

Diplomarbeit

Emissionen im realen Fahrbetrieb als Herausforderung für die Serienkalibrierung von Nutzfahrzeugen

Verfasser

Gerold Bruckner

**Eingereicht am Institut für Verbrennungskraftmaschinen
und Thermodynamik der Technischen Universität Graz**

Vorstand: Univ.-Prof. DI Dr. Helmut Eichlseder

Betreuer TU: Ao. Univ.-Prof. DI Dr.techn. Stefan Hausberger

Externer Betreuer: Dipl.-Ing. (FH) Josef Erhart, AVL List GmbH

Graz, 10.10.2013

Vorwort

Seitens AVL möchte ich mich bei DI (FH) Josef Erhart für die vorbildliche und engagierte Betreuung dieser Diplomarbeit bedanken. Einen Dank an alle Mitarbeiter der AVL List GmbH die mich im Zuge meiner Diplomarbeit mit Rat und Tat unterstützt haben, speziell an DI Michael Kordon und DI Attila Grauenfels von deren fachlicher Unterstützung ich sehr profitierte.

Seitens der Technischen Universität Graz möchte ich Ao.Univ.-Prof. DI Dr.techn. Stefan Hausberger für die Betreuung der Diplomarbeit danken.

Mag. Eva Ferrigato danke ich für die vielen Stunden Korrekturlesen.

Zuletzt möchte ich mich noch bei meinen Eltern Christine und Josef bedanken, ohne deren Unterstützung dieses Studium nicht möglich gewesen wäre.

INHALT

VORWORT	3
FORMELZEICHEN, INDIZES UND ABKÜRZUNGEN	5
EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	7
ZUSAMMENFASSUNG	8
ABSTRACT	9
1 EINLEITUNG	10
1.1 AUFGABENSTELLUNG	11
2 ABGASGESETZGEBUNG FÜR NUTZFAHRZEUGE IN EUROPA	12
2.1 ONROAD	12
2.1.1 Grenzwerte	12
2.1.2 Ermittlung der dynamische Vollastkurve	13
2.1.3 WHSC (World Harmonized Stationary Cycle).....	13
2.1.4 WHTC (World Harmonized Transient Cycle).....	15
2.1.5 WNTe (World-harmonized Not-To-Exceed) Bereich.....	17
2.1.6 ISC (In Service Conformity).....	19
2.2 OFFROAD.....	24
2.2.1 Grenzwerte	24
2.2.2 Ermittlung der dynamischen Vollastlinie	24
2.2.3 NRSC (Nonroad Stationary Cycle).....	24
2.2.4 NRTC (Nonroad Transient Cycle).....	26
2.2.5 NTE (Not-To-Exceed) Bereich	27
3 EMISSIONSBEWERTUNG MITHILFE EINES MOTORMODELLS	29
3.1 DAS MOTORMODELL [5].....	29
3.1.1 Motordaten.....	31
3.1.2 AGR Regelung des Motormodells	31
3.2 MAßNAHMEN ZUR MINIMIERUNG VON NOX [7]	32
3.2.1 Innermotorische NOx Minimierung	33
3.2.2 Abgasnachbehandlungssysteme zur NOx Minimierung	33
3.3 SIMULATION VERSCHIEDENER LASTPROFILE UNTER UNTERSCHIEDLICHEN UMGEBUNGSBEDINGUNGEN	36
3.3.1 Auswahl der Umgebungsbedingungen	36
3.3.2 Kalibrierstrategien.....	36
3.3.3 Ergebnisse.....	38
3.4 RESÜMEE.....	53
4 ISC TESTS AM VERSUCHSTRÄGER	55
4.1 DER VERSUCHSTRÄGER.....	55
4.1.1 Daten von Motor und Motorhardware	55
4.2 DURCHFÜHRUNG [2].....	56
4.3 ERGEBNISSE	58
5 SIMULATION DER ISC TESTS AM HiL PRÜFSTAND	62
5.1 DER PRÜFSTAND	63
5.2 DIE GENAUIGKEIT DES ABGESTIMMTEN MOTORMODELLS	64
5.3 SIMULATION DER ISC TESTS	66
5.3.1 Standardbedingungen.....	66
5.3.2 Non-Standardbedingungen.....	66
5.4 ERGEBNISSE	67
5.5 VERGLEICH DER SIMULIERTEN ISC TESTS VON HiL, MOTORPRÜFSTAND UND FAHRZEUG.....	68
5.6 VERGLEICH DER SIMULIERTEN ISC TESTS AM HiL UNTER NON-STANDARDBEDINGUNGEN	74
5.7 RESÜMEE.....	81
6 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK	82
LITERATUR	84
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	85

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

Abkürzungen

AF	Air Filter (Luftfilter)
AGN	Abgasnachbehandlung
AGR	Abgasrückführung
ATL	Abgasturbolader
BSFC	Break Specific Fuel Consumption (spezifischer Kraftstoffverbrauch)
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
DOC	Dieseloxidationskatalysator
DPF	Dieselpartikelfilter
EAS	Engine Aftertreatment System (Abgasnachbehandlungssystem)
ECU	Engine Control Unit
EFM	Exhaust Flow Meter
EG	Europäische Gemeinschaft
EO	Engine Out
ESC	European Stationary Cycle
ETC	European Transient Cycle
HC	Kohlenwasserstoffe
HiL	Hardware in the Loop
IM	Intake Manifold
ISC	In-service Conformity
LKW	Lastkraftwagen
MD	Motordrehmoment
MF_NOX_EO_S	Feuchtekorrigierter Massenstrom NO _x Engine Out
MF_NOX_TP_S	Feuchtekorrigierter Massenstrom NO _x Tail Pipe
MFB	Mass Fraction Burnt
MiL	Model in the Loop
n	Motordrehzahl
NH ₃	Ammoniak
NO	Stickstoff
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO _x	Stickoxide
NO _x EO	Stickoxide Engine Out
NO _x TP	Stickoxide Tail Pipe
NO _x _EO_Int	Aufintegrierter NO _x _EO Massenstrom
NO _x _TP_Int	Aufintegrierter NO _x _TP Massenstrom
NRSC	Non Road Stationary Cycle
NRTC	Non Road Transient Cycle
NTE	Not To Exceed Area
OCE	Off Cycle Emissions
P_0_A	Umgebungsdruck
P_2_1	Druck nach Ladeluftkühler
P_21	Druck nach Kompressor
P_31	Druck Exhaust Manifold
P_41	Druck nach Turbine
PEMS	Portable Emission Measurement System
PKW	Personenkraftwagen
PM	Partikelmasse

PN	Partikelanzahl
RT_EGR	AGR Rate
SCR	Selective Catalytic Reduction / Selektive katalytische Reduktion
SOC	Start of Combustion
Soot TP	Soot Tail Pipe
T_11	Temperatur nach Luftfilter
T_2_1	Temperatur nach Ladeluftkühler
T_21	Temperatur nach Kompressor
T_31	Temperatur vor Turbolader
T_41	Temperatur nach Turbine
T_51	Temperatur nach DOC
T_IA	Temperatur der Ansaugluft
THC	Gesamtheit der Kohlenwasserstoffe
TP	Tail Pipe
TV	Throttle Valve (Drosselklappe)
TV_Pos	Drosselklappenposition
VTG	Variable Turbinengeometrie
WHSC	World Harmonized Stationary Cycle
WHTC	World Harmonized Transient Cycle
WNTE	World Harmonized Not To Exceed Area

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.

Gerold Bruckner

Graz, 10.10.2013

Zusammenfassung

Seit der Einführung der Abgasgesetzgebung wird der Ausstoß verbrennungsbedingter Luftschadstoffe stufenweise strenger limitiert. Aktuell gilt in Europa für schwere Nutzfahrzeuge (Onroad) EURO 6 und für mobile Arbeitsmaschinen (Offroad) Stufe IV. Mit der Einführung von EURO 6 müssen bei Nutzfahrzeugen erstmals die Emissionen im realen Fahrbetrieb, mittels ISC (In Service Conformity) Tests, nachgewiesen werden. Bisher wurde bei Nutzfahrzeugen nur der Motor am Motorprüfstand zertifiziert. Weiters werden mit EURO 6 die erlaubten Schadstoffemissionen nochmals deutlich reduziert und aufgrund der Partikelanzahllimitierung ist es notwendig einen DPF zu verbauen. Daher kann die bisher weit verbreitete „SCR only“ Strategie im Heavy Duty Bereich für EURO 6 nicht mehr verwendet werden. Die neuen Grenzwerte und die ISC Tests stellen eine große Herausforderung für die Kalibrierung dar. Das erfordert eine gute Gesamtsystemauslegung von Motor, Abgasnachbehandlung und Steuergerätesoftware.

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, die ISC Tests im realen Fahrbetrieb bei Nutzfahrzeugen unter Standard- und Non-Standardbedingungen zu simulieren.

Der Theorieteil beinhaltet die für diese Diplomarbeit wichtigen Neuerungen der Emissionsgesetzgebung für On- und Offroad Nutzfahrzeuge in Europa, sowie die Beschreibung, Entnormierung und Auswertung der verschiedenen Testzyklen.

Mithilfe eines AVL MoBEOTM Motormodells einer mobilen Arbeitsmaschine werden anhand der MiL Simulation (Model in the Loop) verschiedener Lastprofile unter unterschiedlichen Umgebungsbedingungen simuliert, um die Auswirkungen auf die Schadstoffemissionen bewerten zu können. Die MiL Simulation wird zu Beginn ohne Anpassung der Kalibrierung und im weiteren mit Anpassung der Kalibrierung durchgeführt.

Im Praxisteil erfolgen die ISC Tests (= PEMS Messungen) an einem Versuchsträger. Anschließend wird die Simulation der ISC Tests unter unterschiedlichen Umgebungsbedingungen am HiL Prüfstand durchgeführt. Die Ergebnisse der ISC Tests am Versuchsträger zeigen, dass die Grenzwerte bei guter Kalibrierung des Motors am Motorprüfstand ohne größere Probleme eingehalten werden können.

Das Ergebnis dieser Arbeit ist eine detaillierte Beschreibung der ISC Tests, sowie die Emissionsbewertung der Tests. Aufgrund der HiL Simulation der ISC Tests unter Non-Standardbedingungen (z.B.: Kälte, Hitze und Höhe) ist es möglich, die Emissionen bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen zu bewerten. Durch den Vergleich von gemessenen und simulierten Fahrzyklen kann das Potential virtueller Prüfstände als erweiterte Kalibrierumgebung dargestellt werden.

Abstract

Ever since the introduction of the exhaust emission legislation the production of combustion-related emissions of air pollutants has been restricted gradually. Currently EURO 6 presents the effective European restriction for heavy duty vehicles (onroad) and stage IV for mobile machinery (offroad). Now that EURO 6 has been introduced, the emissions corresponding to real driving patterns of commercial vehicles have to be verified via ISC (In Service Conformity) tests for the first time. Thus far only the engine on the test bed has been certified.

Moreover, EURO 6 helps to reduce the permitted air pollutants significantly. It is necessary to add a DPF in order to meet with the limitation of the number of particles. Due to this fact the so far widely-used “SCR only” strategy cannot be applied any more with EURO 6 in the Heavy Duty sector. The new emission limits and ISC tests present a great challenge for the calibration which is why a successful overall system of engine, exhaust aftertreatment system and ECU software is required.

The aim of this thesis is to simulate the ISC tests in real driving patterns of commercial vehicles under standard and non-standard conditions.

The theoretical part contains the important innovations of the exhaust emission legislation for onroad and offroad commercial vehicles in Europe as well as the description, denormalisation and evaluation of the different test cycles.

With the aid of an AVL MoBEOTM engine model of a mobile machinery load profiles under diverse environmental conditions are simulated based on MiL simulation (Model in the Loop) in order to assess the impacts on pollutant emissions. Initially, the MiL simulation is accomplished without adjusting the calibration, subsequently the calibration is adjusted.

The practical part contains the ISC tests (= PEMS measurements) on a test vehicle. Moreover, the simulation of the ISC tests under diverse environmental conditions on the HiL test bed is described. The results of the ISC tests show that the emission limits with a good calibration of the engine can also be kept on the test bed without major problems.

The outcome of this thesis is a detailed description of the ISC tests as well as the emissions evaluation of the tests. Due to the HiL simulation of the ISC tests under non-standard conditions (e.g.: cold, hot and altitude) it is possible to assess the emissions at diverse environmental conditions. Through comparison of measured and simulated driving cycles the potential of virtual test beds as an extended calibration setting can be depicted.

1 Einleitung

Die Abgasgesetzgebung hat ihren Ursprung im Jahr 1960. Aufgrund der steigenden Anzahl der Kraftfahrzeuge und dem damit verbundenen Ausstoß verbrennungsbedingter Luftschadstoffe (u.a. HC, CO, NO_x und PM) traten in Los Angeles, Kalifornien, die ersten Probleme mit Smog auf. Als Smog wird eine gesundheitsschädliche und sichtbeeinträchtigende Luftschadstoffkonzentration infolge besonderer Wetterbedingungen bezeichnet. Aufgrund dieser Tatsachen wurden in den USA 1960 erstmals Abgasgrenzwerte für Straßenfahrzeuge festgelegt. Ganze 10 Jahre später, 1970, trat auch in der Europäische Gemeinschaft (EG) die erste Abgasvorschrift in Kraft. Zu Beginn wurde nur der Ausstoß von Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffen limitiert. 1977 folgte die Begrenzung von Stickoxiden und 1988 wurden Partikel für Dieselmotoren eingeschränkt bis schlussendlich 1992 die Gesetzgebungsstufe EURO 1 in Kraft trat. Seitdem folgt eine stufenweise strengere Limitierung der erlaubten Emissionen. Aktuell gilt für schwere Nutzfahrzeuge seit Anfang 2013 EURO 6 für die Typprüfung und ab Anfang 2014 für alle Neuzulassungen.

Bei schweren Nutzfahrzeugen kommen fast ausschließlich Dieselmotoren zum Einsatz. Aufgrund der Eigenschaften dieser Verbrennungskraftmaschinen gilt das Hauptaugenmerk, in Bezug auf Emissionen, der Forschung und Entwicklung der Reduktion von Stickoxiden und Partikeln. Die Grenzwerte für Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffe werden aufgrund der hohen Oxidationsraten im DOC ohne größere Probleme erreicht. Da die Treibstoffpreise ständig steigen und die Einsatzzeit bzw. die Kilometerleistung von Nutzfahrzeugmotoren die von PKW Motoren bei weitem übertreffen, ist ein niedriger Kraftstoffverbrauch eines der wichtigsten Verkaufsargumente. Daher muss bei der Kalibrierung immer ein Kompromiss zwischen Emissionen und Kraftstoffverbrauch eingegangen werden. Im Gegensatz zum PKW wurde bei Nutzfahrzeugen bisher nur der Motor zertifiziert, welcher anschließend in verschiedenen Fahrzeugen (z.B.: LKW, Bus,...) verbaut wurde. Mit der Einführung von EURO 6 müssen erstmals die Schadstoffemissionen im realen Fahrbetrieb, und somit bei Nutzfahrzeugen erstmals im Fahrzeug, nachgewiesen werden. Diese werden mithilfe von mobiler Messtechnik (PEMS) erfasst und dürfen die gesetzlichen festgelegten Grenzwerte nicht überschreiten.

Die aktuelle Emissionsgesetzgebungsstufe kann nur durch eine gute Gesamtsystemauslegung von Motor, Abgasnachbehandlung und Steuergerätesoftware erfüllt werden. Immer komplexere ECU Funktionalitäten, in Kombination mit der Ausweitung des emissionsrelevanten Betriebsbereiches, führen zu einer erheblichen Erhöhung des Aufwands für die Leistungs- und Emissionskalibrierung. Um Budget- und Zeitgrenzen einzuhalten sind neue Kalibriermethoden nötig. Daher sind virtuelle Prüfstände die ideale Erweiterung realer Testumgebungen. Somit können die Aufwände im Fahrzeug sowie teurer Klimaprüfstände erheblich reduziert werden und diese hauptsächlich für die Validierung der Kalibrierung verwendet werden.

1.1 Aufgabenstellung

Ziel dieser Arbeit ist eine detaillierte Beschreibung der ISC Tests, sowie die Abschätzung der Arbeitsumfänge der Kalibrierung aufgrund der neuen Abgasgesetzgebung. Durch den Vergleich von gemessenen und simulierten Fahrzyklen kann das Potential von virtuellen Prüfständen, als erweiterte Kalibrierumgebung, dargestellt werden.

Nach der Beschreibung der neuen Abgasgesetzgebung erfolgt die Simulation verschiedener Lastprofile unter unterschiedlichen Umgebungsbedingungen am Motormodell, ohne/mit Anpassung der Kalibrierung, und die Bewertung der Auswirkungen auf die Emissionen.

Anschließend erfolgen die Simulation der ISC Tests am HiL, sowie der Vergleich mit den Messungen im Fahrzeug. Somit kann eine Aussage über die Qualität der Simulation getroffen werden. Zur Emissionsbewertung werden die ISC Tests zusätzlich unter Non-Standardbedingungen am HiL simuliert.

2 Abgasgesetzgebung für Nutzfahrzeuge in Europa

Aufgrund des Umfangs der Abgasgesetzgebung für Onroad und Offroad Nutzfahrzeuge werden in den folgenden Kapiteln nur die für diese Arbeit wichtigen Inhalte angeführt. Der detaillierte Gesetzestext ist der Literatur [1], [2], [3], [4] zu entnehmen.

2.1 Onroad

Seit der Einführung der Gesetzgebungsstufe EURO 1 im Jahr 1992 werden die erlaubten Emissionen immer stufenweise strenger limitiert. Mit 1.1.2013 gilt für schwere Nutzfahrzeuge bei der Typprüfung EURO 6 und ab 1.1.2014 für alle neu zugelassenen Nutzfahrzeuge. Die in diesem Kapitel angeführten Inhalte stammen, sofern nicht anders angegeben, aus der ECE Regelung Nr. 49 [3].

Bei dieser Gesetzgebungsstufe muss nicht nur der Ausstoß von Emissionen weiter verringert werden, es gibt auch grundlegende Änderungen:

- Der neue Referenzkraftstoff ist B7 (Diesel mit bis zu 7% Biodiesel)
- ESC und ETC werden durch WHSC und WHTC ersetzt
- Partikelanzahl ist limitiert
- CO₂ Emissionen sowie der Kraftstoffverbrauch müssen dokumentiert werden
- Erweiterte „Not-To-Exceed Area“
- In-Service Conformity Prüfung
- Erhöhte Dauerhaltbarkeit emissionsminimierender Einrichtungen

2.1.1 Grenzwerte

Die gesetzlich vorgegebenen Emissions- und Dauerhaltbarkeitslimits sind in **Tabelle 2-1** und **Tabelle 2-4** angeführt. Die Bestimmung der Verschlechterungsfaktoren (engl.: DF = Deterioration Factors) für eine Motorenfamilie erfolgt mittels Betriebsakkumulationsprogramm am Motorprüfstand. Alternativ können die gesetzlich vorgegebenen Verschlechterungsfaktoren der **Tabelle 2-2** verwendet werden. Die Übereinstimmungsfaktoren (engl.: CF = Conformity Factors) der ISC Tests, dargestellt in **Tabelle 2-3**, beziehen sich auf den WHTC.

Tabelle 2-1: Emissionsgrenzwerte Onroad

	CO	THC	NO _x	NH ₃	PM Masse	PM Anzahl
	g/kWh	g/kWh	g/kWh	ppm	g/kWh	#/kWh
WHSC	1,5	0,13	0,40	10	0,010	8×10^{11}
WHTC	4,0	0,16	0,46	10	0,010	6×10^{11}
WNTE	2,0	0,22	0,60	-	0,016	-

Tabelle 2-2: Verschlechterungsfaktoren Onroad

	CO	THC	NO _x	NH ₃	PM Masse	PM Anzahl
WHSC	1,3	1,3	1,15	1,0	1,05	1,0
WHTC	1,3	1,3	1,15	1,0	1,05	1,0

Tabelle 2-3: Emissionsgrenzwerte ISC

	Übereinstimmungsfaktor CO bezogen auf WHTC	Übereinstimmungsfaktor THC bezogen auf WHTC	Übereinstimmungsfaktor NO _x bezogen auf WHTC
ISC	1,5	1,5	1,5

Tabelle 2-4: Dauerhaltbarkeitslimits [1]

Fahrzeugklassen	Dauerhaltbarkeit (km oder Jahre, je nachdem was früher erreicht wird)	
N2, N3, M3	300 000 km	6 Jahre
N3	700 000 km	7 Jahre

Klasse M₃: Für die Personenbeförderung ausgelegte und gebaute Kraftfahrzeuge mit mehr als acht Sitzplätzen außer dem Fahrersitz und einer zulässigen Gesamtmasse von mehr als 5 Tonnen.[2]

Klasse N₂: Für die Güterbeförderung ausgelegte und gebaute Kraftfahrzeuge mit einer zulässigen Gesamtmasse von mehr als 3,5 Tonnen bis maximal 12 Tonnen.[2]

Klasse N₃: Für die Güterbeförderung ausgelegte und gebaute Kraftfahrzeuge mit einer zulässigen Gesamtmasse von mehr als 12 Tonnen.[2]

2.1.2 Ermittlung der dynamische Vollastkurve

Zuerst muss der Motor stabilisiert werden. Dies geschieht, falls vom Hersteller nicht anders gefordert, durch eine Warmlaufphase bei 75 % bis 100 % der Maximalleistung. Der Motor muss solange betrieben werden, bis die Mittelwerte von Motorkühlung und Schmieröltemperatur über 2 Minuten innerhalb von ± 2 % liegen, oder bis der Motorthermostat die Motortemperatur steuert.

Der Drehzahlbereich wird folgendermaßen bestimmt:

niedrigste Drehzahl = ist die Leerlaufdrehzahl

höchste Drehzahl = $1,02 \times n_{hi}$ (die höchste Drehzahl, bei der sich 70 % der Maximalleistung einstellen)

Nach der Stabilisierung wird der Motor ohne Last im Leerlauf betrieben. Anschließend ist der Motor bei Vollast zu betreiben. Danach erfolgt eine Steigerung der Drehzahl mit 8 ± 1 % min^{-1}/s bis zur Höchstdrehzahl. Drehzahl und Drehmoment müssen dabei mit einer Frequenz von mindestens 1 Hz aufgezeichnet werden.

2.1.3 WHSC (World Harmonized Stationary Cycle)

Dieser Emissionsprüfzyklus besteht aus 13 normalisierten Drehzahl- und Leistungsstufen, dargestellt in **Tabelle 2-5**, in denen ein stationärer Dieselmotor üblicherweise betrieben wird. Die Referenzwerte müssen mithilfe der dynamischen Vollastkurve des zu prüfenden Motors umgerechnet werden. Motordrehzahl- und Laständerungen zwischen den einzelnen Phasen sollen linear innerhalb von 20 ± 1 Sekunden erfolgen.

Beim WHSC wird der Motor warm gestartet. Die Vorkonditionierung erfolgt in Prüfphase 9.

Tabelle 2-5: WHSC

Prüfphase	Normierte Drehzahl	Normiertes Drehmoment	Prüfphasendauer inkl. 20s Übergangszeit
	[%]	[%]	[s]
1	0	0	210
2	55	100	50
3	55	25	250
4	55	70	75
5	35	100	50

Prüfphase	Normierte Drehzahl	Normiertes Drehmoment	Prüfphasendauer inkl. 20s Übergangszeit
6	25	25	200
7	45	70	75
8	45	25	150
9	55	50	125
10	75	100	50
11	35	50	200
12	35	25	250
13	0	0	210
Summe			1895

2.1.3.1 Entnormierung WHSC

Die Drehzahl wird mithilfe folgender Formel entnormiert:

$$n_{\text{ref}} = n_{\text{norm}} \times (0,45 \times n_{\text{lo}} + 0,45 \times n_{\text{pref}} + 0,1 \times n_{\text{hi}} - n_{\text{idle}}) \times 2,037 + n_{\text{idle}}$$

Darin ist:

n_{norm} normierte Drehzahl

n_{lo} die niedrigste Drehzahl bei der sich 55 % der Maximalleistung einstellen

n_{pref} die Drehzahl, bei der das Integral des Drehmoments über der Drehzahl 51 % des Gesamtintegrals erreicht

n_{hi} die höchste Drehzahl, bei der sich 70 % der Maximalleistung einstellen

n_{95h} ist die höchste Drehzahl, bei der sich 95 % der Maximalleistung einstellen

n_{idle} die Leerlaufdrehzahl

n_{ref} Referenzdrehzahl

Das Drehmoment wird mit folgender Formel entnormiert:

$$M = \frac{(M_{\text{norm}} \times M_{\text{max}})}{100}$$

Darin ist:

M_{norm} normiertes Drehmoment in %

M_{max} Maximalwert des Drehmoments aus der Volllastkurve

2.1.3.2 Auswertung WHSC

Der detaillierte Gesetzestext zur exakten Auswertung ist der Literatur [3] zu entnehmen.

Zur Ermittlung der bremspezifischen Emissionen wird die Zyklusarbeit benötigt. Diese lässt sich durch Integration der Motorleistung über den Zyklus bestimmen. Anhand folgender Formel können die bremspezifischen Emissionen für den WHSC berechnet werden:

$$e = \frac{m}{W_{\text{act}}}$$

Hierbei ist:

- e spezifische Emission in g/kWh
 m Massenemission des Bestanteils in g/Zyklus
 W_{act} Zyklusarbeit in kWh/Zyklus

Die mithilfe dieser Formeln berechneten Zyklusemissionen multipliziert mit den in **Tabelle 2-2** dargestellten dazugehörigen Verschlechterungsfaktoren müssen für ein positives Ergebnis kleiner gleich der in **Tabelle 2-1** angegebenen Emissionsgrenzwerte sein.

2.1.4 WHTC (World Harmonized Transient Cycle)

Der WHTC, dargestellt in **Abbildung 2-1**, ist ein transienter Emissionsprüfzyklus der sich aus den realen Fahrprofilen von Nutzfahrzeugen zusammensetzt. Die normierten Drehzahl- und Drehmomentwerte ändern sich im Sekundentakt und müssen mithilfe der dynamischen Vollastkurve entnormiert werden. Beim Kalt-WHTC wird der Motor kalt, d.h. bei einer Umgebungstemperatur von $25\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$, gestartet. Nach dem Durchlauf des Tests erfolgt eine Abkühlphase (engl.: hot soak period) von 10 Minuten. Anschließend wird der Warm-WHTC gestartet.

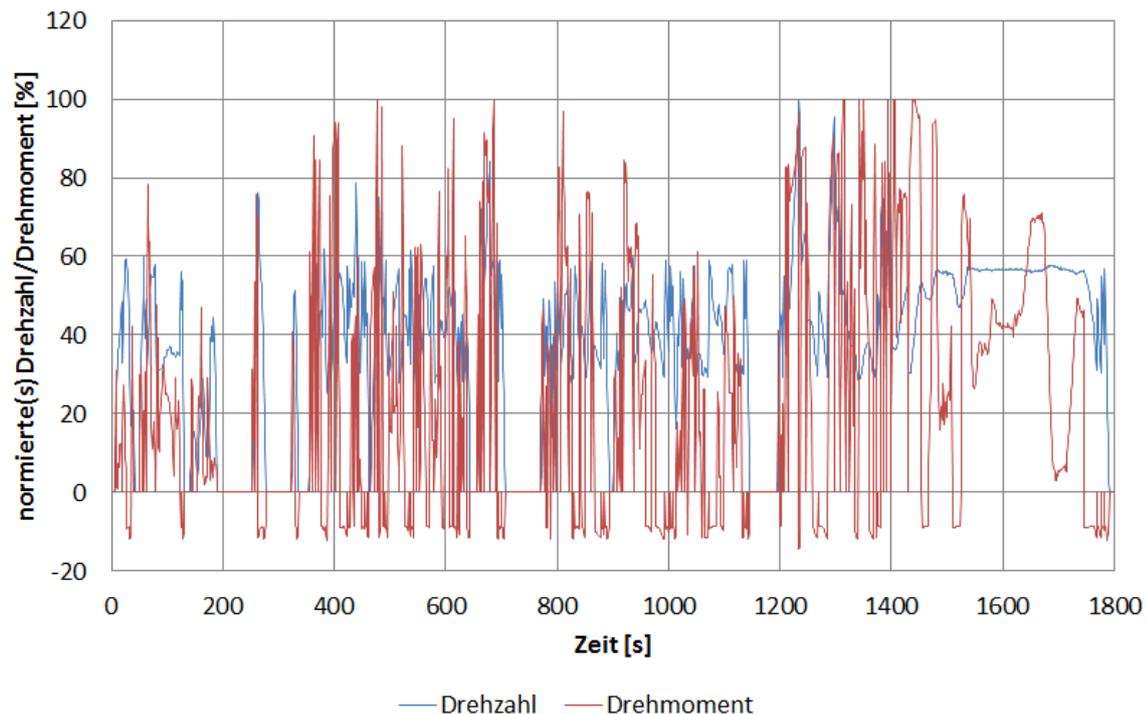


Abbildung 2-1: Schematisches Profil des WHTC

2.1.4.1 Entnormierung WHTC

Die Drehzahl wird mithilfe folgender Formel entnormiert:

$$n_{\text{ref}} = n_{\text{norm}} \times (0,45 \times n_{\text{lo}} + 0,45 \times n_{\text{pref}} + 0,1 \times n_{\text{hi}} - n_{\text{idle}}) \times 2,037 + n_{\text{idle}}$$

Darin ist:

n_{norm}	normierte Drehzahl
n_{lo}	die niedrigste Drehzahl bei der sich 55 % der Maximalleistung einstellen
n_{pref}	die Drehzahl, bei der das Integral des Drehmoments über der Drehzahl 51 % des Gesamtintegrals erreicht
n_{hi}	die höchste Drehzahl, bei der sich 70 % der Maximalleistung einstellen
$n_{95\text{h}}$	ist die höchste Drehzahl, bei der sich 95 % der Maximalleistung einstellen
n_{idle}	die Leerlaufdrehzahl
n_{ref}	die Referenzdrehzahl

Das Drehmoment wird mit folgender Formel entnormiert:

$$M = \frac{(M_{\text{norm}} \times M_{\text{max}})}{100}$$

Darin ist:

M_{norm}	normiertes Drehmoment in %
M_{max}	Maximalwert des Drehmoments aus der Volllastkurve

2.1.4.2 Auswertung WHTC

Der detaillierte Gesetzestext zur exakten Auswertung ist der Literatur [3] zu entnehmen.

Zur Ermittlung der bremspezifischen Emissionen wird die Zyklusarbeit benötigt. Diese lässt sich durch Integration der Motorleistung über den Zyklus bestimmen. Für das finale Prüfergebnis des WHTC müssen Kalt- und Warmzyklus nach folgender Formel gewichtet werden:

$$e = \frac{(0,14 \times m_{\text{cold}}) + (0,86 \times m_{\text{hot}})}{(0,14 \times W_{\text{act,old}}) + (0,86 \times W_{\text{act,hot}})}$$

Hierbei ist:

e	spezifische Emission in g/kWh
m_{cold}	Massenemission des Kalt-WHTC in g/Prüfung
m_{hot}	Massenemission des Warm-WHTC in g/Prüfung
$W_{\text{act,cold}}$	Zyklusarbeit des Kalt-WHTC in kWh
$W_{\text{act,hot}}$	Zyklusarbeit des Warm-WHTC in kWh

Die mithilfe dieser Formeln berechneten Zyklusemissionen multipliziert mit den in **Tabelle 2-2** dargestellten dazugehörigen Verschlechterungsfaktoren müssen für ein positives Ergebnis kleiner gleich der in **Tabelle 2-1** angegebenen Emissionsgrenzwerte sein.

2.1.5 WNTE (World-harmonized Not-To-Exceed) Bereich

In der Vergangenheit wurde Emissionen, die außerhalb der Bedingungen der standardisierten Prüfzyklen auftraten, auch Off-Cycle Emissions genannt, wenig bis keine Beachtung geschenkt. Daher wurde mit EURO 6 der WNTE Kontrollbereich eingeführt.

Ziel des WNTE Kontrollbereichs ist es die Off-Cycle Emissionen über einen breiten Bereich von Betriebs- und Umgebungsbedingungen zu kontrollieren und einzuhalten

2.1.5.1 Bestimmung des WNTE-Kontrollbereichs

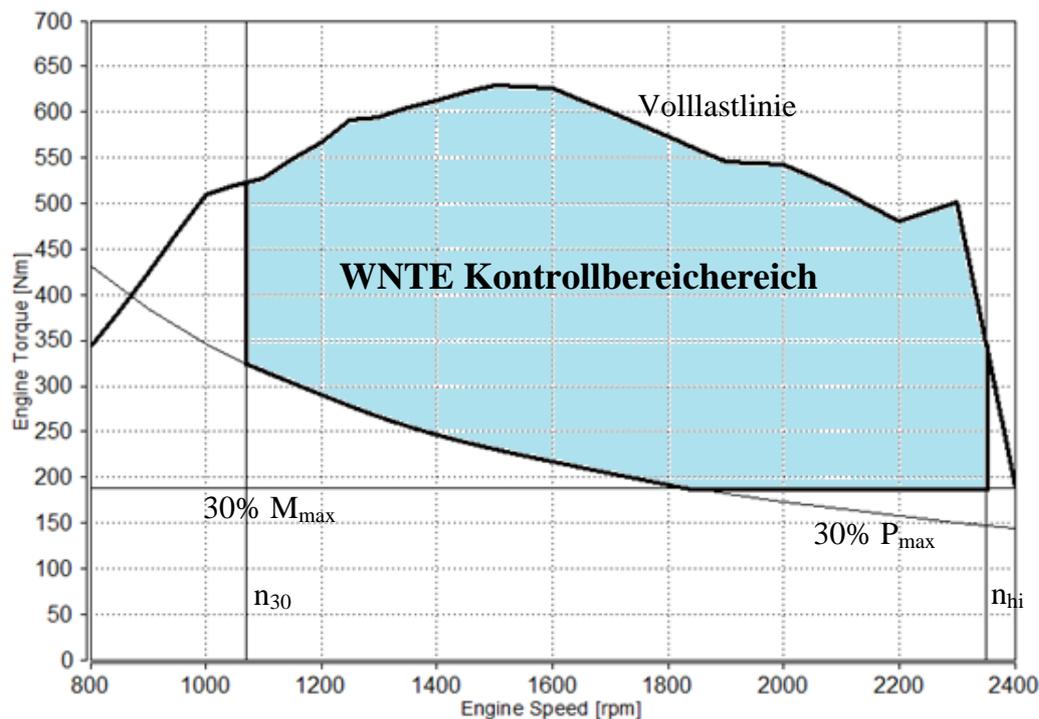


Abbildung 2-2: Beispiel eines WNTE-Kontrollbereichs

Abbildung 2-2 zeigt den WNTE-Kontrollbereich in dem die oben genannten Emissionsgrenzwerte unter den gesetzlich vorgegebenen Umgebungsbedingungen keinesfalls überschritten werden dürfen.

n_{30}	30% Wert der kumulativen Drehzahlverteilung, inkl. Leerlauf, des WHTC
n_{hi}	die höchste Drehzahl, bei der sich 70 % der Maximalleistung einstellen
30% M_{max}	30% Wert des maximalen Drehmomentes
30% P_{max}	30% Wert der Maximalleistung

2.1.5.2 Umgebungsbedingungen

Die WNTE-Emissionsgrenzwerte müssen bei jedem Luftdruck größer gleich 82,5 kPa (~1680m), bei Motorkühlmitteltemperaturen über 70°C sowie bei jeder Temperatur größer gleich -7 °C und kleiner gleich folgender Formel eingehalten werden.

$$T = -0,4514 \times (101,3 - p_b) + 311$$

Hierbei gilt:

T ist die Temperatur der Umgebungsluft in Kelvin

p_b ist der atmosphärische Druck in kPa

Daraus ergeben sich folgende wichtige und kritische Umgebungsbedingungen in denen die WNTe Grenzwerte einzuhalten sind:

- Seehöhe bei -7 °C
- Seehöhe bei 38 °C
- Seehöhe bei 25 °C
- 1680 m Höhe bei 30 °C

2.1.5.3 WNTe Testprozedur

Der WNTe-Kontrollbereich wird wie in **Abbildung 2-3** dargestellt in neun Rasterzellen unterteilt. Drei dieser Zellen werden auf Zufallsbasis bestimmt und jede davon muss fünf, ebenfalls auf Zufallsbasis ermittelte, Prüfpunkte enthalten. Somit ergeben sich 15 zu prüfende Zufallspunkte innerhalb des WNTe-Kontrollbereichs.

