



Oliver Mogg, BSc

Emissionsverhalten im Realbetrieb eines Stufe V Baggers

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplomingenieur IN
Masterstudium Wirtschaftsingenieurwesen - Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Vorstand
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Eichlseder
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

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

Betreuer
Dipl.-Ing. Lukas Landl
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Graz, Juni 2021



Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
Vorstand: Univ.-Prof. DI Dr. Helmut Eichlseder

Der Autor möchte sich auf diesem Wege bei allen Unterstützern und Auftraggebern bedanken. Die Arbeit wurde im Rahmen des Forschungsprojektes „Fortentwicklung der Verordnung (EU) Nr. 2016/1628 für Mobile Maschinen und Geräte (NRMM)“, beauftragt durch das Umweltbundesamt Deutschland, bearbeitet und verfasst.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen meines Masterstudiums an der Technischen Universität Graz, verfasst. Vor gut zwei Jahren bekam ich die Möglichkeit meine Bachelorarbeit am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik zu absolvieren. Die damalige, hervorragende und zielführende Betreuung verleitete mich dazu, auch die Masterarbeit am IVT zu verfassen. Das große Interesse am Thema der ausgeschriebenen Arbeit verstärkte meinen Willen.

An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Helmut Eichelseder und Herrn Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Stefan Hausberger recht herzlich bedanken. Ohne deren Zustimmung und Unterstützung wäre diese Arbeit nicht zustande gekommen.

Ein großes Dankeschön möchte ich auch an Herrn Dipl.-Ing. Dr. techn. Konstantin Weller richten. Mithilfe seiner fachlichen und persönlichen Unterstützung konnten Probleme und Fragestellungen schnell und effizient geklärt werden. Mich begeisterte nicht nur seine fachliche Kompetenz, sondern auch seine freundliche und stets respektvolle Umgangsweise.

Zudem möchte ich mich auch bei allen anderen Mitarbeitern des Instituts herzlichst bedanken.

Abschließend möchte ich mich noch bei meinen Eltern, meinem Bruder und meiner Freundin bedanken. Ihr habt mir stets Halt gegeben und mich immer unterstützt.

Inhaltsverzeichnis

FORMELZEICHEN, INDIZES UND ABKÜRZUNGEN	VI
EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	VIII
KURZFASSUNG	IX
ABSTRACT	X
1 EINLEITUNG	1
2 AUFGABENSTELLUNG	1
3 THEORETISCHE GRUNDLAGEN	2
3.1 EMISSIONEN	2
3.1.1 <i>Luftschadstoffe aus der vollständigen Verbrennung</i>	2
3.1.2 <i>Luftschadstoffe aus der unvollständigen Verbrennung</i>	3
3.1.3 <i>Luftschadstoffe ohne Verbrennungsbasis</i>	4
3.1.4 <i>Umrechnung CO₂- auf Kraftstoffverbrauch für Dieselmotoren</i>	4
3.2 NRMM.....	4
3.2.1 <i>Gesetzgebung und Grenzwerte</i>	6
3.2.2 <i>Typengenehmigung NRMM</i>	7
3.2.3 <i>NRMM Pilot Programm- ISC Messung</i>	9
3.3 MESSTECHNIK FÜR DIE VERMESSUNG IN BETRIEB BEFINDLICHER NRMM	9
3.3.1 <i>PEMS-Messprinzipien</i>	10
4 MESSUNG	12
4.1 MASCHINE.....	13
4.1.1 <i>Maschinenspezifikation und Abgasnachbehandlung</i>	13
4.2 MESSTECHNIK TAKEUTSCHI BAGGER.....	14
4.2.1 <i>PEMS AIP</i>	14
4.2.2 <i>ECU Datenaufzeichnung</i>	15
4.3 MESSAUFBAU	16
4.4 MESSDURCHFÜHRUNG.....	18
4.4.1 <i>Messprogramm und Messablauf</i>	18
4.4.2 <i>Erkenntnisse und Empfehlung zum Messgeschehen</i>	20
4.4.3 <i>Messergebnis Zyklus 01</i>	20
4.4.4 <i>Messergebnis Zyklus 02</i>	25
4.4.5 <i>Messergebnis Zyklus 03</i>	28
4.4.6 <i>Messergebnis Zyklus 04</i>	33
4.4.7 <i>Messergebnis Zyklus 05</i>	36
4.4.8 <i>Übersicht Messergebnisse</i>	39
4.4.9 <i>Auffälligkeiten</i>	41
4.5 ERKENNTNISSE	42
5 AUSWERTUNG NACH ISM VERORDNUNG.....	43
5.1 EMROAD	43
5.1.1 <i>Definition von Nicht-Betriebsereignissen</i>	43
5.1.2 <i>„Mittelungsfenster“-Methode</i>	44
5.2 PRÜFERGEBNISSE	45
5.3 VORGEHENSWEISE BEI DER AUSWERTUNG	46
5.3.1 <i>Zusammenführung der Einzelmessungen und zu beachtende Kriterien</i>	46
5.3.2 <i>Einteilung in Nicht-Betriebsereignis und Betriebsereignis</i>	47
5.3.3 <i>Unterschiede bei Betriebsereigniseinteilung zwischen Manuell und EMROAD</i>	48
5.3.4 <i>Gesamtzyklus aus manueller Betriebsereigniseinteilung</i>	49
5.4 ERGEBNISSE UND ANALYSEN	50
5.4.1 <i>Ergebnisse der Gesamttest Auswertung</i>	50
5.4.2 <i>Ergebnis Auswertung Messung 03</i>	53
5.5 ERKENNTNISSE ZUR AUSWERTUNG	55

