab 09/2017 und $CF_{NOx}=1,5$ ab 01/2020) gelten für alle neu zertifizierten Fahrzeuge und abweichend dazu, werden für alle Neuzulassungen dieselben Conformity Faktoren angewendet, allerdings mit anderen Einführungsdaten nämlich 09/2019 bzw. 01/2021. Conformity Faktoren für Partikelanzahl sind zum Zeitpunkt der Recherche noch nicht endgültig definiert. [58]

Die Einhaltung der CO₂ Grenzwerte ist seit Jänner 2016 im durchschnittlichen Flottenverbrauch mit 130g/km limitiert. Eine weitere Senkung auf 95g/km erfolgt ab Jänner 2021 und ist mit einer vorgelagerten einjährigen Einführungsphase vorgesehen. [23]

2.2.2 Übersicht RDE Gesetzgebung

In diesem Abschnitt der Arbeit wird eine Übersicht zu den gesetzlichen Bestimmungen beschrieben. Die Ausführung ist lediglich ein Exzerpt der festgeschriebenen Definitionen in der Verordnung 715/2007, Rechtsakte 692/2008 AnhangIII A und sollten nicht als Grundlage zur Durchführung von RDE Untersuchungen verstanden werden.

2.2.2.1 Verbindliche Emissionsgrenzwerte (Engl. Not to Exceed, Abk. NTE)

Lt. Punkt 2 im AnhangIII A der Rechtsakte 692/2008 dürfen während der normalen Lebensdauer eines zugelassenen Fahrzeuges die definierten NTE Werte bei keiner RDE-Prüfung überschreiten. Die Berechnung der NTE Werte erfolgt nach Formel 2-2.

$$\text{NTE}_{\text{pollutant}} = \text{CF}_{\text{pollutant}} \times \text{TF}(p_1, \dots, p_2) \times \text{EURO} - 6$$

Formel 2-2: NTE Wert Berechnung

In der Formel wird für die Variable „Euro-6“ der geltende Emissionsgrenzwert lt. (EG) Nr. 715/2007 Euro 6 eingesetzt. Die Berechnung des NTE-Wertes der jeweiligen Emissionskomponente ist vorerst nur durch die Multiplikation mit dem Übereinstimmungsfaktor CF (= engl. Conformity Faktor) da die Übertragungsfunktion TF (engl. Transition Faktor) wurde bis auf weiteres auf den Wert 1 gesetzt wurde. Der TF wurde implementiert um später auf unter gewissen Voraussetzungen den NTE anpassen zu können.

Der Übereinstimmungsfaktor CF für die Stickoxidmasse (NO_x) während der Euro 6 Temp Phase wurde mit Wirkung ab Jänner 2020 auf den Wert 1 plus einer Toleranz von 0,5 gesenkt. Der Toleranzanteil soll dabei allfällig gegebene Messungenauigkeiten kompensieren. Die CF Faktoren zur NTE Partikelanzahlmessung sind zur Zeit der Erstellung der Arbeit noch nicht festgelegt und werden voraussichtlich mit dem 3. Maßnahmenpakete definiert werden. Abbildung 2-3 zeigt die Auflistung der CF Faktoren lt. Veröffentlichung am 26. April 2016 im Amtsblatt L109 der Europäischen Union.

Schadstoff	Stickoxidmasse (NO_x)	Partikelzahl (P)	Masse des Kohlenmonoxids (CO) ⁽¹⁾	Masse der Kohlenwasserstoffe insgesamt (THC)	Summe der Massen der Kohlenwasserstoffe und der Stickstoffoxide (HC + NO_x)
$\text{CF}_{\text{pollutant}}$	1 + margin mit margin = 0,5	zu bestimmen	—	—	—

⁽¹⁾ Die CO-Emissionen sind bei RDE-Prüfungen zu messen und aufzuzeichnen.

Abbildung 2-3: CF Conformity Faktoren

Auch die Kohlenmonoxid (CO) Emissionen müssen während einer RDE Überprüfung gemessen und aufgezeichnet werden. Für Kohlenwasserstoffe (HC) sowie die Summe aus HC + NO_x sind bis lang keine Übereinstimmungsfaktoren festgelegt.

2.2.2.2 Allgemeine Anforderungen (AnnexIII A Punkt 2)

Laut Punkt 2 im AnnexIII A ist festgelegt, dass der Fahrzeughersteller sicherstellen muss, dass die PEMS Messungen von unabhängigen Parteien auf öffentlichen Straßen durchgeführt werden können. Zudem müssen passende Anschlussstellen oder Adapter für Auspuffrohre und

notwendige ECU Signale bereitgestellt werden.

2.2.2.3 Generelle Bestimmungen (AnnexIII A Punkt 3)

AnnexIII A Punkt 3 beschreibt wie RDE Prüfungen durchgeführt werden sollen. Beispielsweise muss der Abgasmassenstrom mittels Messtechnik welche, unabhängig vom Fahrzeug ist, ermittelt werden. Hierfür dürfen keine ECU Daten verwendet werden.

Falls für die Zulassungsbehörde die Datenqualität oder die Validierungs-Ergebnisse der PEMS Messung nicht zufriedenstellend sind, kann der Test als ungültig bewertet werden. In jedem Fall werden die Testdaten und der Grund der eventuellen Ungültigkeit, aufgezeichnet und der Behörde übergeben.

2.2.2.4 Pre-Test Prozedur (AnnexIII A Punkt 4)

Nach dem Punkt 4 im AnnexIII A muss das Versuchsfahrzeug auf der Straße unter normalem Fahrmuster, Konditionen und Zuladungen durchgeführt werden. Der RDE Test soll repräsentativ für Fahrzeuge auf realen Straßen, unter normaler Last ausgeführt werden.

Der Hersteller muss der Zertifizierungsbehörde demonstrieren, dass das gewählte Fahrzeug, die Fahrmuster, Konditionen und Zuladungen für diese Fahrzeug-Familie repräsentativ sind. (Fahrzeug-Familie siehe AnnexIII A Anhang 7 bzw. 2.2.2.19 in dieser Arbeit)

Die Zuladung und Höhenanforderungen, wie im AnnexIII A Punkt 5.1 und 5.2 spezifiziert müssen berücksichtigt werden um später bestimmen zu können ob die Konditionen für RDE Tests akzeptabel sind oder nicht.

Die Zertifizierungsbehörde muss eine Testroute vorschlagen die Stadt-, Land- und Autobahn Umgebungen nach Anforderung im Punkt 6 beinhaltet. Der Vorschlag der Testroute erfolgt auf einer topografischen Karte.

Werden Emissionen durch gespeicherte ECU Daten (Abschalteinrichtungen) beeinflusst, werden, werden alle Emissionen und Leistungen der gesamten PEMS Familie zu der das Fzg. gehört (wie in Anhang 7 beschrieben) als ‚Abweichung zur Bestimmung‘ erachtet. Derartige Funktionalitäten werden als „Defeat Device“ (Minderungsgerät), wie in Artikel 3(10) der Verordnung (EC) 715/2007 definiert, gehandhabt.

2.2.2.5 Zuladung und Testmasse (AnnexIII A Punkt 5.1.)

Die Fahrzeug-Basiszuladung besteht aus einem Fahrer, einem Testzeugen (wenn anwendbar) und der Testausrüstung, inklusive der Befestigungen und der Stromversorgungseinheit. Um die Testanforderungen zu erfüllen muss zusätzlich Zuladung angebracht werden, wenn die gesamte Masse 90% der Summe von Fahrgastmasse, Fahrermasse und Zuladungsmasse (definiert in Punkt 19, 20 und 21 von Artikel 2 der Kommission- Verordnung (EU) No. 1230/2012) nicht überschritten werden. Folgende Definitionen sind hierfür gültig:

(19) Fahrgastmasse = 75kg multipliziert mit der Anzahl an vorgesehenen Sitze.

(20) Fahrermasse = 75kg platziert auf Fahrersitz Referenzpunkt.

(21) Zuladungsmasse = Differenz aus max. techn. möglicher Masse und fahrbereitem Fzg.

2.2.2.6 Umgebungsbedingungen (AnnexIII A Punkt 5.2.)

Die Umgebungsbedingungen für eine gültige RDE Prüfung sind bezüglich Temperatur und Höhe festgelegt. Es gelten folgende festgelegte Temperatur und Druckbereiche:

- Erweiterte Höhenkonditionen: ≤ 700 m über Seehöhe
- Extended Höhenkonditionen: > 700 m ≤ 1300 m über Seehöhe
- Moderate Temperaturkonditionen : $\geq 0^{\circ}\text{C}$ & $\leq 30^{\circ}\text{C}$
- Erweiterte Temperaturkonditionen : $\geq -7^{\circ}\text{C}$ & $< 0^{\circ}\text{C}$ oder $> 30^{\circ}\text{C}$ & $\leq 35^{\circ}\text{C}$

Abweichend der Vorschrift gelten vom Einführungsdatum bis 1.Sept. 2019/2020 folgende Temperaturbereiche:

- Moderate Temperaturkonditionen: $\geq 3^{\circ}\text{C}$ & $\leq 30^{\circ}\text{C}$
- Extended Temperaturkonditionen: $\geq -2^{\circ}\text{C}$ & $< 3^{\circ}\text{C}$ oder $> 30^{\circ}\text{C}$ & $\leq 35^{\circ}\text{C}$

2.2.2.7 Dynamische Bedingungen (AnnexIII A Punkt 5.4.)

Die dynamischen Konditionen umfassen Fahrbahnsteigungen, Gegenwind, Fahrdynamik (Beschleunigung, Bremsen) sowie Hilfssystemen die Einfluss auf den Energieverbrauch und Emissionen haben.

Die Verifikation der Normalität der dynamischen Konditionen wird nach dem Test mittels der aufgezeichneten PEMS Daten ausgewertet. Die Methoden dafür sind:

- EMROAD (Moving averaging window method)
- CLEAR (Power based method tool)

Jede der beiden Methoden besitzt dynamische Referenzkonditionen sowie Gültigkeitsbereiche und Minimalanforderungen um einen Vorgabe konformen Test zu erreichen. Die Vorgehensweise zur RDE Bewertung nach CLEAR und EMROAD Methode wird in 2.2.3 beschrieben.

Wenn die Anforderungen, hinsichtlich Bewertung durch CLEAR- bzw. EMROAD Methode nur von einer der beiden Methoden erfüllt wird ist folgende Vorgehensweise vorgesehen:

1. ein zusätzlicher RDE Test muss durchgeführt werden
2. Wenn wiederholt nur eine Methode die Anforderungen erfüllt, muss für beide Methoden die Vollständigkeit und Normalität (engl. Completeness, Normality) aufgezeichnet werden. Allerdings muss die Berechnung nach Punkt 9.3 im Anhang IIIA nur für die Methode ausgeführt werden bei der die Anforderungen erfüllt sind.

Die Daten beider RDE Tests sowie die Analyse der Vollständigkeit müssen auch veröffentlicht werden um die Differenz der beiden Methoden untersuchen zu können.

2.2.2.8 Fahrzeugkonditionen und Betrieb (AnnexIII A Punkt 5.5.)

Hilfsaggregate, wie beispielsweise Klimaanlage, müssen wie im üblichen Gebrauch unter realen Bedingungen auf der Straße betrieben werden.

Für Fahrzeuge mit periodisch regenerierenden Systemen (Abgasnachbehandlung) gelten folgende Festlegungen: Wenn eine Regeneration während der Testfahrt auftritt, kann der Test als ungültig gewertet- und auf Anfrage vom Hersteller wiederholt werden. Der Hersteller muss sicherstellen dass sowohl die Regeneration als auch eine ausreichende Vor-konditionierung vor dem zweiten Test abgeschlossen ist. Falls während der Wiederholung des RDE Tests eine neuerliche Regeneration stattfindet, müssen die emittierten Schadstoffe in die Evaluierung eingerechnet werden.

2.2.2.9 Testfahrtbedingungen der PEMS Messung (AnnexIII A Punkt 6)

Die Aufteilung der Stadt-, Land- und Autobahnsegmente muss gleichmäßig erfolgen sein. Die Anteile der verschiedenen Betriebsarten (Stadt, Land-Autobahn) sind in Prozent der gesamten Testfahrt festgelegt. Die Testfahrt muss sich, distanzbezogen nach folgenden Schlüssel verteilen:

- 34% Stadtanteil (nicht weniger als 29%)
- 33% Landanteil
- 33% Autobahnanteil

Dies Anteile müssen mit einer Genauigkeit von +/- 10% eingehalten werden. Die RDE Überprüfungsfahrt soll in der Reihenfolge Stadt- gefolgt von Land- und Autobahnfahrt stattfinden. Wenn aus praktischen Gründen eine andere Reihenfolge gewählt wird muss die Zustimmung der Testbehörde eingeholt werden. Außerdem kann der Landanteil von Stadtanteilen unterbrochen werden. Die Zuteilung zu den Anteilen erfolgt ausschließlich über die Fahrzeuggeschwindigkeit nach folgender Definition:

Stadtbetrieb: Fzg.- Geschwindigkeit	$v \leq 60 \text{ km/h}$
Landbetrieb: Fzg.- Geschwindigkeit	$60 \text{ km/h} < v < 90 \text{ km/h}$
Autobahn: Fzg.- Geschwindigkeit	$v \geq 90 \text{ km/h}$

Die maximale Testgeschwindigkeit ist mit 145 km/h festgelegt. Die Maximalgeschwindigkeit darf, für weniger als 3% bezogen auf die Zeit des Autobahnanteils, um 15 km/h überschritten werden.

Bezüglich der Geschwindigkeiten sind weiter folgende Bedingungen zu erfüllen:

- Die Durchschnittsgeschwindigkeit (inkl. Stopps) der Stadtfahrt muss zw. 15km/h und 30km/h liegen.
- Die Geschwindigkeit muss für 10% der Zeit unterhalb 1km/h liegen.
- Die Stadtfahrt muss mehrere Stopps für min. 10 Sek. oder länger beinhalten.
- Ein überaus langer Stopp der 80% der gesamten Stehzeit ausmacht darf nicht vorkommen.
- Die Geschwindigkeit während der Autobahnfahrt muss die gesamte Bandbreite von 90km/h bis min. 110km/h einnehmen.
- Die Fahrzeuggeschwindigkeit im Autobahnbetrieb muss für min. 5 min 110 km/h sein.
- Die Gesamtdauer soll zw. 90 - 120 min liegen und der Start- und Endpunkt keinen Höhenunterschied >100m aufweisen.
- Die zurückgelegte Distanz für jeden Bereich (Stadt, Land, Autobahn) muss min. 16 km sein.

2.2.2.10 Anforderungen zur Durchführung der PEMS Messung (AnnexIII A Punkt 7)

Die Testfahrt muss so ausgewählt werden, dass diese nicht unterbrochen werden muss und die Daten kontinuierlich aufgezeichnet werden können, sodass die minimale Testdauer erreicht werden kann. Die PEMS Energieversorgung muss durch eine externe Einheit bereitgestellt werden und die Installation der Messgeräte ist so durchzuführen, dass die Fahrzeugleistung bzw. die Emissionen so gering wie möglich beeinflusst werden.

RDE Tests müssen an Werktagen auf befestigten Wegen und Straßen durchgeführt werden

(keine Off-Road Fahrt).

Nach dem ersten Motorstart bei Beginn des Emissionstests soll ein langer Leerlauf des Motors vermieden werden. Stirbt der Motor während dem Test ab, ist es erlaubt einen Neustart durchzuführen die Emissionsmessung läuft allerdings weiter.

2.2.2.11 Schmieröl, Kraftstoff und Chemikalien (AnnexIIIa Punkt 8)

Schmieröl, Kraftstoff und Chemikalien müssen innerhalb der vom Hersteller vorgegebenen Spezifikation sein. Proben dieser Flüssigkeiten müssen entnommen werden und mindestens für ein Jahr aufbewahrt werden.

2.2.2.12 Emissions- und Testfahrt Evaluierung (AnnexIIIa Punkt 9)

Daten von verschiedenen Testfahrten dürfen nicht kombiniert, modifiziert oder gelöscht werden. Nach Feststellung der Gültigkeit müssen die Ergebnisse der Emissionsmessung (mittels EMROAD & CLEAR) bestimmt werden. Fallen während eines spezifischen Zeitintervalls die Umgebungskonditionen in den Bereich „Extended“, (wie in Punkt 5.2. ANNEXIIIa) beschrieben, so müssen die Emissionen während diesem Zeitintervall die Emissionen durch den Faktor ‚ext‘ dividiert werden (wie in Appendix 4 beschrieben) bevor die Messung lt. Anforderung evaluiert wird.

Solange spezifische Anforderungen für die Emissionen beim Kaltstart nicht gültig sind, müssen die Kaltstartemissionen zuvor aufgezeichnet, können aber von der Evaluierung ausgeschlossen werden.

2.2.2.13 Emissionstest Ausführung (AnnexIIIa APPENDIX 1)

1. Test Start

Probenentnahme, Messung und Aufzeichnung der Parameter muss vor Beginn des Motorstarts begonnen werden.

2. Test Ausführung

Probenentnahme, Messung und Aufzeichnung muss kontinuierlich während der Straßenmessung laufen. Auch während eines Motor- Start / Stopp müssen Aufzeichnungen weiterlaufen.

3. Test Ende

Das Ende des Tests ist erreicht wenn das Fzg. den Testlauf abgeschlossen hat und der Motor abgeschaltet wird. Die Messung muss solange weiterlaufen, bis die Ansprechzeit des Messsystems erreicht ist.

2.2.2.14 Spezifikation und Kalibrierung von PEMS Komponenten und Signalen (AnnexIIIa APPENDIX 2)

In Appendix 2, Punkt 3.2., Tabelle 1 dieses Teils werden Linearitätsanforderungen an die Signale der PEMS- Komponenten definiert.

Periodische Überprüfung müssen mindestens alle 3 Monate oder falls Änderungen/Reparaturen von Komponenten die Einfluss auf die Emissionsmessung haben, vorgenommen werden.

Überprüfungen von relevanten Komponenten (z.B. Massenstrommessgerät) müssen durchgeführt werden wenn Schäden am Gerät aufgetreten sind, oder wenn die Vorgaben des Messgeräteherstellers oder die ISO 9000 es verlangt. Allerdings dürfen die Kalibrierungen

nicht länger als ein Jahr vor dem aktuellen Test durchgeführt worden sein.

Ebenfalls in Appendix 2 wird die Kalibrierung und Spezifikationen von Gas- und Partikel Analytoren sowie der gesamten Instrumentierung definiert.

2.2.2.15 Validierung von PEMS und Abgasmassenstrom (AnnexIII A APPENDIX 3)

Anhang 3 beschreibt die Anforderung die während transienter Bedingungen die prinzipielle Funktionalität der installierten PEMS zu überwacht, sowie die Richtigkeit des Abgasmassenstroms überprüft werden soll.

Die Überprüfung erfolgt durch berührungslose Abgasmassenstrommessung oder der Referenzwert wird aus den ECU Daten berechnet.

2.2.2.16 Bestimmung der Emissionen (AnnexIII A APPENDIX 4)

Anhang 4 Punkt 4 definiert den Kaltstart durch folgende zwei Bestimmungen:

- Die Kaltstartperiode beträgt 5 min nach dem ersten Motorstart.
- Wenn die Kühlmitteltemperatur verlässlich bestimmt werden kann, endet die Kaltstartphase sobald innerhalb der ersten 5 min 70°C erreicht wurden.

Anhang 4 Punkt 5 beschreibt die Emissionsmessung während eines Motorstillstands folgendermaßen:

Wenn Emissionen während eines Motorstillstands gemessen werden, müssen die Werte in einem eigenen Schritt vor der Datennachbearbeitung auf null gesetzt werden.

Ein Motorstillstand liegt vor, wenn zwei der folgenden Fälle eintreten:

1. Die Aufgezeichnete Motordrehzahl < 50 U/min ist.
2. Der Abgasmassenstrom < 3 kg/h ist.
3. Der Abgasmassenstrom fällt unter 15% des Leerlauf Abgas-Massenstrom fällt.

Anhang 4 Punkt 8 beschreibt die Korrektur der Emissionen

Wenn die Messungen auf trockener Basis erfolgt, müssen die Messungen auf eine Nass – Basis konvertiert werden. Dies gilt allerdings nicht für die Werte der Stickoxidmessung. NO_x Emissionen müssen bezgl. Temperatur und Luftfeuchtigkeit nicht korrigiert werden.

2.2.2.17 Prüfung der Dynamischen Konditionen mit Methode 1 Moving Average Window (Abk. MAW) (AnnexIII A APPENDIX 5)

Bewertungsmethode 1 wird in Kapitel 2.2.3.2 beschrieben.

2.2.2.18 Prüfung der Dynamischen Konditionen mit Methode 2 Power Binning (Abk. PB) (AnnexIII A APPENDIX 6)

Bewertungsmethode 2 wird in Kapitel 2.2.3.1 beschrieben.

2.2.2.19 Fahrzeugauswahl bei der Typzulassung (AnnexIII A APPENDIX 7)

Mehrere Fahrzeugtypen können vom Fahrzeughersteller zu einer PEMS Test Familie zusammengefasst werden welche nur einmal zertifiziert werden müssen.

Fahrzeuge innerhalb einer PEMS Testfamilie müssen in folgenden Punkten identisch sein:

- Emissions- Typzertifizierung muss nach (EC) 715 / 2007 bewertet werden.
- Antriebstype (ICE, HEV, PHEV)
- Kraftstoffart (Benzin, Diesel, LPG, NG...)
- Verbrennungsprozess
- Anzahl der Zylinder
- Zylinderblock Konfiguration (Reihe, V, Radial,...)
- Hubvolumen (Abweichung zum Ref. Volumen -22% bei $V \geq 1500$ ccm und -32% bei < 1500 ccm)
- Methode der Kraftstoffeinspritzung
- Aufladung
- Abgasnachbehandlung
- AGR

2.2.3 Datenauswertung

Die Gesetzgebung limitiert Extremwerte und legt den Fokus auf „Typisches“ Fahren welches durch zwei unterschiedliche Methoden bewertet wird. Die Methoden sind lt. Anhang IIIA Ergänzung 5 und 6 sind (CLEAR bzw. EMROAD) für die gesetzliche Auswertung festgelegt. Im Folgenden wird eine Übersicht beider Methoden gegeben.

2.2.3.1 CLEAR

Normierung der Emissionen erfolgt mittels einer Normalleistungs - Frequenzverteilung. (Engl. Power Binning Method - frequency distribution) Abk. CLEAR = Classification of Emissions from Automobiles in Real driving. Entwickelt von der Technischen Universität Graz.

Allgemeine Feststellungen in der CLEAR Methode [37]:

- Die meisten PKWs werden die überwiegende Zeit in ähnlichen Geschwindigkeitsprofilen bewegt.
- Leistungsbedarf definiert durch Fahrzeugmasse, Rollwiderstand und Luftwiderstand.
- Maximale Motorleistung beeinflusst die Fahrt nur in wenigen Situationen.

Um die während der RDE Fahrt gemessenen Emissionen überprüfen zu können wird folgende Vorgehensweise festgelegt:

- Schritt 1: De-Normieren des generischen Leistungsmuster (Multiplikation mit Fahrzeug spezifischen P_{drive})
- Schritt 2: Messung der Radleistung (Messung mittels Messflansch bzw. CO₂ Veline Methode zur Kontrolle oder als Alternative zu Messung)
- Schritt 3: 3s gleitender Mittelwert der gemessenen Signale (1Hz) aus PEMS Test
- Schritt 4: Gruppieren der 3s Mittelwerte zur korrespondierenden Leistungsklasse
- Schritt 5: Berechnung der Durchschnitts-Emissionswerte [g/h] für jede Leistungsklasse

Schritt 6: Multiplikation der Durchschnittswerte mit den korrespondierenden Zeitanteilen der Leistungsklasse -> gewichteter Emissionswert [g/h]

Ad 1.: Ein dimensionsloses, normiertes Leistungsmuster wird Fahrzeugspezifisch mittels Faktor P_{drive} auf das zu untersuchende Fzg. angepasst (de-normiert) und stellt damit ein übliches Leistungsmuster in [kW] für das jeweilige Fahrzeug dar (Abbildung 2-4). P_{drive} entspricht im Wesentlichen der Fahrwiderstandsleistung des betreffenden Fahrzeugs bei 70km/h mit einer Beschleunigung von $0.45m/s^2$.

Die maximale Radleistungsklasse die in Betracht gezogen wird ist die Leistungsklasse welche 90% der Motornennleistung beinhaltet. Die Anteile aller exkludierten Klassen werden zu der höchsten verbleibenden Klasse addiert.

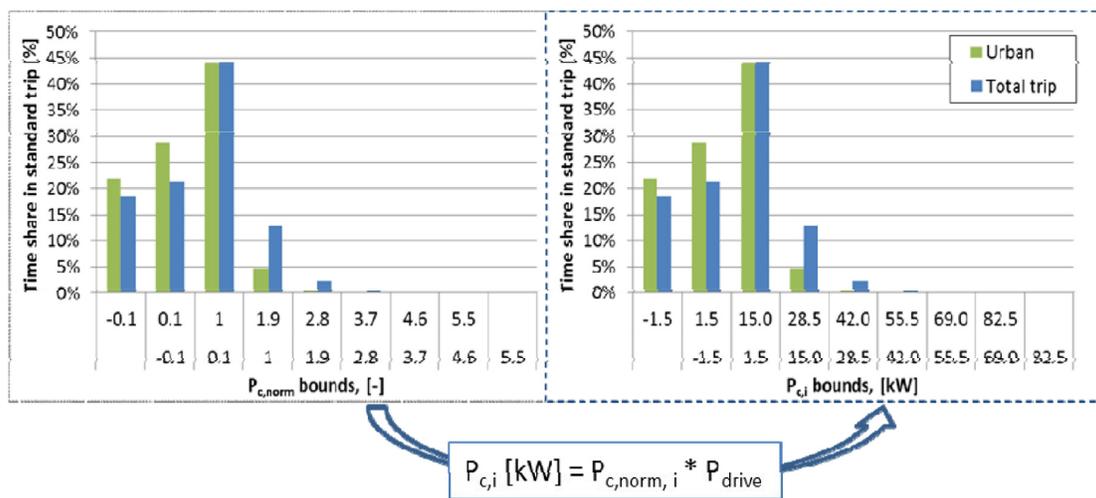


Abbildung 2-4: Normiert – und Denormiertes Leistungsmuster [63]

Ad 2.: Die effektive Radleistung kann direkt aus einer Momentenmessung an den Rädern- oder aus der CO_2 Messung mittels der Veline Methode (Appendix IIIA Anhang 4) errechnet werden.

Ad 3. & 4.: Die Schadstoffmessung wird über einen gleitenden Mittelwert von Sekunden geglättet und jeder ermittelte Wert (Auflösung 1Hz) sekundlich, abhängig von der Leistung zu einer Leistungsklasse zugeteilt.

Ad 5.: Die zugeteilten Emissionen pro Leistungsklasse werden unterschieden zwischen Stadtanteil und dem gesamten Test. Ein Durchschnittswert wird für jede Leistungsklasse in der Einheit [g/h] errechnet.

Ad 6.: Jede Leistungsklasse hat einen Zeitanteil für den Stadtbetrieb bzw. für den gesamten Test hinterlegt. Die Zeitanteile werden mit den korrespondierenden Emissionen der Leistungsklasse multipliziert und gemittelt. Die ermittelten Emissionen können mit den vorgeschriebenen Limits verglichen werden.

2.2.3.2 EMROAD

Entwickelt von Joint Research Center in Ispra, Italien (Abk. JRC = Wissenschaftlicher Dienst der Europäischen Kommission [64]). Die Bewertung der Emissionen erfolgt durch Gewichtung von Zeitfenstern mit üblichen $g\ CO_2/km$ Werten. So kann erreicht werden, dass besonders aggressive oder zu wenig dynamische Fahrzeugbewegungen bzw. spezielle Umgebungsverhältnisse weniger stark, bis gar nicht, berücksichtigt werden.

Bei dieser Methode werden die Emissionen die während eines RDE Tests, unter gegebenen Randbedingungen auftreten, bewertet. Der gesamte Test wird unterteilt in sogenannte Fenster und anschließend mittels statistischer Methoden ausgewertet. Jene Fenster sind zu identifizieren die aussagekräftig sind um die RDE Fahrt richtig zu analysieren. Folgende Vorgehensweise ist dabei festgelegt:

Schritt 1: Segmentierung der Daten und Exklusion der Kaltstartemissionen

Schritt 2: Kalkulation der Emissionen innerhalb der Unterteilungen „Fenster“

Schritt 3: Identifikation der Normfenster

Schritt 4: Verifikation der Test „Completeness“ und „Normality“

Schritt 5: Kalkulation der Norm Fenster Emissionen

Ad 1. & 2.: Lt. AnnexIII A APPENDIX 4 werden jene aufgezeichneten Emissionen die während der ersten 5Min oder einer Kühlwassertemperatur $< 70^\circ C$ anfallen von der Bewertung ausgenommen. Die Masse der Emissionen wird nicht für den gesamten Datensatz berechnet sondern für Unterteilungen des gesamten Datensatz. Die Länge dieser Unterteilungen wird bestimmt durch die emittierte CO_2 Masse im WLTC Referenzzyklus am Rollenprüfstand. Die gleitende Mittelwertbestimmung (Moving Average) wird durchgeführt mit einem Zeitinkrement Δt gleich der Datensammelfrequenz. Diese Unterteilungen werden verwendet um die Mittelwerte der Emissionsdaten auf „Average Windows“ zu verweisen. Die in diesem Punkt beschriebene Kalkulation kann vom letzten Punkt- (Rückwärts) oder vom ersten Punkt der Messung (Vorwärts) durchgeführt werden.

- Stadtfenster sind durch eine Durchschnittsgeschwindigkeit $v < 45\ km/h$ charakterisiert.
- Landfenster sind durch eine Durchschnittsgeschwindigkeit $45 \leq v < 80\ km/h$ charakterisiert.
- Autobahnfenster sind durch eine Durchschnittsgeschwindigkeit $80 \leq v < 145\ km/h$ charakterisiert.

Ad 3.: Durch Verwendung der Referenzpunkte P_1, P_2, P_3 welche aus der CO_2 Emission während dem WLTC errechnet werden, wird die charakteristische Kurve als eine Funktion der Durchschnittsgeschwindigkeit berechnet, die zwei lineare Sektionen (P_1, P_2) und (P_2, P_3) ergibt. Die Sektion (P_2, P_3) ist limitiert auf $145\ km/h$ auf der Fahrzeuggeschwindigkeit-Achse. Primär- und Sekundärtoleranz der charakteristischen CO_2 Kurve sind durch Abweichungen um $tol_1 = +/- 25\%$ bzw. $tol_2 = 50\%$ der Ref. Kurve definiert (Abbildung 2-5).

Ad 4.: Die „Normalität“ (Normality) der Fenster wird mittels Vergleich der distanzspezifischen CO_2 Emission und der Referenzkurve überprüft. Der Test ist „normal“ wenn zumindest 50% der Stadt-, Land- und Autobahnfenster innerhalb der primären Toleranz sind. Der Test ist vollständig („complete“) wenn der Test eine ausreichende Anzahl an Fenster enthält die unterschiedliche Geschwindigkeitsbereiche aufweisen (min. 15% Stadt-, Land-, Autobahnanteil der Gesamtfenster).

Ad 5.: Die Emissionen werden für jede Schadstoffkomponente, als gewichteter

Durchschnittswert eines Fensters, separat für die Stadt, Land und Autobahn Kategorie, sowie für die gesamte Fahrt, berechnet wobei für die gesamte Fahrt ein Arithmetisches Mittel mit den vorgegebenen Anteilen aus Stadt – Land – Autobahn (0,34 – 0,33 – 0,33) zu berechnen ist und nicht die tatsächlich gemessenen Anteile heranzuziehen sind.

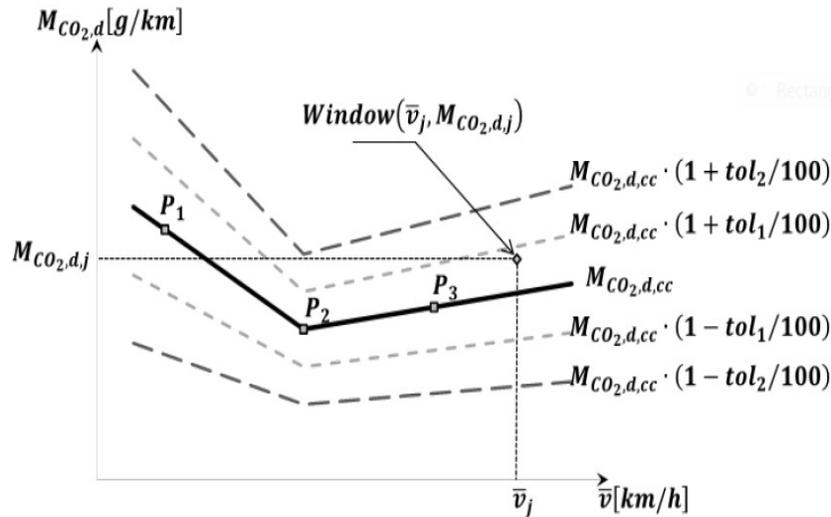


Abbildung 2-5: EMROAD Charakteristische CO₂ Kurve [63]

Die Gewichtung der Emission wird innerhalb des Primärtoleranzbereich (+/- tol₁) mit 1 festgesetzt und im Bereich zwischen tol₁ und tol₂ wird zwischen den Grenzwerten 1-0 linear interpoliert (Abbildung 2-6).

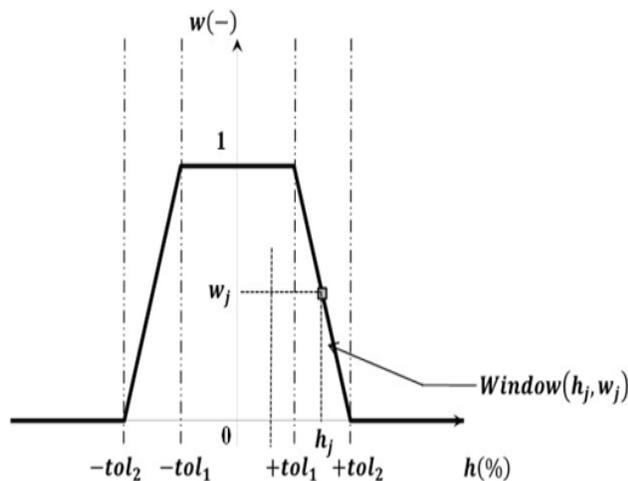


Abbildung 2-6: Gewichtungsfkt. [63]

2.3 RDE Entwicklungsmethoden

Messergebnisse von RDE Fahrten sind stark von verschiedenen Einflussfaktoren abhängig. Als wichtige Einflussfaktoren auf Emissionen können die Verkehrssituation, der Fahrstil und Umwelteinflüsse genannt werden. Grundsätzlich kann eine Realfahrt als Aneinanderreihung von einzelnen Ereignissen betrachtet werden welche von unterschiedlichen Umgebungs- und Motortemperaturen, Fahrsituationen und verschiedenen Betriebszuständen abhängig ist. Das bedeutet, dass Emissionsmessungen nicht eingeschränkt auf einen definierten Fahrzyklus unternommen werden, sondern der Schadstoffausstoß im gesamten Motorkennfeld relevant ist. Der Fahrer darf das Fahrzeug bei „normalem Betrieb“ nahezu beliebig dynamisch, bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen und verschiedenen Beladungszuständen bewegen. Abbildung 2-7 zeigt bei drei unterschiedlichen Fahrzeugklassen den Einfluss verschiedener Fahrdynamiken auf die NO_x Emissionen bzw. die im Motorkennfeld abgedeckten Bereiche verschiedener Testzyklen, verglichen zum gesamten Betriebsbereich bei RDE Überprüfungen. Dadurch kann eine verstärkte Optimierung eingeschränkter Bereiche oder Betriebspunkte vermieden werden. Dazu kommt, dass verschiedene Antriebsstrang – Fahrzeug Kombinationen völlig unterschiedlich auf diverse Fahrzustände reagieren, was die Validierung aller denkbaren Ereignisse, aller Fahrzeugvarianten praktisch undenkbar macht. Aus ökonomischer Sicht ist es eine große Herausforderung alle wesentlichen Fahrzustände in gegebenen Zeitrahmen der Entwicklung zu untersuchen. Dies stellt eine grundlegende Änderung konventionelle Motorenentwicklungen dar. [65] [43] [66] [67]

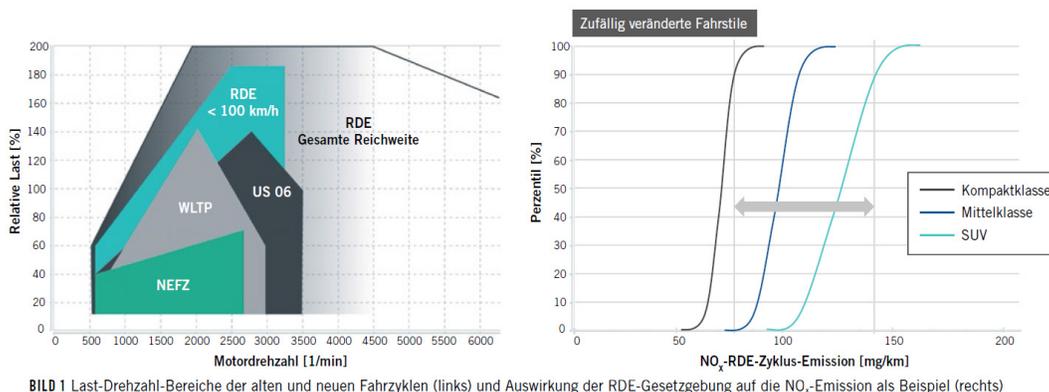


BIld 1 Last-Drehzahl-Bereiche der alten und neuen Fahrzyklen (links) und Auswirkung der RDE-Gesetzgebung auf die NO_x -Emission als Beispiel (rechts)

Abbildung 2-7: Erweiterte Entwicklungsanforderungen [65]

Von einem Paradigmenwechsel in der Antriebstrangentwicklung kann auch deshalb gesprochen werden, da zukünftige Verbesserung sich nicht allein durch große Technologiesprünge, sondern vielmehr aus der Summe vieler kleiner Detailverbesserungen ergeben werden. Die bisherige Erfahrung zeigt, dass ein allgemeingültiger RDE-Ersatztestzyklus, in dem sich komplexe Zusammenhänge in einem völlig reproduzierbaren Bereich abbilden lassen, nicht ausreichend gefunden werden kann. [66]

Ein Grund, weshalb einzelne Testzyklen nicht ausreichen um Probleme innerhalb des gesamten möglichen Betriebsbereichs zu erkennen, ist dass sich im realen Straßenbetrieb Emissionsprobleme aus drei unterschiedlichen Ebenen ergeben: [66]

1. Stationäres Kennfeld (engl. Stationary Engine Map)
2. Dynamikbasierte Effekte (engl. Transient Effects)
3. Ereignishistorie (engl. Event History)

Ad 1.: Probleme die Emissionslimits einzuhalten, können stationären oder quasistationären Ursachen zugeordnet werden. Damit sind beim Ottomotor Kraftstoffanreicherungen im Vollastgebiet zum Bauteilschutz oder div. Spülstrategien in bestimmten Lastpunkten bzw. beim Dieselmotor vor allem Einspritzstrategien oder AGR Raten sowie Ureaeindüsung bei definierten Lastpunkten gemeint [66].

Ad 2.: Dynamikbasierte Effekte sind beim Ottomotor z.B. transiente Kraftstoffzumessung (Gemisch Aufbereitung) und beim Dieselmotor beispielsweise dynamische Luftpfadänderungen wodurch u.U. Problem in der AGR Bemessung entstehen können [66].

Ad 3.: Probleme aus der Ereignishistorie sind im Wesentlichen Temperaturprobleme die sich auf die Abgasnachbehandlung auswirken. So kann bei einem Motorbetrieb in einem unauffälligen Lastpunkt, der zuvor kein Emissionsproblem darstellt, nach längerem Schubbetrieb die Katalysator Light Off Temperatur unterschritten werden und dadurch signifikante Emissionserhöhungen entstehen [66].

Die Methodiken, um die vorgegebenen Limits der bewerteten Schadstoff Emissionen im realen Straßenbetrieb zu unterschreiten, sind vielfältig. Automobilhersteller verfolgen diesbezüglich unterschiedliche Ansätze. Ein möglicher Ansatz ist, gesamte Fahrverläufe in einzelne strengreproduzierbare und bewertbare Einzelelemente zu zerlegen. Einzelne Manöver können dann gruppiert werden und dessen Auswirkungen auf die Summe der Emissionen betrachtet werden. Kritische Manöver können anschließend in unterschiedlichen, zur Verfügung stehenden Entwicklungsumgebungen analysiert bzw. optimiert werden. Denkbare Entwicklungsumgebungen werden in 2.4 beschrieben [68].

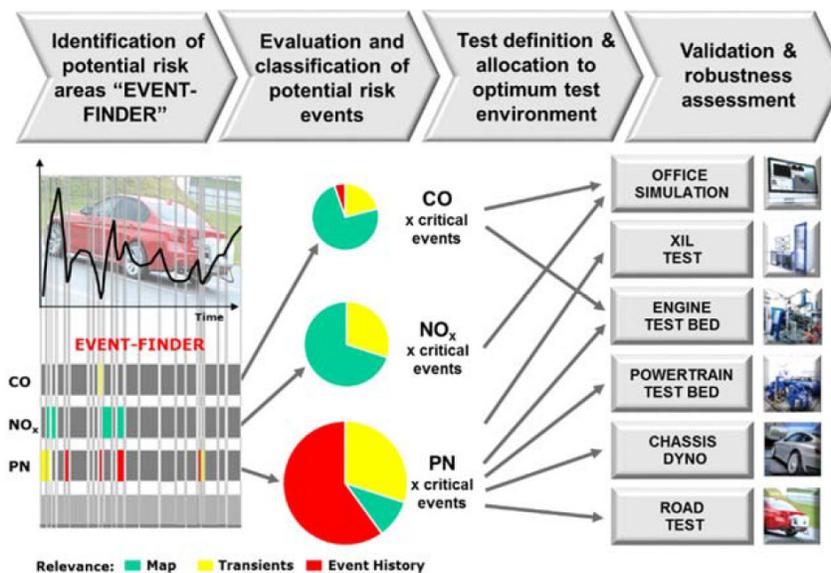


Abbildung 2-8: RDE Entwicklungsmethode [66]

Innerhalb dieser Methode ist die Identifikation einzelner RDE-relevanter Elemente maßgeblich. Zufällige Fahrverläufe können mittels AVL Drive 4.0 in reproduzierbare und bewertbare Elemente (Events), wie Motorstart, Anfahren, Vollast, Schubbetrieb, Schaltvorgängen usw., zerlegt werden. Abbildung 2-9 zeigt eine Auflistung identifizierter Einzelelemente während einer Versuchsfahrt. Aufgezeichnete Fahrzeuglängsdynamik und Emissionen während der Versuchsfahrt werden einzelnen Manövern zugeordnet. So können mittels statistischer

können durch Fahrzeug- und Fahrermodell Belastungen eruiert werden, welche dem Motorprüfstand in Echtzeit übergeben werden um somit den Motor real belasten zu können. [43]

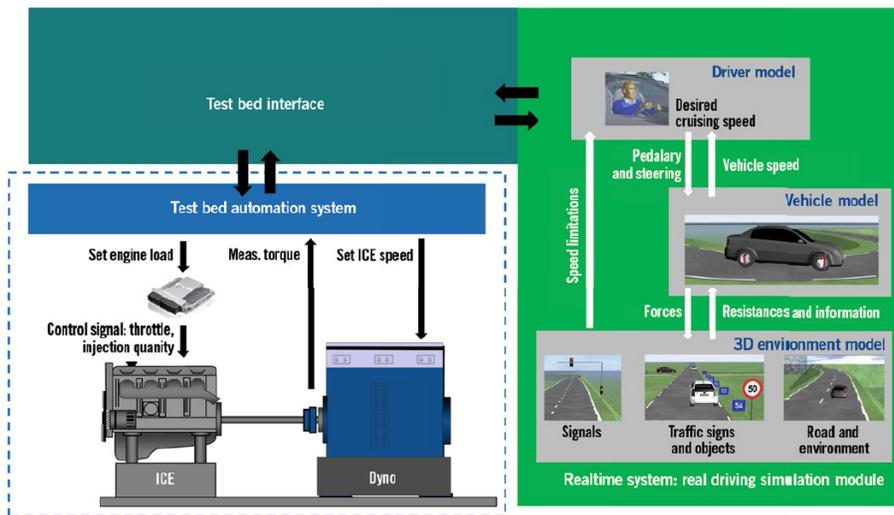


Abbildung 2-11: Engine in the Loop Umgebung [43]

Herausforderungen bei der Implementierung von Echtzeitsimulationen sind Instabilitäten im Regelkreis durch Latenzzeiten, div. Dynamikeinflüsse und Reglerverhalten. Speziell bei dieser Methode ist ein wesentlicher Faktor die Erstellung der Testsequenzen. Hierbei sind antriebsstrangspezifisch, abhängig von der verbauten Motor-, Getriebe- bzw. Abgasnachbehandlungssystem-Technologien unterschiedliche Fahrmanöver emissionskritisch. Beispielsweise sind Downsizing Motoren im niedrigen Drehzahlbereich emissionskritisch in Bezug auf Momentenüberhöhung (Scavenging) für besseres Ansprechverhalten, bzw. verschiedene Abgasnachbehandlungssysteme haben unterschiedliche Anforderungen betreffend div. Lastpunkte in Bezug auf Abgasvolumenströme und daraus resultierender kritischen Raumgeschwindigkeiten. Abhängig von der zu untersuchenden Konfiguration müssen unterschiedliche Fahrmanöver aus einem Katalog herangezogen werden, welche unter reproduzierbaren Randbedingungen am Motorprüfstand untersucht werden können. [69]

2.3.1 Use Cases

Unabhängig der unterschiedlichen Entwicklungsumgebungen werden AVL firmenintern drei grundlegende Herangehensweisen der Antriebstrangentwicklung auf Prüfständen im Zusammenhang mit RDE als Rahmen definiert. Jede der Herangehensweisen wird im Folgenden als „Use Case“ beschrieben. Jeder Use Case findet einen unterschiedlichen Ausgangspunkt sowie unterschiedliche Erkenntnisse des untersuchten Antriebstranges.

Des Weiteren ist eine generelle Strukturierung unterschiedlicher Use Cases sinnvoll um in Gesprächen eine Diskussionsbasis zu schaffen, sodass eine ähnliche Sicht der Dinge auch bei komplexen Zusammenhängen erzeugt werden kann. Anhand der Vielzahl an unterschiedlichen Prüfmethode und Lastsituationen kann und soll allerdings nicht immer eine strikte Trennung einzelner Use Cases erfolgen, da es zu Überschneidungen kommen kann.

Abbildung 2-12 zeigt den Entwicklungsprozess im V-Modell. Das V-Modell beginnt links oben in der Anforderungsdefinition auf Gesamtsystemebene für die virtuelle Produktentwicklung und

Testzyklus) oder CADC sein, sowie unterschiedliche Referenzzyklen die vom Hersteller spezifisch definiert sind.

Im Gegensatz zu Use Case 1 können in diesem Anwendungsfall unterschiedliche Fahrzeuge bzw. Antriebstränge untersucht werden. In diesem Kontext können unterschiedliche Verhalten verschiedener Antriebstränge detailliert beobachtet und auch verglichen werden.

2.3.1.3 Use Case 3 (Virtual Testing)

Use Case 3 beschreibt Anwendungsfälle die ausgehend von der virtuellen Produktentwicklung und Simulation zu Hardwaretests führen. Definitionen bezüglich dem eingesetzten Fahrzeugkonzept und Antriebstrangtechnologien werden zu Beginn fixiert. Die große Anzahl an Freiheitsgraden der Motorbetriebsituationen wird durch Simulationssoftware wie beispielsweise AVL InMotion oder Model.CONNECT abgedeckt. Hierbei können unterschiedliche Betriebsituationen mittels Simulationsmodelle von Fahrzeug, Fahrer und Umgebung erstellt werden und dem Motorprüfstand übergeben werden. Dadurch können Untersuchungen bezüglich Antriebstrangverhalten und Emissionen ähnlich dem realen Straßenbetrieb, einerseits in sehr frühen Entwicklungsstadien unternommen werden und andererseits eine große Anzahl an verschiedenen Varianten und Test Konfigurationen untersucht werden. In diesem Zusammenhang steht die Durchgängigkeit zwischen Simulation und realer Hardware-Integration im Vordergrund. Außerdem steht die Weiterverwendung von Simulationsmodellen in unterschiedlichen Testumgebung bzw. mit steigenden Hardware (Mechanik) Anteilen im Mittelpunkt.

2.4 Entwicklungsumgebungen

In folgenden Betrachtungen werden verschiedene Entwicklungsebenen angeführt die zur Entwicklung von RDE- Antriebsstrangentwicklung eingesetzt werden können. Selbstverständlich gibt es zur Entwicklung von Motoren und Antriebssträngen eine weit vielfältigere Entwicklungs- und Prüfstandslandschaft als hier beschrieben. Beispielsweise werden zur Forschung, Verbrennungsentwicklung oder Basiskalibrierung Einzylindermotorenprüfstände oder Strömungsprüfstände bzw. eine Reihe von Komponentenprüfstände verwendet die natürlich notwendig sind um Motoren möglichst effizient und Schadstoffarm betreiben zu können, allerdings nicht im direkten Zusammenhang mit der RDE Entwicklung stehen.

Dazu ist zu erwähnen, dass zur Entwicklung der Motorbetriebsarten unter realen Fahrbedingungen nicht zwingend alle Entwicklungsumgebungen durchschritten werden müssen. Hier werden von Fahrzeughersteller unterschiedlichste Strategien verfolgt, welche diverse Prüfstandsumgebungen mehr oder weniger beanspruchen bzw. verwenden.

2.4.1 Straßenmessung

Der Straßenmessung wird insofern eine große Bedeutung beigemessen, da letztendlich die RDE Überprüfungsfahrt durch Messung der Realemissionen am Pkw mittels portabler Emissionsmesstechnik (PEMS) im Straßenbetrieb erfolgt.

Schwere Nutzfahrzeuge werden seit 1. Jänner 2013 mit Einführung der Richtlinie ECE R49 ISC – HD Euro 6 mit PEMS Messungen überprüft [61]. Für mobile Geräte und Maschinen plant die EU Kommission mit Einführung der Grenzwertstufe 5 auch Emissionsmessungen während dem Real Betrieb im Feld. Während Pkw Emissionsmessungen im Real Betrieb unter dem Begriff Real Driving Emissions (Abk. RDE) zusammengefasst werden, werden Nutzfahrzeuge im selben Zusammenhang mit dem Terminus In Service Conformity (Abk. ISC) beschrieben [71].

Das grundlegende Messprinzip der Gas PEMS Messung sieht am Beispiel des AVL M.O.V.E. Systems folgende Schritte vor. Aus dem Abgassystem wird ein konstanter Volumenstrom von 3,5l/min Rohabgas entnommen und an einem beheizten Filter Feststoffpartikel abgeschieden. Das entnommene und gefilterte Abgas wird in zwei gleiche Teile aufgeteilt. Ein Teil wird zum Flammen-Ionisations Detektor (Abk. FID) geleitet und der andere Teil zum Nichtdispersive Infrarotsensor (Abk. NDIR) und UV- Resonanz Absorption Spektrometer (Abk. UV – RAS) sowie zum O₂ –Messgerät geleitet. Der Abgasanteil der zum FID geführt wird, wird konstant auf 191°C beheizt. Im Gegensatz dazu wird der zweite Teilstrom in einem zweistufigen Kühler auf Umgebungstemperatur gekühlt, wobei bereits nach der ersten Kühlstufe der mittels dem UV-RAS Analysator die NO und separat die NO₂ Konzentration gemessen wird. Nach der NO und NO₂ Messung wird der Abgasstrom ein weiteres Mal geteilt. Wobei hier der Teil des Abgases der zur CO und CO₂ Messung am NDIR Analysator geführt wird die zweite Kühlerstufe passiert und der restliche Teil ohne weitere Kühlung zur Sauerstoffmessung geführt wird. [72]

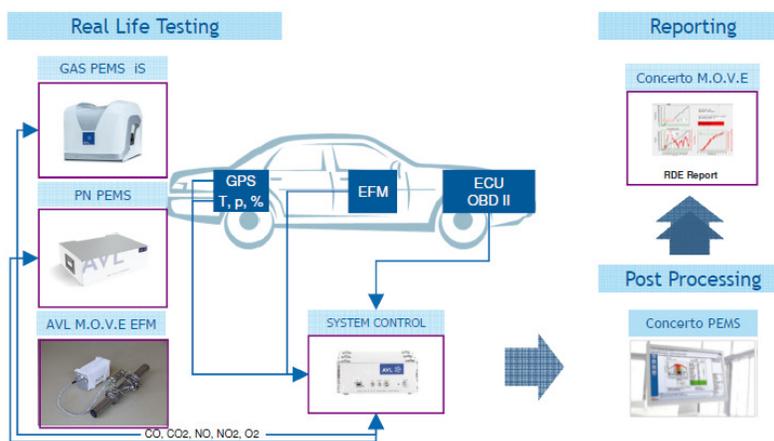


Abbildung 2-13: Schematischer Aufbau PEMS Installation [73]

Abbildung 2-13 zeigt den Aufbau der Komponenten zur PEMS Messung. Die Zentrale Einheit ist der System Controller der die Messdaten aller Komponenten aufzeichnet und dem Post-processing Werkzeug (AVL CONCERTO PEMS) zur Nachverarbeitung bzw. Bewertung übergibt. Im Controller werden die Messergebnisse der GAS PEMS Messung sowie die Partikelanzahl aus der PN PEMS Messung aufgezeichnet. Um aus den ermittelten Konzentrationen streckenbezogene Massenanteile berechnen zu können wird einerseits der Abgasmassenstrom mittels einer Differenzdruck Methode im AVL M.O.V.E EFM (EFM = Abk. Exhaust Flow Meter, dt. Abgasstrom Messung) ermittelt und andererseits durch Auswertung der GPS Daten die Strecke berechnet und zur Datenverarbeitung herangezogen. Darüber hinaus werden eine Reihe zusätzlicher Messdaten wie Höhe, Straßensteigung, Druck, Temperatur uvm. unter anderem aus der Motorsteuerung ausgelesen und aufgezeichnet. Für eine gültige Bewertung der PEMS Messung sind eine Vielzahl von Parameterdaten notwendig. [73]

2.4.2 Rollenprüfstand

Der Rollenprüfstand nimmt eine wichtige Rolle ein, da Rollenprüfstände neben Antriebstrangprüfständen die einzige Umgebung sind, in der das gesamte Fahrzeug mit vergleichbar hoher Reproduzierbarkeit Tests und Messungen unterzogen werden können. Diese Art von Prüfständen wird als Integrationsprüfstand in Forschung und Entwicklung für

verschiedenste Aufgaben sehr flexibel eingesetzt. Der Einsatz reicht von Verbrauchs- und Leistungsmessungen, über Messungen der elektromagnetischen Verträglichkeit bis hin zu Emissions Messungen. Emissionsmessungen im Bereich Schallemission sowie Schadstoffemissionen nehmen hier eine Sonderstellung ein, da diese Fahrzeugemissionen gesetzlich limitiert sind. Speziell der Ausstoß von Schadstoffemissionen wird wie bereits beschrieben, am Rollenprüfstand mittels der CVS Methode, gemäß gesetzlicher Vorgaben nachvollzogen. Dies bedeutet dass Rollenprüfstände in der Antriebstrang Applikation bis hin zu Homologation von großer Bedeutung sind. Aus diesem Grund ist die Methode zur Bestimmung der Schadstoff Emissionen während dem Fahrzeugbetrieb gut erprobt. Das bedeutet dass die Konzentrationen einzelner Abgaskomponenten nicht nur anhand der CVS Methode durchgeführt, sondern unverdünntes Abgas direkt analysiert werden kann. Wenn notwendig können aus dem Abgasstrang während dem Betrieb aus mehreren Stellen entnommen und analysiert werden. [14]

In Bezug auf die geänderte Euro 6d Gesetzgebung sind eine Reihe von Änderung zu beachten. Grundlegend gilt als Basis der Schadstoffemissionsmessungen eine geänderte Global Technical Regulation (Abk. GTR) welche sich in einigen Punkten zur Vorgängerregulierung gravierend ändert. Primär wird der bestehende genormte Testzyklus „Neuer Europäischer Fahrzyklus“ (Abk. NEFZ) durch die „World Harmonized Test Procedure“ (Abk. WLTP) ersetzt. Das bedeutet, dass eine weit dynamischere Geschwindigkeitsspur als zuvor herangezogen wird. Zudem sind in der neuen GTR-No.15 keine fixen Zeitpunkte für Getriebeschaltvorgänge festgelegt, sondern es müssen fahrzeugspezifische Algorithmen zur Bestimmung der Schaltpunkte herangezogen werden. Das Fahrwiderstandspolynom wird durch eine geänderte Vorgehensweise bestimmt, was mehr Realitätsnähe bei Verbrauch und Emissionen erwarten lässt. [74]

Weitere Änderungen in Bezug auf den Betrieb der Rollenprüfstände sind zu erwarten da die Applikation von Realfahrten zusätzliche Anforderungen stellt. Als Beispiel sei hier angeführt, dass bei der Reproduktion einer durchgeführten Realfahrt auf der Straße etwaige Steigungen und Gefälle abzubilden sind. Einerseits muss der Steigungswiderstand anhand der Rollensteuerung durch einen zusätzlichen Term im Fahrwiderstandspolynom ($m \times g \times \sin(\alpha)$) den Dynamometern übergeben werden und andererseits muss dem Prüfstandsfahrer diese zusätzliche Information der Steigungsänderung übermittelt werden, da sich selbstverständlich der Fahrwiderstand für den Fahrer merklich ändert. Zur Reproduktion von Realfahrten sind Änderungen des Fahrwiderstandspolynoms auch deshalb anzupassen da sich abhängig der Verkehrssituation der Luftwiderstand ändern kann, wenn beispielsweise das Versuchsfahrzeug im Windschatten eines Lkw fährt. Darüber hinaus gibt es eine Menge andere Einflussgrößen welche die Randbedingung für den Rollenprüfstandtest ändern können.

2.4.3 Antriebsstrangprüfstand

Stark wachsende Anforderungen an die Verbrauchs- resp. Emissionssziele und Kundenanforderungen, wie Leistungsanforderung und Fahrkomfort bei erhöhtem Innovationsdruck durch den Mitbewerber am Markt, bei gleichzeitig kürzeren Entwicklungszeiten, stellen eine große Herausforderung für die Automobilwirtschaft dar. Um diesen Herausforderungen begegnen zu können haben Antriebstrangprüfstände an Stellenwert gewonnen. Die Bedeutung hat insofern zugenommen als große Fortschritte bezüglich Verbrauch, Emissionen und Fahrbarkeit nur im Gesamtverbund des Antriebstrangs durch optimale Abstimmungen einzelner Komponenten erzielt werden können. Die Bedeutung hat auch deshalb zugenommen weil die Anzahl und Komplexität der Antriebstrangkomponenten stetig steigt. Um bei steigenden Variantenwachstum kurze Entwicklungszeiten realisieren zu können sind mehrere Faktoren notwendig. Mit dem Einsatz von Simulationssoftware (z.B.

AVL VSM - Vehicle Simulation Model) können verschiedene Fahrzeugvarianten mittels nur einem am Prüfstand aufgebauten Antriebstrang getestet werden. Einzelne Fahrzeug Applikationen können dabei eine große Vielzahl an verschiedenen Manövern beobachten werden, da das Simulationsmodell sehr einfache Änderungen an der Testkonfiguration wie unterschiedliche Schlupfzahlen und dergleichen einzelnen Räder resp. Abtriebsachsen erlauben. Antriebstrangprüfstände besitzen üblicherweise einen ausreichenden Grad an Modularität sodass Antriebstränge auch in verschiedenen Entwicklungsphasen getestet werden können. Antriebstrangprüfstände können je nach Anwendungszweck unterschiedliche Ausprägungen auf dessen Aufbauvarianten haben. Abbildung 2-14 zeigt unterschiedliche Antriebstrang Konfigurationen. Beginnend bei sogenannten Powerpack Konfiguration, bei der der Antriebsmotor inklusive Getriebe mit einer Belastungsmaschine in verschiedenen Betriebsituationen getestet werden kann, können Antriebstrangprüfstände je nach Konfiguration, speziell für Allradantriebe mit bis zu vier Belastungsmaschinen ausgeführt sein. [14]

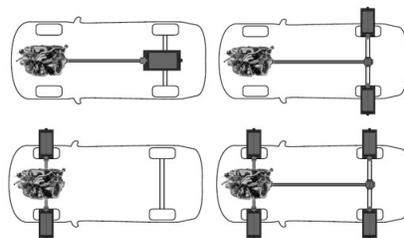


Abbildung 2-14: Antriebstrangprüfstand Konfiguration [14]

Die Belastungsmaschinen die anstatt der Räder an den Naben angeflanscht werden, sind meist hochdynamische permanenterrregte Synchronmaschinen mit geringen Massenträgheitsmomenten sodass das Eigenschwingungsverhalten des Antriebstrangs identisch zum realen Fahrversuch ist. Ein höheres Massenträgheitsmoment der Belastungsmaschine als das vom ursprünglich montierten Rad würde zu erhöhter Last bzw. Stößen und Ruckeln im Prüfstandsbetrieb führen. Dies gilt speziell bei Manövern bei dem das Rad die Traktion verliert. Durch die so hergestellten realitätsnahen Bedingungen am Prüfstand können Untersuchungen unterschiedlichen Betriebsituationen unternommen werden. Da die Anzahl der zu Prüfenden Varianten, Betriebsituationen und Lastpunkte in Bezug auf RDE Untersuchungen sehr weitläufig sind, ist es von Vorteil eine große Bandbreite verschiedener Untersuchungen in dieser Prüfstandsumgebung durchführen zu können. Völlig automatisierter Prüfstandsbetrieb und schnelle Konditionierung der Prüfeinheiten unter anderem durch Austausch der Betriebsmedien lässt zudem die benötigte Zeit am Prüfstand erheblich verkürzen. Durch zusätzlichen Einsatz von DoE- Software (Design of Experiment) wie z.B. AVL CAMEO können hier auch völlig automatisierte Rasterungen bzw. Optimierungen in Bezug auf Emissionen vorgenommen werden. [75]

2.4.4 Hardware in the Loop

Im Bereich der Emissionskalibrierung nimmt die Modellbasierte Entwicklung am HiL (Hardware in the Loop) Prüfstand seit Jahren an Bedeutung zu. Die Gründe dafür sind vielschichtig. Im Vordergrund steht zum einen die Erweiterung der Anforderungen in mehrere Hinsicht wie Einhaltung der Grenzwerte, Kraftstoffverbrauch und erweiterter Zertifizierungsbereich in Bezug auf RDE und zum anderen die stark gestiegenen Anzahl der möglichen Variationsparameter an modernen Antrieben. In beiden Fällen steigt die Anzahl der Versuche um Optima zu finden in einen Bereich der es unter ökonomischen Bedingungen

praktisch unmöglich macht alle dankbaren Kombinationsmöglichkeiten real zu testen. Eine Abhilfe ist die modellbasierte Entwicklung die als Erweiterung des DoE- Ansatz (Design of Experiments, statistische Versuchsplanung) verstanden werden kann. Hierbei besteht die Möglichkeit eine umfangreiche Vor-Bedatung von emissionsrelevanten Korrekturen in Hardware in the Loop- (HiL) oder Software in the Loop- (SiL) Entwicklungsumgebungen in frühen Entwicklungsstadien durchzuführen. Darüber hinaus kann das erstellte Modell während der gesamten Applikationsphase bis hin zum Beginn der Serienproduktion verwendet werden. Der modellbasierte Ansatz hat einen großen Vorteil in der Extrapolationsfähigkeit in Bezug auf Hardwareänderungen, dynamisches Motorverhalten sowie variierende Druck und Temperaturparameter (Höhen- /Klimatests). Basis dafür ist ein semi-physikalischer Modellansatz. Hierbei wird ein empirisches Modell, das sich am Motorprüfstand kalibrieren lässt mit physikalischen Gesetzmäßigkeiten erweitert. Das empirische Modell deckt dabei sehr komplexe Zusammenhänge wie Verbrennungsvorgänge ab. Zur Bedatung der empirischen Modelle werden Antwortgrößen bei verschiedenen Eingangsbedingungen am realen Motor analysiert sodass zeitfreie Systemantworten als Funktion variierender Eingangsgrößen beschrieben werden können. Bekannte Physikalische Zusammenhänge werden herangezogen um Vorgänge im Ladungswechsel oder im Abgasnachbehandlungssystem zu beschreiben. Abbildung 2-15 strukturiert die verwendeten Begriffe bildlich. Durch die Kombination aus physikalisch- und empirischen (= Semiphysikalische) Zusammenhängen kann das parametrisierte Modell in Bereiche extrapolieren werden die, mit realen Messungen am Prüfstand nicht verifiziert werden müssen. Beispielsweise lassen sich durch thermodynamische Zusammenhänge die Parameter, welche durch Druckänderung (Höhensimulation) variieren, sich im Modell als Funktion der Höhen beschreiben. Neben beliebigen Umgebungszuständen lassen sich auch eine hohe Anzahl transients Lastspuren untersuchen. Untersuchungen zeigen dass Emissionen am Abgasendrohr sich mit 10% Fehler vorhersagen lassen. [76] [65]

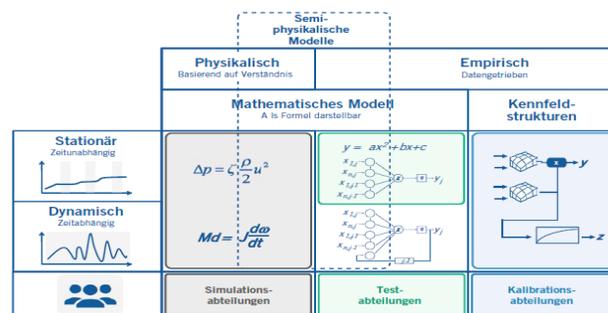


Abbildung 2-15: Modellstrukturierung [65]

Abbildung 2-16 zeigt schematisch, ohne Skalierung, den ursprünglichen Zeitaufwand in den Entwicklungsumgebungen Motorprüfstand und Fahrzeugmessungen in grauen Balken. Ein Teil der zusätzlichen Aufwände durch beschriebene Herausforderungen in Bezug auf RDE Entwicklung kann mit dem Einsatz von Semiphysikalischen Modellansätzen in frühere Entwicklungsstadien verschoben werden. Dies bedeutet eine Reduktion von Prototypen – Hardwaretests was mit einer Zeitersparnis in kostenintensiven Entwicklungsumgebungen einhergeht. [76] [65]

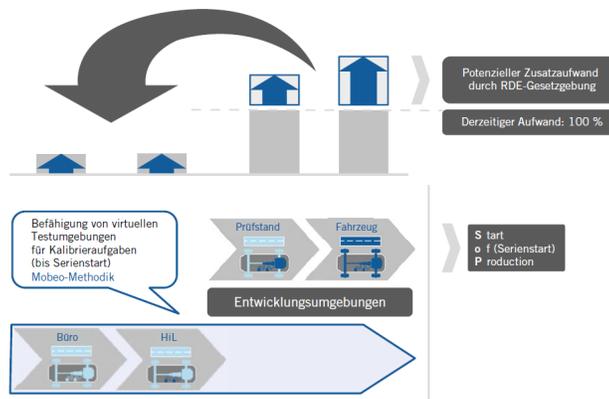


Abbildung 2-16: Frontloading [65]

2.5 Entwicklungsaufgaben am Motorprüfstand

In diesem Kapitel wird der Motorprüfstand und dessen Rolle in der RDE Entwicklung betrachtet. Zu diesem Zweck wird zu Beginn in Absatz 2.5.1 eine allgemeine Analyse der identifizierten Einflussparameter, die sich auf die Fahrzeugemissionen auswirken, beschrieben. In Unterpunkt 2.5.2 wird eine theoretische Motorprüfstandsumgebung beschrieben um die identifizierte Einflussfaktoren (2.5.1) einer Realfahrt im Labor nachempfinden zu können. Abschließend werden dezidierte Aufgabenbereiche ausgearbeitet die im Zuge von RDE Entwicklung in der Motorprüfstandsumgebung übernommen werden können.