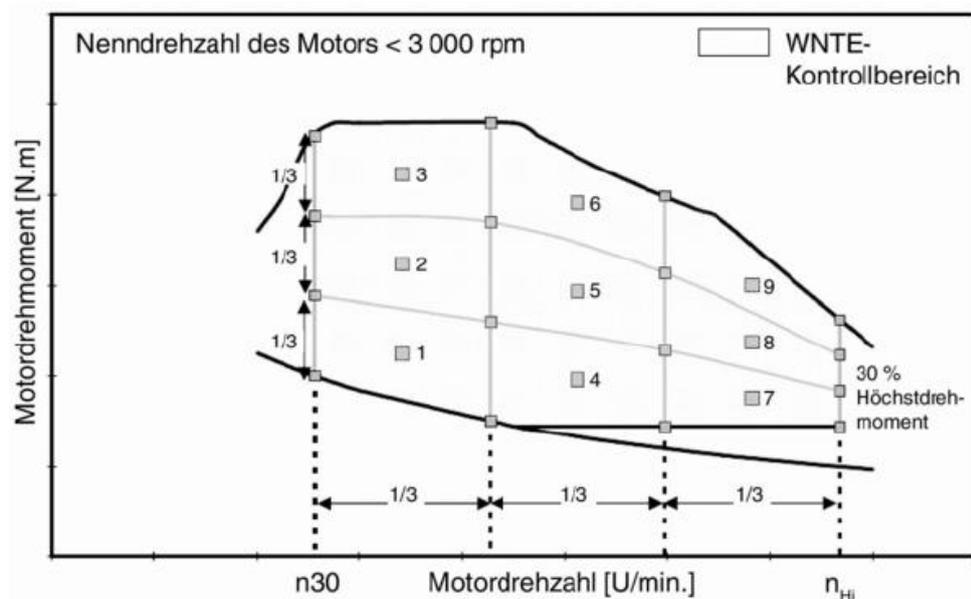


Abbildung 2-3: Rasterung WNTe-Prüfzyklus [3]

Der Motor wird nach Beendigung des WHSC drei Minuten in Phase 9 des WHSC vorkonditioniert. Unmittelbar nach der Vorkonditionierung muss der WNTe-Prüfzyklus gestartet werden. **Abbildung 2-4** zeigt den Start des Prüfzyklus und die Überprüfung der ersten Rasterzelle. Dabei muss der Motor zwei Minuten in jedem der vorher bestimmten Betriebspunkte betrieben werden. Die Übergänge von Motordrehzahl und Last sollen zwischen den einzelnen Punkten linear innerhalb von 20 ± 1 Sekunden erfolgen. Daraus ergibt sich eine Testdauer von 10 Minuten für eine Rasterzelle und eine Gesamtprüfzeit von 30 Minuten.

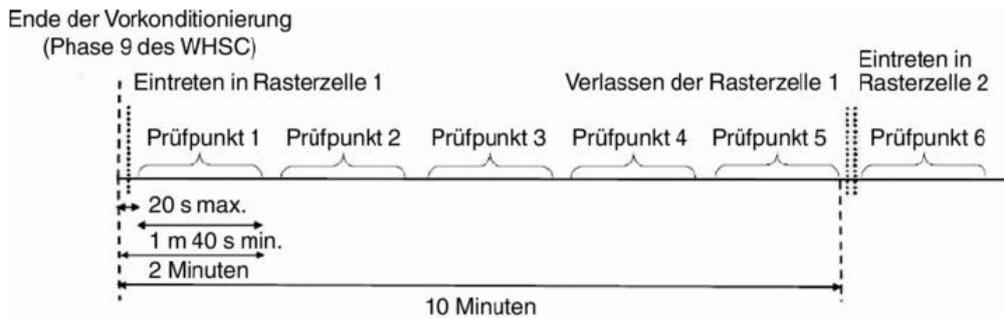


Abbildung 2-4: Start des WNTE-Prüfzyklus [3]

Für ein positives Ergebnis dürfen weder die mittleren spezifischen Emissionen gasförmiger Schadstoffe einer Rasterzelle mit den fünf Betriebspunkten, noch die mittleren spezifischen Emissionen partikelförmiger Schadstoffe des Gesamtprüfzyklus die WNTE-Grenzwerte überschreiten.

2.1.6 ISC (In Service Conformity)

Mit Einführung der Gesetzgebungsstufe EURO 6 müssen erstmals die gasförmigen Emissionen im realen Fahrbetrieb unter realen Fahrbedingungen und Belastungen nachgewiesen werden. Dies erfolgt mithilfe von mobiler Messtechnik (PEMS - Portable Emission Measurement System). Die in diesem Unterkapitel angeführten Inhalte stammen alle aus der EU-Richtlinie 2011/582/EG [2].

2.1.6.1 Fahrzeugauswahl

Wird die Typgenehmigung für eine Motorenfamilie erteilt, ist der Hersteller verpflichtet innerhalb von 18 Monaten ab der Fahrzeugerstzulassung ISC Prüfungen durchzuführen. Das zu prüfende Fahrzeug muss mit einem Motor dieser Motorenfamilie betrieben werden. Zusätzlich wird eine Mindestkilometerleistung von 25.000 km vorausgesetzt und das Fahrzeug muss innerhalb der EU zugelassen und genutzt werden.

Die ICS Prüfungen sind mindestens alle zwei Jahre in regelmäßigen Intervallen über die Fahrzeugnutzungsdauer zu wiederholen. Die Nutzungsdauer beträgt 700.000 km oder 7 Jahre, je nachdem was früher eintritt.

2.1.6.2 ISC-Prüfbedingungen

Sofern keine Statistiken vorliegen die eine für das Fahrzeug repräsentative Nutzlast bestätigen muss es mit 50 bis 60 Prozent der maximalen Fahrzeugnutzlast beladen werden.

Die Umgebungsbedingungen für die ICS-Prüfungen sind identisch mit den in Kapitel 2.1.5.1 angeführten Bedingungen für den WNTE-Prüfzyklus.

Eine Prüffahrt darf nicht unterbrochen werden und die Messdaten müssen kontinuierlich erfasst werden. Die minimale Prüfdauer muss so gewählt werden, dass in dieser Zeit fünf Mal die Zyklusarbeit eines WHTC geleistet wird oder fünf Mal die CO₂-Referenzmasse in kg/Zyklus eines WHTC erzeugt wird. Die Prüffahrt muss je nach Fahrzeugklasse einen bestimmten Prozentsatz, siehe **Tabelle 2-6**, aus Stadt-, Außerstadt- und Autobahnfahrzyklus beinhalten. Die Prozentangaben beziehen sich auf die Fahrzeit.

Die PEMS-Ausrüstung muss extern mit Strom versorgt werden und die Datenerfassungsrate muss mindestens 1Hz betragen.

Tabelle 2-6: Fahrzykluszusammensetzung

Toleranz $\pm 5\%$	Geschwindigkeiten	N_2	N_3	M_3
Stadt	0 – 50 km/h	45%	20%	70%
Außerstadt	50 – 75 km/h	25%	25%	30%
Autobahn	>75 km/h	30%	55%	0

2.1.6.3 Auswertung und Bestimmung der Übereinstimmungsfaktoren

Es gibt zwei Möglichkeiten um die Emissionen zu bestimmen. Die Übereinstimmungsfaktoren müssen für beide Methoden berechnet werden. Die positive/negative Entscheidung wird anhand der Ergebnisse der auf der Zyklusarbeit basierenden Methode getroffen.

1) Auf Zyklusarbeit basierende Methode

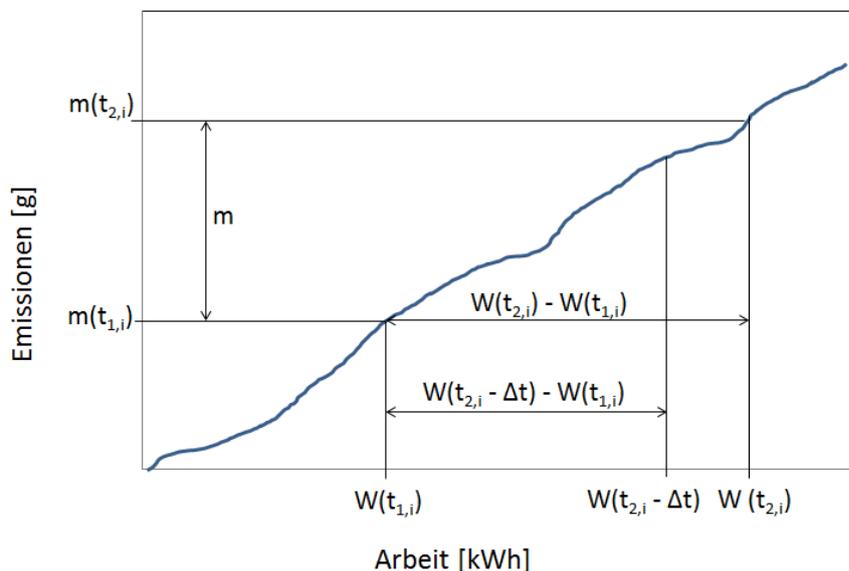
Leistung und Emissionen müssen im Sekundentakt integriert werden. Daraus folgt, dass jede Sekunde ein neues Arbeitsfenster startet. Die Dauer eines Fensters, dargestellt in **Abbildung 2-6**, wird mit folgender Formel berechnet:

$$W = W(t_{2,i}) - W(t_{1,i}) \geq W_{\text{WHTC}}$$

Darin ist:

$W(t_{j,i})$ gemessene Motorarbeit zwischen dem Start und der Zeit $t_{j,i}$ in kWh

W_{WHTC} Motorarbeit des WHTC-Zyklus in kWh

**Abbildung 2-5:** Methode, auf Zyklusarbeit basierend

$t_{2,i}$ muss folgende Bedingung erfüllen:

$$W(t_{2,i} - \Delta t) - W(t_{1,i}) < W_{\text{WHTC}} \leq W(t_{2,i}) - W(t_{1,i})$$

Hierbei ist:

Δt Datenerfassungsdauer, welche kleiner gleich 1 Sekunde sein muss

Die spezifischen Emissionen werden für jedes Arbeitsfenster und jeden gasförmigen Schadstoff anhand folgender Formel berechnet:

$$e_{gas} = \frac{m}{W(t_{2,i}) - W(t_{1,i})}$$

Darin ist:

e_{gas}	spezifische Emission in g/kWh
m	Emissionsmasse des Schadstoffes in g/Arbeitsfenster
$W(t_{2,i}) - W(t_{1,i})$	Motorarbeit während des i-ten Arbeitsfensters in kWh

Gültige Arbeitsfenster sind jene, deren durchschnittliche Leistung größer gleich 20 Prozent der maximalen Motorleistung ist. Dies wird mit folgender Formel berechnet:

$$\frac{W}{D} \geq 0,2 \times P_{max}$$

Darin ist:

W	Motorarbeit des Arbeitsfensters
D	Dauer des Arbeitsfensters
P_{max}	maximale Motorleistung

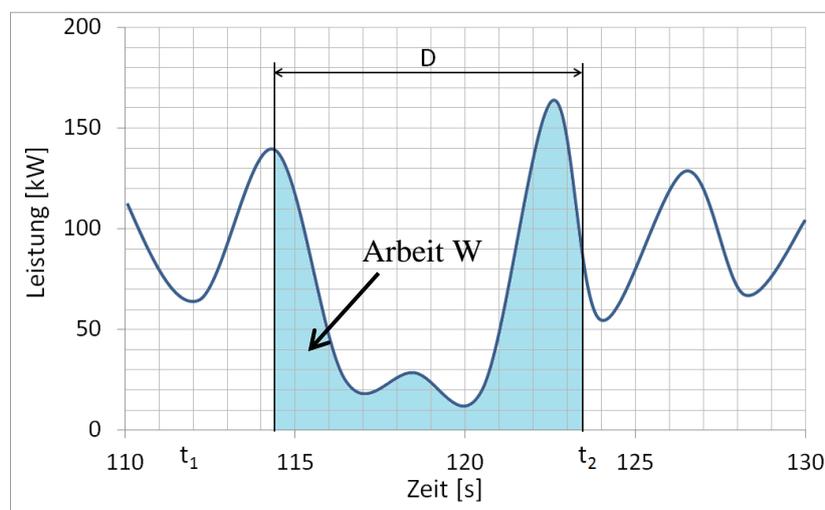


Abbildung 2-6: Dauer eines Arbeitsfensters bei Zyklusarbeit basierender Methode

Es müssen mindestens 50 Prozent aller Arbeitsfenster gültig sein. Ist dies nicht der Fall kann die Leistungsgrenze stufenweise auf minimal 15 Prozent der maximalen Motorleistung herabgesetzt werden.

Übereinstimmungsfaktor der auf der Zyklusarbeit basierender Methode

Für jedes gültige Arbeitsfenster müssen die spezifischen Emissionen von CO, THC und NOx berechnet werden. Der Übereinstimmungsfaktor wird mit folgender Formel berechnet:

$$CF = \frac{e}{L}$$

Darin ist:

- CF Übereinstimmungsfaktor
 e bremspezifische Emissionen der Komponente in g/kWh
 L Grenzwert des WHTC in g/kWh

Der kumulative 90-Perzentilwert der Übereinstimmungsfaktoren darf die in **Tabelle 2-3** angeführten Grenzwerte nicht überschreiten.

2) Auf CO₂-Masse basierende Methode

Die Emissionen müssen im Sekundetakt integriert werden. Daraus folgt, dass jede Sekunde ein neues Arbeitsfenster startet. Die Dauer eines Fensters, dargestellt in **Abbildung 2-8**, wird mit folgender Formel berechnet:

$$m_{\text{CO}_2} = m_{\text{CO}_2}(t_{2,i}) - m_{\text{CO}_2}(t_{1,i}) \geq m_{\text{CO}_2, \text{WHTC}}$$

Dabei gilt:

- $m_{\text{CO}_2}(t_{j,i})$ gemessene CO₂-Masse zwischen dem Start und der Zeit $t_{j,i}$ in kg
 $m_{\text{CO}_2, \text{WHTC}}$ CO₂-Masse des WHTC-Zyklus in kg

$t_{2,i}$ muss folgende Bedingung erfüllen:

$$W(t_{2,i} - \Delta t) - W(t_{1,i}) < W_{\text{WHTC}} \leq W(t_{2,i}) - W(t_{1,i})$$

Hierbei ist:

Δt Datenerfassungsdauer, welche kleiner gleich 1 Sekunde sein muss

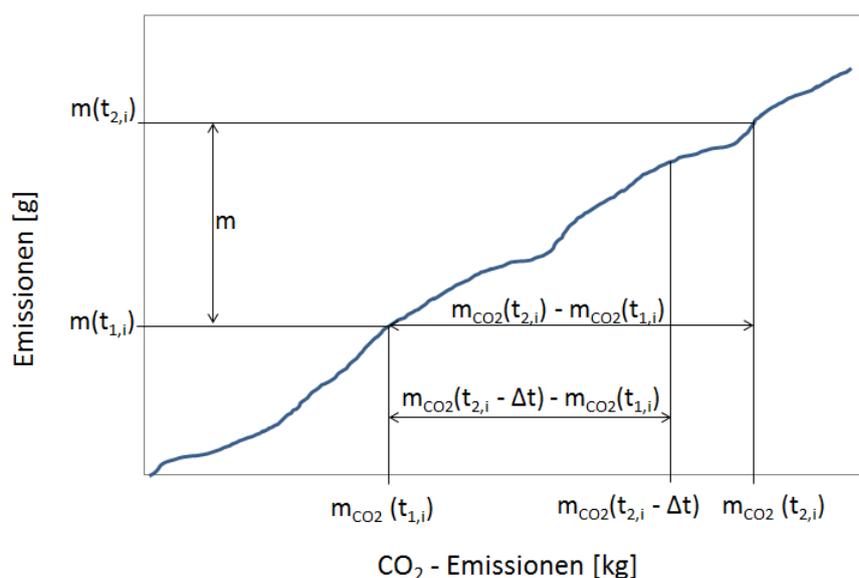


Abbildung 2-7: Methode, die auf CO₂-Masse basiert

Gültige Arbeitsfenster sind alle, deren Dauer, dargestellt in **Abbildung 2-8**, die Maximaldauer nicht überschreitet. Die Maximaldauer wird mit folgender Formel berechnet:

$$D_{max} = 3600 \frac{W_{WHTC}}{0,2 \times P_{max}}$$

Darin ist:

D_{max} Maximaldauer des Arbeitsfensters

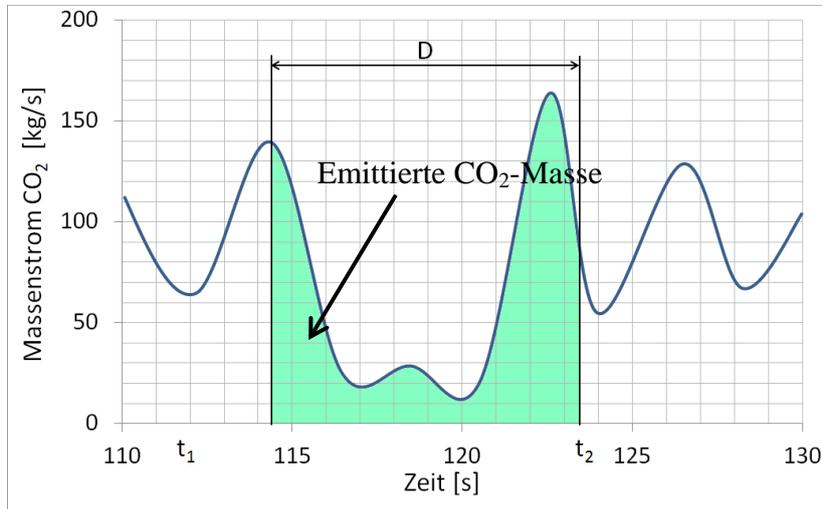


Abbildung 2-8: Dauer eines Arbeitsfensters bei CO₂-Masse basierender Methode

Übereinstimmungsfaktoren der auf der CO₂-Masse basierender Methode

Für jedes gültige Arbeitsfenster müssen die spezifischen Emissionen von CO, THC und NO_x berechnet werden.

Die Übereinstimmungsfaktoren werden mit folgenden Formeln berechnet:

$$CF = \frac{CF_I}{CF_C}$$

$$CF_I = \frac{m}{m_{CO_2}(t_{2,i}) - m_{CO_2}(t_{1,i})}$$

$$CF_C = \frac{m_L}{m_{CO_2,WHTC}}$$

Darin ist:

CF Übereinstimmungsfaktor (Conformity Factor)

CF_I Übereinstimmungsfaktor Verhältnis im Betrieb

CF_C Übereinstimmungsfaktor Verhältnis der Zertifizierung

$m_{CO_2}(t_{2,i}) - m_{CO_2}(t_{1,i})$ CO₂-Masse während des i-ten Arbeitsfensters in kg

m_L Emissionsmasse des Schadstoffes entsprechend dem Grenzwert des WHTC

Der kumulative 90-Perzentilwert der Übereinstimmungsfaktoren darf die in **Tabelle 2-3** angeführten Grenzwerte nicht überschreiten.

2.2 Offroad

Bei mobilen Arbeitsmaschinen (u.a. Bau- und Landmaschinen) heißt die Gesetzgebungsstufe nicht EURO sondern Stufe. Seit Inkrafttreten der Stufe 1 1999, also knapp 7 Jahre nach der Einführung von EURO 1, werden die erlaubten Emissionen auch bei mobilen Arbeitsmaschinen stetig strenger limitiert. Mit 1.1.2013 gilt für mobile Arbeitsmaschinen bei der Typprüfung Stufe 4 und ab 1.1.2014 für alle neu zugelassenen Bau- und Landmaschinen. Die in diesem Kapitel angeführten Inhalte stammen, sofern nicht anders angegeben, aus der EU Richtlinie 26/2010 [4].

2.2.1 Grenzwerte

Die gesetzlich vorgegebenen Emissions- und Dauerhaltbarkeitslimits sind in **Tabelle 2-7** und **Tabelle 2-8** aufgeführt. Im Gegensatz zu Straßenfahrzeugen werden die Abgasgrenzwerte zusätzlich in Leistungsklassen unterteilt. Oberhalb von 560 kW und unterhalb von 56 kW gelten andere Emissionsgrenzwerte. Die Bestimmung der Verschlechterungsfaktoren für eine Motorenfamilie erfolgt mittels Betriebsakkumulationsprogramm am Motorprüfstand. Alternativ können die gesetzlich vorgegebenen Verschlechterungsfaktoren der **Tabelle 2-9** verwendet werden.

Tabelle 2-7: Emissionsgrenzwerte Offroad

	Leistungsklasse	CO	THC	NOx	PM Masse
		g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
NRSC	130 kW ≤ P < 560	3,5	0,19	0,4	0,025
NRSC	56 kW ≤ P < 130	5,0	0,19	0,4	0,025
NRTC	130 kW ≤ P < 560	3,5	0,19	0,4	0,025
NRTC	56 kW ≤ P < 130	5,0	0,19	0,4	0,025
NTE	130 kW ≤ P < 560	5,25	0,285	0,6	0,0375
NTE	56 kW ≤ P < 130	7,5	0,285	0,6	0,0375

Tabelle 2-8: Dauerhaltbarkeitslimits Offroad[1]

Leistungsklassen	Dauerhaltbarkeit (in Betriebsstunden)
≤ 37 kW (bei konstanter Drehzahl)	3000 Stunden
≤ 37 kW (bei nicht konstanter Drehzahl)	5000 Stunden
≥ 37 kW	8000 Stunden

Tabelle 2-9: Verschlechterungsfaktoren Offroad

	CO	THC	NOx	PM Masse
NRSC	1,3	1,3	1,15	1,05
NRTC	1,3	1,3	1,15	1,05

2.2.2 Ermittlung der dynamischen Vollastlinie

Die dynamische Vollastkurve wird wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben ermittelt.

2.2.3 NRSC (Nonroad Stationary Cycle)

Dieser stationäre Emissionsprüfzyklus, auch C1-Test genannt, besteht aus 8 Drehzahl- und Leistungsstufen, dargestellt in **Tabelle 2-10**. Die Referenzwerte müssen mithilfe der dyn. Vollastkurve des zu prüfenden Motors umgerechnet werden. Die Vorkonditionierung erfolgt bei maximalem Drehmoment sowie Nenndrehzahl.

Tabelle 2-10: NRSC (C1)

Prüfphase	Drehzahl	Last	Mindestprüfphasendauer	Wichtungsfaktor
		[%]	[min]	
1	Referenzdrehzahl	100	10	0,15
2	Referenzdrehzahl	75	10	0,15
3	Referenzdrehzahl	50	10	0,15
4	Referenzdrehzahl	10	10	0,10
5	Zwischendrehzahl	100	10	0,10
6	Zwischendrehzahl	75	10	0,10
7	Zwischendrehzahl	50	10	0,10
8	Leerlaufdrehzahl	0	10	0,15

Die Referenzdrehzahl n_{ref} wird mithilfe folgender Formel berechnet:

$$n_{\text{ref}} = n_{\text{lo}} + 0,95 \times (n_{\text{hi}} - n_{\text{lo}})$$

Darin ist:

n_{lo} höchste Drehzahl, bei der 50% der Maximalleistung noch erreicht werden

n_{hi} höchste Drehzahl, bei der 70% der Maximalleistung noch erreicht werden

Der Zwischendrehzahlwert ist mit 60 Prozent der Referenzdrehzahl definiert. Die angegebenen Lastprozentwerte müssen mit dem Maximalmoment des zu prüfenden Motors multipliziert werden um den Drehzahlwert für den jeweiligen Betriebspunkt zu erhalten.

2.2.3.1 Auswertung des NRSC

Die bremspezifischen Zyklusemissionen für gasförmige Schadstoffen können anhand folgender Formel berechnet werden:

$$e_{\text{gas}} = \frac{\sum_{i=1}^n (m_{\text{gas},i} \times W_{\text{F},i})}{\sum_{i=1}^n (P_i \times W_{\text{F},i})}$$

Darin ist:

e_{gas} bremspezifische Emission der gasförmigen Komponente in g/kWh

$m_{\text{gas},i}$ Masse der gasförmigen Komponente eine Prüfphase in g/h

P_i Leistung der einzelnen Prüfphase

$W_{\text{F},i}$ Wichtungsfaktor einer Prüfphase

Die mithilfe dieser Formeln berechneten Zyklusemissionen multipliziert mit den in **Tabelle 2-9** dargestellten dazugehörigen Verschlechterungsfaktoren müssen für ein positives Ergebnis kleiner gleich der in **Tabelle 2-7** angegebenen Emissionsgrenzwerte sein. Falls die Verschlechterungsfaktoren mittels Betriebsakkumulationsprüfung ermittelt wurden sind diese Werte zu verwenden.

2.2.4 NRTC (Nonroad Transient Cycle)

Der NRTC, dargestellt in **Abbildung 2-9**, ist ein transienter Emissionsprüfzyklus welcher sich aus den realen Fahrprofilen von mobilen Arbeitsmaschinen zusammensetzt. Die normierten Drehzahl- und Drehmomentwerte ändern sich im Sekundentakt und müssen mithilfe der dynamischen Vollastkurve umgerechnet werden. Beim Kalt-WHTC wird der Motor kalt, d.h. bei einer Umgebungstemperatur von $25\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$, gestartet. Nach dem Durchlauf des Tests erfolgt eine Abkühlphase von 20 Minuten. Anschließend wird der Warm-NRTC gestartet.

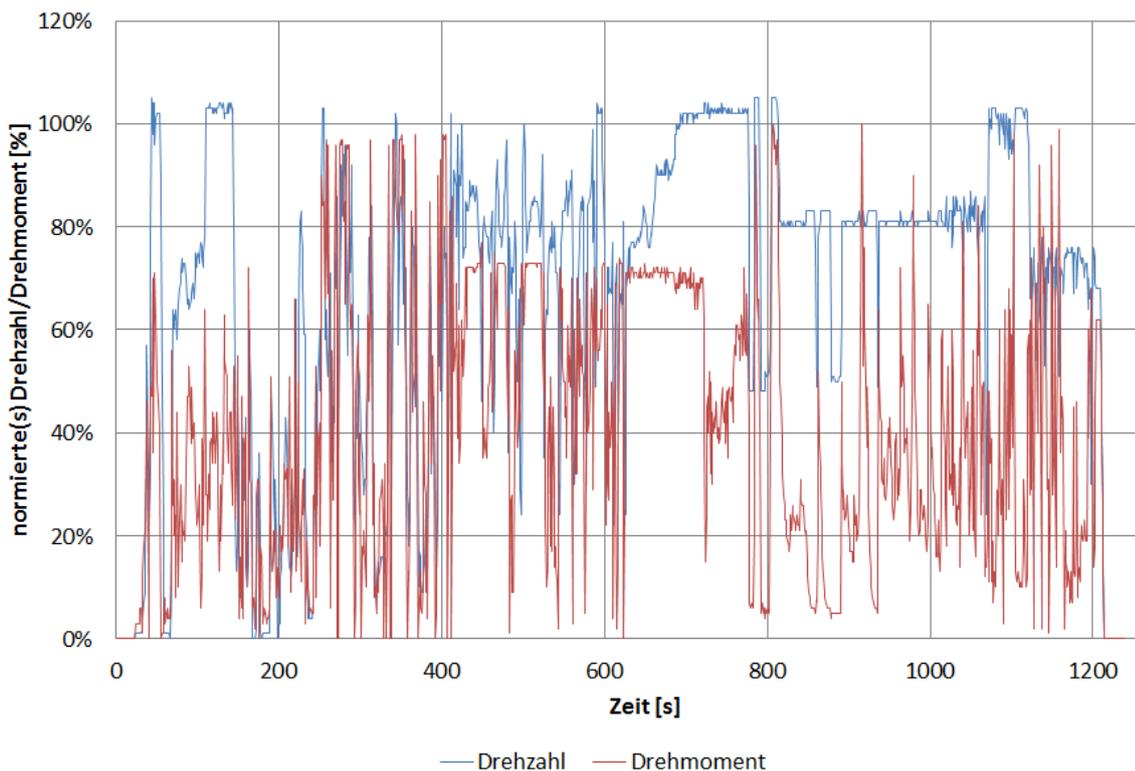


Abbildung 2-9: Schematisches Profil des NRTC

2.2.4.1 Entnormierung des NRTC

Die Drehzahlwerte werden mit folgender Formel entnormiert:

$$n_{\text{aktuell}} = n_{\text{norm}} \times (n_{\text{ref}} - n_{\text{idle}}) + n_{\text{idle}}$$

Dabei ist:

n_{norm} angegebener Drehzahlwert in %

n_{idle} Leerlaufdrehzahl

n_{ref} Referenzdrehzahl

Das Drehmoment wird mit folgender Formel entnormiert:

$$M = \frac{(M_{\text{norm}} \times M_{\text{max}})}{100}$$

Darin ist:

M_{norm} normiertes Drehmoment in %

M_{max} maximales Drehmoment

2.2.4.2 Auswertung NRTC

Die Auswertung ist identisch mit der des WHTC, siehe Kapitel 2.1.4.2, mit dem Unterschied, dass die Gewichtung zwischen Kalt-NRTC und Warm-NRTC nicht dieselbe ist. Zur Ermittlung der bremspezifischen Emissionen wird die Zyklusarbeit benötigt. Diese lässt sich durch Integration der Motorleistung über den Zyklus bestimmen.

Für das finale Prüfergebnis des NRTC müssen Kalt- und Warmzyklus nach folgender Formel gewichtet werden:

$$e = \frac{(0,10 \times m_{\text{cold}}) + (0,90 \times m_{\text{hot}})}{(0,10 \times W_{\text{act,old}}) + (0,90 \times W_{\text{act,hot}})}$$

Hierbei ist:

e spezifische Emission in g/kWh

m_{cold} Massenemission des Bestanteils des Kalt-WHTC in g/Prüfung

m_{hot} Massenemission des Bestanteils des Warm-WHTC in g/Prüfung

$W_{\text{act,cold}}$ Zyklusarbeit des Kalt-WHTC in kWh

$W_{\text{act,hot}}$ Zyklusarbeit des Warm-WHTC in kWh

Die mithilfe dieser Formeln berechneten Zyklusemissionen multipliziert mit den in **Tabelle 2-9** dargestellten dazugehörigen Verschlechterungsfaktoren müssen für ein positives Ergebnis kleiner gleich der in **Tabelle 2-7** angegebenen Emissionsgrenzwerte sein. Falls die Verschlechterungsfaktoren mittels Betriebsakkumulationsprüfung ermittelt wurden sind diese Werte zu verwenden.

2.2.5 NTE (Not-To-Exceed) Bereich

Wie beim Onroad Nutzfahrzeug gibt es auch für mobile Arbeitsmaschinen einen NTE-Kontrollbereich, in dem die Off-Cycle Emissionen limitiert sind.

2.2.5.1 Bestimmung des NTE-Kontrollbereichs

Abbildung 2-10 zeigt den NTE Kontrollbereich in dem die oben genannten Emissionsgrenzwerte unter den gesetzlich vorgegebenen Umgebungsbedingungen keinsfalls überschritten werden dürfen.

$n_{15\%ESC}$ Drehzahl die mit unten angeführter Formel berechnet wird

$$n_{15\%ESC} = n_{lo} + 0,15 \times (n_{hi} - n_{lo})$$

n_{hi} die höchste Drehzahl, bei der sich 70 % der Maximalleistung einstellen

n_{lo} die höchste Drehzahl, bei der sich 50 % der Maximalleistung einstellen

30% M_{max} 30% Wert des maximalen Drehmomentes

30% P_{max} 30% Wert der Maximalleistung

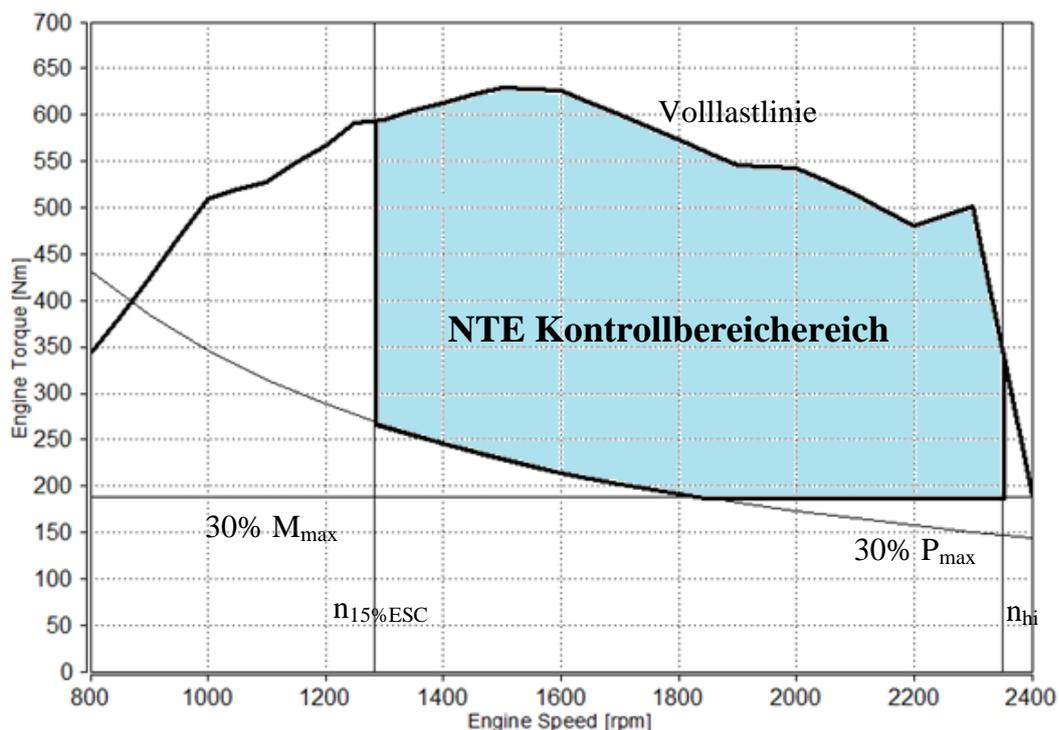


Abbildung 2-10: Beispiel eines NTE Kontrollbereichs

2.2.5.2 Umgebungsbedingungen

Die Umgebungsbedingungen des NTE-Bereichs sind identisch mit denen des WNT-Controllbereichs angeführt in Kapitel 2.1.5.2.

2.2.5.3 NTE-Testprozedur

Es werden zufällig 3 Betriebspunkte innerhalb des NTE-Bereichs ausgewählt die in zufälliger Reihenfolge angefahren werden, und den prinzipiellen Anforderungen des NRSC folgen. Die Emissionen werden für jeden Punkt separat bestimmt und müssen kleiner gleich der in **Tabelle 2-7** angeführten Grenzwerte sein um ein positives Ergebnis zu erzielen.

3 Emissionsbewertung mithilfe eines Motormodells

Der Ausstoß von Schadstoffemissionen wird immer strenger limitiert. Dadurch steigt die Komplexität der Systeme und somit erhöht sich der Kalibrieraufwand stetig. Computergestützte Motormodelle bieten Unterstützung um die Budget- und Zeitgrenzen bei den immer komplexeren Systemen einzuhalten.

Die MiL Simulation erfolgt offline, d.h. am PC. Alle Komponenten und Systeme werden simuliert. Bei modernen Rechensystemen liegt die Testdauer deutlich unter der realen Testzeit.