6	SIMULATION	56
6.1	PHEM.....	56
6.1.1	<i>Normierung</i>	57
6.2	PHEM INPUTDATEN FÜR KENNFELDERSTELLUNG	58
6.2.1	<i>Fahrzeug- bzw. Maschinendaten</i>	58
6.2.2	<i>Volllast- und Schleppkurve</i>	58
6.2.3	<i>Zyklus aus Messdaten</i>	59
6.3	CO ₂ LEISTUNGSINTERPOLATION.....	59
6.4	ERSTELLUNG EMISSIONSKENNFELD - BETRIEBSPHASEN.....	61
6.5	NACHRECHNUNG-BETRIEBSPHASEN.....	61
6.5.1	<i>Zyklus 01</i>	61
6.5.2	<i>Zyklus 02</i>	63
6.5.3	<i>Zyklus 03</i>	63
6.5.4	<i>Zyklus 04</i>	64
6.5.5	<i>Zyklus 05</i>	65
6.6	IMPLEMENTIERUNG ABGASNACHBEHANDLUNGSMODELL	65
6.6.1	<i>Module der Abgasnachbehandlung</i>	66
6.6.2	<i>Erstellung Temperaturmodell</i>	67
6.6.3	<i>Berechnung NO_x Engine Out Kennfeldemissionen</i>	71
6.7	NACHRECHNUNG MIT GESAMTKENNFELD INKLUSIVE ABGASNACHBEHANDLUNG	72
6.7.1	<i>Wichtige Simulationsparameter</i>	72
6.7.2	<i>Zyklus 01</i>	73
6.7.3	<i>Zyklus 02</i>	74
6.7.4	<i>Zyklus 03</i>	75
6.7.5	<i>Zyklus 04</i>	75
6.7.6	<i>Zyklus 05</i>	76
6.8	ANALYSE UND INTERPRETATION DER SIMULATION.....	77
7	SCHLUSSFOLGERUNG	79
	LITERATUR	80
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	82

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

Formelzeichen

m_C	kg	Masse Kohlenstoff im Kraftstoff
$m_{Kraftstoff}$	kg	Masse Kraftstoff
M_C	kg/mol	Molare Masse Kohlenstoff
M_{CO_2}	kg/mol	Molare Masse Kohlenstoffdioxid
M	Nm	Motordrehmoment
P	kW	Motorleistung
W	kWh	Motorarbeit
D_{max}	s	Maximale Dauer des Mittelungsfenster
P_{max}	kW	Maximale Motorleistung
W_{Ref}	kWh	Referenzarbeit „NRTC“
CF_Z	-	Übereinstimmungsfaktor Variante-Zyklusarbeit
e_{gas}	g/kWh	Bremsspezifische Emissionsmasse
W	kWh	Motorarbeit des Mittelungsfensters
m	mg	Emissionsmasse des Mittelungsfensters
L	g/kWh	Grenzwert im „NRTC“
CF_{CO_2}	-	Übereinstimmungsfaktor Variante-CO ₂ Masse
CF_I	-	Verhältnis im Betrieb
CF_C	-	Verhältnis der Zertifizierung
m_{CO_2}	kg	CO ₂ Masse des Mittelungsfensters
$m_{CO_2,Ref}$	kg	Referenzmasse CO ₂ „NRTC“
m_L	mg	Grenzwert im „NRTC“
P_e	kW	Motorleistung
P_{rated}	kW	Nennleistung
$P_{e,norm}$	-	Normierte Motorleistung
n_e	1/min	Motordrehzahl
n_{rated}	1/min	Nennndrehzahl
n_{idle}	1/min	Leerlaufdrehzahl
n_{norm}	-	Normierte Motordrehzahl
$m_{Emission}$	kg	Emissionsmasse
$m_{Emission,norm}$	-	Normierte Emissionsmasse