2.5.1 Analyse der Einflussparameter auf Emissionen

Um die Einflussfaktoren auf entstehende Emissionen zu verifizieren wurde ein Top – Down Betrachtungsprinzip gewählt. Beginnend mit einer sehr allgemeinen Ein-/Ausgangsgrößen Analyse (Abbildung 2-17) wurden fortführend tieferliegende Einflussparameter festgestellt.

Der Einfluss verschiedener Fahrstile auf die entstehenden Emissionen wurde in Abbildung 2-7 bereits beschrieben. Der Fahrer gibt die gewünschte Beschleunigung bzw. Fahrgeschwindigkeit über die Drehmomentvorgabe am Motor vor. Im Fall eines Antriebstrangs mit manuellem Getriebe werden Schaltzeitpunkte ebenfalls vom Fahrer festgelegt.

Der Kraftstoff nimmt primär Einfluss auf die Motorbetriebsart und Verbrennung. Quantitative Kraftstoffregelung bei ottomotorischer Verbrennung und qualitative Regelung bei dieselmotorischer Verbrennung.

Variierende Umweltbedingungen spielen in Bezug auf Emissionen im realen Straßenbetrieb eine große Rolle. Auch deshalb weil ein großer Teil der Umweltbedingungen bis jetzt durch genormte Testzyklen in Bezug auf Emissionen nicht beachtet wurde. Unter Umweltbedingungen werden Temperatur, Druck, Witterung, Fahrbahneigenschaften, Kurven, Verkehr uvm. verstanden.

Die beschriebenen Randbedingungen haben in unterschiedlichen Fahrzeugen verschiedene Auswirkungen da je nach Antriebstrang verschiedene Lastsituationen sich problematisch auf Emissionen auswirken können. Je nach Fahrzeugdesign und Antriebstrang-Packaging werden Motor, Kühler und Abgasnachbehandlungssysteme vom Fahrtwind unterschiedlich angeströmt, sodass sich unterschiedliche Temperatursituationen und damit unterschiedliche Wirkungsgrade bzw. Konvertierungsraten einstellen. Fahrzeugspezifisch sind natürlich auch Fahrzeugmassen, Massenträgheitsmomente, Fahrwerk und Reifeneigenschaften bzw. Reibmomenten und

Aerodynamik die zu fahrzeugspezifischen Fahrwiderstandskurven führen.

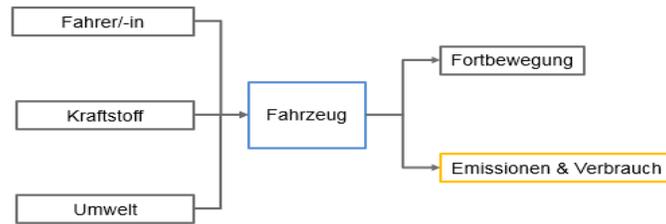


Abbildung 2-17: Ein-/Ausgangsgrößen Analyse [77]

Als Ausgangsgrößen dieser Analyse werden einerseits die Fortbewegung der Personen und Güter und der damit einhergehende Kraftstoffverbrauch und andererseits die Emissionen definiert. Emissionen können in diesem Fall als Überbegriff aller anfallenden Emissionen wie Lärm aber auch Schadstoffe betrachtet werden.

Bei genauerer Betrachtung werden die anfallenden Schadstoffemissionen grundlegend von zwei Faktoren maßgeblich beeinflusst. Einerseits die innermotorische Verbrennung und zum anderen die Abgasnachbehandlung. Während des Verbrennungsvorgangs werden die im Kraftstoff vorhandenen Kohlenwasserstoffe mit Verbrennungsluft möglichst vollständig verbrannt. Die Basismotorverbrennung spielt insofern eine wichtige Rolle als hier ein Großteil der Schadstoffemissionen vermieden werden kann und darüber hinaus die Güte der Verbrennung sich im Verbrauch und der abgegebenen Motorleistung niederschlägt. Andererseits spielt für die Masse der emittierten Schadstoffe am Endrohr die Abgasnachbehandlung eine große Rolle. Grund dafür ist, dass durch die Verbrennungsentwicklung nicht für alle Betriebspunkte die Entstehung der limitierten Schadstoffe unterhalb der vorgegebenen Grenzwerte gehalten werden kann. Das bedeutet, dass ein Teil der entstandenen Schadstoffe durch chemische Reaktionen in unschädliche Stoffe konvertiert werden, wie beispielsweise in 3-Wege-Katalysatoren oder SCR Systemen, bzw. in Filtersystemen wie Partikelfilter oder NO_x Trap gespeichert und regeneriert werden.

Abbildung 2-18 zeigt eine Aufstellung der Einflussfaktoren auf Kraftstoffverbrauch und Emissionen basierend auf zwei grundlegende Einflussgrößen - der innermotorischen Verbrennung und der Abgasnachbehandlung. Beide Einflüsse sind abhängig von unterschiedlichen Zusammenhängen. Im Weiteren werden die Einflüsse der Realfahrt auf die Verbrennung sowie auf die Abgasnachbehandlung getrennt voneinander betrachtet.

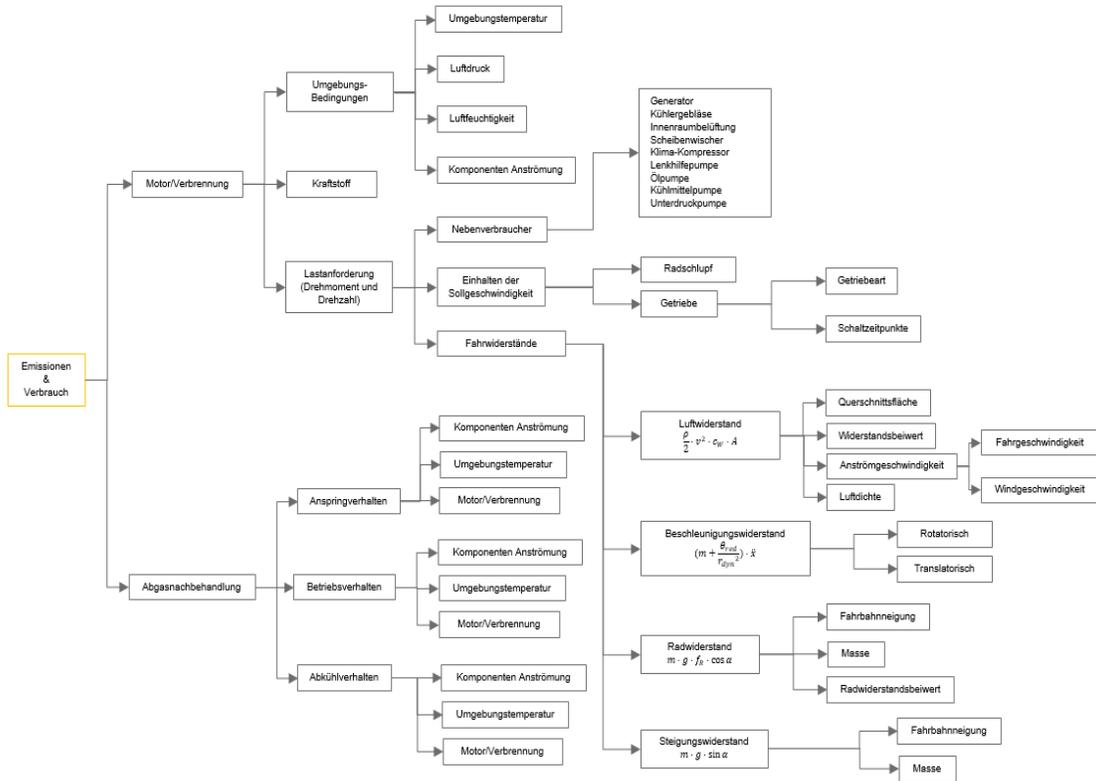


Abbildung 2-18: Einflussfaktoren auf Emissionen und Verbrauch [77]

2.5.1.1 Einflussfaktoren Innermotorischen Verbrennung

Einflussgrößen auf den Motor bzw. die innermotorische Verbrennung können in drei Gruppen unterteilt werden:

- Lastanforderung
- Kraftstoff
- Umgebungsbedingungen

Abbildung 2-19 zeigt eine Einteilung der identifizierten Einflussfaktoren der Verbrennung.

Die Lastanforderung wird primär durch den Fahrer vorgegeben. Der Fahrer gibt mittels Fahrpedalstellung eine gewünschte Geschwindigkeit und somit ein Drehmoment bzw. über das Getriebe die Drehzahl vor. Um die gewünschte Fahrzeuggeschwindigkeit zu erreichen muss das notwendige Motormoment zusätzlich den Anteil zur Überwindung der Fahrwiderstände und Leistungsanforderung der Nebenverbraucher bereitstellen. Eine Aufstellung an möglichen Nebenverbraucher ist in Abbildung 2-19 gezeigt. Die Leistung der Nebenverbraucher wird entweder über Riementriebe oder über das elektrische Bordnetz vom Motor abgefragt welches vom Generator (Lichtmaschine) versorgt wird. Die Zusammensetzung der Fahrwiderstände wird separat in Abbildung 2-21 aufgezeigt.

Die gespeicherte chemische Energie im Kraftstoff wird durch die Verbrennung zunächst in thermische und daraus folgend in mechanische Energie umgewandelt. Die Zusammensetzung und Eigenschaften der Kraftstoffe sind unterschiedlich. Kraftstoffstandards, Zusammensetzung und Eigenschaften sind in der World-Wide Fuel Charter beschrieben [78]. Speziell auf Emissionen ist die Art der Luft-Kraftstoff Gemischbildung von großer Bedeutung. Stand der

Technik sind aufgeladene, direkt einspritzende Motoren (Abk. TDI = Turbocharged Diesel Direct Injection bzw. TGDI= Turbocharged Gasoline Direct Injection) wobei hierbei der Kraftstoffeinspritzdruck bzw. Strahlbild und Ladungsbewegung einen erheblichen Einfluss auf die Schadstoffbildung haben. Die optimale Kalibrierung der zur Verfügung stehenden Variationsparameter ist üblicherweise Teil der Thermodynamik- und Verbrennungsentwicklung des Grundmotors [50].

Im Realbetrieb wird der Verbrennungsmotor durch die Umgebung mit äußeren Einflüssen betrieben die unterschiedlich auf die Entstehung von Emissionen auswirken. Die Umgebung ist durch die Umgebungstemperatur, den Luftdruck und die Luftfeuchtigkeit definiert. Darüber hinaus ist die Motorraumdurchströmung durch die Fahrzeuggeschwindigkeit zu berücksichtigen [77].

Die Umgebungstemperatur und der Luftdruck wirken sich über den Zusammenhang der idealen Gasgleichung direkt proportional auf die Luftdichte aus. Die Anteile Wasser- und trockene Luft des Realgases, beschrieben durch die rel. Luftfeuchtigkeit, müssen ebenfalls zur Ermittlung der Luftmasse berücksichtigt werden. Die Luftmasse ist eine Grundgröße der Verbrennung und damit im direkten Zusammenhang mit Kraftstoffverbrauch und Emissionen. Auch wegen der Inertwirkung der Wasseranteile in der Verbrennungsluft hat die Luftfeuchtigkeit einen Einfluss auf die Verbrennung. Niedrige Umgebungstemperaturen beeinflussen stark das Motorstartverhalten und die Reibleistung zufolge erhöhter Viskosität der Motorschmierung und längerer Aufwärmphasen der Kühlmittel [79] [55] [80].

Die Anströmung durch die Fahrzeuggeschwindigkeit im Motorraum beeinflusst je nach Fahrzeugbauart die Kühlwasser- bzw. Motoröl-Wärmetauscher welche für die Temperatur der Motormedien verantwortlich ist. Die Motormedien sind für Aufheiz- und Kühlverhalten des Motors verantwortlich.

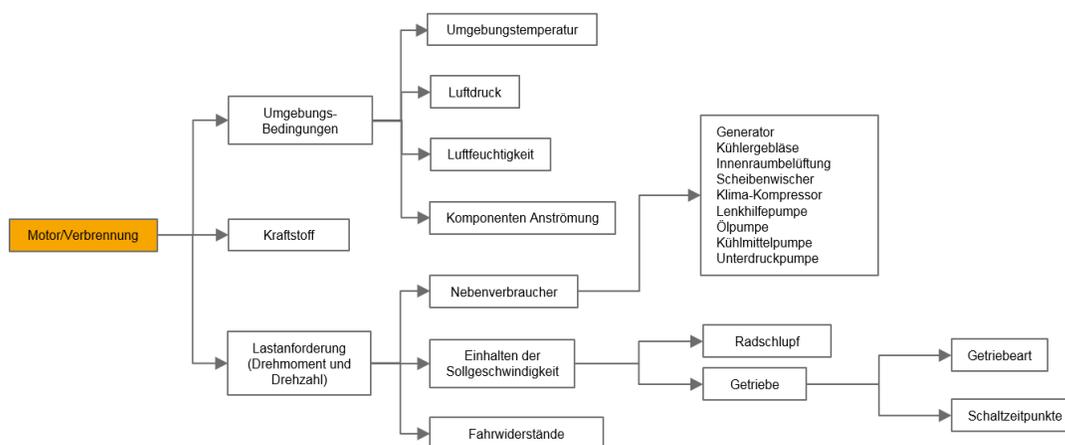


Abbildung 2-19: Einflussfaktoren der Innermotorischen Verbrennung [77]

Der Fahrwiderstand als Anteil der Lastanforderung setzt sich aus Luftwiderstand, Beschleunigungswiderstand, Radwiderstand und Steigungswiderstand zusammen. Abbildung 2-21 zeigt eine Aufstellung der Widerstände und deren Einflussgrößen.

Der Luftwiderstandskraft berechnet sich aus der Luftdichte, dem dimensionslosen Widerstandsbeiwert, der projizierten Anströmungsfläche des Fahrzeugs und der Relativgeschwindigkeit zum Medium im Quadrat. Die relative Geschwindigkeit im Medium

entspricht bei Windstille der Fahrzeuggeschwindigkeit und bei auftretendem Wind muss bei genauer Betrachtung der Anteil in Bewegungsrichtung berücksichtigt werden. Dies gilt auch bei Überholvorgängen von Fahrzeugen wo durch Sogwirkung Luftströme quer zur Fahrzeugbewegungsrichtung auftreten können, die den Fahrwiderstand beeinflussen können. Fahrzeuge im realen Straßenverkehr bewegen sich zudem im Umfeld anderer Verkehrsteilnehmer. Speziell bei Fahrzeugen in Kolonnenfahrt ändert sich der Luftwiderstandsbeiwert des vorausfahrenden und des folgenden Fahrzeugs in Abhängigkeit des Folgeabstands der Fahrzeuge. [81]

Der Beschleunigungswiderstand kommt zu tragen wenn die momentane Fahrzeuggeschwindigkeit erhöht oder verringert wird. Der Beschleunigungswiderstand setzt sich aus einem translatorischen- und rotatorischen Anteil zusammen. Einflussparameter der Beschleunigungswiderstandskraft sind die gesamte Fahrzeugmasse, die Massenträgheitsmomente des gesamten Antriebsstrangs reduziert auf ein Rad, der dyn. Reifendurchmesser und letztendlich die gewünschte Beschleunigung oder Verzögerung. [82]

Die Radwiderstandskraft berechnet sich aus dem Anteil der Fahrzeuggewichtskraft die normal auf die Fahrbahnoberfläche wirkt, multipliziert mit dem dimensionslosen Radwiderstandsbeiwert. Im Radwiderstandsbeiwert werden Anteile der Widerstandskraft folglich der Walkarbeit des Reifens, Lagerreibung, Luftwiderstand bis hin zu Widerstände aufgrund des Reifenschräglaufs berücksichtigt. [83]

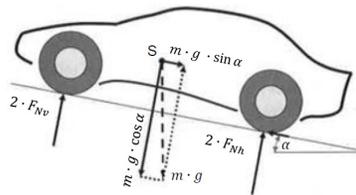


Abbildung 2-20: Fahrzeug Gewichtskraftkomponenten [84]

Im Gegensatz zur Radwiderstandskraft berechnet sich die Steigungswiderstandskraft aus dem Anteil der Gewichtskraft die parallel zur Fahrbahnoberfläche, in Fahrzeuginnenrichtung wirkt. [85] Abbildung 2-20 zeigt die beschriebene Aufteilung der Gewichtskraft in zwei Komponenten.

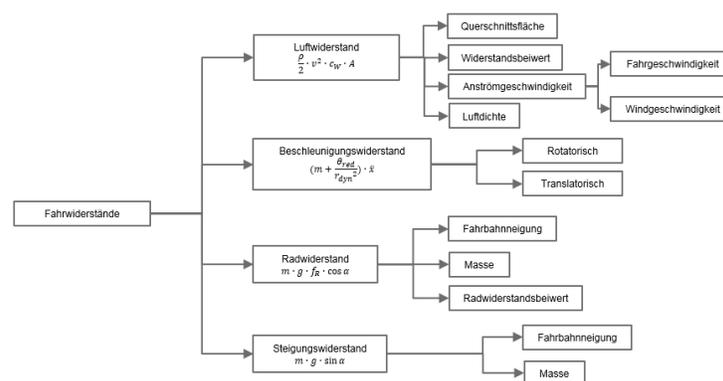


Abbildung 2-21: Fahrwiderstände [77]

2.5.1.2 Einflussfaktoren der Abgasnachbehandlung

Um die geltenden Schadstoffgrenzwerte zu erreichen ist neben möglicher Minimierung der Schadstoffbildung durch die Verbrennung in den meisten Fällen eine Abgasnachbehandlung notwendig. Die Reduktion der entstandenen Emissionen durch katalytische Konvertierung oder Filterung inkl. Filterregeneration ist Aufgabe der Abgasnachbehandlung. Die eingesetzte Technik ist sehr unterschiedlich und variiert sehr stark. Bei Benzinmotoren sind 3-Wegekatalysatoren Stand der Technik. Allerdings ist es nicht auszuschließen, dass zukünftig Partikelfilter Einsatz finden um die Grenzwerte im Realbetrieb nicht zu überschreiten. Bei Dieselmotoren werden Oxidationskatalysatoren und Partikelfilter weitestgehend eingesetzt und zur Reduktion der Stickoxide, SCR-Systeme oder NO_x -Speicher-katalysatoren verbaut. Die angewandten Technologien der Abgasnachbehandlung benötigen Mindesttemperaturen um wirksam zu werden. Die Temperaturschwelle, ab der die gewünschte Konvertierung bzw. Reduktion der Schadstoffe stattfindet, wird Light-Off Temperatur bezeichnet. Das Erreichen der Light-Off Temperatur (Anspringverhalten bzw. Abkühlverhalten) ist damit entscheidend für die Wirksamkeit der eingesetzten Abgasnachbehandlung. Der Einfluss der Umgebungstemperatur auf das Nachbehandlungssystem ist insofern zu erklären dass bei niedrigen Umgebungstemperaturen die Dauer entsprechend länger ist, bis die spezifische Light-Off Temperatur erreicht wird. Eine ungünstige Anströmung (Konvektion) der Nachbehandlungskomponente kann thermische Energie in einer Größenordnung abführen, die sich merkbar negativ auf die Bauteiltemperatur auswirkt. Die Anlage wird üblicherweise nach dem Motorstart durch die eingebrachte thermische Energie der Verbrennung aufgeheizt. Dementsprechend wird speziell in der Kaltstartphase eines Motor durch Erhöhung der zugeführten Kraftstoffmenge die Abgasnachbehandlung möglichst rasch auf Betriebstemperatur gebracht (Kat-Heiz Phase Applikation). [55]

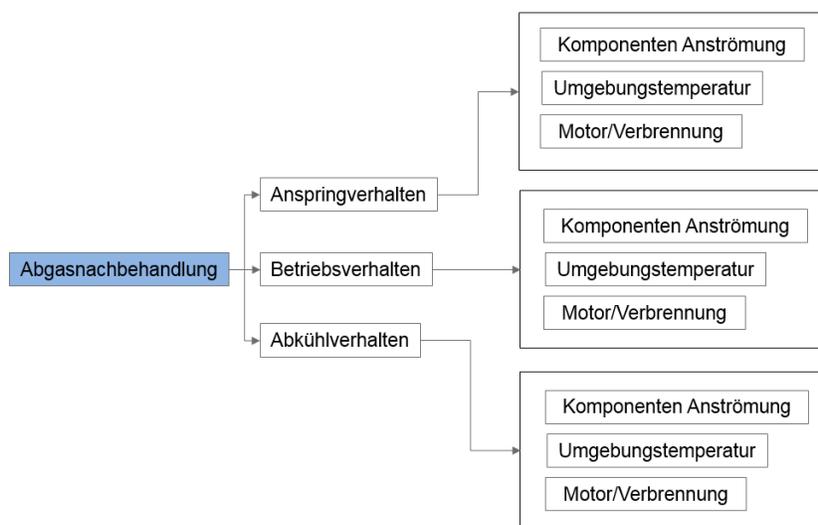


Abbildung 2-22: Einflussfaktoren der Abgasnachbehandlung

Je nach verbauter Abgasnachbehandlung ist das Betriebsverhalten nach Erreichen der Light-Off Temperatur von mehreren Faktoren abhängig. Beispielsweise im Fall von niedriger Umgebungstemperatur, ungünstiger Konvektion und oder langen Motorschubbetrieb kann beispielsweise die Katalysator-Temperatur in einen Bereich fallen in dem eine ausreichende Schadstoffkonvertierung nicht möglich ist. Bei SCR-Katalysatoren wird die Menge der eingedüste Harnstofflösung entweder kennfeldbasiert als Funktion von Abgastemperatur und

Massenstrom bestimmt. Wobei der Abgasmassenstrom und dessen Temperatur wiederum abhängig von der Motorlast bzw. der Verbrennung sind [86]. Oder, alternative kann die notwendige Harnstoffmenge durch verbaute NO_x Sensoren bestimmt werden.

2.5.2 Motorprüfstandsgebung

Motorprüfstände können für unterschiedliche Zielsetzungen konzipiert werden. So werden beispielsweise Einzylindermotorprüfstände vorwiegend für Forschungszwecke der Verbrennung verwendet, Motor-Dauerlaufprüfstände zur Sicherstellung der Haltbarkeit und Langzeitstabilität. Bandende- (engl. End of Line) bzw. Produktionsmotorprüfstände werden zur Überprüfung der Produktionsqualität eingesetzt. [14]

Um Motoren für EURO 6d und dessen RDE Anforderung zu entwickeln werden Funktions- und Emissionsmotorenprüfstände verwendet. Hiermit kann der Nachweis und die Absicherung von motorbezogenen Gesamtfunktionen erbracht, und der Ausstoß von Emissionen unter unterschiedlichen Bedingungen beobachtet werden. Motorenprüfstände mit einem möglichst weiten Einsatzgebiet besitzen üblicherweise folgende Hauptbestandteile: [14]

- Belastungsreinrichtung
- Prüfstandsmechanik
- Motormedienkonditionierung
- Verbrauchsmesseinrichtung für Kraftstoff, Verbrennungsluft und Harnstoff (AdBlue)
- Temperatur- und Druckmessketten für div. Messstellen
- Verbrennungsdiagnose Messtechnik
- Abgasmesstechnik
- Motorsteuergerät (ECU) Schnittstelle
- Prüfstandsautomatisierung
- Kalibrierwerkzeuge

In Abbildung 2-23 werden wichtige Komponenten der Motorprüfstandsgebung gezeigt. Zu den jeweiligen Subsystemen sind jene Parameter aus 2.5.1 angeführt die dargestellt werden müssen um einen möglichst realitätsnahen Prüfstandsbetrieb herzustellen.

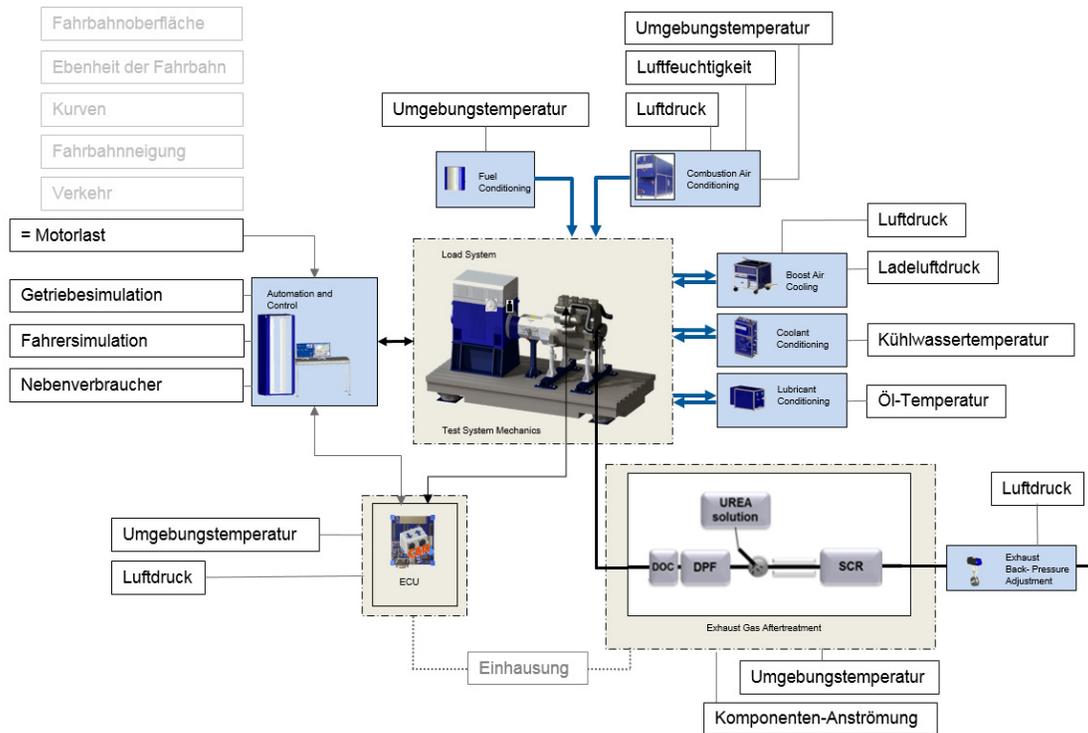


Abbildung 2-23: Umgebung eines Entwicklungsmotorprüfstand

2.5.2.1 Belastungseinrichtung (Dynamometer)

Eine zentrale Aufgabe übernimmt die Belastungseinheit. Um reale Lastsituationen darzustellen ist ein instationärer Prüfstandsbetrieb notwendig. Instationäre Prüfstände werden durch transiente, dynamische und hochdynamische Leistungsbremsen unterschieden. Die Unterscheidung wird unter anderem durch die max. Frequenz beschrieben in der eine Änderung der Last möglich ist. Lastpunktdefinition in Zeitschritten ≤ 1 Sek können in der Regel durch transiente Leistungsbremsen dargestellt werden. Dynamische Leistungsbremsen zeichnen sich einerseits durch erhöhte Regelgenauigkeit und andererseits durch den Einsatz von Simulationen aus. So können beispielsweise Simulation des Antriebstrangs, Fahrerverhalten, Straßenlast und Steigungen am dynamischen- oder hochdynamischen Prüfstand dargestellt werden. Oszillationen des Antriebstrangs können typischerweise bis max 8. Hz beschrieben werden. Dynamische Motorprüfstände eignen sich demnach für die Nachbildung von Rollenprüfstandstests z.B. auch NEFZ, WLTC, oder FTP-75 Tests. Hochdynamische Prüfstände können Fahrzeug, Fahrer und Umfeld unter höchstmöglich realen Bedingungen prüfen. Auf hochdynamischen Motorprüfständen können Antriebstrangsimulationen bis 40Hz dargestellt werden. Echte Motorleerlaufbedingungen (Nullmoment-) Simulation für Gangschaltvorgängen sind möglich. Um reale Motorkaltstartverhalten bzw. Kraftstoffverbrauchs- und Emissionsverhalten unter realen Fahrbedingungen zu untersuchen, wie es speziell in Bezug auf RDE Entwicklung von Bedeutung ist, werden hochdynamische Motorprüfstände eingesetzt. Dabei wird der reale Motor mit einem virtuellen Antriebstrang dessen Einflussparameter auf den Motor mittels der Simulationssoftware der Prüfstandsautomatisierung übergeben wird, betrieben. Üblicherweise sind hochdynamische Leistungsbremsen als permanenterregte Synchronmaschinen ausgeführt. Der Unterschied von dyn. und hochdynamischen Leistungsbremsen kann bei der Nachbildung von

Motorstartvorgängen gut verdeutlicht werden. Abbildung 2-24 zeigt den Drehzahlverlauf eines realen freien Motorstart verglichen mit einer Dyn. Asynchron Pendel Anlage (AVL APA-HI) im linken Bild bzw. mit einer Hochdynamischen Leistungsbremse (AVL DynoSpirit) rechts. Die Darstellung zeigt, dass durch die höherer Regelauflösung und einer gezielten Masse-Null Simulation die Trägheit der hochdynamischen Leistungsbremse kompensiert und dadurch der freie Motorstart weitaus näher dem realen Motorstartverhalten nachempfunden werden kann. [14]

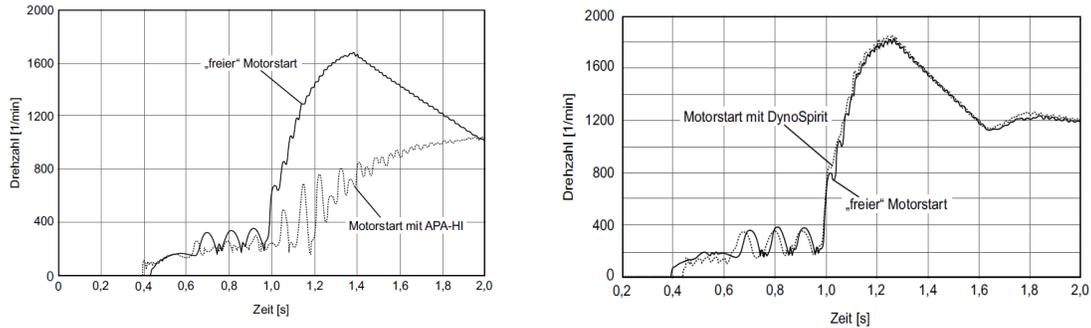


Abbildung 2-24: Motorstart Vergleich von Dyn. und Hochdyn. Leistungsbremsen [14]

2.5.2.2 Konditioniersysteme

Konditioniersysteme übernehmen die Regelung der Motormedien hinsichtlich Druck, Temperatur und ggf. Massenstrom bzw. Feuchtigkeit. Für folgende Motormedien stehen Konditioniereinrichtungen zur Verfügung:

- Kraftstoff
- Kühlmedium
- Motoröl
- Verbrennungsluft bzw. Ladeluft

Die Kraftstoffkonditionierung regelt den Kraftstoffdruck und die Temperatur auf das gewünschte Niveau. Der zu regelnde Kraftstoffsystemdruck ist in der Regel von der Motorkraftstoffpumpe abhängig. Kleine Kraftstofftemperaturschwankungen werden speziell bei Common-Rail und DI Systemen, durch den meist hohen Einspritzdruck ausgeglichen.

Kühlkreislaufkonditionierungen regeln die Kühlmedientemperatur in einem einstellbaren Bereich. Abhängig vom Motorprüfstandsbetrieb werden motorinterne Thermostate, die zwischen kleinem- und großem Kühlkreis regeln, unter Umständen blockiert, sodass die gewünschte Kühlwassertemperatur durch die Konditionierung aufgeprägt werden kann. Kühlmitteltemperaturänderung während dem Realbetrieb werden in 3.1.1.1 beschrieben. Der regelbare Kühlmitteltemperaturbereich reicht abhängig von der Anlage von 20°C – 140°C. Um dynamische Änderungen möglichst realitätsnah abzubilden sind kurze Leitungen zwischen Regler und Temperatursensor von Vorteil. Abhängig vom verwendeten Kühlmittelmassenstrom und dessen thermische Trägheit kann durch den Einsatz von Reglerkaskaden eine genauere Temperaturregelung erzielt werden.

Motorölkonditionierungen regeln die Öltemperatur typischerweise im Bereich von 40°C – 130°C bei einem einstellbaren Öldruck von 1,2 bar – 6 bar Absolutdruck. Beobachtete

Öltemperaturänderungen während realen dem Straßenbetrieb werden in 3.1.1.1 beschrieben.

Die Kühlmittel- und Motoröltemperierung kann während dem Prüfstandsbetrieb auch durch den motoreigenen Kühler vorgenommen werden. Abhängig vom Entwicklungsstadium und der einhergehenden Komponentenverfügbarkeit ist es denkbar den Fahrzeugkühler aufzubauen und mittels Fahrtwindgebläse geschwindigkeitsabhängig, realitätsnah die Motokühlung aufrechtzuhalten.

Die Verbrennungsluftkonditionierung modifiziert die Umgebungsluft hinsichtlich Temperatur, Druck und Luftfeuchtigkeit. Der mögliche Regelbereich der Verbrennungslufttemperatur reicht üblicherweise von 15°C bis 70°C und der Druck von +8 mbar bis +100 mbar bezogen auf den Umgebungsdruck. Der Luftdruck ändert sich abgesehen von wetterbedingten Schwankungen primär als Funktion der Höhe der Realfahrt. Lt. RDE- Regelwerk ist die max. Höhe bis 1300m über Seehöhe (erweiterter Bereich) limitiert. Dies entspricht lt. barometrischer Höhenformel einem Luftdruck von 861mbar (bei 20°C). Damit ergibt sich ein denkbarer Regelbereich von 1013mbar bis 861mbar. Der gültige Außentemperaturbereich ist gesetzlich auf den Bereich -7°C bis 35°C (inkl. erweiterter Temp. Bereich) limitiert. Die Dauer der RDE Überprüfung muss zwischen 90min und 120min dauern. Durchschnittliche Tagesschwankungen der Außentemperatur zeigen eine sehr geringe Änderung innerhalb der Zeitdauer von zwei Stunden. Abbildung 2-25 zeigt den Außentemperaturverlauf über 24 Stunden im Mai 2016. Starke Temperaturänderungen sind nur an den Tag – Nacht Übergängen erkennbar. Bezgl. der Luftfeuchtigkeit sind vom Gesetzgeber keine Grenzwerte vorgegeben. Änderungen der Feuchtigkeit sind allerdings bei durchschnittlichen Wetterlagen ebenfalls keiner starken Dynamik unterlegen.

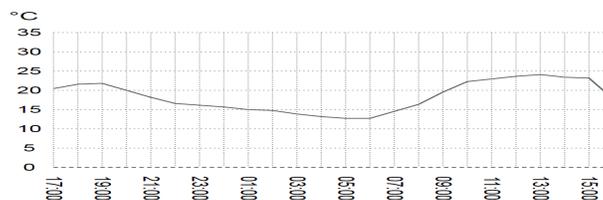


Abbildung 2-25: Aussentemperaturverlauf Graz Universität [87]

Je nach angedachter Ladeluftkühlung wird am Prüfstand die Ladeluft mittels einer Ladeluftkonditionierung, oder mittels am Prüfstand aufgebaute Wasser-Luft bzw. Luft-Luft Wärmetauscher auf die gewünschte Ladelufttemperatur gebracht.

2.5.2.3 Kommunikationsschnittstelle Motorsteuergerät

Die Motorsteuerung für den Prüfstandsbetrieb ist meist abweichend zum späteren Motorbetrieb ein Entwicklungssteuergerät. Dies ist insofern notwendig, da einerseits die Motorsteuerung meist noch nicht fertig bedatet ist, und andererseits im Falle des Steuergerätes aus der Produktion eine Restbussimulation notwendig ist. Mittels der Restbussimulation können notwendige aber fehlende Eingangssignale extern dem Motorsteuergerät zur Verfügung gestellt werden um einen Betrieb des Steuergerätes zu ermöglichen. Unabhängig vom Entwicklungsstadium ist eine Kommunikationsschnittstelle zum Motorsteuergerät von Bedeutung. In Bezug auf Durchführung von Realfahrten am Motorprüfstand ist speziell die Atmosphärendruck- Eingangsgröße von Bedeutung. Der Umgebungsdruck wird typischerweise durch einen Drucksensor auf der Motorsteuergerätplatine erfasst. Um die Synchronisation von

Ansaugluftdruck und Motorsteuerung- Eingangsinformation sicherzustellen, kann einerseits der Drucksensor mit dem Ansaugluftdruck beaufschlagt werden oder andererseits bei Kenntnis der Motorsteuerungslogik und der verwendeten Signalbezeichnungen, mittels einer Kommunikationsschnittstelle der gewünschte Wert durch das Automatisierungssystem übergeben werden.

2.5.2.4 Abgasnachbehandlungssystem

Für die Funktion von Abgasnachbehandlungssysteme sind Mindesttemperaturen (Light-Off Temp.) notwendig. Gleichzeitig sollten Abgasnachbehandlungssysteme zum Schutz der Bauteile nicht überhitzen. Das bedeutet, dass jede Komponente der Abgasnachbehandlung ein spezifisches Temperaturfenster für dessen effizienten Betrieb hat. Abhängig der Fahrzeug- bzw. Antriebstrangkonstruktion werden Abgasnachbehandlungssysteme während dem Straßenbetrieb durch den Fahrtwind umströmt. Die Umströmung ist einerseits notwendig um den Einsatz über die geplanten Lebensdauer zu ermöglichen, andererseits kann sich die Konvektion bzw. die Umgebungstemperatur negativ auf das Unterschreiten der Light-Off Temperatur bzw. dem Aufwärmverhalten beim Kaltstart auswirken. Um reale Temperaturverhältnisse der Abgasnachbehandlung am Motorprüfstand abzubilden ist die Kenntnis der Einbausituation bzw. Strömungsverhältnisse notwendig. Oberflächentemperaturmessungen an den Nachbehandlungssystemen während dem Straßenbetrieb, bzw. Energieflusssimulationen können hierfür Aufschluss geben. Um bei gleicher Motorlast gleiche Temperaturverhältnisse am Prüfstand zu erhalten ist es dankbar das gesamten Abgassystem ähnlich der Fahrzeugkonstruktion einzuhausen und so anzuströmen, sodass ähnliche Temperaturverhältnisse hergestellt werden können. Aus heutiger Sicht hat sich noch keine eindeutige Lösung zu diesem Problem herausgestellt.

Der Abgasgegendruck am Auspuff, welche im Realbetrieb durch die Atmosphäre dem System aufgeprägt wird, kann sich durch Höhenunterschiede im Straßenbetrieb vom Prüfstandsbetrieb unterscheiden. Der Gegendruck kann am Prüfstand bei verbauter Ansaugluftdruckkonditionierung, im dynamischen Prüfstandsbetrieb durch Verbindung des Abgassystems und dem Ansaugluftdruck – und dem Einsatz einer entsprechenden Regelklappe auf vergleichbaren Niveau wie im Ansaugtrakt gehoben werden. Abbildung 2-26 zeigt schematisch die Verschlauchung. Bei Pos. 1 wird die konditionierte Ansaugluft zum Motoransaugtrakt gebracht. Durch das Verbindungsstück (Pos. 2) wird die konditionierte Luft über ein Y-Rohrstück mit dem Abgasstrang (Pos. 3) verbunden. Über die Regelklappe (Pos. 4) wird der Druck geregelt. So kann gewährleistet werden dass der Motoreingangs- und ausgangsseitig mit dem gleichen Druck beaufschlagt wird.

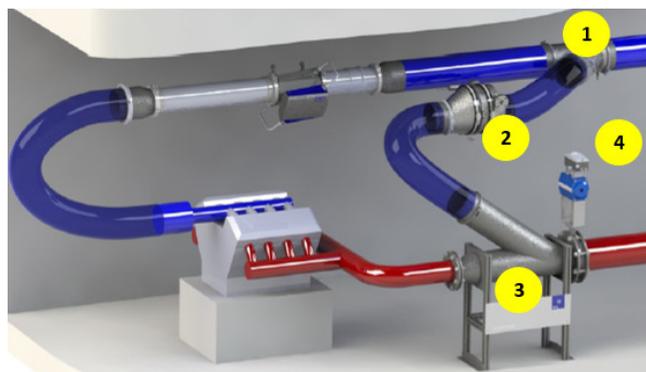


Abbildung 2-26: Dynamische Ansaug- und Abgasdruckregelung

2.5.2.5 Prüfstandautomatisierung

Die Prüfstandautomatisierung übernimmt die Motor- und Leistungsbremsensteuerung während dem Prüfstandsbetrieb sowie die Überwachung bzw. Steuerung von Konditionier- u. Messeinrichtungen und dient als Schnittstelle zu verschiedenen Steuergeräten. Die Überwachung und Bedienung von Sicherheitseinrichtung werden üblicherweise auch von der Prüfstandautomatisierung unternommen. Die Anforderungen an diese Systeme ändern sich nur sehr bedingt, da auch bisher durch die Automatisierung ein flexibler Prüfstandsbetrieb ermöglicht ist. Änderungen werden insofern auf die Automatisierung zukommen als das es möglich sein sollte vorangegangene Messdaten aus realen Straßenfahrten möglichst reibungslos in die Motorprüfstandsumgebung zu übernehmen. Dies bedeutet mitunter Umrechnungen oder logische Verknüpfungen der aufgenommen Daten in Formate die den Motorprüfstandsbetrieb letztendlich ermöglichen. Beispiele dafür werden in 2.5.3 bzw. Abbildung 2-27 diskutiert.

2.5.2.6 Prüfstands Peripherie

Selbstverständlich sind für den Prüfstandsbetrieb eine Reihe weiterer Komponenten erforderlich wie Prüfstandsmechanik z.B. Wellenverbindungen und Fundamentsysteme, Verbrauchsmesseinrichtung für Kraftstoff, Verbrennungsluft und eventuell Harnstoff (AdBlue), Abgasmesstechnik (Gasanalysatoren und Partikelzähler), Messtechnik zu Verbrennungsdiagnose sowie Temperatur- und Druckaufnehmer um möglichst genauen Aufschluss des Motorbetriebsverhalten zu erlangen. An diese erwähnten Komponenten richten sich allerdings keine speziellen oder zusätzlichen Anordnungen in Bezug auf die RDE Untersuchungen am Prüfstand.

2.5.3 Generisches Konzept zur Umsetzung von RDE- Prüfaufgaben am Motorprüfstand

Um Motoren entwickeln zu können die unter anderem die Emissionsgrenzwertanforderungen im realen Straßenbetrieb erfüllen können, wie in der Abgasgesetzgebung EURO 6d gefordert, werden folgende Aufgabengruppen auf den Motorprüfstand zukommen.

- Stationäre Tests in beliebigen Betriebspunkten im gesamten Drehmomenten- Drehzahl Kennfeld.
Bsp. Untersuchungen Basismotor, Thermodynamik, Verbrennungsentwicklung usw.
- Transiente Laständerungen zwischen unterschiedlichen Motorbetriebspunkten.
Bsp. Dynamikuntersuchungen, Kalibrierung der Abgasanlage
- Motorprüfstandsbetrieb zur Erstellung von empirischen- bzw. semiphysikalischen Motormodellen.
Bsp. mittels Einsatz von statistischer Versuchsplanung (DoE) werden Motormodelle erstellt welche Untersuchungen in HiL, SiL oder MiL (Abk. Hardware-, Software-, Modell in the Loop) Umgebungen ermöglichen.
- Reproduktion von real gefahrenen Straßen-Fahrmanövern.
Bps. Reale Fahrzeugfahrt wird nachempfunden (Use Case 1 lt. 2.3.1.1)
- Motorlastbedingungen die durch vordefinierte Testzyklen gegeben sind.
Bsp. WLTC, NEFZ, ARTEMIS u. A. (Use Case 2 lt. 2.3.1.2)
- Simulationsbasierte Motorenentwicklung
Bsp. Simulationsstudien ergeben antriebsstrangspezifisch kritische Lastsituationen welche am Realmotor untersucht werden. (Use Case 3 lt. 2.3.1.3)

Speziell bei der Reproduktion von gesamten RDE Tests aus dem Straßenbetrieb sowie beliebiger einzelner Streckenabschnitte, aber auch zur Durchführung von WLTC Tests am Motorprüfstand müssen eine Reihe an Parametern übernommen oder definiert werden, sodass der Prüfstandsbetrieb bzw. eine RDE-Bewertung möglich ist. Grob strukturiert kann eine solche Eingabe - Ausgabe Sequenz in fünf Bereiche unterteilt werden.

1. Eingabe (Input)
2. Parametervorbereitung (Pre-Processing)
3. Prüflaufausführung (Execution)
4. Nachbearbeitung (Post-Processing)
5. Bewertung (Analyse)

Abbildung 2-27 zeigt abstrahiert fünf Abschnitte bzw. anhand dem Blockschaubild einen möglichen Prozessablauf. Soll beispielweise eine Streckenführung am Prüfstand dargestellt werden, können aus GPS Daten oder Straßenkarten Informationen bezgl. Straßensteigungen, Höheninformationen und Geschwindigkeitslimits als Eingabedaten abgeleitet werden. Um einen Prüflauf zu definieren reichen diese Daten noch nicht aus. Dementsprechend müssen wählbare Parameter wie Umgebungsbedingungen, Fahrerverhalten, Verkehr etc. hinzugefügt und zu einem eindeutigen Prüflauf kombiniert werden. Dieser Prüflauf besteht beispielsweise aus einem Fahrpedal – Steigung Verlauf über der Zeit sowie Informationen die den Motor-Konditioniereinrichtungen zeitaufgelöst übergeben werden können. Dieser Test wird am Motorprüfstand ausgeführt. Die ermittelten und aufgezeichneten Messergebnisse werden in einem Datenhost abgelegt. In der Nachbearbeitung werden aus den abgelegten Messsignalen jene Daten genommen die zur RDE Bewertung (CLEAR bzw. EMROAD) notwendig sind und dem bereits bestehenden Auswertewerkzeug übergeben. Im Falle unterschiedlicher Normnamen zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen einzelner Abschnitte müssen Aliastabellen eingesetzt werden.

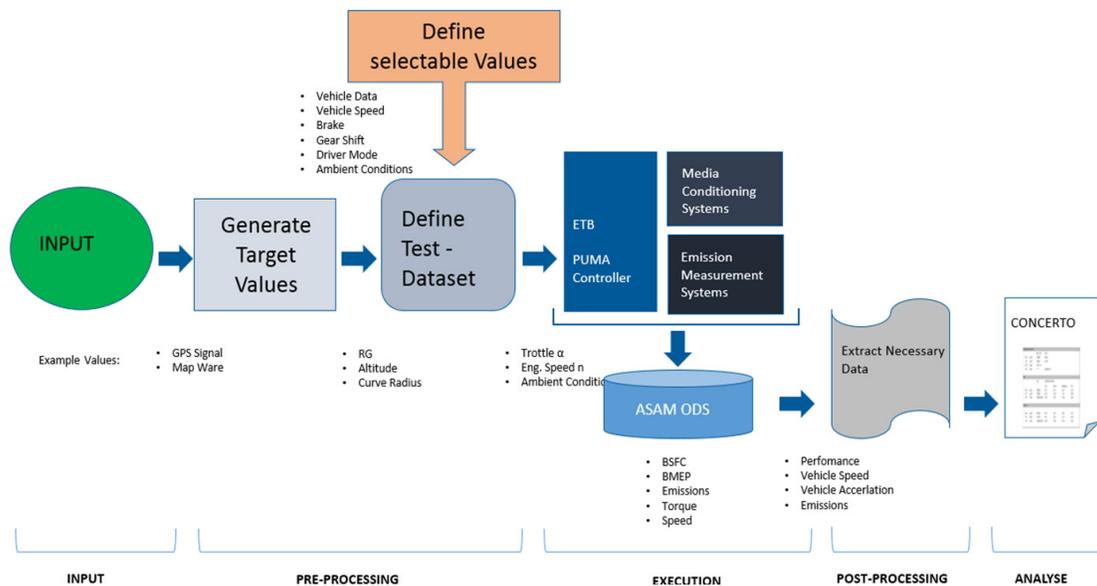


Abbildung 2-27: Generischen Prozessablauf

Dieselbe Vorgehensweise, wie beschrieben, allerdings mit einem weiteren Detaillierungsgrad wird in Abbildung 2-28 dargestellt. Hier werden für unterschiedliche Prüflaufszenarios unterschiedliche Eingabeparameter dargestellt welche spezifischen weiterverarbeitet werden. Im Wesentlichen muss in der Parametervorbereitung unterschieden werden ob die dafür notwendigen Daten vorhanden oder zusätzlich Parameter definiert werden müssen. Im dritten Fall wird der gesamte Prüflauf durch eine, diesem Prozess vorgelagerte Simulation in Form eines AVL InMotion Modells übergeben welches alle notwendigen Parameter an die Prüfstandsautomatisierung übergibt. Da die EMROAD - RDE Bewertung die am Rollenprüfstand während dem WLTC ermittelten CO₂ Messungen als Basis heranzieht, müssen für eine vollständige Bewertung diese zur Verfügung gestellt werden.

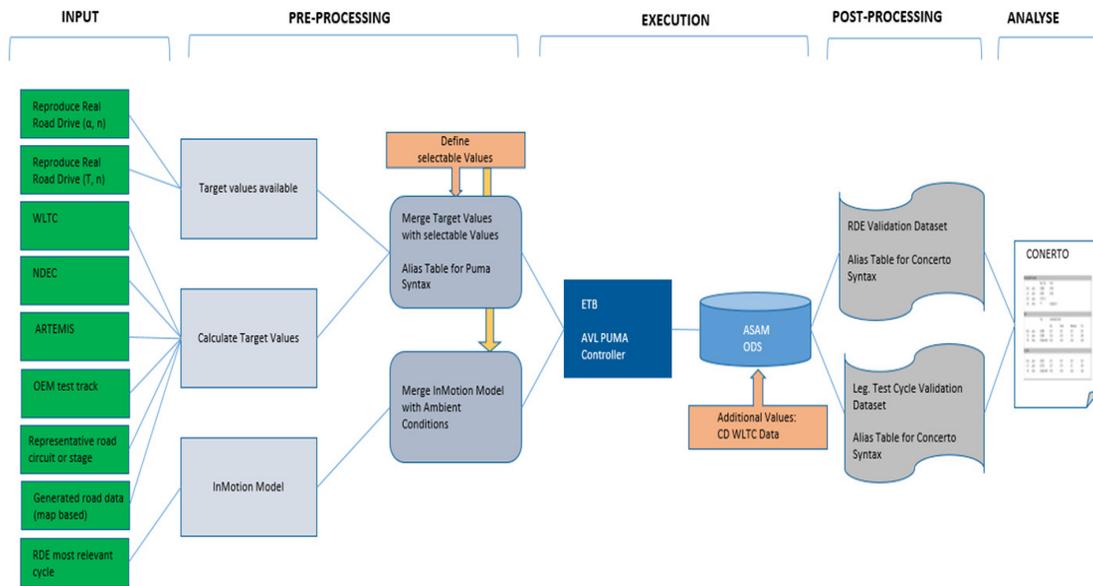


Abbildung 2-28: Gen. Prozessablauf für unterschiedlichen Szenarios

3 Experimentelle Untersuchungen

Ziel der experimentellen Untersuchung ist den Einfluss verschiedener Motorparameter im Hinblick auf beschränkte Schadstoffemissionen zu untersuchen. Druck und Temperaturänderungen von Motormedien wurden in einer Realfahrt beobachtet und am Motorprüfstand nachempfunden. Um den Einfluss der Druck und Temperaturänderung auf die Emissionen während der Realfahrt zu untersuchen wurde ein Prüfstandsmotor mit der aufgezeichneten Drehzahl - Drehmomenten Spur belastet um somit reale Lastsituationen als Basis der Untersuchungen herzustellen. Um eventuelle Unterschiede in den gasförmigen Emissionen sowie den ausgestoßenen Partikeln zu sehen wurden die Motormedien abwechselnd dynamisch, wie in der Realfahrt, beobachtet, sowie auf einen konstanten Durchschnittswert geregelt. Die gemessenen Emissionen wurden verglichen und die Differenzwerte in Bezug auf die gesetzlichen Grenzwerte in Verhältnis gestellt.

3.1 Realfahrt Messungen

Als Basis der Untersuchungen wurden Aufzeichnungen einer Realfahrt herangezogen. Die Route der Realfahrt führt von Graz über die Autobahn A2 bis zur Ausfahrt Gleisdorf West wo die Bundesstraße S65 über Kainbach bei Graz wieder nach Graz zurückführt. Abbildung 3-1 zeigt eine Karte mit eingezeichneter Streckenführung.

Die gesamte Strecke beträgt 52,6km, wobei die Anteile der Stadt – Land – Autobahn Strecke (20% - 43% - 34%) den Anforderungen der vorgesehenen Zertifizierungsfahrt nicht ausreichend entspricht, da eine gleichmäßige Aufteilung der drei Strecken Anteile gefordert ist. Die Dauer der Realfahrtfahrt beträgt 55min welche ebenfalls zu kurz im Vergleich zu den geforderten 90 – 120min Versuchsdauer ausfällt.

Das Versuchsfahrzeug ist ein Mittelklasse Pkw mit rund 1500kg Leergewicht. Motorisiert ist der das Fahrzeug mit einem 2400cm³ Hubraum Ottomotor, ohne Aufladung und Saugrohreinjection.

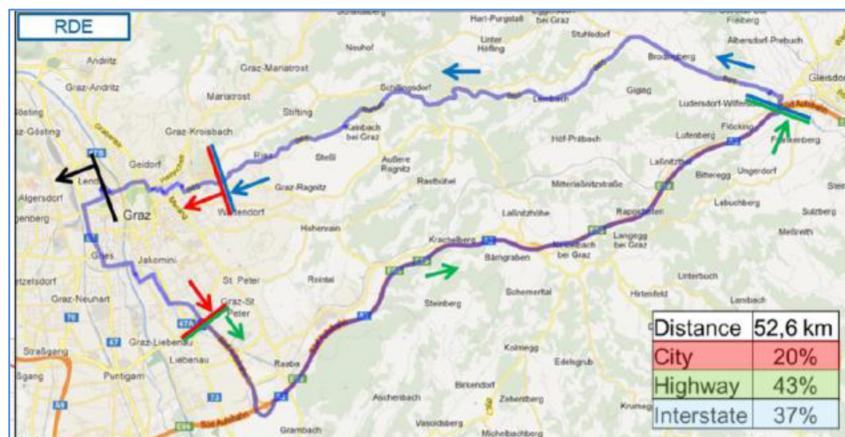


Abbildung 3-1: Streckführung Realfahrt

Das Höhenprofil der Strecke zeigt in Abbildung 3-2 zwei Anstiege. Der erste Höhenunterschied im Vergleich zu Graz (Seehöhe 353m) ist im Bereich Laßnitzhöhe (~500m Seehöhe) über die Südautobahn A2- und der zweite Anstieg im Bereich Kaindorf bei Graz (~560m Seehöhe) auf der Bundesstraße S65 zu finden. Die maximalen kumulierten Steigungen von 1200m/100km sowie die Forderung eines maximalen Höhenunterschieds von 100m zw. Start und Endpunkt geht konform mit den festgeschriebenen Randbedingungen einer gültigen RDE Messfahrt. Es

muss erwähnt werden, dass die Einhaltung aller vorgeschriebenen Randbedingungen während der Realfahrt, für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit angestellten Untersuchungen bezgl. der Medienparameter keine Bedingung ist. In Bezug auf das Höhenprofil ist jedoch als korrespondierender Abfall bzw. Anstieg des Umgebungsluftdrucks von Interesse. Die Änderung des atmosphärischen Luftdrucks während der Versuchsfahrt wird folgend in Abschnitt 3.1.1.1 betrachtet.

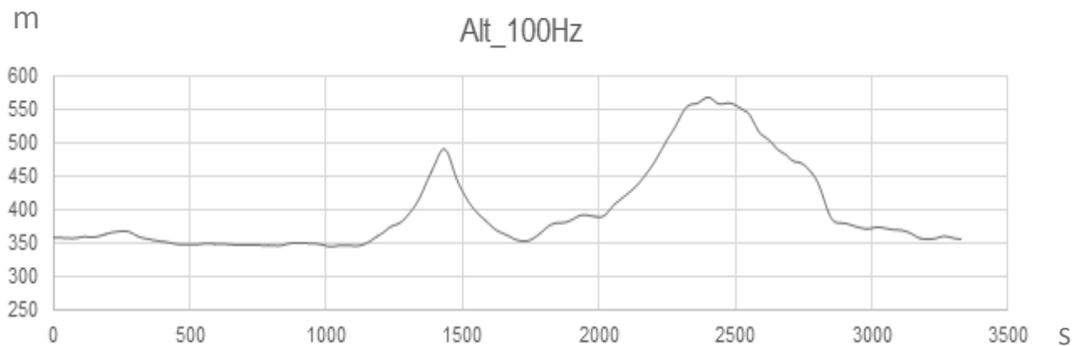


Abbildung 3-2: Höhenprofil der Realfahrt

Die aufgezeichnete Geschwindigkeitsspur über der Versuchsdauer zeigt charakteristisch die unterschiedlichen Geschwindigkeitsniveaus zw. Stadt – Land und Autobahn-betrieb (Abbildung 3-3).



Abbildung 3-3: Geschwindigkeitsspur der Realfahrt

3.1.1 Messsignalauswertungen der Realfahrt

Um möglichst viele Schlüsse aus der Realfahrt ziehen zu können wurde das Fahrzeug mit einer Vielzahl an Sensoren und Messgeräten ausgestattet. Um den Einfluss verschiedener Motorparameteränderungen auf die Emissionen während einer Realfahrt zu analysieren wurde nur ein Auszug der aufgezeichneten Messsignale herangezogen. Als wichtige Größe wurde das Drehmoment am Schwungrad am Motor mittels einer verbauten Flexplate gemessen. Das Messsignal der Drehmomentmessung zeigte ein deutliches Messrauschen welches mit einem Besselfilter verringert werden und somit ein eindeutiges Signal als Grundlage für weitere

Untersuchungen verwendet werden konnte. Die Motordrehzahl wurde aus dem CAN-Bus mit einer Frequenz von 100Hz ausgelesen. Beide Größen sind in Abbildung 3-4 als Funktion der Zeit dargestellt.

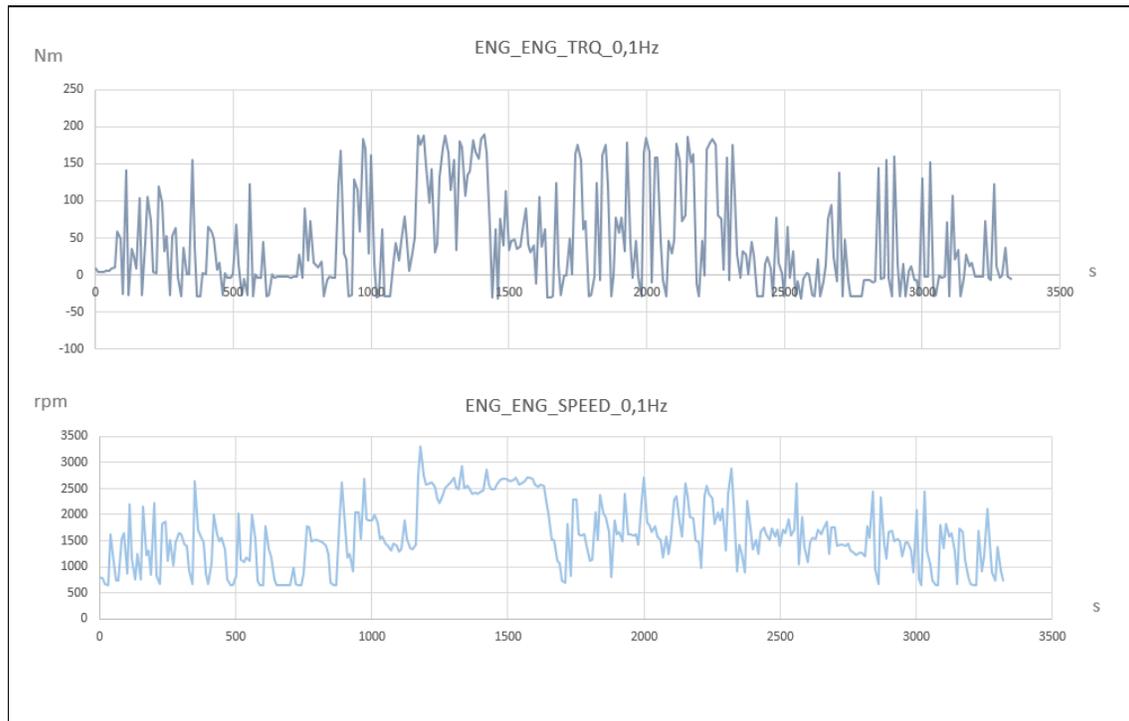


Abbildung 3-4: Drehzahl – Drehmoment aus Realfahrt

3.1.1.1 Motormedien

Die Umgebungstemperatur während der Realfahrt ist in Abbildung 3-5 dargestellt. Wie ersichtlich ändert sich die Temperatur während der gesamten Fahrtdauer nur sehr gering. Die Minimaltemperatur wurde mit 18,3°C gemessen. Die Maximaltemperatur lag bei 20,5°.

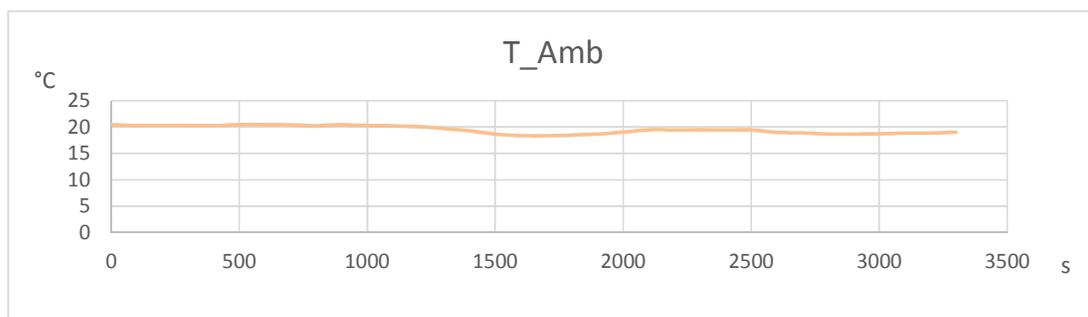


Abbildung 3-5: Umgebungslufttemperatur

Die Ansauglufttemperatur bleibt analog zur konstanten Umgebungstemperatur, mit Ausnahme der ersten Minuten, konstant. Die auffällig hohe Temperatur von 49,5°C am Beginn der Messfahrt ist durch die Stauwärme im Ansaugrohr durch vorangegangenen Motorbetrieb zu erklären. Der Effekt der Temperaturabnahme im Saugrohr wird im Weiteren nicht näher betrachtet. Die Temperaturmessung wurde im Luftmassenmessgerät, welches direkt im Saugrohr verbaut wurde, durchgeführt. Der Ansauglufttemperaturverlauf während der

Messfahrt ist in Abbildung 3-6 gezeigt.