Damit die Testzyklen für die On- und Offroad Emissionsgesetzgebung am Modell simuliert werden können müssen diese, wie bereits im Theorieteil erläutert, anhand der ermittelten dynamischen Vollastlinie entnormiert werden. Im Anschluss an die MiL Simulation erfolgt die Auswertung der Daten sowie die Berechnung der Zyklusergebnisse, welche zur Emissionsbewertung verwendet werden. Die Auswertung der Daten erfolgt mittels AVL Concerto¹. Die Grenzwerte für HC und CO stellen bei heutigen Dieselmotoren aufgrund der hohen Oxidationsraten des DOC nahezu keine Probleme dar und werden deshalb nicht betrachtet. Das verwendete Motormodell besitzt keinen DPF. Dieser ist jedoch aufgrund der Limitierung der Partikelanzahl für die Erfüllung von EURO 6 erforderlich. Daher werden im Zuge der MiL-Simulation nur die NO_x Emissionen und der spezifische Kraftstoffverbrauch genau betrachtet. Bei den Partikeln werden nur die Trends analysiert, da die Grenzwerte bei Adaption eines DPF erfüllt werden würden.

3.1 Das Motormodell [5]

Bei dem in dieser Arbeit verwendeten Motormodell handelt es sich um ein vom AVL MoBEOTM (Model Based Engine Optimization) Team entwickeltes Motormodell eines Dieselmotors. Das Modell der mobilen Arbeitsmaschine (Offroad Anwendung) erfüllt in der Standardkonfiguration die Abgasnorm Stufe 4 bzw. Tier 4 final.

Das verwendete Motormodell, dargestellt in **Abbildung 3-1**, besteht aus drei Bereichen:

- dem virtuellen Motor
- der virtuellen ECU
- den virtuellen Sensoren und Aktuatoren

Jeder dieser Bereiche basiert auf Matlab/Simulink Blöcken. Der virtuelle Motor beinhaltet die Verbrennung, Aufladung, AGR und die Abgasnachbehandlung. Die gasführenden Strukturen werden auf Volumina und Strömungswiderstände reduziert, d.h. null-dimensionale Systeme.

Eingangsgrößen des Motormodells:

- Motordrehzahl
- gewünschtes Drehmoment
- Druck, Temperatur und Luftfeuchtigkeit des Umgebungszustandes

¹ Datenauswertungssoftware

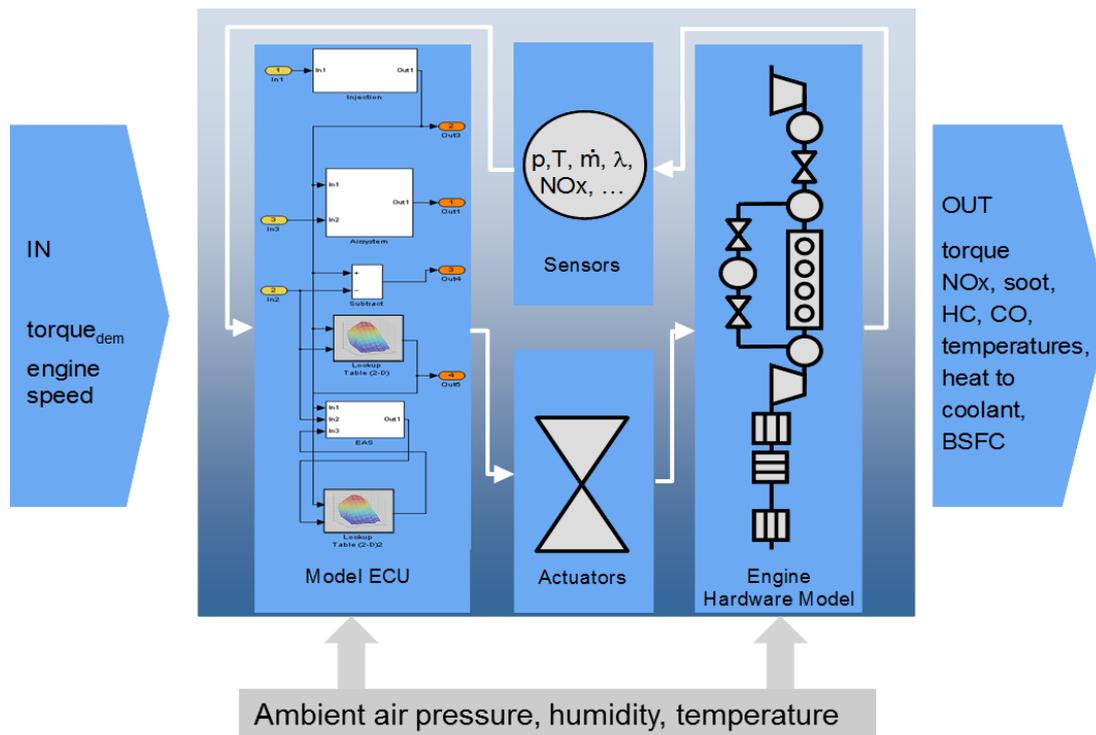


Abbildung 3-1: Das Motormodell [5]

Die wichtigsten Ergebnisgrößen des Motormodells:

- dynamischer Drehmomentenverlauf
- Schadstoffemissionen
- Kraftstoffverbrauch
- Abwärmestrom ins Kühlwasser
- Temperaturen und Drücke
- uvm.

Für den Simulationsbetrieb dieses Motormodells wird ein ECU Modell benötigt, welches die wichtigsten Steuer- und Regelfunktionen einer realen ECU beinhaltet. Damit kann das Motormodell wie am Prüfstand betrieben werden.

Die Sauerstoffkonzentration, der 50 % Umsatzpunkt der Verbrennung, Ladungsmasse und Ladungstemperatur sowie die Motordrehzahl sind die Haupteinflussgrößen des NO_x Modells. Beim Soot Modell sind das u.a. AGR Rate, Motordrehzahl, λ , Raildruck sowie Nacheinspritzung.

3.1.1 Motordaten

- Hubraum: 4 Liter
- Nennleistung: 120 kW bei 2300 U/min
- Max. Drehmoment: 630 Nm bei 1500 U/min
- ATL mit mechanischem Wastegate
- Ladeluftkühler
- Drosselklappe (vor Saugrohr)
- Ungekühltes EGR (Positionsregelung)
- SCR Katalysator
- Haupt- und Nacheinspritzung

Motor/EAS Vorkonditionierung und Unterscheidung zwischen kaltem und warmem Zyklus sind mit diesem Motormodell nicht möglich. Daraus folgt, dass die Kalibrierung für die Kombination von Kalt- und Warmzyklus eventuell nochmal angepasst werden müsste, um die gesetzlichen Emissionsgrenzwerte einzuhalten.

Alle Temperaturen werden beim Simulationsstart automatisch auf 25 °C initialisiert. Die gesetzliche vorgeschriebene Umgebungstemperatur bei der WHSC, WHTC, NRSC und NRTC durchgeführt werden müssen, beträgt 25 °C ± 5 °C. Weiters werden die Testzyklen unter Non-Standardbedingungen simuliert, um den Einfluss auf die Emissionen zu untersuchen und zu bewerten. Während der Simulation sind keine ECU Korrekturfunktionen für die Umgebungszustände aktiv.

3.1.2 AGR Regelung des Motormodells

Die Abgasrückführung wird bei dem in dieser Arbeit verwendeten Motormodell positionsgeregt. D.h. das AGR Ventil wird auf eine bestimmte Position eingeregelt. Ein Problem dieser Regelstrategie ist, dass der ATL Wirkungsgrad nicht berücksichtigt wird. Dieser verschlechtert sich über die Bauteillebensdauer, und damit sinkt der Ladedruck. In weiterer Folge ändert sich somit bei derselben AGR Ventilposition die AGR Rate und damit ändern sich die Schadstoffemissionen. In der Praxis wird das AGR üblicherweise noch zusätzlich über andere Parameter (z.B.: das Luftverhältnis) geregelt.

3.2 Maßnahmen zur Minimierung von NOx [7]

Im Folgenden werden kurz die für diese Arbeit relevanten Maßnahmen zur NOx Minimierung erläutert. Die angeführten Inhalte können, sofern nicht anders angegeben, in der Literatur [7] nachgeschlagen werden. Für die interessierten LeserInnen sei erwähnt, dass die Bildungsmechanismen, Simulation und detaillierte Beschreibung der Maßnahmen zur NOx Minimierung der Literatur [7] zu entnehmen sind.

Abbildung 3-2 zeigt die Abhängigkeit der Schadstoffbildung im Dieselmotor vom Luftverhältnis und der damit verbundenen lokalen Verbrennungstemperatur. Wegen der hohen Oxidationsraten im DOC haben sich beim Dieselmotor NOx und PM als die kritischen Emissionen herauskristallisiert. Aufgrund der hohen Temperaturen sind die NOx Bildungsraten bei nahezu stöchiometrischen Flammzonen am höchsten. [9]

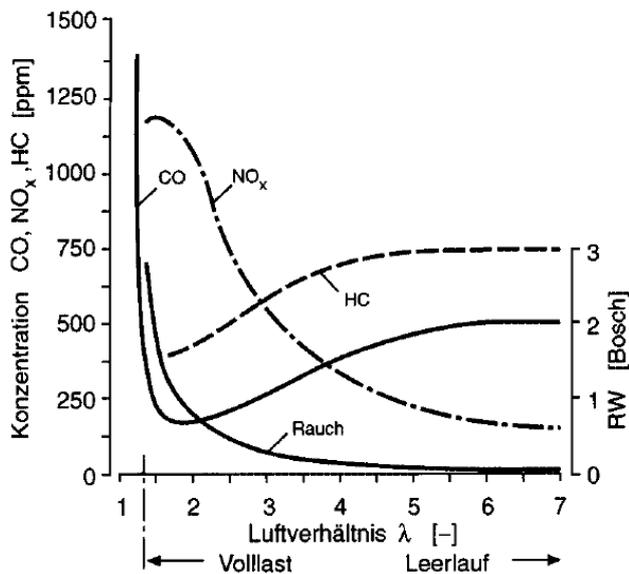


Abbildung 3-2: Schadstoffbildung im Dieselmotor über dem Luftverhältnis[9]

Den maßgebenden Stickoxidanteil im Verbrennungsmotor stellen die thermischen NOx dar. Thermische NOx entstehen bei hohen Temperaturen (> 2300 K) und werden durch die Zeldovich Gleichungen beschrieben. Daraus folgt, dass zur Reduzierung der NOx Bildung die Verbrennungstemperatur gesenkt werden muss. Die Stickoxide können einerseits durch innermotorische Eingriffe und andererseits durch Abgasnachbehandlungssysteme reduziert werden.

3.2.1 Innermotorische NO_x Minimierung

Bei der innermotorischen NO_x Minimierung muss der NO_x/Ruß Trade Off, dargestellt in **Abbildung 3-3**, beachtet werden. D.h. bei der innermotorischen Reduktion von NO_x erhöhen sich theoretisch die Rußemission.

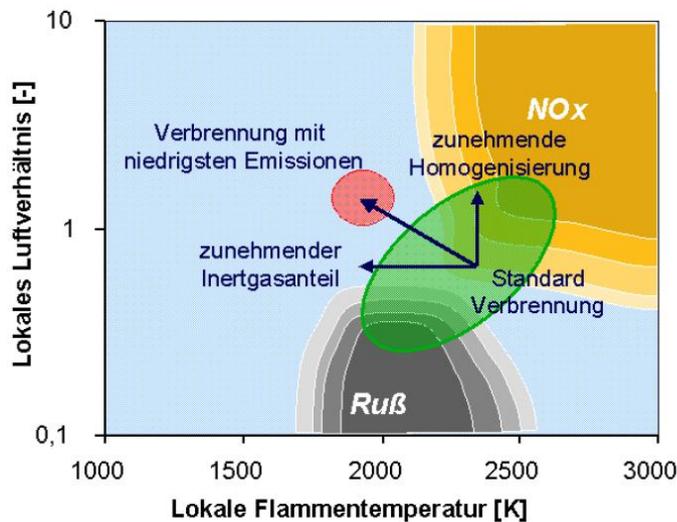


Abbildung 3-3: Grundsätzliches Vorgehen zur NO_x Reduktion bei Verbrennungsmotoren [6]

3.2.1.1 Abgasrückführung

Die Abgasrückführung (engl.: EGR = Exhaust Gas Recirculation) ist eine sehr wirksame Maßnahme zur Reduzierung der NO_x Emissionen. Dabei wird der angesaugten Frischluft Inertgas zugeführt. Die wegen des rückgeführten H₂O höheren spezifischen Wärmekapazitäten und der Verdünnungseffekt des Inertgases reduzieren die Verbrennungstemperatur und senken somit die NO_x Emissionen.

3.2.1.2 Änderung der Verbrennungsschwerpunktlage

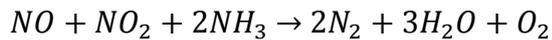
Aus thermodynamischer Sicht wäre die isochore Verbrennung im OT ideal. Da die reale Verbrennung verlustbehaftet ist, liegt die optimale Schwerpunktlage der Verbrennung einige °KW nach dem OT. Bei Nutzfahrzeugen ist diese, abhängig vom Hubraum, bei Vollast ca. 3 bis 4 °KW nach OT. Der hohe Wirkungsgrad und die damit verbundenen hohen Prozesstemperaturen bei dieser Schwerpunktlage begünstigen die thermische Stickoxidbildung. Um die Temperaturen zu senken, wird der Einspritzbeginn verändert. Durch einen späteren Einspritzbeginn wird die Schwerpunktlage nach hinten (Richtung spät) verschoben. Dadurch wird aufgrund der langsameren Verbrennung die Verbrennungstemperatur gesenkt und somit die NO_x Bildung reduziert. Diese Methode zur NO_x Minimierung wirkt sich negativ auf den Wirkungsgrad aus.

3.2.2 Abgasnachbehandlungssysteme zur NO_x Minimierung

Bei schweren Nutzfahrzeugen werden überwiegend Dieselmotoren eingesetzt. Hierbei kommt ausschließlich die selektive katalytische Reduktion (engl.: SCR = Selective Catalytic Reduction) als Abgasnachbehandlungssystem zum Einsatz. Deshalb wird in dieser Arbeit nur diese Technologie erläutert.

3.2.2.1 SCR Katalysator [8]

Aufgrund des hohen Luftüberschusses im Dieselmotorabgas sind CO und HC wie beim 3-Wege Katalysator nicht geeignet zur Stickoxidreduktion. Als Reduktionsmittel hat sich Ammoniak (NH_3) durchgesetzt. Der Ammoniaktransport im Fahrzeug ist aus sicherheitstechnischen Gründen unmöglich, daher wird NH_3 mithilfe einer in den Abgasstrang eingespritzten wässrigen Harnstofflösung (Handelsname AdBlue) erzeugt. Das Dosiersystem spritzt das AdBlue, welches in einem separaten Tank mitgeführt wird, kennfeldabhängig ein. Damit können die Stickoxide nach der unten angegebenen Gleichung reduziert werden.



Die Konvertierungsrate bei modernen SCR Katalysatoren welche im geeigneten Temperaturfenster betrieben werden liegt bei bis zu 99%.

3.2.2.2 Auswirkungen der SCR Temperatur auf die Stickoxidemissionen

Die Auswirkungen der NO_x Konvertierungsrate in Abhängigkeit von der SCR Temperatur und vom Verhältnis NO zu NO_2 sind in **Abbildung 3-4** zu sehen. Die Grafik verdeutlicht, dass bei niedriger SCR Temperatur die NO_x Konvertierungsrate stark abnimmt. D.h. um möglichst viel NO_x zu konvertieren, sollte die Temperatur im Katalysator mindestens $280\text{ }^\circ\text{C}$ betragen. Ebenso hat das Verhältnis von NO zu NO_2 einen nicht unerheblichen Einfluss. Im Idealfall sollen beide Komponenten zu gleichen Teilen vorhanden sein.

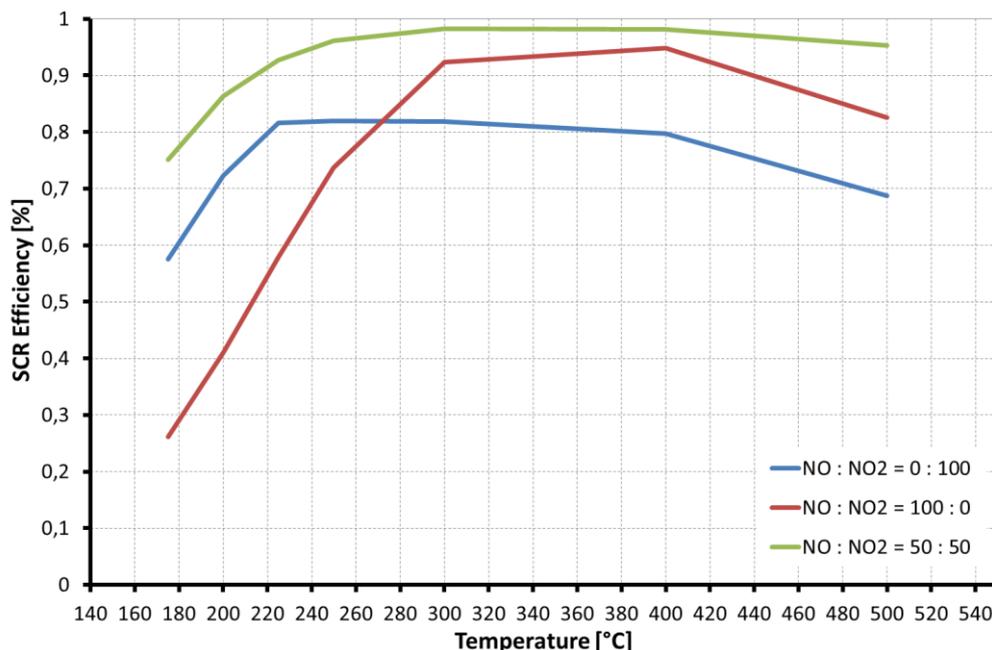
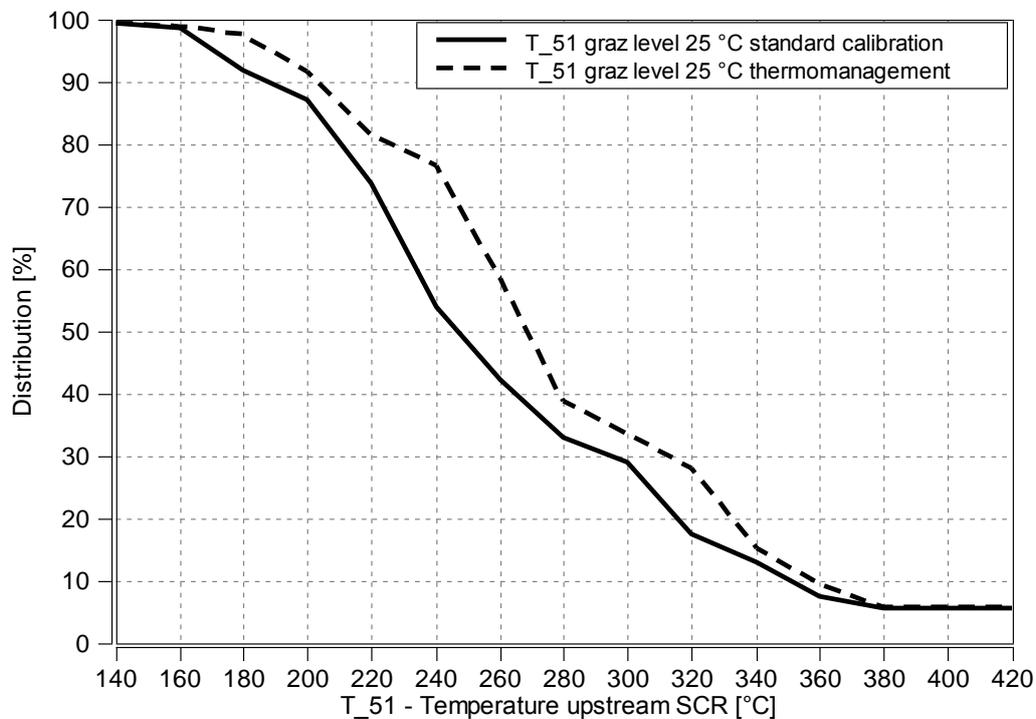


Abbildung 3-4: NO_x Konvertierungsrate über der SCR Temperatur [12]

Eine gängige Maßnahme zur Steigerung der Abgastemperatur ist das Drosseln der Ansaugluft – auch Thermomanagement genannt – mithilfe einer Drosselklappe. Somit steigt bei gleicher Kraftstoffeinspritzmenge die Abgastemperatur. Die Wärmezufuhr lässt sich durch das Produkt von Masse, spezifischer Wärmekapazität und der Temperaturänderung berechnen. Daraus folgt, dass eine Reduktion der Masse einen Temperaturanstieg zur Folge hat. Die Auswirkungen der Drosselung auf die Abgastemperatur ist in **Abbildung 3-5** ersichtlich. Durch das Thermomanagement wird die Verbrennungstemperatur erhöht, dadurch steigen die NO_x Rohemissionen. Aufgrund der höheren Verbrennungstemperatur steigt auch die Abgastemperatur und somit können im SCR Katalysator mehr NO_x reduziert werden. Allein

durch Drosseln im Leerlauf und Schubetrieb ist es möglich, die SCR Temperatur im WHTC stark anzuheben. Im Vergleich zur Standardkalibration bei 25 °C, wo nur 53 % der Temperatur über 240 °C liegen, sind es mit Drosseln schon 76 %. Somit steigt die Konvertierungsrate des SCR Katalysators und somit sinken die NOx TP Emissionen.

Abbildung 3-5: T_51 Verteilung im WHTC



3.3 Simulation verschiedener Lastprofile unter unterschiedlichen Umgebungsbedingungen

Ziel der Untersuchungen am Motormodell ist es, die Auswirkungen unterschiedlicher Umgebungsbedingungen bei verschiedenen Prüfzyklen auf die Schadstoffemissionen darzustellen. Weiters wird die Standardkalibrierung der mobilen Arbeitsmaschine (Offroad) adaptiert, um die Grenzwerte für EURO 6 (Onroad) zu erfüllen.

3.3.1 Auswahl der Umgebungsbedingungen

Motoren müssen zur Zertifizierung je nach ihrem Einsatzgebiet u.a. den WNTe (Onroad) bzw. NTE (Offroad) Prüfzyklus bestehen. Die unten angeführten Umgebungsbedingungen ergeben sich aus den Randbedingungen dieses Testzyklus. Zusätzlich werden die Prüfzyklen noch bei 25 °C / Graz Niveau und 10 °C / 1680m simuliert.

Umgebungsbedingungen für die Prüfzyklen:

- -7 °C / Graz Niveau (Randbedingung WNTe / NTE Test)
- 25 °C / Graz Niveau
- 38 °C / Graz Niveau (Randbedingung WNTe / NTE Test)
- 10 °C / 1680 m
- 30 °C / 1680 m (Randbedingung WNTe / NTE Test)

3.3.2 Kalibrierstrategien

In diesem Kapitel werden die verwendeten Kalibrationsstrategien genauer erläutert. Um die geforderten Emissionslimits der verschiedenen Testzyklen zu erfüllen und um die Auswirkungen in Bezug auf die Schadstoffemissionen bewerten zu können, werden die unten angegebenen Kalibrierstrategien untersucht.

- **a) Standardkalibrierung (standard calibration):** Standardabstimmung, mit der die Abgasnorm Stufe 4 bzw. Tier 4 final erfüllt wird.
- **b) Thermomanagement (thermomanagement):** Da die Onroad Prüfzyklen im Vergleich zu Offroad Prüfzyklen niederlastiger sind, muss aus Thermomanagementgründen die Abgastemperatur angehoben werden um eine gute Konvertierungsrate im SCR Katalysator zu erzielen. Dazu wird mittels Drosselklappe die Menge der Ansaugluft reduziert (geringeres λ), somit erhöht sich bei gleichbleibender Einspritzmenge die Abgastemperatur. Dadurch steigt die NOx Konvertierungsrate im SCR Katalysator und die NOx TP Emissionen sinken.

Bei dieser Kalibrierstrategie erfolgt die Drosselung (Drosselklappenposition wird fix vorgegeben) im Leerlauf- und Schubbetrieb über den gesamten Lastbereich.

- **c) Finale Kalibrierung (final calibration):** Hier wird bis zu einer Drehzahl von 1100 U/min gedrosselt. Zusätzlich wird einerseits die AGR Ventilposition verändert um die AGR Rate zu erhöhen und andererseits der Einspritzzeitpunkt der Haupteinspritzung variiert um die NOx Emissionen zu reduzieren.

Einstellungen:

- Drosselung bei 700-1100 U/min
 - +15 % AGR Ventilposition bei 700-900 U/min
 - +30% AGR Ventilposition bei 1100-1600 U/min
 - -1 °KW spätere Haupteinspritzung bei 1100-1600 U/min
- **d) λ – Regelung (lambda controlled):** Ziel ist es die AGR Rate so anzupassen, dass bei allen Umgebungszuständen die λ Werte der einzelnen Betriebspunkte maximal um $\pm 0,01$ von der Basis abweichen. Als Basis dient die Standardkalibrierung des NRSC bei Graz Niveau und 25 °C.
- **e) NO_x EO – Regelung (NO_x EO controlled):** Die NO_x EO Emissionen aller Umgebungszustände sollen nur mittels AGR Rate (Ausnahme: Graz Niveau bei -7 °C) so angepasst werden, dass die NO_x EO Emissionen maximal um ± 1 % von der Basis abweichen. Als Basis dient die finale Kalibrierung des WHTC bei Graz Niveau und 25 °C. Die folgenden Anpassungen sind nur für den WHTC gültig. Zweck der NO_x EO Regelung ist es, die Auswirkungen dieser Kalibrationsstrategie auf die Emissionen zu untersuchen.

Einstellungen:

- Graz Niveau / 38 °C: -12 % AGR Ventilposition bei 1100-2400 U/min
- Graz Niveau / -7 °C: -12 % AGR Ventilposition bei 1100-2400 U/min
-3° KW spätere Haupteinspritzung bei
1100-1600 U/min
- 1648 m / 30 °C: -16,5 % AGR Ventilposition bei
1100-2400 U/min
- 1648 m / 10 °C: -1,5 % AGR Ventilposition bei 1100-2400 U/min

Die finale Kalibrierung (c) wurde speziell an den WHTC angepasst, da bei diesem Zyklus die NO_x Emissionsgrenzwerte mit der Standardkalibrierung über dem gesetzlichen Limit lagen. WHSC, NRSC und NRTC werden mit der finalen Kalibrierung simuliert, um den Einfluss auf die Emissionen bewerten zu können.

Die λ -Regelung und die NO_x EO-Regelung werden mithilfe dieses Motormodells getestet um die Auswirkungen und Sinnhaftigkeit dieser Kalibrationsstrategien beurteilen zu können.

3.3.3 Ergebnisse

Die angegebenen Emissionslimits gelten nur für die Standardbedingungen bei 25°C, da der Prüfzyklus nur bei diesen Bedingungen durchgeführt werden muss. Die restlichen Umgebungsbedingungen dienen der Emissionsbewertung.

Weiters sei hier nochmals erwähnt, dass mit dem hier verwendeten Motormodell eine Unterscheidung zwischen kaltem und warmen Prüfzyklus sowie eine Vorkonditionierung von Motor und EAS nicht möglich ist. Die folgenden Ergebnisse beziehen sich daher auf den warmen Zyklus. Die Zyklusergebnisse bei NRTC und WHTC setzen sich aus einem kalten und einem warmen Prüfzyklus zusammen, wobei Ersterer einen großen Einfluss auf das Gesamtergebnis hat. Die Gewichtung des kalten Prüfzyklus ist gering (14% beim WHTC), jedoch die Emissionen sind aufgrund des kalten EAS sehr hoch. Anschließend müssen noch die Verschlechterungsfaktoren berücksichtigt werden. Dies hat zur Folge, dass die finale Kalibrierung nochmals adaptiert werden müsste um die Grenzwerte für EURO 6 zu erfüllen.

Die Partikelemissionen ergeben sich durch Addition der mittels SOOT Modell berechneten SOOT Werte und einem Faktor für lösliche Partikel.

An dieser Stelle sei noch einmal erwähnt, dass während der MiL-Simulation keine ECU Korrekturfunktionen für die Umgebungszustände aktiv sind.

Die Emissionstrends sind bei den verschiedenen Testzyklen und Umgebungsbedingungen ähnlich. Die folgenden Unterkapitel beinhalten die Zyklusergebnisse aller simulierten Prüfzyklen, wobei die Ergebnisse des NRSC und des WHTC genauer interpretiert, da hier zusätzliche Kalibrationsstrategien (NO_x EO-Regelung und λ -Regelung) getestet werden.

3.3.3.1 WHSC

Die Zyklusergebnisse des WHSC sind in **Tabelle 3-1** abgebildet. Aufgrund des geringen Abgasmassenstroms im Leerlauf hat das Thermomanagement beim WHSC keinen nennenswerten Einfluss auf die Zyklusemissionen. Die angegebenen Emissionslimits gelten nur für die Standardbedingungen Graz Niveau und 25 °C.

Den Zyklusergebnissen ist zu entnehmen, dass die Emissionsgrenzwerte für NO_x eingehalten werden.

Der Trend bezüglich der NO_x EO Emissionen ist mit Ausnahme der NO_x EO Regelung bei allen Kalibrierstrategien ähnlich. Die NO_x EO Emissionen steigen bei niedrigen Umgebungstemperaturen, und fallen bei hohen. Der Grund dafür ist die Temperaturabhängigkeit der Luftdichte. Somit ist der kritische Umgebungszustand bezüglich NO_x EO der bei -7 °C. Da die Luftdichte mit fallender Temperatur zunimmt erhöht sich die Luftmasse bei diesem Umgebungszustand. Aus diesem Grund steigt bei gleichbleibender AGR Ventilposition das Luftverhältnis und die NO_x Bildung und die Roh-NO_x Emission nehmen zu (siehe **Abbildung 3-2**).

Tabelle 3-1: Zyklusergebnisse WHSC

Cycle Emissions							
			NO _x _TP_S	NO _x _EO_S	SOOT	PM	BSFC
			g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
Emission Limit: EURO 6			0,40	-	-	0,001	-
Standard Conditions							
graz level	25 °C	standard calibration	0,22	5,96	0,003	0,003	235,5
graz level	25 °C	thermomanagement	0,22	6,04	0,003	0,003	237,1
graz level	25 °C	final calibration	0,16	4,89	0,002	0,003	238,3
Non-Standard Conditions							
graz level	38 °C	standard calibration	0,19	5,70	0,006	0,007	237,8
graz level	38 °C	thermomanagement	0,20	5,77	0,006	0,006	239,1
graz level	38 °C	final calibration	0,15	4,58	0,006	0,007	240,8
graz level	-7 °C	standard calibration	0,31	6,44	0,001	0,002	230,5
graz level	-7 °C	thermomanagement	0,32	6,53	0,000	0,001	232,5
graz level	-7 °C	final calibration	0,24	5,58	0,000	0,001	233,0
1648 m	30 °C	standard calibration	0,20	5,73	0,016	0,016	239,7
1648 m	30 °C	thermomanagement	0,20	5,81	0,016	0,016	241,1
1648 m	30 °C	final calibration	0,15	4,60	0,017	0,017	242,9
1648 m	10 °C	standard calibration	0,22	6,17	0,006	0,006	235,6
1648 m	10 °C	thermomanagement	0,22	6,19	0,005	0,006	237,3
1648 m	10 °C	final calibration	0,17	5,19	0,005	0,006	238,5

3.3.3.2 WHTC

Hier wird eine zusätzliche Kalibrierstrategie – die NO_x EO Regelung – untersucht und deren Einfluss auf die Emissionen bewertet. Mit dieser Strategie wird untersucht, ob eine Regelung auf bestimmte NO_x EO Werte sinnvoll ist. Die angegebenen Emissionslimits gelten nur für die Standardbedingungen Graz Niveau und 25 °C. Die Zyklusergebnisse sind der **Tabelle 3-2** zu entnehmen. Da die gesetzlich limitierten NO_x Emissionen mit der Standardkalibrierung im WHTC überschritten werden, musste die Kalibrierung angepasst werden.

Die NO_x EO Emissionen steigen bei niedrigen Umgebungstemperaturen, und fallen bei hohen. Der Grund dafür ist die Temperaturabhängigkeit der Luftdichte. Somit ist der kritische Umgebungszustand bezüglich NO_x EO der bei -7 °C. Da die Luftdichte mit fallender Temperatur zunimmt erhöht sich die Luftmasse bei diesem Umgebungszustand. Aus diesem Grund steigt bei gleichbleibender AGR Ventilposition das Luftverhältnis und die NO_x Bildung und die Roh-NO_x Emission nehmen zu (siehe **Abbildung 3-2**).

Tabelle 3-2: Zyklusergebnisse WHTC

Cycle Emissions							
			NO _x _TP_S	NO _x _EO_S	SOOT	PM	BSFC
			g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
Emission Limit: EURO 6			0,46	-	-	0,001	-
Standard Conditions							
graz level	25 °C	standard calibration	0,65	5,12	0,032	0,032	243,5
graz level	25 °C	thermomangement	0,51	5,19	0,034	0,035	245,6
graz level	25 °C	final calibration	0,44	4,29	0,045	0,045	246,8
Non-Standard Conditions							
graz level	38 °C	standard calibration	0,63	4,80	0,044	0,045	246,1
graz level	38 °C	thermomangement	0,50	4,86	0,046	0,047	247,9
graz level	38 °C	NO _x EO controlled	0,44	4,26	0,052	0,053	249,3
graz level	38 °C	final calibration	0,42	3,96	0,058	0,059	249,6
graz level	-7 °C	standard calibration	0,71	5,80	0,012	0,012	238,0
graz level	-7 °C	thermomangement	0,60	5,87	0,014	0,014	240,8
graz level	-7 °C	NO _x EO controlled	0,43	4,23	0,021	0,022	246,5
graz level	-7 °C	final calibration	0,50	5,00	0,021	0,021	241,0
1648 m	30 °C	standard calibration	0,60	4,65	0,071	0,071	249,0
1648 m	30 °C	thermomangement	0,48	4,72	0,074	0,075	250,9
1648 m	30 °C	NO _x EO controlled	0,44	4,26	0,076	0,077	252,2
1648 m	30 °C	final calibration	0,41	3,83	0,088	0,089	252,7
1648 m	10 °C	standard calibration	0,63	5,13	0,045	0,046	244,3
1648 m	10 °C	thermomangement	0,52	5,21	0,048	0,049	246,9
1648 m	10 °C	NO _x EO controlled	0,43	4,29	0,062	0,062	247,8
1648 m	10 °C	final calibration	0,44	4,32	0,061	0,061	247,7

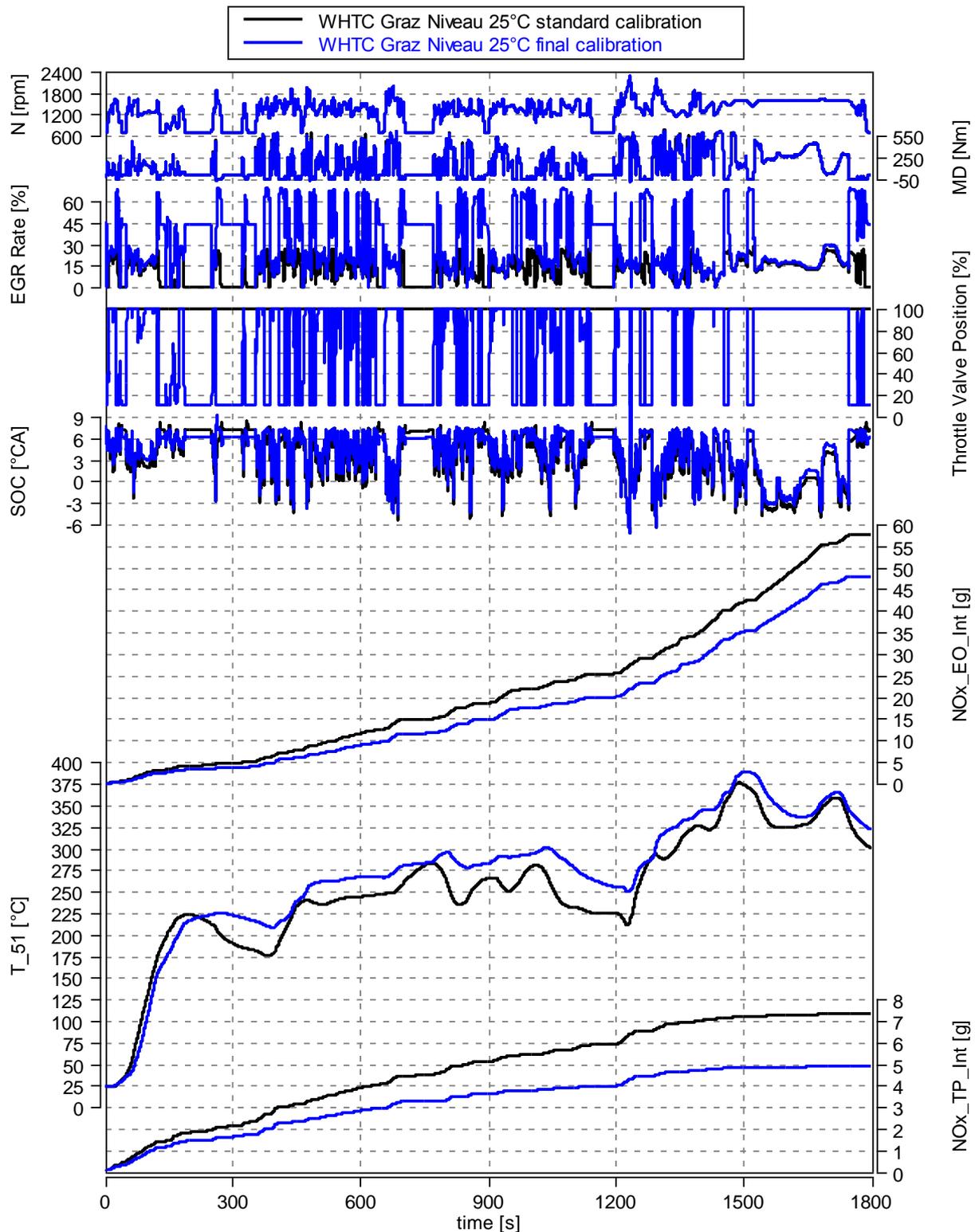


Abbildung 3-6: Vergleich Standardkalibrierung und finale Kalibrierung im WHTC bei Graz Niveau / 25 °C

Abbildung 3-6 zeigt den Vergleich der Standardkalibrierung mit der finalen Kalibrierung im WHTC. Der Einfluss von Thermomanagement, erhöhter AGR Rate und späterer Haupteinspritzung auf die NO_x Emissionen ist gut ersichtlich. 100 % bedeuten bei der Drosselklappenposition (Throttle Valve Position), dass die Drosselklappe vollständig geöffnet ist. Anhand der integrierten NO_x Massenströme (NO_x_EO_Int und NO_x_TP_Int) wird der Effekt der NO_x-minimierenden Maßnahmen noch einmal verdeutlicht.