Weitere Indices und Abkürzungen

ANB	Abgasnachbehandlung
BSFC	Brake Specific Fuel Consumption
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CPC	Condensate Particle Counter
DOC	Diesel Oxydation Catalyst
DPF	Diesel Particulate Filter
ECU	Engine Control Unit
EFM	Exhaust Flow Meter
EO	Engine out

E-KF	Einzelkennfeld
G-KF	Gesamtkennfeld
HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs
ISC	In Service Conformity
ISM	In Service Monitoring
LKW	Lastkraftwagen
NH ₃	Ammoniak
NO	Stickstoffmonoxid
NO _x	Stickoxide
NO _x -EO	Stickoxide am Motorausgang
NO _x -TP	Stickoxide nach Abgasnachbehandlung
NO ₂	Stickstoffdioxid
NRMM	Non Road Mobile Machinery
NRSC	Non Road Stationary Cycle
NRTC	Non Road Transient Cycle
PEMS	Portable Emission Measurement System
PKW	Personenkraftwagen
PM	Partikelmasse
PN	Partikelanzahl
RDE	Real Driving Emissions
SCR	Selective Catalytic Reduction
TP	Tailpipe
ttc	Temperature Thermocouple

Eidesstattliche Erklärung

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

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

Oliver Mogg

Graz, Juni 2021

Kurzfassung

Einhergehend mit dem Inkrafttreten der neuen „Stage V“ Gesetzgebung für Off-Road Maschinen müssen Motorhersteller der Klassen „NRE-v-5“ und „NRE-v-6“ auch im realen Betrieb die Einhaltung der gesetzlich vorgeschriebenen Emissionsgrenzwerte nachweisen. Dies wird im Rahmen einer Monitoring Phase überwacht. Die Einführung der innerbetrieblichen Emissionsmessung im Realbetrieb in die geltende Gesetzgebung von „Off Road“ Maschinen bringt aber einige Herausforderungen mit sich. Im Rahmen dieser Arbeit wird untersucht, ob Emissionsmessungen im Realbetrieb mittels PEMS sinnvoll möglich sind und wie das Emissionsverhalten einer Stufe V Baumaschine im Realbetrieb ist.

Zu den Aufgabenschwerpunkten gehören die Durchführung und Validierung einer „ISC“ Messung an einem Bagger, die gesetzliche Auswertung und Analyse der Messung, sowie das Erstellen eines maschinenspezifischen Simulationsmodelles.

Die „ISC“ Messung der Baumaschine wurde in Kooperation mit dem ÖAMTC durchgeführt. Für die Messung wurde ein „kleines“ PEMS eingesetzt, da dieses trotz des beschränkten Platzes auf dem Bagger montiert werden konnte. Nach dem Messaufbau, wurde ein vorbereitetes Messprogramm durchgeführt. Das Messprogramm umfasste fünf Zyklen, welche einen möglichst großen Betriebsbereich des Baggers abdecken sollten. Dazu gehörten auch der Kaltstart und verschieden lange Niederlastzeiten, um das Abkühlverhalten der Maschine bewerten zu können.

Im Anschluss der Messung wurden die Messdaten validiert und auf Auffälligkeiten überprüft. Diese Analyse veranschaulicht, dass die im Messgerät integrierte Partikelmessung zum Teil falsche Ergebnisse liefert. Ein Fehler im verbauten Differenzdrucksensor, dessen Signale zur Verdünnungsregelung verwendet werden, könnte eine mögliche Ursache dafür sein.

Eine Auswertung der gesetzteskonformen Ergebnisse erfolgte mit Hilfe des offiziellen Tools „Emroad“, welches von der europäischen Union zur Verfügung gestellt wird. Zum einen zeigen die Ergebnisse, dass eine Messung nach ISC Vorgaben möglich ist, aber auch, dass durch das, in der „ISC“ Regulierung vorgeschriebene Ausschließen der Nicht-Betriebsereignisse, wie z.B. Kaltstart oder längere Niederlastphasen, emissionskritische Phasen nicht berücksichtigt werden. Der Bagger erfüllt die Grenzwerte für die Stufe V in diesen Tests.