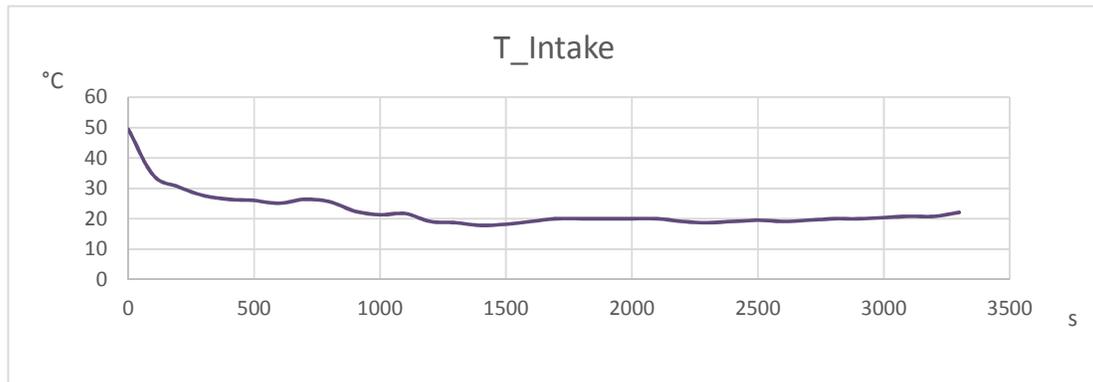


Abbildung 3-6: Ansauglufttemperatur

Die relative Luftfeuchtigkeit, in Abbildung 3-7 rot eingezeichnet, reagiert, korrespondierend zur leicht abgesenkten Lufttemperatur, mit einem Anstieg im Bereich Sekunde 1500 – 2000. Der berechnete Feuchtegrad zeigt allerdings dass die Wassermasse bezogen auf trockene Luft überwiegend gleich bleibt. Die Änderung des Feuchtegrades ist in Abbildung 3-7 blau eingezeichnet.

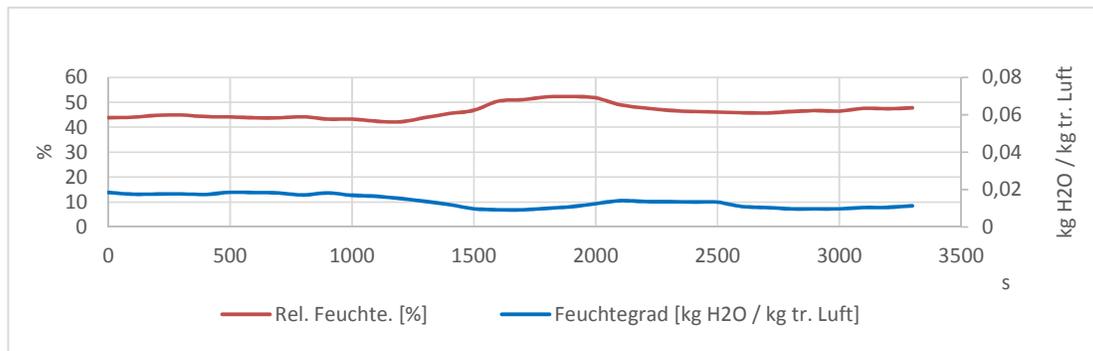


Abbildung 3-7: Luftfeuchtigkeit

Die Kühlwassertemperatur ändert sich während der Messfahrt mit höherer Dynamik als die Ansauglufttemperatur bzw. Feuchte. Gründe dafür sind im Wesentlichen der unterschiedliche Wärmeeintrag aus der Verbrennung durch verschiedene Lastpunkte im Motorbetrieb sowie unterschiedliche Thermostatregelung zwischen großem- und kleinem Wasserkreis im Motor. In Abbildung 3-8 ist der Verlauf der Wassertemperatur am Motorauslass dargestellt. Eine strikte Trennung der unterschiedlichen Ursachen der Temperaturänderung ist nicht zur Gänze möglich. Ein regelmäßiges Muster der Temperaturänderungen, wie im Bereich um Sekunde 2000, sind vermehrt der Thermostat-Regelung, sowie unregelmäßige Änderungen, den verschiedenen Wärmeeinträgen aus der Verbrennung die über die Zylinderwand in den Wassermantel eingebracht wird, zuzuordnen. Die maximale Temperaturspreizung zwischen Minimal- und Maximalwert beträgt 12,7°C.

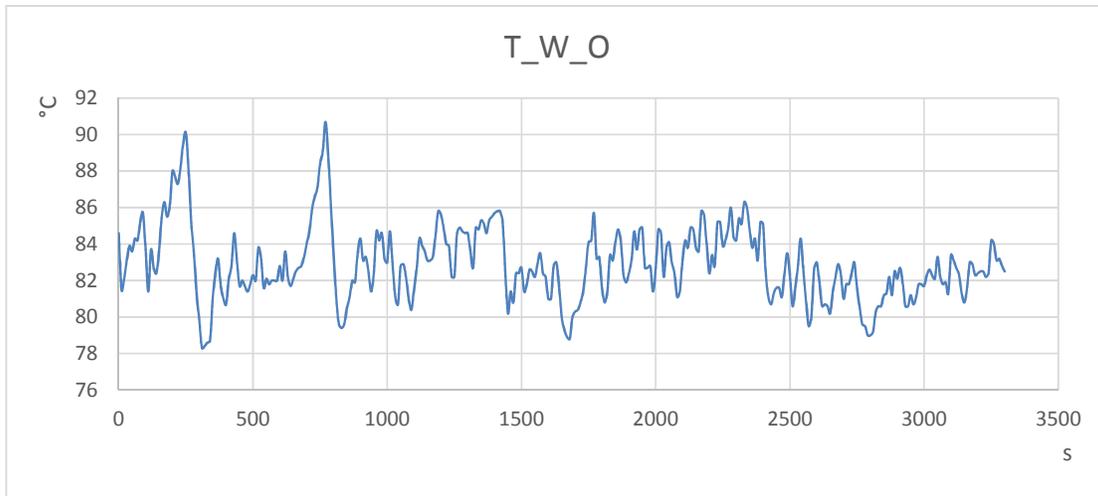


Abbildung 3-8: Kühlwassertemperatur

Die Motoröltemperatur wurde während der Messfahrt in der Ölwanne (Sumpftemperatur) gemessen. Der Verlauf über der Zeit ist in Abbildung 3-9 dargestellt. Die Motoröltemperatur steht einerseits im Wärmeaustausch mit dem Kühlwasser, andererseits wird ein Teil der Verbrennungswärme vom Motoröl abgetragen und darüber hinaus wird aus triobologischen Effekten das zur Schmierung eingesetzte Öl erwärmt. Der gemessene Maximalwert liegt bei 99,7° und die niedrigste Temperatur von 75,2°C am Beginn der Messung.

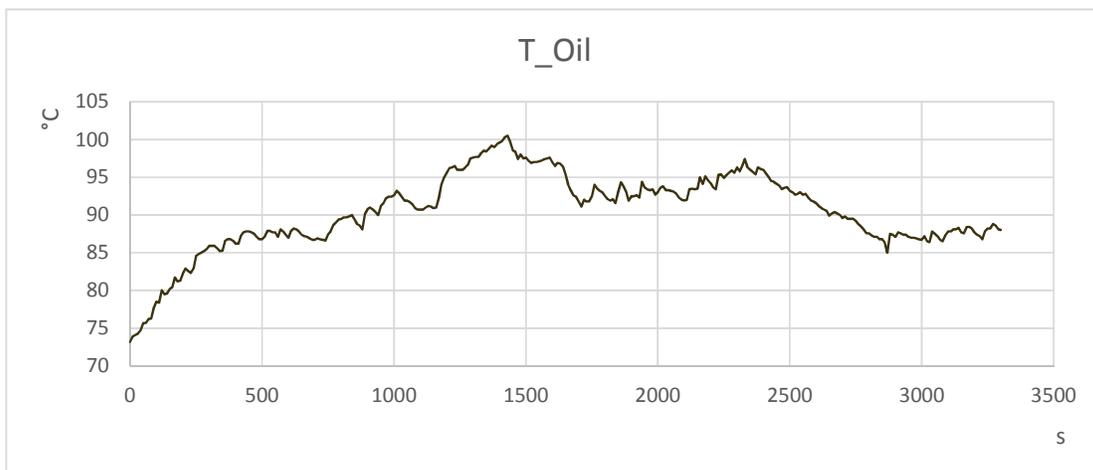


Abbildung 3-9: Motoröltemperatur

Abbildung 3-10 zeigt das Höhenprofil der Fahrstrecke aus dem zwei Anstiege erkennbar sind. Analog mit dem Anstieg der Höhe (Fahrroute) sinkt der Luftdruck über dem Zusammenhang der Barometrischen Höhenformel. Das Absinken des atmosphärischen Luftdrucks ist in der Absolut-Luftdruck Messung erkennbar. Die treppenförmige Signalspur der Druckmessung resultiert aus dem Intervall der Abtastfrequenz.

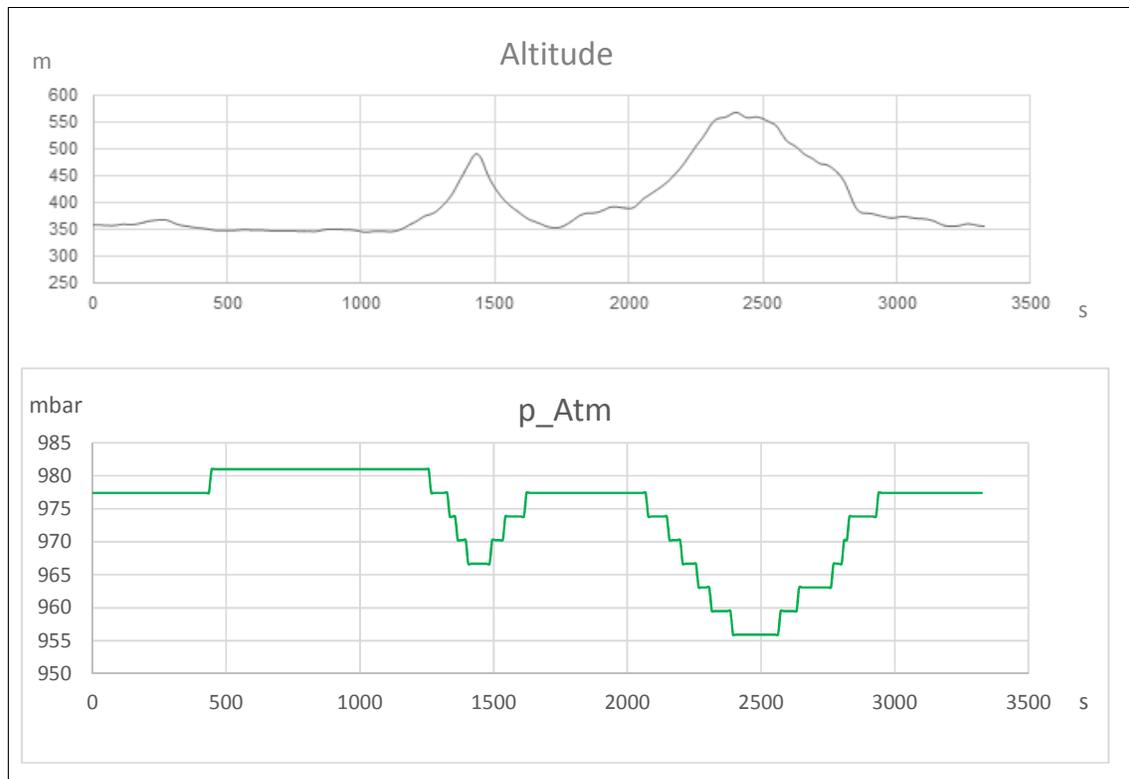


Abbildung 3-10: Atmosphärischer Luftdruck - Höhenprofil

3.1.2 Ableiten der Experimente

Aus der Analyse der Motormedienparameter ist zusammenfassend erkennbar, dass sich Außenlufttemperatur und Feuchte während der Messfahrt nur gering ändern. Kühlwasser- und Öltemperatur sowie Außenluftdruck hingegen weitestgehend dynamischen Änderungen unterliegen sind. Um den Einfluss der Änderungsdynamik der Motormedien auf die Entstehung von Schadstoffemissionen zu untersuchen wurde folgender Versuch abgeleitet.

Der Prüfstandsmotor wird mit der in der Messfahrt gemessenen Drehmoment-, Drehzahl-Paarung belastet. Somit kann sichergestellt werden, dass der Motor wie im Straßenverkehr vorwiegend betrieben wird.

Die Medien Kühlwasser, Öl und Außenluftdruck werden wie in der Realfahrt beobachtet am Motorprüfstand mit Konditionierungssystemen dynamisch nachgeregelt. Während dem Betrieb werden die gasförmigen Emissionen sowie die emittierten Partikelanzahl gemessen.

Anschließend wird der Motor bei selber Last mit konstanter Kühlwasser- und Öltemperatur sowie Ansaugluftdruck betrieben und ebenfalls die Emissionen gemessen. Durch Vergleich der emittierten Abgase kann der Einfluss der dynamischen Motormedien, verglichen zu konstanten Motormedien für jede Schadstoffkomponenten, eruiert werden.

Abbildung 3-11 zeigt eine schematische Darstellung der Versuchsmethodik.

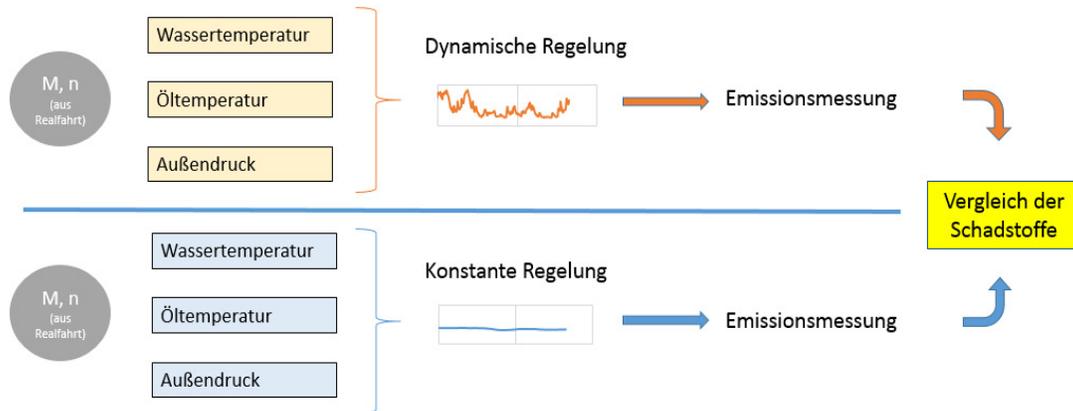


Abbildung 3-11: Schematische Versuchsdurchführung

Um den Einfluss einzelner Medienparameter zu ermitteln wurde folgende Versuchsmatrix (Abbildung 3-12) ausgearbeitet. Beginnend mit Konfiguration 1, bei der die Kühlwassertemperatur als auch die Motoröltemperatur und der Ansaugluftdruck dynamisch, wie in der Realfahrt beobachtet, eingestellt werden, wurden weiterführend in Konfiguration 2 bis 7 einzelne oder mehrere Medien, sowie in Kombination alle möglichen Kombinationen auf einen konstanten Wert geregelt. Bei Konfiguration 8 wurden alle zu untersuchenden Medien zeitlich konstant konditioniert.

CONFIG	TW	TOIL	p_ATM
1	Dyna.	Dyna.	Dyna.
2	Dyna.	Konst	Dyna.
3	Konst	Dyna.	Dyna.
4	Dyna.	Dyna.	Konst
5	Konst	Konst	Dyna.
6	Konst	Dyna.	Konst
7	Dyna.	Konst	Konst
8	Konst	Konst	Konst

Abbildung 3-12: Versuchsmatrix

3.1.3 Versuchsaufbau

Der Einfluss der genannten Mediendynamik ist anhand eines Dieselmotors analysiert worden. Konkret wurde als Versuchsträger ein Reihen-4Zylinder Dieselmotor mit Abgasturbolader und Direkteinspritzung (TDI) und einem Hubraum von 2000cm³ herangezogen worden. Der Versuchsträger hat eine Nennleistung von 120kW bei 3500upm und einem maximalen Drehmoment von 400Nm bei 2000upm. Abbildung 3-13 zeigt die Motorcharakteristik anhand

des Leistungs- und Drehmomenten Verlauf über der Drehzahl. Die implementierte Abgasnachbehandlung besteht aus einem Dieselpartikelfilter (DPF) und einem Oxidationskatalysator (DOC) welcher kombiniert in einer Einhausung direkt nach dem Turbolader (Turbinenseite) am Motorkurbelgehäuse verbaut ist.

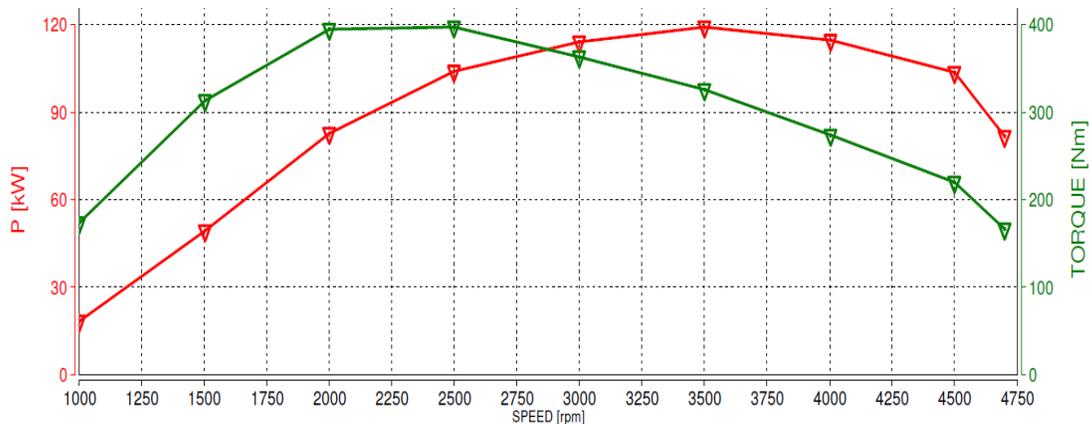


Abbildung 3-13: Prüfstandsmotor Charakteristik

Abbildung 3-14 zeigt schematisch die Prüfstands Umgebung die für die Versuchsdurchführung. Die Belastungseinheit am verwendeten Motorprüfstand ist eine Asynchron-Pendelmaschine mit einer Nennleistung von 220kW. Die Kraftstoffmassenstrommessung sowie die Temperaturregelung sind in einer Einheit (Produktname AVL FUELEXACT) verbaut. Die Temperaturregelung wird über Kraftstoff-Kühlwasserwärmetauscher realisiert und die Massenmessung anhand eines Coriolis-Sensors vorgenommen. Die Ansaugluft wurde hinsichtlich Druck-, Temperatur- und Feuchte reguliert. Um die Vorgabeparameter herzustellen sind die Druckregleinheit (Gebläse), Wärmetauscher inkl. Kühlkreis bzw. Heizkanal und Kondensatsystem in einer Ansaugluftkonditioniereinheit verbaut (Produktname AVL CONSYSAIR 800). Die Motorkühlwassertemperatur wird mittels der Kühlwasserkonditionierung (Produktname AVL CONSYSCOOL 200), die im Wesentlichen über Wärmetauscher welche mit Hauswasser bzw. Heißwasser durch ein Heizelement versorgt werden, eingestellt. Das motoreigene Thermostat, welches die Regelung zwischen kleinem und großem Wasserkühlkreis regelt, wurde für den Prüfstandsbetrieb blockiert, sodass jegliche Wassertemperaturänderung durch die Konditionierung aufgeprägt werden konnte.

Die Konzentrationen der gasförmigen Abgaskomponenten werden anhand verschiedener Messprinzipien im Gasanalysator (Produktname AVL AMAi60) bestimmt. Grundlegend wird zur Messung der Kohlenwasserstoffe (Total Hydrocarbons Abk. THC sowie Methan CH_4) ein Flammenionisationsdetektor (Abk. FID) verwendet. Zur Messung der Stickoxide ($\text{NO} + \text{NO}_2$) wird ein Chemilumineszenzdetektor (Abk. CLD) benutzt. Kohlenmonoxid (CO), Kohlendioxid (CO_2), sowie Distickstoffoxid (N_2O) werden mittels der Nichtdispersive-Infrarottechnologie (NDIR) gemessen. Paramagnetische Detektoren (PMD) werden zur Messung der Sauerstoffkonzentration herangezogen. Die Messung der Partikelanzahl wird durch einen Butanol-Kondensat Partikelzähler (eng. Condensation Particle Counter Abk. CPC) durchgeführt. Die Entnahme der Abgase zur Partikelzählung erfolgt aus dem Rohgas direkt nach der Turbolader Turbine. Die Abgasentnahmestellen zur Gasanalyse liegt einmal vor der Abgasnachbehandlung (Linie 1 = Rohgas) sowie nach dem DFP-DOC Paket (Linie 2 = Endrohr).

Die Steuerung aller Prüfstandskomponenten wird über die Automatisierung AVL PUMA Open Version 1.5.3 durchgeführt (PUMA = Prüfstands- und Messtechnik Automatisierung). In der Automatisierung sind alle Prüflaufsequenzen in sogenannten Block Sequencer (BSQ)

programmiert. Innerhalb der BSQ sind beispielsweise Motor-Warmlaufsequenzen, Messtechnik Ein-/Abschaltbefehle sowie der eigentliche Prüflauf im sogenannten Step Sequencer (SSQ) abgelegt. Der SSQ umfasst zeitdiskret alle Vorgabewerte der Motordrehzahl, Drehmomenten bzw. Pedalwert α die dem Motor bzw. der Leistungsbremse übergeben werden. Darüber hinaus sind ebenfalls im SSQ, zeitaufgelöst alle Parameter die für den Betrieb der Medienkonditioniereinrichtungen notwendig sind hinterlegt. Die zeitliche Auflösung wurde mit 10Hz festgelegt. Um während dem Motorbetrieb Daten aus dem Entwicklungssteuergerät auslesen bzw. überschreiben zu können ist eine direkte Verbindung zwischen der Prüfstands Automatisierung und dem Motorsteuergerät notwendig. Diese Verbindung wurde mittels ETAS INCA hergestellt. Über das Automatisierungssystem werden auch alle Werte der verbauten Messtechnik inkl. Abgasanalyse übernommen und für jeden Prüflauf auf einem Datenhost abgespeichert.

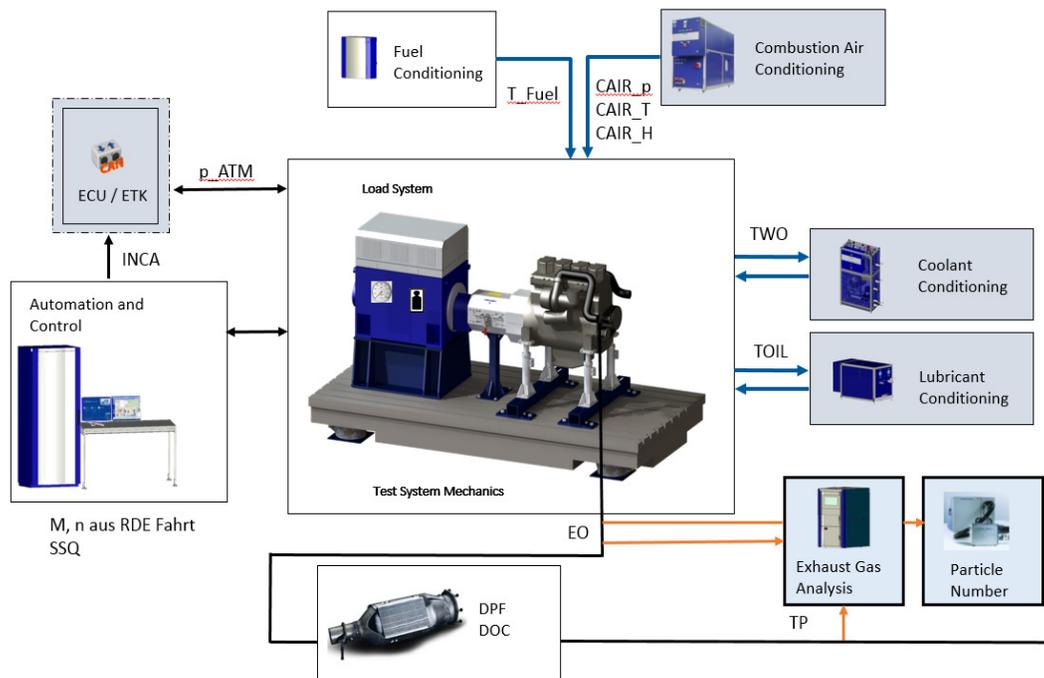


Abbildung 3-14: Prüfstandsumgebung

Abbildung 3-15 zeigt zwei Fotos vom Prüfstandsaufbau aus zwei verschiedenen Perspektiven. Position 1 zeigt den Prüfstandsmotor welcher auf einer Schnellwechelpalette aufgebaut ist. Der Vorzug einer Schnellwechelpalette ist eine Vielzahl an Vorbereitungsmaßnahmen, wie beispielsweise die Installation der Messstellen bzw. der Messtechnik bis hin zu Motormedien Befüllung und Motorvorstart vorgelagert im Rüstraum erledigen zu können. Die Schnellwechelpalette besitzt genormte Kupplungen für Kühlwasser- und Ölzufuhr sodass in der Prüfstandszelle die Verbindung zu den Konditioniereinrichtungen einfach und rasch hergestellt werden kann. Dadurch kann kostenintensive Rüstzeit am Prüfstand vermindert werden. Position 2 zeigt die Leistungsbremse und Position 3 die Messsignalverstärker in der FEM Box (Abk. FEM = Front End Module) welche die direkte Verbindung zwischen Messsonde und Messsignalverstärker bzw. der Prüfstandautomatisierung mit Datenerfassung herstellt. Position 4 zeigt die Kraftstoffkonditioniereinrichtung inkl. Kraftstoffmassenmessung. Links neben der Kraftstoffkonditionier- und Messeinheit ist die Motorkühlwasserkonditionierung (Position 5) zur Kühlwassertemperaturregelung angeordnet.

Position 6 zeigt die Ölkonditionierung welche motornah aufgestellt ist. Auf der gegenüberliegenden Seite der Leistungsbremse ist die Ansaugluftkonditionierung (eng. Air Conditioning System Abk. ACS) aufgestellt, zu sehen in Position 7. Die Verschlauchung der Luftkonditionierung zum Prüfstandsmotor ist in Abbildung 3-16 abgebildet.

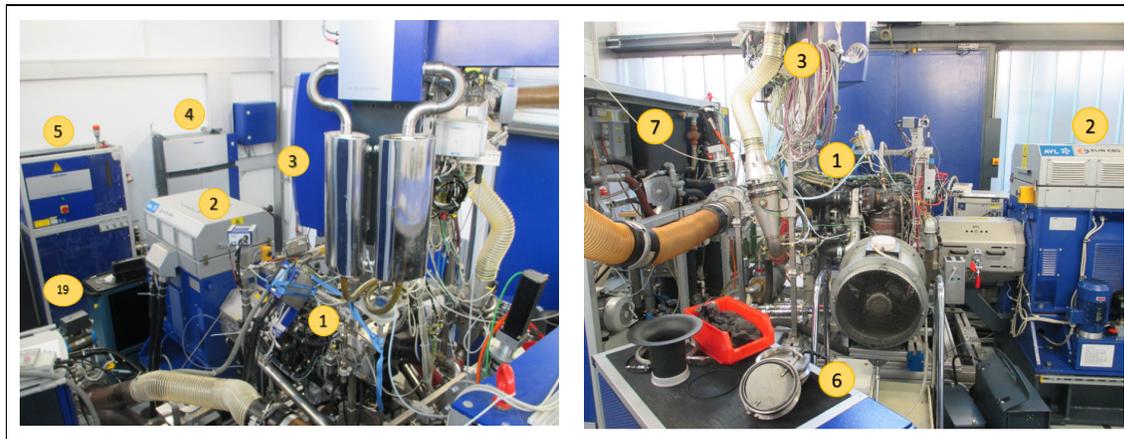


Abbildung 3-15: Prüfstands Aufbau

Die Ansaugluftkonditionierung saugt Frischluft aus der Prüfzelle an, verdichtet die Luft, stellt die Temperatur und Feuchte der Vorgabewerte entsprechend ein und übergibt die konditionierte Luft (Position 8) über ein Rohr auf dem das Luftmassenmessgerät (Produktname AVL FLOWSONIX, abgebildet in Position 9) installiert ist, dem Motor. Über eine Y-Rohrstück Abzweigung (Position 10), einen Schlauch (Position 11) und über eine Druckregelklappe (Position 19) wird das gleiche Druckniveau auf der Abgasseite aufgeprägt. Dadurch kann gewährleistet werden, dass kein unnatürliches Druckgefälle zwischen Ein- und Auslassseite erzeugt wird. Position 12 zeigt das Abgasrohr, das hier ebenfalls mittels einem Y-Rohr den Druck der Ansaugluftkonditionierung übernimmt.

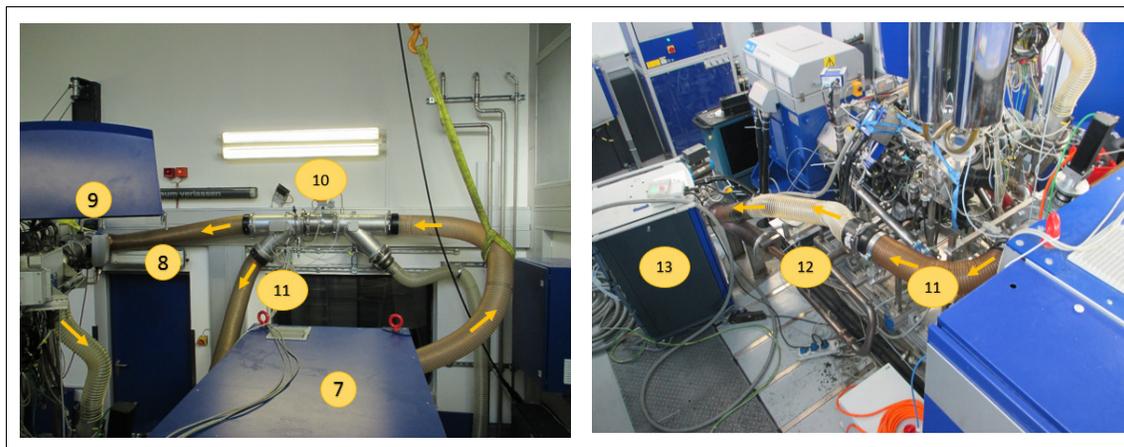


Abbildung 3-16: Ansaugluft Verschlauchung

Position 13 zeigt den Partikelzähler direkt neben dem Prüfstandsmotor welcher mit einer kurzen beheizten Leitung mit der Entnahmesonde verbunden ist. In Abbildung 3-17 Position 14 kann die Entnahme im Rohrbogen nach der Turboladerturbine, vor dem DPF und DOC Gehäuse gesehen werden. Direkt nach der Abgasentnahme ist ein Druckteiler verbaut. Da in der Abgasturboladerturbine der Druck nicht weit genug abgesenkt wird kann ist der Abgasdruck an der Partikelzähler-Entnahmestelle zu hoch für die Primärverdünnung. Daher wird nur ein Teil des Abgasstromes mit verringertem Druck, zur Partikelzählung freigegeben und das restlich

entnommene Abgas in die Prüfstandszellenluftabsaugung abgeleitet. Position 15 zeigt den flexiblen Metallschlauch inkl. dem Pumpengehäuse in welchem die Primärverdünnung stattfindet. Bei Position 16 ist die Rohgasentnahmestelle für die gasförmige Emissionsanalyse zu sehen. Das Entnahmerohr, das sich unmittelbar nach der Partikelzählerentnahme im selben Rohrbogen befindet, mündet in einer beheizten Leitung um jegliche Kondensation aller gasförmigen Komponenten zu vermeiden. Nach der Abgasnachbehandlung (Position 17) ist ein Abgasrohr angeflanscht welches die Entnahmestelle für die zweite Linie der gasförmigen Emissionsanalyse (Endrohr Eng. Tailpipe) trägt. Auch hier wird das entnommene Abgas durch eine beheizte Leitung zu den Analysatoren geführt.

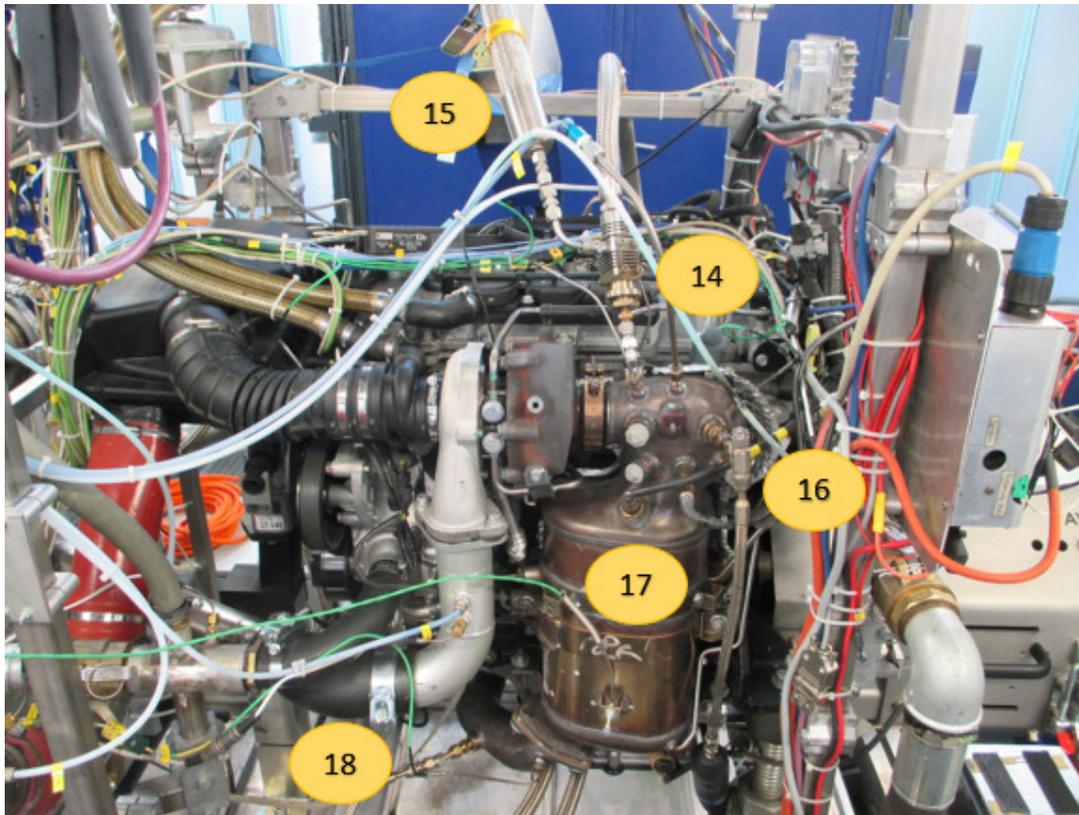


Abbildung 3-17: Abgasentnahmestellen

Der in der Automatisierung, aus den interpolierten Fahrtmessdaten erzeugte, programmierte Prüflauf ist in Abbildung 3-18 schematisch dargestellt. Grundlegend ist für jeden der 8 festgelegten Testkonfigurationen ein Ablauf programmiert. Unmittelbar nach Start des Tests wird die gewünschte Testkonfiguration vom Bediener abgefragt und abhängig von der Eingabe die definierte Testsequenz abgearbeitet.

Im Wesentlichen besteht unabhängig von der Testkonfiguration die Sequenz aus dem Aufschalten der Messtechnik (Gasanalysator und Partikelzähler) sowie der eingebundenen Medienkonditionierung und Übergabe der Sollwerte. Gefolgt von einer 10min Konditionierphase bei der der Motor auf einem mittleren Lastpunkt betrieben wird um möglichst vergleichbare und reproduzierbare Zustände herzustellen. Nachdem die Konditionierung abgeschlossen ist wird der Recorder aktiviert und der eigentliche Prüflauf mit der definierten Motorlast / Motordrehzahl- und dem Medientemperaturprofil über der Zeit abgearbeitet. Nach erfolgreichen Durchlauf aller vorgegeben Zeitschritte wird der Recorder beendet und der Motor im Leerlauf betrieben. Am Ende werden die Daten auf einem ASAM Host (AVL SANTORIN Host) abgespeichert und der Bediener kann nun den Motor abstellen

oder einen weiteren Prüflauf starten.

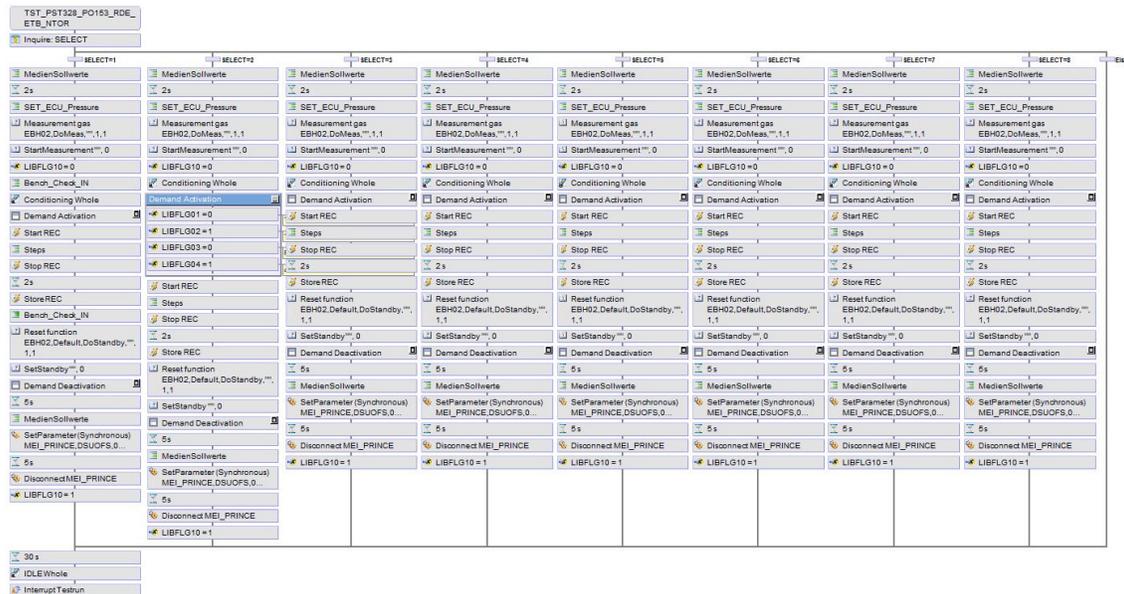


Abbildung 3-18: PUMA Block Sequencer - BSQ

Ein SSQ Auszug der Drehmoment- Drehzahl Vorgabewerte des Versuchs ist tabellarisch in Abbildung 3-19 angeführt. Jede definierte Stufe wird 0,1 Sekunden ausgeführt. Für den gesamten Versuch mit einer Dauer von 3300sek sind somit 33.000 Stufen definiert. Da in einem SSQ nicht mehr als 20.000 Zeitschritte adressiert werden können wurde der Prüflauf in zwei Teile aufgeteilt. Teil 1 beinhaltet 19.999 - und Teil 2 13.001 Zeitschritte. Die Möglichkeit der Aneinanderreihung von mehreren SSQ im BSQ wurde genutzt. Der Übergang vom Ende eines SSQ zum Beginn des Nächsten verläuft ohne Zeitversatz.

No	StepType	ControlM	StepLeng	StepLeng	StepLength	RampTyp	RampTyp	StepConc	Monitor	XType	Reaction	DemVal1	Ramp1	Unit1	DemVal2	Ramp2	Unit2
1	Controlled	N/T	0,1 s	Step relative	Linear	Linear	And	Off	1	Interrupt	1284.55	0,1 A.s	-8,7	0,1 A.s			
2	Controlled	N/T	0,1 s	Step relative	Linear	Linear	And	Off	1	Interrupt	1534.15	0,1 A.s	-9,51	0,1 A.s			
3	Controlled	N/T	0,1 s	Step relative	Linear	Linear	And	Off	1	Interrupt	1632.25	0,1 A.s	-8,89	0,1 A.s			
4	Controlled	N/T	0,1 s	Step relative	Linear	Linear	And	Off	1	Interrupt	1757.7	0,1 A.s	-8,34	0,1 A.s			
5	Controlled	N/T	0,1 s	Step relative	Linear	Linear	And	Off	1	Interrupt	1768.5	0,1 A.s	-9,45	0,1 A.s			
6	Controlled	N/T	0,1 s	Step relative	Linear	Linear	And	Off	1	Interrupt	1757.65	0,1 A.s	-8,21	0,1 A.s			
7	Controlled	N/T	0,1 s	Step relative	Linear	Linear	And	Off	1	Interrupt	1731.8	0,1 A.s	-6,68	0,1 A.s			
8	Controlled	N/T	0,1 s	Step relative	Linear	Linear	And	Off	1	Interrupt	1699.8	0,1 A.s	-5,71	0,1 A.s			
9	Controlled	N/T	0,1 s	Step relative	Linear	Linear	And	Off	1	Interrupt	1666.3	0,1 A.s	-4,31	0,1 A.s			
10	Controlled	N/T	0,1 s	Step relative	Linear	Linear	And	Off	1	Interrupt	1625.05	0,1 A.s	-4,9	0,1 A.s			
11	Controlled	N/T	0,1 s	Step relative	Linear	Linear	And	Off	1	Interrupt	1577	0,1 A.s	-3,71	0,1 A.s			
12	Controlled	N/T	0,1 s	Step relative	Linear	Linear	And	Off	1	Interrupt	1528.1	0,1 A.s	-2,61	0,1 A.s			
13	Controlled	N/T	0,1 s	Step relative	Linear	Linear	And	Off	1	Interrupt	1471.8	0,1 A.s	-2,33	0,1 A.s			
14	Controlled	N/T	0,1 s	Step relative	Linear	Linear	And	Off	1	Interrupt	1413.6	0,1 A.s	-2,46	0,1 A.s			
15	Controlled	N/T	0,1 s	Step relative	Linear	Linear	And	Off	1	Interrupt	1361.75	0,1 A.s	-2,02	0,1 A.s			
16	Controlled	N/T	0,1 s	Step relative	Linear	Linear	And	Off	1	Interrupt	1311.65	0,1 A.s	-0,96	0,1 A.s			
17	Controlled	N/T	0,1 s	Step relative	Linear	Linear	And	Off	1	Interrupt	1266.2	0,1 A.s	-0,66	0,1 A.s			
18	Controlled	N/T	0,1 s	Step relative	Linear	Linear	And	Off	1	Interrupt	1228.4	0,1 A.s	-0,27	0,1 A.s			
19	Controlled	N/T	0,1 s	Step relative	Linear	Linear	And	Off	1	Interrupt	1199.35	0,1 A.s	0,16	0,1 A.s			
20	Controlled	N/T	0,1 s	Step relative	Linear	Linear	And	Off	1	Interrupt	1172.6	0,1 A.s	-0,33	0,1 A.s			
21	Controlled	N/T	0,1 s	Step relative	Linear	Linear	And	Off	1	Interrupt	1147.8	0,1 A.s	-0,38	0,1 A.s			
22	Controlled	N/T	0,1 s	Step relative	Linear	Linear	And	Off	1	Interrupt	1132.35	0,1 A.s	-0,79	0,1 A.s			
23	Controlled	N/T	0,1 s	Step relative	Linear	Linear	And	Off	1	Interrupt	1122.2	0,1 A.s	-1,2	0,1 A.s			
24	Controlled	N/T	0,1 s	Step relative	Linear	Linear	And	Off	1	Interrupt	1112.3	0,1 A.s	-0,34	0,1 A.s			
25	Controlled	N/T	0,1 s	Step relative	Linear	Linear	And	Off	1	Interrupt	1103.45	0,1 A.s	-1,81	0,1 A.s			
26	Controlled	N/T	0,1 s	Step relative	Linear	Linear	And	Off	1	Interrupt	1100.05	0,1 A.s	-1,31	0,1 A.s			
27	Controlled	N/T	0,1 s	Step relative	Linear	Linear	And	Off	1	Interrupt	1104.7	0,1 A.s	-1,4	0,1 A.s			
28	Controlled	N/T	0,1 s	Step relative	Linear	Linear	And	Off	1	Interrupt	1108.45	0,1 A.s	-1,15	0,1 A.s			

Abbildung 3-19: Step Sequencer SSQ

Alle Messsignale die während der Realfahrt nicht mit einer Frequenz von 10Hz aufgezeichnet werden konnten, wurden mit der gleitenden Mittelwert Methode gefiltert und in ein 10Hz Signal konvertiert welches anschließend übernommen werden konnte. Durch die Filterung kann gewährleistet werden, dass der entstehende Fehler bei der Konvertierung möglichst klein ausfällt.

Beispielhaft zeigt Abbildung 3-20 einen Ausschnitt der Flexplate-Drehmomenten Messung (grüne Kurve) welche mit einer Auflösung von 100Hz aufgezeichnet wurde. Würde ausschließlich jeder zehnte Wert herangezogen werden (dunkelblaue Kurve), würde sich die Charakteristik stark verfälschen. Durch Glättung der gleitenden Mittelwertmethode des Ursprungssignal und einer 10Hz Diskretisierung kann die Originalmessung gut nachempfunden werden.

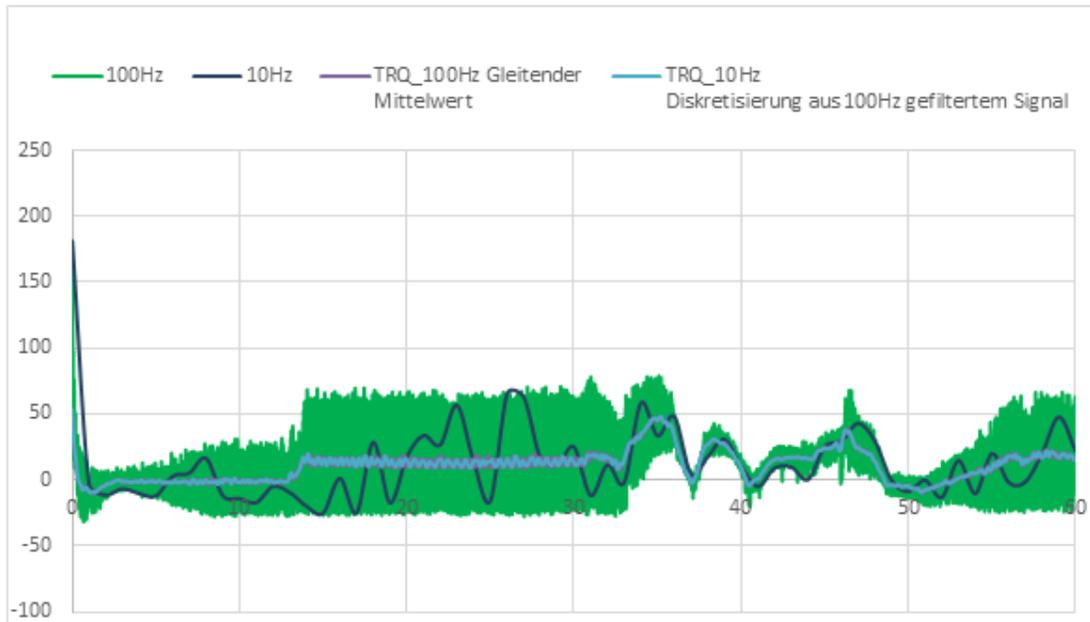


Abbildung 3-20: Signalfilter

Der verwendete gleitende Mittelwert Algorithmus berechnet den Mittelwert über einem Zeitfenster das 0,5sek vor und nach dem gesuchten Zeitpunkt liegt und gibt diesen spezifisch für diesen Zeitpunkt aus. In diesem Fall wurde keine Gewichtung bestimmter Werte vor- oder nach dem gesuchten Zeitpunkt vorgenommen. Am Beginn und Ende des gesamten Datensets (Erster- und letzter Wert) werden die Originalwerte ohne Berechnung übernommen.

Die gleiche Vorgehensweise wie beispielhaft anhand an der Drehmomentmessung erläutert, wurde bei allen Messungen die nicht in einer 10Hz Auflösung vorliegen, vorgenommen. Im Detail wurde mit der gemessenen Motordrehzahl und dem Ansaugluft-Drucksignal aus der Realfahrt analog vorgegangen.

Im speziellen Fall der Motordrehzahl musste eine weitere Anpassung vorgenommen werden. Die charakteristische Motorlast aus der Realfahrt (Drehzahl – Drehmomentkollektiv) wurde übernommen und dem Versuchsmotor am Prüfstand übergeben. Da der Prüfstandsmotor eine geringfügig andere Leerlaufdrehzahl besitzt wurde der Drehzahlverlauf so angepasst, dass ein natürlicher Motorbetrieb am Prüfstand möglich ist. Im Detail wurde der gesamte Drehzahlverlauf um die ermittelte Leerlaufdrehzahldifferenz erhöht. Abbildung 3-21 zeigt den originalen- sowie die angehobenen Drehzahlverlauf.

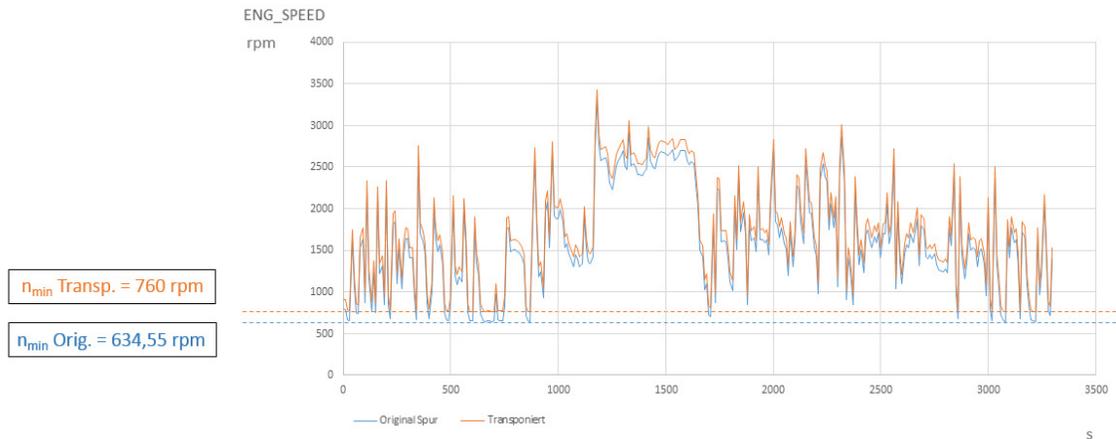


Abbildung 3-21: Anpassung Motordrehzahl

Die gemessene Motormomentenspur in der Realfahrt konnte ohne Anpassung der unteren- bzw. oberen Grenzwerte übernommen werden.

3.1.4 Versuchsdurchführung

Aufgrund der vorhandenen Drehmoment- und Drehzahlspur, über der Zeit während der Realfahrt wurde ebenfalls am Prüfstand eine Drehzahl-, Drehmoment- Regelung gewählt. Bei dieser Regelart wird die Motordrehzahl mit der direkt verbundenen Asynchronmaschine dem Motor aufgeprägt. Die gesamte Regelung aller Prüfstands- und Motorparameter, sowie die gesamte Steuerung und Überwachung der Messtechnik, wird von der Automatisierungssoftware PUMA 1.5.3 vorgenommen. Das gewünschte Motordrehmoment wird über einen PID Regler mittels dem Pedalwert α eingestellt. Der Regelbereich des Pedalwertes α reicht von 0 – 100%, wobei 0% Motorleerlauf- und 100% Vollast, max. mögliches Drehmoment entspricht. Um unrealistische Pedalwertänderungen zu verhindern ist ein max. Gradient von 10% Änderung pro Zeitschritt (0,1sek) eingefügt worden. Unrealistische, sehr dynamische Pedalwertänderungen können durch die Umrechnung von geforderten Drehmoment und aktuellen Fahrpedalstellung auftreten. Die Eingangsgrößen Drehzahl und Drehmoment werden der Leistungsbremse bzw. dem Prüfstandmotor (Abk. UUT = Unit Under Test) in 10Hz aufgelösten Zeitschritten vorgegeben. Alle Vorgabeparameter sind im SSQ hinterlegt, von dem die Prüfstandsautomatisierung zu jedem Zeitpunkt die Vorgabewerte auslesen kann. Die Prüfstand – Motorregelung mittels Drehzahl-/ Drehmoment (Abk. n/T) – Regelung bietet den Vorteil die Motorlast der Realfahrt möglichst genau nachzuempfinden da das vorliegende Drehzahl-/ Drehmoment-Kollektiv das Integral aller Energieverbraucher darstellt. Die zeitlich aufgelöste Motorlast widerspiegelt die Last zur Fortbewegung der gesamten Fahrzeugmasse inkl. Zuladung, sowie der Überwindung aller auftretenden Fahrwiderstände und zusätzlich den Leistungsbedarf der auftretenden Nebenverbraucher. Ein Nachteil der Regelart ist die verzögerte Ansprechzeit der Drehmomentregelung. Abbildung 3-22 und Abbildung 3-23 zeigt die Diskrepanz zwischen dem gewünschten Drehmoment (blaue Kurve) und der tatsächlich gemessenen Drehmomentspur (Kurve in Magenta). Der dargestellte Drehmomentverlauf zeigt einen Schaltvorgang. Während der Schaltsequenz ändert sich die Motordrehzahl sehr rasch. Die vorgegebene Motordrehzahl wird von der Belastungsmaschine akkurat eingestellt und der Motor gebremst bzw. beschleunigt. Die Drehmoment – Fahrpedalregelung kann derartig rasche Änderungen während dem Schaltvorgang nicht dynamisch genug einstellen. Die abrufbare Leistung berechnet sich aus Formel 3-1.

$$P_{\text{Engine}} = M_{\text{Engine}} * \omega$$

Formel 3-1: Motorleistung

Wobei die Winkelgeschwindigkeit direkt proportional zur Motordrehzahl ist. Der Zusammenhang ist in Formel 3-2 beschrieben.

$$\omega = \frac{\pi * n_{\text{Engine}}}{30}$$

Formel 3-2: Winkelgeschwindigkeit

Aus dem Drehmoment/ Drehzahl Zusammenhang ergibt sich bei rascher Drehzahl Änderung und konstanter Leistung eine Drehmomentenspitze.

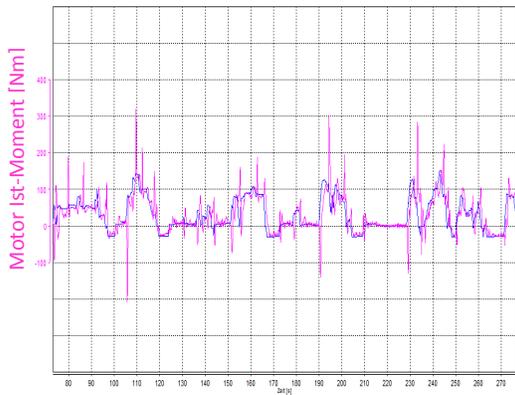


Abbildung 3-22: Soll – Ist- Drehmoment

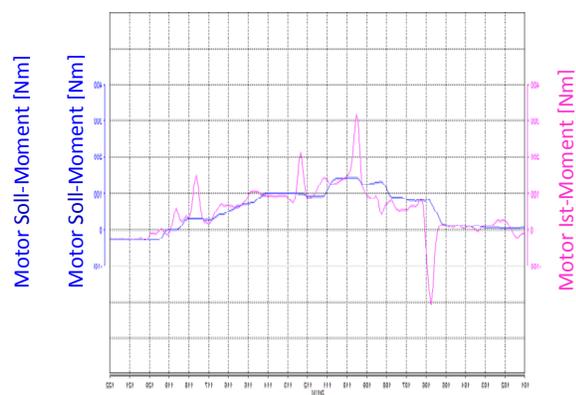


Abbildung 3-23: Drehmoment Verlauf Schaltvorgang

Da die Drehmomentregelung der Drehzahl nicht rasch genug folgen kann sinkt bei stark steigender Motordrehzahl das Moment (Spitze nach unten) bzw. mit bei rasch sinkender Drehzahl invers (Spitze nach oben). Bei großen Drehzahländerungen bewirkt die Massenträgheit des Kurbeltriebs die Ausbildung eines sichtbaren Drehmomentpeaks.

Um derartigen Artefakte zu vermeiden kann während der Schaltvorgangsequenz eine Änderung der Regelart vorgenommen werden. Um den Schaltvorgang realitätsnahe abbilden zu können müsste eine Umschaltung auf den Regelmodus Leerlauf (engl. Idle Control) welche im Wesentlichen eine Motordrehzahl / Fahrpedalstellung (n/α) Regelung (wobei $\alpha = 0$) und einer Massenträgheitskompensation der E-Maschine inkl. der Wellenverbindung entspricht, was einen reale Motorleerauf zufolge hat. Eine Änderung der Regelung verlangt eine zuverlässige Erkennung des Schaltvorgangs. Im vorliegenden Fall ist der gewählte Gang aus dem CAN-Bus Signal entnommen. Das Gangsignal aus der Motorsteuerung wird aus der vorhandenen Fahrzeuggeschwindigkeit und dazugehöriger Motordrehzahl berechnet. Eine präzise zeitliche Zuordnung der Kupplungstrennung ist damit nicht möglich. Um eine Realfahrt am Prüfstand zu replizieren ist bei dieser Methode ebenfalls die Erkennung der Kupplungstrennung bzw. des Schaltvorgangs wesentlich.

Dem Problem der Drehmomentenspitzen entgegenzuwirken wurde die Drehmomentvorgabe zeitlich vorgezogen und somit einen Teil der Regelzeit zu kompensieren. Abbildung 3-24 kann entnommen werden, dass das Drehmoment mit Zeitoffset zwar die Drehmomentenspitzen zeigt, jedoch die Amplituden der Schwingung verkleinert werden konnte. Während der

Versuchsdurchführung wurde iterierend die Drehmomentvorgabe vorgezogen um den idealen Zeitversatz zu ermitteln. Der Zeitoffset zwischen dem original gemessenen Drehmoment in der Realfahrt und dem Vorgabewert wurde letztendlich mit 1sek festgelegt. Hier konnten die Drehmomentenspitzen verkleinert werden ohne einen Fehler in der resultierenden Drehmoment-Drehzahl Paarung hervorzurufen.

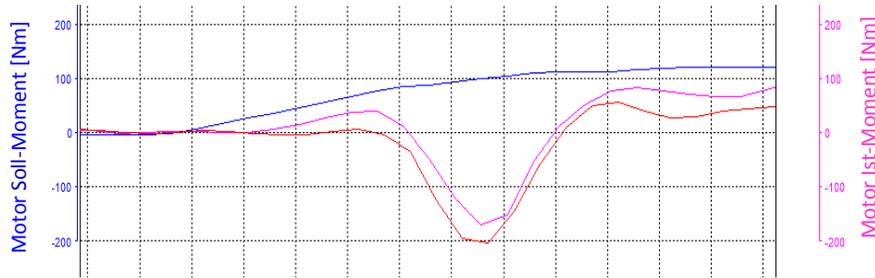


Abbildung 3-24: Zeitoffset Drehomentvorgabe

Die Drehzahlregelung über die 220kW Asynchron-Pendelmaschine erfolgt sehr präzise wie Abbildung 3-25 und Abbildung 3-26 zeigt.

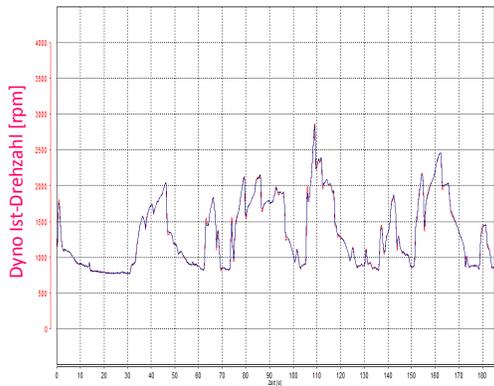


Abbildung 3-25: Soll – Ist- Drehzahl

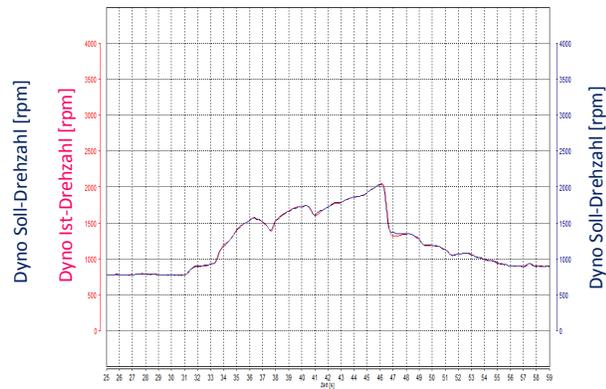


Abbildung 3-26: Drehzahl Detail

Die blau gezeichnet vorgegebene Drehzahlspur liegt überwiegend deckungsgleich über der im Versuch ermittelten Motordrehzahlspur in Rot eingezeichnet.

Die während dem Prüfstandsbetrieb gemessene Kühlwassertemperatur am Motorauslass (Normname: Temp. Water Out, Abk. TWO) hinkt der gewünschten Temperaturspur nach. In Abbildung 3-27 kann eine Zeitdifferenz (grüner Cursor) zwischen der geforderten (Magenta) und gemessenen Temperatur (Blau) gesehen werden. Die Zeitdifferenz resultiert aus mehreren Einflussfaktoren.

Einflussfaktor 1: Die Regelung der Kühlwassertemperatur am Motorauslass (TWO) ist verglichen mit der Kühlwasserregelung am Motoreinlass (Normname TWI) langsamer. Da in der Realfahrt die TWI Spreizung zwischen der max.- und min. Temperatur größer als der mögliche Regelbereich am Prüfstand ist, wurde die Kühlwassertemperatur am Motorausgang (TWO) als Vorgabegröße am Prüfstand gewählt.

Einflussfaktor 2: Die zur Verfügung stehende Kühlwasserconditionierung besitzt zwei Heizer die während der Reglung nur ein- und ausgeschaltet werden und nicht abhängig der Soll- Ist Temperatur die notwendige Heizleistung zur Verfügung stellen.

Einflussfaktor 3: Die Kühlwasserconditionierung am Prüfstand ist hinter der Leistungsbremse

installiert. Die Vor- und Rücklauf Verschlauchung zum bzw. vom Motor ist unter der Grundplatte durchgeführt und wird auf gegenüberliegender Seite der Kraftabnahme (bei Zyl. 1) an den Motor angeschlossen. Das bedeutet, dass längere Vor- und Rücklauf-Leitungen in Kauf genommen werden müssen.

Einflussfaktor 4: Die spezifische Wärmekapazität von Kühlwasser und Motor resultiert in einer thermischen Trägheit, die in Form einer verzögerten Ansprechzeit der Temperaturänderung zu sehen ist.

Einflussfaktor 5: Bei transients Laständerung, wie bei den durchgeführten Versuchen, kommt es ständig zu unterschiedlichen Energieeinträgen aus der Verbrennung in das Kühlwasser.

Um die Auswirkungen der genannten Einflussfaktoren zu minimieren, sodass während dem Prüfstandsbetrieb der Motor mit einem annähernd gleichen Kühlwassertemperaturprofil wie in der Realfahrt zu betrieben werden konnte, wurde ein durchschnittlicher Zeitversatz von 14 Sek. zwischen Soll- und Ist-Spur gemessen und bei nachfolgenden Tests die Vorgabewerte um diese Konstante zeitlich vorgezogen.

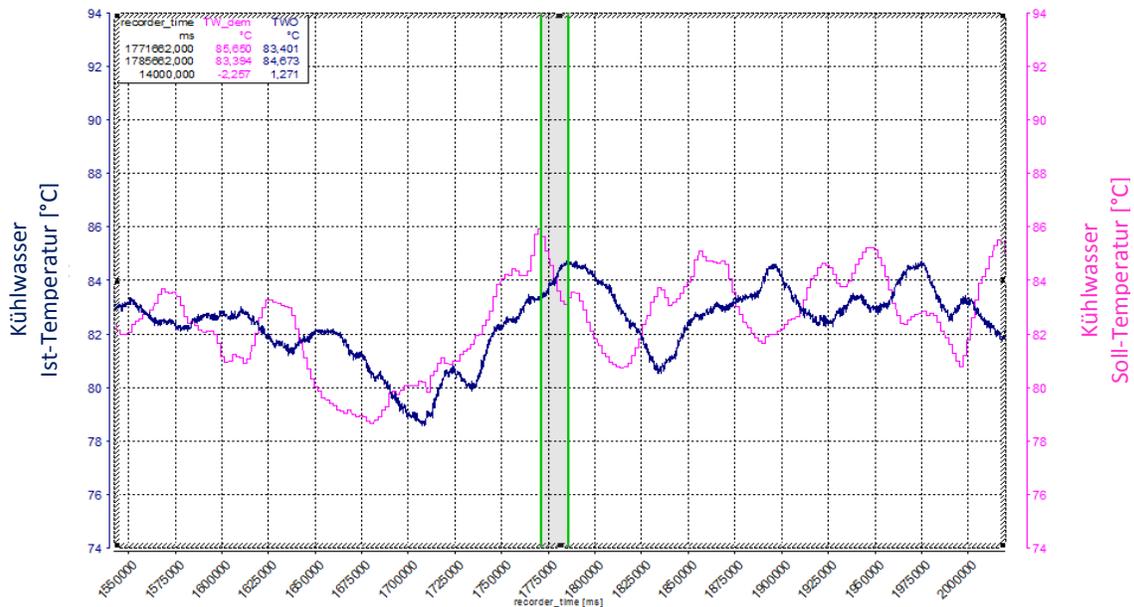


Abbildung 3-27: Kühlwassertemperatur Vorgabe- und tatsächlicher Verlauf

Abbildung 3-28 zeigt die verschobene Vorgabespur und die gemessene Antwortgröße (Blau). Dynamische Temperaturänderungen sind auch hier nur in einem begrenzten Ausmaß realisierbar. Sehr große Gradienten kann die Prüfstandregelung nicht abbilden, sodass sehr kleine Temperaturänderungen nicht darstellbar sind. Die Detailansicht in Abbildung 3-29 zeigt, dass nicht alle Wassertemperaturänderungen darstellbar sind, jedoch die Charakteristik der Realfahrt-Kühlwassertemperatur gut nachempfunden werden kann.