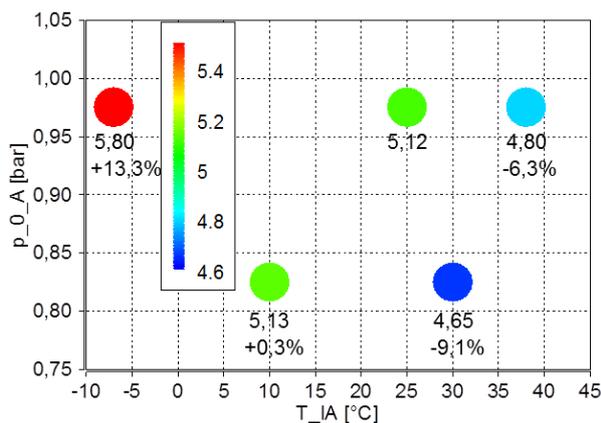


Abbildung 3-7: NO_x EO Zyklus-emissionen im WHTC in g/kWh bei Standardkalibrierung

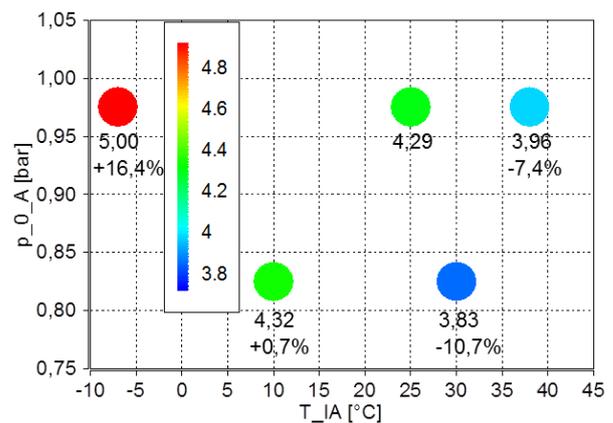


Abbildung 3-9: NO_x EO Zyklus-emissionen im WHTC in g/kWh bei finaler Kalibrierung

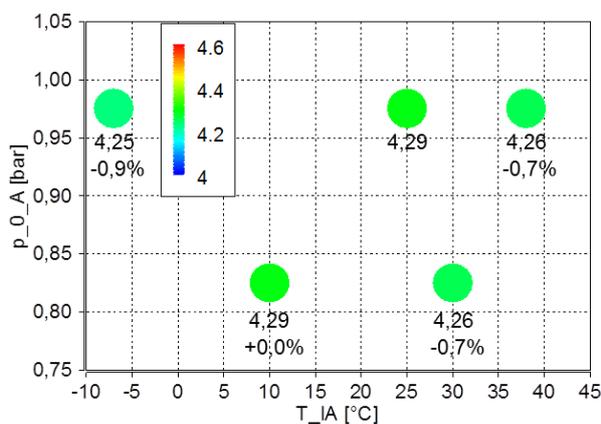


Abbildung 3-8: NO_x EO Zyklus-emissionen im WHTC in g/kWh bei NO_x EO Regelung

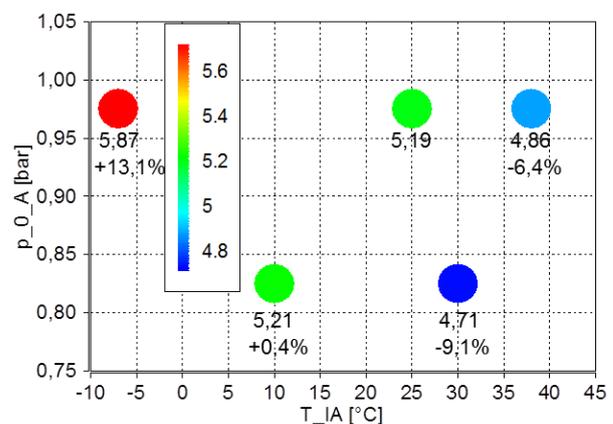


Abbildung 3-10: NO_x EO Zyklus-emissionen im WHTC in g/kWh bei Thermomanagement

Die Rohstickoxidemissionen im WHTC bei Standardkalibrierung, NO_x EO Regelung, finaler Kalibrierung und Thermomanagement sind **Abbildung 3-7**, **Abbildung 3-8**, **Abbildung 3-9** und **Abbildung 3-10** zu entnehmen. Die Prozentwerte unter den Zyklusergebnissen beziehen sich immer auf den Umgebungszustand bei 25 °C der jeweiligen Kalibrierstrategie. Es ist deutlich zu erkennen, dass bei der finalen Kalibrierung die NO_x EO Emission, im Vergleich zur Standardkalibrierung, in jedem Umgebungszustand niedriger sind. Dies folgt aus der erhöhten AGR Rate sowie der späteren Haupteinspritzung. Aufgrund der Drosselung beim Thermomanagement und dem damit verbundenen Temperaturanstieg erhöhen sich die Roh-NO_x Emissionen. Die Wirkung dieser Maßnahme wird erst bei Betrachtung der NO_x TP ersichtlich.

Der Trend bezüglich der NO_x EO Emissionen ist mit Ausnahme der NO_x EO Regelung bei allen Kalibrierstrategien ähnlich. Die NO_x EO Emissionen steigen bei niedrigen Umgebungstemperaturen, und fallen bei hohen. Der Grund dafür ist die Temperaturabhängigkeit der Luftdichte. Somit ist der kritische Umgebungszustand bezüglich NO_x EO der bei -7 °C. Da die Luftdichte mit fallender Temperatur zunimmt erhöht sich die Luftmasse bei diesem Umgebungszustand. Aus diesem Grund steigt bei gleichbleibender AGR Ventilposition das Luftverhältnis und die NO_x Bildung und die Roh-NO_x Emission nehmen zu (siehe **Abbildung 3-2**).

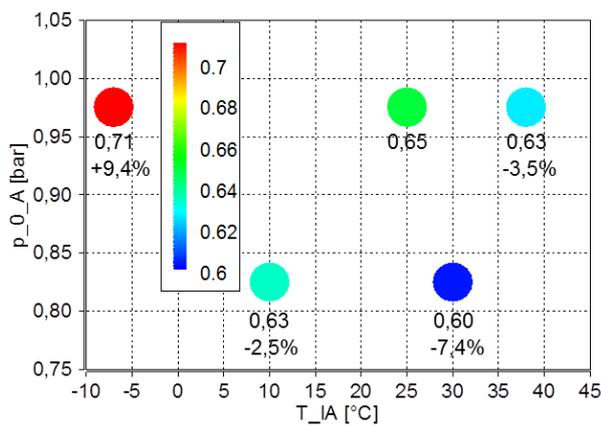


Abbildung 3-11: NO_x TP Zyklus-emissionen im WHTC in g/kWh bei Standardkalibrierung

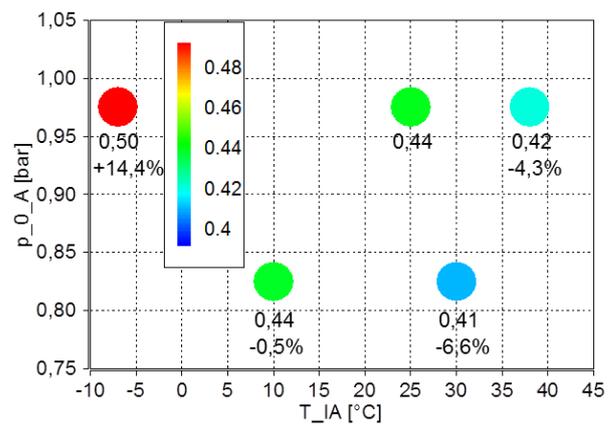


Abbildung 3-13: NO_x TP Zyklus-emissionen im WHTC in g/kWh bei finaler Kalibrierung

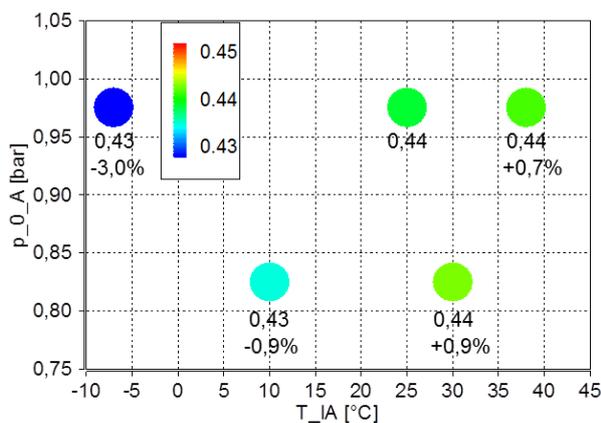


Abbildung 3-12: NO_x TP Zyklus-emissionen im WHTC in g/kWh bei NO_x EO Regelung

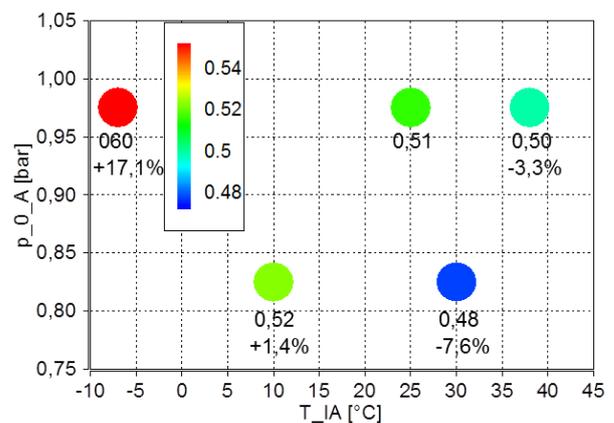


Abbildung 3-14: NO_x TP Zyklus-emissionen im WHTC in g/kWh bei Thermomanagement

Abbildung 3-11, Abbildung 3-12, Abbildung 3-13 und Abbildung 3-14 zeigen die Tailpipe Stickoxidemissionen im WHTC bei Standardkalibrierung, NO_x EO Regelung, finaler Kalibrierung sowie Thermomanagement. Die Prozentwerte unter den Zyklusergebnissen beziehen sich immer auf den Umgebungszustand bei 25 °C der jeweiligen Kalibrierung. Im Vergleich zur Standardkalibrierung sind bei der finalen Kalibrierung die NO_x TP in allen Umgebungbedingungen niedriger. Die Begründung dafür ist die erhöhte AGR Rate, Thermomanagement sowie die spätere Haupteinspritzung. Aus den Ergebnissen in **Abbildung 3-14** geht hervor, dass das Thermomanagement einen wesentlichen Anteil an der Stickoxidminimierung hat. Durch das Drosseln erhöht sich die Abgastemperatur und in weiterer Folge die SCR Temperatur. **Abbildung 3-15** zeigt den Einfluss des Thermomanagements auf den SCR Temperaturverlauf im WHTC. Bei 25°C erhöht sich dadurch die durchschnittliche SCR Temperatur im WHTC um 16 °C. Dadurch steigt die NO_x Konvertierungsrate (siehe **Abbildung 3-4**) und es werden mehr NO_x reduziert. Die NO_x TP bei der NO_x EO Regelung sind in allen Umgebungszuständen nahezu identisch, da die Rohstickoxidemissionen auf demselben Niveau liegen.

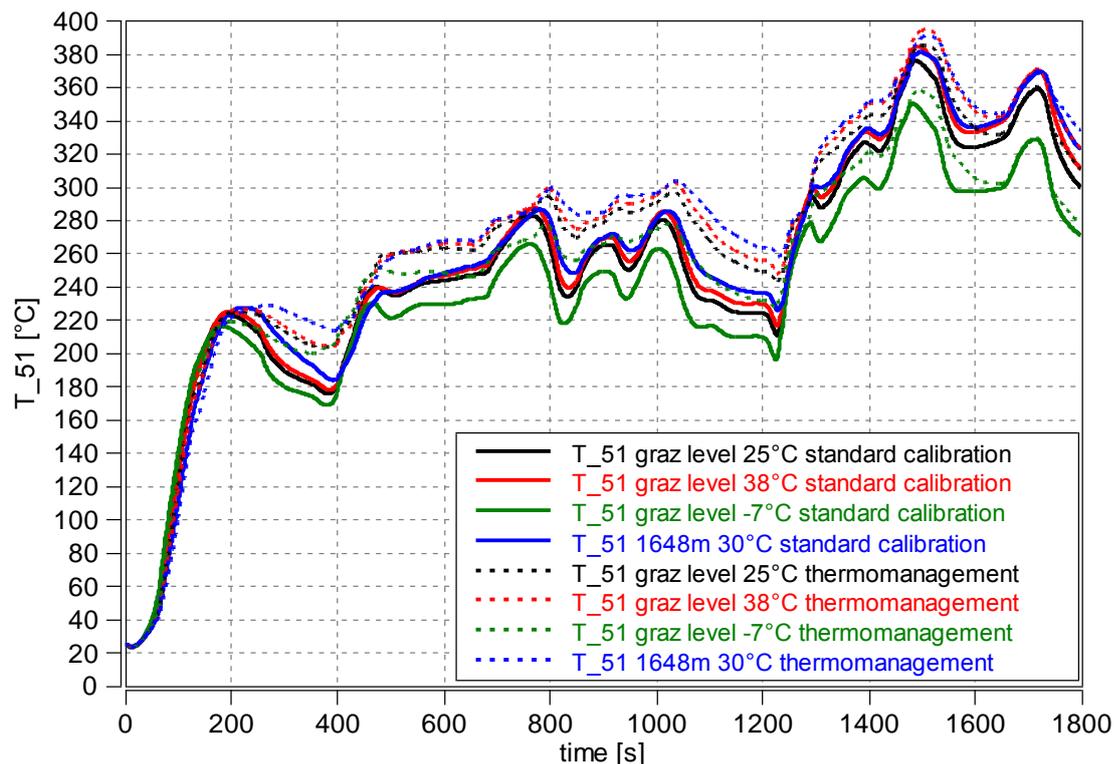


Abbildung 3-15: SCR Temperaturverläufe im WHTC bei Standardkalibrierung und Thermomanagement

Der Trend der NO_x TP Emissionen ist mit Ausnahme der NO_x EO Regelung bei allen Kalibrierstrategien ähnlich. Die NO_x TP Emissionen steigen bei niedrigen Umgebungstemperaturen und fallen bei hohen. Der Grund dafür sind die Temperaturabhängigkeit der Luftdichte und der Einfluss der SCR Temperatur auf die Konvertierungsrate. Somit ist der kritische Umgebungszustand bezüglich NO_x TP jener bei -7 °C. Da die Luftdichte mit fallender Temperatur zunimmt, erhöht sich die Luftmasse bei diesem Umgebungszustand. Aus diesem Grund steigt bei gleichbleibender AGR Ventilposition das Luftverhältnis und damit nehmen die NO_x TP Emission zu (**Abbildung 3-2**).

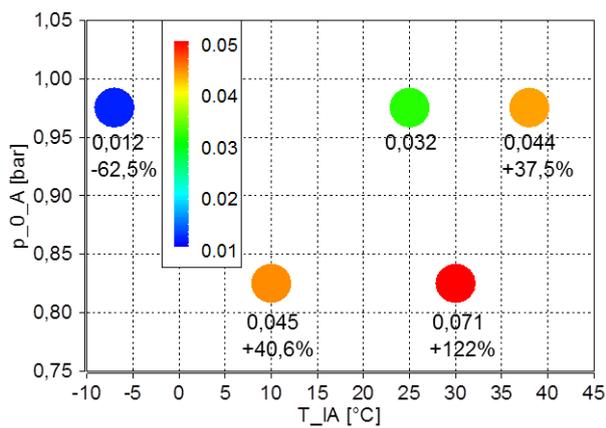


Abbildung 3-16: Soot TP Zyklus-emissionen im WHTC in g/kWh bei Standardkalibrierung

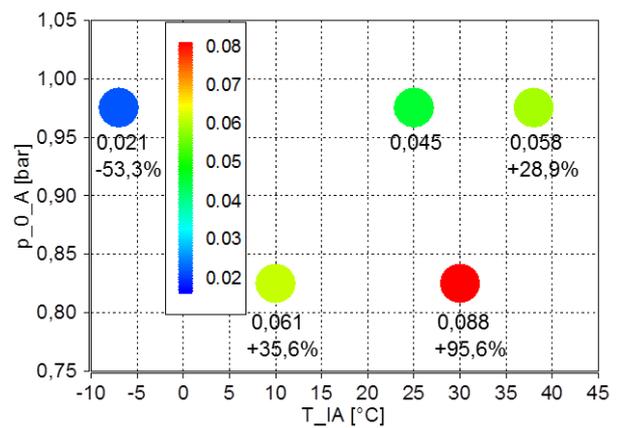


Abbildung 3-18: Soot TP Zyklus-emissionen im WHTC in g/kWh bei finaler Kalibrierung

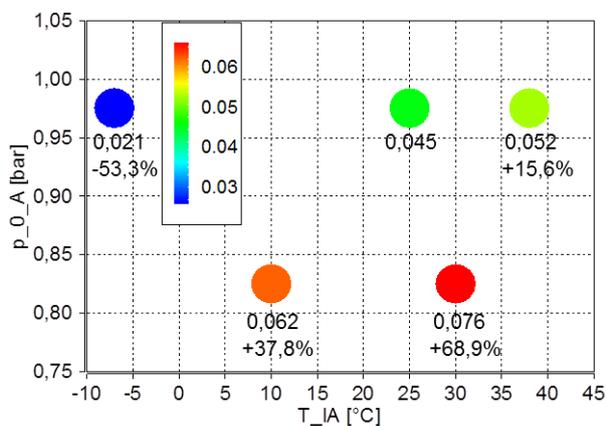


Abbildung 3-17: Soot TP Zyklus-emissionen im WHTC in g/kWh bei NO_x EO Regelung

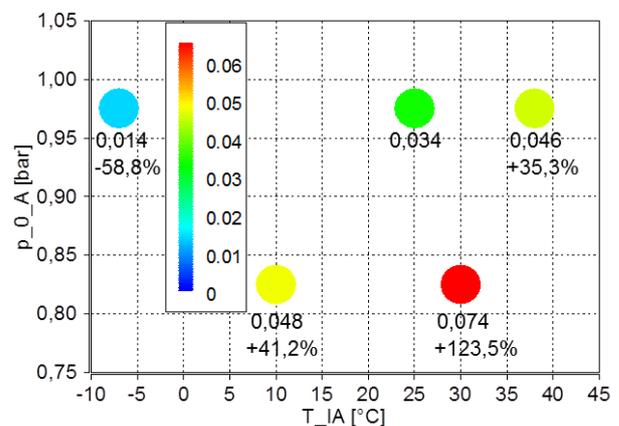


Abbildung 3-19: Soot TP Zyklus-emissionen im WHTC in g/kWh bei Thermomanagement

Die Tailpipe Sootemissionen im WHTC bei Standardkalibrierung, NO_x EO Regelung, finaler Kalibrierung sowie Thermomanagement sind **Abbildung 3-16**, **Abbildung 3-17**, **Abbildung 3-18** und **Abbildung 3-19** zu entnehmen. Die Prozentwerte unter den Zyklusergebnissen beziehen sich immer auf den Umgebungszustand bei 25 °C der jeweiligen Kalibrierung. Hier ist der NO_x/PM Trade off deutlich zu erkennen. Die höhere AGR Rate, der spätere Einspritzzeitpunkt und das Thermomanagement reduzieren die NO_x Emissionen, erhöhen jedoch die Partikelemissionen. Da Dichte und Sauerstoffkonzentration der Luft mit steigender Temperatur und Höhe abnehmen, sinkt das Luftverhältnis bei diesen Umgebungsbedingungen trotz konstanter AGR Ventilposition. Dadurch wird die Partikelbildung begünstigt. Der Trend der Partikelemissionen ist bei allen Kalibrierstrategien ähnlich.

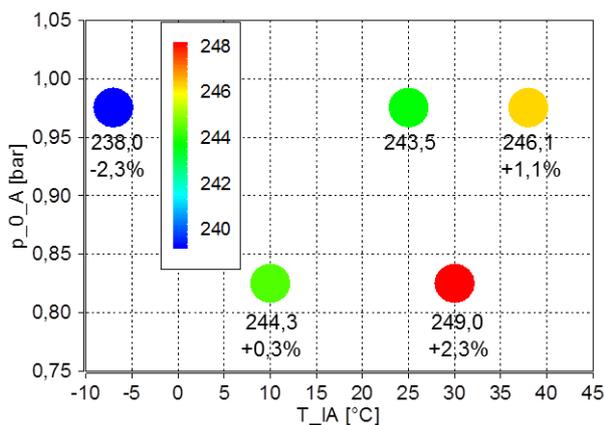


Abbildung 3-20: BSFC im WHTC in g/kWh bei Standardkalibrierung

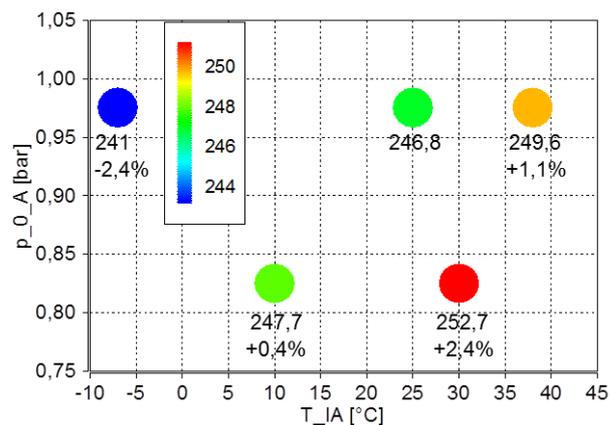


Abbildung 3-22: BSFC im WHTC in g/kWh bei finaler Kalibrierung

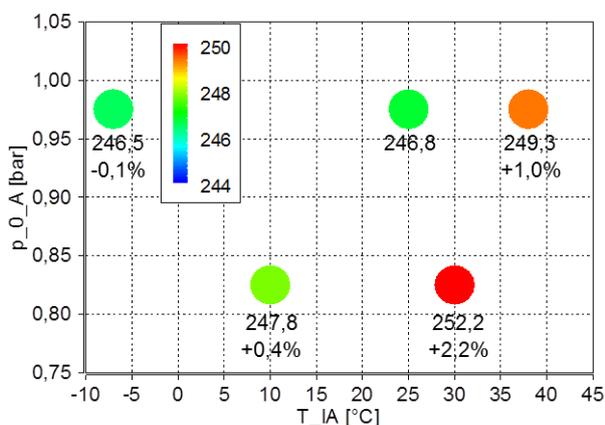


Abbildung 3-21: BSFC im WHTC in g/kWh bei NO_x EO Regelung

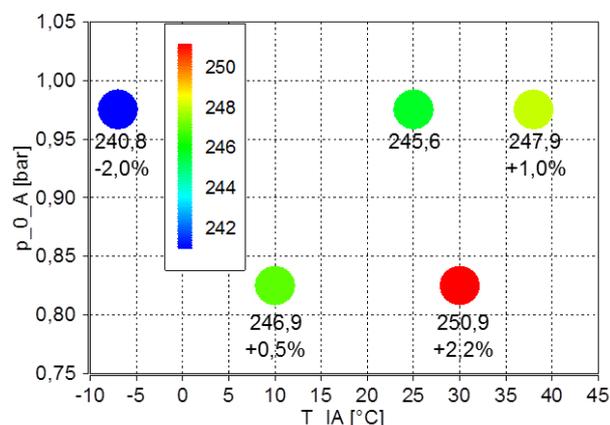


Abbildung 3-23: BSFC im WHTC in g/kWh bei Thermomanagement

Abbildung 3-20, Abbildung 3-21, Abbildung 3-22 und Abbildung 3-23 zeigen den Kraftstoffverbrauch im WHTC bei Standardkalibrierung, NO_x EO Regelung, finaler Kalibrierung sowie Thermomanagement. Die Prozentwerte unter den Zyklusergebnissen beziehen sich immer auf den Umgebungszustand bei 25 °C der jeweiligen Kalibrierung. Die Sauerstoffkonzentration der Luft sinkt mit steigender Temperatur und erhöht sich mit fallender. Dadurch ergeben sich geringe Kraftstoffverbrauchsunterschiede bei den unterschiedlichen Umgebungsbedingungen. Der etwas höhere Kraftstoffverbrauch bei der finalen Kalibrierung, im Vergleich zur Standardkalibrierung, resultiert aus dem Thermomanagement und dem späteren Haupteinspritzzeitpunkt.

3.3.3.3 NRSC

Beim NRSC wird der Einfluss einer weiteren Kalibrierstrategie, der λ -Regelung, untersucht und bewertet. Mit dieser Strategie wird untersucht, ob eine Regelung auf bestimmte λ -Werte sinnvoll ist. Die λ -Regelung wird beim NRSC untersucht, da dies ein stationärer Prüfzyklus ist der nur 8 Betriebspunkte beinhaltet. Daher ist es ein vertretbarer Aufwand die λ -Werte mithilfe der AGR Rate händisch auf die Sollwerte einzuregulieren. Aufgrund des geringen Abgasmassenstroms im Leerlauf hat das Thermomanagement keinen nennenswerten Einfluss auf die Zyklusemissionen. Die angegebenen Emissionslimits gelten nur für die Standardbedingungen Graz Niveau und 25 °C.

Der Motor wurde für die Stufe IV kalibriert. Den Zyklusergebnissen ist zu entnehmen, dass die Emissionsgrenzwerte für NO_x und PM eingehalten werden.

Tabelle 3-3: Zyklusergebnisse NRSC

Cycle Emissions							
			NO _x _TP_S	NO _x _EO_S	SOOT	PM	BSFC
			g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
Emission Limit: Stufe IV			0,40	-	-	0,025	-
Standard Conditions							
graz level	25 °C	standard calibration	0,09	5,27	0,005	0,005	238,4
graz level	25 °C	final calibration	0,07	5,18	0,004	0,004	239,1
Standard Conditions							
graz level	38 °C	standard calibration	0,07	5,09	0,009	0,009	239,5
graz level	38 °C	lambda controlled	0,08	6,96	0,005	0,005	240,5
graz level	38 °C	final calibration	0,05	5,00	0,008	0,009	240,2
graz level	-7 °C	standard calibration	0,14	5,57	0,002	0,002	236,3
graz level	-7 °C	lambda controlled	0,11	3,49	0,008	0,009	235,7
graz level	-7 °C	final calibration	0,13	5,45	0,002	0,002	237,0
1648 m	30 °C	standard calibration	0,06	4,62	0,045	0,045	241,3
1648 m	30 °C	lambda controlled	0,07	8,54	0,040	0,040	243,9
1648 m	30 °C	final calibration	0,05	4,52	0,045	0,045	242,0
1648 m	10 °C	standard calibration	0,07	4,87	0,032	0,032	239,3
1648 m	10 °C	lambda controlled	0,09	8,42	0,027	0,027	242,2
1648 m	10 °C	final calibration	0,05	4,76	0,032	0,032	240,1

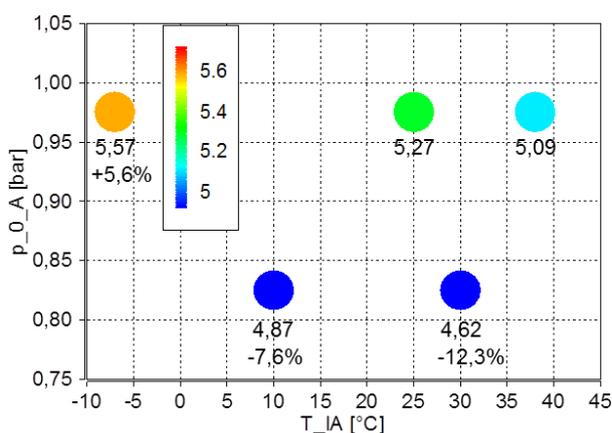


Abbildung 3-24: NO_x EO Zyklus-emissionen im NRSC in g/kWh bei Standardkalibrierung

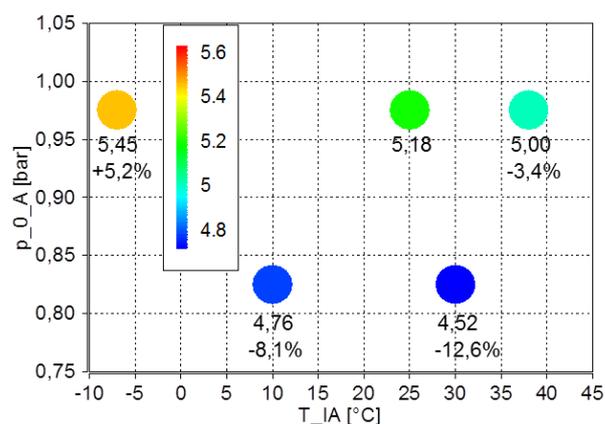


Abbildung 3-26: NO_x EO Zyklus-emissionen im NRSC in g/kWh bei finaler Kalibrierung

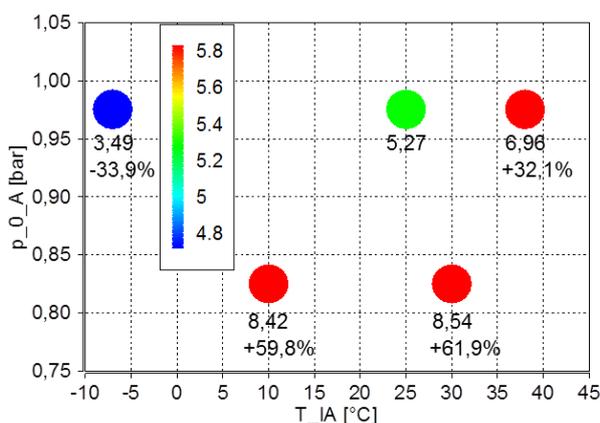


Abbildung 3-25: NO_x EO Zyklus-emissionen im NRSC in g/kWh bei λ -Regelung

Die Rohstickoxidemissionen im NRSC bei Standardkalibrierung, λ -Regelung und finaler Kalibrierung sind **Abbildung 3-24**, **Abbildung 3-25**, **Abbildung 3-26** zu entnehmen. Die Prozentwerte unter den Zyklusergebnissen beziehen sich immer auf den Umgebungszustand bei 25 °C der jeweiligen Kalibrierung. Die NO_x EO Emissionen sind bei der finalen Kalibrierung, im Vergleich zur Standardkalibrierung, in jedem Umgebungszustand niedriger. Dies folgt aus der erhöhten AGR Rate sowie der späteren Haupteinspritzung. Die Luftdichte nimmt mit fallender Temperatur zu und mit steigender ab. Daraus folgt, dass das Luftverhältnis bei niedrigeren Temperaturen, im Vergleich zur Basis, bei gleicher AGR Ventilposition steigt. Bei höheren Temperaturen ist es genau umgekehrt. Aus diesem Grund wird bei -7 °C Umgebungstemperatur die AGR Rate angehoben um die geforderten λ -Werte der Basis bei 25 °C zu erreichen. Dadurch werden die NO_x EO Emissionen im Vergleich zur Basis reduziert. Bei den anderen Umgebungszuständen (Hitze und Höhe) ist es genau umgekehrt. Hier muss die AGR Rate gesenkt werden, um die geforderten λ -Werte zu erzielen. Somit erhöhen sich die NO_x EO Emissionen. In der Höhe konnte der ATL nicht immer den geforderten Ladedruck liefern, dadurch war es nicht möglich, alle Betriebspunkte auf die korrekten λ -Werte der Basis einzuregulieren. Somit werden die Grenzen der λ -Regelung aufgezeigt, da es speziell in der Höhe schwierig ist die geforderten λ -Werte der Basis zu erreichen. Aus diesem Grund steigen die NO_x EO Emissionen bei Hitze und Höhe rasant an.

Der Trend bezüglich der NO_x EO Emissionen ist bei Standardkalibrierung und finaler Kalibrierung ähnlich. Die NO_x EO Emissionen steigen bei niedrigen Umgebungstemperaturen, und fallen bei hohen. Der Grund dafür ist die Temperaturabhängigkeit der Luftdichte. Somit ist der kritische Umgebungszustand bezüglich NO_x EO der bei -7 °C.