Auf Basis der Messdaten wurde mit Hilfe des Simulationstools „PHEM“ ein Simulationsmodell erstellt. Da sich die Simulation der NO_x-Emissionen mit einem kennfeldbasierten Ansatz als schwierig herausstellte, wurde das Simulationsmodell im Verlauf der Arbeiten mit einem detaillierten Temperatur- und Abgasnachbehandlungs-Modell ergänzt. Das finale Modell kann die Emissionen in allen gemessenen realen Betriebssituationen darstellen.

Abstract

In line with the entry into force of the new "Stage V" legislation for off-road machinery, engine manufacturers of the "NRE-v-5" and "NRE-v-6" classes must also demonstrate compliance with the statutory emission limits in real-world operation. This is monitored as part of a monitoring phase. However, the introduction of in-plant emission measurement in real operation into the current legislation of "off road" machines brings some challenges. In the context of this work, it is investigated whether emission measurements in real operation by means of PEMS are reasonably possible and what the emission behavior of a Stage V construction machine is in real operation.

The main tasks include the execution and validation of an "ISC" measurement on an excavator, the legal evaluation and analysis of the measurement, and the creation of a machine-specific simulation model.

The "ISC" measurement of the construction machine was carried out in cooperation with ÖAMTC. A "small" PEMS was used for the measurement, as it could be mounted on the excavator despite the limited space. After the measurement setup, a prepared measurement program was carried out. The measurement program included five cycles, which were intended to cover an operating range of the excavator as wide as possible. This also included the cold start and low-load periods of different lengths in order to be able to evaluate the cooling behavior of the machine.

Following the measurement, measurement data was validated and checked for anomalies. This analysis illustrates that the particle measurement integrated in the measuring device partly delivers incorrect results. An error in the installed differential pressure sensor, whose signals are used for dilution control, could be a possible cause.

An evaluation of the legally compliant results was carried out with the help of the official tool "Emroad", which is provided by the European Union. On the one hand, results show that a measurement according to ISC specifications is possible, but also that emission-critical phases are not taken into account due to the exclusion of non-operational events, such as cold starts or longer low-load phases, as prescribed in the "ISC" regulation. The excavator meets the Stage V limits in these tests.

Based on the measured data, a simulation model was created using the "PHEM" simulation tool. Since the simulation of NO_x emissions with a map-based approach proved to be difficult, the simulation model was supplemented with a detailed temperature and exhaust gas aftertreatment model in the course of the work. The final model can represent emissions in all measured real-world operating situations.

1 Einleitung

Der Klimaschutz und die Verringerung der Luftverunreinigung sind seit Jahren zentrale Ziele, welche unsere Gesellschaft und Politik verfolgen. Damit einhergehend entstehen fortlaufend neue Beschränkungen, die den Ausstoß von Luftschadstoffen verringern sollen.

Der Verkehr, trägt einen erheblichen Anteil an dem umweltbelastenden Schadstoffausstoß bei. Dieser umfasst aber nicht nur PKWs und LKWs, sondern auch Baumaschinen. Gerade bei Großbaustellen im urbanen Bereich sind viele Baumaschinen gleichzeitig im Einsatz und haben einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Luftgüte in diesem Bereich haben.

Die geltenden Gesetzgebungen im PKW- und LKW-Sektor schreiben bereits vor, dass Motoren nicht nur am Prüfstand, sondern auch im realen Fahrbetrieb getestet und überprüft werden müssen. Mit dem Inkrafttreten der „Stage V“ Gesetzgebung mit Jänner 2017 sollen auch spezielle mobile Maschinen und Geräte, welche nicht für den Straßenverkehr bestimmt sind und einen Verbrennungsmotor enthalten, im Realbetrieb überprüft werden. Die innerbetriebliche Messung, auch als „ISC“ Messung bekannt, ist auf diesem Gebiet somit neu hinzugekommen. Aus diesem Grund wurde eine Monitoring Phase ins Leben gerufen, mit deren Hilfe das Einführen der innerbetrieblichen Messung erleichtert werden soll. [5]

Im Zuge dieser Monitoring Phase werden an verschiedenen mobilen Maschinen innerbetriebliche Emissionsmessungen durchgeführt. Dabei gilt es, die gesetzlichen Anforderungen betreffend des Messgeschehens und der Auswertung zu analysieren und validieren.

2 Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung kann wie folgt gegliedert werden.