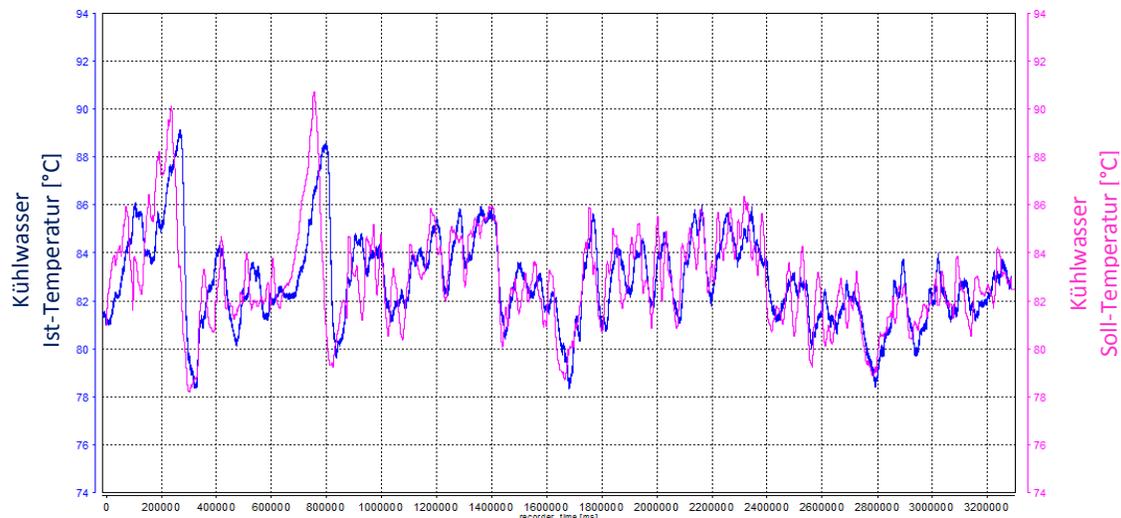


Abbildung 3-28: Kühlwassertemperatur mit Zeitoffset

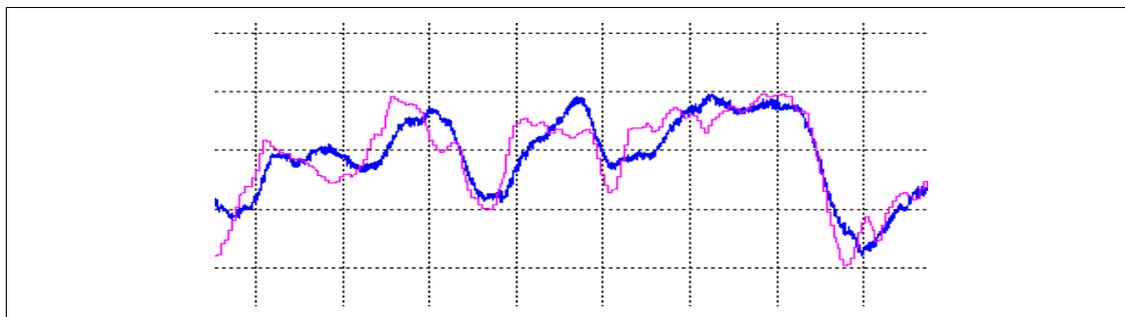


Abbildung 3-29: Kühlwassertemperaturverlauf Detail

Der Atmosphärendruck während der Realfahrt sinkt durch das vorgegebene Höhenprofil der Fahrtstrecke, wie in Abbildung 3-30 bzw. in Punkt 3.1.1 beschrieben ersichtlich, zweimal ab.

Die eingesetzte Ansaugluftkonditionierung (engl. Air Conditioning System Abk. ACS) kann den Ansaugluftdruck erhöhen allerdings nicht unter den vorherrschenden Atmosphärendruck absenken. Dies bedeutet dass mit der zur Verfügung stehenden ACS die Bergfahrten nicht nachempfunden werden können, da die beobachtete Realfahrt, der von Graz ausgehenden Route zwei Anstiege beinhaltet und dabei der Luftdruck unter dem Druckniveau von Graz abfällt. Um den Einfluss des Druckunterschieds zu untersuchen wurde die gemessene, originale Ansaugluftdruckspur (in Abbildung 3-30 blau dargestellt) über der Zeit hochgesetzt (in Rot dargestellt), sodass der darzustellende Minimalluftdruck den vorherrschenden Atmosphären Luftdruck nicht unterschreitet.

Der minimale Luftdruck wurde mit 995mbar festgelegt. Dieser Luftdruck resultiert aus dem berechneten Luftdruck der barometrischen Höhenformel für Graz, mit einer Seehöhe von 353m der 969mbar beträgt plus einer möglichen Schwankungsbreite durch verschiedene Wetterlagen auf 985mbar, sowie einer min. Druckbeaufschlagung von 10mbar die von Seiten der Ansaugluftkonditionierung notwendig ist. In Summe ergibt sich als kleinster regelbarer Druck von 995mbar (strichlierte Linie in Abbildung 3-30).

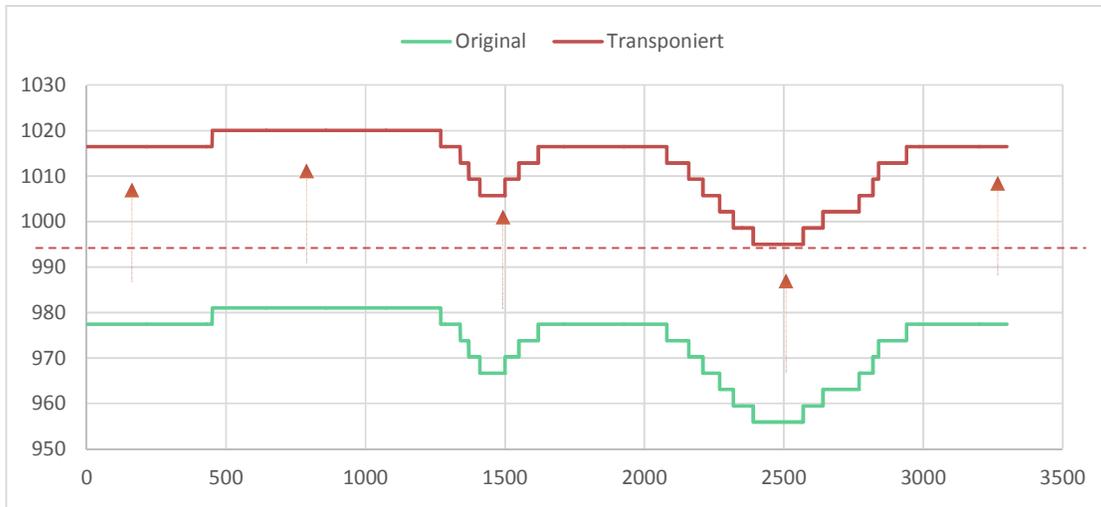


Abbildung 3-30: Atmosphärischer Luftdruck Original und Transponiert

Der, im Vergleich zur vorherrschenden Atmosphäre, erhöhte Luftdruck wird mittels einer ETAS INCA Schnittstelle dem Entwicklungs- Motorsteuergerät (engl. Engine Control Unit Abk. ECU) mit einer Frequenz von 10Hz übergeben. Damit kann sichergestellt werden, dass der Motor in einem Kennfeld betrieben wird, das mit dem real anliegenden Ansaugluftdruck übereinstimmt.

In Abbildung 3-31 ist der Vorgabe-Luftdruck in Rot, sowie die gemessene Antwortgröße in Grün dargestellt. Die Regelabweichungen bewegen sich im Bereich < 5mbar.

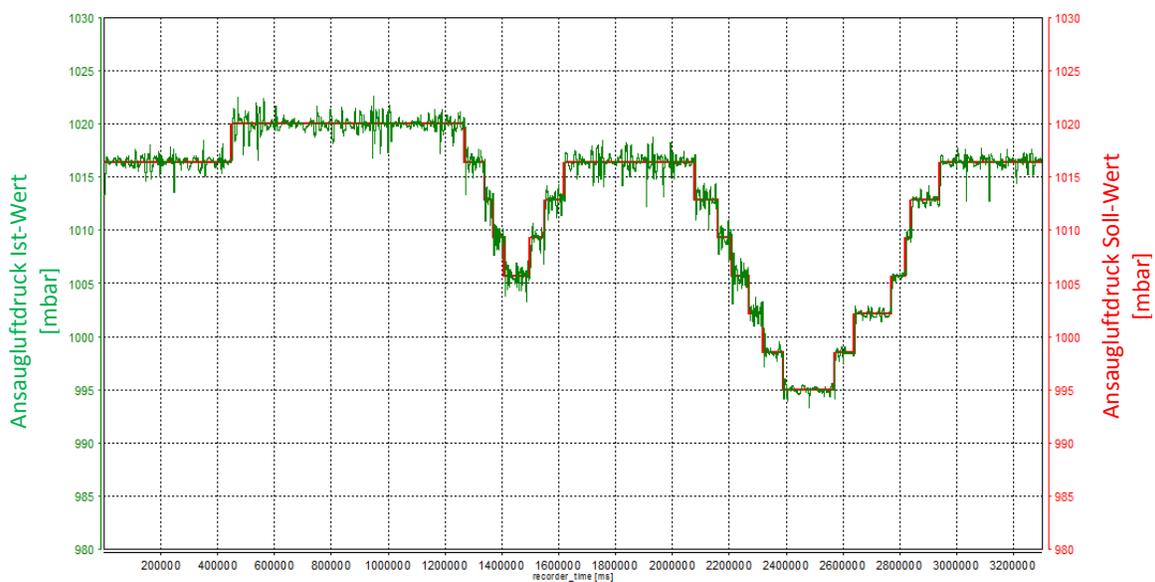


Abbildung 3-31: Ansaugluftdruck Ist – Soll Profil

Ein ähnliches Bild liefert die konstante Luftdruck Regelung auf 1013mbar. Die globalen Minima und Maxima liegen bei 1009,3mbar und 1015,7. Der Durchschnittswert entspricht dem

Vorgabewerte von 1013mbar und einer Standardabweichung von 0,64 mbar. Abbildung 3-32 zeigt den Verlauf der Luftdruckvorgabe (Magenta) und der Antwortgröße (Grün).

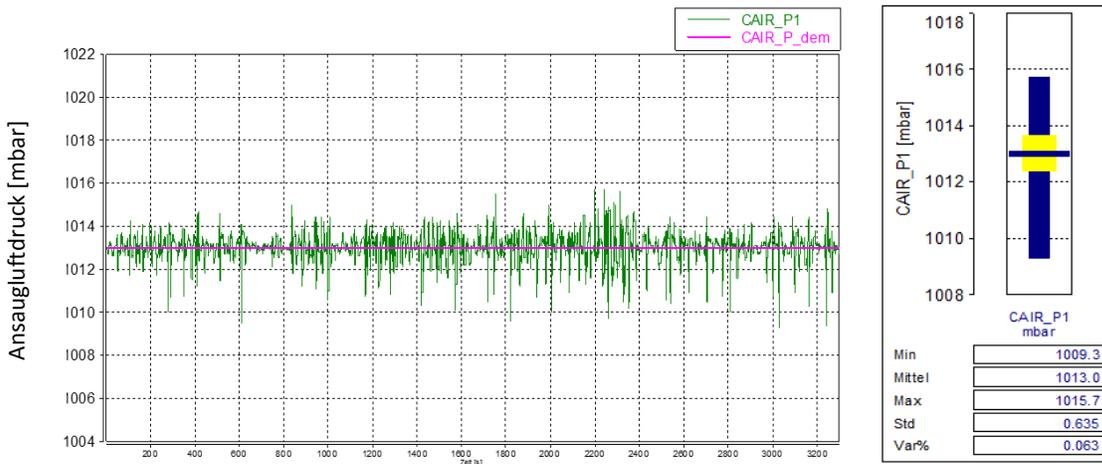


Abbildung 3-32: Konstante Ansaugluftdruckregelung

Die dynamische Motorölkonditionierung inklusive dem Temperaturregler ist örtlich sehr nahe dem Motor am Prüfstand angeordnet. Daher ist kein Zeitoffset aufgrund der Leitungslängen notwendig. Am Prüfstandsmotor sowie in der Realfahrt wurde die Temperaturmessstelle in der Ölwanne appliziert. Abbildung 3-33 zeigt die Motoröl-Vorgabewerte (Magenta) und den durch die Motoröl-Konditionierung aufgeprägte Temperaturverlauf während dem Prüfstandsbetrieb (Blau). Das Temperaturprofil kann charakteristisch gut nachempfunden werden.

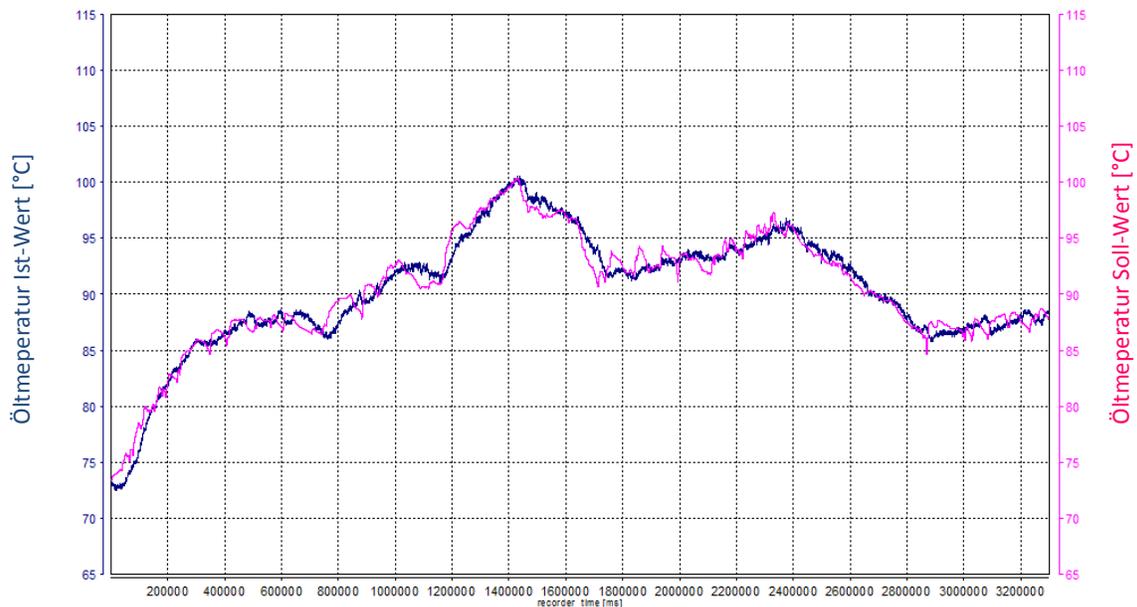


Abbildung 3-33: Öl-Temperatur (dyn.)

Wie Detailansicht Abbildung 3-34 zeigt können kleine Temperaturschwankungen nicht detailgetreu nachempfunden werden.

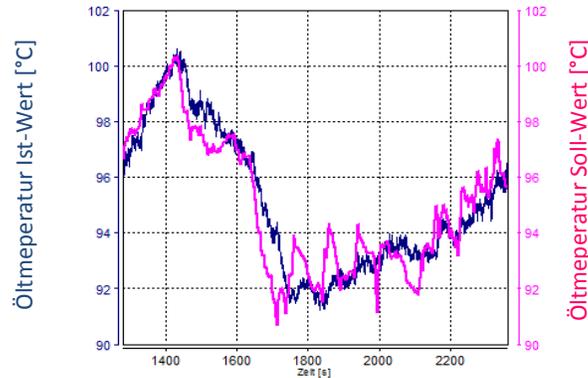


Abbildung 3-34: Öl-Temperatur Detail

Die Öltemperatur bei konstantem Vorgabewert entspricht 90°C . Die tatsächlich gemessene Öltemperatur in der Ölwanne (engl. Oilsump) konnte im Mittel über den gesamten Prüflauf auf $89,75^{\circ}\text{C}$ mit einer Standardabweichung von $2,17^{\circ}\text{C}$ erreicht werden. Das entspricht einem Streumaß von 2,41%.

Die Werte sind aufgrund der niedrigen Starttemperatur (73°C) im Vergleich zum Vorgabewert (90°C) ein wenig verfälscht da der Einschwingvorgang nicht ausgeklammert wurde. Die Vorgabetemperatur zur Konditionierung wurde auf die Anfangstemperatur der Dynamischen Öl-Temp. Regelung festgelegt.

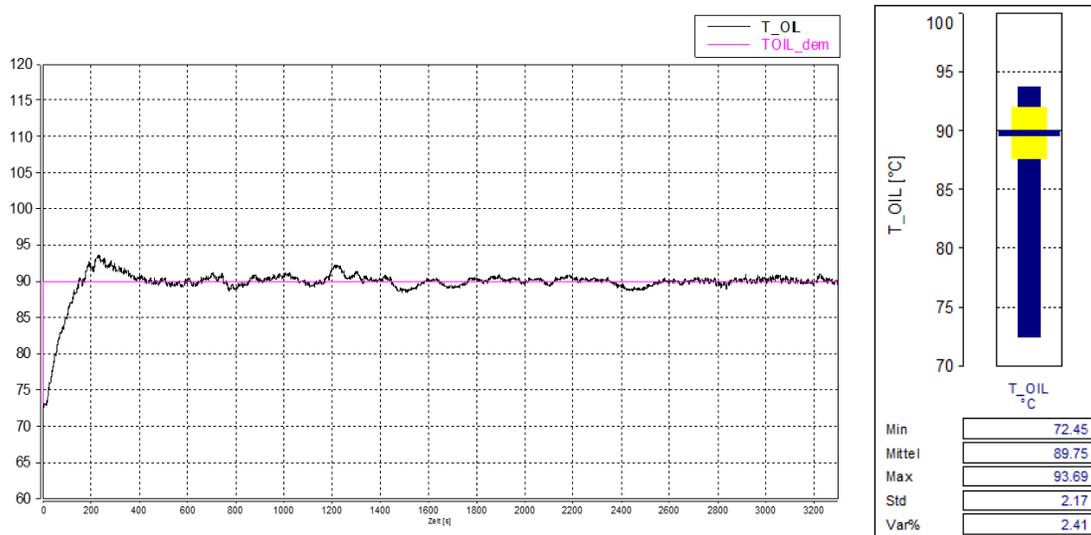


Abbildung 3-35: Öl-Temperatur (konst.)

Die geplante Versuchsmatrix (Abbildung 3-36), wie bereits in 3.1.2 beschrieben, wurde sechs mal wiederholt um statistisch abgesicherte Aussagen treffen zu können. Zu Beginn wurde die Regelart Drehzahl - Drehmoment (N/T) gewählt. Im Detail wird dabei die Motordrehzahl von der Belastungsmaschine dem Verbrennungsmotor aufgeprägt und das gewünschte Drehmoment durch verstellen des Fahrpedals eingeregelt. Die Regelung bzw. die Umrechnung des Vorgabe-Drehmoments und dem Pedalwert wird durch einen PID Regler übernommen.

TW	TOIL	p_ATM	CONFIG	N/T	N/T	N/T	N/Alpha	N/Alpha	N/Alpha
Dyna.	Dyna.	Dyna.	1	ATF 6 (Run_28)	ATF 5 (Run_38)	ATF 4 (Run_49)	ATF 3 (Run_58)	ATF 2 (Run_67)	ATF 1 (Run_69)
Dyna.	Konst	Dyna.	2	ATF 12 (Run_27)	ATF 11 (Run_37)	ATF 10 (Run_47)	ATF 9 (Run_57)	ATF 8 (Run_66)	ATF 7 (Run_70)
Konst	Dyna.	Dyna.	3	ATF 18 (Run_26)	ATF 17 (Run_36)	ATF 16 (Run_46)	ATF 15 (Run_56)	ATF 14 (Run_65)	ATF 13 (Run_71)
Dyna.	Dyna.	Konst	4	ATF 24 (Run_25)	ATF 23 (Run_35)	ATF 22 (Run_45)	ATF 21 (Run_55)	ATF 20 (Run_64)	ATF 19 (Run_72)
Konst	Konst	Dyna.	5	ATF 30 (Run_32)	ATF 29 (Run_32)	ATF 28 (Run_44)	ATF 27 (Run_54)	ATF 26 (Run_63)	ATF 25 (Run_73)
Konst	Dyna.	Konst	6	ATF 36 (Run_21)	ATF 35 (Run_31)	ATF 34 (Run_43)	ATF 33 (Run_53)	ATF 32 (Run_62)	ATF 31 (Run_74)
Dyna.	Konst	Konst	7	ATF 42 (Run_22)	ATF 41 (Run_30)	ATF 40 (Run_42)	ATF 39 (Run_65)	ATF 38 (Run_61)	ATF 37 (Run_75)
Konst	Konst	Konst	8	ATF 48 (Run_24)	ATF 47 (Run_39)	ATF 46 (Run_41)	ATF 45 (Run_51)	ATF 44 (Run_50)	ATF 43 (Run_68)

Abbildung 3-36: Versuchsübersicht

Während der ersten Versuche wurden Unregelmäßigkeiten bezüglich der Wiederholbarkeit in der Motordrehmomentenspur einzelner Messungen festgestellt. Um die Wiederholbarkeit zu steigern wurde auf Verdacht der Prüfstandsregelmodus von N/T auf N/Alpha geändert. Dafür wurde bei einem Testlauf mit Drehmomentvorgabe die errechnete (tatsächliche) Fahrpedalstellung α aufgenommen und bei weiteren Testläufen als Vorgabewert dem Motor übergeben. In Summe wurde jede Konfiguration (Config 1 bis 8) dreimal mittels der N/T Regelung sowie N/Alpha vorgegeben. Somit sind 48 Versuchsläufe die Basis der Ergebnisermittlung. Die Versuchsmatrix inkl. der Aufstellung der zugehörigen Versuchsläufe ist in Abbildung 3-36 dargestellt.

4 Ergebnisse

Folgend werden die Ergebnisse der durchgeführten Messungen beschrieben. Dazu wird zuerst die Wiederholbarkeit der Messungen dargestellt. Abhängig der Versuchsvariante werden die Messergebnisse der gasförmigen und Partikelanzahl Emissionen unter Berücksichtigung der Wiederholbarkeit gezeigt.

4.1 Drehmomentverlauf

Der Drehmomentenverlauf weist gewisse Streuungen auf. Abbildung 4-1 stellt einen Ausschnitt aller aufgezeichneten Drehmomentmessung dar. Hieraus kann abgeleitet werden, dass es aufgrund nicht völliger Wiederholbarkeit des Prüflaufs bei gleicher Last, zu gewissen Abweichungen kommt. Um nicht Unterschiede in den Schadstoffmessungen auf Basis ungewünschter Messfehler zu bewerten ist es notwendig diese genauer zu spezifizieren.

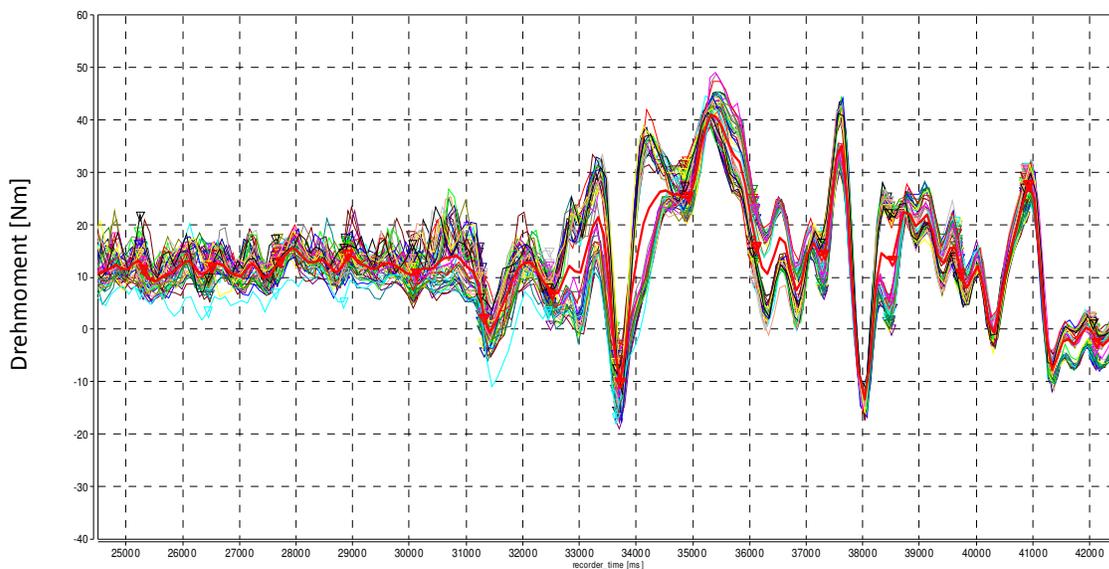


Abbildung 4-1: Drehmomentverlauf

In der Detailansicht (Abbildung 4-2) ist erkennbar, dass bei getrennter Betrachtung jener Verläufe, bei denen Drehzahl / Drehmoment (N/T) geregelt, und jene bei denen Drehzahl Fahrpedalstellung (N/Alpha) geregelt wird, ein Unterschied sichtbar ist. Der gemittelte Drehmomentverlauf aller Messungen, in Rot dargestellt, und die Drehmoment-Vorgabewerte, in Dunkelblau eingezeichnet, können hier als Referenz herangezogen werden. Es ist erkennbar, dass die Drehmomentsspuren, welche bei N/Alpha Regelung gemessen wurden, näher beisammen liegen, jedoch zeitlich deutlich verschoben zur Vorgabe sind. Im Gegenzug kann gesehen werden, dass die Drehmomentverläufe welche während der N/T Regelung eruiert wurden etwas größere Streuungen aufweisen. Allerdings sind die gemessenen Werte näher an der Drehmoment-Vorgabekurve.

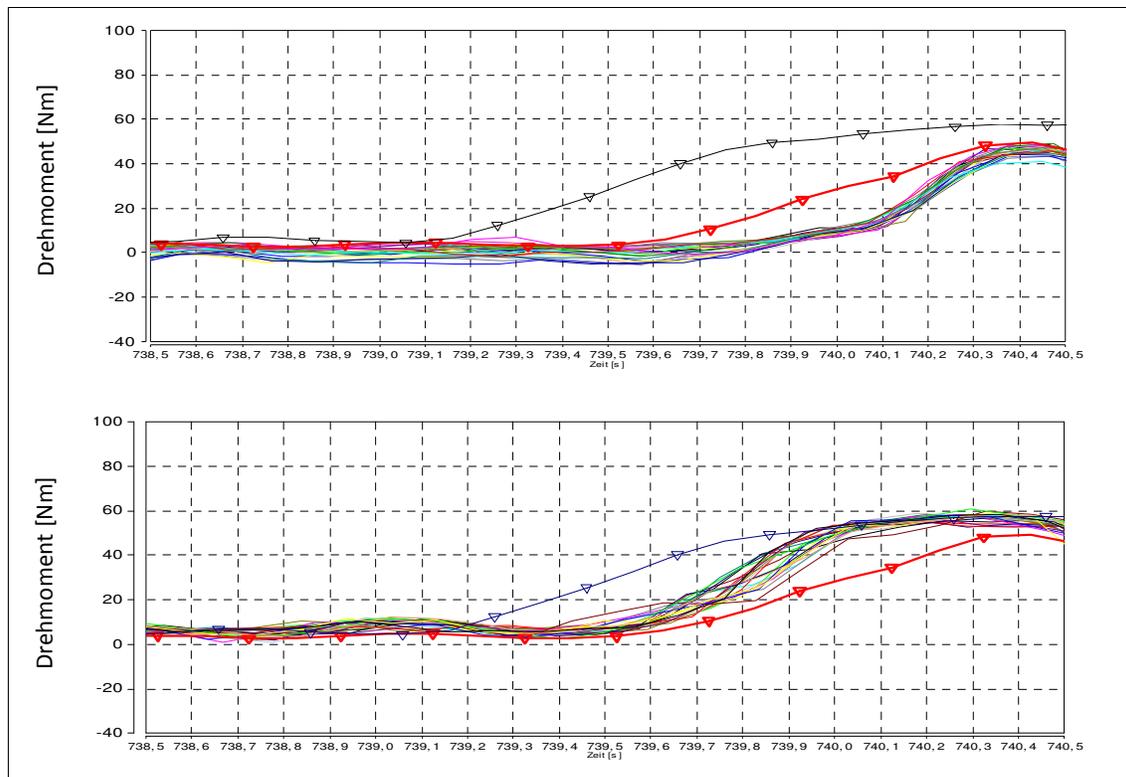


Abbildung 4-2: Drehmoment Vergleich N/T – N/Alpha

Es lässt sich ableiten, dass die Wiederholbarkeit der Emissionsmessungen, neben vorgegebenen Ungenauigkeiten und Messfehler der Analysatoren, auch durch leichte Variabilität im Motorbetrieb zu berücksichtigen ist. Die Vorgehensweise zur Ermittlung der Summe aller Messfehler und Störgrößen der Schadstoffmessung wird in Abschnitt 4.2 beschrieben.

4.2 Wiederholbarkeit

Allgemein wurden die zeitaufgelösten Emissionen (Modalwert) kumuliert. Dadurch sind Unterschiede in den Schadstoffemission vergleichbar leicht zu erkennen. Das linke Diagramm in Abbildung 4-3 zeigt die Modalwerte einer Stickoxid Messung zweier Prüfläufe in Blau und Magenta aufgetragen. Ein direkter Vergleich bzw. die Ableitung von Kennziffern ist in der Form schwierig, weshalb die Integration des Messsignals über der Zeit zur Bewertung herangezogen wurde, welche in Abbildung 4-3 (rechtes Diagramm) dargestellt ist. Die Summe der Emissionsunterschiede zweier Versuche kann durch Subtraktion der Endwerte (Ordinatenwert bei Sekunde 3300) ermittelt werden. Im vorliegenden Fall beispielsweise Config. 1 als Endwert der blauen Kurve und Config 8 als Endwert der Kurve in Magenta.

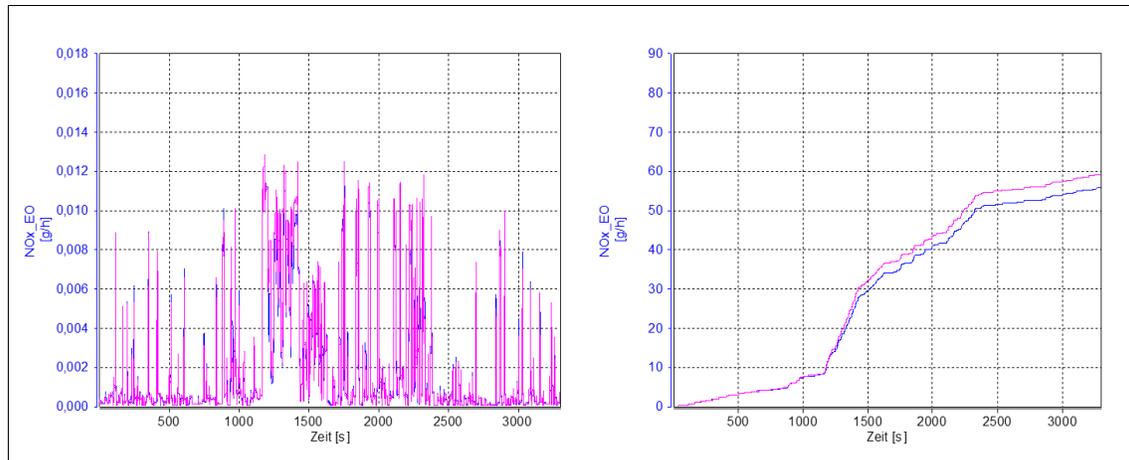


Abbildung 4-3: Vergleich Emissionen Modal - Kummuliert

In den folgenden Diagrammen (Abbildung 4-4 ff.) sind die kumulierten Emissionsmessungen aller Prüfläufe mit gleicher Testkonfiguration dargestellt. Für jede Schadstoffkomponente sind die Abweichungen über den gesamten Testlauf ausgewertet. Die grüne Kurve entspricht der Mittelung aller Messungen. Ausgehend vom Mittelwert (μ) wurden die Abweichungen (x) ermittelt und die Varianz $\text{Var}(X)$ bzw. die Standardabweichung σ nach Formel 4-1 und Formel 4-2 berechnet.

$$\text{Var}(X) = \sigma^2 = \sum_{i=1}^n (x - \mu)^2$$

Formel 4-1: Varianz [88]

$$\sigma = \sqrt{\text{Var}(X)}$$

Formel 4-2: Standardabweichung [88]

Der Variations Koeffizient (Eng. Coefficient of Variation Abk. CoV, dt. Streumaß) wurde aus dem Quotienten der Standardabweichung zum Mittelwert, wie in Formel 4-3 beschrieben, ermittelt. Dieser Wert entspricht dem Prozentwert der Standardabweichung zum Mittelwert und wurde somit als Vergleichswert der Wiederholbarkeit herangezogen.

$$\text{CoV} = \frac{\sqrt{\text{Var}(X)}}{\mu} * 100$$

Formel 4-3: Variationskoeffizient [88]

4.2.1 Wiederholbarkeit gasförmiger Schadstoffemissionen

Das Balkendiagramm in den folgenden Abbildungen zeigt in Grün den Mittelwert aller bewerteten Messungen, sowie die positiv- und negativ addierte Standardabweichung zum Mittelwert, die einem Konfidenzintervall von 68% [89] entspricht. In Grau sind die Maxima und Minima der Abweichungen dargestellt. Alle Berechnungen der statistischen Größen wurden unter der Annahme einer Normalverteilung der Messwerte vorgenommen.

Das Diagramm in Abbildung 4-4 zeigt die Verläufe aller Stickoxidmessungen bei gleicher Testkonfiguration. Zur Bewertung der Wiederholbarkeit wurde die Konfiguration gewählt bei der Ansaugluftdruck, Kühlwasser- und Öltemperatur dynamisch, wie in der Realfahrt beobachtet, nachgeregelt wurden. Es konnte gesehen werden, dass die Reproduzierbarkeit bei konstanten Medienparamter in gleicher Größenordnung auftritt, jedoch die Abweichung

geringfügig kleiner sind, sodass die gewählte Konfiguration dem Grenzfall entspricht. Die Stickoxide zeigen ein Streumaß, das durch den Variationskoeffizient (CoV) beschrieben wird, von 18,7%. Dies ist in Abbildung 4-4 im Feld CoV_NOx_Config 1 ausgewiesen.

Die Statistikbox rechts in Abbildung 4-4 zeigt im grauen Balken die Minima und Maxima der Kumulierten Stickoxidwerte zudem sind die den errechneten Mittelwert (engl. Average Abk. AVG) in Grün und die dazugehörige Standardabweichung (engl. standard deviation Abk. Dev) in Blau eingezeichnet.

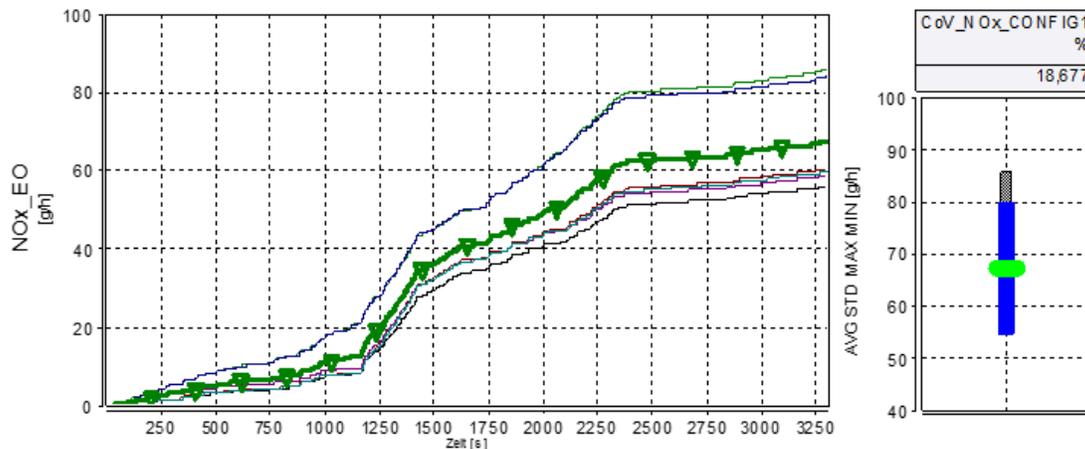


Abbildung 4-4: Wiederholbarkeit Stickoxide

Die Vergleichbarkeit der Kohlenwasserstoffmessung, ebenfalls bei gleicher Konfiguration, weist eine Streuung von 7,4% um den Mittelwert auf. Abbildung 4-5 zeigt den Verlauf der Kohlenwasserstoff Emissionen aller zur Verfügung stehender Messungen über der gesamten Testdauer.

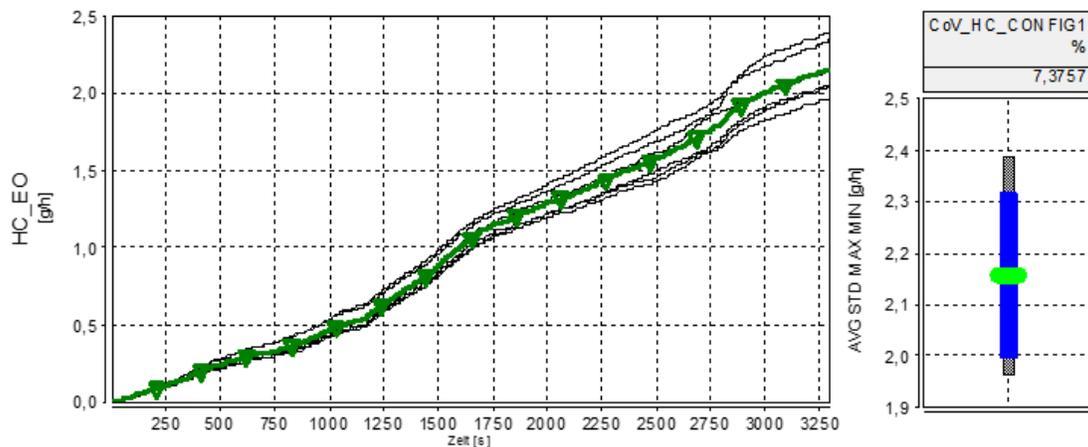


Abbildung 4-5: Wiederholbarkeit Kohlenwasserstoffe

Sehr hohe Wiederholbarkeiten können der bei der Kohlenmonoxid und Kohlendioxid Messung beobachtet werden. Die Abweichungen über die gesamte Testdauer entspricht bei der CO Messung 2,5% wie Abbildung 4-6 zeigt.

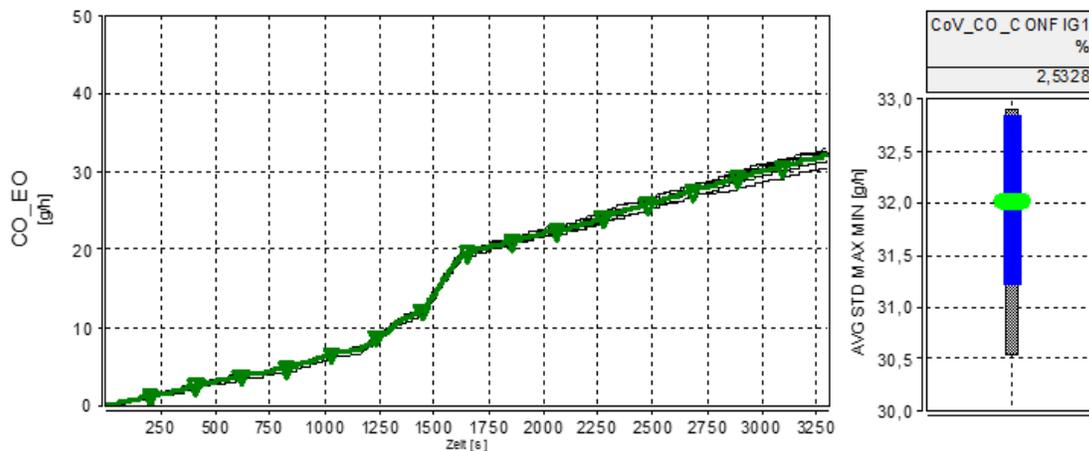


Abbildung 4-6: Wiederholbarkeit Kohlenmonoxid

Die Wiederholbarkeit der Kohlendioxidmessung ist um drei Zehnerpotenzen besser. Abbildung 4-7 zeigt den Verlauf aller CO₂ Messungen, die in der Darstellung nicht unterscheidbar sind, da die Kurven scheinbar kongruent übereinander liegen. Das Streumaß um den Mittelwert liegt bei 0,0087%.

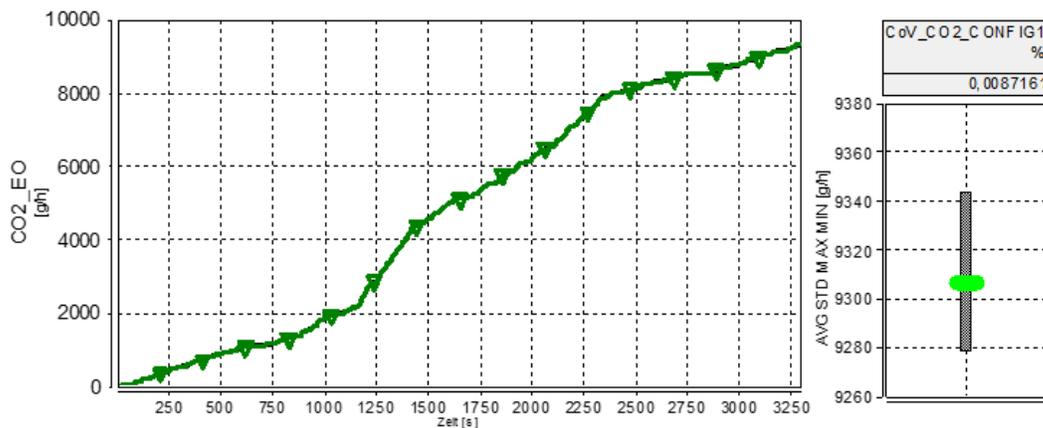


Abbildung 4-7: Wiederholbarkeit Kohlendioxid

Die Wiederholbarkeit der NO_x Emissionen mit einer berechneten Streuung (von 18,7% ist eine nicht zufriedenstellende Basis um genaue Differenz-Emissionen bei verschiedenen Testkonfigurationen zu untersuchen. Werden allerdings nur die ermittelten Schadstoffe mit gleichen Kontrollmodus getrennt voneinander analysiert, konnte eine weitaus erhöhte Wiederholbarkeit beobachtet werden.

Abbildung 4-8 und Abbildung 4-9 zeigen im direkten Vergleich NO_x Emission die während der N/α Motorregelung (Abb. Abbildung 4-8) bzw. bei N/T (Abb. Abbildung 4-9) gemessen wurden. Die zeitaufgelöste Kumulation der NO_x Emissionen zeigt deutlich, dass die Unterschiede mit der N/α Regelung weit größer sind als mittels N/T Regelung. Das Streumaß von 18,3% bei N/α und 1,2% bei N/T zeigt den Unterschied auch deutlich.

Aufgrund der Beobachtung wurden im Anschluss nur die Messungen mittels N/T Regelung zur Bewertung der Schadstoffunterschiede bei verschiedenen Motor-Vorgabe Parametern herangezogen.

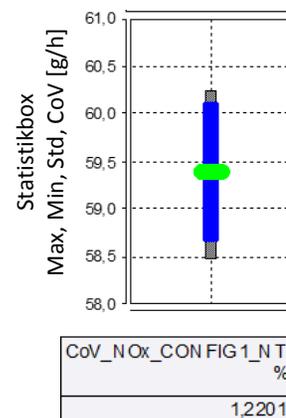
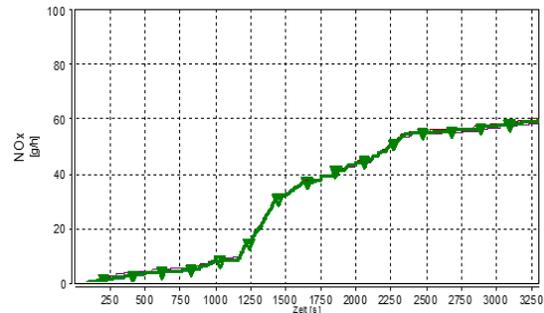
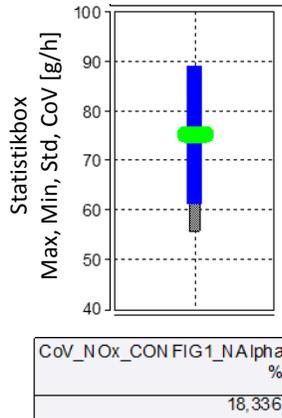
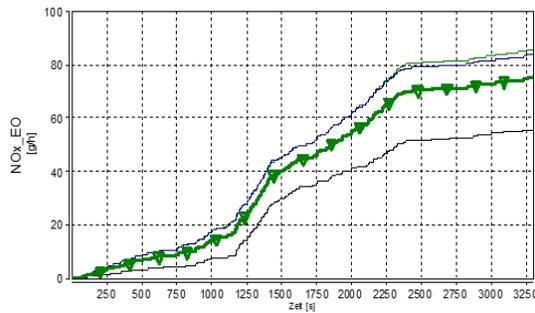


Abbildung 4-8: NO_x bei Regelmodus N/α Abbildung 4-9: NO_x bei Regelmodus N/T

Die Berechnung der Streuung wurde als Prozent der Standardabweichung vom Mittelwert (Variationskoeffizient engl. Coefficient of Variation Abk. CoV) bei allen Konfigurationen durchgeführt. Aus allen Variationskoeffizient wurde für jede Komponente ein arithmetischer Mittelwert berechnet. Diese Analysen dienen um die Summe aller Messfehler zu berücksichtigen. Abbildung 4-10 zeigt in einer Grafik die ermittelten Werte für aller betrachteten, gasförmigen Schadstoffkomponenten. Die Streuung der Stickoxide liegt bei 3,97% und jene der Kohlenmonoxide bei 3,12%. Die Wiederholbarkeit der CO₂ Messung liegt bei einem geringen Streumaß von 0,33% und der Kohlenwasserstoffen etwas erhöht bei 9,63%. Die absolute Menge an Kohlenwasserstoffen ist in der gesamten Messreihe sehr gering. Aus diesem Blickwinkel können die ermittelten Ungenauigkeiten der HC-Messung in Kauf genommen werden kann.

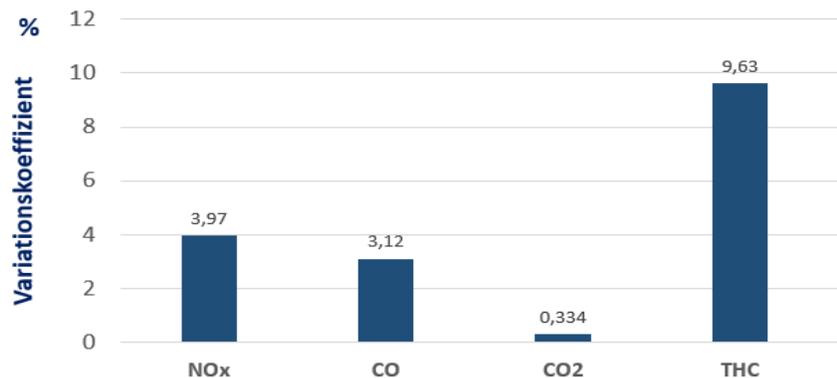


Abbildung 4-10: Wiederholbarkeit Schadstoffmessung

Die Wiederholbarkeit der gasförmigen Emissionen wurden getrennt von den Partikelemissionen analysiert.

4.2.2 Wiederholbarkeit Partikelanzahlemissionen

Die Wiederholbarkeit der Partikelanzahlemissionen wurde analog zu den gasförmigen Schadstoffen ermittelt. Auch hier kann bei getrennter Analyse der Emissionen für jede Regelart ein erheblicher Unterschied der Wiederholbarkeit beobachtet werden. Die Partikelanzahlmessung aller Versuche mit gleicher dynamischer Medienregelung und Kontrollart Drehzahl / Fahrpedalstellung (N/ α) sind in Abbildung 4-11: Partikelemissionen bei Regelmodus N/ α Abbildung 4-11 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Summe der emittierten Partikel erheblich variiert. Es errechnet sich eine durchschnittliche Streuung von 42,1% um den Mittelwert.

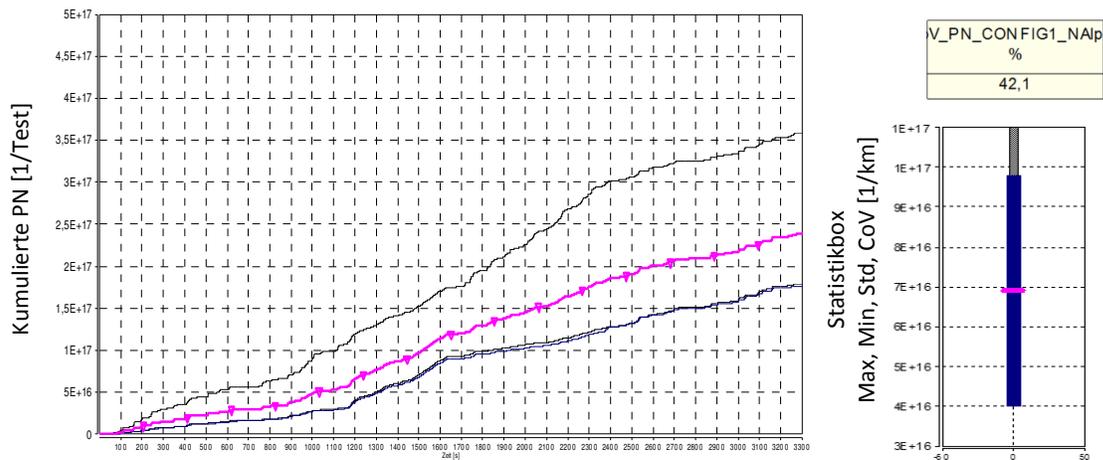


Abbildung 4-11: Partikelemissionen bei Regelmodus N/ α

Ein gänzlich anderes Bild zeigt die Analyse der Partikelanzahlmessungen bei der die Medien ebenfalls dynamisch der Realfahrt nachempfunden, allerdings die Regelart Drehzahl / Drehmoment (N/T) gewählt wurde. Abbildung 4-12 zeigt, dass die Kurven weitaus näher zusammenliegen. Das berechnete Streumaß (CoV) der Messungen beträgt entsprechend der Beobachtungen nur 3,2%. Das bedeutet, dass auch im Fall der Partikelanzahlmessung nur jene Versuche zur Bewertung herangezogen werden, welche mittels Drehzahl / Drehmoment (N/T) Motorregelung ermittelt wurden.

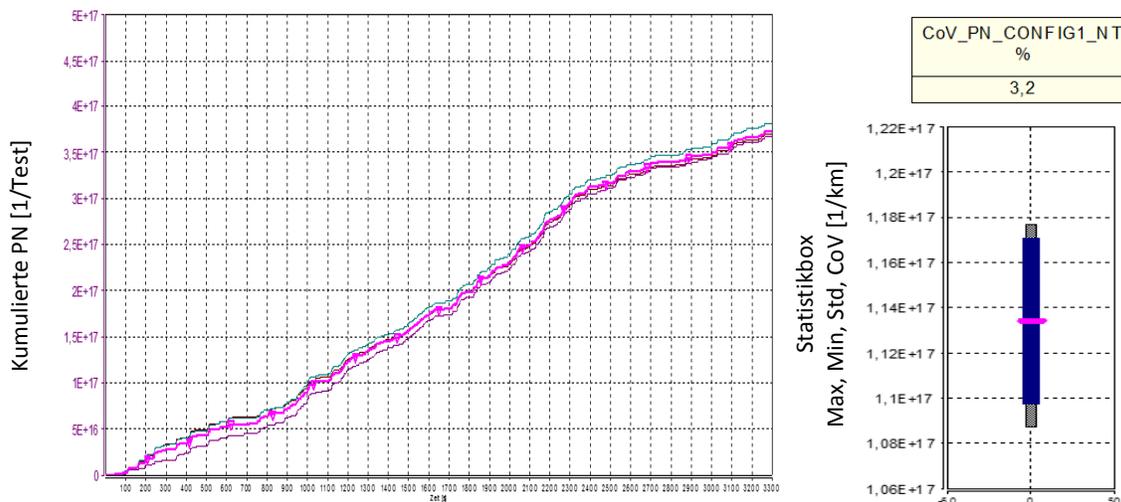


Abbildung 4-12: Partikelemissionen bei Regelmodus N/T

Um einen allgemein gültigen Messfehler der Partikelanzahlmessung zu finden wurde bei allen Partikelmessungen, welche mittels N/T Regelart eruiert wurden, das Streumaß für jede Testkonfiguration ermittelt und daraus der arithmetische Mittelwert gebildet. Diese mittlere Streuung enthält alle Messfehler die zu Abweichungen bei Wiederholung eines Versuchs führen.

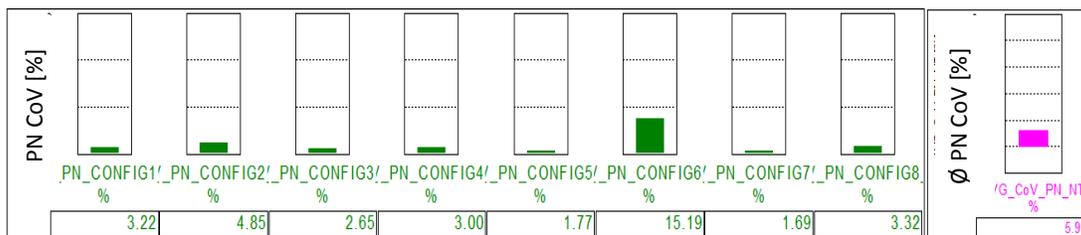


Abbildung 4-13: Streumaß Partikelanzahl Messung

Der Mittelwert aller errechneten Streumaße ergibt 5,95%. Dieses Maß wurde für alle weiteren Betrachtungen der Partikelanzahl berücksichtigt. Abbildung 4-13 zeigt die Streumaße der Versuchskonfiguration 1 bis 8 in Balkendiagramme (Grün) dargestellt, sowie die Mittelung in Magenta.

Es ist zu berücksichtigen dass die Entnahmesonde der Partikelmessungen wie in Abbildung 3-17 beschrieben direkt nach der Turboladerturbine vor der Abgasnachbehandlung angeordnet ist. Durch fehlende Abgasberuhigungsstrecken herrschen an der Stelle einerseits starke Turbulenzen und andererseits können durch die fehlende Verdünnung unterschiedliche Nukleationspartikel unterschiedlich zu größeren Partikel agglomerieren. Diese Umstände erschweren die Wiederholbarkeit der Partikelanzahl Messung.

4.3 Gasförmige Emissionen

Die Bewertung der gasförmigen Emission erfolgt in Bezug auf die Emissionen der Testkonfiguration bei welcher alle Motormedien dynamisch der Realfahrt nachgeregelt wurden. Die dynamische Regelung der Motormedien bildet die Basis, da diese den realen Motor Betriebsbedingungen vermeintlich am ehesten entsprechen. In folgenden Diagrammen werden

alle durchgeführten Versuchskonfigurationen (siehe Abbildung 3-12) mit den Basisemissionen (Config 1) verglichen. Im Detail sind die Schadstoffe der Prüfläufe mit angenäherten realen Bedingungen (in Blau dargestellt) und werden mit den Emissionen in der jeweiligen Versuchskonfiguration (in Grau dargestellt) verglichen in dem der Differenzwert berechnet wird. Die emittierten Schadstoffe sind kumuliert über der Zeit aufgetragen. Die Differenz wird aus den spezifischen (streckenbezogenen) Emissionen über die gesamte Prüfdauer gebildet und zur Bewertung herangezogen. Die spezifischen Schadstoffe in [g/km] sind in den Balkendiagrammen aufgetragen und die Differenz in einer Box aufgezeigt. Die Berücksichtigung der Messfehler wird im Anschluss vorgenommen.

4.3.1 Vergleich der gasförmigen Schadstoffemissionen zwischen dyn. und konst. Motormedien

In folgenden Abbildungen werden die Emissionen von Config 1 und Config 8 im Detail dargestellt. Dabei entspricht Konfiguration 1 der dynamisch aufgeprägten Kühlwasser- und Öltemperatur bzw. dem Ansaugluftdruckverlauf wie in einer Realfahrt beobachtet und Konfiguration 8 dem Versuchsaufbau mit zeitlich konstanten aufgeprägten Medienparameterwerten.

Die Diagramme der übrigen Vergleiche aller anderen Konfiguration sind im Anhang angeführt.

Abbildung 4-14 zeigt den Verlauf der kumulierten Stickoxid Emissionen während der gesamten Versuchsdauer. Es kann entnommen werden, dass der NO_x Ausstoß über der Zeit sehr ähnlich ist. Auch die Summe der spezifischen NO_x Emissionen mit 995,9mg/km bei dynamischer und 994,3mg/km bei konstanter Medienregelung entspricht einer sehr geringen Differenz. Speziell wenn der Differenzwert von 1,6mg/km, in Bezug auf den Gesamtausstoß von gerundet 995mg/km, betrachtet wird ist die Differenz in diesem Fall als gering einzustufen. Die absolute Differenz entspricht 0,16% der Summe der ausgestoßenen Stickoxide.

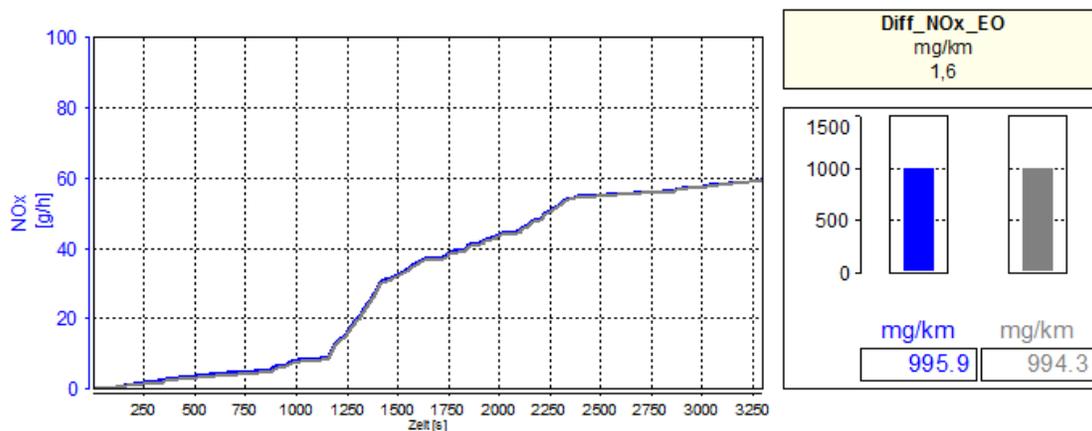


Abbildung 4-14: Vergleich Stickoxide Emissionen Config 1 - 8

Ein vergleichbares Bild zeigen die emittierten Kohlenmonoxide. Der Vergleich der beiden Versuchskonfigurationen zeigt, dass annähernd die gleiche Menge CO ausgestoßen wird und in diesem Versuch sehr wenig Einfluss der Motormediendynamik erkennbar ist. Wie Abbildung 4-15 zeigt ist eine Differenz von 12,5mg/km messbar. Wie bei der Stickoxidmessung ist auch hier die Differenzmenge, bezogen auf den gesamt Ausstoß von ~ 550mg/km, gering. Die Absolute Differenz von 12,5mg/km entsprechen 2,27% der emittierten Kohlenmonoxid Emissionen.

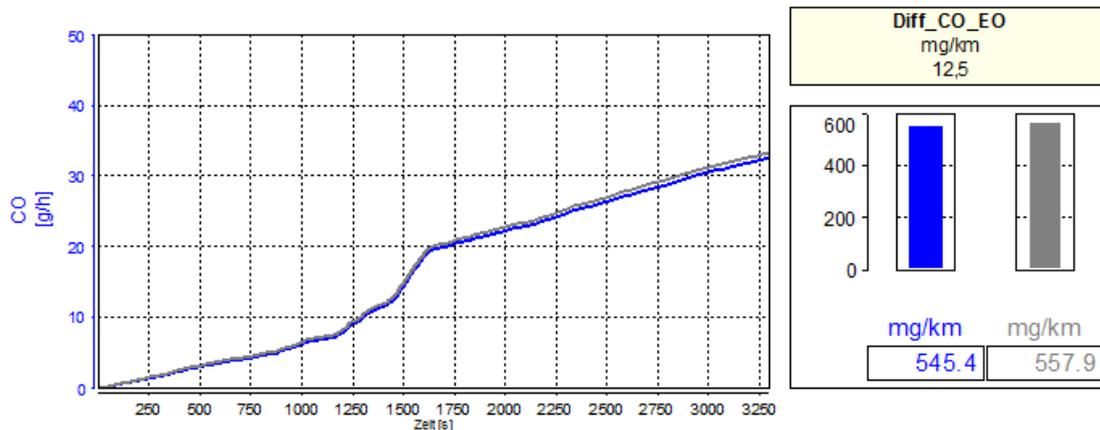


Abbildung 4-15: Vergleich Kohlenmonoxid Emissionen Config 1 - 8

Die Differenz der Kohlendioxidmessungen zeigt relativ zur Gesamtmenge des ausgestoßenen CO₂ sehr kleine Abweichungen. Die Differenz der Endwerte von 974,5mg/km entspricht bezogen auf 157g/km 0,62%.

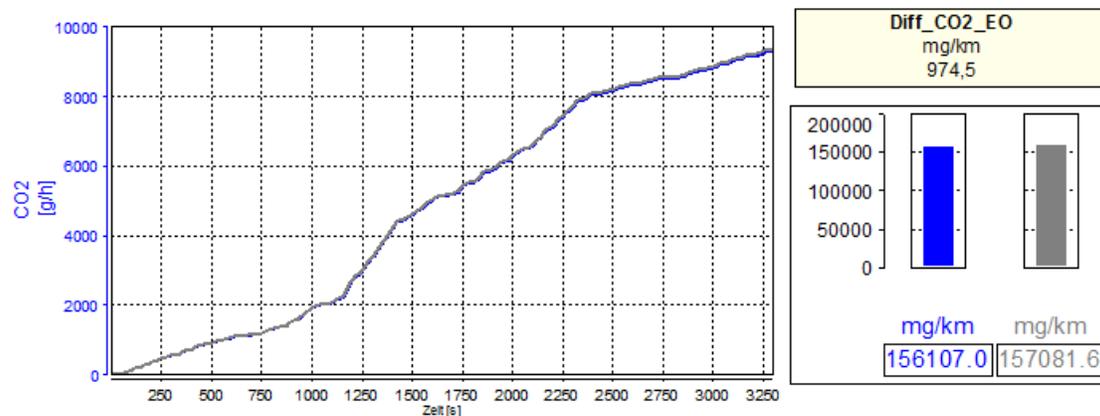


Abbildung 4-16: Vergleich Kohlendioxid Emissionen Config 1 - 8

Abbildung 4-17 zeigt die kumulierten Kohlenwasserstoffmessungen. Dabei sind alle Kohlenwasserstoff- Verbindungen inkl. CH₄ betroffen (eng. Total Hydrocarbons, Abk. THC). Die Differenz zwischen den beiden Testkonfigurationen beträgt 1,6mg/km. Dies entspricht, bezogen auf die gesamte emittierte Menge an Kohlenwasserstoffen, 4,5 Prozent. Allerdings werden über den gesamten Versuch rund 35mg/km emittiert, was ohnehin eine sehr kleine Menge Schadstoff darstellt und auch in Hinblick auf den EU6 Grenzwert als nicht problematisch betrachtet werden kann.