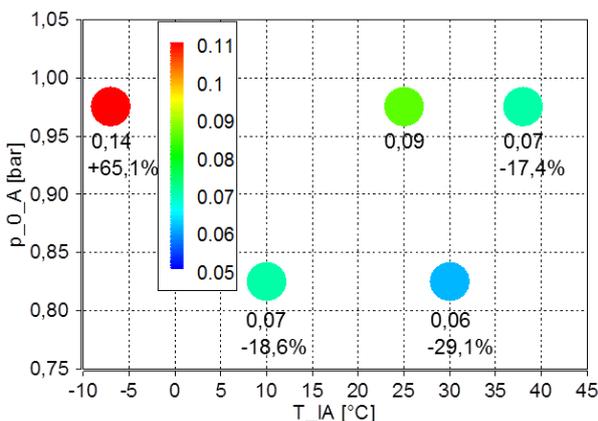


Abbildung 3-27: NO_x TP Zyklus-emissionen im NRSC in g/kWh bei Standardkalibrierung

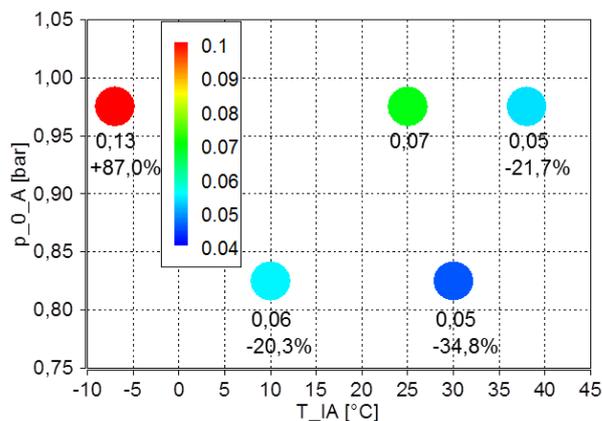


Abbildung 3-29: NO_x TP Zyklus-emissionen im NRSC in g/kWh bei finaler Kalibrierung

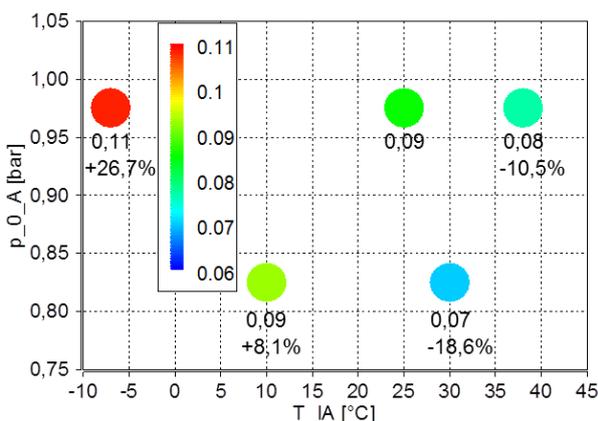


Abbildung 3-28: NO_x TP Zyklus-emissionen im NRSC in g/kWh bei λ-Regelung

Abbildung 3-27, Abbildung 3-28 und Abbildung 3-29 zeigen die Tailpipe Stickoxidemissionen im NRSC bei Standardkalibrierung, λ-Regelung und finaler Kalibrierung. Die Prozentwerte unter den Zyklusergebnissen beziehen sich immer auf den Umgebungszustand bei 25 °C der jeweiligen Kalibrierung. Verglichen mit der Standardkalibrierung sind bei der finalen Kalibrierung die NO_x TP in allen Umgebungsbedingungen niedriger. Die Begründung dafür ist die erhöhte AGR Rate sowie die spätere Haupteinspritzung.

Der Trend der NO_x TP Emissionen ist mit Ausnahme der λ-Regelung bei allen Kalibrierstrategien ähnlich. Die NO_x TP Emissionen steigen bei niedrigen Umgebungstemperaturen und fallen bei hohen. Der Grund dafür sind die Temperaturabhängigkeit der Luftdichte und der Einfluss der SCR Temperatur auf die Konvertierungsrate. Somit ist der kritische Umgebungszustand bezüglich NO_x TP jener bei -7 °C. Da die Luftdichte mit fallender Temperatur zunimmt, erhöht sich die Luftmasse bei

diesem Umgebungszustand.

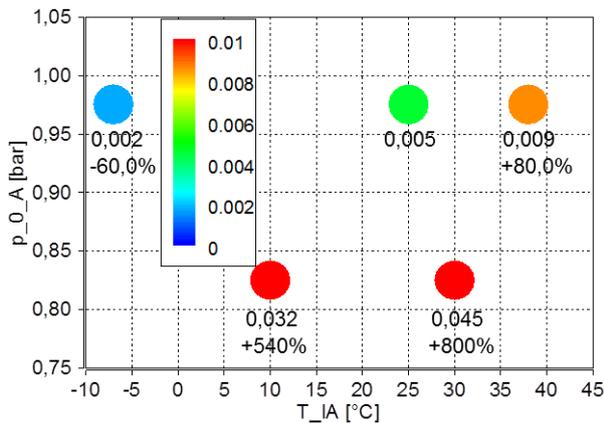


Abbildung 3-30: Soot TP Zyklusemissionen im NRSC in g/kWh bei Standardkalibrierung

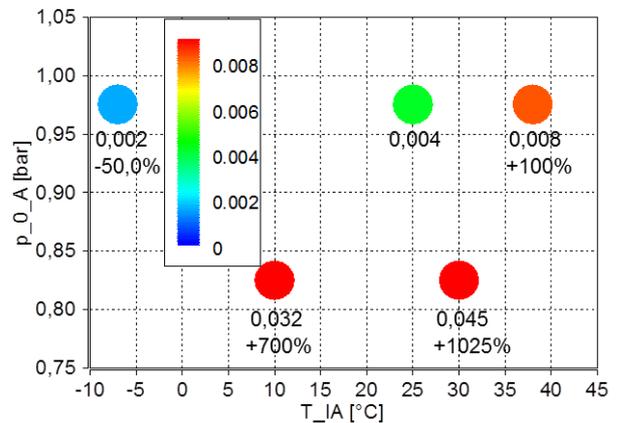


Abbildung 3-32: Soot TP Zyklusemissionen im NRSC in g/kWh bei finaler Kalibrierung

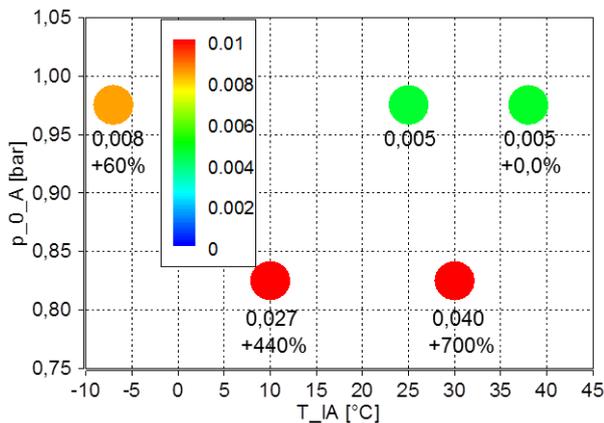


Abbildung 3-31: Soot TP Zyklusemissionen im NRSC in g/kWh bei λ Regelung

Die Partikelemissionen im NRSC bei Standardkalibrierung, λ -Regelung und finaler Kalibrierung sind **Abbildung 3-30**, **Abbildung 3-31** und **Abbildung 3-32** zu entnehmen. Die Prozentwerte unter den Zyklusergebnissen beziehen sich immer auf den Umgebungszustand bei 25 °C der jeweiligen Kalibrierung. Hier ist der NO_x/PM Trade off deutlich zu erkennen. Die höhere AGR Rate, der spätere Einspritzzeitpunkt und das Thermomanagement reduzieren die NO_x Emissionen, erhöhen jedoch die Partikelemissionen. Da Dichte und Sauerstoffkonzentration mit der Luft steigender Temperatur und Höhe abnehmen, sinkt das Luftverhältnis bei diesen Umgebungsbedingungen mit konstanter AGR Ventilposition. Dadurch wird die Partikelbildung begünstigt. Der Trend der Partikelemissionen ist bei allen Kalibrierstrategien ähnlich. Somit stellen Hitze und Höhe die kritischen Umgebungsbedingungen für die Partikel dar. Bei der λ -Regelung sind NO_x und Soot Emissionen bei -7 °C höher, da hier zusätzlich die Drosselklappenstellung verändert wurde.

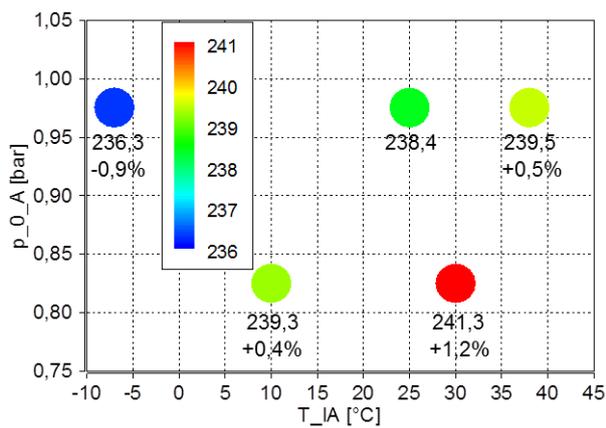


Abbildung 3-33: BSFC Zyklus-emissionen im NRSC in g/kWh bei Standardkalibrierung

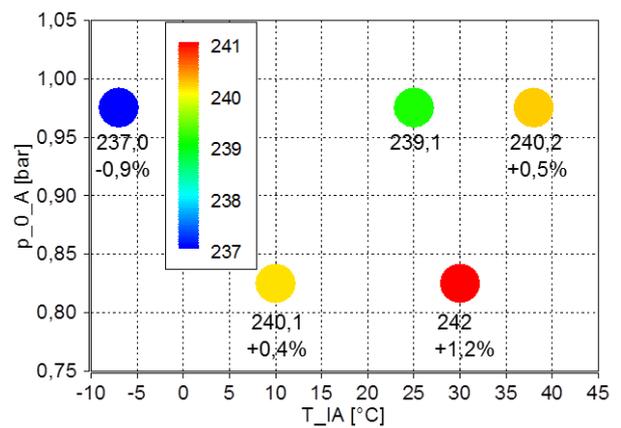


Abbildung 3-35: BSFC Zyklus-emissionen im NRSC in g/kWh bei finaler Kalibrierung

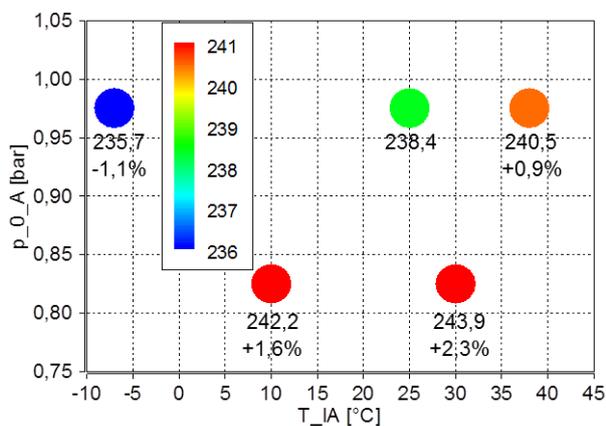


Abbildung 3-34: BSFC Zyklus-emissionen im NRSC in g/kWh bei λ -Regelung

Abbildung 3-33, Abbildung 3-34 und Abbildung 3-35 zeigen den Kraftstoffverbrauch im NRSC bei Standardkalibrierung, λ -Regelung und finaler Kalibrierung. Die Prozentwerte unter den Zyklusergebnissen beziehen sich immer auf den Umgebungszustand bei 25 °C der jeweiligen Kalibrierung. Die Sauerstoffkonzentration im Gemisch sinkt mit steigender Temperatur und erhöht sich mit fallender. Dadurch ergeben sich geringe Kraftstoffverbrauchsunterschiede bei den unterschiedlichen Umgebungsbedingungen. Der etwas höhere Kraftstoffverbrauch bei der finalen Kalibrierung, im Vergleich zur Standardkalibrierung, resultiert aus dem Thermomanagement und dem späteren Haupteinspritzzeitpunkt. Bei der λ -Regelung wirken sich auch noch die höhere Ladungswechselverluste negativ auf den Kraftstoffverbrauch aus.

3.3.3.4 NRTC

Der Motor wurde für die Offroadabgasnorm Stufe IV kalibriert. Den Zyklusergebnissen ist zu entnehmen, dass die Emissionsgrenzwerte für NO_x und PM eingehalten werden. Das Thermomanagement hat aufgrund der fehlenden Schubbetriebsphasen sowie der höherlastigen Betriebspunkte, im Vergleich zum WHTC, keinen nennenswerten Einfluss auf die Emissionen. Die finale Kalibrierung wurde speziell an den WHTC angepasst. Da die Betriebspunkte des NRTC im Vergleich zum WHTC bei höheren Lasten und Drehzahlen liegen, sind die NO_x-minimierenden Effekte der erhöhten AGR Rate und des späteren Einspritzzeitpunktes beim NRTC deutlich geringer.

Tabelle 3-4: Zyklusergebnisse NRTC

Cycle Emissions							
			NO _x _TP_S	NO _x _EO_S	SOOT	PM	BSFC
			g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
Emission Limit: Stufe IV			0,40	-	-	0,025	-
Standard Conditions							
graz level	25 °C	standard calibration	0,23	4,90	0,015	0,015	241,2
graz level	25 °C	thermomanagement	0,23	4,92	0,015	0,015	241,4
graz level	25 °C	final calibration	0,20	4,73	0,020	0,020	242,0
Non-Standard Conditions							
graz level	38 °C	standard calibration	0,21	4,76	0,022	0,022	242,4
graz level	38 °C	thermomanagement	0,20	4,77	0,022	0,022	242,6
graz level	38 °C	NO _x EO controlled	0,21	4,91	0,021	0,021	242,4
graz level	38 °C	final calibration	0,18	4,58	0,027	0,027	243,2
graz level	-7 °C	standard calibration	0,31	5,18	0,006	0,006	238,7
graz level	-7 °C	thermomanagement	0,31	5,20	0,006	0,006	239,0
graz level	-7 °C	NO _x EO controlled	0,30	4,90	0,006	0,006	238,4
graz level	-7 °C	final calibration	0,29	5,03	0,009	0,009	239,4
1648 m	30 °C	standard calibration	0,19	4,46	0,047	0,048	244,0
1648 m	30 °C	thermomanagement	0,19	4,47	0,048	0,048	244,3
1648 m	30 °C	NO _x EO controlled	0,19	4,90	0,040	0,041	244,1
1648 m	30 °C	final calibration	0,16	4,29	0,053	0,053	244,9
1648 m	10 °C	standard calibration	0,22	4,71	0,026	0,027	241,9
1648 m	10 °C	thermomanagement	0,22	4,73	0,027	0,027	242,2
1648 m	10 °C	NO _x EO controlled	0,21	5,01	0,023	0,023	242,0
1648 m	10 °C	final calibration	0,20	4,55	0,032	0,032	242,7

3.4 Resümee

Die Ergebnisse der MiL-Simulation zeigen, dass der Motor für den jeweiligen Einsatzzweck (On- / Offroad) und damit auf die zu erfüllenden Prüfzyklen abgestimmt wird. Der Motor wurde für die Offroadabgasnorm Stufe IV kalibriert. Es sei an dieser Stelle noch einmal erwähnt, dass während der MiL-Simulation keine Umgebungskorrekturfunktionen aktiv waren.

In **Abbildung 3-36** sind die Betriebspunkte des WHTC und NRTC abgebildet. Im Vergleich zum WHTC befinden sich die Betriebspunkte des NRTC bei höheren Lasten und Drehzahlen. Weiters beinhaltet der WHTC im Gegensatz zum NRTC Schubphasen. Der NRTC hat keine Schubphasen, da eine mobile Arbeitsmaschine nahezu nie im Schubbetrieb betrieben wird.

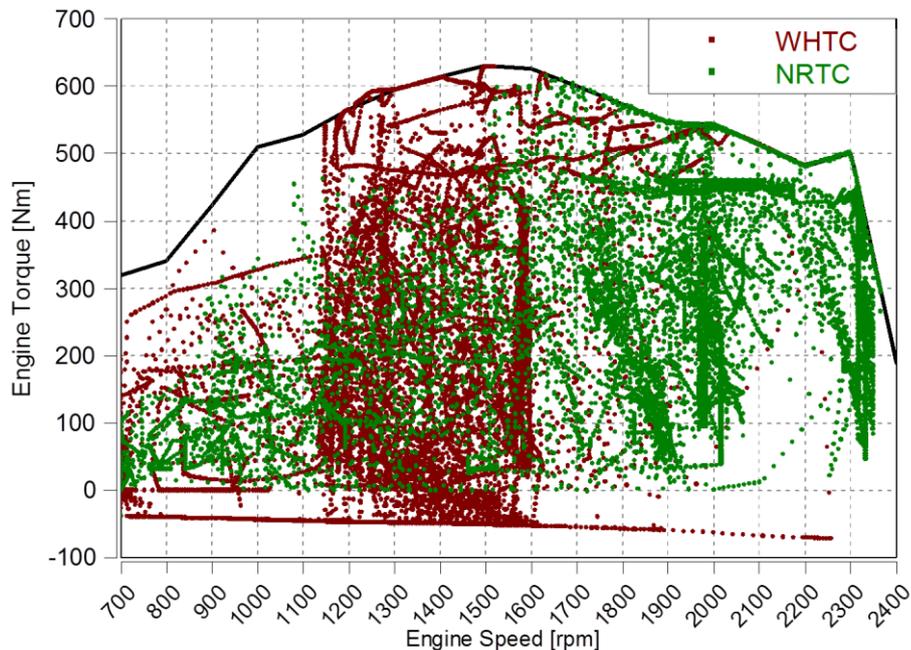


Abbildung 3-36: Betriebspunkte WHTC/NRTC

Aufgrund der Kalibrierung des Motors für Stufe IV und der unterschiedlichen Lage der Betriebspunkte ist die durchschnittliche SCR Temperatur (siehe **Tabelle 3-5**) im WHTC um 48,5 °C niedriger als im NRTC. Dies hat einen direkten Einfluss auf die NO_x Konvertierungsrate und damit auf die NO_x TP Emissionen.

Tabelle 3-5: durchschnittliche SCR Temperatur im NRTC/WHTC

test cycle	ambient conditions		calibration strategy	average SCR Temperature
				°C
NRTC	graz level	25 °C	standard calibration	300,0
NRTC	graz level	25 °C	thermomangement	300,0
NRTC	graz level	25 °C	final calibration	301,0
WHTC	graz level	25 °C	standard calibration	251,5
WHTC	graz level	25 °C	thermomangement	267,0
WHTC	graz level	25 °C	final calibration	269,5

Aus diesem Grund war es nötig, die Kalibrierung für den WHTC zu adaptieren. Mittels Thermomanagement, Spätstellung der Haupteinspritzung und erhöhter AGR Rate konnte die Durchschnittstemperatur im WHTC um 18 °C angehoben werden. Aufgrund der erhöhten Abgastemperatur und AGR Rate wurden die NO_x TP Emissionen deutlich verringert. Mit dem in dieser Arbeit verwendeten Motormodell war die Unterscheidung zwischen Kalt- und Warmzyklus nicht möglich. Um die Abgasnorm EURO 6 zu erfüllen muss das Zyklusergebnis, welches aus Kalt- und Warmzyklus multipliziert mit dem Verschlechterungsfaktor besteht, kleiner gleich der in **Tabelle 2-1** angeführten Grenzwerte sein. Daraus folgt, dass die Kalibrierung höchstwahrscheinlich weiter angepasst werden müsste.

Aus den Ergebnissen der Simulation unter Non-Standardbedingungen folgt generell, dass Kälte (-7 °C) problematisch für die Stickoxidemissionen und Höhe und Hitze (1648 m und 30 °C) kritisch für die Partikelemissionen sind. Ein Grund dafür ist die Temperaturabhängigkeit der Luftdichte. Die Luftdichte nimmt mit fallender Temperatur zu. Das führt beim Umgebungszustand von 1648m und 30 °C dazu, dass das Luftverhältnis bei gleicher AGR Ventilposition abnimmt und somit die Partikelemissionen fördert. Erschwerend kommt noch hinzu, dass in der Höhe der Luftdruck sinkt. Bei -7 °C ist dieser Effekt genau umgekehrt. Um den Schadstoffausstoß im emissionsrelevanten Bereich einzuhalten, werden Korrekturkennfelder (z.B.: Einspritzzeitpunkt, Ladedruck,...) verwendet.

4 ISC Tests am Versuchsträger

4.1 Der Versuchsträger

Hierbei handelt es sich um einen zweiachsigen LKW der Medium Duty Klasse. Um die für die ISC Tests erforderliche Beladung zu erreichen, werden Betongewichte auf der Ladefläche des Versuchsträgers angebracht. Das PEMS Messsystem, welches für die ISC Tests benötigt wird, wird ebenfalls auf der Ladefläche befestigt.

4.1.1 Daten von Motor und Motorhardware

Motor:

- Medium Duty Engine EURO VI

Aufladung:

- ATL mit variabler Turbinengeometrie
- Ladeluftkühlung

Abgasrückführung:

- Hochdruck AGR
- AGR Kühler

Einspritzsystem:

- Common Rail
- Mehrfacheinspritzung

Abgasnachbehandlung:

- DOC
- DPF
- SCR System

4.2 Durchführung [2]

Um die Emissionen im realen Fahrbetrieb zu messen, wird eine mobile Messeinrichtung, kurz PEMS, verwendet. Die exakte Durchführung der ISC Tests sowie die Beschreibung der verwendeten Messmethoden sind der Literatur [2] zu entnehmen. **Abbildung 4-1** zeigt eine solche Messeinrichtung, das AVL Gas PEMS System.



Abbildung 4-1: AVL Gas PEMS System [11]

Die in **Tabelle 4-1** angeführten Daten müssen für einen Dieselmotor mittels PEMS gemessen und aufgezeichnet werden.

Tabelle 4-1: Prüfkenndaten

Daten	Einheit	Quelle
CO-Konzentration ²	ppm	Analysator
THC-Konzentration ²	ppm	Analysator
NO _x -Konzentration ²	ppm	Analysator
CO ₂ -Konzentration ²	ppm	Analysator
Abgasdurchsatz	kg/h	Abgasdurchsatzmesser (EFM)
Abgastemperatur	K	EFM
Umgebungstemperatur ³	K	Sensor
Umgebungsdruck	kPa	Sensor
Motordrehmoment	Nm	ECU oder Sensor
Motordrehzahl	rpm	ECU oder Sensor
Kraftstoffdurchsatz des Motors	g/s	ECU oder Sensor
Kühlmitteltemperatur	K	ECU oder Sensor
Ansauglufttemperatur des Motors ³	K	Sensor
Fahrzeuggeschwindigkeit über dem Boden	km/h	ECU oder Sensor
Breitengrad des Fahrzeugs	Grad	GPS
Längengrad des Fahrzeugs	Grad	GPS

² Gemessen oder korrigiert bei feuchtem Bezugszustand

³ Entweder Sensor für Ansauglufttemperatur oder für Umgebungstemperatur

4.2.1.1 Anbringung des mobilen Messsystems

Das PEMS soll im Fahrzeug so unterbracht werden, dass die Vorschriften des Messsystemherstellers befolgt werden und folgende Punkte minimal auftreten:

- Schwankungen der Umgebungstemperatur
- Schwankungen des Umgebungsdrucks
- Elektromagnetische Strahlung
- Mechanische Erschütterung und Vibrationen

Der Abgasdurchsatzmesser (EFM) ist am Auspuffrohr anzubringen und die GPS Antenne soll, falls möglich, am höchsten Punkt des Fahrzeugs installiert werden.

4.2.1.2 Prüfdurchführung

Der Versuchsträger wird am Vorabend jedes ISC Tests vorkonditioniert. Ziel der Konditionierung ist eine konstante NH₃ Beladung des SCR bei Beginn jeder Prüffahrt.

Vor dem Prüfbeginn müssen die PEMS Instrumente gestartet und stabilisiert werden. Anschließend erfolgt die Kalibration der Analytoren. Die Datenaufzeichnung muss vor dem Motorstart beginnen. Hat die Kühlmitteltemperatur 70°C erreicht oder läuft der Motor 20 Minuten im Leerlauf, darf die Prüffahrt gestartet werden. Die Aufzeichnung muss kontinuierlich während der gesamten Prüffahrt erfolgen.

Am Ende der Messfahrt muss der Post-check des PEMS Systems mithilfe der Kalibriergase durchgeführt werden. Dieser muss innerhalb von 30 Minuten nach Beendigung der Messung erfolgen. Hierbei wird der Drift bestimmt, der innerhalb der gesetzlichen Vorschriften liegen muss.

Die Route 1:

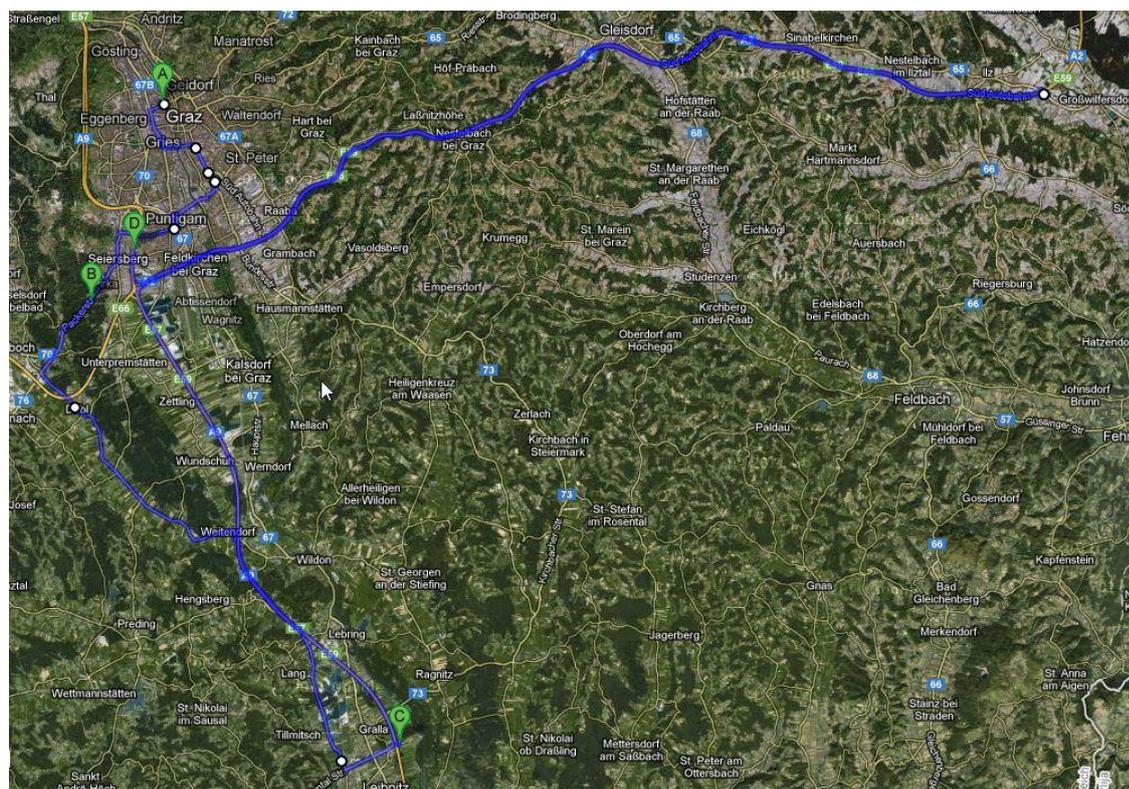


Abbildung 4-2: Route 1 PEMS Messung

- A – B: Stadt (Urban)
 B – C: Überland (Rural)
 C – D: Autobahn (Motorway)

Die Auswahl der Route nimmt einige Zeit in Anspruch, da die gesetzlich vorgegebenen Prozentwerte des Fahrzyklus, siehe **Tabelle 2-6**, eingehalten werden müssen. Das verwendete Versuchsfahrzeug fällt in die Kategorie N₃.

4.2.1.3 Auswertung

Anschließend werden die Messungen mit den in Kapitel 2.1.6 beschriebenen Methoden mithilfe der Software AVL Concerto™ ausgewertet. Ein besonderes Augenmerk muss hierbei auf das Time Alignment der Messdaten gelegt werden, da dies einen nicht unerheblichen Einfluss auf das Testergebnis hat.

4.3 Ergebnisse

Der Übereinstimmungsfaktor für ein Arbeitsfenster wird mit folgender Formel berechnet:

$$CF = \frac{e}{L}$$

Darin ist:

- CF Übereinstimmungsfaktor
 e bremspezifische Emissionen der Komponente in g/kWh
 L Grenzwert des WHTC in g/kWh

Der kumulative 90-Perzentilwert der Übereinstimmungsfaktoren darf die in **Tabelle 2-3** angeführten Grenzwerte nicht überschreiten.

Tabelle 4-2: Ergebnisse ISC Tests

ISC Tests								
Test Information		Conformity Factors				Trip Requirements		
Test Nr.:	Route	THC	NOx	CO	Work	Urban	Rural	Motorway
		[-]	[-]	[-]	[kWh]	[%]	[%]	[%]
<i>Emission Limit: EURO 6</i>		<i>< 1,5</i>	<i>< 1,5</i>	<i>< 1,5</i>	<i>> 104</i>	<i>20 ± 5</i>	<i>25 ± 5</i>	<i>55 ± 5</i>
3	1	0,04	1,04	0,07	202,8	21,0	24,4	54,6
4	2	0,03	0,80	0,06	146,0	25,5	20,4	54,1
12	3	-0,01	0,74	0,05	156,4	19,1	24,5	56,4

Die in **Tabelle 4-2** angegebenen Übereinstimmungsfaktoren sind jene, die mithilfe der Arbeitsfenstermethode berechnet werden, da aufgrund dieser die Entscheidung, ob der Test positiv oder negativ ist, gefällt wird. Test 4 ist ungültig, da der prozentuelle Stadtanteil zeitlich überschritten wurde. Grund dafür waren erhöhtes Verkehrsaufkommen und neue Baustellen. Deshalb musste die Route nochmals abgeändert werden.

Test 12 wird im Vergleich zu Test 3 und 4 mit verbessertem Datenstand und geänderter Motorhardware durchgeführt. Die Kalibrierung des PEMS wird ebenfalls angepasst. Bei den ersten Tests erfolgt die Kalibrierung von NO und NO₂ mit der Genauigkeit von 5000 ppm ± 2%. Das ergibt eine mögliche Abweichung von ± 100 ppm, was angesichts der geringen Konzentrationen der TP Emissionen (0 – 250 ppm) schon erheblich ist. Aus diesem Grund erfolgt eine Anpassung der Kalibrierung des PEMS und somit ergibt sich eine Genauigkeit von 300 ppm ± 2%. Mithilfe dieser Maßnahmen konnte der Übereinstimmungsfaktor von NO_x nochmals deutlich gesenkt werden.

Test 3:

Da der Test 3 am HiL simuliert und am Motorprüfstand nachgefahren wird, werden an dieser Stelle noch ein paar Details der Auswertung angeführt. **Tabelle 4-3** sind die Ergebnisse des ISC Tests zu entnehmen.

Tabelle 4-3: Ergebnisse mittels Arbeitsfenstermethode

reference Work	kWh	20.80	Points total	-	9594.00	Max. Span Drift	%	< 2
EU Power Threshold	%	20.00	Data Coverage No.	-	9562.00	Max. Zero Drift	%	< 2
min Power	%	20.01	Data Coverage Perc	%	99.67	Max. Diff. Drift Correction	%	6.0
max Power	%	53.67	Work Windows total	-	7974.00			
Conformity Factor GAS	-	1.50	Valid Windows No.	-	7786.00			
Conformity Factor Particles	-	2.00	Valid Windows Perc	%	97.64			

ave BS CO	g/kWh	0.24	ave BS THC	g/kWh	0.01	ave BS NOx	g/kWh	0.38
min BS CO	g/kWh	0.18	min BS THC	g/kWh	0.00	min BS NOx	g/kWh	0.07
max BS CO	g/kWh	0.55	max BS THC	g/kWh	0.02	max BS NOx	g/kWh	1.13
90%Perc BS CO	g/kWh	0.28	90%Perc BS THC	g/kWh	0.01	90%Perc BS NOx	g/kWh	0.48
EU Limit CO	g/kWh	4.00	EU Limit THC	g/kWh	0.16	EU Limit NOx	g/kWh	0.46
Conformity Factor CO	-	0.07	Conformity Factor THC	-	0.04	Conformity Factor NOx	-	1.04

Abbildung 4-3 zeigt den Übereinstimmungsfaktor für NOx. Die rote Linie stellt den EURO 6 Grenzwert von 1,5 dar. Bei 90 % wird interpoliert und es ergibt sich ein Übereinstimmungsfaktor von 1,04. Es ist ersichtlich, dass der erlaubte Grenzwert deutlich unterschritten wird. Da die Übereinstimmungsfaktoren über die Fahrzeugnutzungsdauer (700.000 km oder 7 Jahre) nachgewiesen werden müssen, kann demnach wahrscheinlich ausreichend Sicherheit gewährleistet werden.

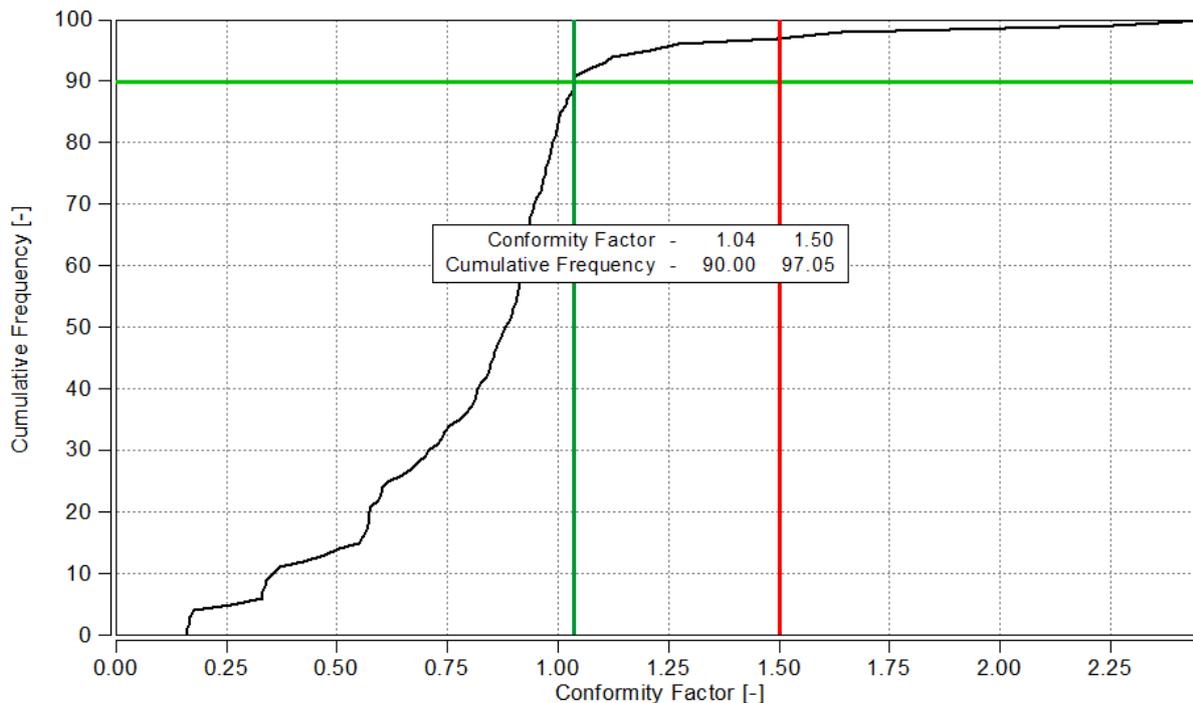


Abbildung 4-3: Übereinstimmungsfaktor NOx

In **Abbildung 4-4** sind Drehzahl, Drehmoment, Geschwindigkeit und die Übereinstimmungsfaktoren von NO_x jedes gültigen Arbeitsfensters dargestellt. Drehzahl-, Drehmomentverlauf und die Zeit dienen als Input für HiL Simulation und Motorprüfstand. Mittels CAMEO⁴ wird aus diesen Größen ein Prüflauf generiert, der am HiL simuliert und Motorprüfstand nachgefahren wird. Eingangsgrößen für diesen Prüflauf sind Drehzahl- und Momentenverlauf der realen Messung. Die Aufteilung in Stadt-, Land- und Autobahnanteil ist anhand des Geschwindigkeitsprofils deutlich zu erkennen.

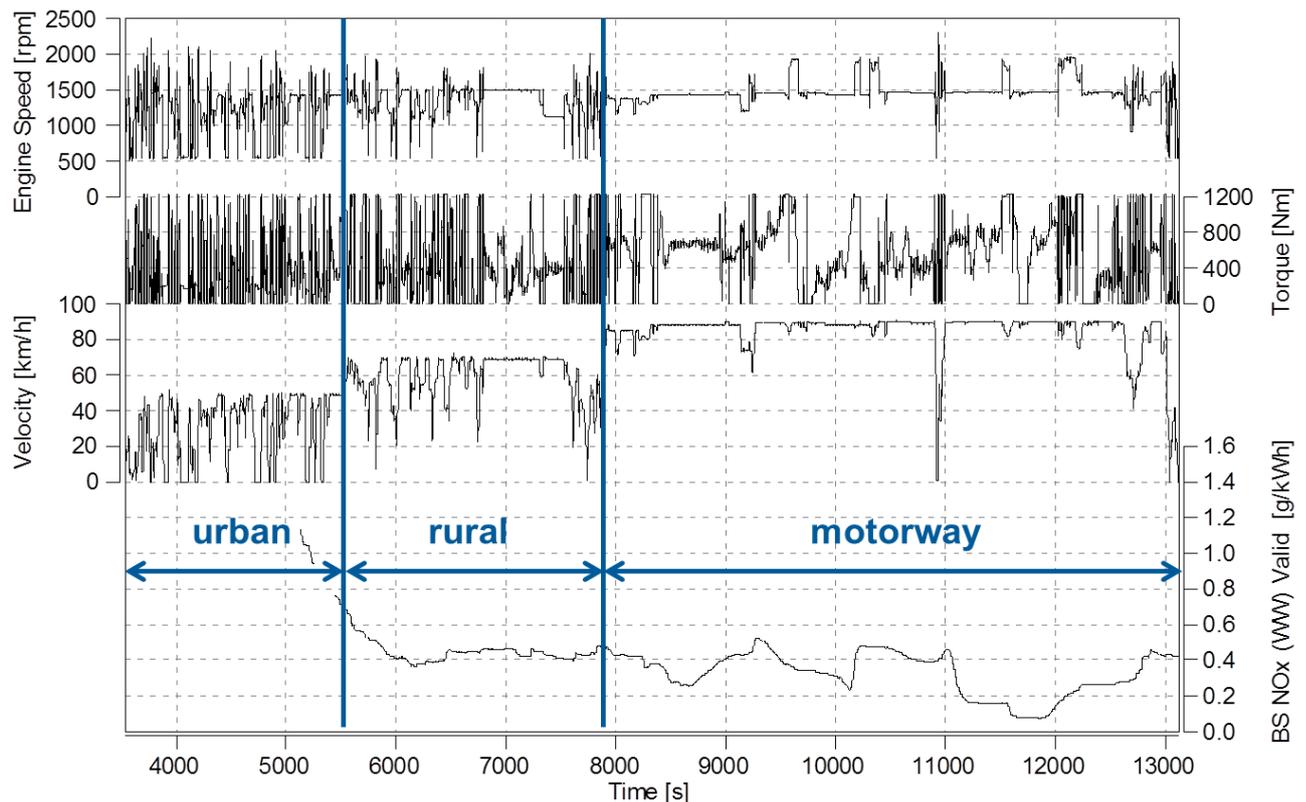


Abbildung 4-4: PEMS Test 3

Aus den Übereinstimmungsfaktoren der einzelnen Arbeitsfenster ist ersichtlich, dass die ersten gültigen Arbeitsfenster einen großen Einfluss auf den 90% Perzentilwert haben.

Weiters ist das Drehmoment der ECU mit jenem des Motorprüfstands zu überprüfen. Dabei darf im WHSC eine maximale Abweichung von 7% vorhanden sein.

Die ISC Tests werden wenn möglich immer zur selben Tageszeit gefahren, da das Verkehrsaufkommen ähnlich ist. Somit kann die Gefahr aufgrund überlasteter Straßen die prozentualen Anteile zeitlich zu überschreiten reduziert werden.

⁴ Automatisierungstool

5 Simulation der ISC Tests am HiL Prüfstand

Aufgrund der stetig steigenden Komplexität und des zunehmenden Funktionsumfangs der Motorsteuergeräte gewinnen virtuelle Prüfstände immer mehr an Bedeutung, vor allem, um die Entwicklungszeiten und Kosten zu reduzieren. Ein weiterer Grund für die steigende Bedeutung ist die mittlerweile sehr hohe Genauigkeit der verwendeten Modelle. Das reale Steuergerät und reale mechatronische Komponenten (z.B.: Injektoren, VTG-Steller, AGR Ventil,...) sind über deren Ein- und Ausgänge mit dem HiL Prüfstand, welcher zur Nachbildung des realen Motors dient, verbunden. Bei der HiL Simulation wird der Motor über Modelle simuliert. Damit können die Funktionen der ECU überprüft und/oder kalibriert werden.

Einige Vorteile des HiL Prüfstandes:

- Senkung der Entwicklungszeit und Kosten, da dadurch die Tests am Motorprüfstand reduziert werden können.
- Da der Motor als Modell vorhanden ist, kann dieser auch bei falscher Bedienung oder fehlerhafter ECU keinen Schaden nehmen.
- Tests sind beliebig oft unter denselben Bedingungen durchführbar.

Demgegenüber steht der Nachteil, dass die Genauigkeit der Simulation der realen Umgebung, unabhängig von den technischen Möglichkeiten, begrenzt ist. Die Genauigkeit ist vor allem durch die geforderte Echtzeitfähigkeit der Modelle eingeschränkt. Virtuelle Prüfstände können daher reale Tests nie ersetzen, aber reduzieren.

5.1 Der Prüfstand

Abbildung 5-1 zeigt den Aufbau des für diese Arbeit verwendeten HiL Prüfstands. Dieser ist ausgenommen vom simulierten Motor nahezu identisch mit einem Motorprüfstand der AVL. Es sei an dieser Stelle erzählt, dass das Motormodell des EURO6 Medium Duty Engine bei den HiL Simulationen verwendet wird. Bei den MiL Simulationen wurde ein Motormodell einer mobilen Arbeitsmaschine verwendet und adaptiert. Als Applikationssoftware und damit Schnittstelle für die Kommunikation mit ECU und HiL Prüfstand wird die Software INCA⁵ verwendet. Mit PUMA⁶ und CAMEO stehen dieselben Schnittstellen wie am realen Prüfstand zur Verfügung. Die Daten werden mittels PUMA Host Verbindung, identisch zum Motorprüfstand, gespeichert. Diese Konfiguration hat den großen Vorteil, dass die Daten im selben Format abgespeichert werden wie die realen Prüfstandsdaten.

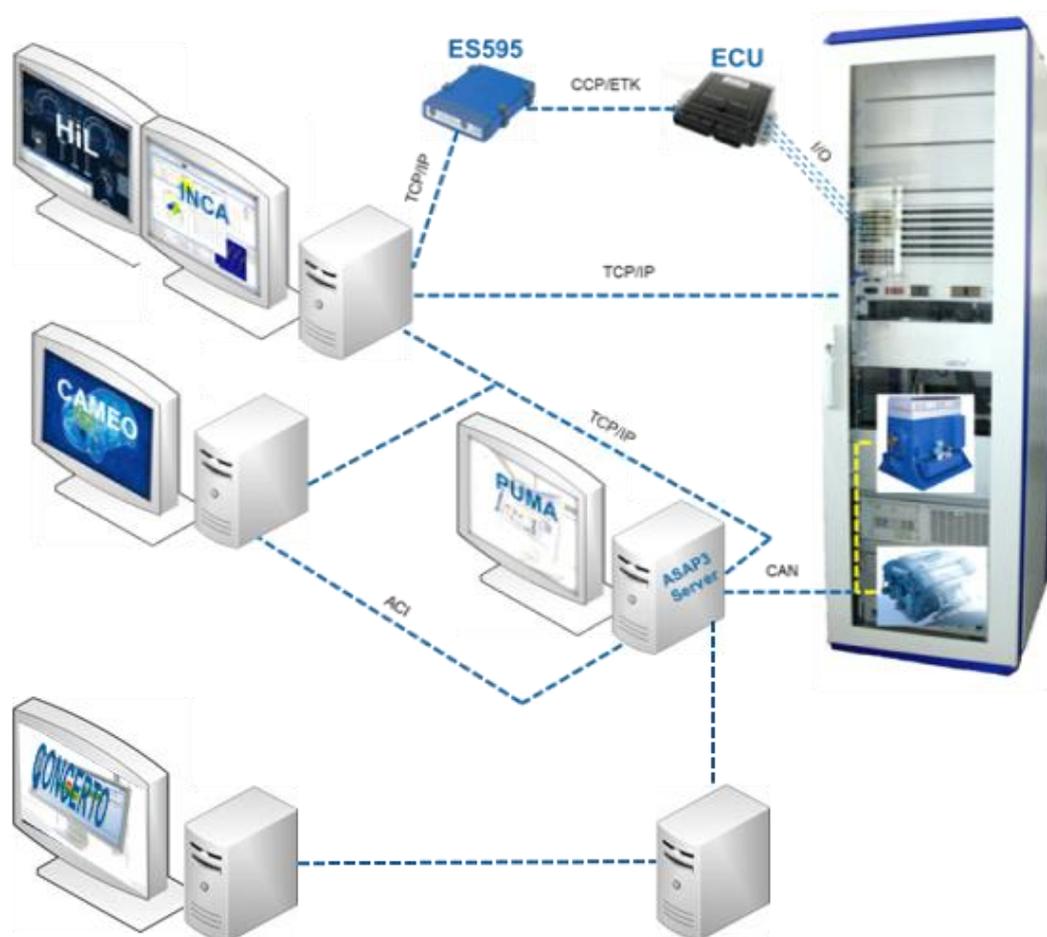


Abbildung 5-1: HiL Prüfstands Aufbau [9]

⁵ Steuergerätesoftware

⁶ Prüfstands- und Messtechnikautomatisierung

5.2 Die Genauigkeit des abgestimmten Motormodells

Mithilfe sogenannter Scatterplots wird die Genauigkeit des abgestimmten Motormodells dargestellt. Bei den HiL Simulationen wird das Motormodell für den Medium Duty Engine verwendet. Im Gegensatz zu den MiL Simulationen wo ein Motormodell einer mobilen Arbeitsmaschine verwendet wurde. Bei diesen Plots werden auf der Abszisse die gemessenen Werte (Motorprüfstandswerte) eines Motorkennfeldes und auf der Ordinate die simulierten Werte (HiL Simulation) aufgetragen. Im Idealfall ergibt sich eine Punkteschar die eine 45° Gerade darstellt. In **Abbildung 5-2**, **Abbildung 5-3**, **Abbildung 5-4**, **Abbildung 5-5**, **Abbildung 5-6**, **Abbildung 5-7**, **Abbildung 5-8** und **Abbildung 5-9** sind die Scatterplots dargestellt. Zusätzlich ist bei jedem Diagramm die Häufigkeitsverteilung der Abweichung abgebildet. Dazu wird jeweils der Simulationswert vom Prüfstandwert subtrahiert und anschließend in Klassen eingeteilt. Die Punkte der einzelnen Klassen werden anschließend mithilfe der Gesamtanzahl der Messpunkte des Kennfeldes in Prozentwerte umgerechnet.

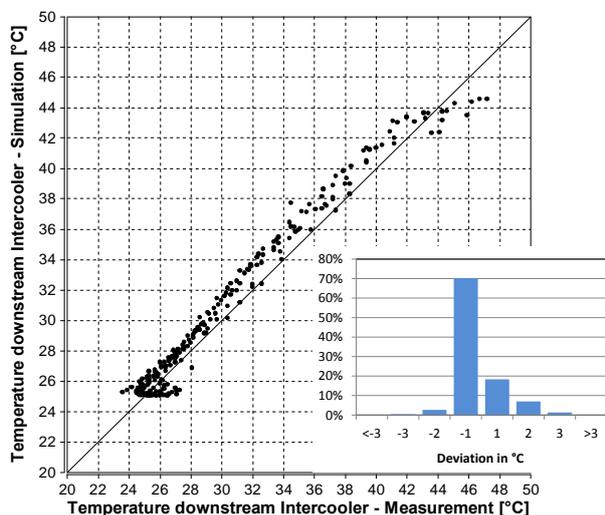


Abbildung 5-2: Scatterplot T_2_1

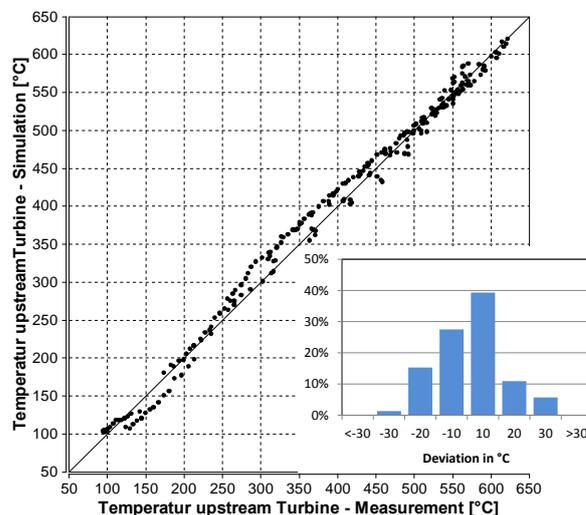


Abbildung 5-3: Scatterplot T_31

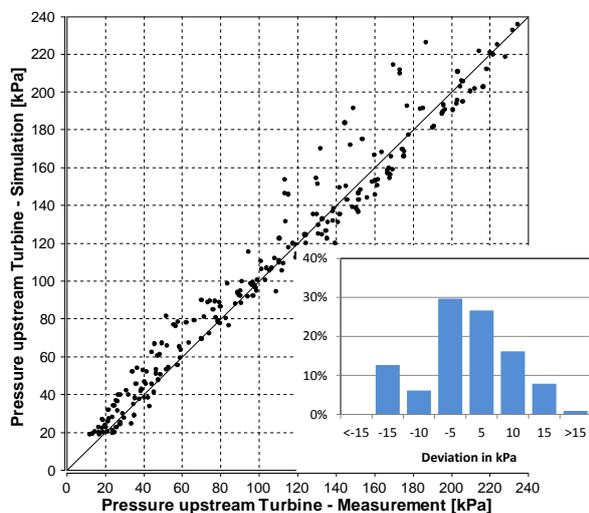


Abbildung 5-4: Scatterplot P_31

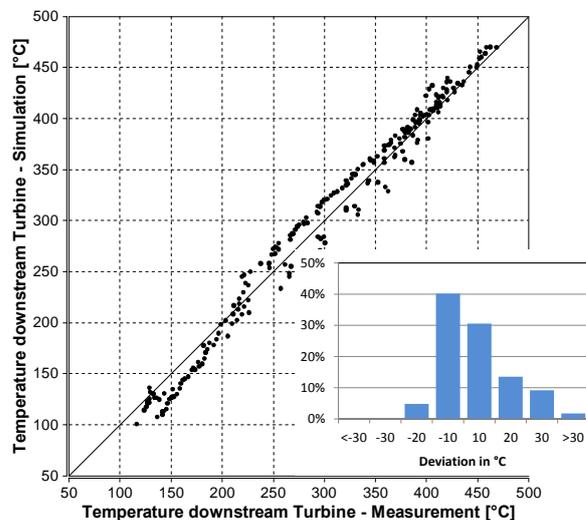


Abbildung 5-5: Scatterplot T_41

Die Aussage dieser Plots wird anhand **Abbildung 5-5** erläutert. Die Messpunkte sind in einer

Punkteschar um die 45° Gerade angeordnet. Mithilfe der Häufigkeitsverteilung wird verdeutlicht, dass über 70% der Werte von T_41 innerhalb einer Abweichung von ± 10 °C liegen. Positive Abweichungen bedeuten, dass die am Prüfstand gemessenen Werte höher sind als die am HiL simulierten. Bei negativen ist es genau umgekehrt.

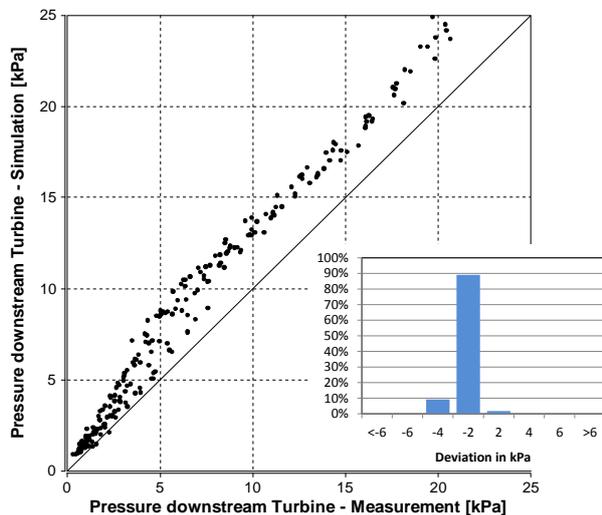


Abbildung 5-6: Scatterplot P_41

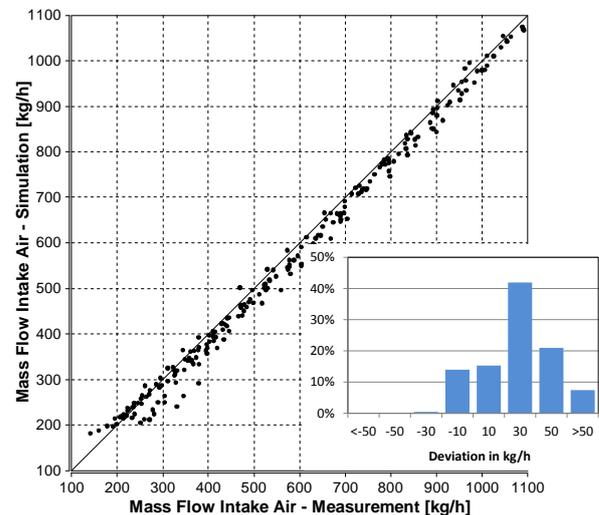


Abbildung 5-7: Scatterplot MF_IA

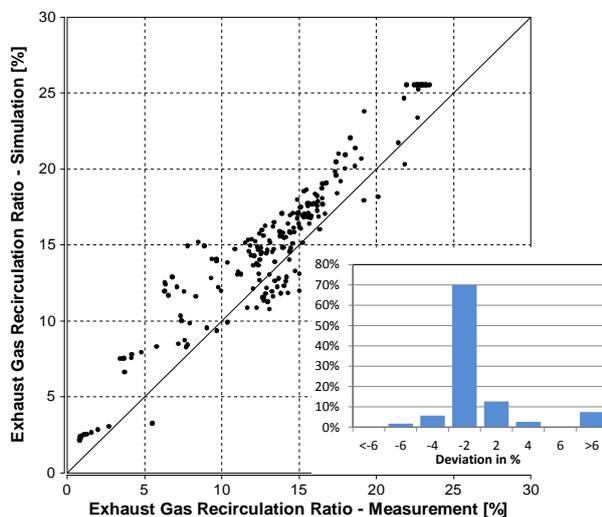


Abbildung 5-8: Scatterplot RT_EGR

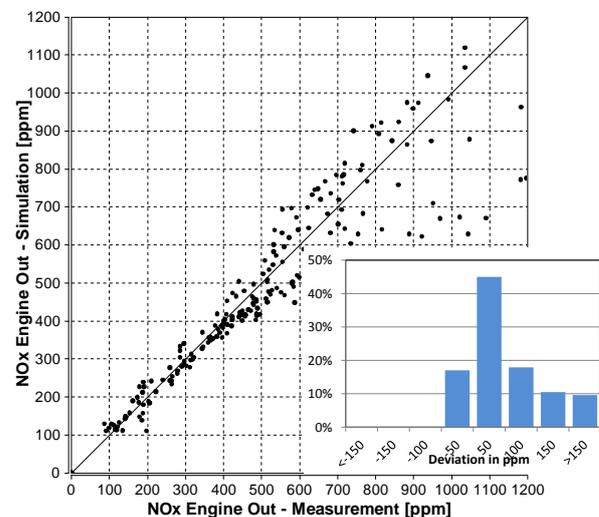


Abbildung 5-9: Scatterplot NOx_EO_S

T_31 und T_41 liegen mit Ausnahme einiger weniger Punkte im Bereich ± 20 °C. Der simulierte P_41 ist etwas zu hoch, kann jedoch mit wenig Aufwand angepasst werden. Der simulierte Luftmassenstrom ist tendenziell etwas niedriger als jener vom Prüfstand. In Folge dessen ist die AGR Rate am HiL etwas zu hoch. Das Motormodell erfüllt jedoch die geforderten Genauigkeitsanforderungen.

5.3 Simulation der ISC Tests

Bei der Simulation werden im Vergleich zum Fahrzeug nur die gasförmigen NO_x Zyklusemission ermittelt. Dies erfolgt durch Integration der jeweiligen Massenströme und anschließender Division der errechneten Zyklusarbeit. Aus zeitlichen Gründen war es nicht möglich, Übereinstimmungsfaktoren für HiL und Motorprüfstand zu berechnen. Zu Vergleichszwecken werden beim Fahrzeug, zusätzlich zu dem 90% Perzentilwert der Übereinstimmungsfaktoren die Zyklusstickoxidemissionen auf dieselbe Weise ermittelt. Wie bereits erwähnt geht aus den Übereinstimmungsfaktoren der einzelnen Arbeitsfenster (**Abbildung 4-4: PEMS Test 3**) hervor, dass die ersten gültigen Arbeitsfenster einen großen Einfluss auf den 90% Perzentilwert haben.

Die Grenzwerte für HC und CO stellen aufgrund der hohen Oxidationsraten im DOC keine Probleme dar, daher werden hier nur die NO_x Emissionen analysiert.

5.3.1 Standardbedingungen

Die ISC Tests werden unter Standardbedingungen, d.h. bei Graz Niveau und 25 °C, simuliert. Dadurch ist es möglich, die Ergebnisse der HiL Simulation mit den Messungen am Prüfstand und am Versuchsträger zu vergleichen. Somit kann eine Aussage über die Genauigkeit der Simulation, bzw. des Modells getroffen werden.

5.3.2 Non-Standardbedingungen

Da der HiL Prüfstand häufig für die Bedatung der Umgebungskorrekturfunktionen der ECU verwendet wird, werden die ISC Tests auch unter Non-Standardbedingungen simuliert, um den Einfluss auf die Stickoxidemissionen zu bewerten. Die Non-Standardbedingungen wurden nicht beliebig gewählt. Graz Niveau / -7 °C, Graz Niveau / 38 °C und 1700 m / 30 °C Stellen die Grenzen der Umgebungsbedingungen des WNTe Bereichs dar.

Aktuell ist der Ausstoß von Schadstoffemissionen über 1700 m nicht limitiert, die Kalibration soll jedoch so erfolgen, dass die Emissionen über 1700 m nicht sprunghaft ansteigen. Dies könnte sich jedoch mit zukünftigen Abgasgesetzgebungsstufen ändern. Aus diesem Grund und um die Auswirkungen auf die Emissionen bewerten zu können, werden die ISC Tests auch bei 2500 m und 3500 m jeweils bei der höchstmöglichen Temperatur (ermittelt mit der in Kapitel 2.1.5.2 angegebenen Formel) simuliert.

Non-Standardbedingungen:

- Graz Niveau / -7 °C
- Graz Niveau / 38 °C
- 1700 m / 30 °C
- 2500 m / 26 °C
- 3500 m / 22 °C

5.4 Ergebnisse

In **Tabelle 5-1** sind die Mittelwerte der ISC Tests für Versuchsträger, Motorprüfstand und HiL dargestellt. Mit den NO_x Sensorwerten aus der ECU werden die ECU Mittelwerte berechnet. Das PEMS misst nur die NO_x TP Emissionen, aus diesem Grund wird der ECU Wert (NO_x EO Sensorwert) zur Berechnung der NO_x Konvertierungsrate verwendet. D.h. die ECU Ergebnisse in **Tabelle 5-1** werden mittels Sensorwerten (EO und TP) berechnet. Bei den Benchwerten erfolgt die Berechnung mit den gemessenen Werten, im Gegensatz zu den ECU Werten, bei denen die Daten der NO_x Sensoren verwendet werden.

Tabelle 5-1: Mittelwerte der ISC Tests

ISC Tests						
		Ambient Conditions		NO _x TP	NO _x EO	Konv.
				[g/kWh]	[g/kWh]	[%]
Truck	PEMS	graz niveau	16 °C	0,43	4,92	91,3
Truck	ECU	graz niveau	16 °C	0,22	4,92	95,6
Testbed	Bench	graz niveau	25 °C	0,30	4,81	93,7
Testbed	ECU	graz niveau	25 °C	0,26	4,43	94,1
HiL	Bench	graz niveau	25 °C	0,23	4,29	94,7
HiL	ECU	graz niveau	25 °C	0,20	3,69	94,6
HiL	Bench	graz niveau	-7 °C	0,26	4,21	93,8
HiL	ECU	graz niveau	-7 °C	0,26	4,19	93,8
HiL	Bench	graz niveau	38 °C	0,24	3,44	93,2
HiL	ECU	graz niveau	38 °C	0,23	3,42	93,1
HiL	Bench	1700 m	30 °C	0,32	5,05	93,7
HiL	ECU	1700 m	30 °C	0,31	4,77	93,6
HiL	Bench	2500 m	26 °C	0,56	6,83	91,8
HiL	ECU	2500 m	26 °C	0,51	6,25	91,8
HiL	Bench	3500 m	22 °C	0,58	8,11	92,9
HiL	ECU	3500 m	22 °C	0,53	7,59	93,0

5.5 Vergleich der simulierten ISC Tests von HiL, Motorprüfstand und Fahrzeug

Um eine weitere Vergleichsmöglichkeit zu erhalten, wird ein ISC Test am Motorprüfstand nachgefahren. Als Input für die HiL Simulation und den Motorprüfstand dient der ISC Test im Fahrzeug (Test 3).

Der Versuchsträger wird vor den ISC Tests mit Messtechnik bestückt, wobei darauf geachtet wird dass die Sensorpositionen ähnlich zu den Positionen am Motorprüfstand sind.

Um die simulierten Daten des HiL mit den Daten des Motorprüfstandes und Fahrzeuges vergleichen zu können, wird ein 300 Sekundenausschnitt im Überlandbereich (Geschwindigkeit 50 – 75 km/h) verwendet.

Abbildung 5-10 zeigt die Verläufe von T₁₁, T₂₁, T₃₁ und T₄₁ bei der PEMS Messung. Die geringere Ansauglufttemperatur im Fahrzeug ist auf die Umgebungsbedingungen zurückzuführen. Generell folgt, dass die simulierten Temperaturen sehr gut mit jenen von Prüfstand und Fahrzeug übereinstimmen.

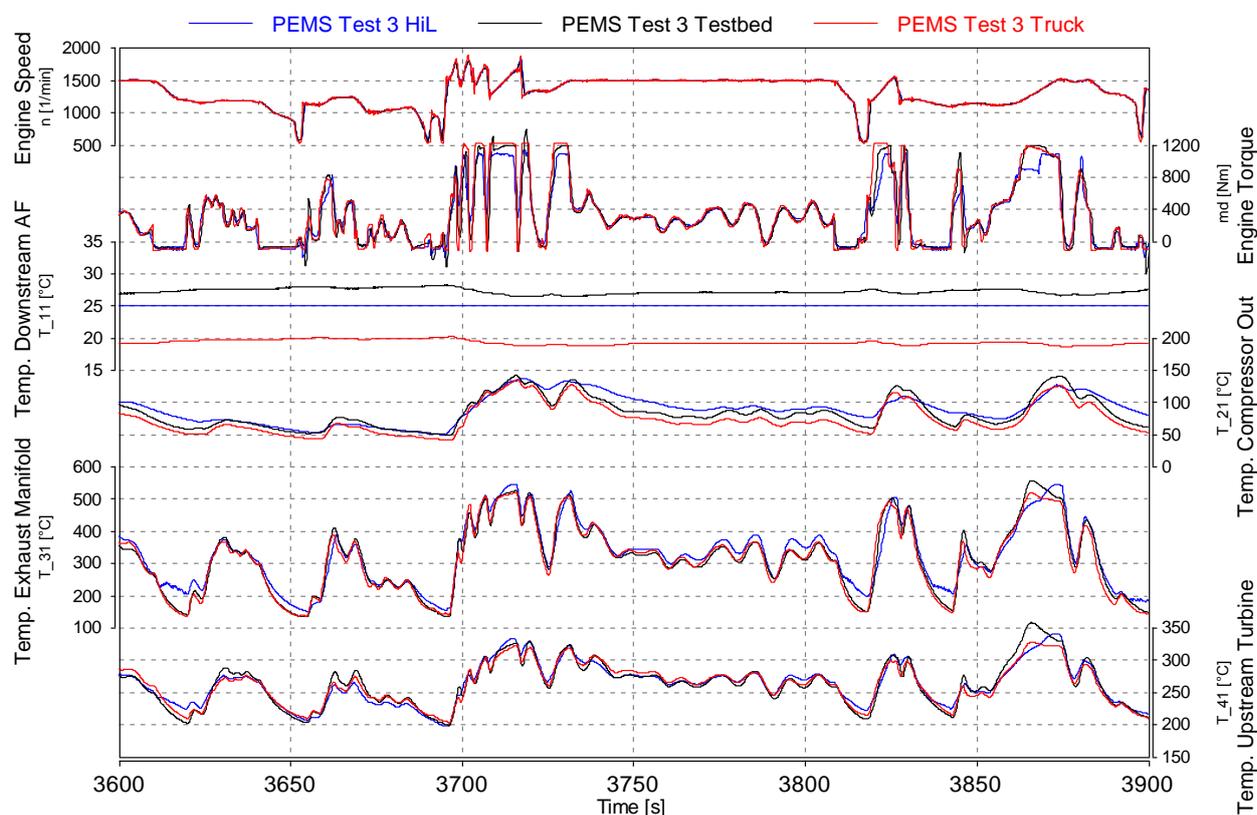


Abbildung 5-10: Temperaturverläufe

In **Abbildung 5-11** sind die Druckverläufe desselben Zeitabschnitts dargestellt. Die simulierten Drücke sind tendenziell etwas zu hoch. Ein möglicher Grund dafür ist der unterschiedliche Wirkungsgrad von Kompressor und Turbine real / simuliert. Trotz Abweichungen stimmen die Verläufe der Simulation gut mit jenen von Prüfstand und Versuchsträger überein.

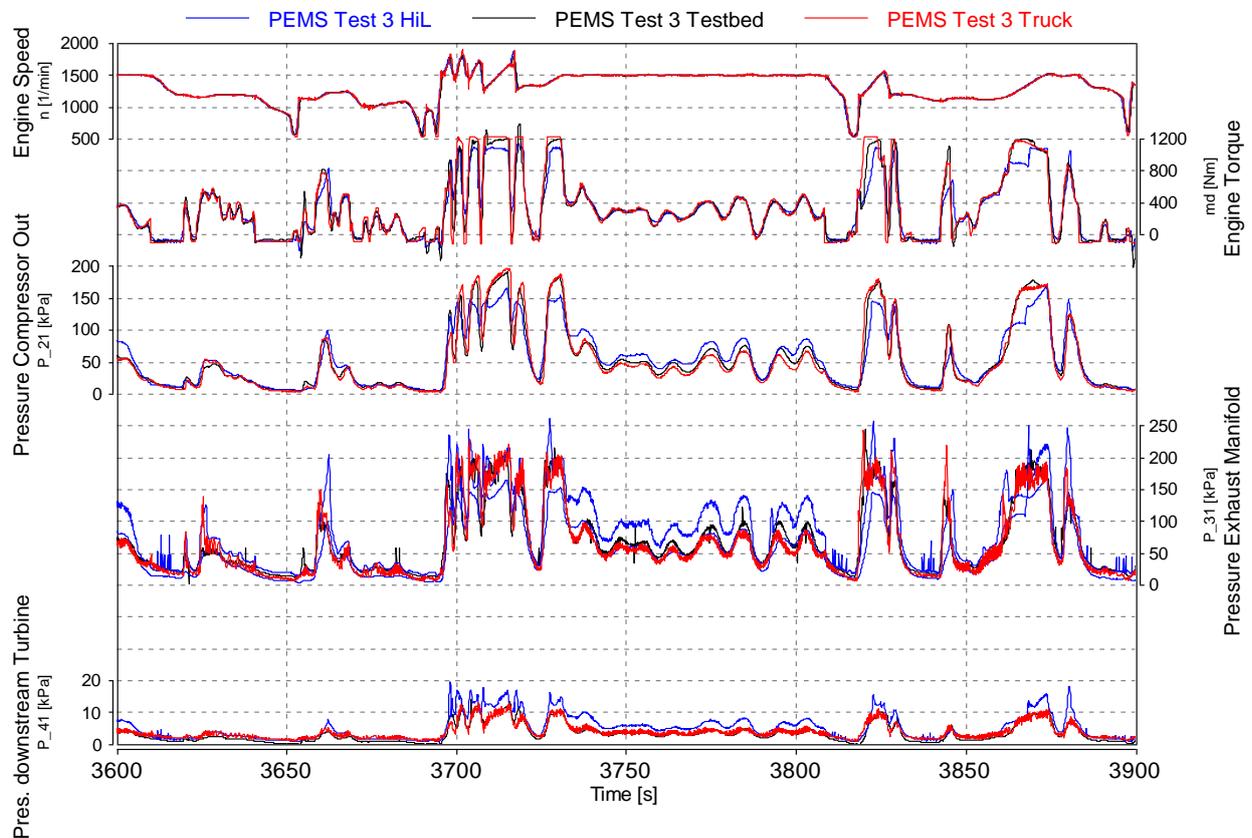


Abbildung 5-11: Druckverläufe

Abbildung 5-12 zeigt den Massenstrom der Ansaugluft sowie den Druck am Kompressorausgang. Wird der Druckverlust im Ladeluftkühler (Größenordnung ~ 100 mbar) von P_{21} subtrahiert, so erhält man den Ladedruck. Der simulierte Luftmassenstrom ist bei hohen Luftmassendurchsätzen tendenziell zu niedrig, daher ist auch P_{21} , abhängig vom Betriebspunkt, niedriger und infolge dessen auch P_{31} . Dies zeigt auch der dazugehörige Scatterplot (**Abbildung 5-7**).

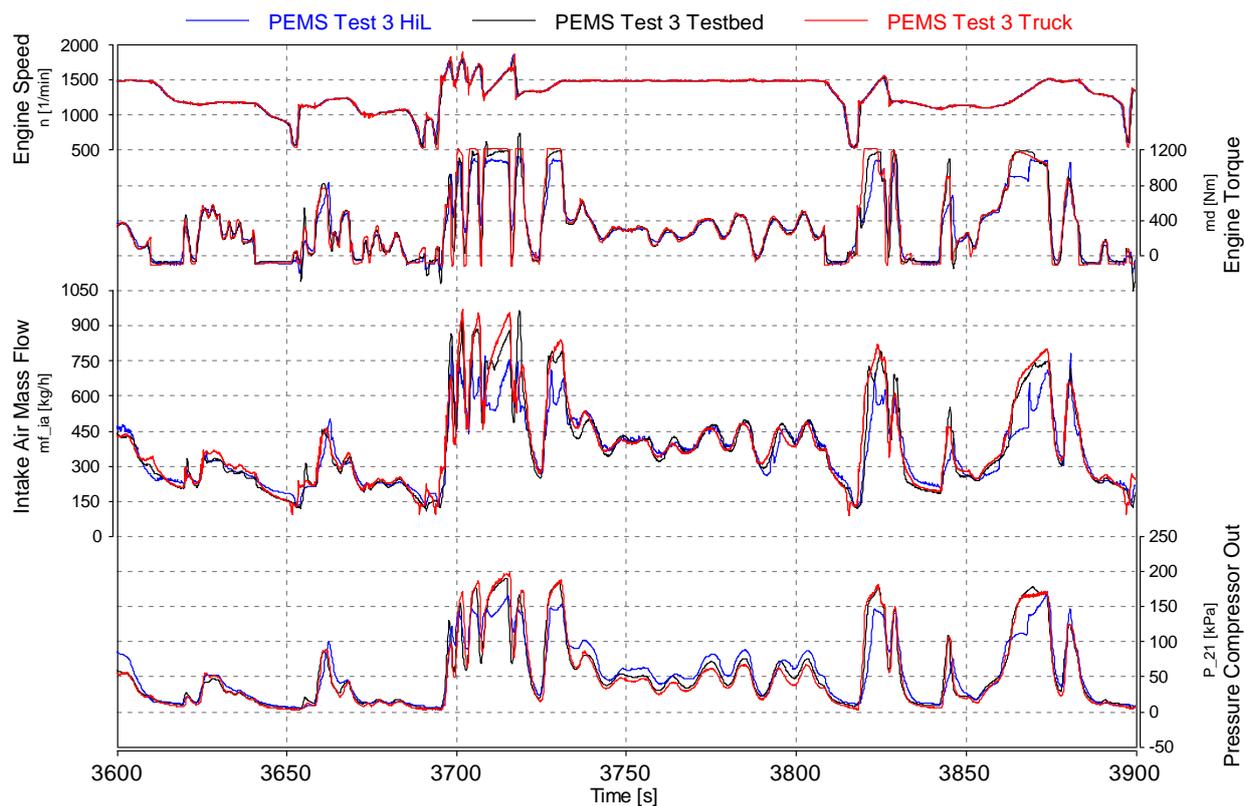


Abbildung 5-12: Massenstrom Ansaugluft und Druck am Kompressoraustrag

In **Abbildung 5-13** sind VTG und AGR Position sowie die AGR Temperatur dargestellt. Die AGR Rate wird am HiL mithilfe eines eigenen Modells abgebildet und an stationäre Punkte des Motorkennfeldes angepasst. Der ISC Test ist ein transienter Zyklus, daher kommt es zu den Abweichungen der AGR Position. Die unterschiedliche VTG Position ist auf die Hystereseabhängigkeit, sowie dem Zusammenspiel von Ladedruck- und AGR Regelung zurückzuführen.