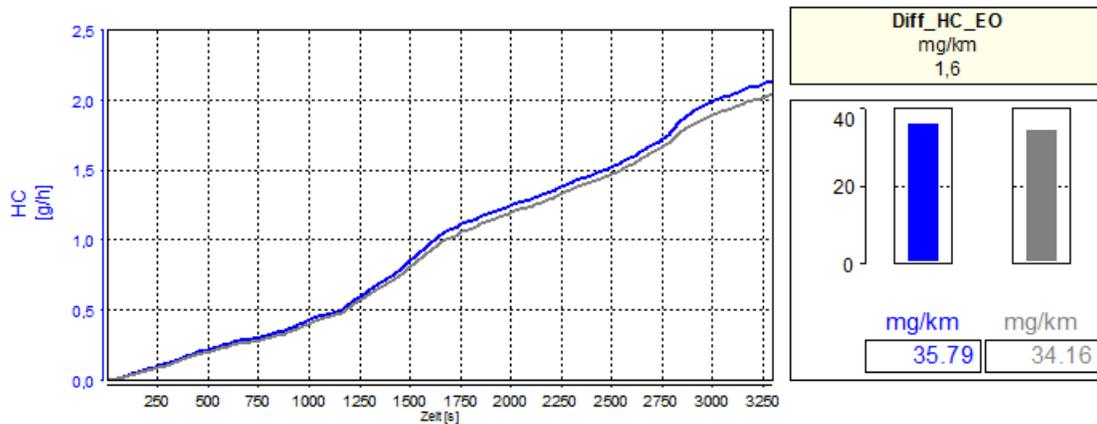


Abbildung 4-17: Vergleich Kohlenwasserstoffe Emissionen Config 1 - 8

4.3.2 Übersicht der gasförmigen Emissionsdifferenzen

Die Differenzen, analog wie in 4.3.1 erläutert, wurden für alle Testkonfigurationen der festgelegten Testmatrix (siehe Abbildung 3-12 bzw. Abbildung 3-36) mit den Emissionen der Vergleichskonfiguration gegenübergestellt. Bei der Vergleichskonfiguration wird der Ansaugluftdruck (p_{ATM}), die Kühlwassertemperatur (TW), sowie die Öltemperatur (TOIL) dynamisch der Realfahrt nachempfunden. Die auftretenden Differenzen einzelner Schadstoffe werden in den folgenden Diagrammen beschrieben. Dabei sind unter den Diagrammabszissen die jeweiligen Randbedingungen des Versuchs beschrieben. So kann entnommen werden, welche Parameter über der Zeit veränderlich (dynamisch) oder über die Versuchsdauer gleichbleibend (konstant) geregelt wurden. Die ermittelten Differenzwerte sind bei der zugehörigen Testkonfiguration aufgetragen. Darüber hinaus wurde bei jeder Differenz der zuvor ermittelte prozentuelle Messfehler berücksichtigt. Somit ergibt sich für jede Konfiguration ein Zahlen Trippel in Form des Messwertes, sowie die durch die, Min- und Max. Werte der Fehlerberücksichtigung.

Im Fall der Abbildung 4-18 werden die Differenzwerte der Stickoxide dargestellt. Dazu korrespondierend ist der geltende Euro 6 NO_x Grenzwert von 80mg/km eingezeichnet um die Größenordnung der Differenzwerte einschätzen zu können. So kann entnommen werden, dass bei allen Versuchen ein Unterschied der NO_x Emission rund ein Viertel des zugrundeliegenden Grenzwerts entspricht. In Abbildung 4-18 sind die Emissionsdifferenzen mit Berücksichtigung der Fehlerrate eingezeichnet. Die Fehlerindikatoren werden in Abschnitt 5.1 Interpretation der der Ergebnisse diskutiert.

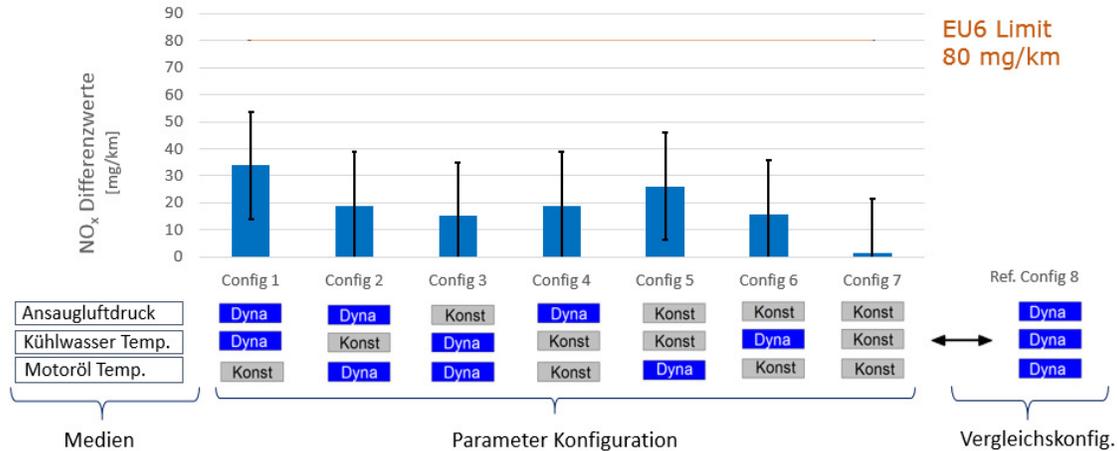


Abbildung 4-18: NO_x Emissionen - Übersicht aller Versuchskonfigurationen

In der Abgasgesetzgebung Euro 6 ist für Motoren mit Selbstzündung ein Grenzwert für die Summe der Kohlenwasserstoff und Stickoxiden Emissionen (HC+NO_x) festgelegt. Weshalb die HC Emissionen hier nicht separat angeführt sind. Der Summen Grenzwert von HC + NO_x ist festgesetzt mit 170mg/km. Es zeigt sich, dass die gemessene, absolute Menge an HC Emissionen sowie die ermittelten Differenzen der Versuche sehr gering ist (siehe Abbildung 4-17). Die erkennbaren Differenzen resultieren primär aus den anteiligen NO_x Emissionen die in Abbildung 4-18 diskutiert werden. Es kann abgeleitet werden, dass die Unterschiede der Kohlenwasserstoff Emissionen nicht von großer Bedeutung sind.

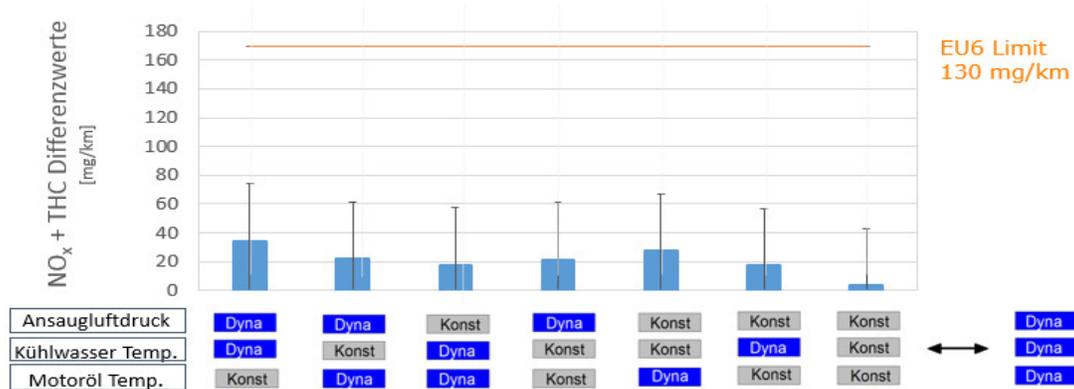


Abbildung 4-19: (NO_x + HC) Emissionen - Übersicht aller Versuchskonfigurationen

Abbildung 4-20 zeigt die Unterschiede der Kohlenmonoxid Messungen. Unabhängig der Versuchskonfiguration ist ersichtlich, dass die errechneten Differenzen, bezogen auf den Euro 6 Grenzwert von 500mg/km, um die Größenordnung 100 kleiner sind. Es kann abgeleitet werden, dass die untersuchten Medienparameter auf die CO Emissionen keinen ausgeprägten Einfluss zeigen.

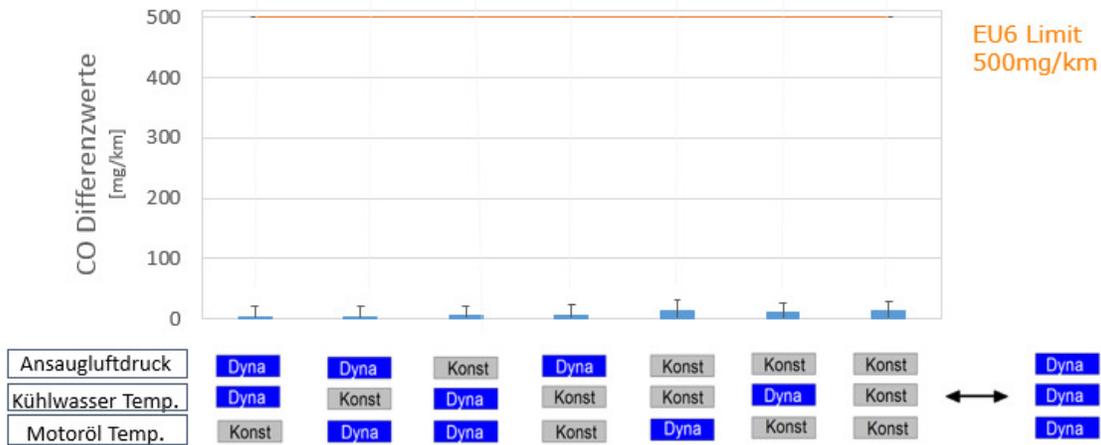


Abbildung 4-20: CO Emissionen - Übersicht aller Versuchskonfigurationen

Ein Einfluss der Medienparameter auf die Kohlendioxidmessung ist ebenfalls nicht erkennbar. Abbildung 4-21 zeigt die Differenzen der CO₂ Messung. Der limitierte durchschnittliche Flottenverbrauch von 130g/km ist hier ein Referenzwert. Der Wert wird ab 2021 auf 95g/km abgesenkt. In jedem der beiden Fälle sind die ermittelten Unterschiede unabhängig der Testkonfiguration um Faktor ~130 kleiner.

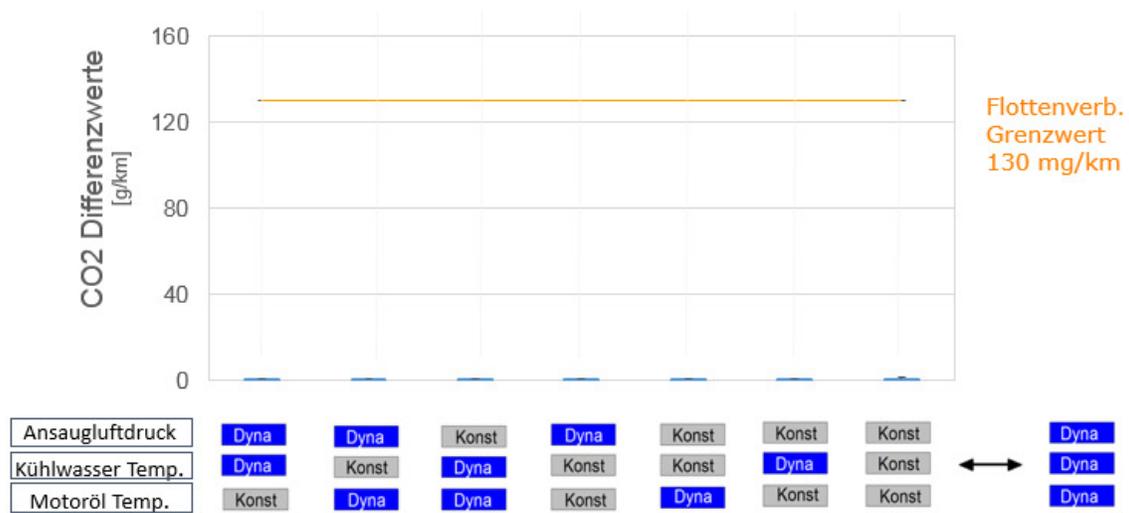


Abbildung 4-21: CO₂ Emissionen - Übersicht aller Versuchskonfigurationen

4.4 Partikelanzahl

Um den Einfluss der untersuchten Medienparameter auf die emittierte Partikelanzahl zu untersuchen wurde dieselbe Methode, wie zur Analyse der gasförmigen Emissionen, gewählt:

Die kumulierte Partikelanzahl über die Testdauer wurde für jede Versuchskonfiguration ausgewertet und anschließend mit dem Referenztest verglichen. Dem Referenztest entsprechen jene Ergebnisse, bei dem alle Motormedien, der zu Grunde liegenden Realfahrt, nachgeregelt wurden.

Als Beispiel sei Abbildung 4-22 angeführt. Hierbei werden die gemessenen Partikel während dem Motorprüfstandsbetrieb mit konstanten Motormedien (graue Kurve) mit den emittierten Partikeln während dem Referenztest (blaue Kurve) verglichen. Im Vergleichstest wurden $3,7 \times 10^{17}$ Partikel emittiert und in der Versuchskonfiguration 8 (graue Kurve) um 1,56% mehr.

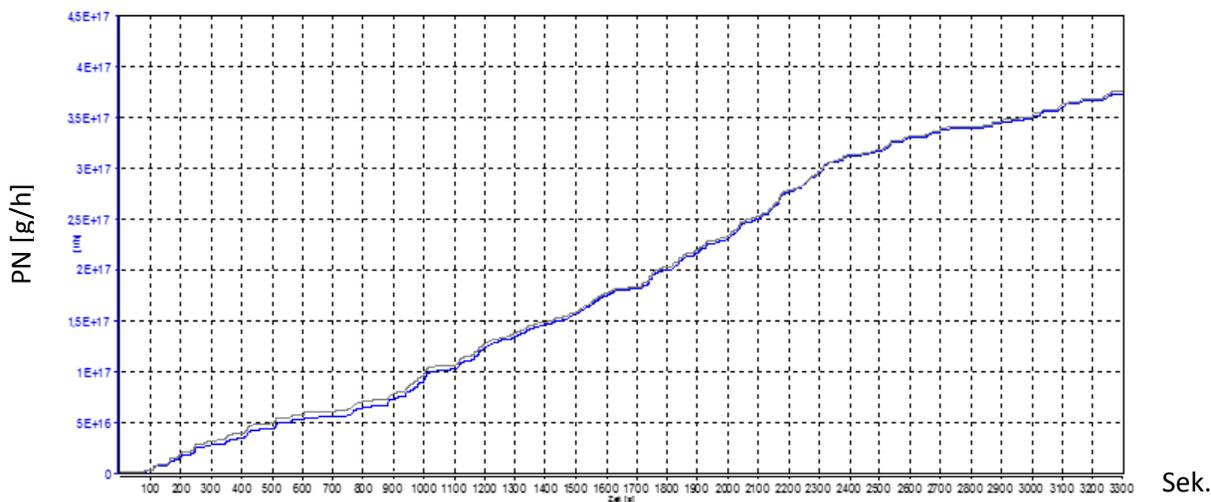


Abbildung 4-22: Kumulierte Partikelanzahl Config 1-8

4.4.1 Übersicht der Partikelanzahl Emissionsdifferenzen

Die Ergebnisse der Partikelmessung aller durchgeführten Versuchskonfigurationen wurden dem Vergleichstest gegenübergestellt. Die kumulierten Partikelemissionen über der Zeit können dem Anhang entnommen werden. Eine Übersicht der Abweichungen zum Vergleichstest ist in Abbildung 4-23 gezeigt. Auch hier sind die in 4.2.2 ermittelten prozentuellen Wiederholbarkeiten berücksichtigt worden. Woraus sich wiederum für jede der gemessenen Konfiguration drei Werte ergeben: Der ermittelte Differenzwert, sowie ein Min.- und ein Maximalwert. Der Euro 6 Grenzwert ist mit 6×10^{11} Partikel pro km festgelegt.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Im folgenden Teil der Arbeit werden die in Kapitel 4 zusammengefassten Ergebnisse diskutiert sowie mögliche Ursachen der beobachteten Ergebnisse erläutert. Abschließend werden Versuchsspezifika hervorgehoben sowie ein Ausblick auf weitere mögliche Untersuchungen gegeben.

5.1 Interpretation der Messergebnisse

Die in 4.3.1 beschriebenen Messergebnisse zeigen, dass die beobachtete Motormediendynamik keinen Einfluss auf die CO₂ und CO Emissionen ausübt. Die Messung der ausgestoßenen HC Emissionen zeigt ebenfalls keine signifikanten Abweichungen als Funktion der Medienparameter zumal auch die absolute Menge an Kohlenwasserstoffe verglichen, zum Euro 6 Grenzwert, sehr gering ist.

Die Abweichungen der Stickoxidmessungen sind für alle Testkonfigurationen in Abbildung 5-1 dargestellt. Hierbei ist erkennbar, dass Abweichungen von gerundet 2mg/km bis 34mg/km ermittelt wurden. Unter Betrachtung des Euro 6 Stickoxidgrenzwertes von 80mg/km sind Abweichungen von mehr als 30mg/km einzelner Testkonfigurationen, nicht vernachlässigbar. Im Gegenzug ist zu beachten, dass der prozentuelle Unterschied, bezogen auf die Summe der streckenbezogenen Emissionen, allerdings sehr gering ist. Abbildung 5-1 zeigt unter dem Diagramm die absoluten Differenzwerte im grau- sowie die prozentuellen Abweichungen im blau markierten Block. Wichtig ist zu erwähnen, dass die gemessenen gesamten Stickoxidemissionen im Rohabgas, bezogen auf die Strecke, bei 995,88mg/km liegen. Dies entspricht den 12,5 fachen des geltenden Grenzwertes am Fahrzeug Endrohr. Im Zuge der Arbeit konnte nicht festgestellt werden ob die Emissionen bei einem Motor mit deutlich niedrigeren Rohgasemissionen ebenfalls die hohen Absolut- oder die niedrigen Prozentuell-Differenzen beobachtet werden. Ebenfalls festzuhalten ist, aufgrund der hohen Rohemissionen verhältnismäßig hohe Fehlerindikatoren aufweisen, welche die Messungenauigkeit beschreiben.

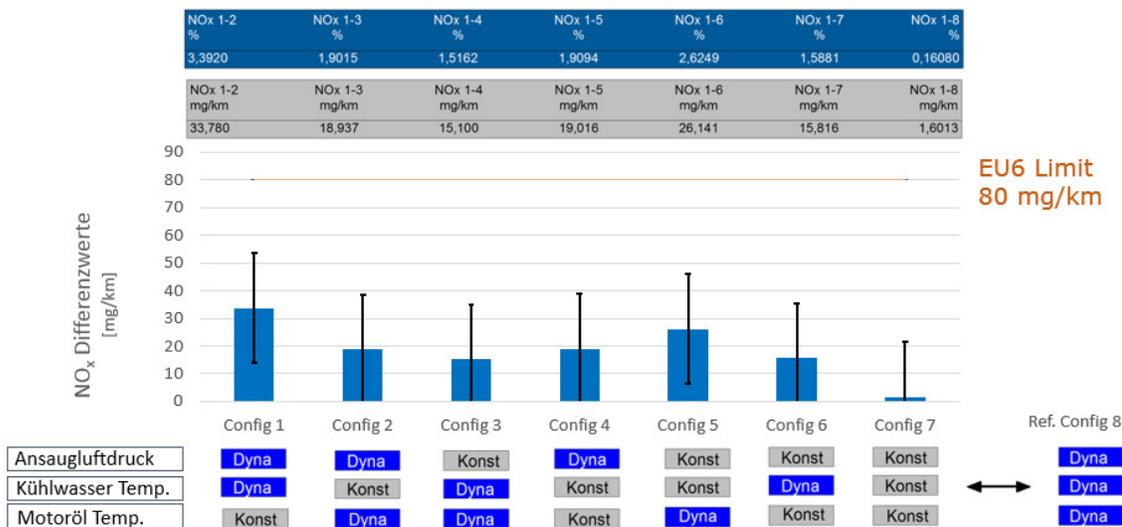


Abbildung 5-1: NO_x Messergebnisse

Die beobachtete Stickoxiddifferenz zwischen dynamischer und konstanter Medienregelung könnte ein Resultat aus den unterschiedlichen Temperatursituationen sein. Am Beispiel der Kühlwassertemperatur wird versucht eine Beziehung herzustellen.

Man kann davon ausgehen, dass sich bei erhöhter Kühlwassertemperatur eine höhere Brennraumtemperatur einstellt, welche die NO_x Entstehung begünstigt. Die Mittelung der real beobachtet (dyn) Kühlwassertemperatur ergibt die Temperatur der konstanten Kühlwasserregelung. Das bedeutet naturgemäß, dass im Mittel über den gesamten Test, die Temperatur im gleichen Ausmaß wärmer wie kälter zur Durchschnittstemperatur ist und somit die NO_x Entstehung im gleichen Ausmaß begünstigt wie benachteiligt ist. Der größte Anteil, 90% - 95% der emittierten Stickoxide, kann der thermischen NO_x Entstehung zugeordnet werden [51]. Abbildung 5-2 zeigt den Temperatureinfluss auf die NO_x verschiedener Entstehungsmechanismen. Das thermische NO_x zeigt hierbei eine Funktion höherer Ordnung. Daraus kann abgeleitet werden, dass bei höherer Temperatur die NO_x Entstehung im weit größeren Ausmaß begünstigt ist als dies bei niedrigerer Temperatur vermindert wird. Weshalb die Zeitanteile im Versuch bei der die Medien Temperatur zu höheren Brennraumtemperaturen führt, weit mehr NO_x entstehen als bei niedriger Temperatur.

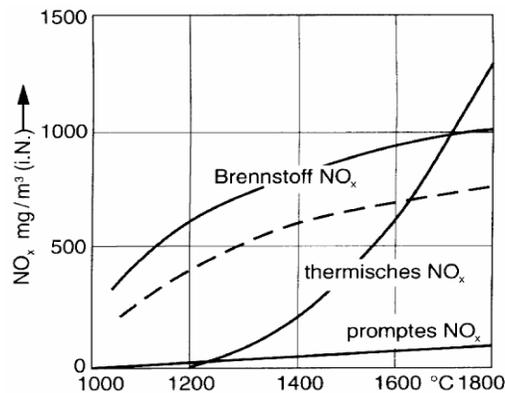


Abbildung 5-2: NO_x Entstehung Temperatureinfluss

Dieses Verhalten führt dazu, dass speziell in Phasen bei denen die Kühlwassertemperatur längere Zeit höher als die Durchschnittstemperatur ist, ungleich mehr Stickoxide gebildet werden, als in Phasen bei der die Temperatur unter dem Durchschnitt liegt.

Abbildung 5-3 zeigt in blau die reale Kühlwassertemperatur bei dynamischer Regelart und in magenta die Kühlwassertemperatur in bei konstantem Vorgabewert über der Zeit.

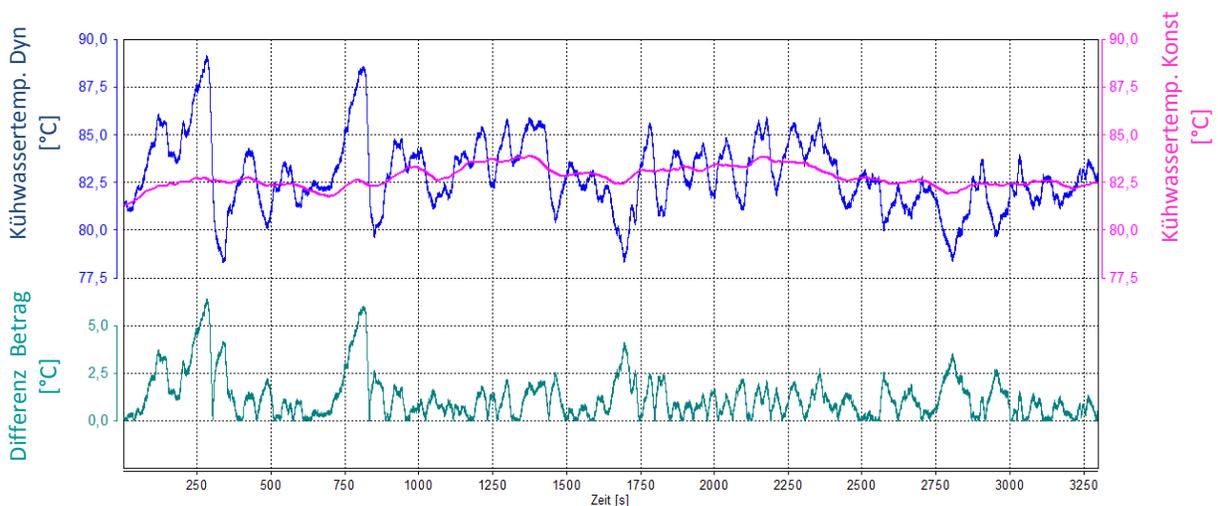


Abbildung 5-3: Kühlwassertemperatur Vergleich

Die Kurve in grün (Abbildung 5-3) zeigt den Differenzwert der Kühlwassertemperatur über der Zeit. Hierbei ist der Betrag der Abweichung durch die Wurzel der Quadrate der Differenzwertwerte aufgetragen. Dabei kann beobachtet werden in welchen Bereichen die Kühlwassertemperaturen, zwischen dynamischer- und konstanter Regelart, wie stark abweicht.

Das Detail in Abbildung 5-4 zeigt eine Betriebsphase bei der die dyn. Wassertemperaturregelung längere Zeit höhere Temperaturen als die konstante Regelung erfordert. Die Ergebnisse der NO_x Messungen reagieren in dieser Phase mit unterschiedlichen NO_x Emissionen. Das zugehörige untere Diagramm zeigt die modale NO_x Messung für beide Betriebsarten, wobei in Blau die Stickoxide bei konst. Kühlwassertemp. im beobachteten Zeitraum leicht unter den Emissionen der dyn. Kühlwasserregelung (Magenta) liegt.

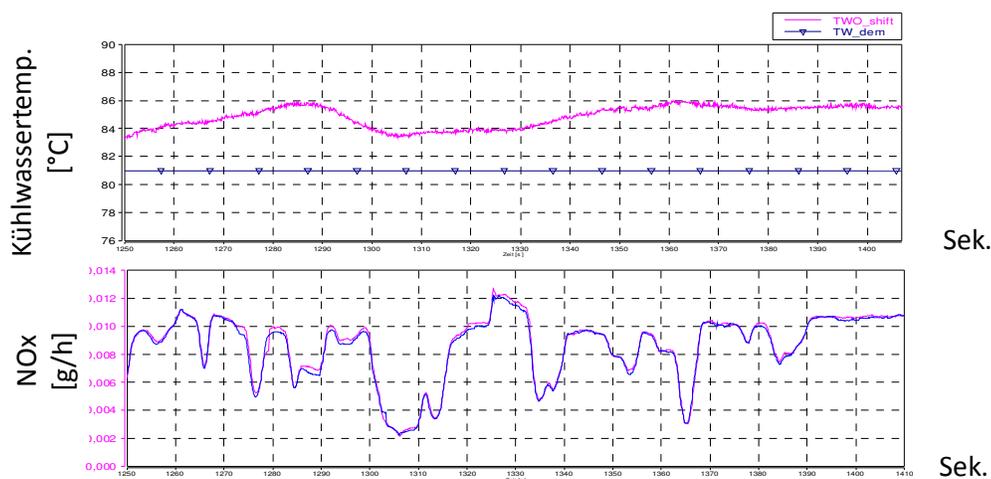


Abbildung 5-4: NO_x Temperaturzusammenhang

Partikelemissionen entstehen in kraftstoffreichen- bzw. sauerstoffarmen Bereichen in denen zu wenig Aktivierungsenergie zur Verfügung steht um Kohlenstoffanteile mit Sauerstoff zu oxidieren. Insofern ist im Zusammenhang der Partikelentstehung ein umgekehrter Temperatureinfluss als der Stickoxidbildung gegeben. Fahrzeuge mit regenerativen Dieselpartikelfilter besitzen allerdings sehr hohe Filterraten und können somit hinsichtlich Partikelanzahl größtenteils als unkritisch betrachtet werden können.

5.2 Versuchsspezifika

Die Experimente im Rahmen dieser Arbeit besitzen einzigartige Ausprägungen. Vordergründig ist zu erwähnen, dass die Untersuchungen mit einem Dieselmotor durchgeführt wurden, weshalb allgemein gültige Aussagen zu den untersuchten Motormedieneinflüssen nur bedingt möglich sind. Weiters ist festzuhalten, dass das ermittelte Motorlastkollektiv auf Messungen einer speziellen Messfahrt beruht. Bei der Übernahme diverser Realfahrt-Messwerte in die Prüfstands Umgebung wurde darauf Rücksicht genommen die Charakteristik beizubehalten ohne dabei einen unnatürlichen Motorprüfstandsbetrieb zu erzwingen. Dafür sind geringfügige Anpassungen der Motorleerlaufdrehzahlen sowie die Anhebung des Ansaugluftdrucks notwendig gewesen. Genauere Beschreibungen der erwähnten Anpassungen sind in 3.1.3 bzw. 3.1.4 ausgeführt.

5.3 Fazit

- Die mit September in Kraft tretende Europäische Gesetzgebung zur Fahrzeug Typgenehmigung sieht umfangreiche Randbedingungen zur Messung und Bewertung der Schadstoffemissionen im realen Straßenbetrieb vor. Genaue Bestimmungen bezüglich Conformity Faktoren für Partikelanzahlmessung, Kaltstart, Hybride bzw. In-Service Compliance und administrative Vorgänge werden in den kommenden Maßnahmenpaketen noch definiert.
- Die Literaturrecherche hat gezeigt, dass zur Entwicklung von Antriebsträngen, in Bezug auf RDE, eine Reihe verschiedener Methoden angewendet werden. Um die gesteigerte Anzahl möglicher Betriebspunkte im erweiterten Betriebsbereich zu untersuchen werden verstärkt Modell-basierte Ansätze herangezogen.
- Um Antriebstränge für die Zertifizierung im Realstraßenbetrieb zu entwickeln, sind Untersuchungen nicht nur anhand von Straßenmessungen, sondern verstärkt in vorgelagerte Entwicklungsumgebungen von Bedeutung.
- Insofern nehmen Motorprüfstände nach wie vor eine wichtige Rolle ein, um Basismotor- Analysen, wie Thermodynamik- und Verbrennungsuntersuchungen, Funktionsentwicklung und Kalibrierung von Abgasnachbehandlungssystemen durchzuführen. Dafür ist der Motorprüfstandbetrieb anhand stationärer Betriebspunkte, als auch transiente Laständerungen, für dynamische Untersuchungen notwendig.
- Ein weiterer Einsatzbereich am Motorprüfstand ist die notwendige Datenakquise zur Bedatung von Motor- und Abgasnachbehandlungsmodellen, welche anschließend in verschiedenen HiL, SiL oder MiL Umgebungen verwendet werden können. Dadurch kann ein Teil der Optimierungen des gesamten Motorkennfeldbereichs in kostengünstigeren Umgebungen mit mehrfacher Echtzeit unternommen werden.
- Speziell in Bezug auf RDE Entwicklung eignet sich der Motorprüfstand um Lastsituationen, wie im realen Straßenbetrieb, reproduzierbar zu analysieren. Dazu können einerseits real beobachtete Manöver herangezogen werden, andererseits Lastsituationen die aus Simulationsstudien, antriebsstrangspezifisch kritische Manöver erkennen, anschließend am Prüfstand beobachtet bzw. optimiert werden.
- Am Motorprüfstand können mittels Fahrzeug- und Fahrersimulation auch die Schadstoffemissionen während Standarttestzyklen wie NEFZ, WLTC, CADC etc. analysiert werden. Derartige Referenzmessungen sind speziell für Variantenvergleiche von Bedeutung.
- Die Einflussparameter auf Schadstoffemissionen sind sehr weitreichend. In einer vereinfachten Form sind die Emissionen einerseits von der Verbrennung (Rohemissionen) und andererseits von der Effektivität der Abgasnachbehandlung abhängig. In beiden Fällen liegt das Hauptaugenmerk auf möglichst nahe Abbildung realer Umstände am Motorprüfstand wie im Straßenbetrieb beobachtet werden kann.
- Die Emissionsbewertung einer Realfahrt erfolgt im gegenwärtig vorliegenden Gesetzesentwurf mittels der Stickoxid- und Partikelanzahl Messung. Dazu sind im Prüfstandsbetrieb Gasemissionen- und Partikelanzahl-Messgeräte notwendig.
- Um realitätsnahe RDE Betriebsbereiche am Prüfstand nachzustellen sind Konditioniereinrichtungen notwendig, die um Motorbetriebsmedien auf diverse Druck-, Temperatur- oder Feuchte- Parameter zu regeln.
- Im Detail wurde der Einfluss von wechselnden Parametern wie Druck bzw. Temperatur im Kühlwasser, Motoröl und Ansaugluftdruck analysiert. Mit Einschränkung kann beobachtet werden, dass bei den vorgenommenen Untersuchungen die

Parameteränderungen keinen Einfluss auf CO₂, CO und THC Emissionen gezeigt haben. Bei den Stickoxid- und Partikelanzahlmessungen konnten Einflüsse festgestellt werden. Die beobachteten Einfluss bezieht sich auf NO_x-Massenemissionen bzw. Partikelanzahl-Emissionen die in der Größenordnung der EU6 Grenzwerte liegen, jedoch prozentuell bezogen auf die gemessenen Rohemissionen sehr gering sind.

- Um genauere und allgemein gültige Aussagen treffen zu können sind allerdings weitere Untersuchungen notwendig.

5.4 Ausblick

Wie in 5.1 erwähnt, konnte anhand der vorliegenden Messwerte nicht festgestellt werden, ob die gemessenen Abweichungen bei Dieselmotoren mit geringeren NO_x-Rohemissionen im gleichen Ausmaß beobachtet werden können, oder, ob der Ausstoß der Stickoxide sich im gewissen Verhältnis vermindert. Um dies festzustellen müssten die Untersuchungen vergleichsweise an Motoren mit höherer Emissions Standards (z.B. EU6) durchgeführt werden.

Durch die gänzlich unterschiedliche Betriebsart von Dieselmotoren im Vergleich zur Benzinmotoren sind die getroffenen Aussagen der durchgeführten Experimente nicht für Benzinmotoren gültig. Dementsprechende Untersuchungen an Benzinmotoren sind geplant.

In 2.5.1 wurden eine Reihe an Einflussparameter, die sich auf die Emissionen auswirken, angeführt. Weitere Spezifikationen einzelner Parameter, bezgl. dessen Auswirkung, bzw. deren Einfluss auf die möglichst reale Nachbildung (z.B. Regelgenauigkeit) am Motorprüfstand, durch fehlende Antriebstrang und Fahrzeugkomponenten, sind notwendig, um treffsichere RDE Untersuchungen am Motorprüfstand vorzunehmen.

Literatur

- [1] E. Specht und Z. Redemann, „Eindimensionales Modell zur Berechnung der Erwärmung der Atmosphäre durch anthropogene insbesondere verkehrsbedingte CO₂-Emissionen.“, gehalten auf der 9. Internationales Forum Abgas- und Partikel-Emissionen, Ludwigsburg, Deutschland, 2016.
- [2] Dr. Jörg Adolf, Shell Deutschland, „Verkehrsemissionen: Wie kann der Straßenverkehr seinen Beitrag zu den Klimaschutzziele leisten?“, Dez-2014.
- [3] Europäische Kommission, „Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO₂-armen Wirtschaft bis 2050“. August-2011.
- [4] European Commission, „A resource-efficient Europe – Flagship initiative under the Europe 2020 Strategy“. Jänner-2011.
- [5] UNFCCC Members, „UN-Climate Change Agreement - United Nations Framework Convention on Climate Change, 21st Conference of the Parties COP21“. Dez-2015.
- [6] Hermann Harde, „Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei?“, in *Spektroskopische Untersuchungen und Modellrechnungen zum Einfluss von H₂O, CO₂, CH₄ und O₃ auf unser Klima*, Norderstedt.
- [7] S. Wilke, „Schadstoff- und Treibhausgas-Emissionen des Straßenverkehrs“, *Umweltbundesamt*, 01-Juli-2013. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/schadstoff-treibhausgas-emissionen-des>. [Zugegriffen: 17-Mai-2016].
- [8] European Environment Agency, „Air quality in Europe 2011“, 2011.
- [9] Gesetzestext, „EUR-Lex - I21037 - EN - EUR-Lex“. [Online]. Verfügbar unter: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=uriserv:I21037>. [Zugegriffen: 09-Nov-2015].
- [10] Gesetzestext, „EUR-Lex - 32007L0046 - EN - EUR-Lex“. [Online]. Verfügbar unter: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:32007L0046>. [Zugegriffen: 09-Nov-2015].
- [11] Gesetzestext, „EUR-Lex - 42011X0708(01) - EN - EUR-Lex“. [Online]. Verfügbar unter: [http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:42011X0708\(01\)](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:42011X0708(01)). [Zugegriffen: 09-Nov-2015].
- [12] Coordinating Research Council, „Exhaust and Evaporative Emission Testing of Flexible-Fuel Vehicles - CRC Report No. E-80“. Aug-2011.

- [13] A. J. Martyr und M. A. Plint, *Engine Testing: The Design, Building, Modification and Use of Powertrain Test Facilities*. Elsevier, 2012.
- [14] M. Paulweber, *Mess- und Prüfstandstechnik - Antriebsstrangentwicklung*. 2014.
- [15] M. Bahadir, H. Parlar, und M. Spitteller, *Springer Umweltlexikon*. Springer-Verlag, 2013.
- [16] Gesetzestext, „EUR-Lex - 31970L0220 - EN - EUR-Lex“. [Online]. Verfügbar unter: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/de/ALL/?uri=CELEX:31970L0220>. [Zugegriffen: 09-Nov-2015].
- [17] F. J. Dreyhaupt, *VDI-Taschenlexikon Immissionsschutz*. Springer-Verlag, 2013.
- [18] Europäischer Rat, „Richtlinie des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschrift der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Abgase von Kraftfahrzeugmotoren mit Fremdzündung 70/220/EWG“, *Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft*. [Online]. Verfügbar unter: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:31970L0220&from=de>. [Zugegriffen: 17-Mai-2016].
- [19] G. P. Merker und R. Teichmann, *Grundlagen Verbrennungsmotoren: Funktionsweise, Simulation, Messtechnik*. Springer-Verlag, 2014.
- [20] A. Urlaub, *Verbrennungsmotoren: Verfahrenstheorie*. Springer-Verlag, 2013.
- [21] Gesetzestext, „EUR-Lex - 32008R0692 - EN - EUR-Lex“. [Online]. Verfügbar unter: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?qid=1444513211658&uri=CELEX:32008R0692>. [Zugegriffen: 11-Nov-2015].
- [22] Gesetzestext, „EUR-Lex - 32012R0459 - EN - EUR-Lex“. [Online]. Verfügbar unter: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1444513000834&uri=CELEX:32012R0459>. [Zugegriffen: 11-Nov-2015].
- [23] Gesetzestext, „Verordnung (EG) Nr.443/2009 des Europäischen Parlament und des Rates zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen.“ [Online]. Verfügbar unter: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009R0443&from=en>. [Zugegriffen: 12-Mai-2016].

- [24] Europäische Kommission - Pressemitteilung, „Kommission begrüßt Vereinbarung der Mitgliedstaaten für belastbare Prüfungen der Luftschadstoffemissionen von Fahrzeugen.“ Okt-2015.
- [25] Dr. Max Lang, „Abgasmessung am Prüfstand“, ÖAMTC, Feb. 2015.
- [26] H.-J. Brüne, A. Bittermann, und T. Fortner, „RDE – Die Herausforderung für den Dieselantrieb von morgen.“, gehalten auf der Internationales Forum Abgas- und Partikel-Emissionen, Ludwigsburg, Deutschland, 2014.
- [27] M. Bargende, *14. Internationales Stuttgarter Symposium*. Springer-Verlag, 2014.
- [28] M. Weiss, P. Bonnel, R. Hummel, N. Steininger, European Commission, Joint Research Centre, und Institute for Energy and Transport, *A complementary emissions test for light-duty vehicles assessing the technical feasibility of candidate procedures*. Luxembourg: Publications Office, 2013.
- [29] Greg Archer, „Mind the Gap 2015 Closing the chasm between test and real-world car CO2 emissions“. European Federation for Transport and Environment.
- [30] V. Franco, F. P. Sánchez, J. German, und P. Mock, „Real-World Exhaust Emissions From Modern Diesel Cars“, *communications*, Bd. 49, Nr. 30, S. 847129–102, 2014.
- [31] P. Mock, J. German, A. Bandivadekar, und I. Riemersma, „Discrepancies between type-approval and “real-world” fuel-consumption and CO“, *Int. Counc. Clean Transp.*, S. 13, 2012.
- [32] J. Liebl, M. Lederer, K. Rohde-Brandenburger, J.-W. Biermann, M. Roth, und H. Schäfer, *Energiemanagement im Kraftfahrzeug: Optimierung von CO2-Emissionen und Verbrauch konventioneller und elektrifizierter Automobile*. Springer-Verlag, 2014.
- [33] Piotr Bielaczyc, Joseph Woodburn, und Andrzej Szczotka, „A Comparison of Carbon Dioxide Exhaust Emissions and Fuel Consumption for Vehicles Tested over the NEDC, FTP-75 and WLTC Chassis Dynamometer Test Cycles“, *SAE 2015-01-1065*, Apr. 2015.
- [34] M. Lunanova, *Optimierung von Nebenaggregaten: Maßnahmen zur Senkung der CO2-Emission von Kraftfahrzeugen*. Springer-Verlag, 2009.
- [35] „Verordnung (EG) Nr.715/2007 Des Europäischen Parlaments und des Rates.“, 20-Juni-2007. [Online]. Verfügbar unter: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32007R0715&from=EN>. [Zugegriffen: 12-Mai-2016].
- [36] M. André, „The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions“, *Sci. Total Environ.*, Bd. 334–335, S. 73–84, Dez. 2004.

- [37] S. Hausberger und S. Lipp, „Auswertemethoden für On-Board Emissionstests von PKW und LNF für die zukünftige Emissionsgesetzgebung“, gehalten auf der Internationales Forum Abgas- und Partikel-Emissionen, Ludwigsburg, Deutschland, 2014, S. 138–149.
- [38] C. Bliefert, *Umweltchemie*. John Wiley & Sons, 2012.
- [39] S. Hausberger, „Skriptum LV Umweltauswirkungen des Verkehrs“, 2015.
- [40] „European Commission - PRESS RELEASES - Press release - Fragen und Antworten zu Emissionsgrenzwerten für Luftschadstoffe“. [Online]. Verfügbar unter: http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-15-5705_de.htm. [Zugegriffen: 09-Mai-2016].
- [41] Europedirectcoburg, „Fahrzeug-Emissionstests unter realen Fahrbedingungen werden verbindlich“, *Europe Direct Coburg*, 29-Okt-2015. .
- [42] J. Gerstenberg, H. Hartlief, und S. Tafel, „Introducing a method to evaluate RDE demands at the engine test bench“, in *16. Internationales Stuttgarter Symposium*, M. Bargende, H.-C. Reuss, und J. Wiedemann, Hrsg. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016, S. 549–563.
- [43] H. Maschmeyer, Mattihias Kluin, und Christian Beidl, „Real Driving Emissions - Ein Paradigmenwechsel in der Entwicklung“, *MTZ-Mot. Z.*, Bd. 76, Nr. 2, S. 36–41, 2015.
- [44] T. Reck, *Experimentelle Untersuchung der Einflussgrößen zur Minimierung der Partikelrohmission bei Benzindirekteinspritzung*. Logos Verlag Berlin GmbH, 2013.
- [45] Gesetzestext, „EUR-Lex - 31988L0077 - EN - EUR-Lex“. [Online]. Verfügbar unter: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex:31988L0077>. [Zugegriffen: 02-Nov-2015].
- [46] Pramod Kulkarni, Paul Baron, und Klaus Willeke, *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications* - Google Books. 2011.
- [47] „Umweltbundesamt: Feinstaub (PM10)“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.umweltbundesamt.at/pm10/>. [Zugegriffen: 02-Nov-2015].
- [48] K. Reif, „Abgas-Messtechnik“, in *Dieselmotor-Management*, Vieweg+Teubner Verlag, 2012, S. 516–523.
- [49] S. Urban, *Charakterisierung der Quellverteilung von Feinstaub und Stickoxiden in ländlichem und städtischem Gebiet*. Forschungszentrum Jülich, 2010.

- [50] R. Pischinger, M. Klell, und T. Sams, *Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine*. Springer-Verlag, 2013.
- [51] ete.a, „Energie- und Umweltengineering“, *Mechanismen der NO_x - bzw. NO-Bildung*, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.ete-a.de/img/pdf/Entstickung.pdf>. [Zugegriffen: 21-Juni-2016].
- [52] H. Schobert, *Chemistry of Fossil Fuels and Biofuels*. Cambridge University Press, 2013.
- [53] T. Gerthsen, *Chemie für den Maschinenbau: Organische Chemie für Kraft- und Schmierstoffe, Polymerchemie für Polymerwerkstoffe*. Universitätsverlag Karlsruhe, 2008.
- [54] W. Beitz und K.-H. Küttner, *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*. Springer-Verlag, 2013.
- [55] Richard van Basshuysen und Fred Schäfer, *Handbuch Verbrennungsmotor - Grundlagen Komponenten*, Bd. 6. Auflage. Springer Vieweg, 2012.
- [56] Klima ohne Grenzen gemeinnützige GmbH, „Klima ohne Grenzen - Zusammenhang zwischen CO₂-Emissionen und Klimawandel“, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <http://klimaohnegrenzen.de/klimawissen#ProgEmissionen>. [Zugegriffen: 02-Mai-2016].
- [57] „Verordnung (EU) 2016/427 der Kommission zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 hinsichtlich der Meisssionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 6) festgelegt“. [Online]. Verfügbar unter: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016R0427&from=EN>. [Zugegriffen: 12-Mai-2016].
- [58] Stephanie Flitsch und Werner Anton Hofegger, „Emission Legislation RDE - Update April 2016“, 04-Jän-2016.
- [59] B. Giechaskiel, „Real Driving Emissions (RDE) Portabel Emission Measurement Systems (PEMS) Particle Number (PN) Implementing PN-Pems for RDE procedures“, gehalten auf der 3rd International Conference Real Driving Emissions, Berlin, 2015.
- [60] European Commission Directorate-General of Internal Market Industry Entrepreneurship and SMEs, „European Commission: RDE Working Group Meeting, Real Driving emission (RDE) legislation: next steps“. 25-Jän-2016.
- [61] Delphi Automotive, „Worldwide Emissions Standards for Passenger Cars and LDV Brochure“. [Online]. Verfügbar unter: <http://delphi.com/docs/default->

- source/catalogs/delphi-worldwide-emissions-standards-pc-ldv-15-16.pdf?sfvrsn=2.
[Zugegriffen: 14-Juli-2015].
- [62] Baptiste Chatain, „Parliament decides not to veto car emissions test update“, *European Parliament News*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.europarl.europa.eu/news/en/news-room/20160129IPR11905/Parliament-decides-not-to-veto-car-emissions-test-update>. [Zugegriffen: 12-Mai-2016].
- [63] European Commission, „Amending Regulation (EC) No 692/2008 as regards emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 6) Annex IIIA“. Oktober-2015.
- [64] Bundesministerium für Bildung und Forschung, „Gemeinsame Forschungsstelle (JRC) - EU-Büro des BMBF“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.eubüro.de/jrc.htm>. [Zugegriffen: 12-Juli-2016].
- [65] T. Fortuna, H.-M. Koegeler, M. Kordon, und G. Vitale, „DoE und darüber hinaus - Evolution des modellbasierten Entwicklungsansatzes“, *ATZ - Automob. Z.*, Bd. 117, Nr. 2, S. 50–55, Jän. 2015.
- [66] G. Fraidl, P. Kapus, P. Schöggel, S. Krapf, K. Vidmar, und M. Weissbäck, „RDE - Herausforderungen und Lösungen“, gehalten auf der Wiener Motorensymposium 2015, 2015.
- [67] K. Vidmar, P. Götschl, G. Fraidl, P. Kapus, und H. Jansen, „Real Driving Emissions - Eine Herausforderung für GDI Motoren“, gehalten auf der 8. Internationales Forum Abgas und Partikelemissionen, 2014.
- [68] List, H.O., „Futur drive development: overcoming a short development time and high complexity“, gehalten auf der 35th International Vienna Motor Symposium, 2014.
- [69] Hauke Maschmeyer, Mattias Kluin, Mattias Kluin, und Prof. Christian Beidl, „Durchgängiger Entwicklungsprozess für Real Driving Emissions- Untersuchungen - Von der Simulation bis zur PEMS-Messung auf der Straße“, gehalten auf der 16. MTZ-Fachtagung, 2014.
- [70] AVL List GmbH, „AVL RDE Development Solution“, Juni-2014.
- [71] TÜV NORD AG, „Was ist PEMS?“, *Mobile Emissionsmessungen an jedem Verbrennungsmotor*, 13-Mai-2016. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.tuev-nord.de/de/was-ist-pems-103836-was-ist-pems-103837.htm>. [Zugegriffen: 20-Mai-2016].
- [72] AVL List GmbH, Graz - Austria, „AVL Gas PEMS und AVL Gas PEMS IX Product Guide“. Dez-2015.

- [73] Jin Lei und Karl Oberguggenberger, „Real Driving Emissions (RDE) the Game Changer“, 31-Sep-2015.
- [74] UNECE, „Global technical regulation No. 15. Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure“. März-2014.
- [75] Dr. Pfeiffer Klaus und Merl Reinhard, „Emission Calibration: Accelerating Development using a Powertrain-in-the-Loop Testbed“, gehalten auf der FISITA Automotive World Conference - Intelligent transport to solve our future mobility, safety and environmental challenges, Maastricht, 2014.
- [76] Stefan Platner, Michael Kordon, Efstratios Fakiolas, und Hannes Atzler, „Modellbasierte Serienkalibrierung - der effiziente Weg für Variantenentwicklung“, *Springer Automot. Media*, Sep. 2013.
- [77] Marcus Szikora, „Ermittlung und Bewertung der Abbildungsgüte von Realfahrteinflüsse zur Darstellung von Real-Driving-Emissions-Messung auf Rollenprüfständen“, TU Wien, 2015.
- [78] Ivan Hodac, Mitch Bainwol, Jed R. Mandel, und Yoshiyasu Nao, „World Wide Fuel Charter, Fifth Edition“. European Automobile Manufacturers Association ACEA, Sep-2013.
- [79] Robert Joumard, Juhani Laurikko, Tuan Le Han, und Sava Geivandis, „Accuracy of exhaust emissions measurements on vehicle bench“, gehalten auf der 2nd Conf. Environment & Transport, Arcueil, France, 2006.
- [80] M. Weilenmann, J.-Y. Favez, und R. Alvarez, „Cold-start emissions of modern passenger cars at different low ambient temperatures and their evolution over vehicle legislation categories“, *Atmos. Environ.*, Bd. 43, Nr. 15, S. 2419–2429, Mai 2009.
- [81] Thomas Schütz, *Hucho - Aerodynamik des Automobils - Strömungsmechanik*. Springer Vieweg, 2013.
- [82] Bernd Heißing, Ersoy Metin, und Metin Gies, *Fahrwerkhandbuch - Grundlagen Fahrdynamik Komponenten*. Springer Vieweg.
- [83] K.-L. Haken, *Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik*, Bd. 1. Auflage. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2007.
- [84] Günter Leister, *Fahrzeugreifen und Fahrwerkentwicklung*. 2009.

- [85] Reif Konrad, *Bosch Grundlagen Fahrzeug- und Motorentechnik*, 1. Auflage. Bosch-Fachinformation Automobil, Bosch-Fachinformation Automobil.
- [86] Rolf Brück, Klaus-Müller Hass, Romasn Konieczny, und Wolfgang Maus, „The Next Generation of Highly Effective DeNO_x Exhaust Aftertreatment - Ultra Compact SCR Dosing Systems for Close-coupled Applications“ . .
- [87] „Graz-Universität - wetter.ORF.at“. [Online]. Verfügbar unter: <http://wetter.orf.at/steiermark/grazuniversitaet/>. [Zugegriffen: 15-Juni-2016].
- [88] Ludwig-Maximilians-Universität München, „Statistik II für Studierende“. Juni-2016.
- [89] „Standardabweichung - Statista Definition“, *Statista Lexikon*. [Online]. Verfügbar unter: <http://de.statista.com/statistik/lexikon/definition/126/standardabweichung/>. [Zugegriffen: 23-März-2016].

6 Anhang

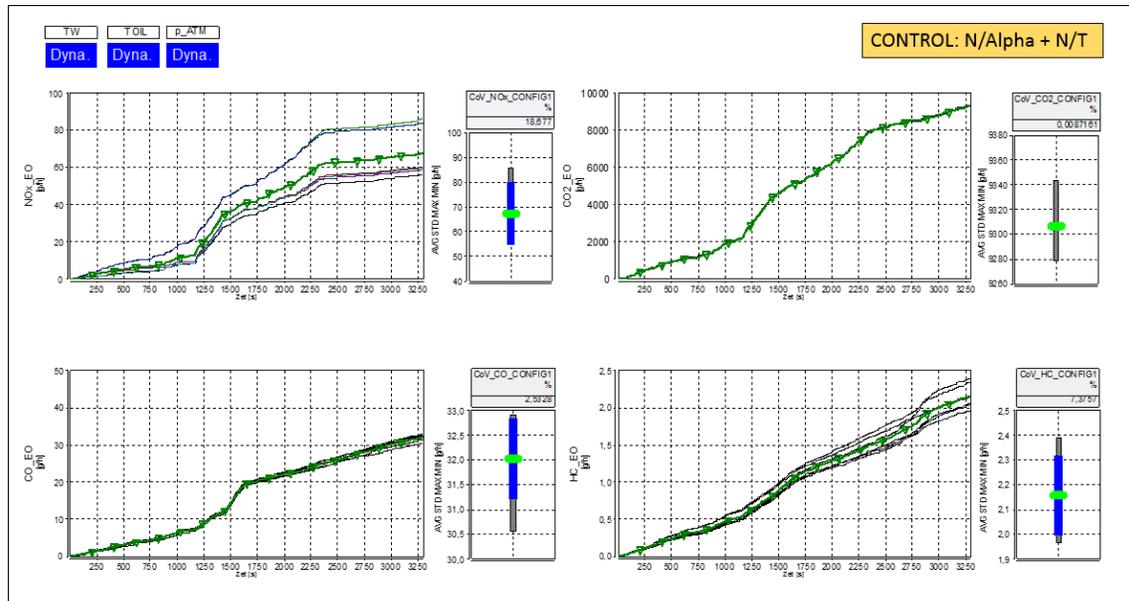


Abbildung 6-1: Wiederholbarkeit Gas. Emi.; Setup: TW=Dyn.; TOil=Dyn.; p_Atm=Dyn.; Regelmod. N/α + N/T

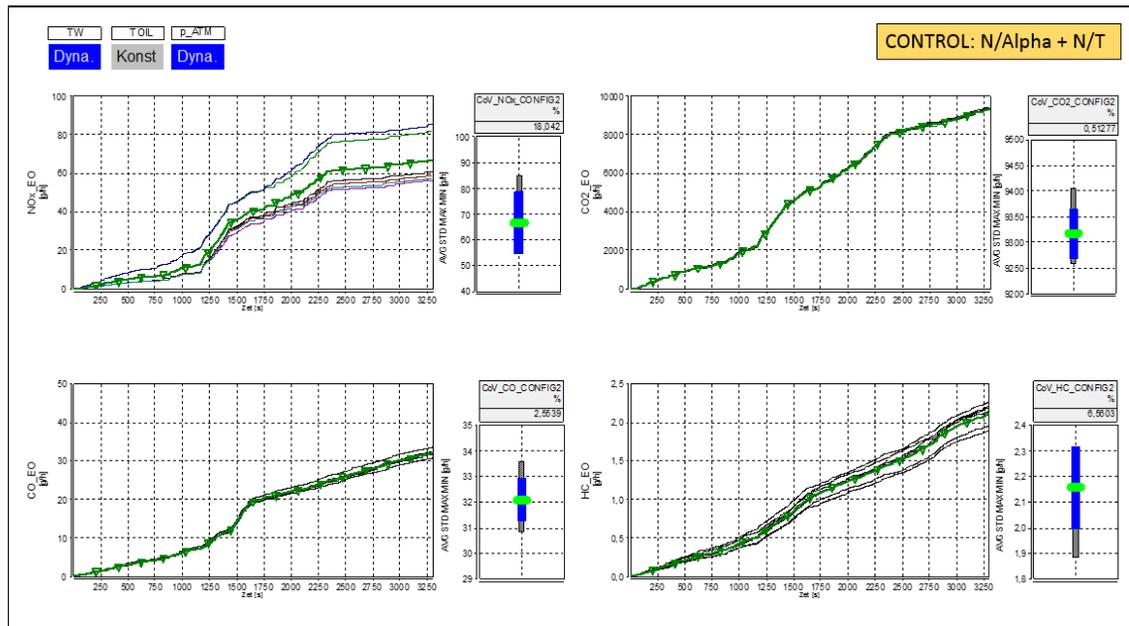


Abbildung 6-2: Wiederholbarkeit Gas. Emi.; Setup: TW=Dyn.; TOil=Dyn.; p_Atm=Dyn.; Regelmod. N/α + N/T

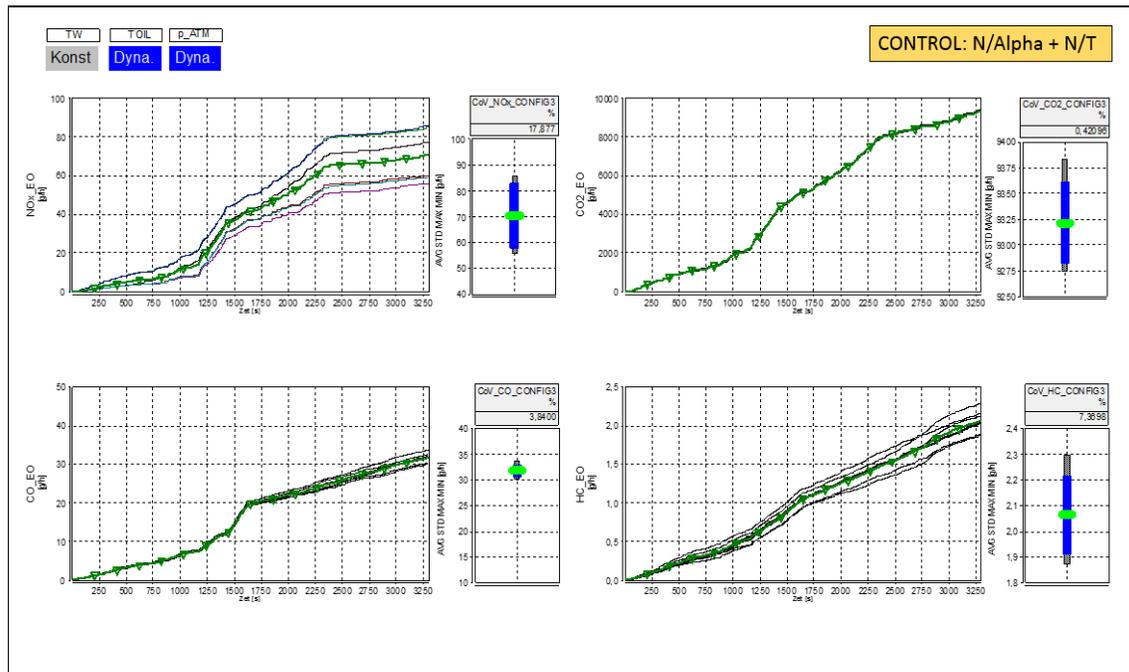


Abbildung 6-3: Wiederholbarkeit Gas. Emi.; Setup: TW=Dyn.; TOil=Dyn.; p_Atm=Dyn.; Regelmod. N/α + N/T

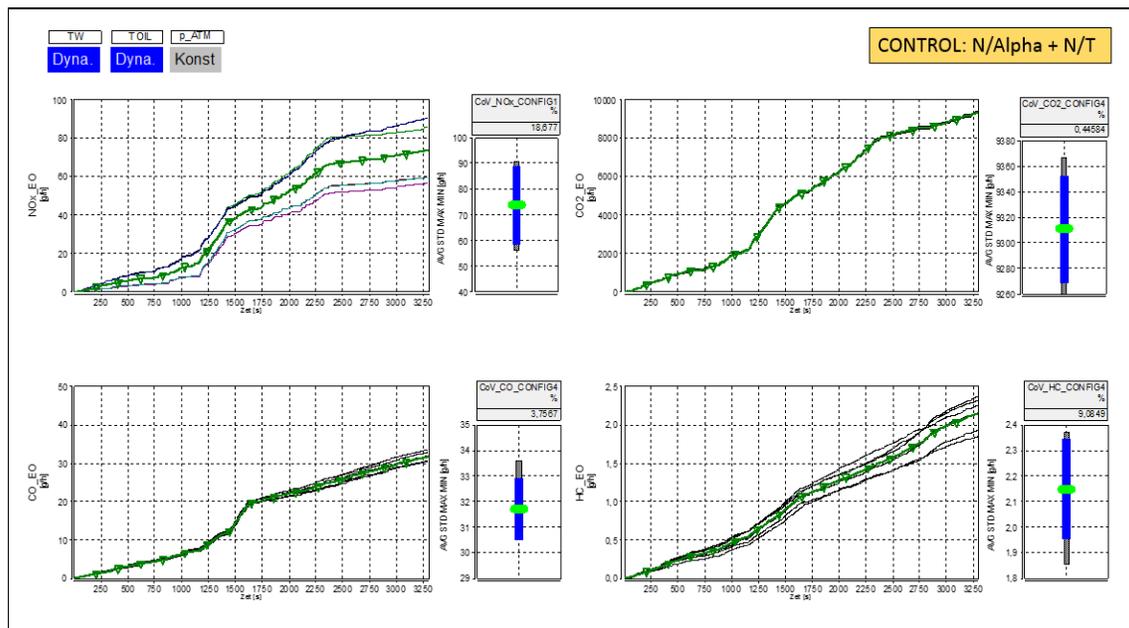


Abbildung 6-4: Wiederholbarkeit Gas. Emi.; Setup: TW=Dyn.; TOil=Dyn.; p_Atm=Konst.; Regelmod. N/α + N/T

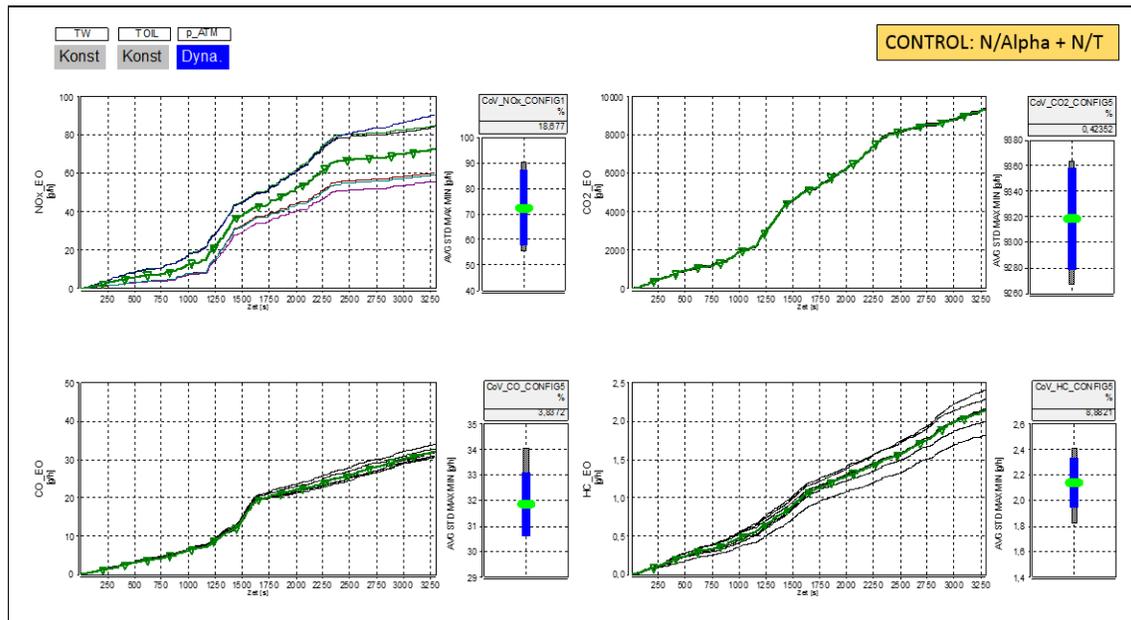


Abbildung 6-5: Wiederholbarkeit Gas. Emi.; Setup: TW=Konst.; TOil=Konst.; p_Atm=Dyn; Regelmod. N/a + N/T

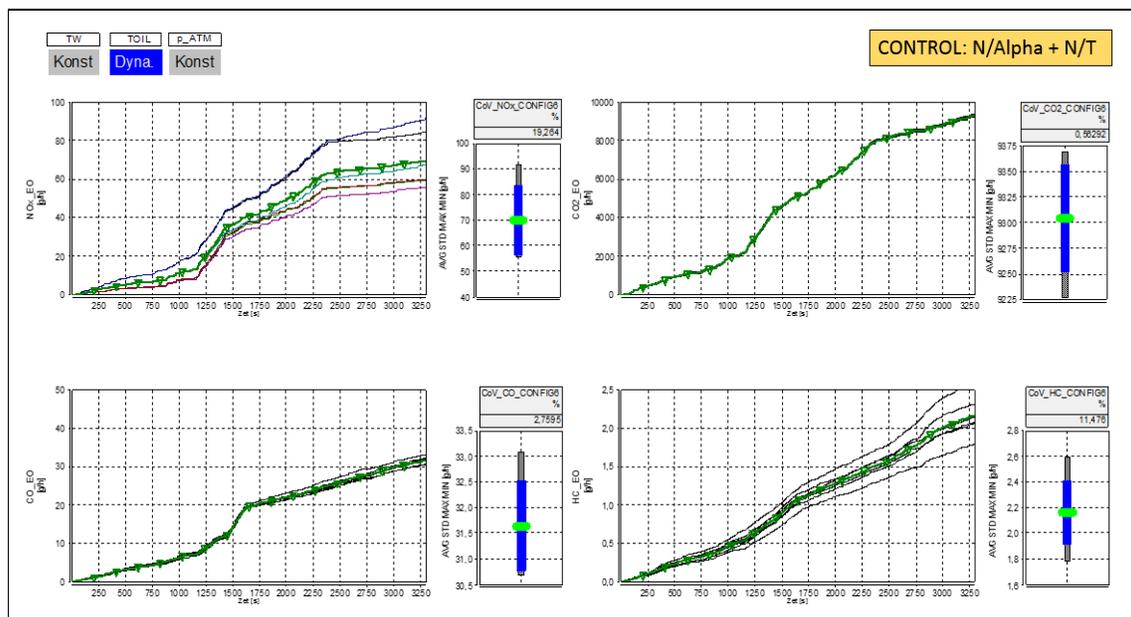


Abbildung 6-6: Wiederholbarkeit Gas. Emi.; Setup: TW=Konst.; TOil=Dyn.; p_Atm=Konst.; Regelmod. N/a + N/T