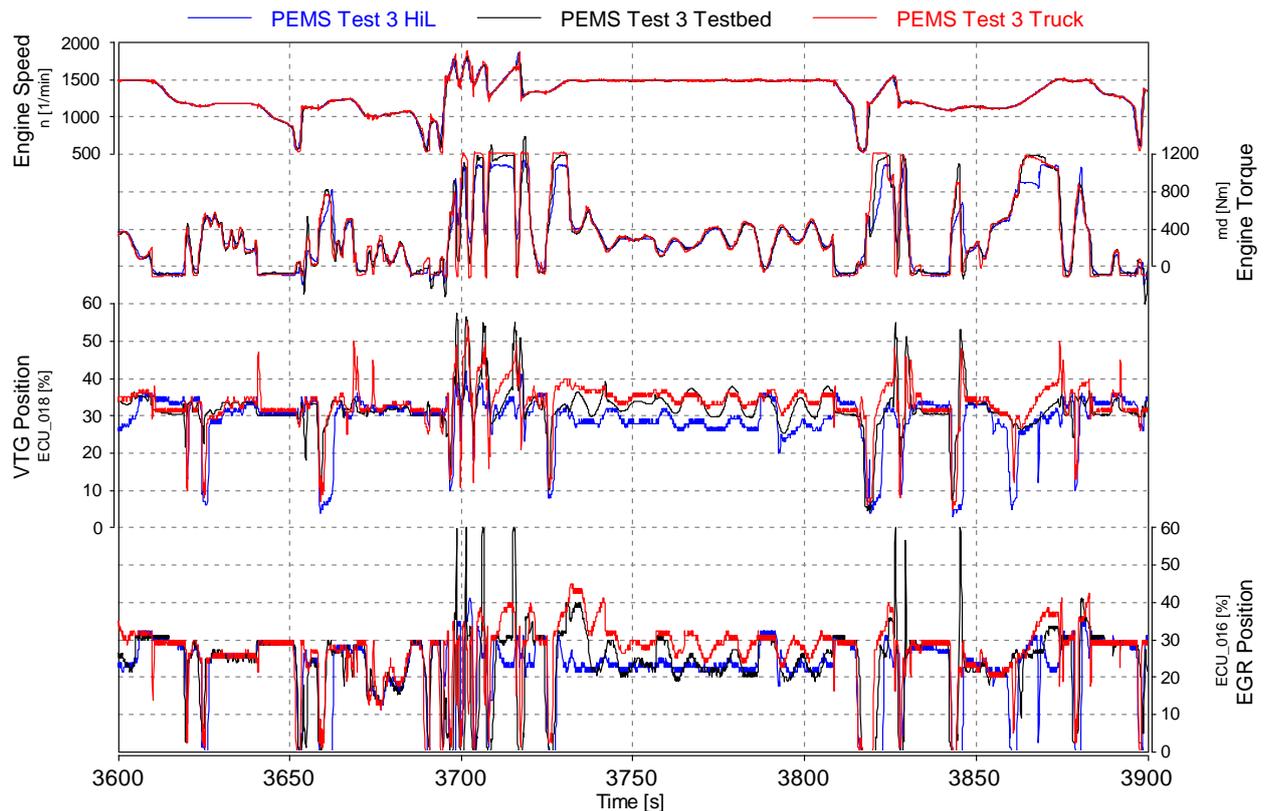


Abbildung 5-13: VTG Position und EGR Position

Abbildung 5-15 zeigt die NO_x EO und die NO_x TP Emissionen. Die NO_x EO werden am HiL sehr gut nachgebildet. Das verdeutlicht der in **Abbildung 5-16** dargestellte integrierte NO_x EO Massenstrom. Im Zyklusergebnis ergibt sich eine NO_x EO Abweichung zwischen HiL und Motorprüfstand von ca. 11%. Bei HiL und Versuchsträger beträgt die Abweichung 12%. Hier ist ersichtlich, dass die NO_x EO am Prüfstand sehr gut mit denen am Versuchsträger übereinstimmen. Basis für die Berechnung der prozentuellen Abweichung ist der Mittelwert NO_x EO des HiL Prüfstandes.

Bei den NO_x TP Emissionen zeigen sich größere Abweichungen. Dafür gibt es mehrere Gründe. Einerseits wurde das HiL Modell für ein neues EAS parametrisiert, andererseits war das EAS am Motorprüfstand zum Testzeitpunkt schon stark gealtert. Weiters war der SCR Katalysator im Fahrzeug leicht vergiftet. Das wirkt sich ebenfalls negativ auf den SCR Wirkungsgrad aus. Den Einfluss der gealterten Anlage auf die NO_x Konvertierungsrate zeigt **Abbildung 5-14**. Darin wird die NO_x Konvertierungsrate jedes Betriebspunktes von HiL und Prüfstand über die mittlere SCR Temperatur aufgetragen. Aus den Trendlinien geht hervor, dass die Konvertierungsrate am Prüfstand zwischen 94 und 95 % liegt. Hingegen am HiL liegt diese zwischen 98 und 99 %. Somit lassen sich die NO_x TP Abweichungen von HiL und Prüfstand erklären.

Werden die mithilfe der NO_x TP Sensorwerte aus der ECU berechneten Mittelwerte für NO_x TP (siehe **Tabelle 5-1**) betrachtet, ist ersichtlich, dass die Abweichungen deutlich geringer als bei den Benchwerten sind.

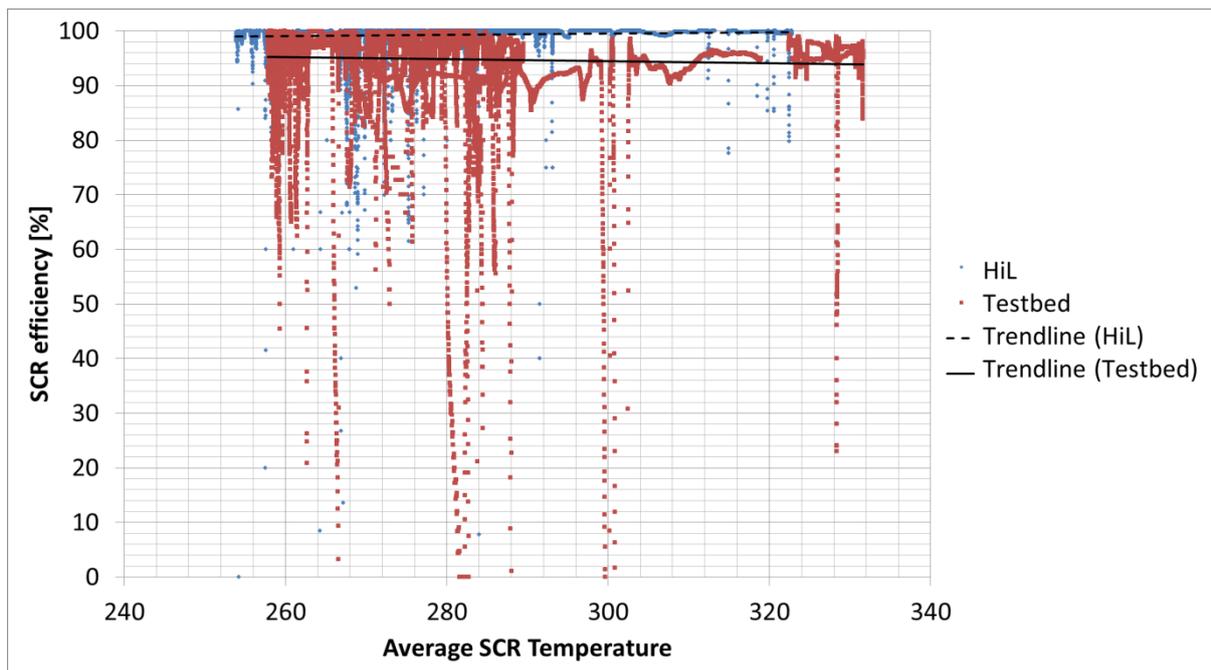


Abbildung 5-14: SCR Efficiency

Zum Zeitpunkt der PEMS Messung war das PEMS zur Messung von NO und NO₂ auf die Genauigkeit von 5000 ppm \pm 2% kalibriert. Das ergibt eine Genauigkeit von \pm 100 ppm. Angesichts der geringen TP Konzentrationen (0 – 250 ppm) hat diese Tatsache einen erheblichen Einfluss auf das Endergebnis. Somit lassen sich auch die NO_x TP Abweichungen zwischen Versuchsträger, Motorprüfstand und HiL erklären. Im Zuge weiterer ISC Tests wurde das PEMS auf eine Genauigkeit von 300 ppm \pm 2% kalibriert. Aus zeitlichen Gründen war es jedoch nicht möglich, einen neueren Test am HiL zu simulieren.

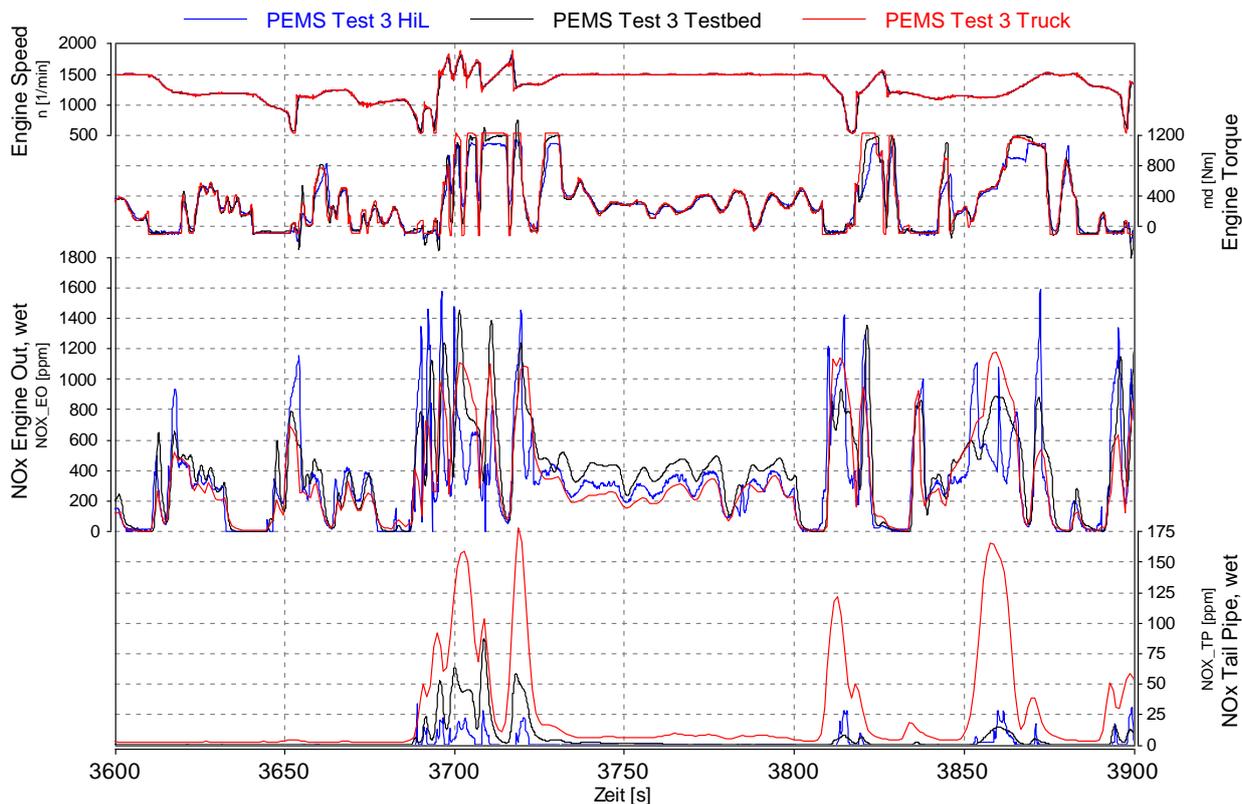


Abbildung 5-15: NO_x EO, NO_x TP

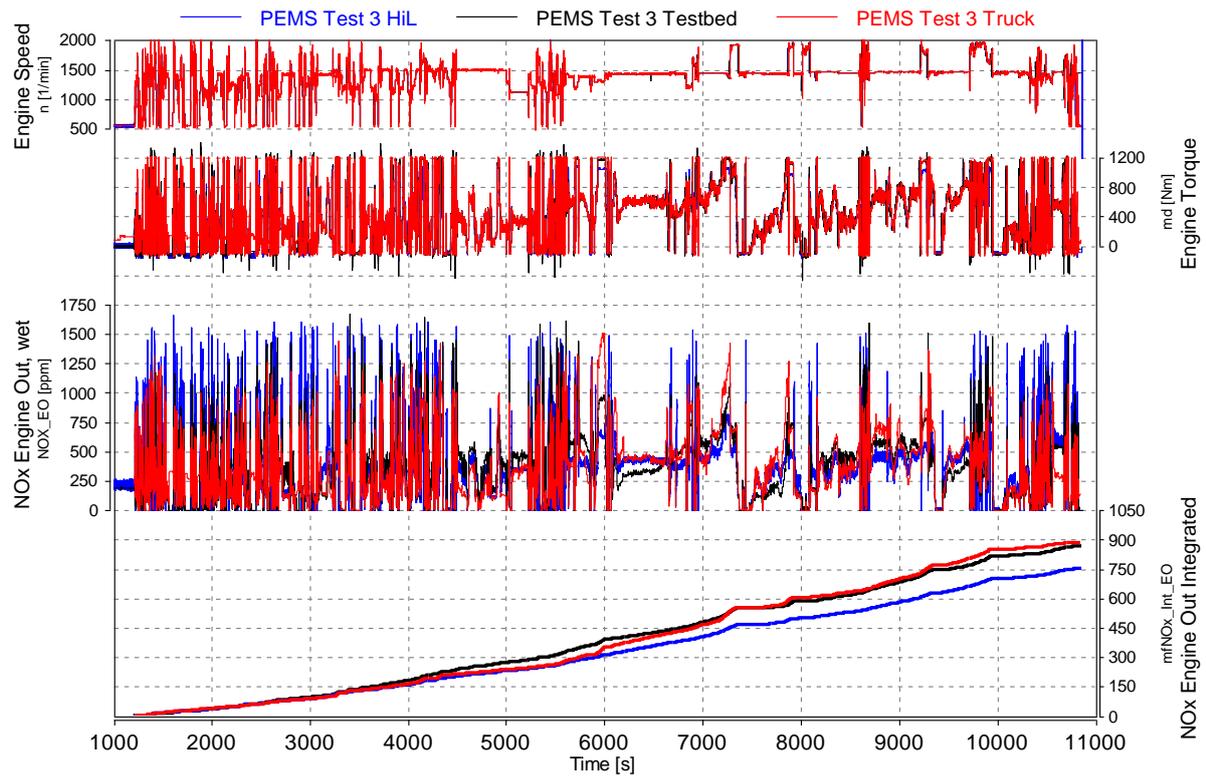


Abbildung 5-16: NOx EO über gesamte Testdauer

5.6 Vergleich der simulierten ISC Tests am HiL unter Non-Standardbedingungen

Zuerst werden die Ergebnisse der Messungen bei Graz Niveau (25 °C, -7 °C und 38 °C) verglichen. Anschließend erfolgt der Vergleich der Messungen in der Höhe (30 °C / 1700 m, 26 °C / 2500 m und 22 °C / 3500 m) mit jener der Standardbedingung (25 °C / Graz Niveau).

Vergleich: 25 °C, -7 °C und 38 °C jeweils bei Graz Niveau

In **Abbildung 5-17** sind die verschiedenen Temperaturen dargestellt. Die Abweichungen ergeben sich hauptsächlich aus den verschiedenen Umgebungsbedingungen sowie den aktiven ECU Korrekturfunktionen. Die höhere Saugrohrtemperatur bei 38 °C ist auf die höhere AGR Rate zurückzuführen.

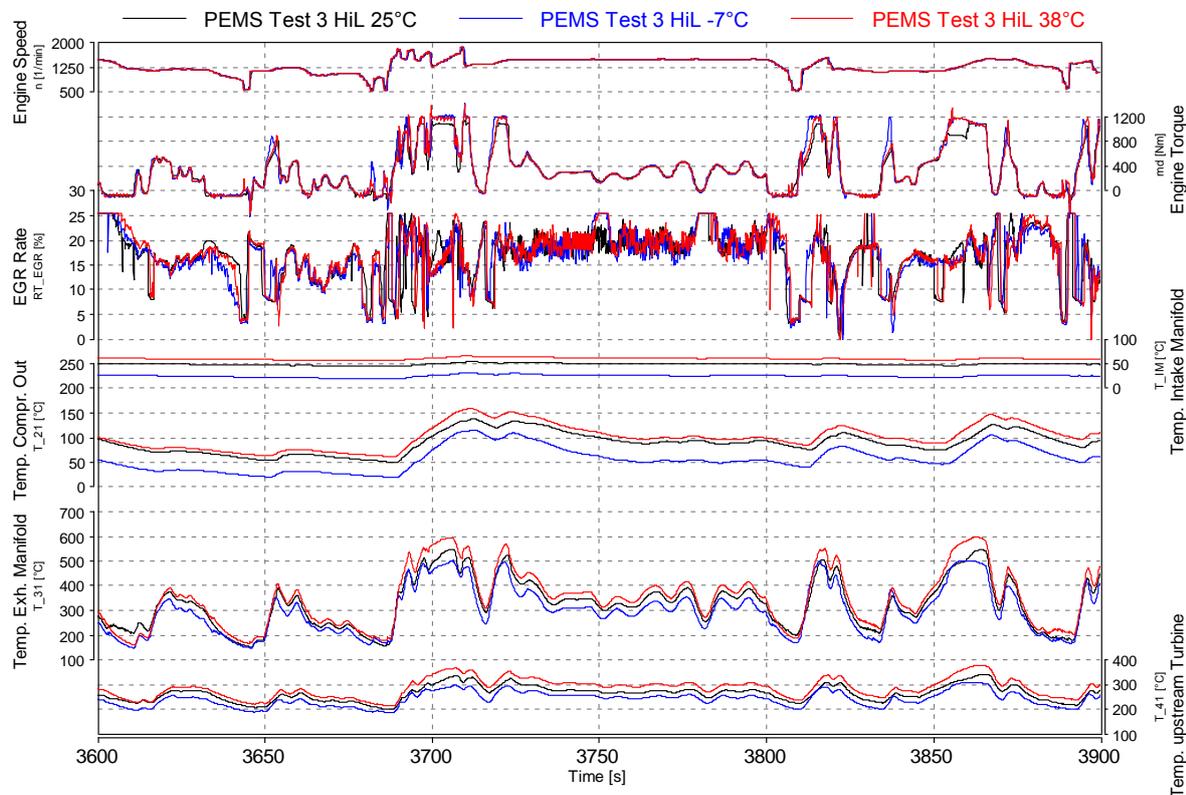


Abbildung 5-17: Temperaturen bei 25 °C, -7 °C und 38 °C

Abbildung 5-18 zeigt die Druckverläufe. Die Abweichungen der unterschiedlichen Umgebungsbedingungen zueinander sind sehr gering. P₂₁ ist die Summe aus dem Ladedruck (P_{2_1}) und dem Druckverlust durch den Ladeluftkühler. Die Abweichungen bei P₂₁ sind eine Folge der Luftmassenabweichung aufgrund der Temperaturabhängigkeit der Luftdichte und wirken sich direkt auf P₃₁ aus.

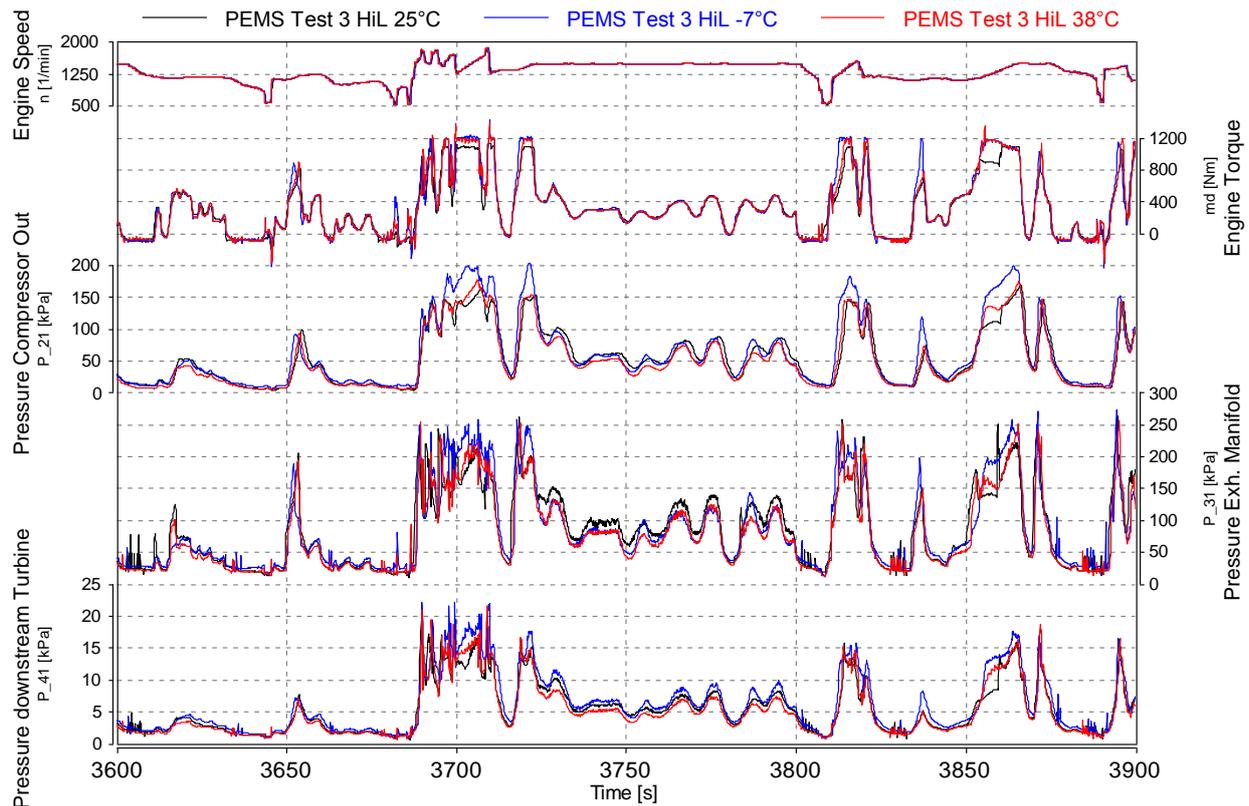


Abbildung 5-18: Drücke bei 25 °C, -7 °C und 38 °C

Den Einfluss der unterschiedlichen Umgebungsbedingungen auf die NO_x Emissionen zeigt **Abbildung 5-19**. Bei -7 °C sind die NO_x Rohemissionen, verglichen mit den beiden anderen Zuständen, am höchsten. Bei 38 °C sind sie am niedrigsten. Verdeutlicht wird dieser Effekt durch die integrierten NO_x Massenströme in **Abbildung 5-20**. Da die NO_x Konvertierungsrate des SCR bei -7 °C und 38 °C nahezu identisch sind, ergeben sich aufgrund der höheren NO_x Rohemissionen bei Kälte auch höhere NO_x TP. Die niedrigeren EO Emissionen bei 38 °C sind eine Folge der höheren Saugrohrtemperatur, die sich aufgrund der höheren AGR Rate einstellt. Ein weiterer Grund ist die Temperaturabhängigkeit der Luftdichte.

Die NO_x TP Zyklusemissionen sind bei -7 °C höher als bei 38 °C und 25 °C. Die NO_x Konvertierungsrate ist mit ca. 95 % bei 25 °C um 1 % höher im Vergleich zu -7 °C und 38 °C. Daher sind auch die NO_x TP bei diesem Umgebungszustand am niedrigsten.

Die NO_x TP Spitzen in **Abbildung 5-19** bei 38 °C sind eine Folge der geringeren NH₃ Beladung sowie der höheren SCR Temperatur. Bei hohen SCR Temperaturen kann der SCR Katalysator weniger NH₃ speichern, dadurch können NO_x TP Spitzen teilweise nicht mehr reduziert werden. Diese NO_x TP Spitzen brechen jedoch im simulierten ISC Test selten durch.

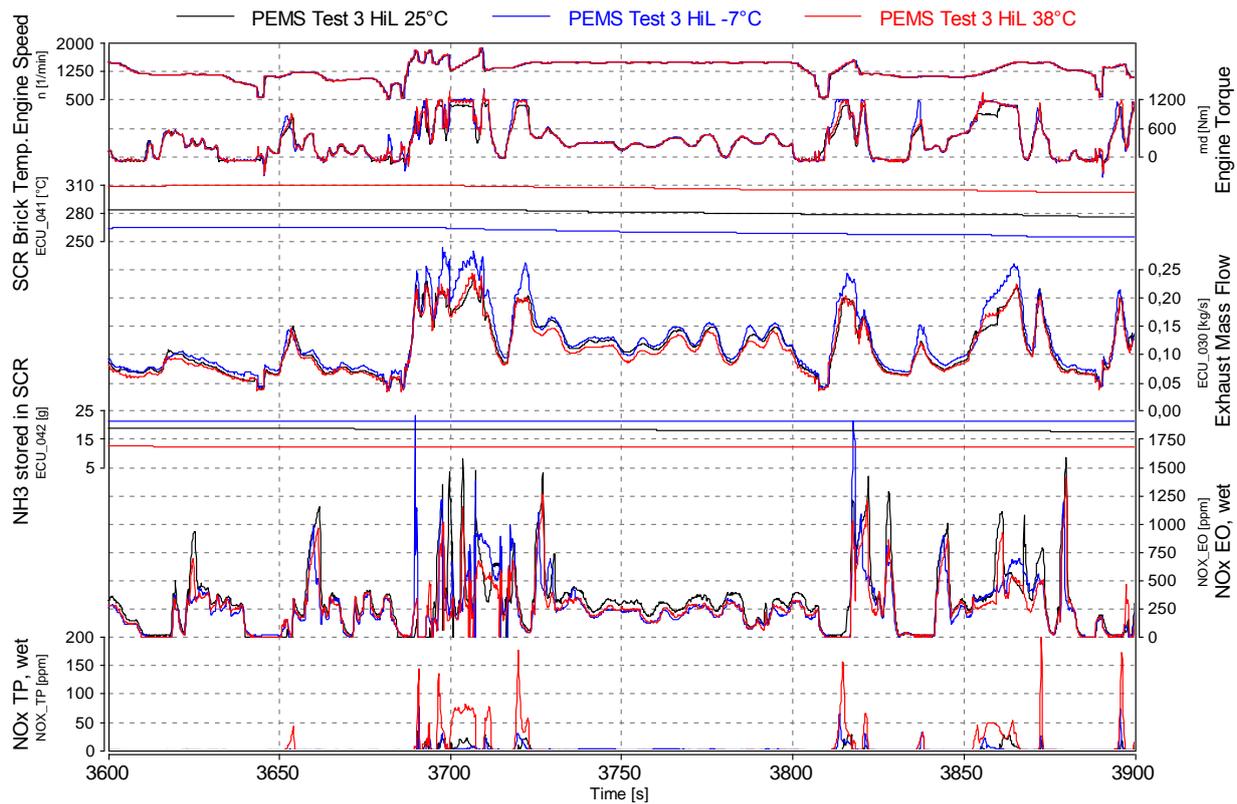


Abbildung 5-19: NO_x Analyse bei 25 °C, -7 °C und 38 °C

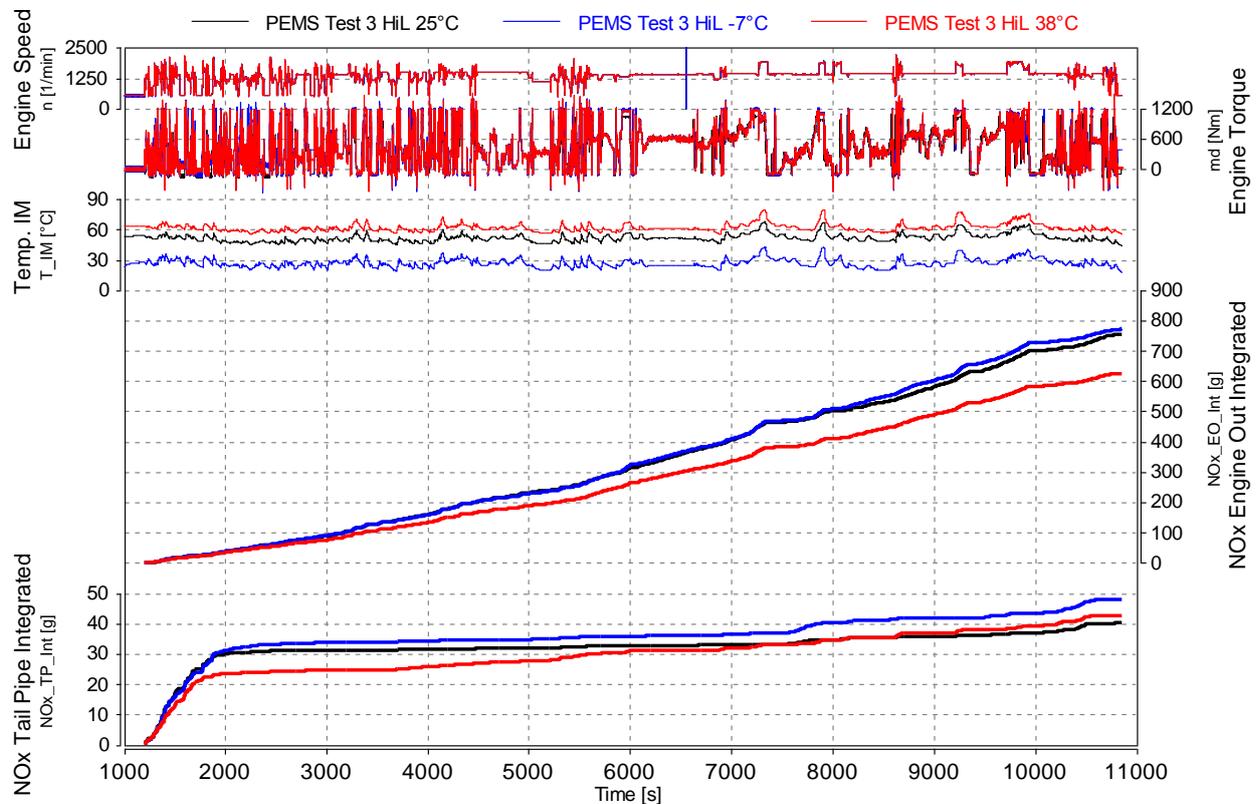


Abbildung 5-20: NO_x EO und NO_x TP über gesamte Testdauer bei 25 °C, -7 °C und 38 °C

Vergleich: 25 °C / Graz Niveau, 30 °C / 1700 m, 26 °C / 2500 m und 22 °C / 3500 m

Abbildung 5-21 zeigt die Temperaturverläufe bei den verschiedenen Umgebungsbedingungen. Hauptgrund für die Abweichungen der Temperaturen zueinander sind die unterschiedlichen Umgebungstemperaturen, sowie die aktiven ECU Korrekturfunktionen.

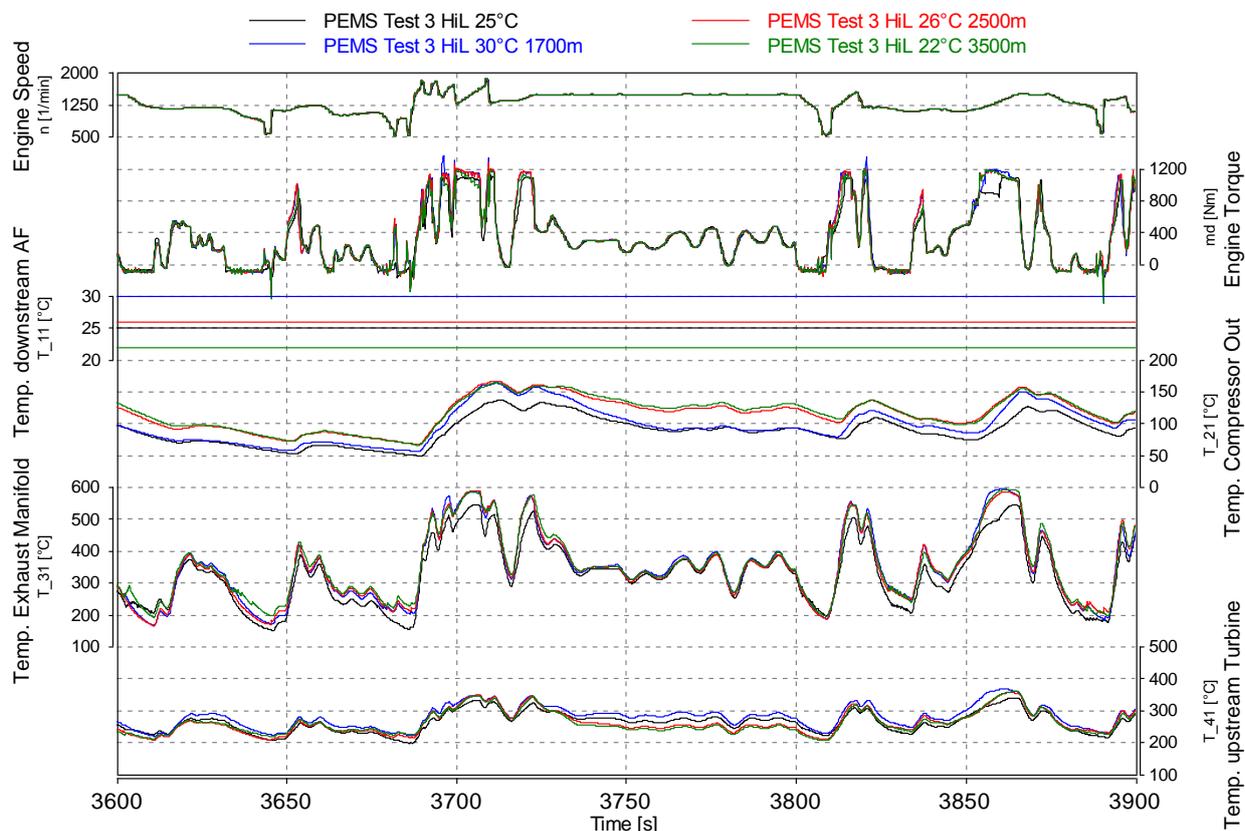


Abbildung 5-21: Temp. bei 25 °C und bei verschiedenen Höhen / Temp.

In **Abbildung 5-22** sind die Druckverläufe der unterschiedlichen Umgebungsbedingungen dargestellt. Der geregelte Ladedruck zeigt, dass im Gegensatz zu den MiL Simulationen (siehe Kapitel 3.3.3) ECU Korrekturfunktionen aktiv sind.