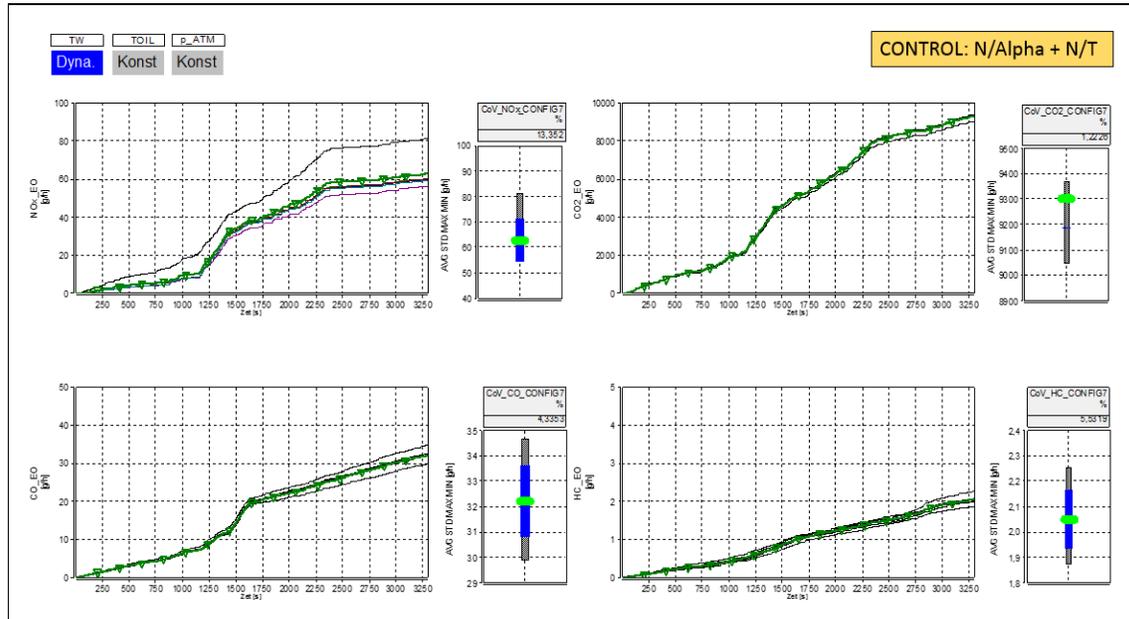


Abbildung 6-7: Wiederholbarkeit Gas. Emi.; Setup: TW=Dyn.; TOil=Konst.; p_Atm=Konst.; Regelmod. N/α + N/T

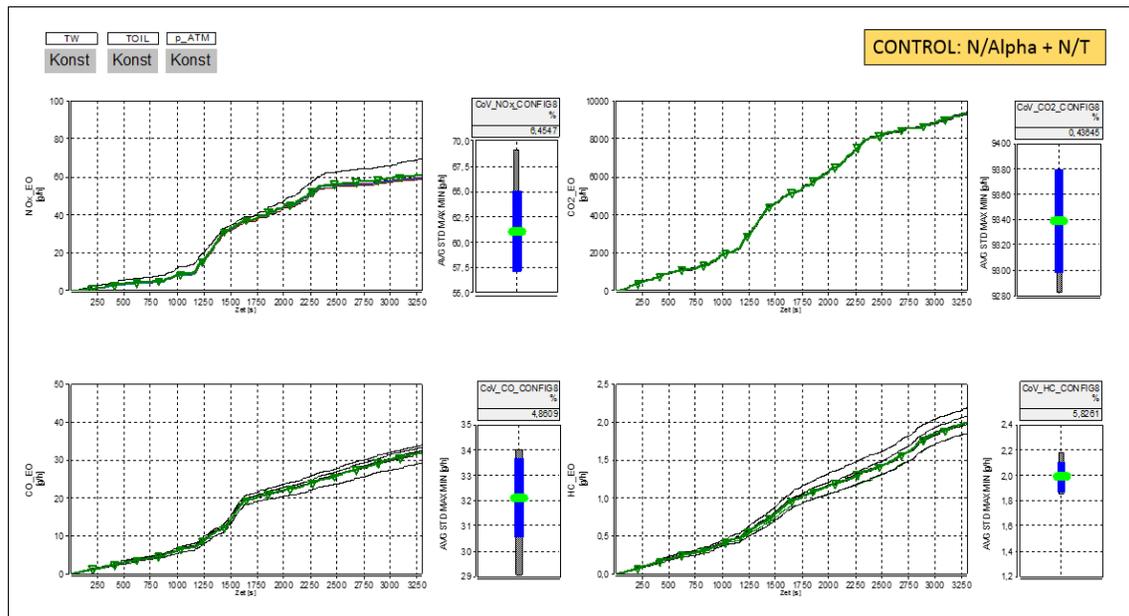


Abbildung 6-8: Wiederholbarkeit Gas. Emi.; Setup: TW=Konst.; TOil=Konst.; p_Atm=Konst.; Regelmod. N/α + N/T

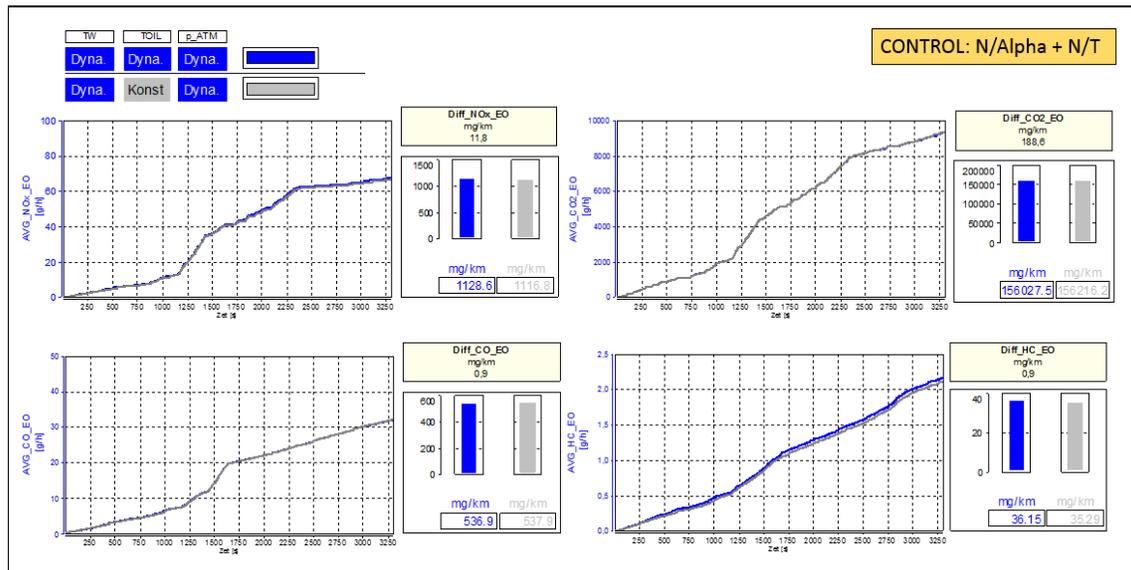


Abbildung 6-9: Abweichung Gas. Emi. CONFIG 1 – CONFIG 2; Regelmod. N/α + N/T

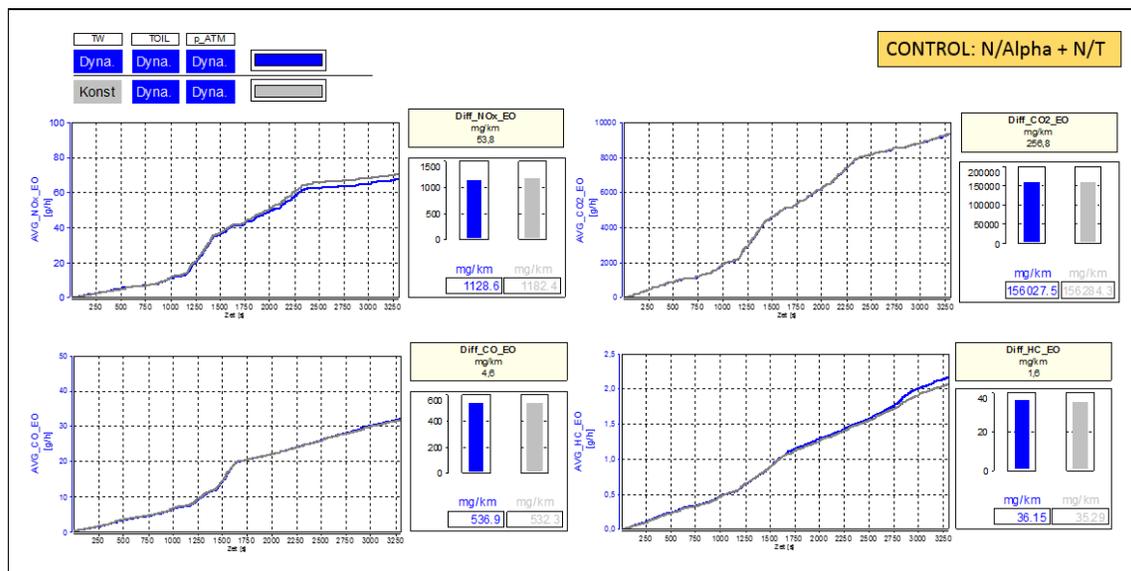


Abbildung 6-10: Abweichung Gas. Emi. CONFIG 1 – CONFIG 3; Regelmod. N/α + N/T

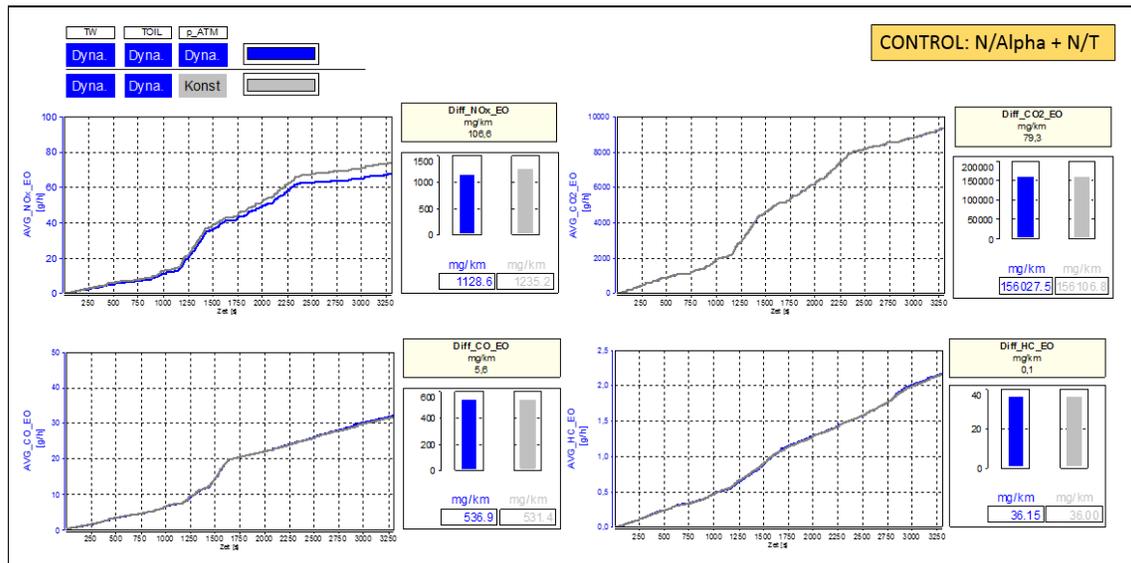


Abbildung 6-11: Abweichung Gas. Emi. CONFIG 1 – CONFIG 4; Regelmod. N/a + N/T

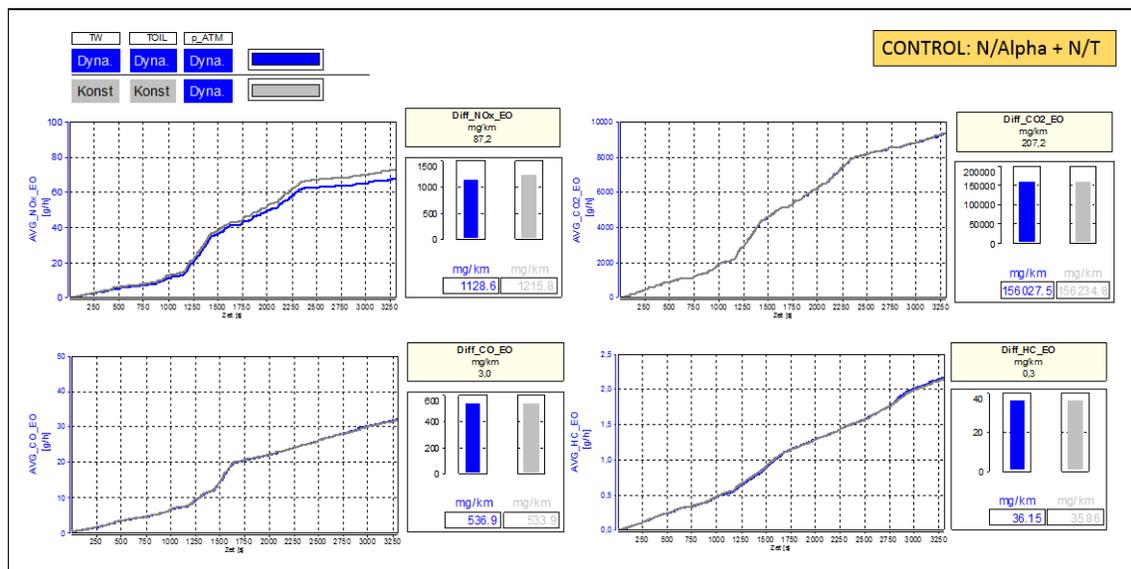


Abbildung 6-12: Abweichung Gas. Emi. CONFIG 1 – CONFIG 5; Regelmod. N/a + N/T

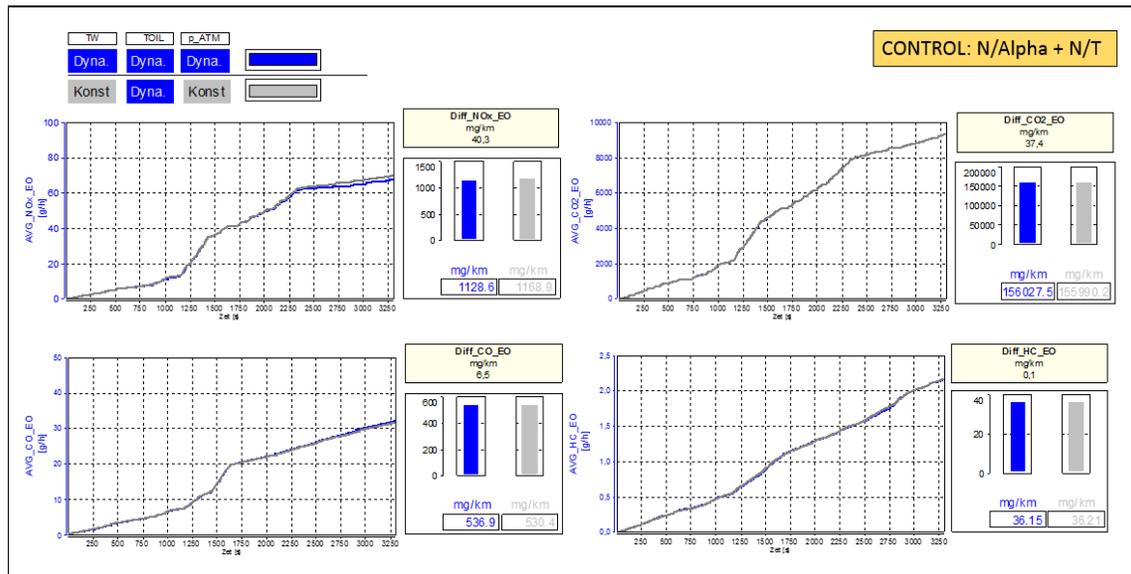


Abbildung 6-13: Abweichung Gas. Emi. CONFIG 1 – CONFIG 6; Regelmod. N/α + N/T

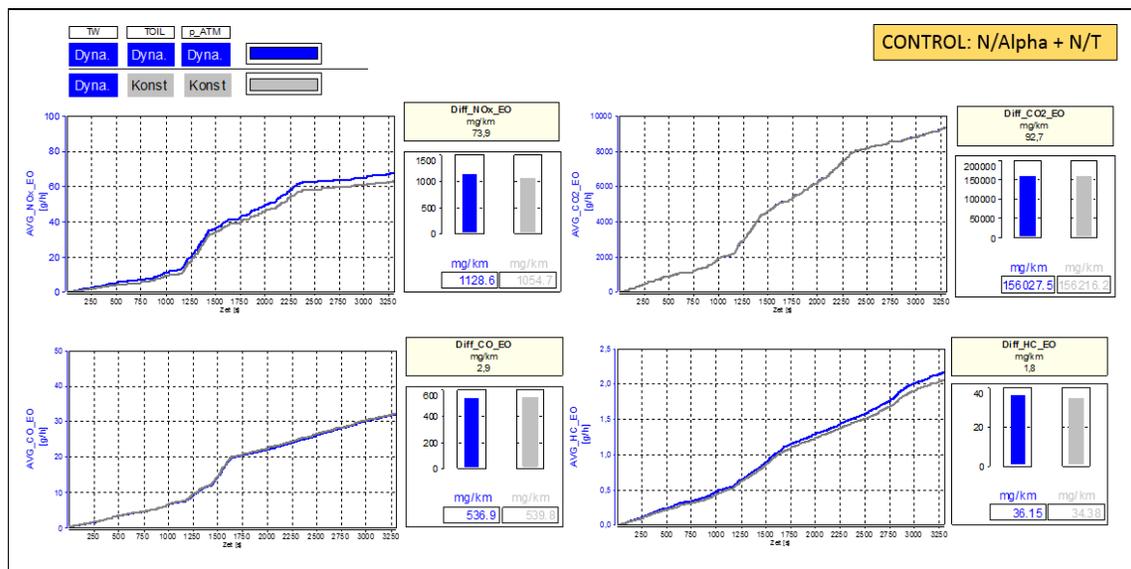


Abbildung 6-14: Abweichung Gas. Emi. CONFIG 1 – CONFIG 7; Regelmod. N/α + N/T

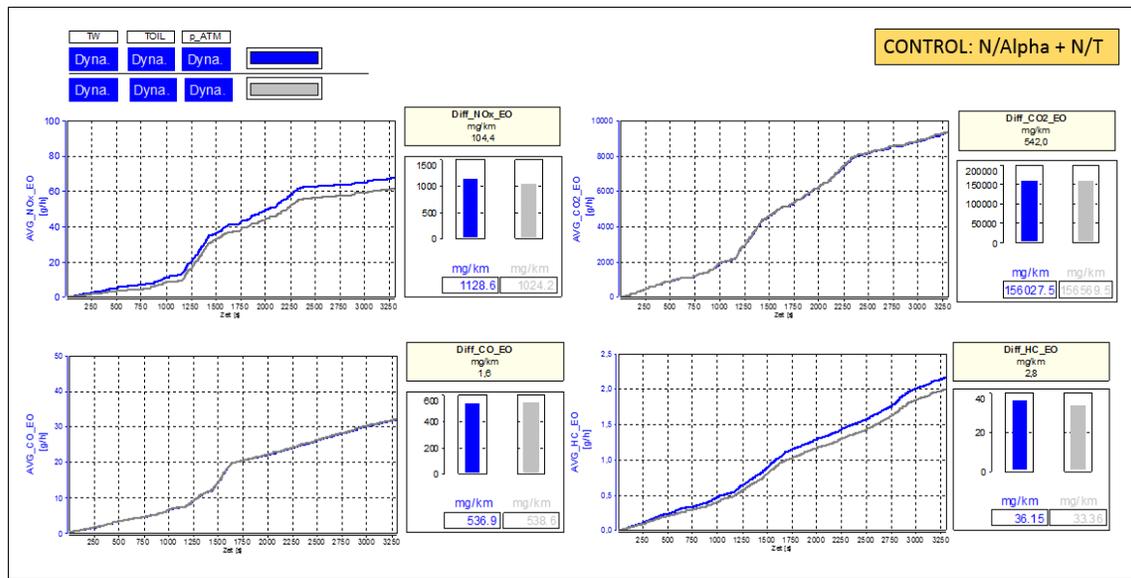


Abbildung 6-15: Abweichung Gas. Emi. CONFIG 1 – CONFIG 8; Regelmod. N/α + N/T

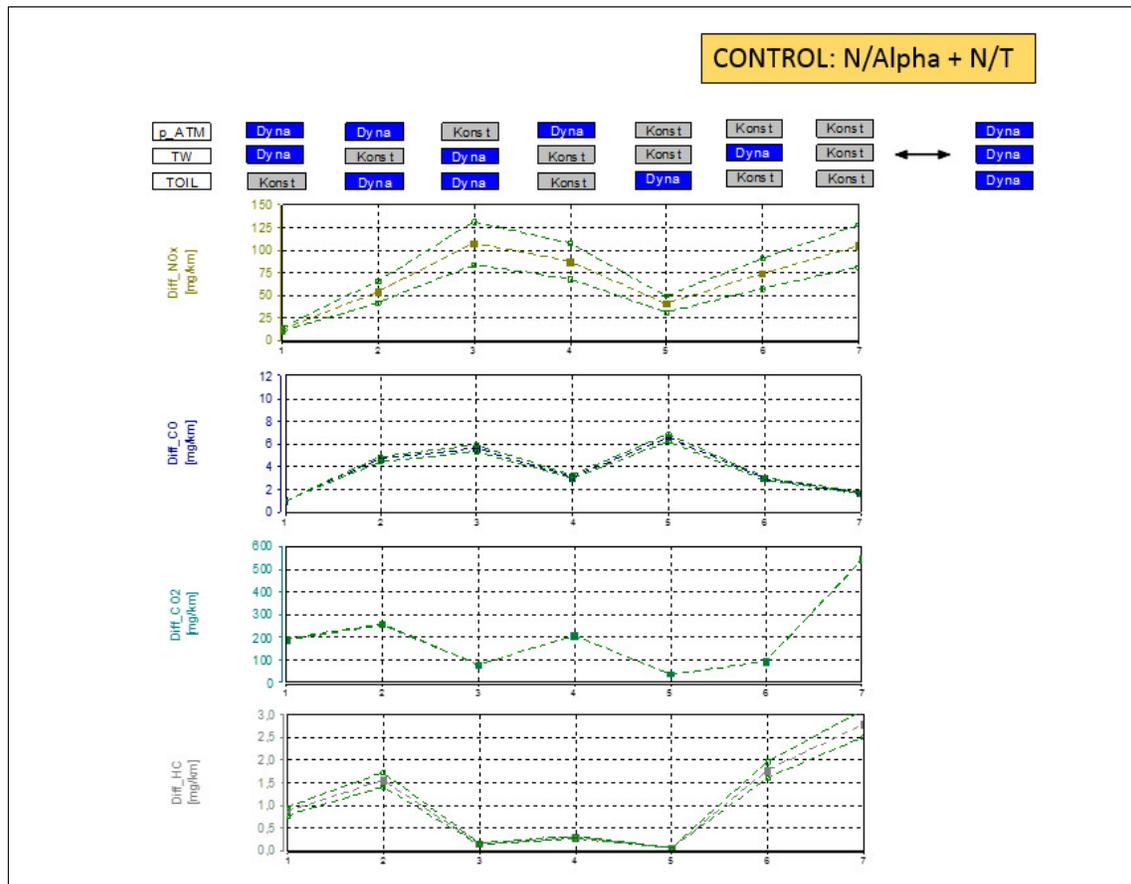


Abbildung 6-16: Übersicht Gas. Emi. Abweichung CONFIG 1 – CONFIG 2 bis CONFIG 8; Regelmod. N/α + N/T

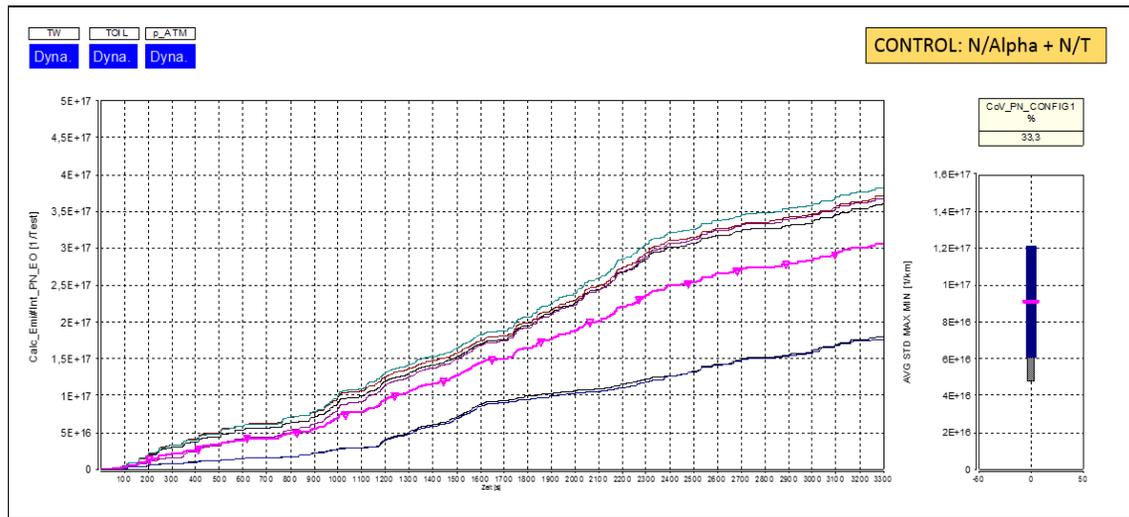


Abbildung 6-17: Wiederholbarkeit Partikelzahl; Setup: TW=Dyn.; TOil=Dyn.;
p_Atm=Dyn.; Regelmod. N/α + N/T

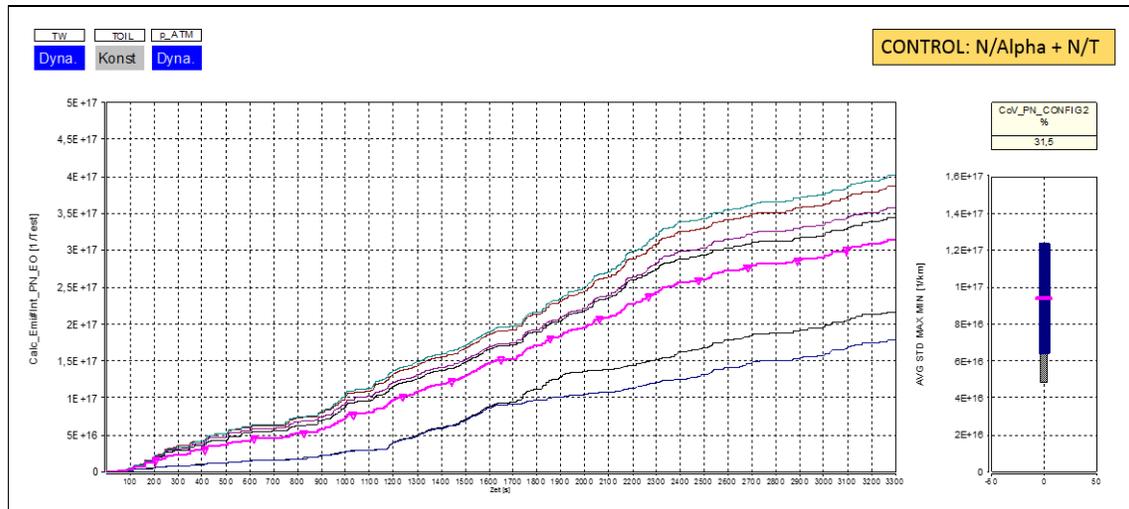


Abbildung 6-18: Wiederholbarkeit Partikelzahl; Setup: TW=Dyn.; TOil=Konst.;
p_Atm=Dyn.; Regelmod. N/α + N/T

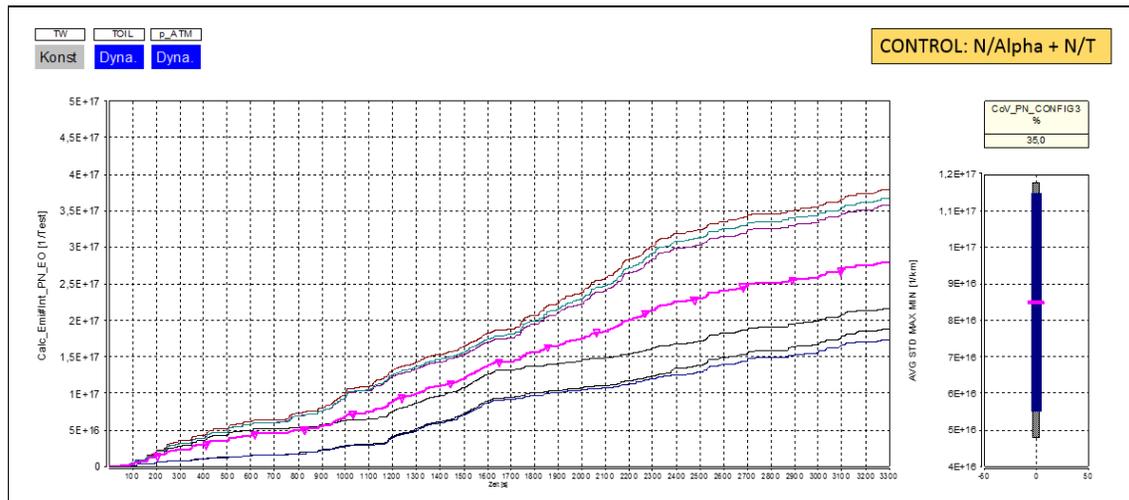


Abbildung 6-19: Wiederholbarkeit Partikelzahl; Setup: TW=Konst.; TOil=Dyn.;
p_AtM=Dyn; Regelmod. N/alpha + N/T

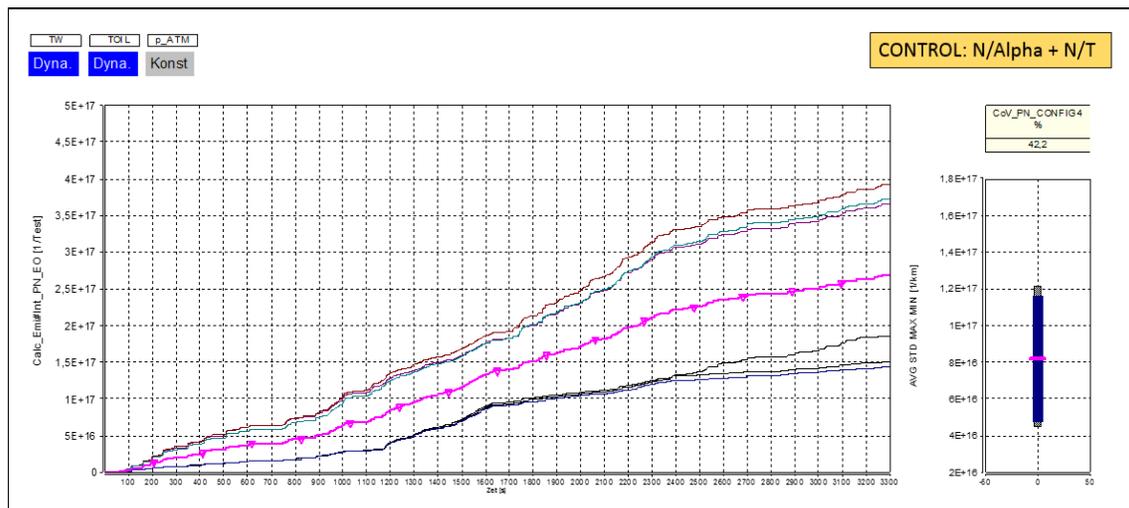


Abbildung 6-20: Wiederholbarkeit Partikelzahl; Setup: TW=Dyn.; TOil=Dyn.; p_AtM=Konst.; Regelmod. N/alpha + N/T

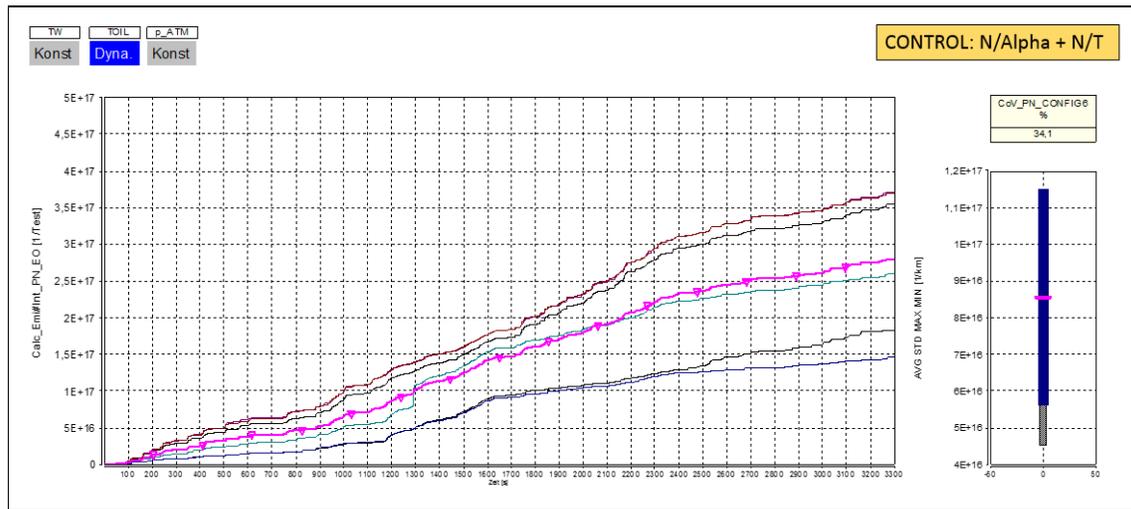


Abbildung 6-21: Wiederholbarkeit Partikelzahl; Setup: TW=Konst.; TOil=Dyn.; p_AtM=Konst.; Regelmod. N/α + N/T

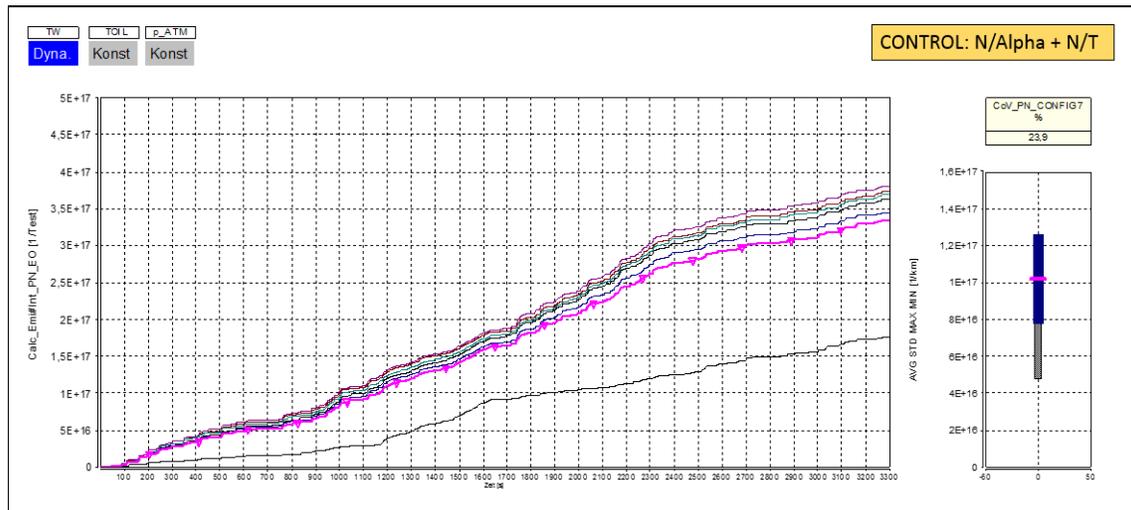


Abbildung 6-22: Wiederholbarkeit Partikelzahl; Setup: TW=Dyn.; TOil=Konst.; p_AtM=Konst.; Regelmod. N/α + N/T

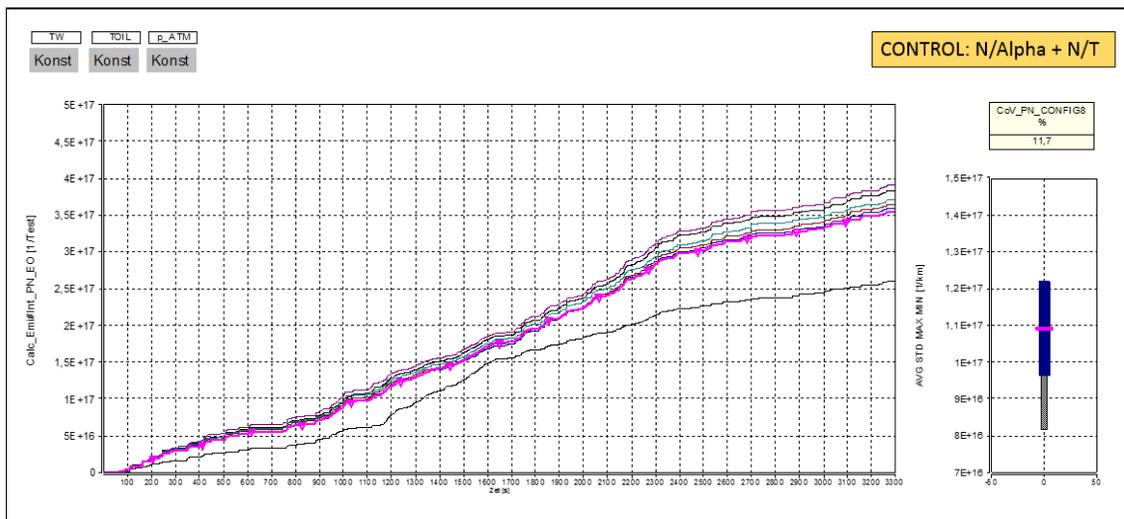


Abbildung 6-23: Wiederholbarkeit Partikelzahl; Setup: TW=Konst.; TOil= Konst.; p_Atm= Konst.; Regelmod. N/α + N/T

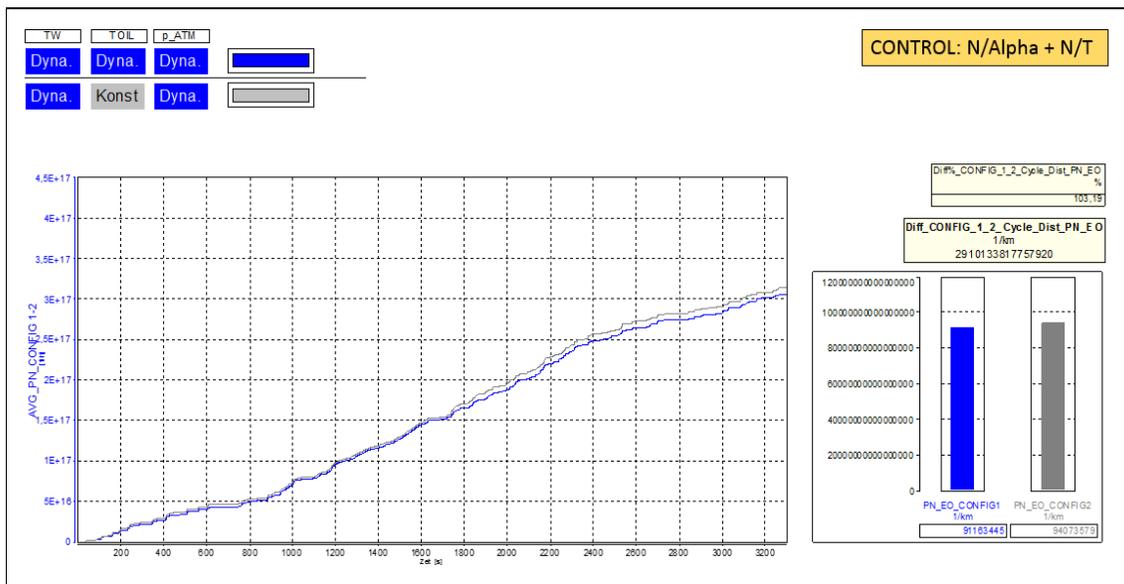


Abbildung 6-24: Abweichung Partikelanzahl. CONFIG 1 – CONFIG 2; Regelmod. N/α + N/T

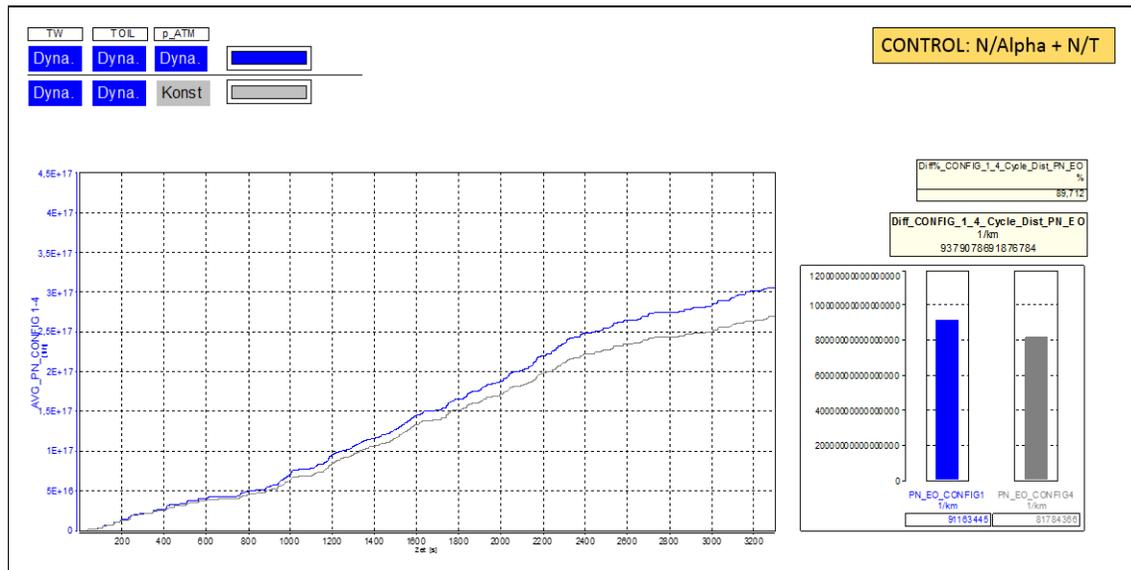


Abbildung 6-25: Abweichung Partikelanzahl. CONFIG 1 – CONFIG 4;
Regelmod. N/α + N/T

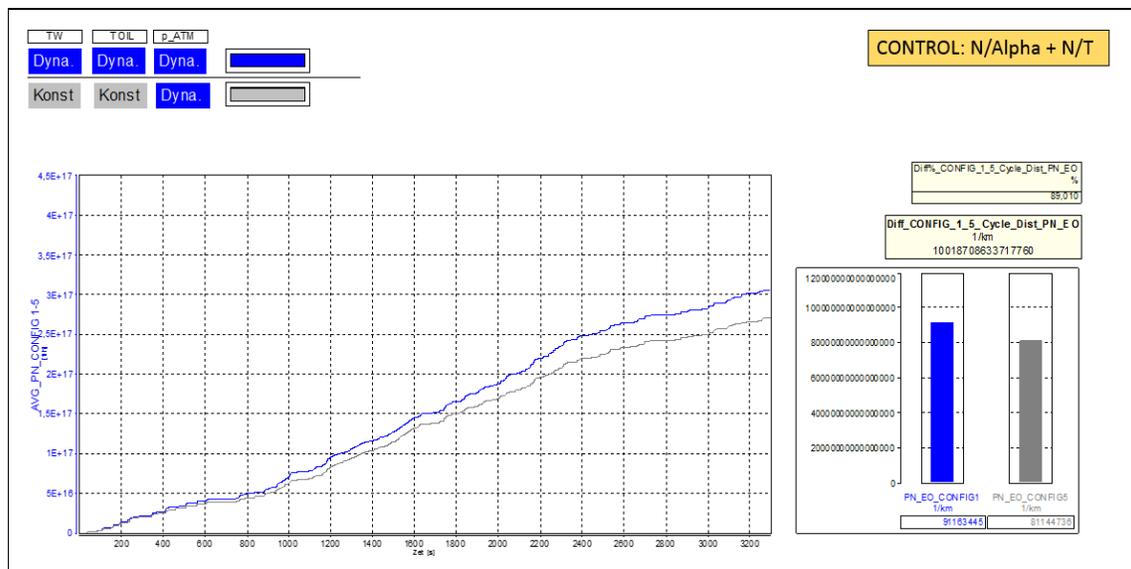


Abbildung 6-26: Abweichung Partikelanzahl. CONFIG 1 – CONFIG 5;
Regelmod. N/α + N/T

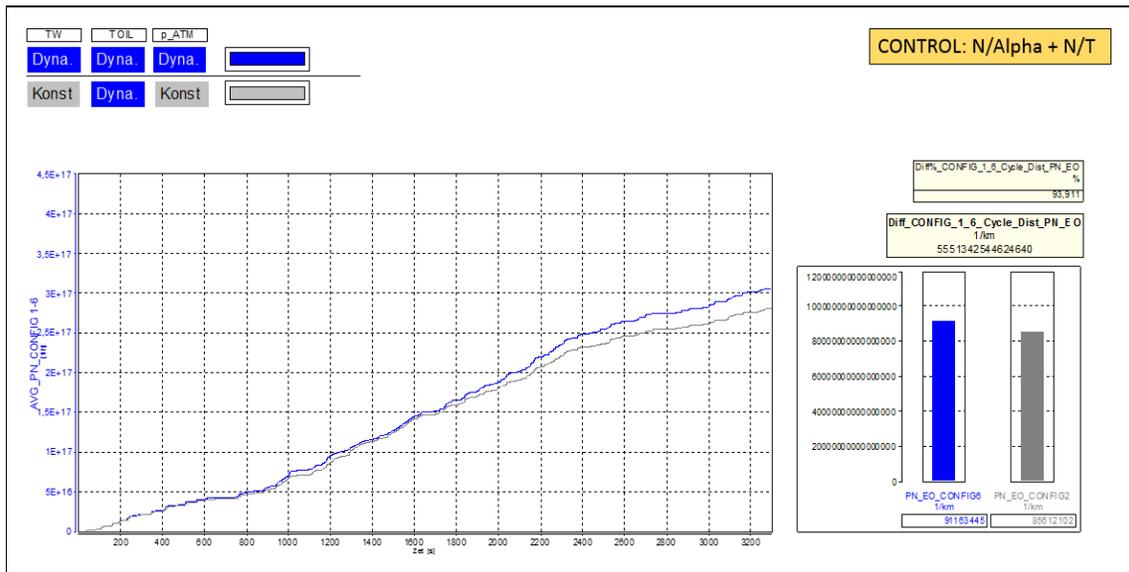


Abbildung 6-27: Abweichung Partikelanzahl. CONFIG 1 – CONFIG 6; Regelmod. $N/\alpha + N/T$

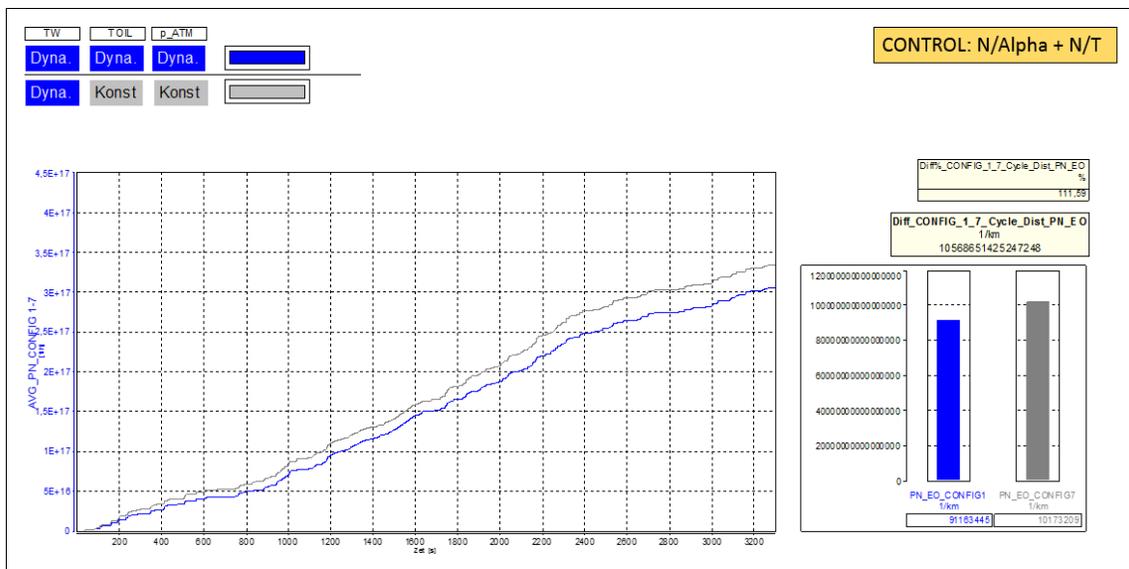


Abbildung 6-28: Abweichung Partikelanzahl. CONFIG 1 – CONFIG 7; Regelmod. $N/\alpha + N/T$

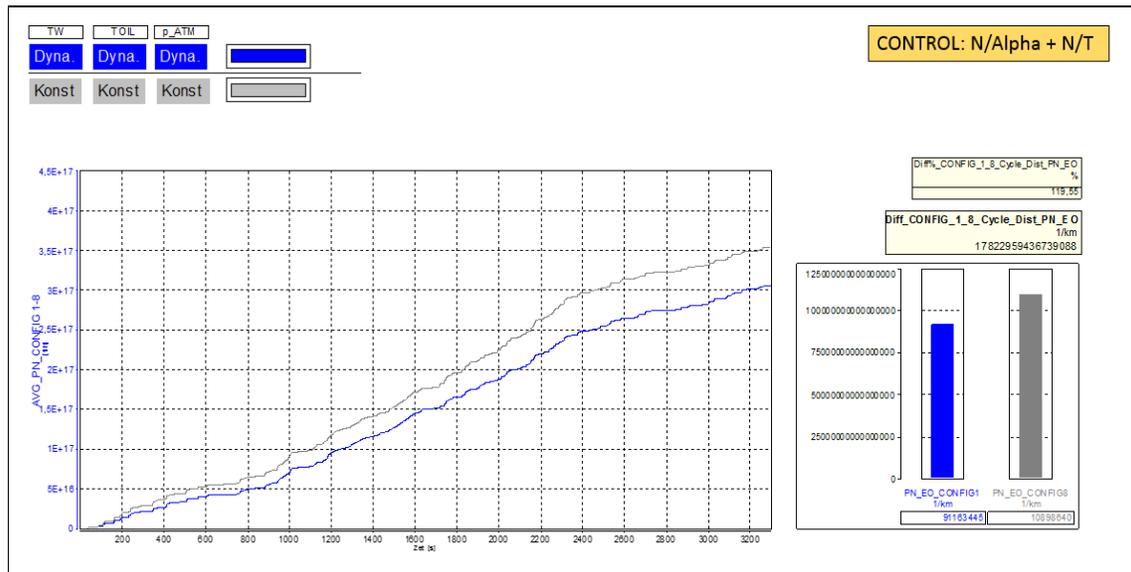


Abbildung 6-29: Abweichung Partikelanzahl. CONFIG 1 – CONFIG 8; Regelmod. $N/\alpha + N/T$

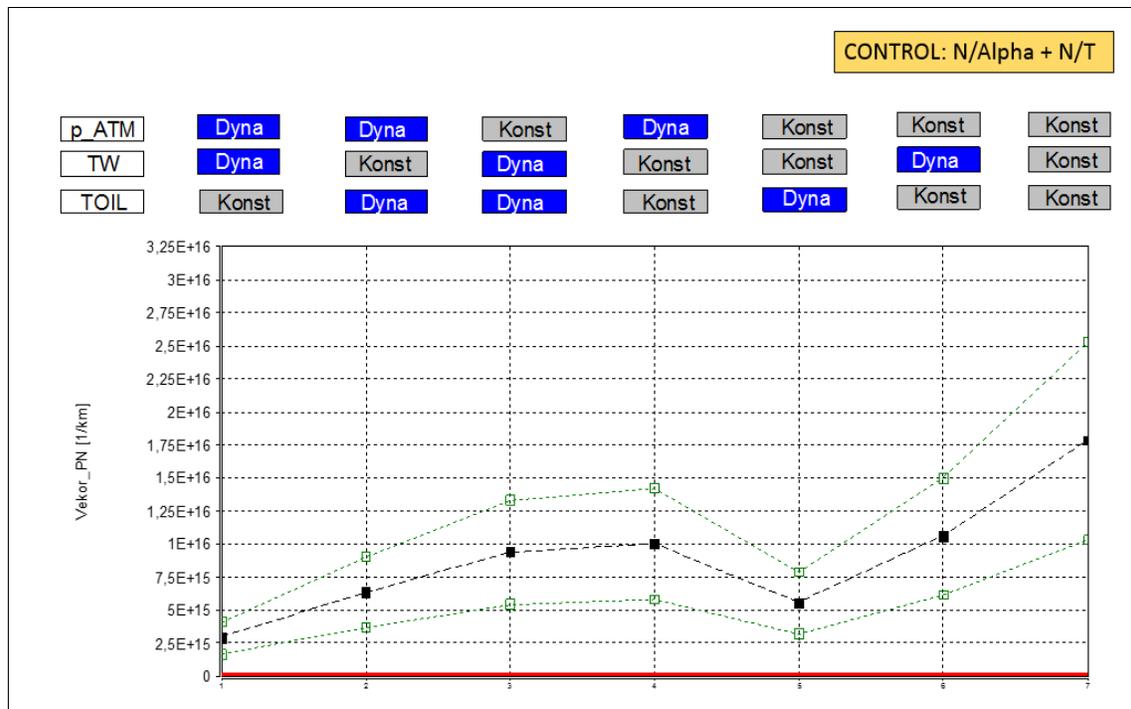


Abbildung 6-30: Übersicht Partikelanzahl: Abweichung CONFIG 1 – CONFIG 2 bis CONFIG 8; Regelmod. $N/\alpha + N/T$

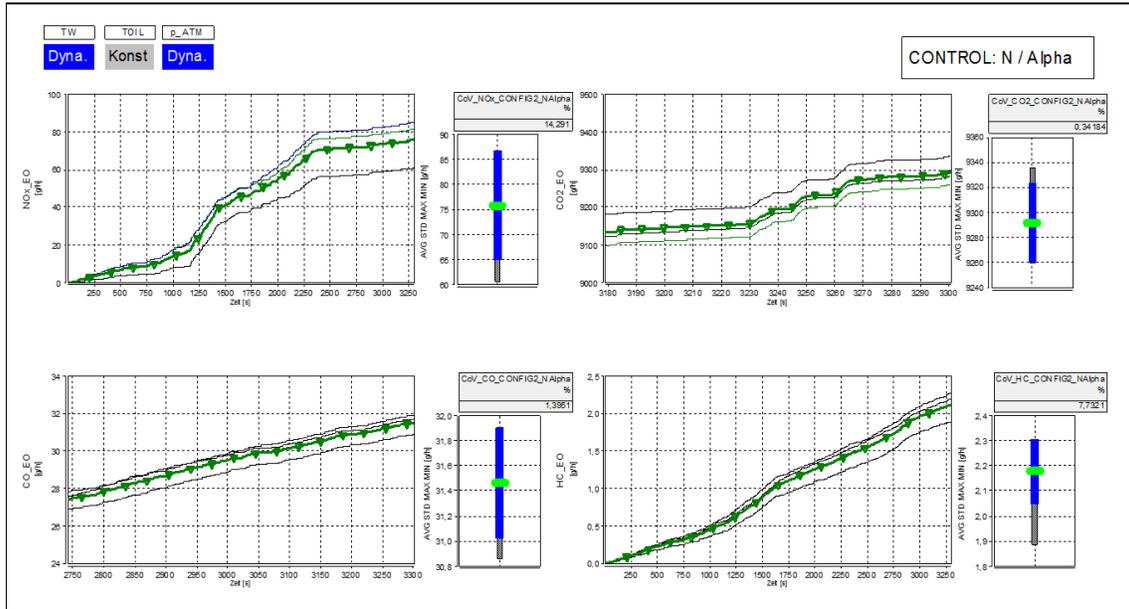


Abbildung 6-31: Wiederholbarkeit Gas. Emi.; Setup: TW=Dyn.; TOil=Konst.;
p_Atm=Dyn.; Regelmod. N/α

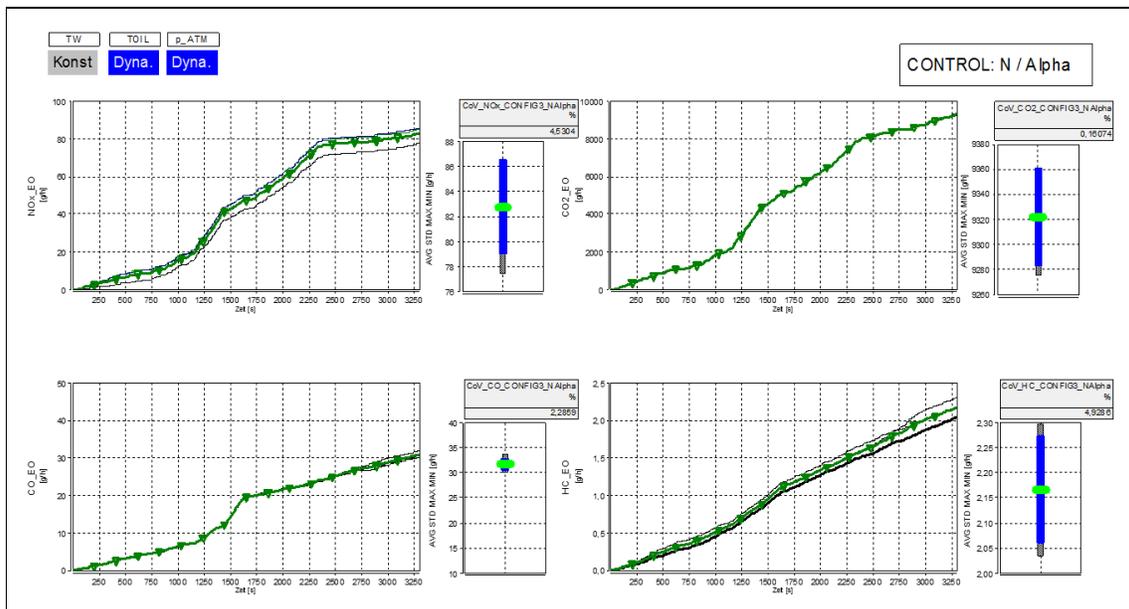


Abbildung 6-32: Wiederholbarkeit Gas. Emi.; Setup: TW=Konst.; TOil=Dyn.;
p_Atm=Dyn.; Regelmod. N/α

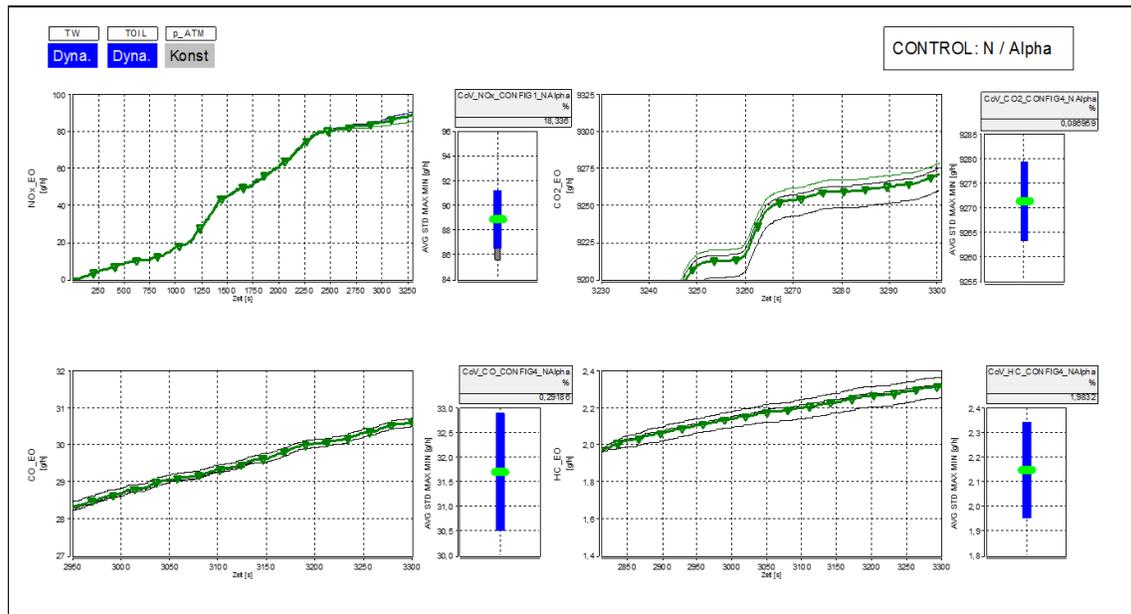


Abbildung 6-33: Wiederholbarkeit Gas. Emi.; Setup: TW=Dyn.; TOil=Dyn.; p_Atm=Konst.; Regelmod. N/alpha

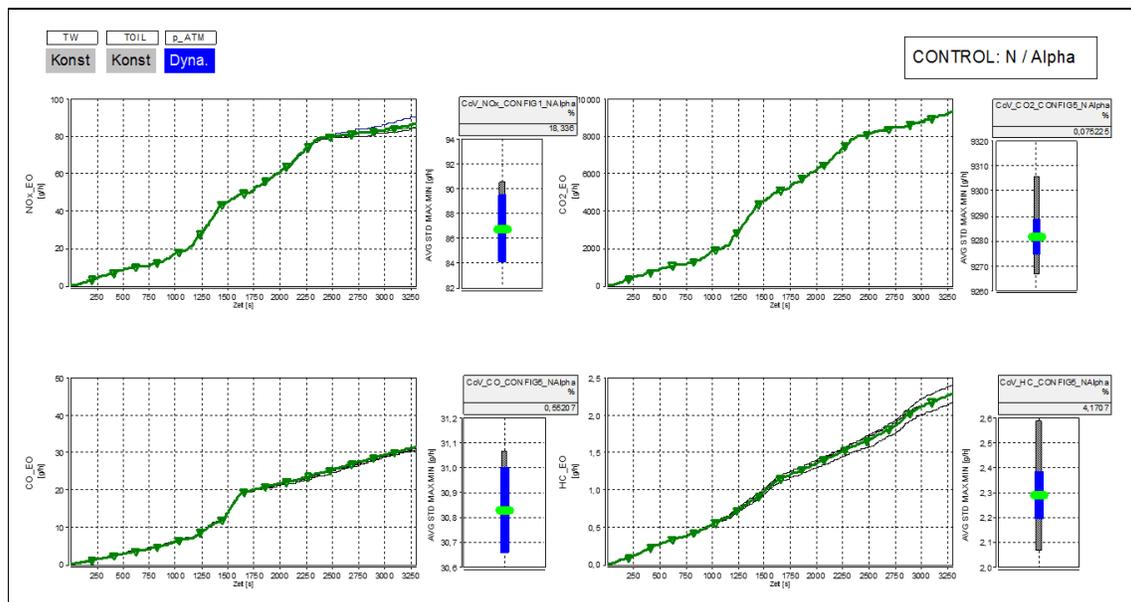


Abbildung 6-34: Wiederholbarkeit Gas. Emi.; Setup: TW=Konst.; TOil=Konst.; p_Atm=Dyn.; Regelmod. N/alpha

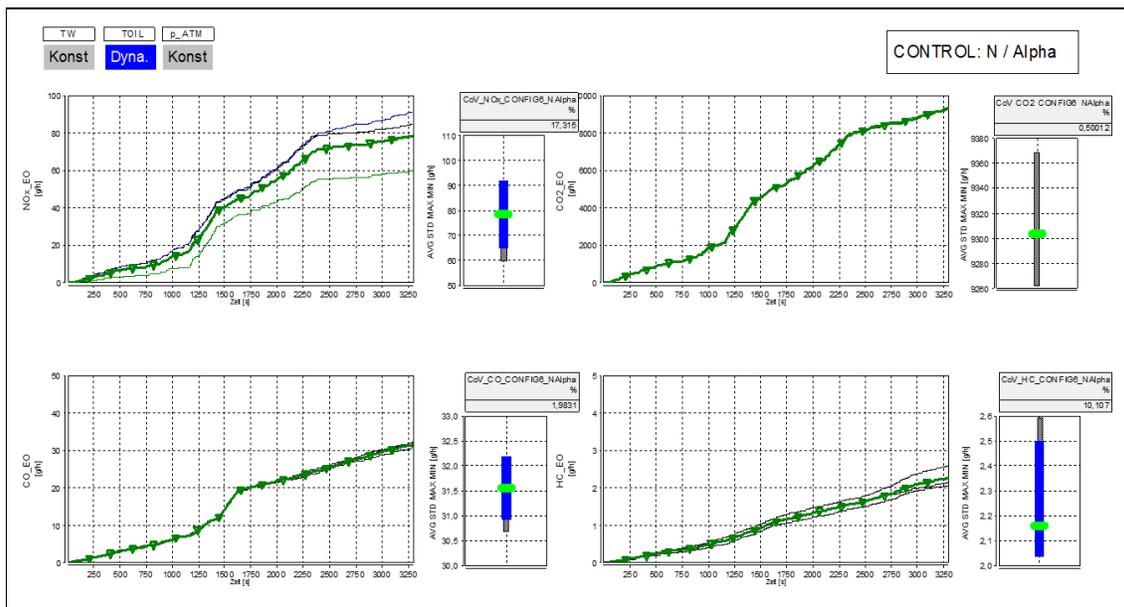


Abbildung 6-35: Wiederholbarkeit Gas. Emi.; Setup: TW=Konst.; TOil=Dyn.; p_Atm=Konst.; Regelmod. N/a

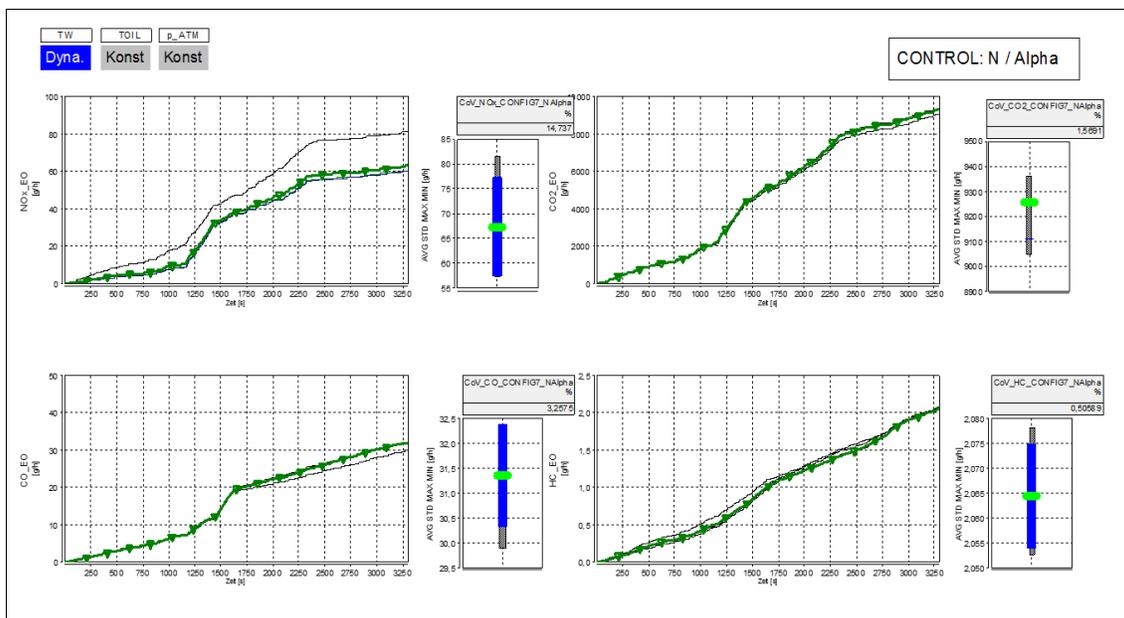


Abbildung 6-36: Wiederholbarkeit Gas. Emi.; Setup: TW=Dyn.; TOil=Konst.; p_Atm=Konst.; Regelmod.; N/a

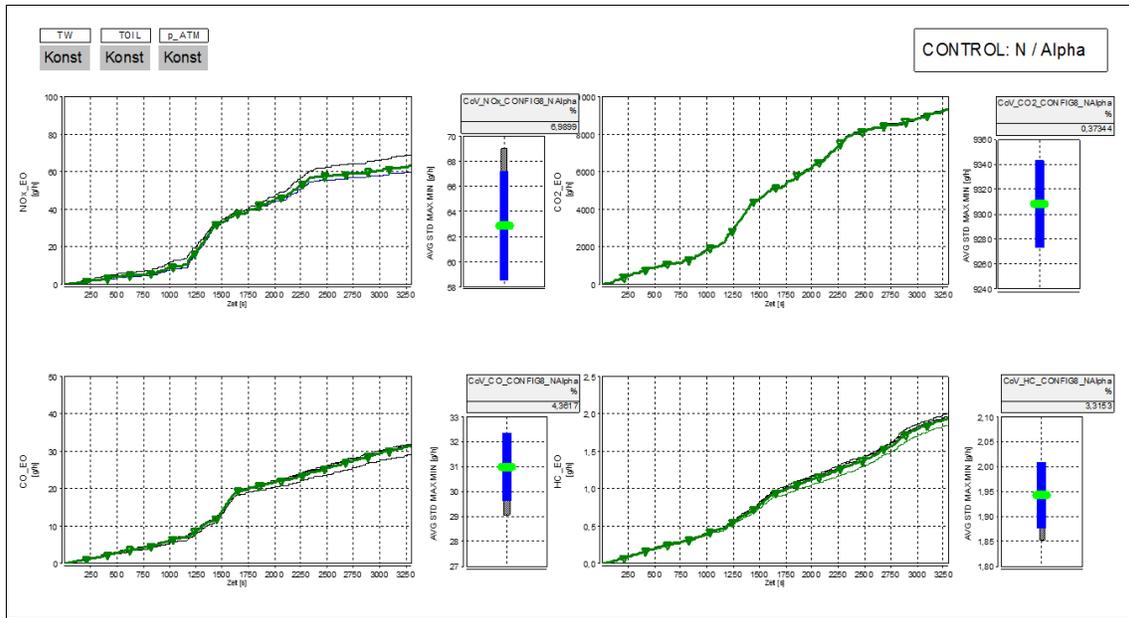


Abbildung 6-37: Wiederholbarkeit Gas. Emi.; Setup: TW=Dyn.; TOil=Dyn.; p_Atm=Dyn.; Regelmod. N/α

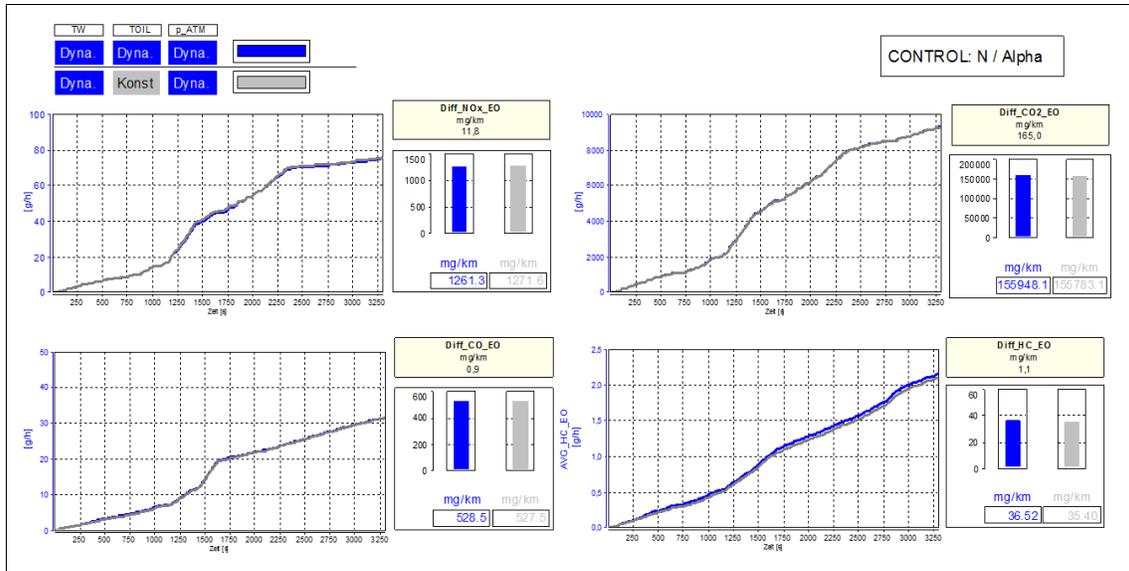


Abbildung 6-38: Abweichung Gas. Emi. CONFIG 1 – CONFIG 2; Regelmod. N/α

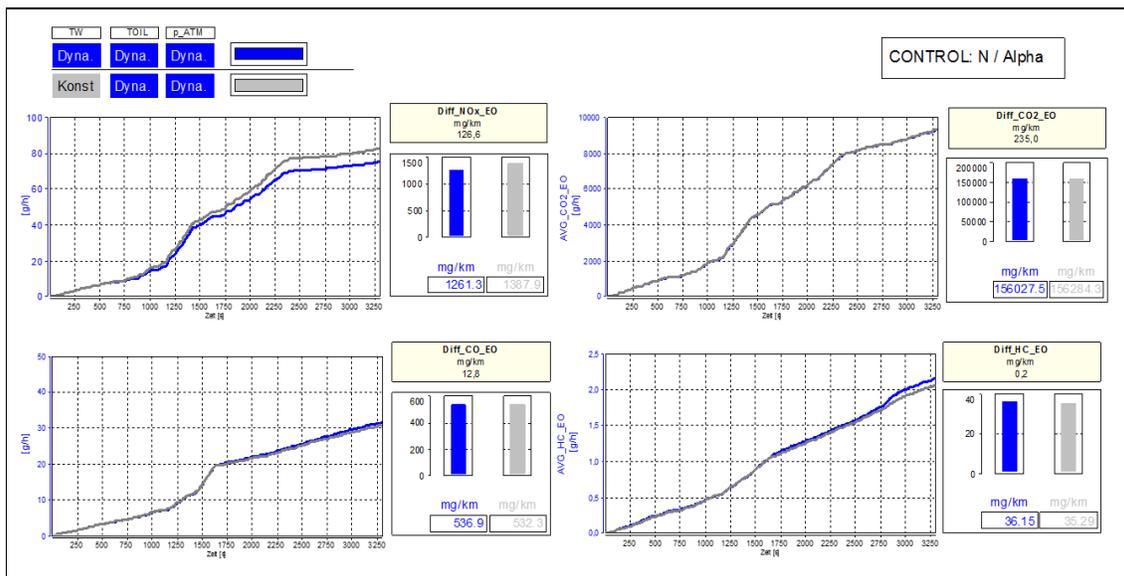


Abbildung 6-39: Abweichung Gas. Emi. CONFIG 1 – CONFIG 3; Regelmod. N/α

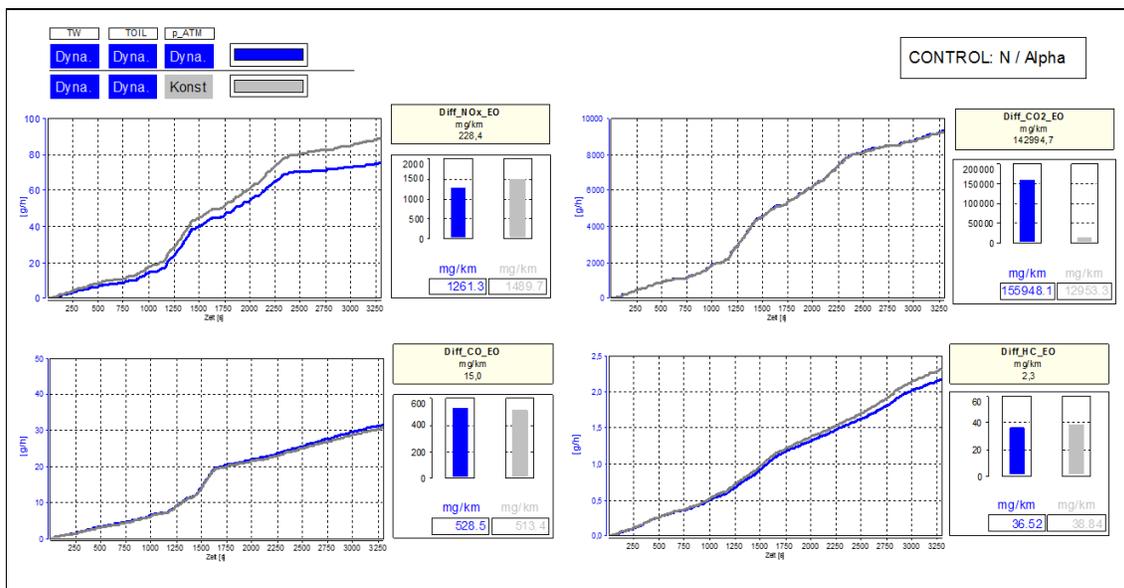


Abbildung 6-40: Abweichung Gas. Emi. CONFIG 1 – CONFIG 4; Regelmod. N/α

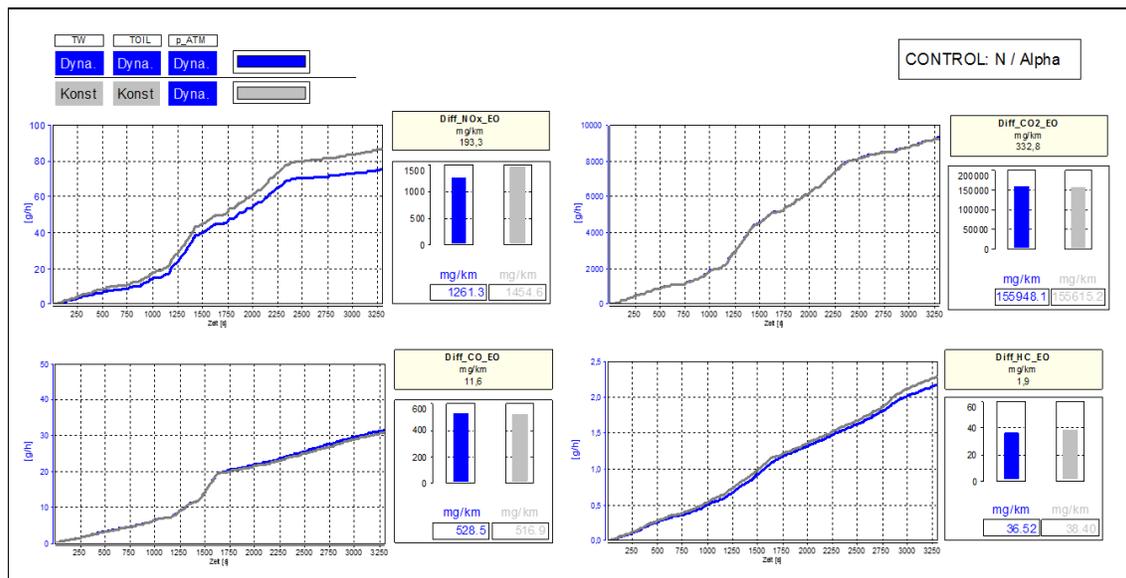


Abbildung 6-41: Abweichung Gas. Emi. CONFIG 1 – CONFIG 5; Regelmod. N/α

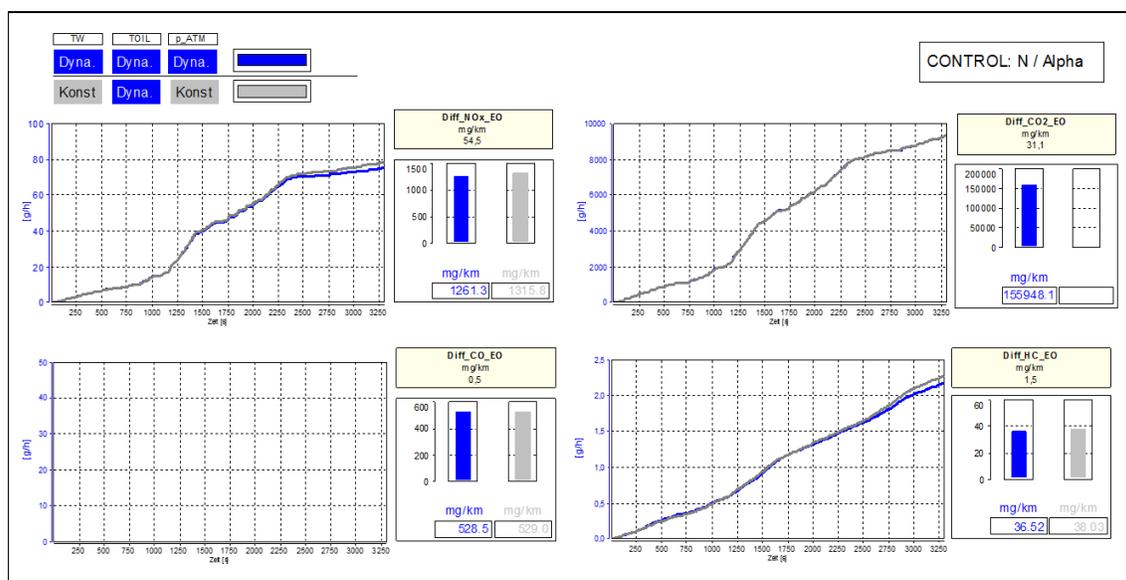


Abbildung 6-42: Abweichung Gas. Emi. CONFIG 1 – CONFIG 6; Regelmod. N/α

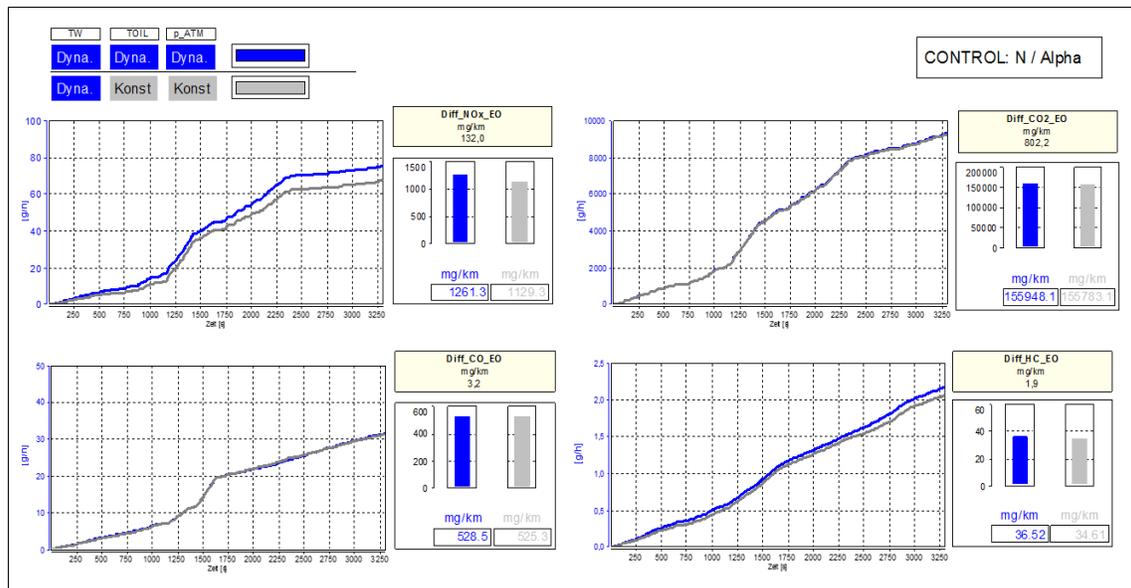


Abbildung 6-43: Abweichung Gas. Emi. CONFIG 1 – CONFIG 7; Regelmod. N/α

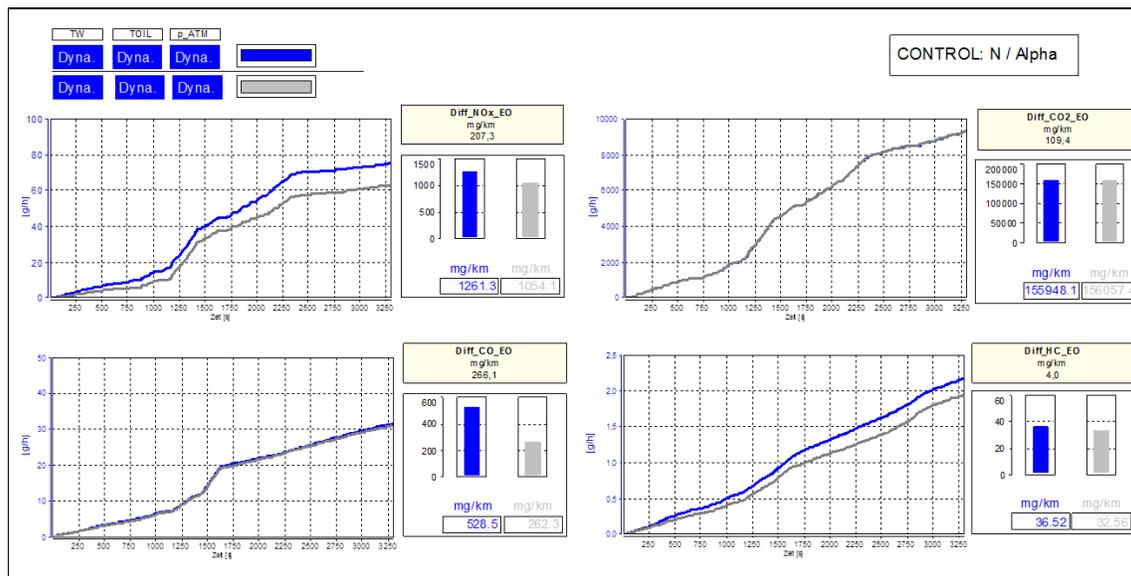


Abbildung 6-44: Abweichung Gas. Emi. CONFIG 1 – CONFIG 8; Regelmod. N/α

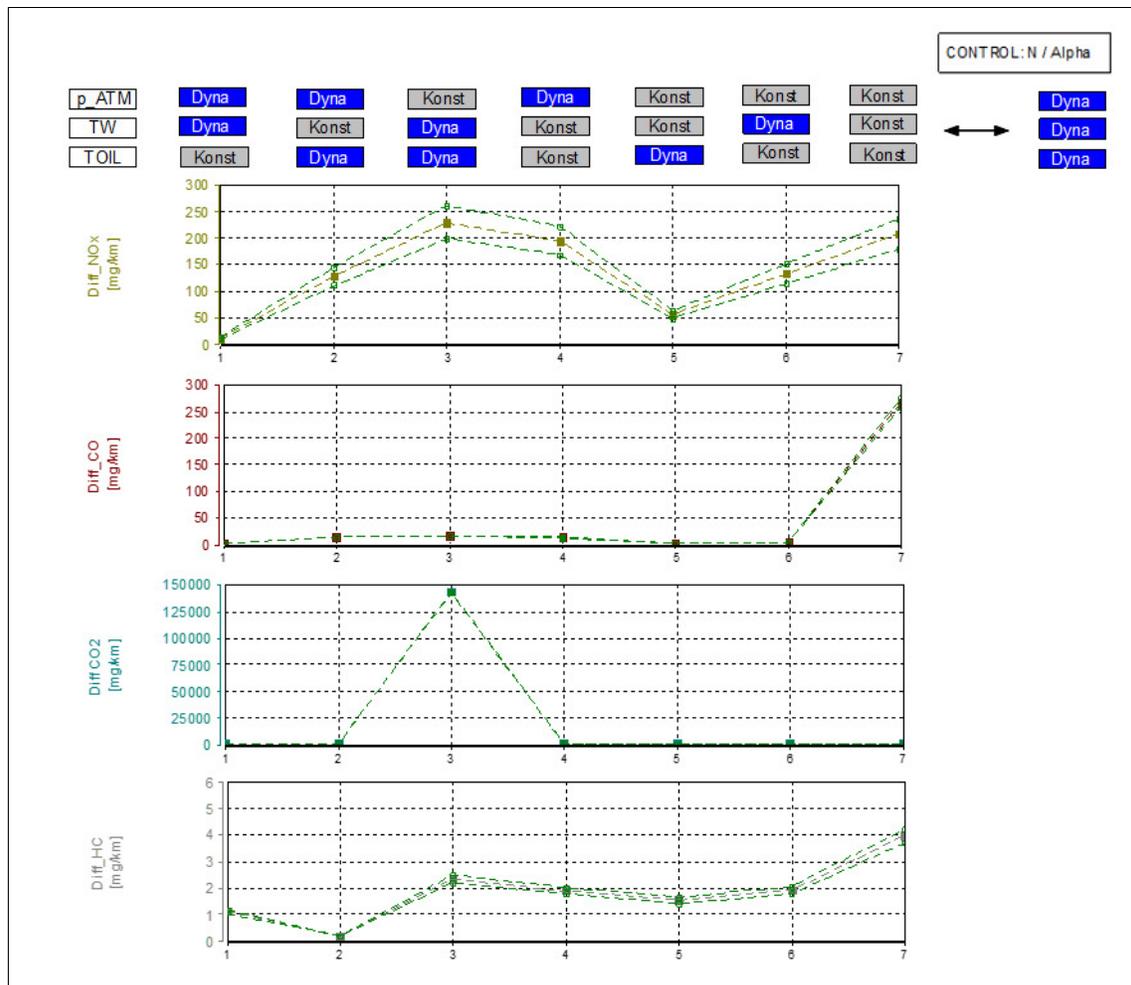


Abbildung 6-45: Übersicht Gas. Emi. Abweichung CONFIG 1 – CONFIG 2 bis CONFIG 8; Regelmod. N/α

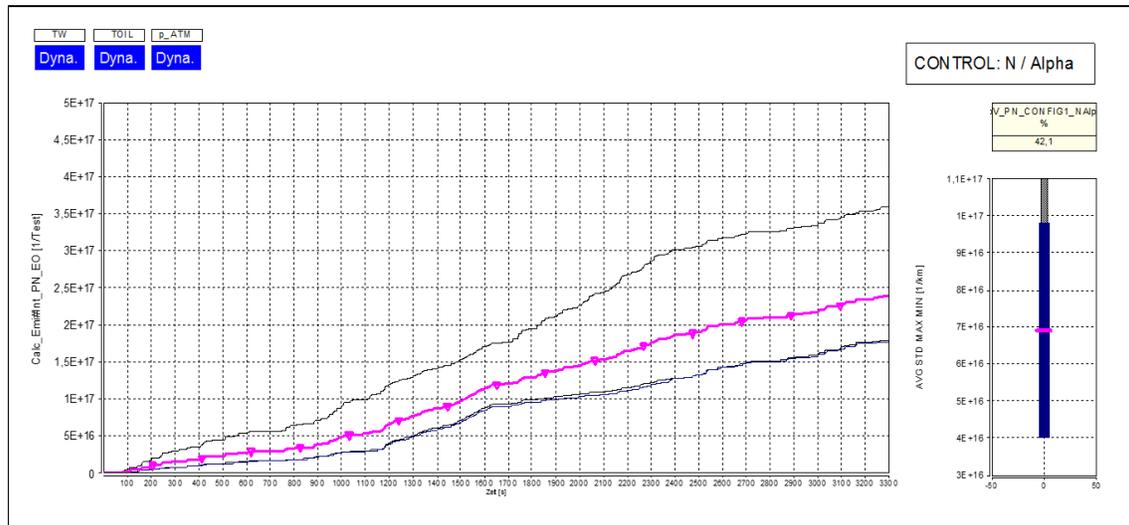


Abbildung 6-46: Wiederholbarkeit Partikelzahl; Setup: TW=Dyn.; TOil=Dyn.;
p_Atm=Dyn; Regelmod. N/ α

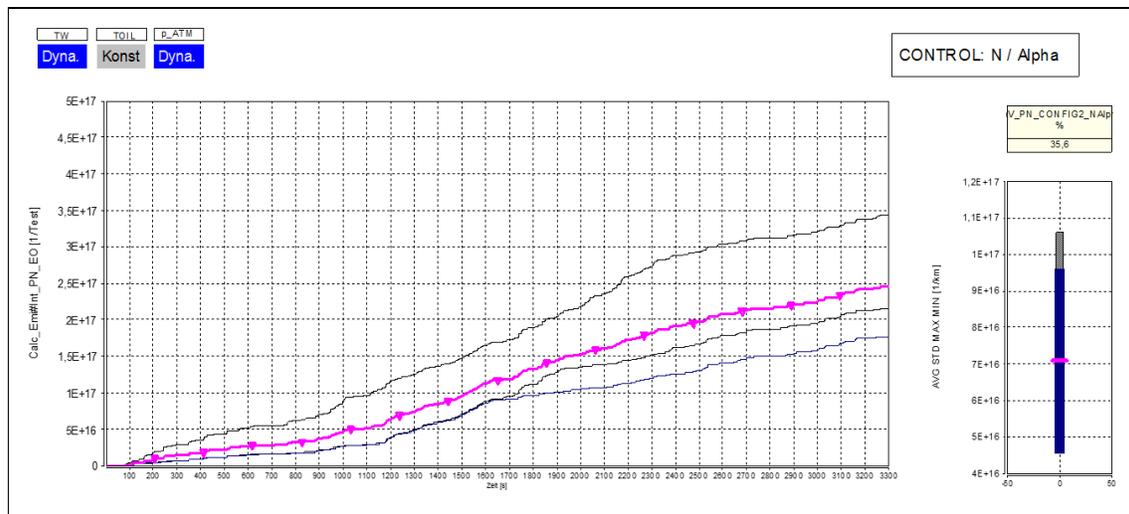


Abbildung 6-47: Wiederholbarkeit Partikelzahl; Setup: TW=Dyn.; TOil=Konst.;
p_Atm=Dyn; Regelmod. N/ α

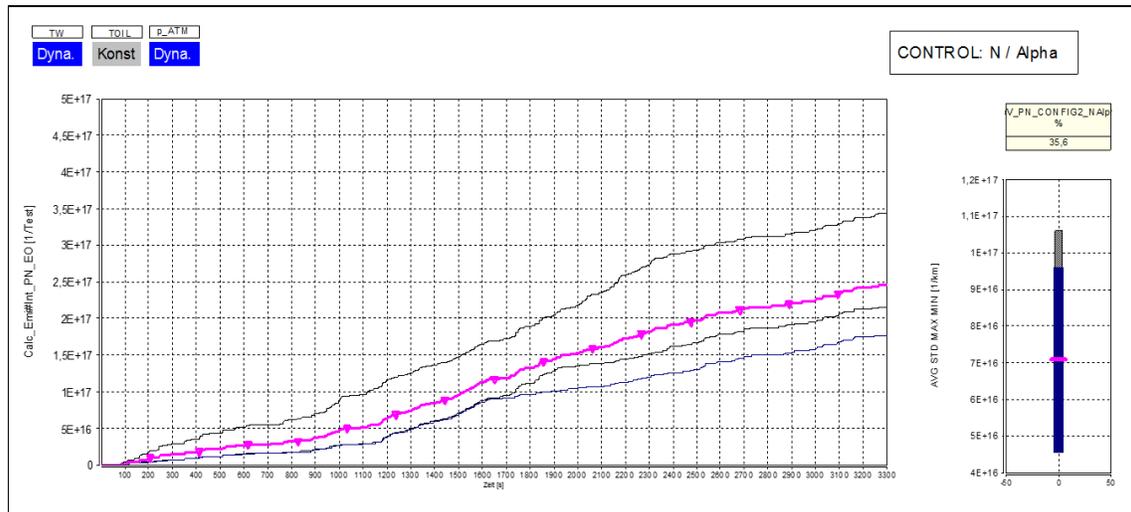


Abbildung 6-48: Wiederholbarkeit Partikelzahl; Setup: TW=Dyn.; TOil=Dyn.;
p_Atm=Dyn; Regelmod. N/α

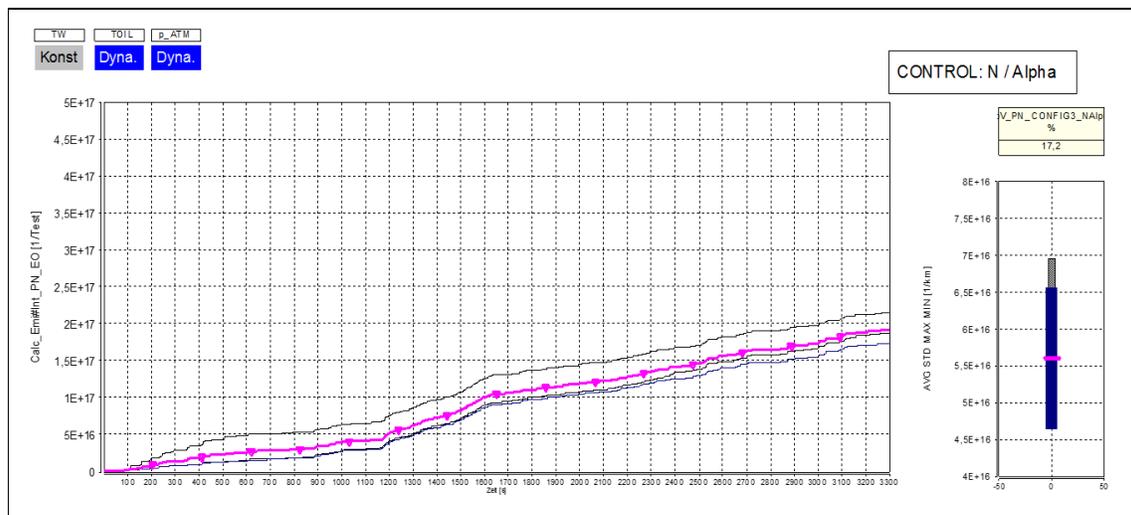


Abbildung 6-49: Wiederholbarkeit Partikelzahl; Setup: TW=Dyn.; TOil=Dyn.;
p_Atm=Dyn; Regelmod. N/α

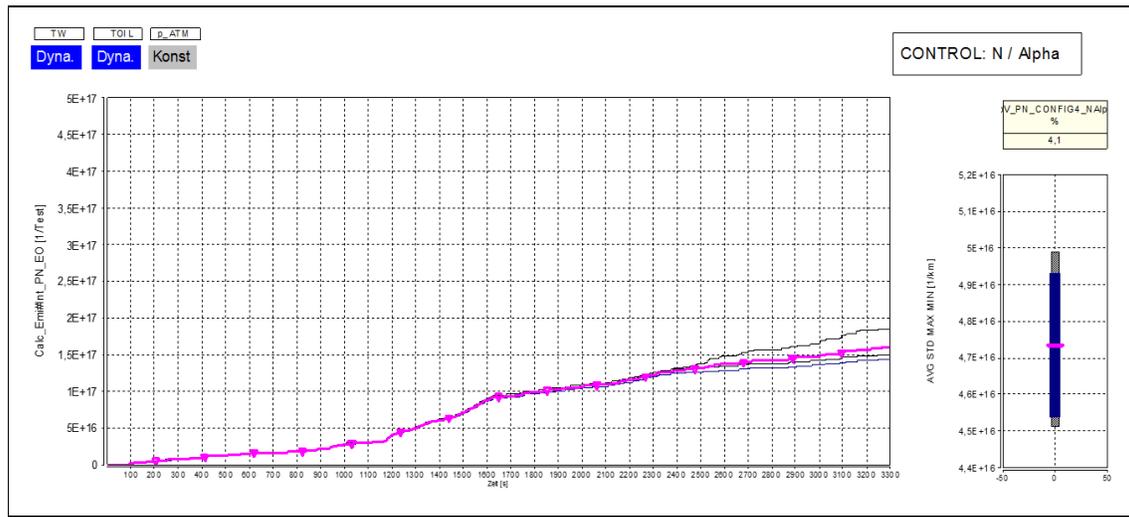


Abbildung 6-50: Reproduzierbarkeit Partikelzahl; Setup: TW=Dyn.; TOil=Dyn.;
p_Atm=Konst.; Regelmod. N/ α

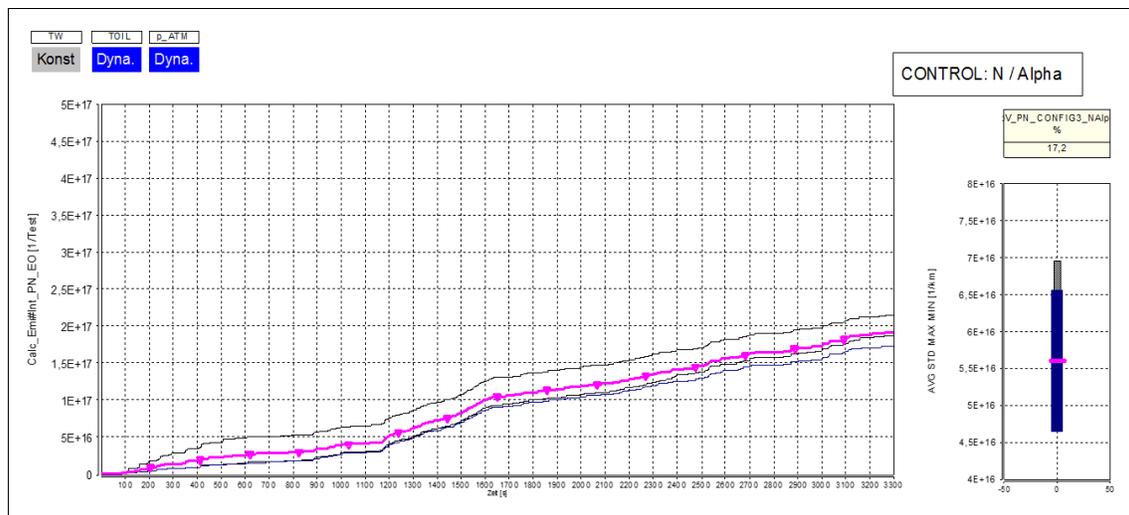


Abbildung 6-51: Wiederholbarkeit Partikelzahl; Setup: TW=Konst.; TOil=Dyn.;
p_Atm=Dyn.; Regelmod. N/ α

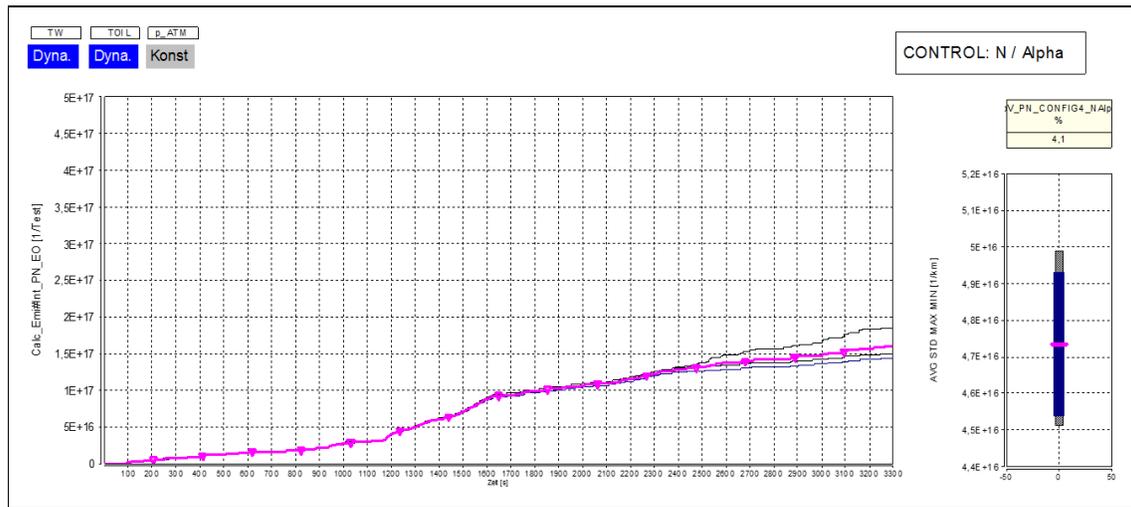


Abbildung 6-52: Wiederholbarkeit Partikelzahl; Setup: TW=Dyn.; TOil=Dyn.; p_Atm=Konst; Regelmod. N/a

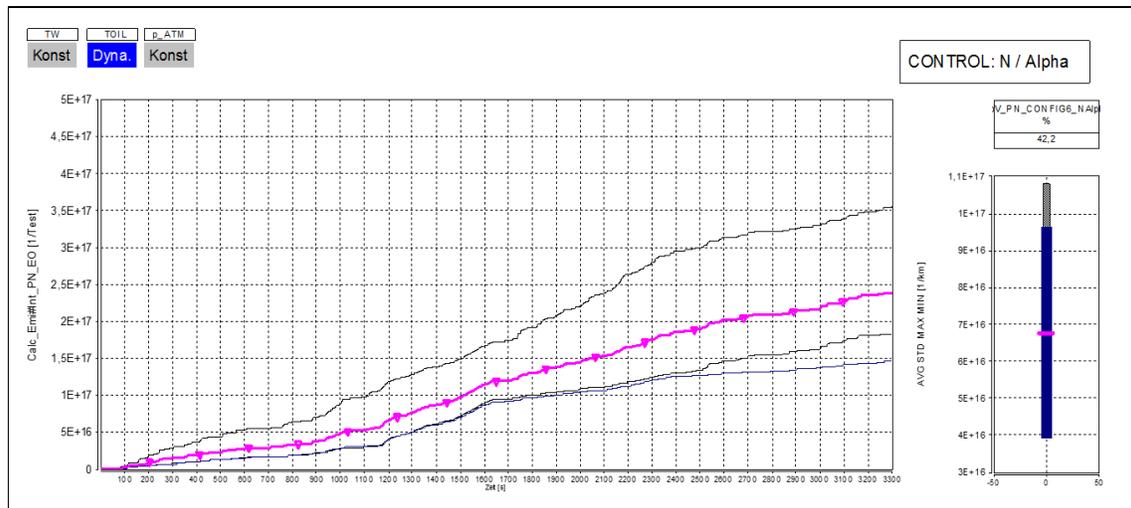


Abbildung 6-53: Wiederholbarkeit Partikelzahl; Setup: TW=Konst.; TOil=Dyn.; p_Atm=Konst; Regelmod. N/a

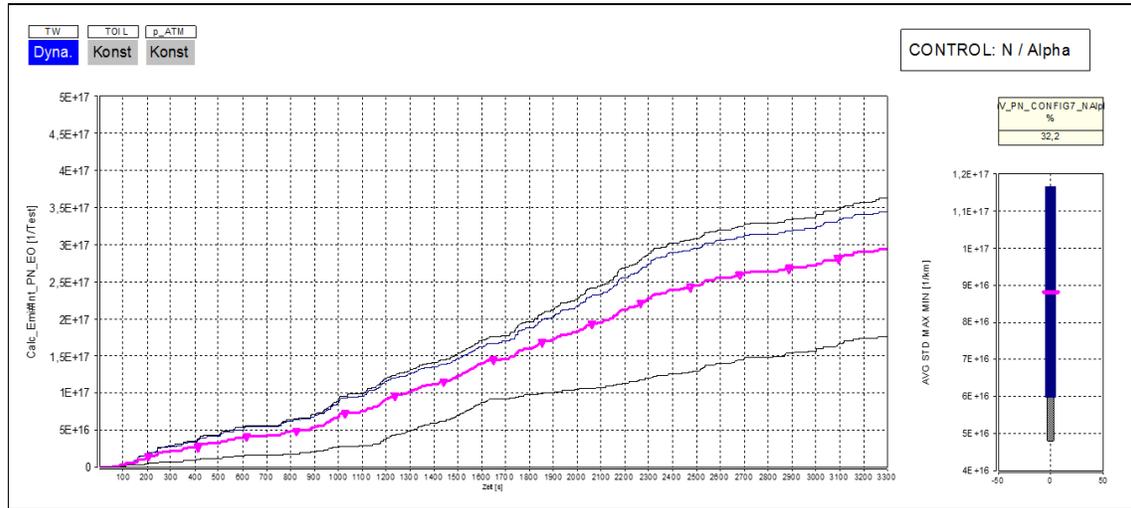


Abbildung 6-54: Wiederholbarkeit Partikelzahl; Setup: TW=Dyn.; TOil=Konst.; p_Atm=Konst.; Regelmod. N/a

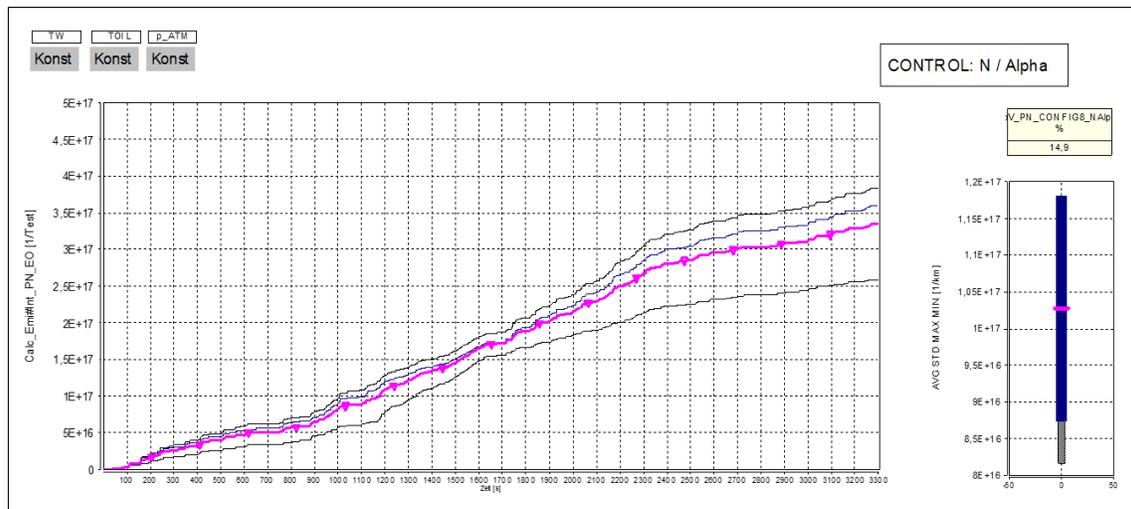


Abbildung 6-55: Wiederholbarkeit Partikelzahl; Setup: TW=Konst.; TOil=Konst.; p_Atm=Konst.; Regelmod. N/a

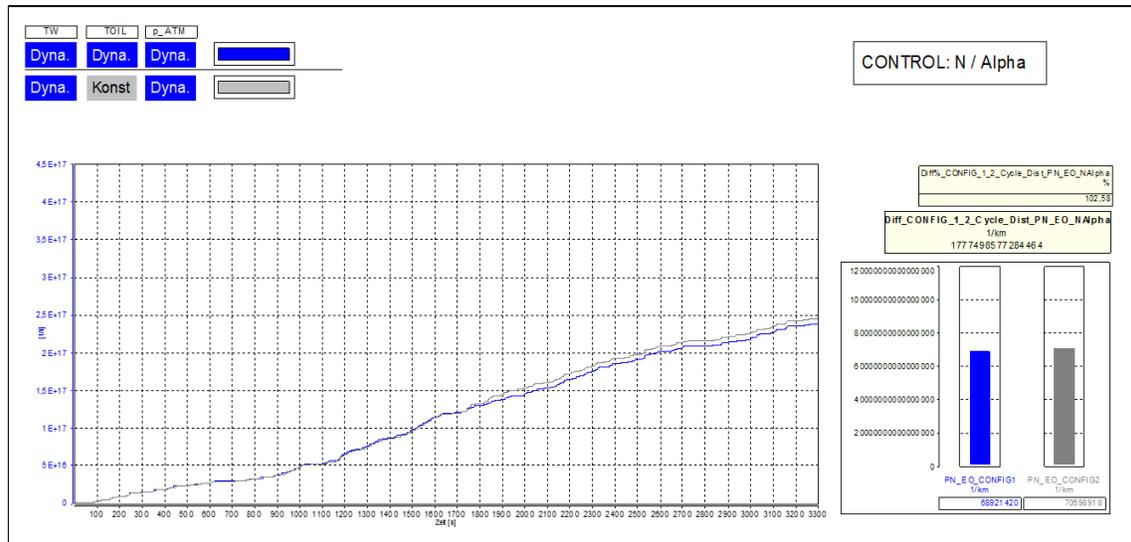


Abbildung 6-56: Abweichung Partikelanzahl; CONFIG 1 – CONFIG 2; Regelmod. N/ α

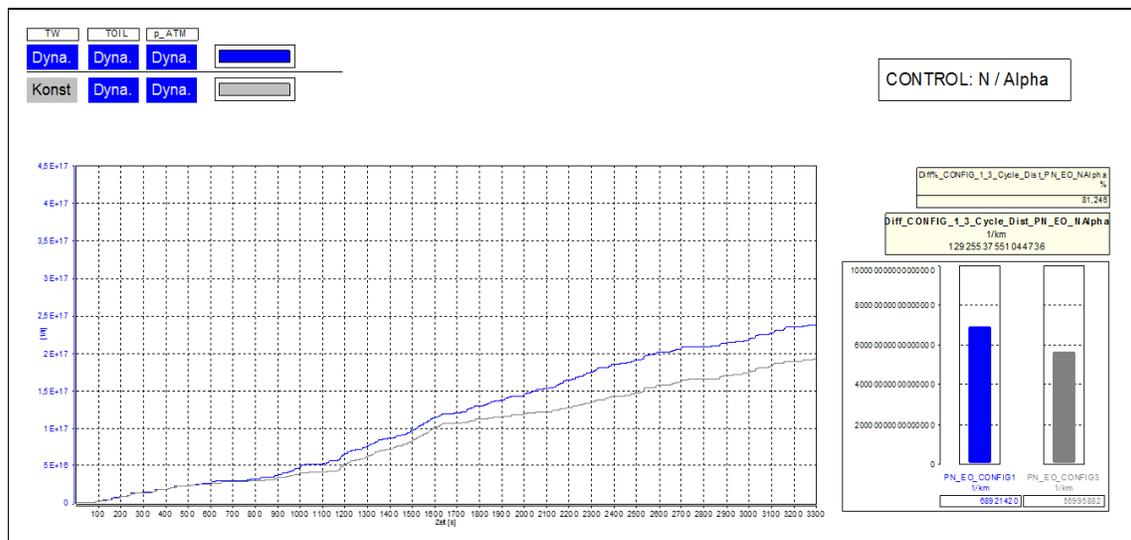


Abbildung 6-57: Abweichung Partikelanzahl; CONFIG 1 – CONFIG 3; Regelmod. N/ α

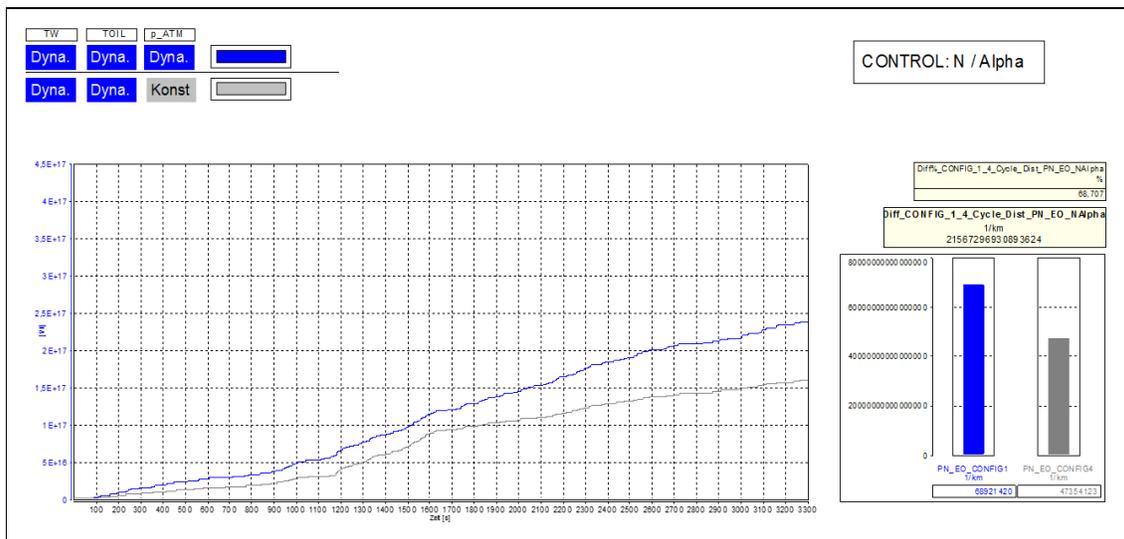


Abbildung 6-58: Abweichung Partikelanzahl; CONFIG 1 – CONFIG 4; Regelmod. N/α

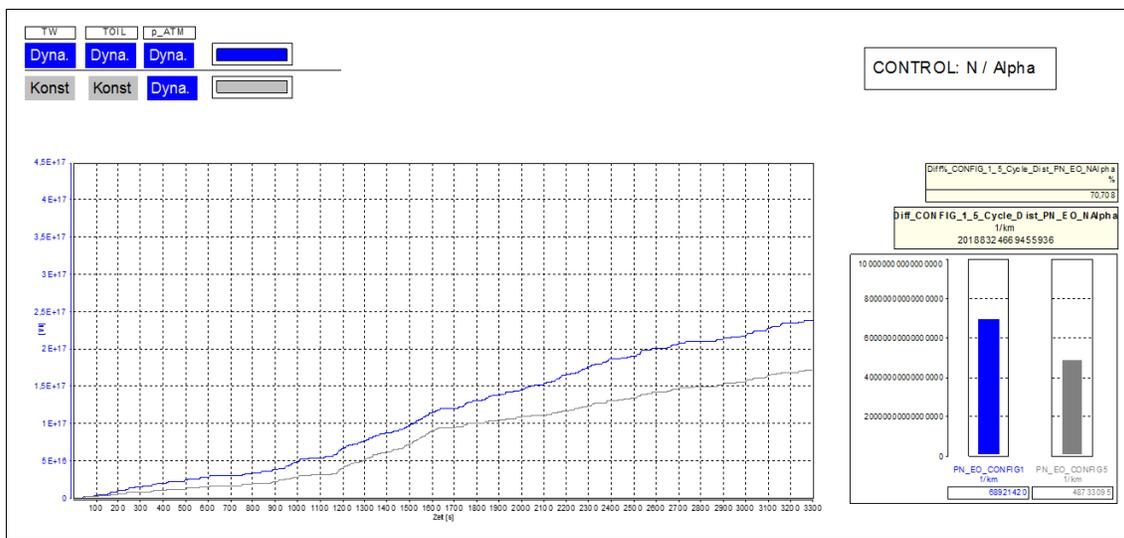


Abbildung 6-59: Abweichung Partikelanzahl; CONFIG 1 – CONFIG 5; Regelmod. N/α

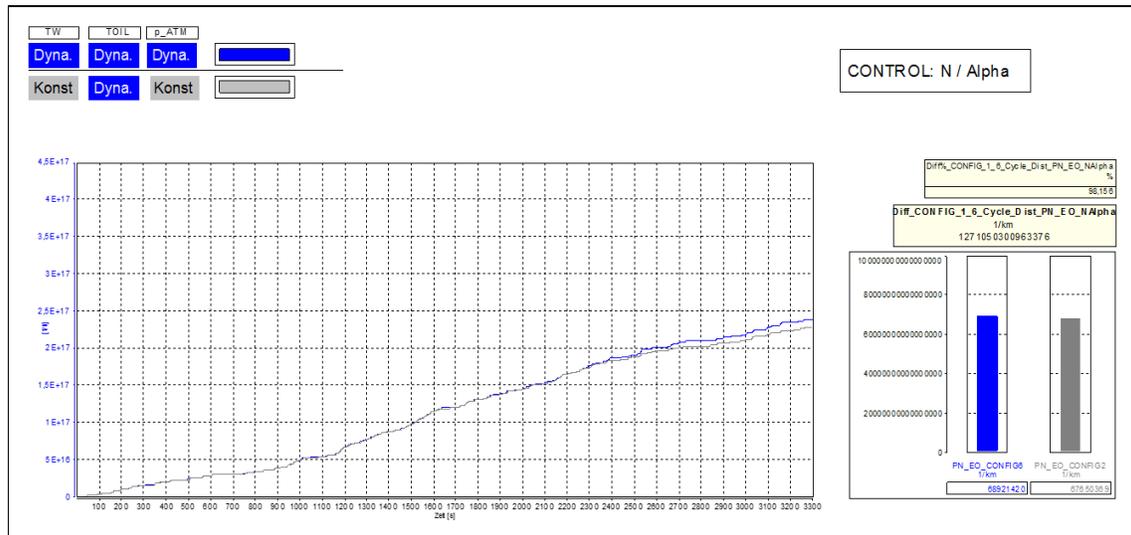


Abbildung 6-60: Abweichung Partikelanzahl; CONFIG 1 – CONFIG 6; Regelmod. N/α

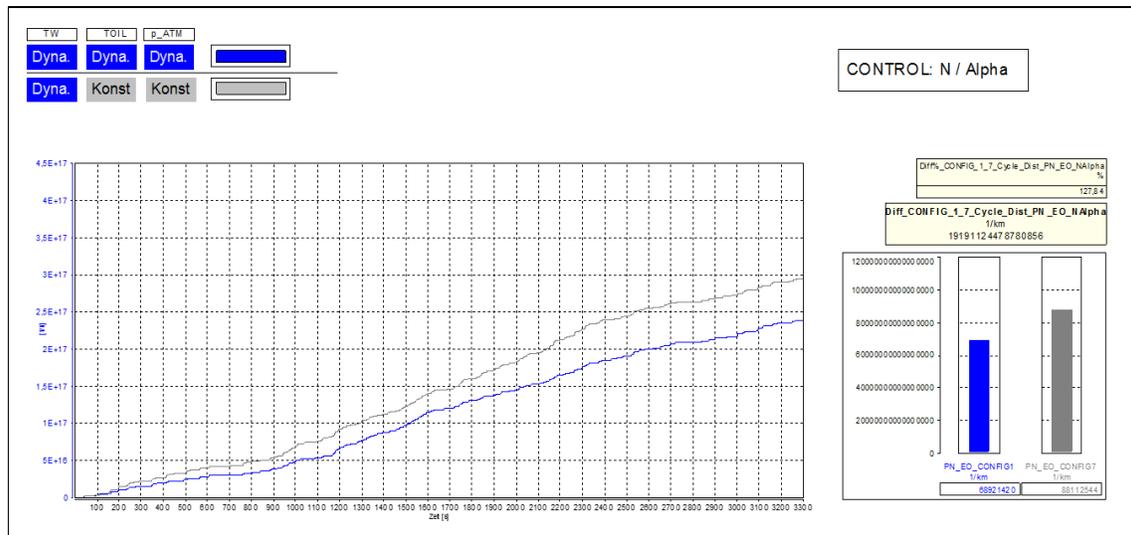


Abbildung 6-61: Abweichung Partikelanzahl; CONFIG 1 – CONFIG 7; Regelmod. N/α

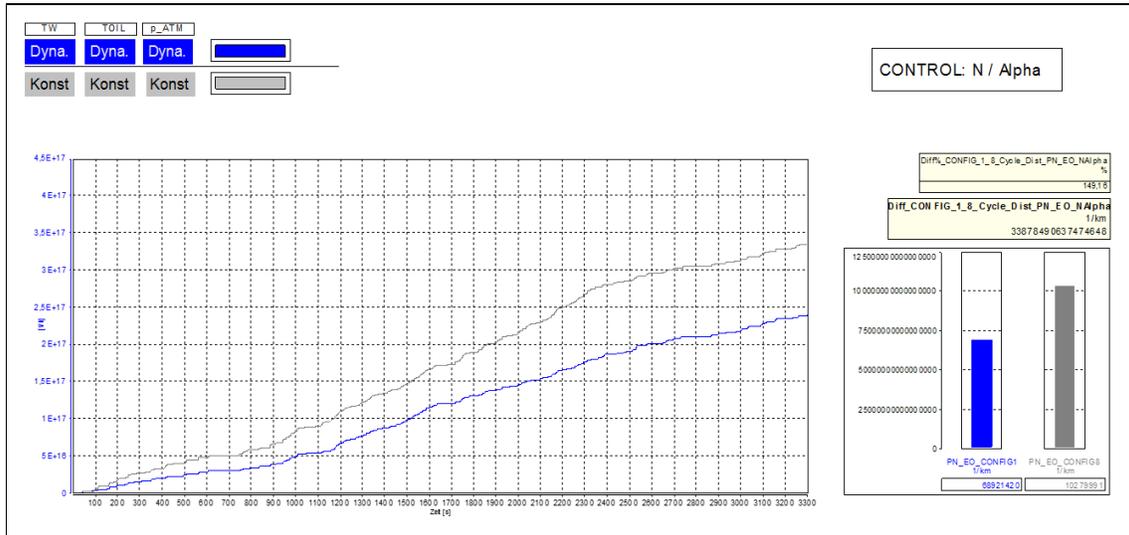


Abbildung 6-62: Abweichung Partikelanzahl; CONFIG 1 – CONFIG 8; Regelmod. N/α

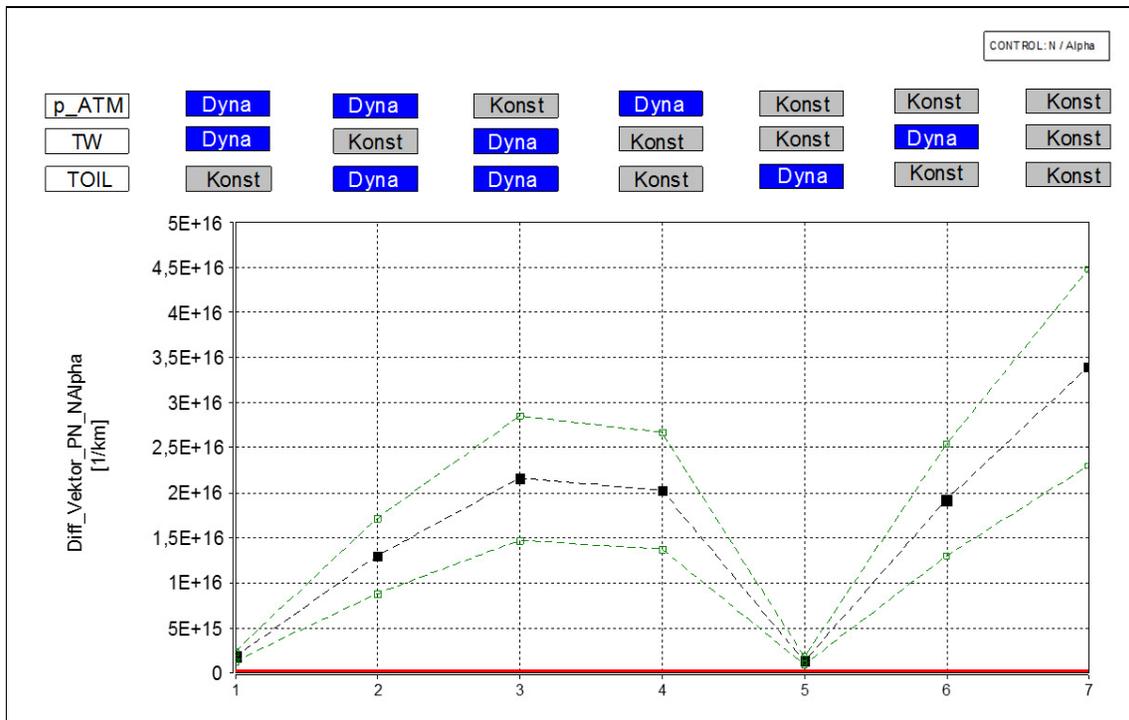


Abbildung 6-63: Übersicht Partikelanzahl. Abweichung CONFIG 1 – CONFIG 2 bis CONFIG8; Regelmod. N/α

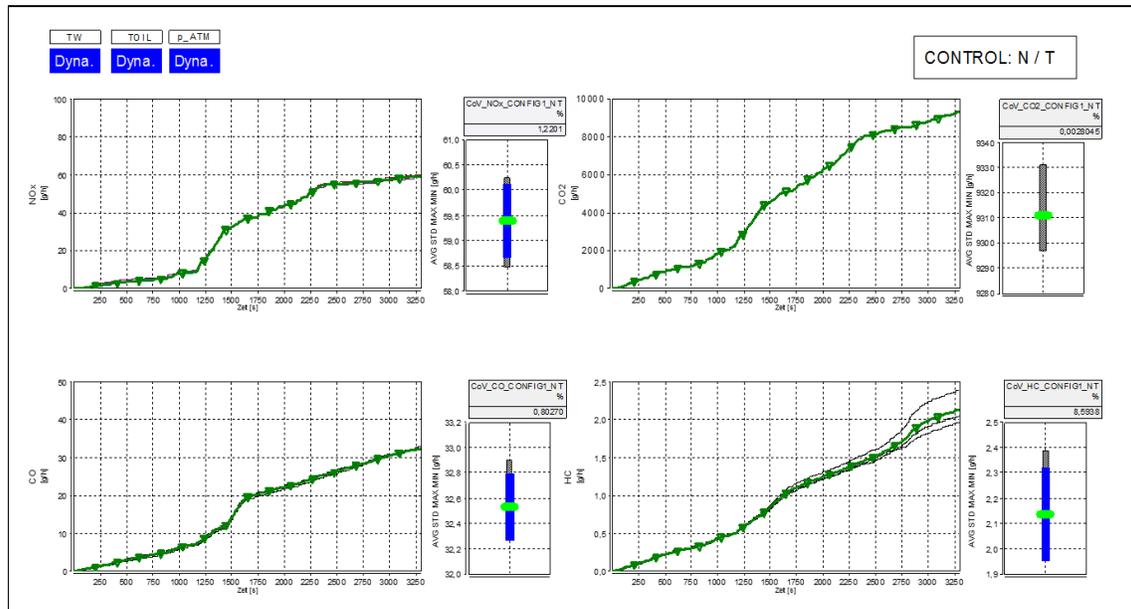


Abbildung 6-64: Wiederholbarkeit Gas. Emi.; Setup: TW=Dyn.; TOil=Dyn.; p_Atm=Dyn.; Regelmod. N/T