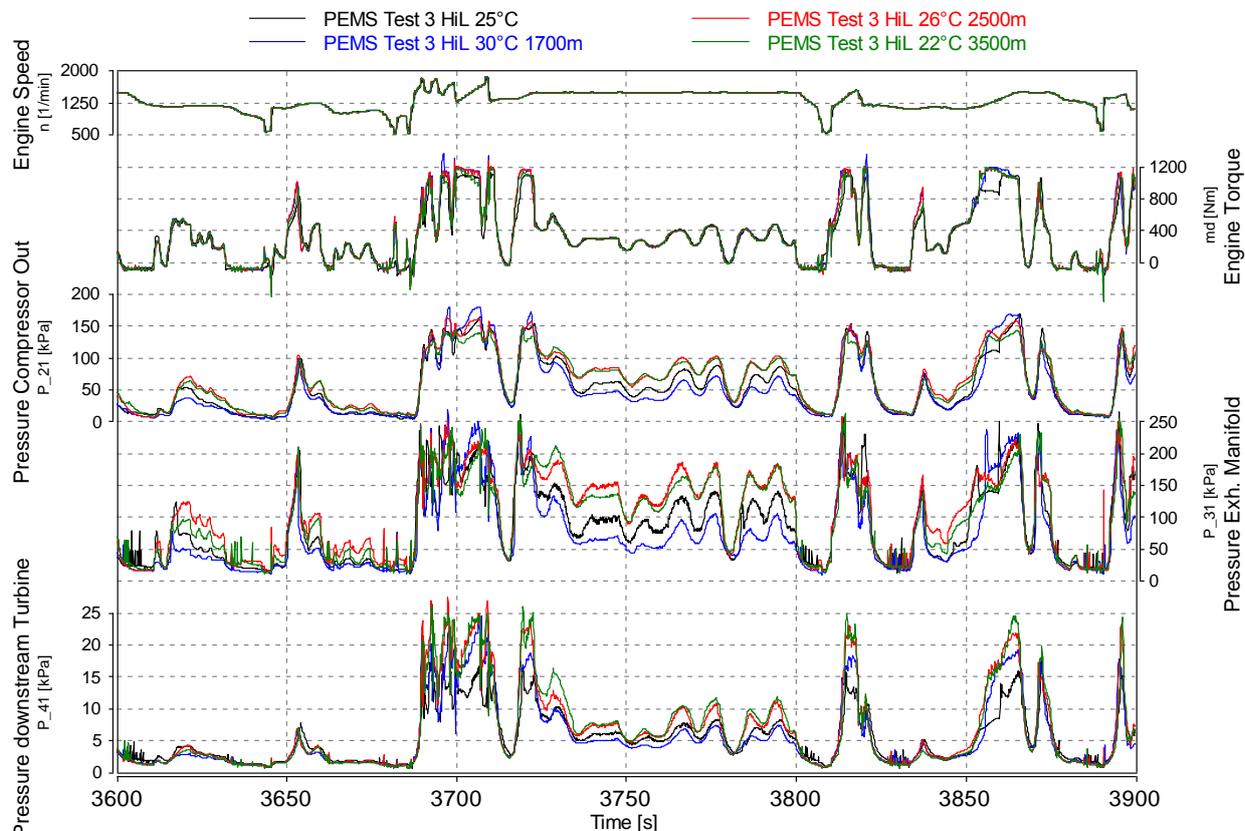


Abbildung 5-22: Drücke bei 25 °C und bei verschiedenen Höhen / Temp.

Der Einfluss der Höhe auf die NO_x Emissionen ist in **Abbildung 5-23** ersichtlich. Da der emissionsrelevante Bereich mit 30 °C / 1700 m endet, steigen die NO_x Emissionen bei 26 °C / 2500 m und 22 °C / 3500 m an. Der Motor muss jedoch so kalibriert werden, dass die Emissionen über 1700 m nicht sprunghaft, sondern verlaufend ansteigen.

Die höhere SCR Temperatur bei 30 °C / 1700 m hat eine geringere NH₃ Speicherfähigkeit zur Folge.

Verdeutlicht wird das durch die in **Abbildung 5-24** dargestellten integrierten NO_x Massenströme. Die Unterschiede bei den NO_x EO Emissionen stammen hauptsächlich von den unterschiedlichen AGR Raten.

Das dynamische Verhalten des Fahrzeugs sollte unter allen Umgebungsbedingungen ähnlich sein. Aufgrund der geringeren Luftdichte in der Höhe müssen dazu Parameter (z.B.: Einspritzmenge und Ladedruck) angepasst werden. Dadurch steigen in der Regel die NO_x Emissionen.

Zusätzlich dazu sind Motorschutzfunktionen (T₃₁ Schutz, Turboladerdrehzahlbegrenzung,...) aktiv, welche wiederum direkten Einfluss auf die Dynamik des Fahrzeugs haben.

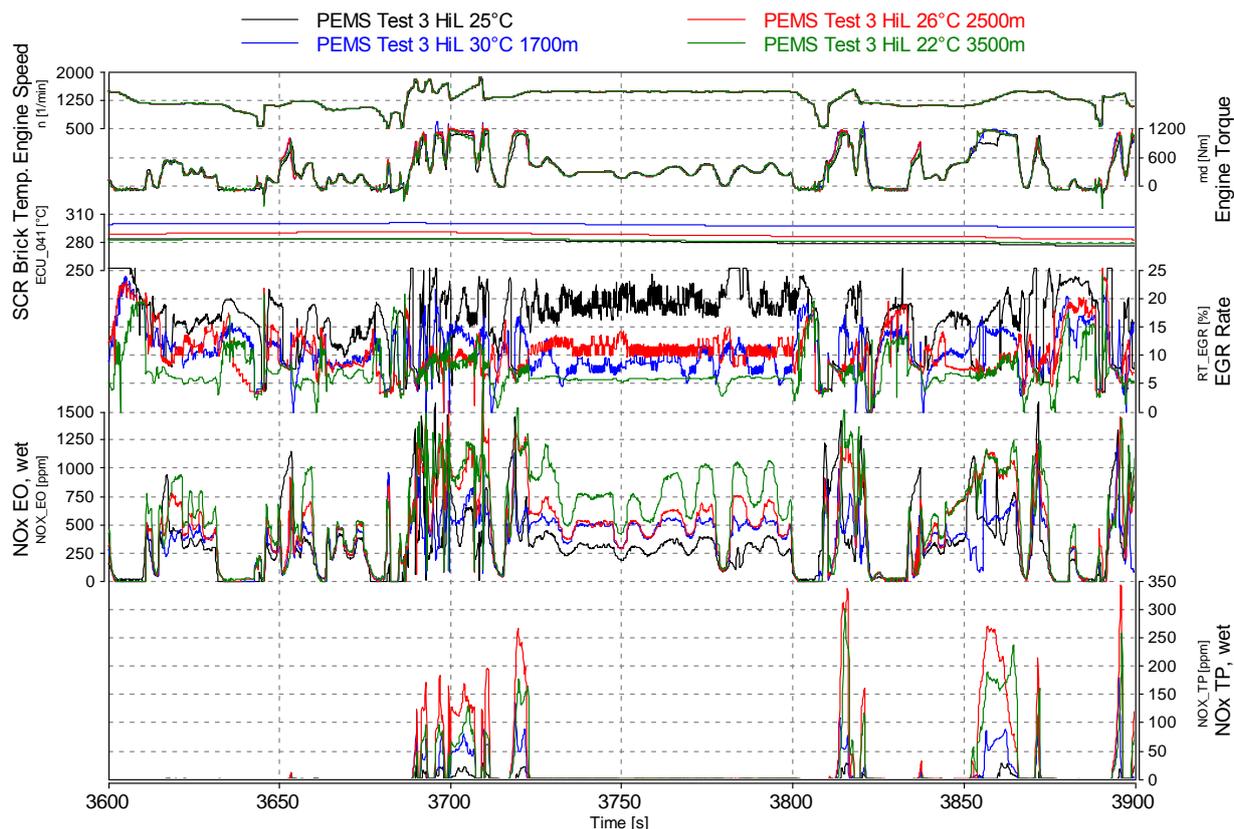


Abbildung 5-23: Analyse NOx bei 25 °C und bei verschiedenen Höhen / Temp.

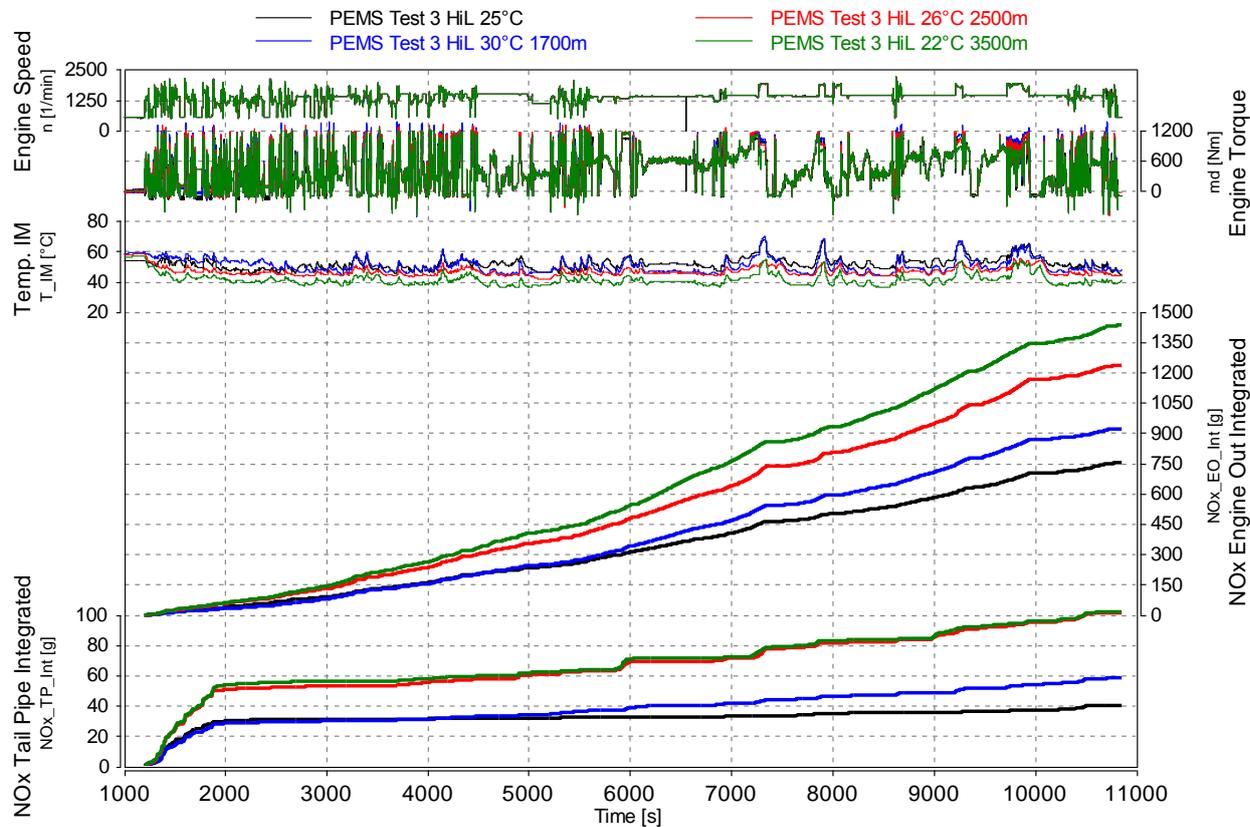


Abbildung 5-24: NOx EO und NOx TP über gesamte Testdauer bei 25 °C und bei verschiedenen Höhen / Temp.

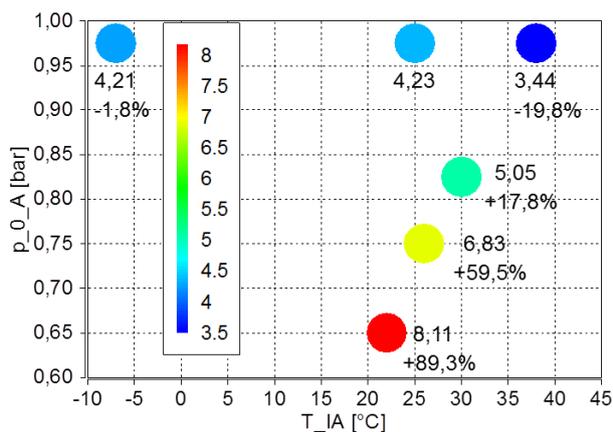


Abbildung 5-25: Zyklusergebnisse ISC Tests NOx EO unter Non-Standardbedingungen

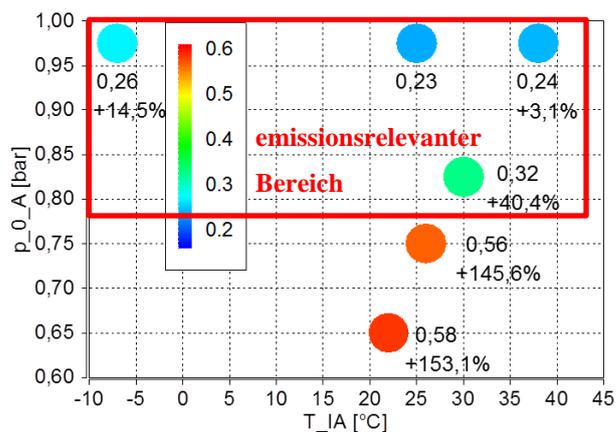


Abbildung 5-26: Zyklusergebnisse ISC Tests NOx TP unter Non-Standardbedingungen

Abbildung 5-25 und **Abbildung 5-26** zeigen die Zyklusemissionen für NOx EO und NOx TP. Im Vergleich zur MiL Simulation sind hier die NOx EO bei -7 °C geringer als bei 25 °C. Dies liegt an der Kalibrierung des Motors und an der Tatsache, dass hier ECU Korrekturfunktionen aktiv sind. Dass die NOx TP bei -7 °C, trotz geringerer NOx EO, höher sind ist auf den etwas schlechteren SCR Wirkungsgrad zurückzuführen.

Die ISC Tests am Versuchsträger ergaben bei dem zum Vergleich verwendeten Test 3 einen Übereinstimmungsfaktor für NOx von 1,04 bei einer NOx TP Zyklusemission von 0,43 g/kWh. Mit verbessertem Datenstand konnte der Übereinstimmungsfaktor für NOx auf 0,74 gesenkt werden (Test 12). Somit lässt sich daraus schließen, dass die Übereinstimmungsfaktoren bei den simulierten ISC Tests unter Non-Standardbedingungen am HiL im emissionsrelevanten Bereich immer unter dem gesetzlichen Grenzwert von 1,5 sein werden.

5.7 Resümee

Die praktischen Untersuchungen im Zuge dieser Arbeit zeigen, dass die gesetzlichen Grenzwerte der ISC Tests bei guter Gesamtsystemauslegung von Motor, Abgasnachbehandlung und Steuergerätesoftware prinzipiell keine großen Probleme darstellen. Eine sehr gute und daher zeitintensive Kalibrierung des Motors am Motorprüfstand ist daher eine Voraussetzung um die ISC Tests zu bestehen.

Der zeitliche Aufwand zur Festlegung der ISC Route darf keinesfalls unterschätzt werden. Die im Gesetz angegebene prozentuelle Aufteilung zwischen Stadt, Land und Autobahn bezieht sich auf die Messzeit. Das spielt insofern eine Rolle, dass z.B. neue Baustellen, erhöhtes Verkehrsaufkommen, Unfälle usw. aufgrund des ungeplanten Zeitverlustes zur Überschreitung der erlaubten prozentuellen Aufteilung führen können. Dies hat zur Folge, dass der ISC Test ungültig ist. Aus diesen Gründen musste die Route bei den ISC Tests mehrmals angepasst werden.

Bei der Auswertung der ISC Tests muss besondere Aufmerksamkeit auf das Time Alignment gelegt werden, da es einen sehr großen Einfluss auf das Endergebnis hat.

Der Vergleich der Ergebnisse von HiL Simulation, Motorprüfstand und Versuchsträger zeigt, dass es möglich ist, die ISC Tests mit ausreichender Genauigkeit zu simulieren. Die Abweichung der NO_x EO Zyklusergebnisse zwischen HiL und Prüfstand beträgt ca. 11% und zwischen Prüfstand und Versuchsträger ca. 2%. Bei den NO_x TP Zyklusergebnissen sind die Abweichungen höher. Die NO_x TP Zyklusergebnisse sind am Prüfstand und am Versuchsträger höher als am HiL. Die Gründe dafür sind, wie bereits erwähnt, ein stark gealtertes EAS am Prüfstand, sowie unzureichende Genauigkeit bei der Kalibrierung von NO und NO₂ mit dem PEMS. Werden die ECU NO_x TP Zyklusemissionen betrachtet so ist der Unterschied zwischen HiL und Versuchsträger 0,02 g/kWh und zwischen HiL und Prüfstand 0,06 g/kWh. Aktuelle ISC Tests zeigen, dass die NO_x TP Emissionen, aufgrund der neu kalibrierten PEMS Messtechnik (bessere Genauigkeit) in Verbindung mit einem neuen ECU Datenstand, deutlich geringer sind. Es sei an dieser Stelle nochmals erwähnt, dass beim Vergleich der ISC Tests von HiL, Prüfstand und Versuchsträger die Zyklusemissionen verglichen werden, da das PEMS am HiL nicht simuliert und am Motorprüfstand nicht aufgebaut wird.

Um die Gründe für die NO_x TP Abweichungen zu bestätigen, müsste ein aktueller ISC Test am HiL simuliert und am Motorprüfstand mit einem neuen EAS nachgefahren werden. Aus zeitlichen Gründen war dies jedoch nicht möglich.

Die Simulationen des ISC Tests unter Non-Standardbedingungen zeigen, dass die NO_x Emissionen über 1700 ansteigen. Ein Grund dafür ist, dass die Emissionen nur bis 30 °C und 1700 m nachgewiesen werden müssen (WNTE Test). Werden die Zyklusemissionen für NO_x TP des Versuchsträgers mit jenen des HiL Prüfstands verglichen lässt sich daraus schließen, dass die Übereinstimmungsfaktoren bei den simulierten ISC Tests unter Non-Standardbedingungen am HiL im emissionsrelevanten Bereich unter dem gesetzlichen Grenzwert von 1,5 sein werden.

Verdeutlicht wird diese Aussage durch die den Vergleich der Zyklusergebnisse. Der Versuchsträger emittierte während des ISC Tests 0,43 g/kWh an NO_x. Bei den HiL Simulationen wurden in der Höhe (3500m) 0,58 g/kWh ausgestoßen. Daraus kann darauf geschlossen werden, dass die Emissionslimits auch unter Non-Standardbedingungen erfüllt werden. Die letzten ISC Tests (u.a. mit verbessertem Datenstand) ergaben einen NO_x Zykluswert von 0,22 g/kWh. Daraus folgt, dass die NO_x unter Non-Standardbedingungen ebenfalls weniger werden. Generell ist ersichtlich, dass reale und simulierte Ergebnisse gut zusammenpassen.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Um die Abgasnorm EURO 5 zu erfüllen, gab es 2 häufig verwendete Strategien. Bei der einen Variante besteht die Abgasnachbehandlung aus DOC und DPF inkl. AGR, bei der anderen aus DOC und SCR Katalysator. Letztere wird gerne als „SCR only“ Lösung bezeichnet. Bei dieser Strategie muss der Motor so kalibriert werden, dass die gesetzlichen Grenzwerte für Partikel durch innermotorische Maßnahmen erreicht werden. Dazu wird eine hohe Verbrennungstemperatur, welche gut für den Wirkungsgrad, aber schlecht für die Stickoxidbildung ist, angestrebt, um eine effektive und effiziente Verbrennung zu erzielen. Bei dieser Kalibrierung entstehen die höchsten NO_x Emissionen, die jedoch im SCR Katalysator reduziert werden. Vorteil dieser Strategie ist ein geringerer Kraftstoffverbrauch aufgrund des besseren Wirkungsgrades. Nachteil dieser Strategie ist, dass zusätzlich Ad Blue verbraucht wird. Der Ad Blue Verbrauch beträgt ca. 3% vom Kraftstoffverbrauch.

Mit der Einführung von EURO 6 (Onroadgesetzgebung) für Nutzfahrzeuge und der damit verbundenen Limitierung der Partikelanzahl ist die häufig verwendete „SCR only“ Lösung alleine nicht mehr möglich. Aufgrund Partikelanzahllimitierung ist ein Einbau eines DPF unumgänglich. Mit EURO 6 müssen bei Nutzfahrzeugen erstmals die Emissionen im realen Fahrbetrieb (ISC Tests) nachgewiesen werden. Bisher wurde der Motor nur am Motorprüfstand zertifiziert und anschließend in verschiedenen Fahrzeugen (z.B.: Bus, LKW,...) verbaut.

Die Ergebnisse der MiL Simulation im Zuge dieser Diplomarbeit zeigen, dass der Motor für den jeweiligen Einsatzzweck (On- / Offroad) und damit auf die zu erfüllenden Prüfzyklen abgestimmt wird. Generell folgt, dass ohne aktive ECU Korrekturfunktionen die Stickoxidemissionen bei kalten Umgebungsbedingungen aufgrund der Temperaturabhängigkeit der Luftdichte steigen. Weiters wird anhand der unterschiedlichen Last und Betriebspunkte zwischen On- und Offroadtestzyklen der Einfluss der SCR Temperatur auf die NO_x Konvertierungsrate dargestellt.

Die praktischen Untersuchungen dieser Arbeit zeigen, dass die gesetzlichen Grenzwerte der ISC Tests bei guter Gesamtsystemauslegung von Motor, Abgasnachbehandlung und Steuergerätesoftware prinzipiell keine großen Probleme darstellen. Eine sehr gute Kalibrierung am Motorprüfstand ist jedoch eine Grundvoraussetzung um die ISC Tests zu bestehen.

Anhand der Ergebnisse der Simulation folgt, dass die ISC Tests prinzipiell am HiL simuliert werden können. Bei den NO_x TP Emissionen traten größere Abweichungen zwischen der Simulation und der Realität (Prüfstand und Versuchsträger) auf. Die Gründe hierfür sind ein gealtertes EAS am Prüfstand sowie die Kalibrierung des PEMS Systems und eine leicht vergiftete SCR Anlage im Versuchsträger. Um diese Gründe zu bestätigen bzw. deren Auswirkungen zu zeigen müsste ein aktueller ISC Test nochmals am HiL simuliert und am Motorprüfstand mit einem neuen EAS gefahren werden. Dies war jedoch aus zeitlichen Gründen nicht möglich.

Die Simulationen unter Non-Standardbedingungen verdeutlichen die Kalibrierung der Motoren auf die Testzyklen. Außerhalb des emissionsrelevanten Bereichs des WNTE / NTE Testzyklus, d.h. über 30 °C / 1700 m, steigen die NO_x Emissionen an. Wie bereits erwähnt, dürfen die Emissionen über 1700 m nicht schlagartig, sondern in einem stetigen Verlauf ansteigen. An dieser Stelle stellt sich die Frage, ob eine weitere Ausweitung des emissionsrelevanten Bereichs über 1700 m sinnvoll wäre, da diese Höhe vor allem in Europa nur auf einigen Alpenpassstraßen überschritten wird. Auf den meisten dieser Straßen sind LKW jedoch nicht zulässig. Bei Offroadanwendungen ist das schon relevanter, da Pistengeräte, Bagger,... oft in der Höhe betrieben werden.

Da die Non-Standardbedingungen nur schwer am Motorprüfstand simuliert werden können, hat hier die HiL Simulation ihr größtes Potential. Es gibt Klima-Höhen-Prüfstände mit denen es möglich ist extreme Druckverhältnisse (Höhen bis über 3500 m) einzustellen. Es ist aber vor allem eine Kostenfrage, da die Prüfstandsstunden auf solchen Klima-Höhen-Prüfstand sehr teuer sind. Der HiL Prüfstand inkl. MoBEO Modell ist deutlich preiswerter. Zum Vergleich – zwei Stunden am Klima-Höhen-Prüfstand sind teurer als eine Woche am HiL Prüfstand. Natürlich müssen Abstriche in der Genauigkeit gemacht werden, da die Simulation nie reale Tests am Prüfstand ersetzen kann. Die heutzutage verwendeten Modelle sind jedoch sehr gut. Aus diesem Grund wird der HiL Prüfstand heute oft eingesetzt um die ECU Korrekturfunktionen zu kalibrieren bzw. vor zu kalibrieren

Ziel zukünftiger Abgasgesetzgebungen wird es sein, die Schadstoffemissionen strenger zu limitieren. Da bei Stufe IV (Offroadgesetzgebung) für mobile Arbeitsmaschinen die Partikelanzahl nicht limitiert ist, kann hier die „SCR only“ Lösung weiter verwendet werden. Aktuell wird heftig diskutiert, ob bei der nächsten Gesetzgebungsstufe (Stufe V) eine Limitierung der Partikelanzahl erfolgt. Weiters sind auch ISC Tests für mobile Arbeitsmaschinen mit der Einführung von Stufe V im Gespräch. Da NO₂ giftig ist, steht eine NO₂ Limitierung ebenfalls zur Diskussion. Aktuell sind bei ISC Tests nur die gasförmigen Emissionen, nicht jedoch die Partikelemissionen, begrenzt. Dies könnte sich ebenfalls ändern. Fakt ist, dass Gesetzgeber und Hersteller bereits über die Anpassung der Abgasnorm bzw. die zukünftige Abgasnorm diskutieren. Ob und wie sich die Abgasgesetzgebung in Zukunft ändert, werden spätestens die Emissionsstufen EURO 7 bzw. Stufe V zeigen.

Literatur

- [1] Regelung Nr. 49 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE) – Einheitliche Bestimmungen hinsichtlich der Maßnahmen, die gegen die Emission von gasförmigen und partikelförmigen Schadstoffen zu treffen sind, die aus Selbstzündungsmotoren für Kraftfahrzeuge entstehen, sowie gegen die Emission gasförmiger Schadstoffe aus mit Erdgas oder Flüssiggas betriebenen Fremdzündungsmotoren für Kraftfahrzeuge.
- [2] Europäisches Parlament: Richtlinie 2011/582/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Mai 2011 zur Durchführung und Änderung der Verordnung (EG) Nr. 595/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen (Euro VI) und zur Änderung der Anhänge I und III der Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates.
- [3] Europäisches Parlament: Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. September 2007 zur Schaffung eines Rahmens für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten.
- [4] Europäisches Parlament: Richtlinie 2004/26/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 31. März 2010 zur Änderung der Richtlinie 97/68/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte
- [5] Schüßler M, et al.: Modellbasierte Emissionsoptimierung auf Triebstrang-Ebene, 17. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen 2008
- [6] Sams Th., et. Al.: Regelung eines PKW-Dieselmotors mit alternativer Verbrennung; Tagung der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors, Graz 2005
- [7] Hausberger S., Sams Th.: Vorlesungsskript, Schadstoffbildung und NOx Minimierung, TU Graz 2010
- [8] Schüßler M.: Vorlesungsskript, Schadstoffbildung und NOx Minimierung – SCR Teil, TU Graz 2010
- [9] Pischinger R., Klell M., Sams Th.: Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine, 2. Auflage, Springer Verlag, Wien – New York, 2002
- [10] Kordon M.: Präsentation, Model based development and calibration, AVL List GmbH, Graz 2013
- [11] AVL List GmbH: AVL Gas PEMS Product Guide, AVL List GmbH, Graz 2012
- [12] Decker M.: Präsentation, AVL List GmbH, Graz 2013

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Schematisches Profil des WHTC	15
Abbildung 2-2: Beispiel eines WNTE-Kontrollbereichs	17
Abbildung 2-3: Rasterung WNTE-Prüfzyklus [3]	18
Abbildung 2-4: Start des WNTE-Prüfzyklus [3]	19
Abbildung 2-5: Methode, auf Zyklusarbeit basierend	20
Abbildung 2-6: Dauer eines Arbeitsfensters bei Zyklusarbeit basierenden Methode	21
Abbildung 2-7: Methode, die auf CO ₂ -Masse basiert.....	22
Abbildung 2-8: Dauer eines Arbeitsfensters bei CO ₂ -Masse basierenden Methode	23
Abbildung 2-9: Schematisches Profil des NRTC	26
Abbildung 2-10: Beispiel eines NTE Kontrollbereichs	28
Abbildung 3-1: Das Motormodell [5]	30
Abbildung 3-2: Schadstoffbildung im Dieselmotor über dem Luftverhältnis[9]	32
Abbildung 3-3: Grundsätzliches Vorgehen zur NO _x Reduktion bei Verbrennungsmotoren [6]	33
Abbildung 3-4: NO _x Konvertierungsrate über der SCR Temperatur [12]	34
Abbildung 3-5: T 51 Verteilung im WHTC	35
Abbildung 3-6: Vergleich Standardkalibrierung und finale Kalibrierung im WHTC bei Graz Niveau / 25 °C.....	41
Abbildung 3-7: NO _x EO Zyklusemissionen im WHTC in g/kWh bei Standardkalibrierung	42
Abbildung 3-8: NO _x EO Zyklusemissionen im WHTC in g/kWh bei NO _x EO Regelung ...	42
Abbildung 3-9: NO _x EO Zyklusemissionen im WHTC in g/kWh bei finaler Kalibrierung ..	42
Abbildung 3-10: NO _x EO Zyklusemissionen im WHTC in g/kWh bei Thermomanagement	42
Abbildung 3-11: NO _x TP Zyklusemissionen im WHTC in g/kWh bei Standardkalibrierung	43
Abbildung 3-12: NO _x TP Zyklusemissionen im WHTC in g/kWh bei NO _x EO Regelung ..	43
Abbildung 3-13: NO _x TP Zyklusemissionen im WHTC in g/kWh bei finaler Kalibrierung.	43
Abbildung 3-14: NO _x TP Zyklusemissionen im WHTC in g/kWh bei Thermomanagement	43
Abbildung 3-15: SCR Temperaturverläufe im WHTC bei Standardkalibrierung und Thermomanagement.....	44
Abbildung 3-16: Soot TP Zyklusemissionen im WHTC in g/kWh bei Standardkalibrierung	45
Abbildung 3-17: Soot TP Zyklusemissionen im WHTC in g/kWh bei NO _x EO Regelung...	45
Abbildung 3-18: Soot TP Zyklusemissionen im WHTC in g/kWh bei finaler Kalibrierung .	45
Abbildung 3-19: Soot TP Zyklusemissionen im WHTC in g/kWh bei Thermomanagement	45
Abbildung 3-20: BSFC im WHTC in g/kWh bei Standardkalibrierung.....	46
Abbildung 3-21: BSFC im WHTC in g/kWh bei NO _x EO Regelung	46
Abbildung 3-22: BSFC im WHTC in g/kWh bei finaler Kalibrierung	46

Abbildung 3-23: BSFC im WHTC in g/kWh bei Thermomanagement	46
Abbildung 3-24: NO _x EO Zyklusemissionen im NRSC in g/kWh bei Standardkalibrierung	48
Abbildung 3-25: NO _x EO Zyklusemissionen im NRSC in g/kWh bei λ -Regelung.....	48
Abbildung 3-26: NO _x EO Zyklusemissionen im NRSC in g/kWh bei finaler Kalibrierung .	48
Abbildung 3-27: NO _x TP Zyklusemissionen im NRSC in g/kWh bei Standardkalibrierung	49
Abbildung 3-28: NO _x TP Zyklusemissionen im NRSC in g/kWh bei λ -Regelung	49
Abbildung 3-29: NO _x TP Zyklusemissionen im NRSC in g/kWh bei finaler Kalibrierung ..	49
Abbildung 3-30: Soot TP Zyklusemissionen im NRSC in g/kWh bei Standardkalibrierung.	50
Abbildung 3-31: Soot TP Zyklusemissionen im NRSC in g/kWh bei λ Regelung	50
Abbildung 3-32: Soot TP Zyklusemissionen im NRSC in g/kWh bei finaler Kalibrierung ..	50
Abbildung 3-33: BSFC Zyklusemissionen im NRSC in g/kWh bei Standardkalibrierung....	51
Abbildung 3-34: BSFC Zyklusemissionen im NRSC in g/kWh bei λ Regelung	51
Abbildung 3-35: BSFC Zyklusemissionen im NRSC in g/kWh bei finaler Kalibrierung.....	51
Abbildung 3-36: Betriebspunkte WHTC/NRTC	53
Abbildung 4-1: AVL Gas PEMS System [11].....	56
Abbildung 4-2: Route 1 PEMS Messung.....	57
Abbildung 4-3: Übereinstimmungsfaktor NO _x	60
Abbildung 4-4: PEMS Test 3.....	61
Abbildung 5-1: HiL Prüfstands Aufbau [9]	63
Abbildung 5-2: Scatterplot T_2_1	64
Abbildung 5-3: Scatterplot T_31	64
Abbildung 5-4: Scatterplot P_31	64
Abbildung 5-5: Scatterplot T_41	64
Abbildung 5-6: Scatterplot P_41	65
Abbildung 5-7: Scatterplot MF_IA.....	65
Abbildung 5-8: Scatterplot RT_EGR.....	65
Abbildung 5-9: Scatterplot NO _x _EO_S	65
Abbildung 5-10: Temperaturverläufe	68
Abbildung 5-11: Druckverläufe	69
Abbildung 5-12: Massenstrom Ansaugluft und Druck am Kompressoraustritt	70
Abbildung 5-13: VTG Position und EGR Position.....	71
Abbildung 5-14: SCR Efficiency.....	72
Abbildung 5-15: NO _x EO, NO _x TP	72
Abbildung 5-16: NO _x EO über gesamte Testdauer	73
Abbildung 5-17: Temperaturen bei 25 °C, -7 °C und 38 °C.....	74
Abbildung 5-18: Drücke bei 25 °C, -7 °C und 38 °C	75
Abbildung 5-19: NO _x Analyse bei 25 °C, -7 °C und 38 °C	76

Abbildung 5-20: NO _x EO und NO _x TP über gesamte Testdauer bei 25 °C, -7 °C und 38 °C	76
Abbildung 5-21: Temp. bei 25 °C und bei verschiedenen Höhen / Temp.....	77
Abbildung 5-22: Drücke bei 25 °C und bei verschiedenen Höhen / Temp.	78
Abbildung 5-23: Analyse NO _x bei 25 °C und bei verschiedenen Höhen / Temp.	79
Abbildung 5-24: NO _x EO und NO _x TP über gesamte Testdauer bei 25 °C und bei verschiedenen Höhen / Temp.....	79
Abbildung 5-25: Zyklusergebnisse ISC Tests NO _x EO unter Non-Standardbedingungen....	80
Abbildung 5-26: Zyklusergebnisse ISC Tests NO _x TP unter Non-Standardbedingungen.....	80

Tabelle 2-1: Emissionsgrenzwerte Onroad	12
Tabelle 2-2: Verschlechterungsfaktoren Onroad	12
Tabelle 2-3: Emissionsgrenzwerte ISC	12
Tabelle 2-4: Dauerhaltbarkeitslimits [1]	13
Tabelle 2-5: WHSC	13
Tabelle 2-6: Fahrzykluszusammensetzung	20
Tabelle 2-7: Emissionsgrenzwerte Offroad.....	24
Tabelle 2-8: Dauerhaltbarkeitslimits Offroad[1].....	24
Tabelle 2-9: Verschlechterungsfaktoren Offroad.....	24
Tabelle 2-10: NRSC (C1).....	25
Tabelle 3-1: Zyklusergebnisse WHSC	39
Tabelle 3-2: Zyklusergebnisse WHTC.....	40
Tabelle 3-3: Zyklusergebnisse NRSC	47
Tabelle 3-4: Zyklusergebnisse NRTC	52
Tabelle 3-5: durchschnittliche SCR Temperatur im NRTC/WHTC	53
Tabelle 4-1: Prüfkenndaten	56
Tabelle 4-2: Ergebnisse ISC Tests	58
Tabelle 4-3: Ergebnisse mittels Arbeitsfenstermethode.....	60
Tabelle 5-1: Mittelwerte der ISC Tests	67