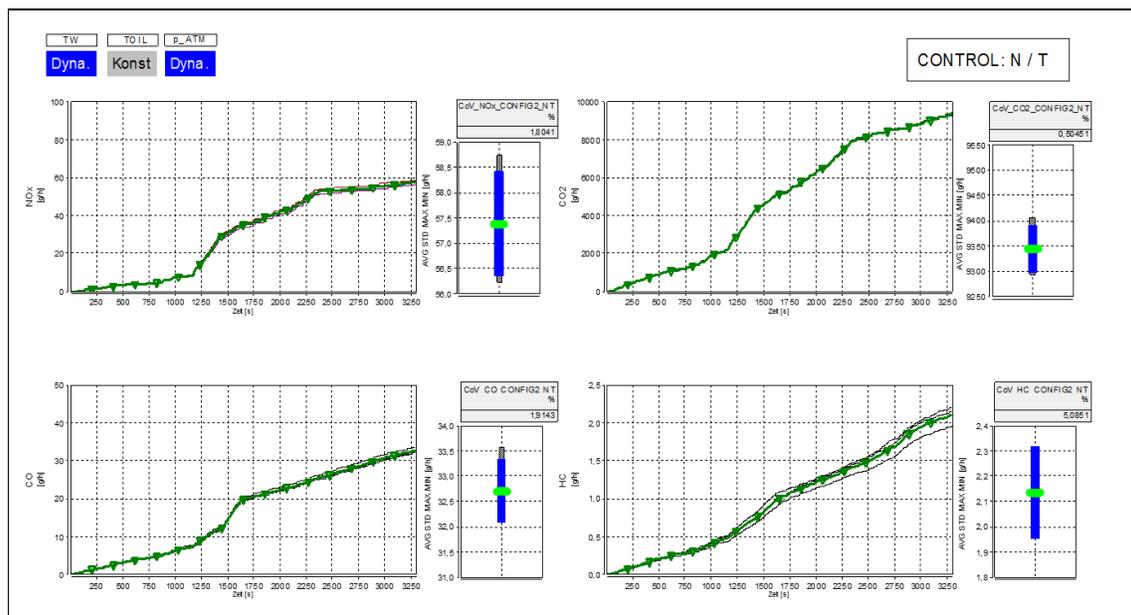


Abbildung 6-65: Wiederholbarkeit Gas. Emi.; Setup: TW=Dyn.; TOil=Konst.; p_Atm=Dyn.; Regelmod. N/T

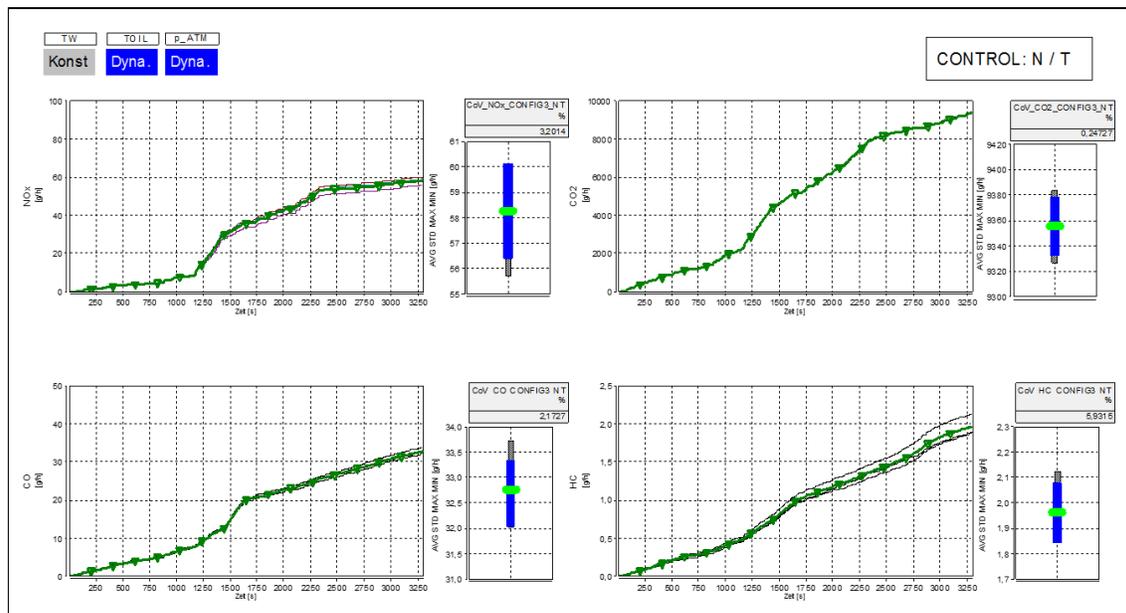


Abbildung 6-66: Wiederholbarkeit Gas. Emi.; Setup: TW=Konst.; TOil=Dyn.; p_Atm=Dyn.; Regelmod. N/T

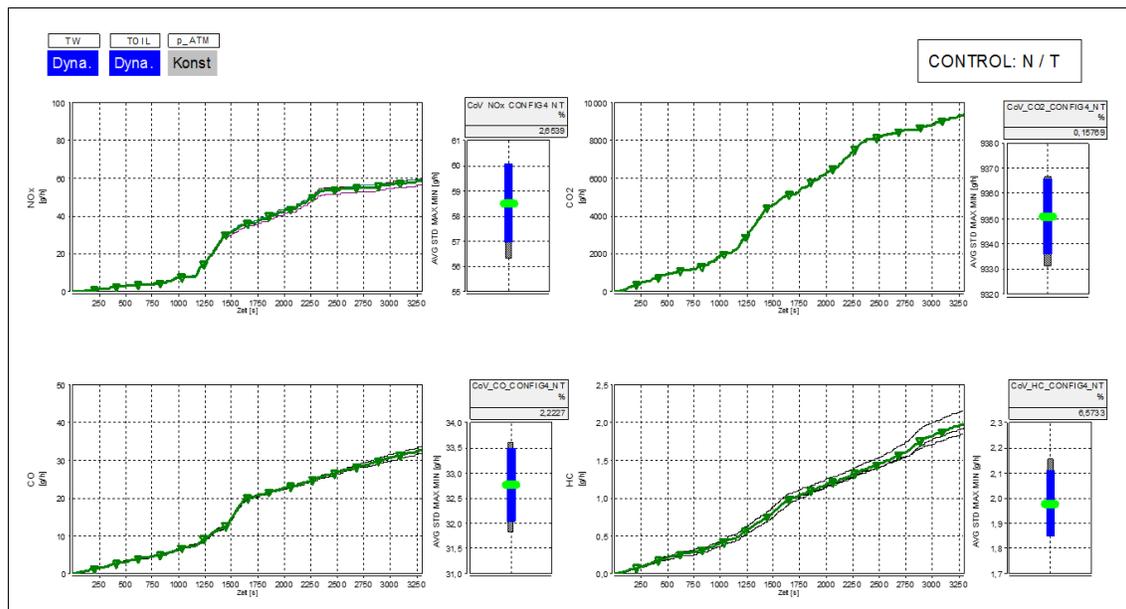


Abbildung 6-67: Wiederholbarkeit Gas. Emi.; Setup: TW=Dyn.; TOil=Dyn.; p_Atm=Konst.; Regelmod. N/T

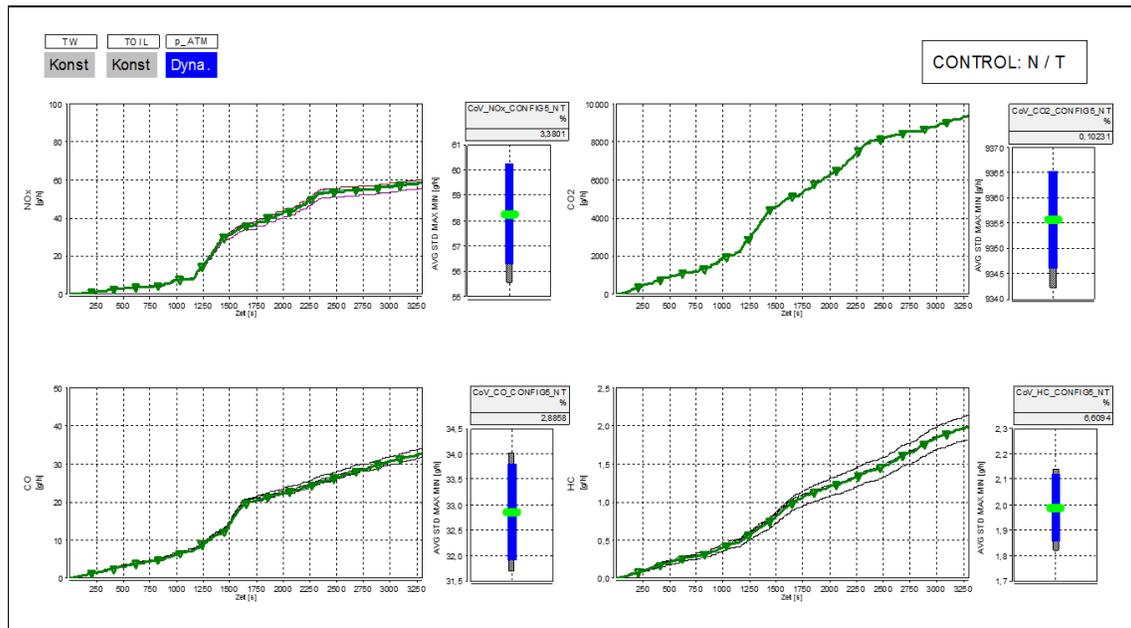


Abbildung 6-68: Wiederholbarkeit Gas. Emi.; Setup: TW=Konst.; TOil=Konst.; p_Atm=Dyn.; Regelmod. N/T

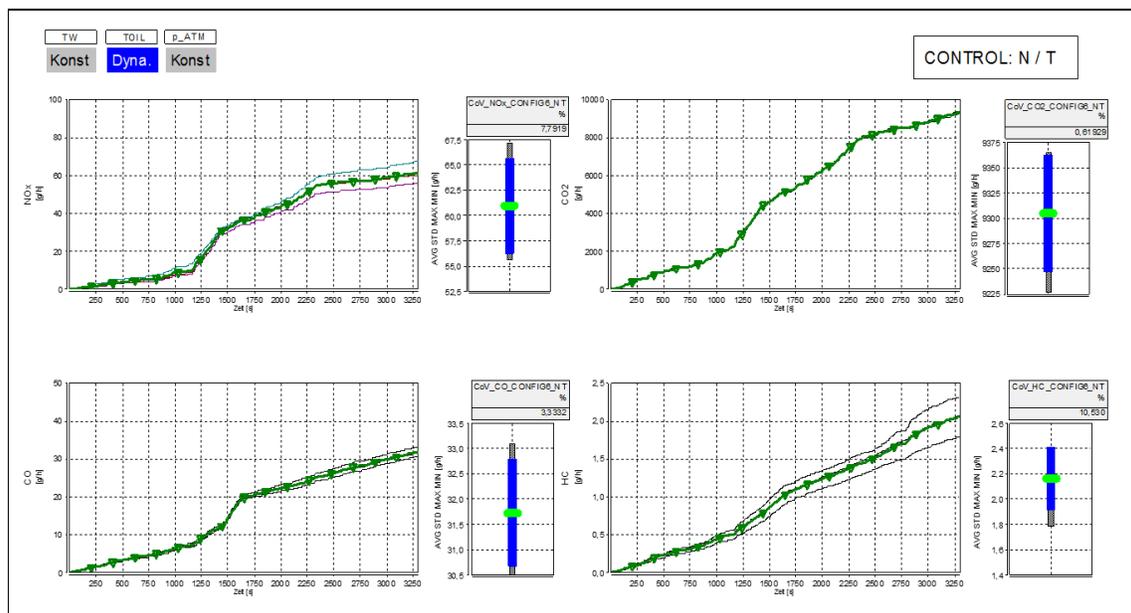


Abbildung 6-69: Wiederholbarkeit Gas. Emi.; Setup: TW=Konst.; TOil=Dyn.; p_Atm=Konst.; Regelmod. N/T

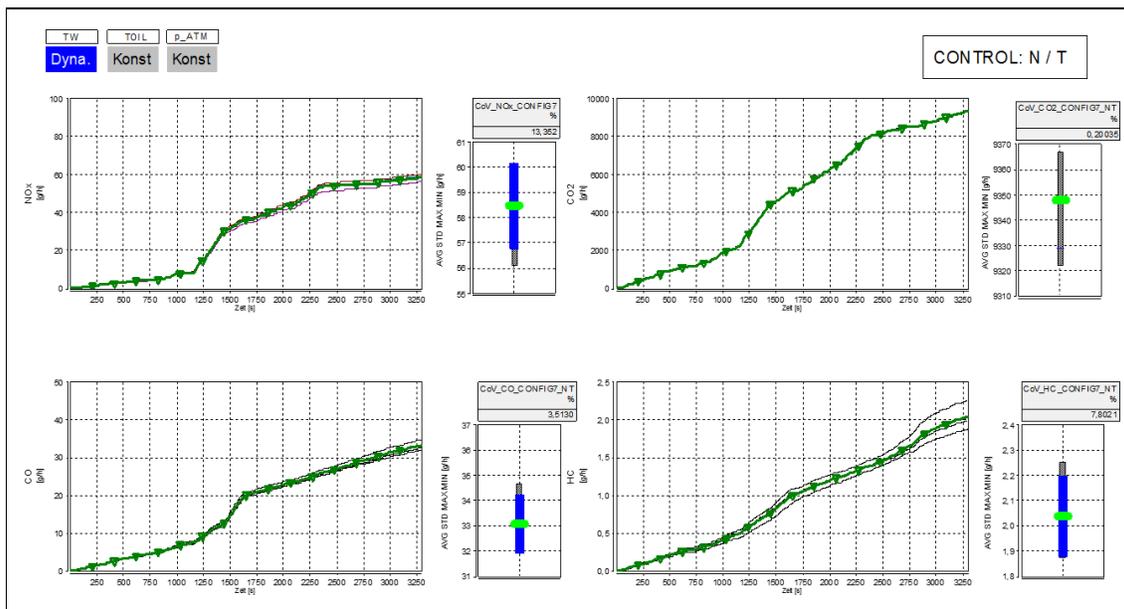


Abbildung 6-70: Wiederholbarkeit Gas. Emi.; Setup: TW=Dyn.; TOil=Konst.; p_Atm=Konst.; Regelmod. N/T

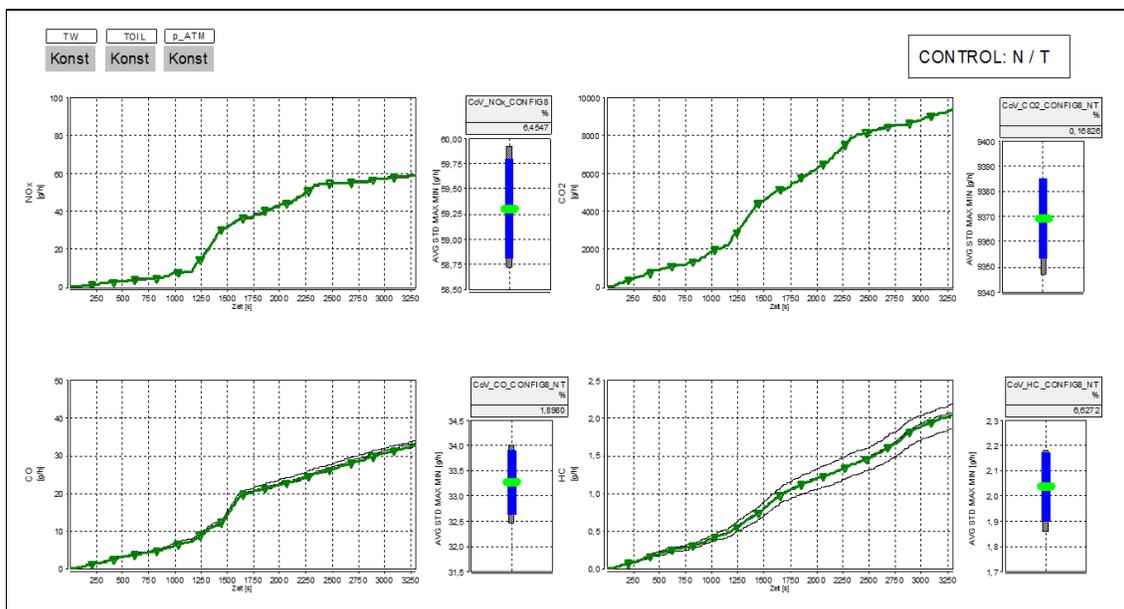


Abbildung 6-71: Wiederholbarkeit Gas. Emi.; Setup: TW=Konst.; TOil=Konst.; p_Atm=Konst.; Regelmod. N/T

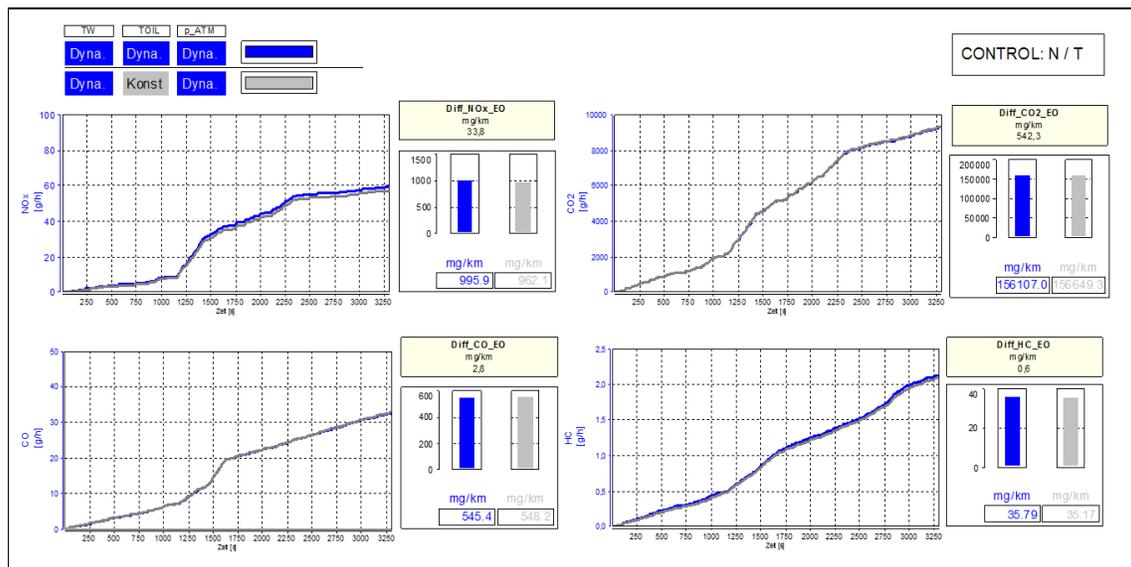


Abbildung 6-72: Abweichung Gas. Emi. CONFIG 1 – CONFIG 2; Regelmod. N/T

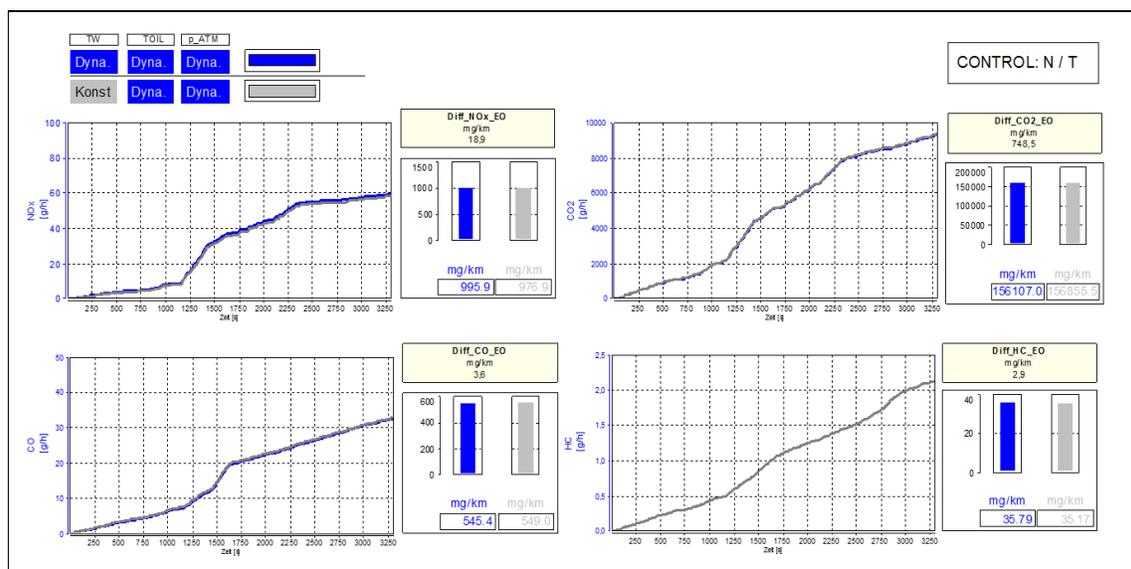


Abbildung 6-73: Abweichung Gas. Emi. CONFIG 1 – CONFIG 3; Regelmod. N/T

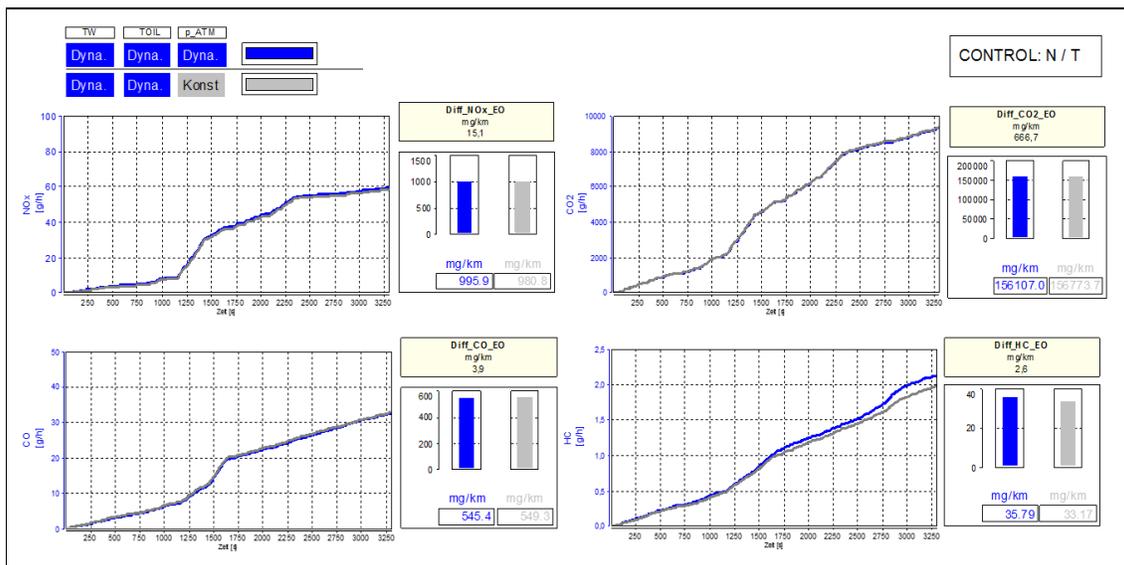


Abbildung 6-74: Abweichung Gas. Emi. CONFIG 1 – CONFIG 4; Regelmod. N/T

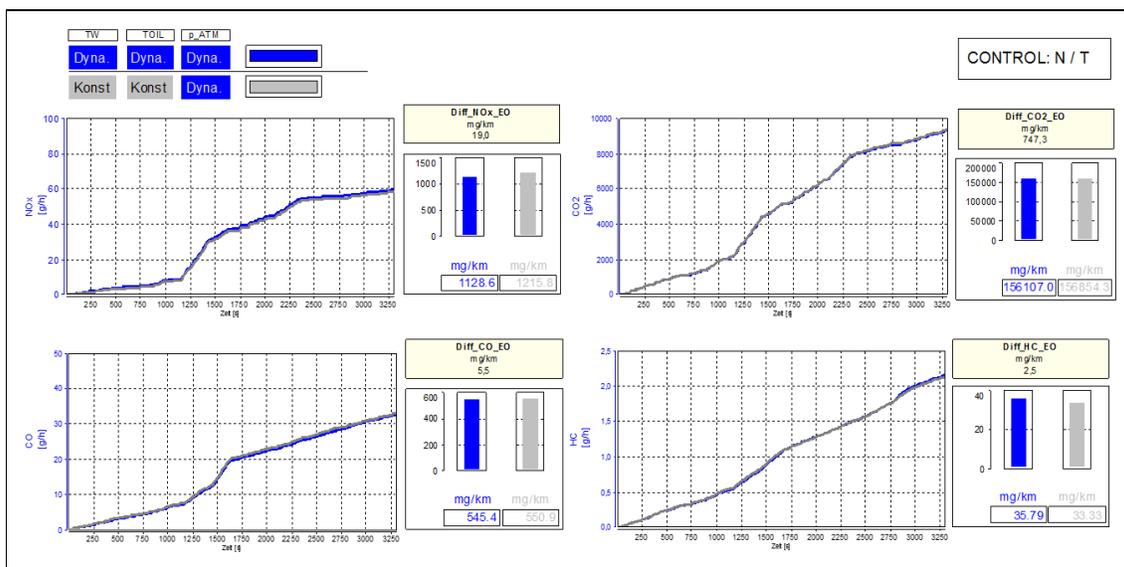


Abbildung 6-75: Abweichung Gas. Emi. CONFIG 1 – CONFIG 5; Regelmod. N/T

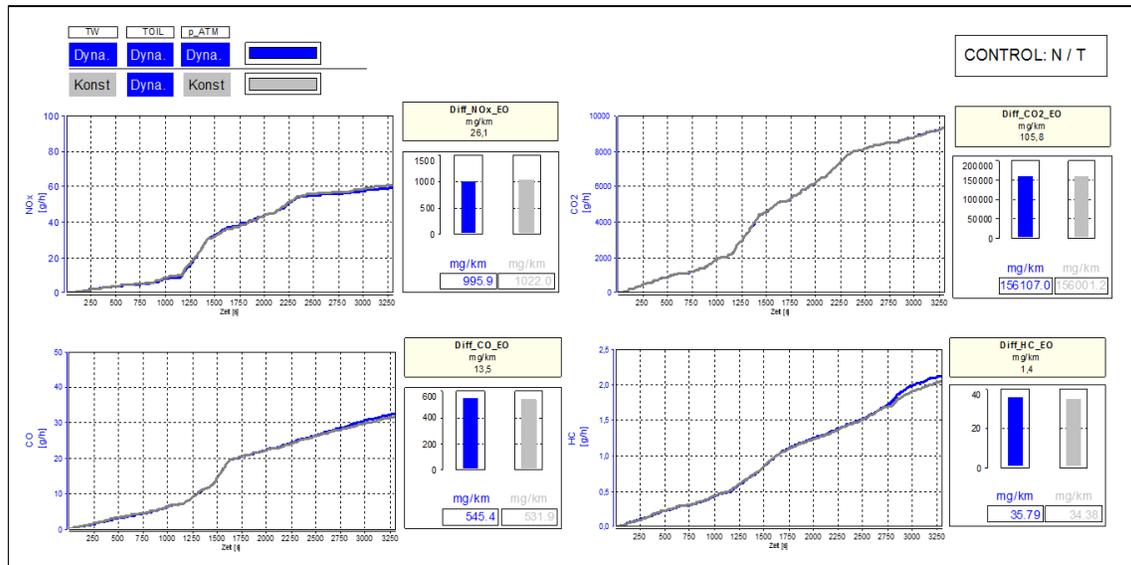


Abbildung 6-76: Abweichung Gas. Emi. CONFIG 1 – CONFIG 6; Regelmod. N/T

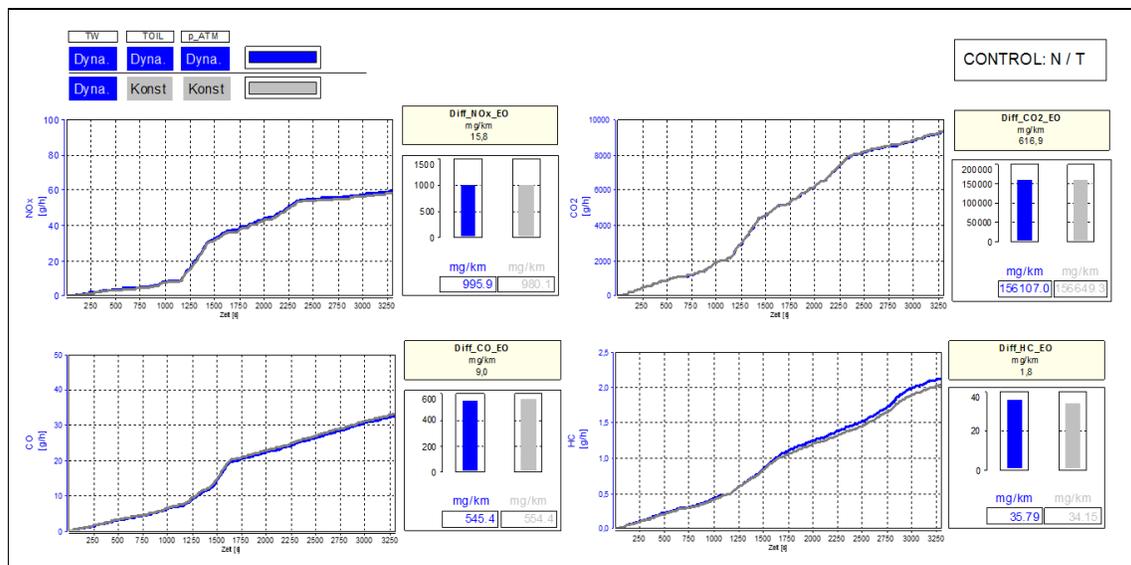


Abbildung 6-77: Abweichung Gas. Emi. CONFIG 1 – CONFIG 7; Regelmod. N/T

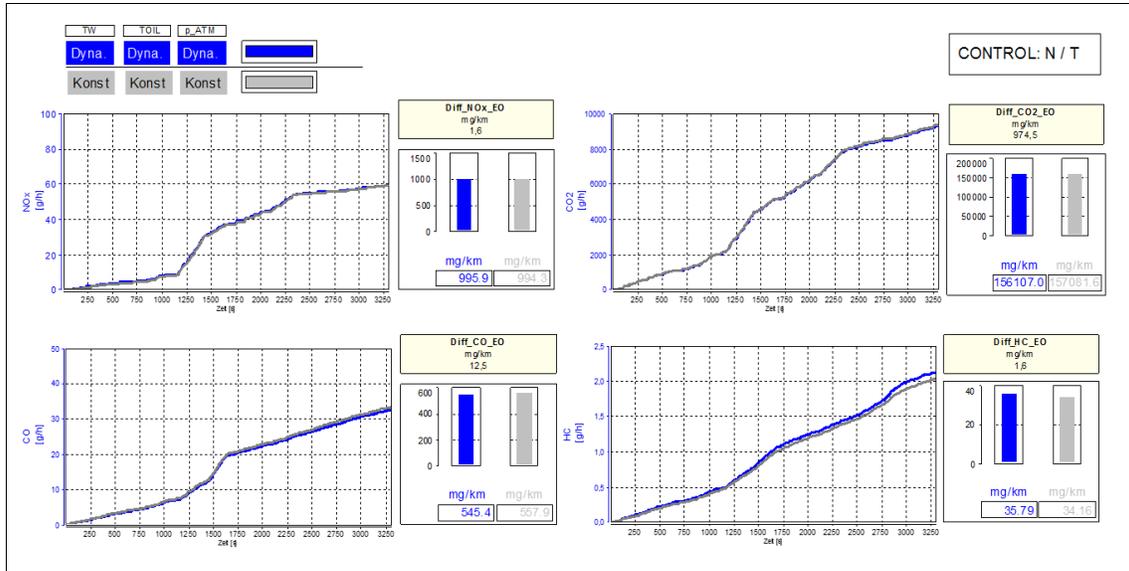


Abbildung 6-78: Abweichung Gas. Emi. CONFIG 1 – CONFIG 8; Regelmod. N/T

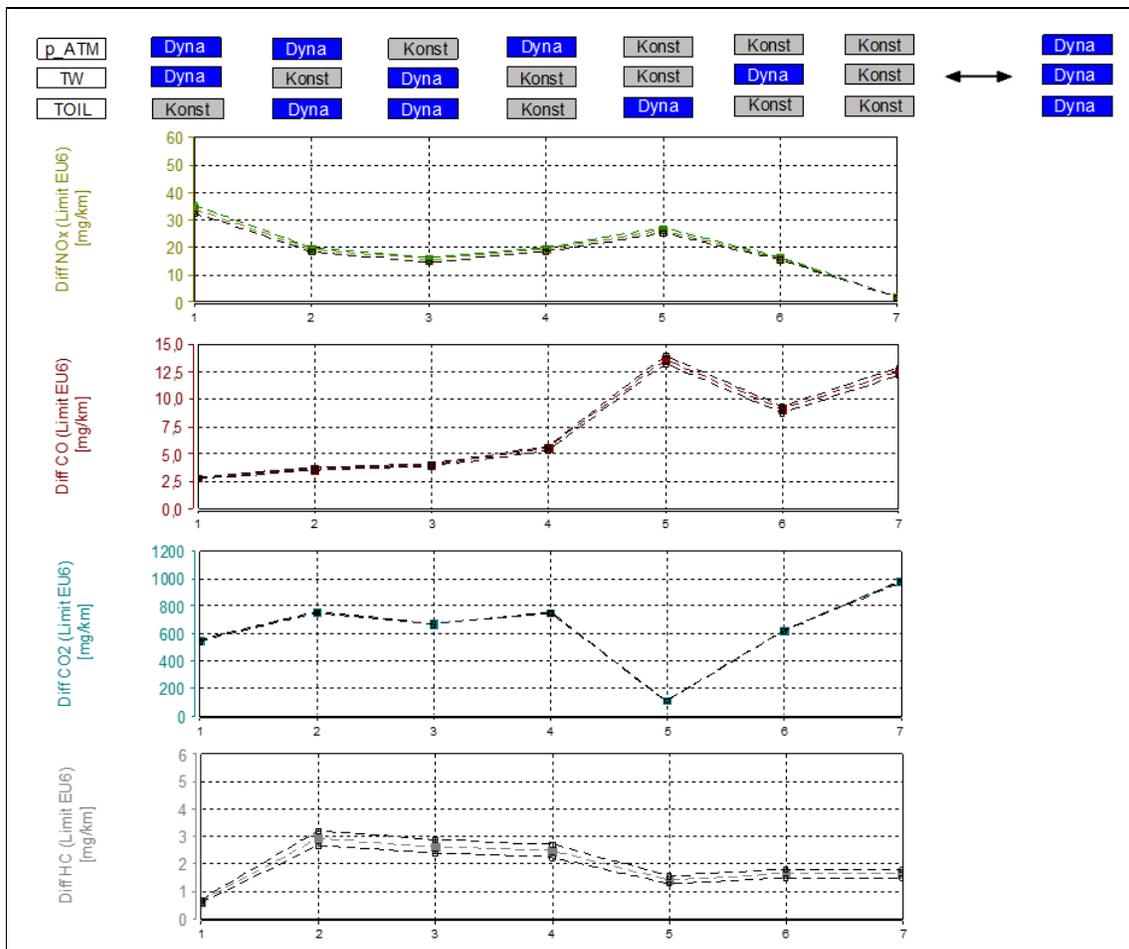


Abbildung 6-79: Übersicht Gas. Emi. Abweichung CONFIG 1 – CONFIG 2 bis CONFIG 8; Regelmod. N/T

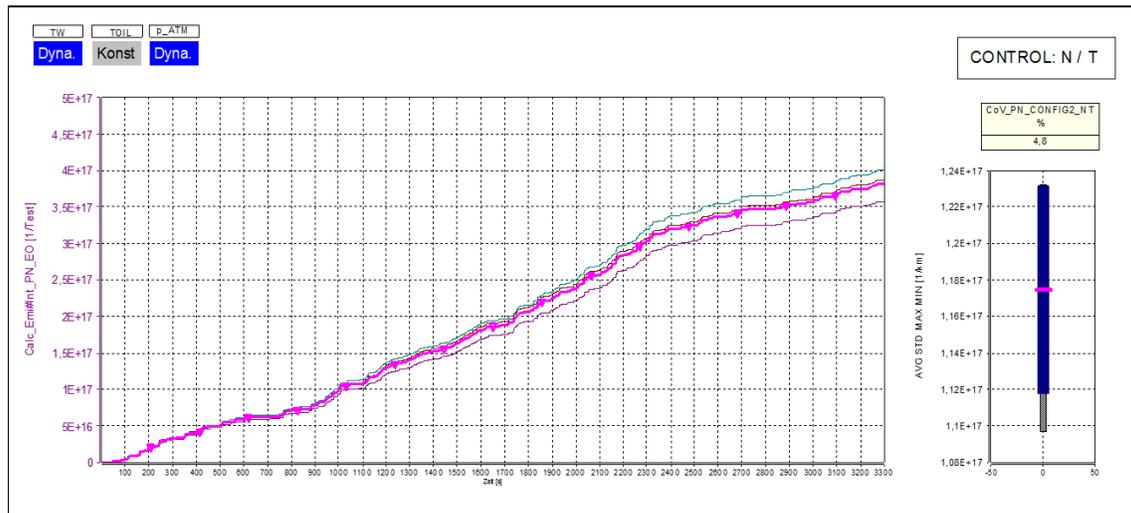


Abbildung 6-80: Wiederholbarkeit Partikelzahl; Setup: TW=Dyn.; TOil=Konst.; p_Atm=Dyn.; Regelmod. N/T

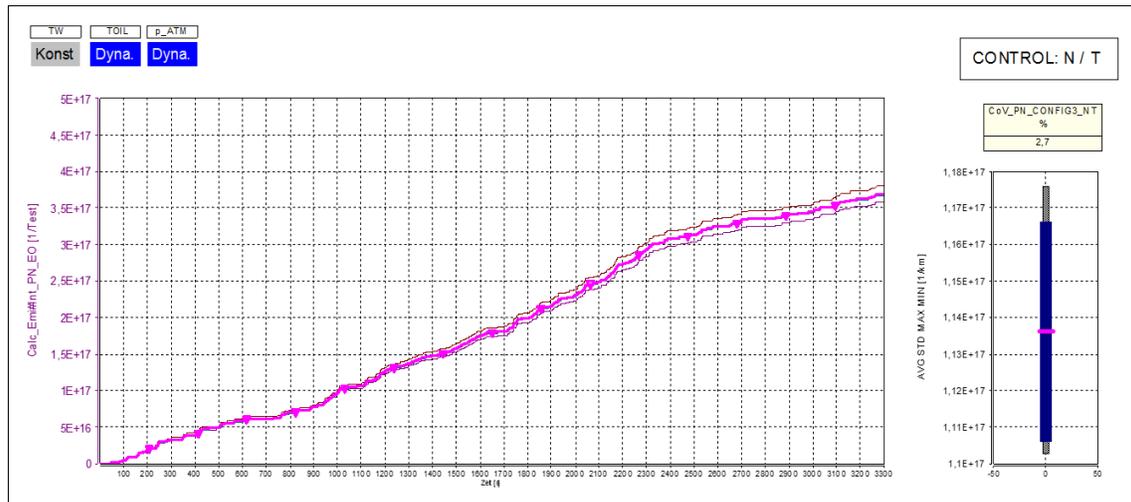


Abbildung 6-81: Wiederholbarkeit Partikelzahl; Setup: TW=Konst.; TOil=Dyn.; p_Atm=Konst.; Regelmod. N/T

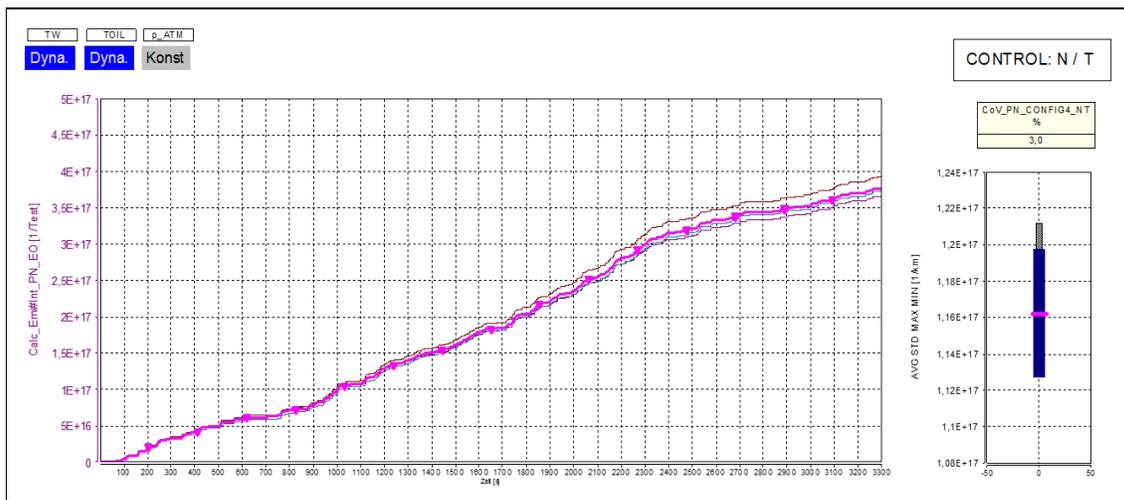


Abbildung 6-82: Wiederholbarkeit Partikelzahl; Setup: TW=Dyn.; TOil=Dyn.; p_Atm=Konst.; Regelmod. N/T

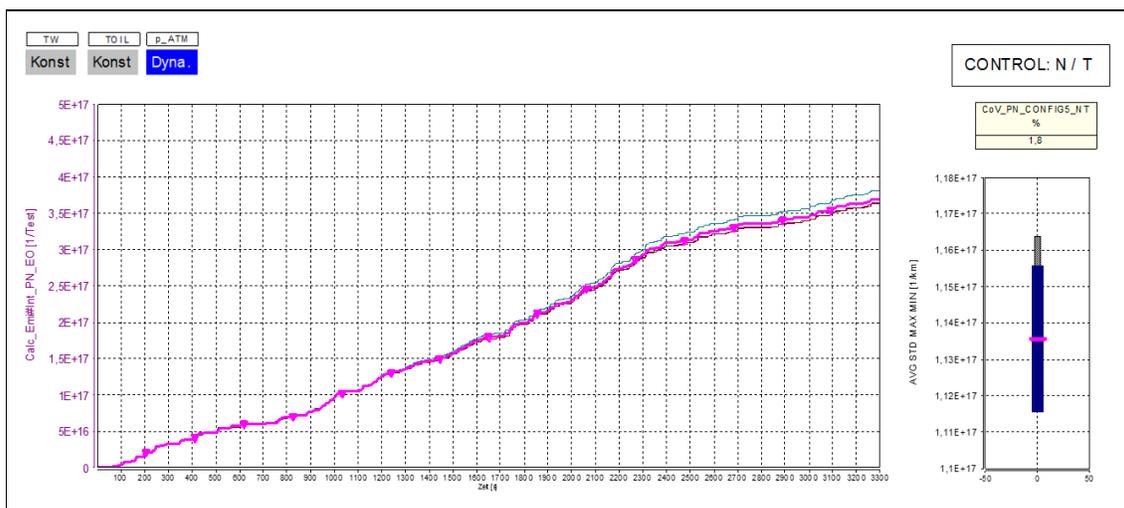


Abbildung 6-83: Wiederholbarkeit Partikelzahl; Setup: TW=Konst.; TOil=Konst.; p_Atm=Dyn.; Regelmod. N/T

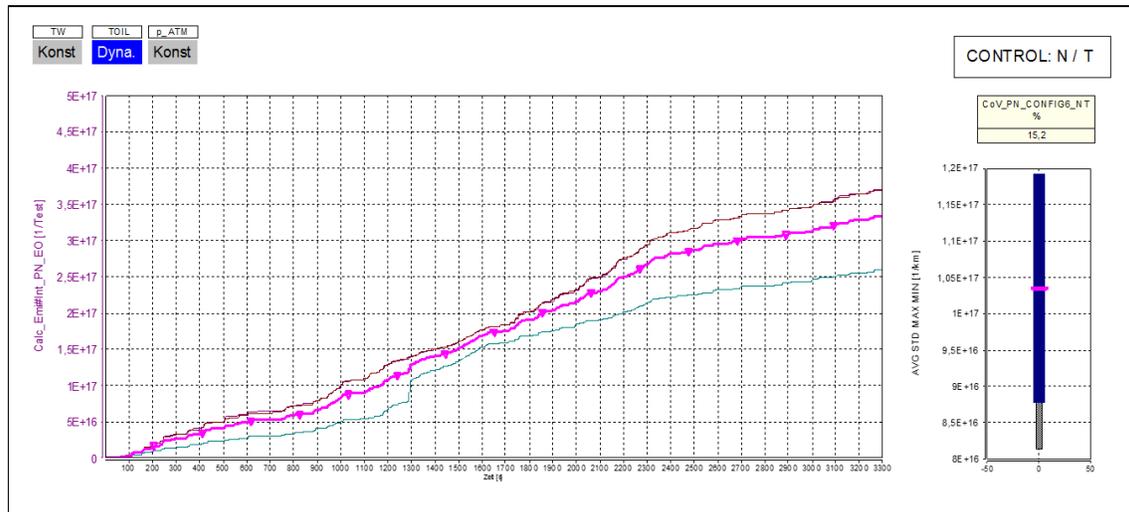


Abbildung 6-84: Wiederholbarkeit Partikelzahl; Setup: TW=Konst.; TOil=Dyn.;
p_Atm=Konst.; Regelmod. N/T

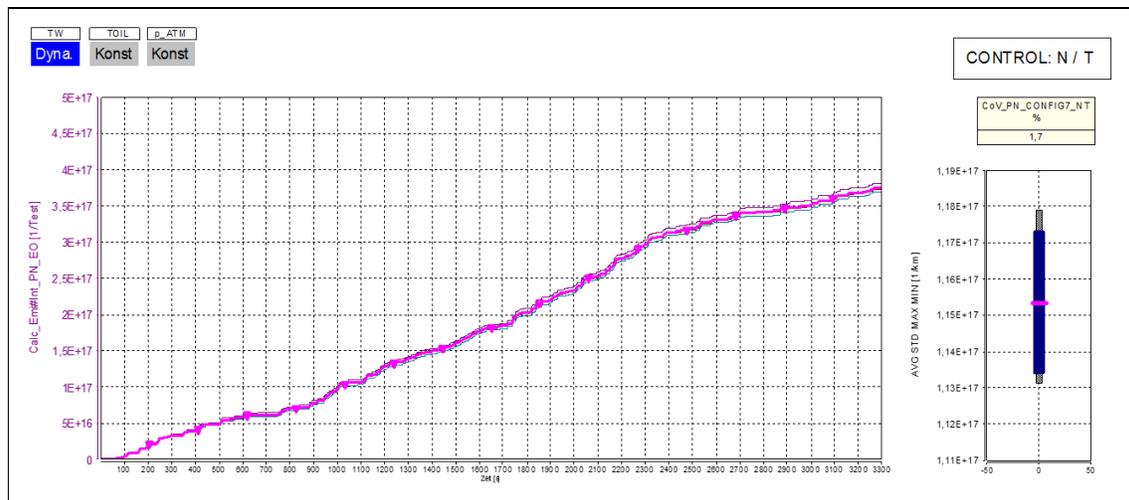


Abbildung 6-85: Wiederholbarkeit Partikelzahl; Setup: TW=Dyn.; TOil=Konst.;
p_Atm=Konst.; Regelmod. N/T

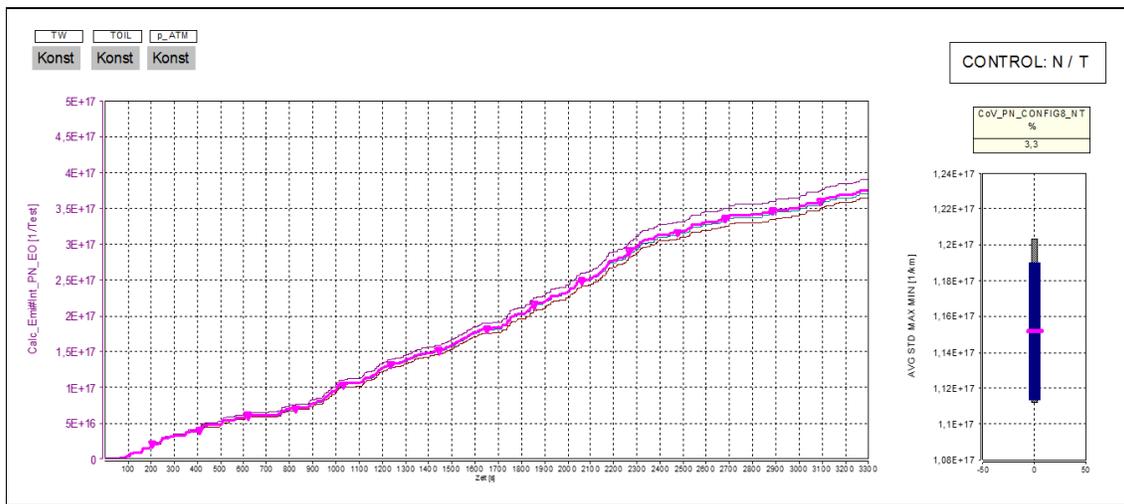


Abbildung 6-86: Wiederholbarkeit Partikelzahl; Setup: TW=Konst.; TOil=Konst.; p_Atm=Konst.; Regelmod. N/T

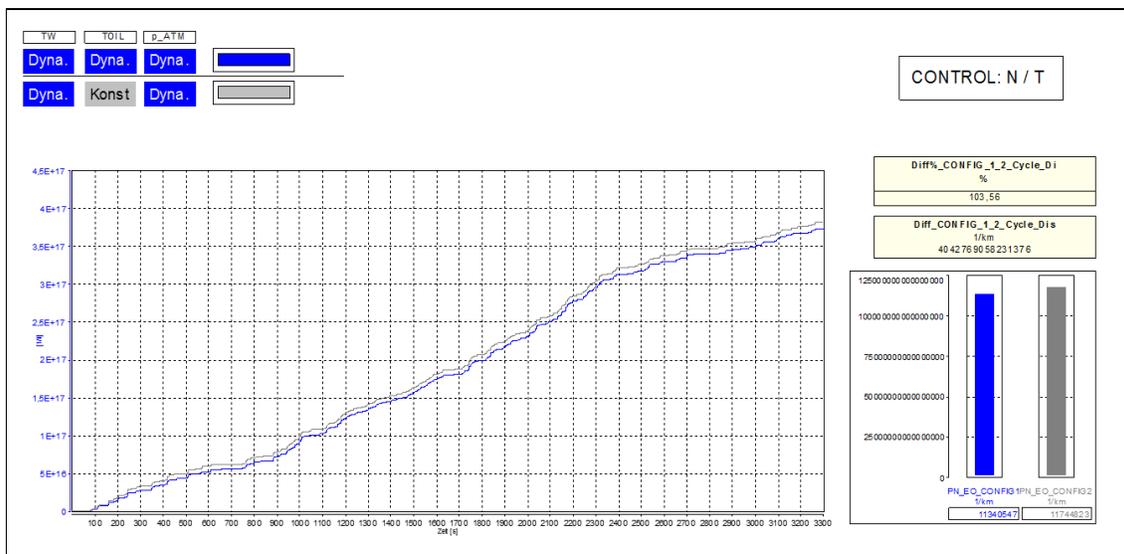


Abbildung 6-87: Abweichung Partikelanzahl; CONFIG 1 – CONFIG 2; Regelmod. N/T

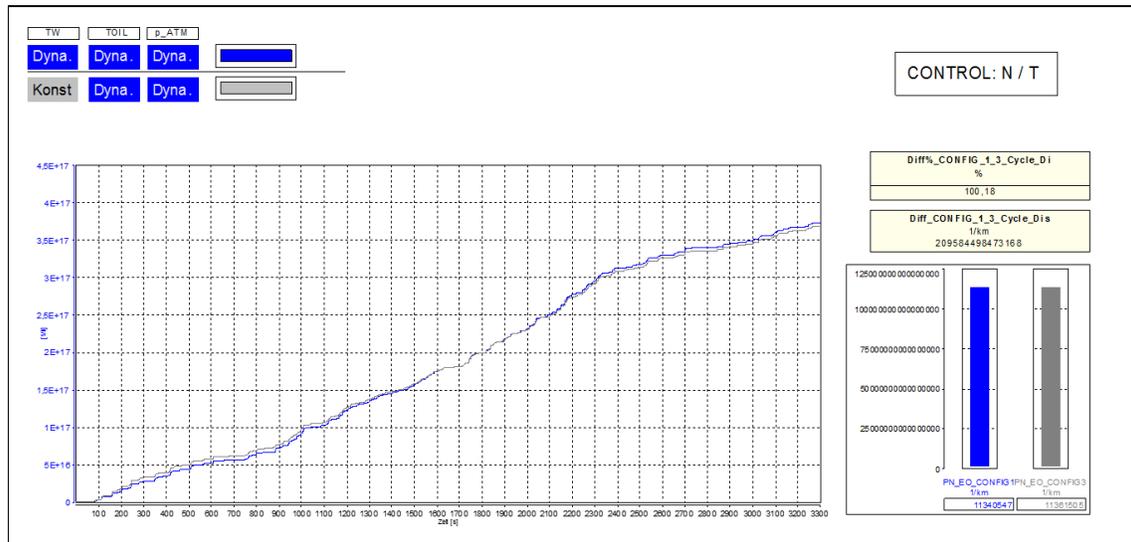


Abbildung 6-88: Abweichung Partikelanzahl; CONFIG 1 – CONFIG 3; Regelmod. N/T

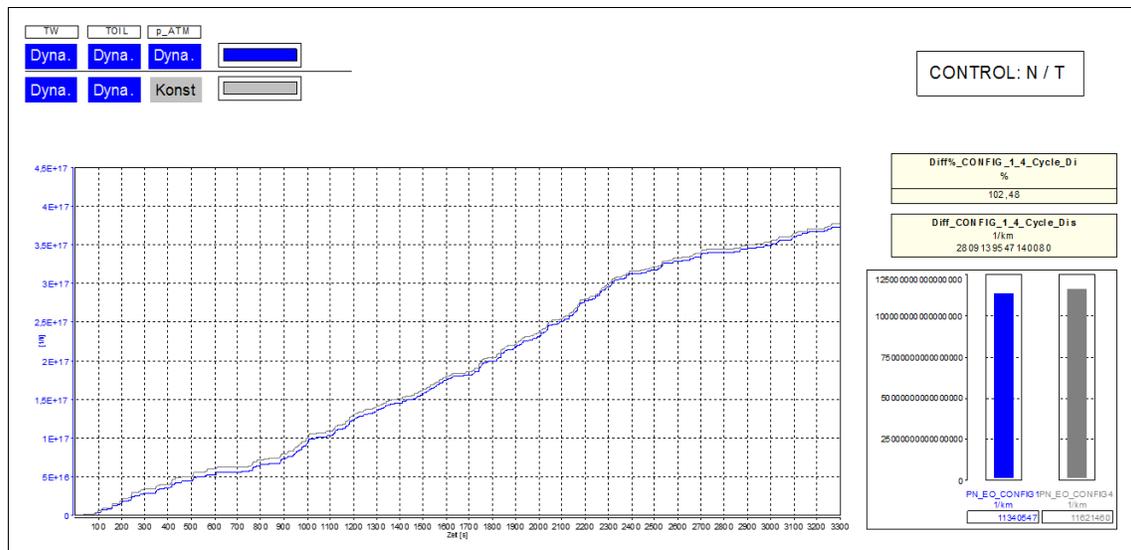


Abbildung 6-89: Abweichung Partikelanzahl; CONFIG 1 – CONFIG 4; Regelmod. N/T

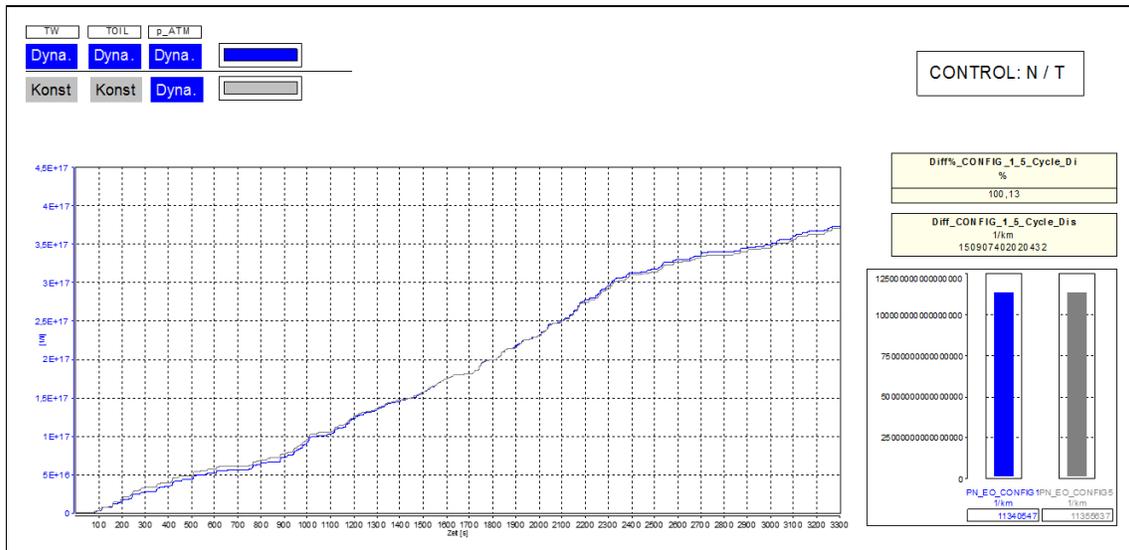


Abbildung 6-90: Abweichung Partikelanzahl; CONFIG 1 – CONFIG 5; Regelmod. N/T

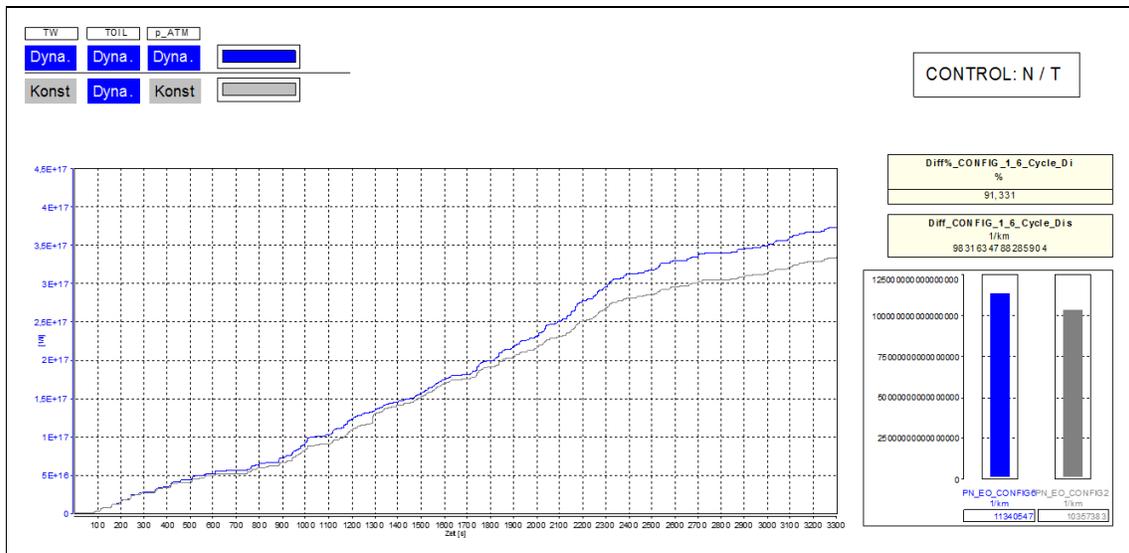


Abbildung 6-91: Abweichung Partikelanzahl; CONFIG 1 – CONFIG 6; Regelmod. N/T

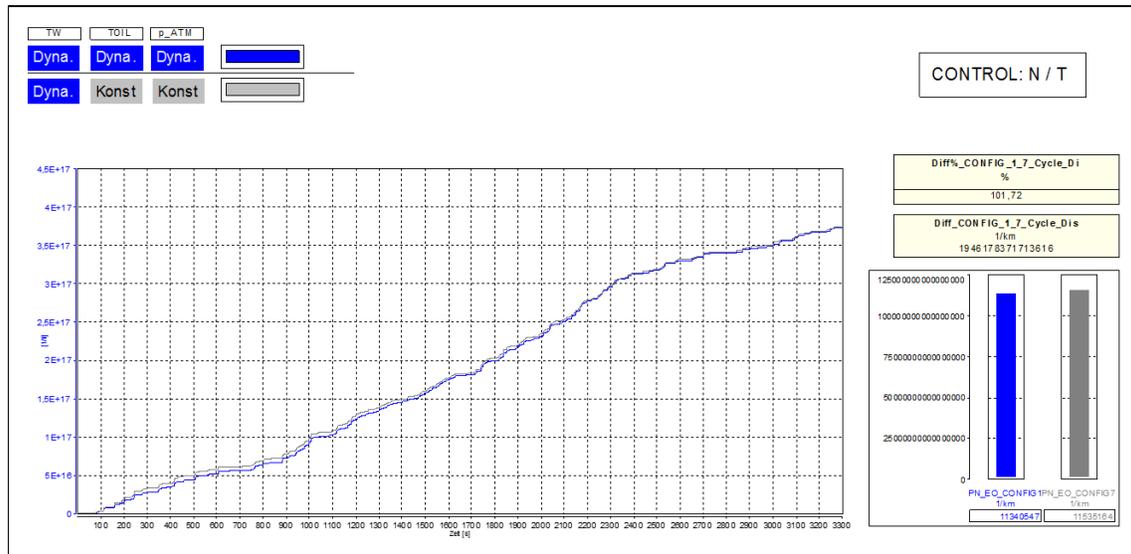


Abbildung 6-92: Abweichung Partikelanzahl; CONFIG 1 – CONFIG 7; Regelmod. N/T

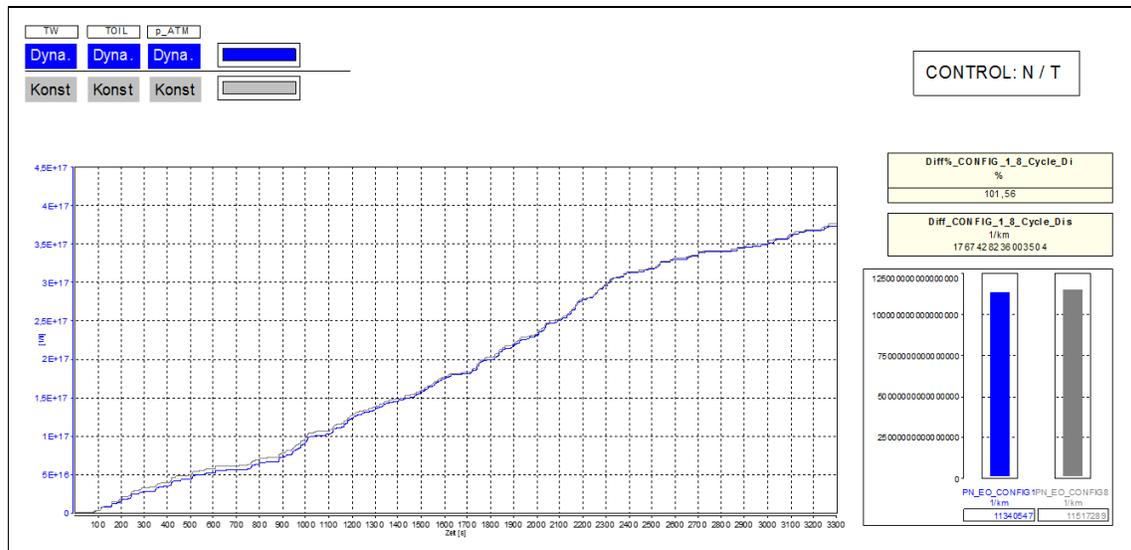


Abbildung 6-93: Abweichung Partikelanzahl; CONFIG 1 – CONFIG 8; Regelmod. N/T

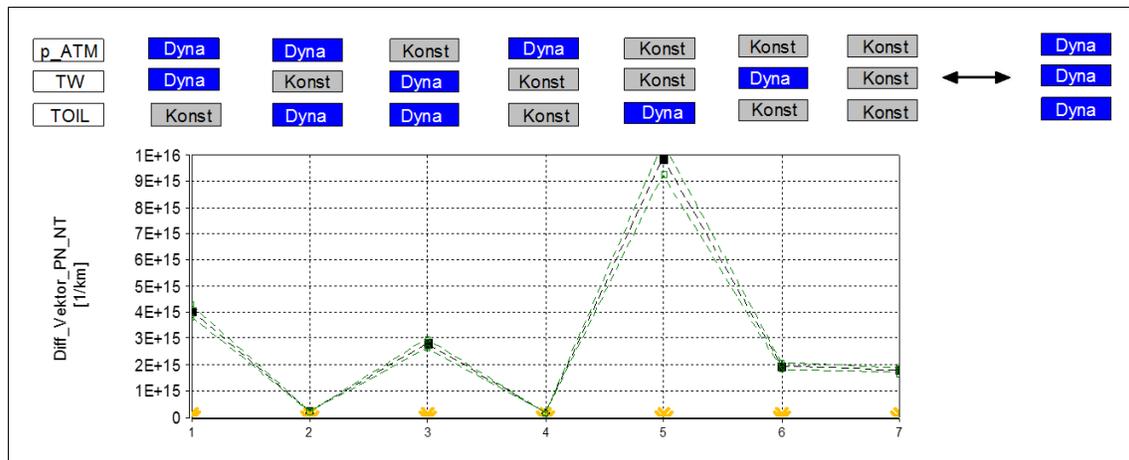


Abbildung 6-94: Übersicht Partikelanzahl. Abweichung CONFIG 1 – CONFIG 2 bis CONFIG8; Regelmod. N/T