- Unabhängige Prüfung der ISC Regulierung auf Durchführbarkeit
- Durchführung einer ISC Messung
 - Vorstudie Montagemöglichkeiten
 - Vorstudie Messprogramm
 - Aufbau des Messgerätes
 - Durchführung der Messung
- Auswertung der Ergebnisse
 - Allgemeine Auswertung
 - Auswertung unter Berücksichtigung der ISC Regularien
- Bewertung des Emissionsverhaltens
- Erstellung eines Simulationsmodelles (inklusive Kaltstart- und Niederlastphasen)

3 Theoretische Grundlagen

Um ein allgemeines Verständnis für die, in dieser Arbeit behandelten Themen und Fragestellungen zu schaffen, werden in diesem Kapitel die wichtigsten Grundlagen erläutert und erklärt.

Neben den Emissionen, die bei einer motorischen Verbrennung erzeugt werden, wird auf Gesetzgebungen und Richtlinien von „Off Road“ Maschinen näher eingegangen. Des Weiteren folgt eine Betrachtung der erforderlichen Messtechnik für die Schadstoffmessung im realen Fahrbetrieb.

3.1 Emissionen

Anthropogene Emissionen entstehen durch Verbrennungs- und / oder Produktionsprozesse. Der Verkehr, einschließlich dem Betrieb von nicht für den Straßenverkehr bestimmten mobilen Maschinen und Geräten trägt einen bekanntlich nicht vernachlässigbaren Anteil an den anthropogenen Emissionen bei. [1]

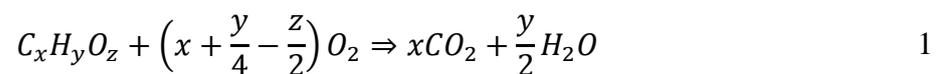
Die Luftschadstoffe können unter Berücksichtigung ihrer Entstehung und Herkunft in drei verschiedene Gruppen aufgeteilt werden. In den ersten beiden Gruppen sind Verbrennungsschadstoffe zu finden, die des Weiteren in vollständige Verbrennungsschadstoffe und unvollständige Verbrennungsschadstoffe eingeteilt werden, während die dritte Gruppe Schadstoffe beinhaltet die ohne Verbrennungsbasis entstehen. [1]

3.1.1 Luftschadstoffe aus der vollständigen Verbrennung

Eine vollständige Verbrennung erfolgt, wenn für den Verbrennungsprozess ausreichend Luftsauerstoff vorhanden ist und der Treibstoff vollständig abbrennen kann. [1]

Die Produkte der vollständigen Verbrennung sind Kohlenstoffdioxid, Wasser, Stickstoff und überschüssige Luft. [1]

Die Reaktionsgleichung der vollständigen Verbrennung lautet wie folgt. [1]



Kohlenstoffdioxid (CO₂) ist ein sogenanntes Treibhausgas, welches durch die Oxidation von Kohlenstoffverbindungen gebildet wird. CO₂ verursacht eine schwer berechenbare, kontinuierliche Zunahme der mittleren Temperatur an der Erdoberfläche. Um andere Schadstoffe mittels Abgasnachbehandlungstechnologien zu verringern muss meist im Gegenzug ein vermehrter Kraftstoffverbrauch und somit ein erhöhter CO₂-Ausstoß in Kauf genommen werden, damit die Katalysatoren in ihrem optimalen Temperaturfenster gehalten werden können. Es gilt somit einen sinnvollen Kompromiss zwischen Reduktion der Schadstoffe und Erhöhung der CO₂-Emissionen zu finden. [1]

H₂O wird nicht als Luftschadstoff gewertet und wird daher auch nicht genauer betrachtet.

Eine weitere Abgaskomponente die vor allem bei der dieselmotorischen Verbrennung entsteht, sorgte in den letzten Jahren für viel Aufregung und für Nachrüstungen in der Abgasnachbehandlung: NO_x. Moderne Dieselmotoren werden mit Luftüberschuss im sogenannten „mageren“ Bereich betrieben, um den Wirkungsgrad zu erhöhen und den

Kraftstoffverbrauch zu senken. Das erhöhte Luftverhältnis führt bei realen Dieselmotoren zu sehr hohen Verbrennungstemperaturen und überschüssigem Sauerstoff, welche die Bildung von Stickoxiden begünstigen. [1]

Stickoxide (NO_x), bestehend aus NO oder NO₂, entstehen bei der sogenannten „überevullständigen“ Verbrennung. Die verschiedenen Bildungsmechanismen von NO und NO₂ werden hier nicht genauer behandelt. Es sei lediglich erwähnt, dass das emittierte NO unter dem Einfluss von UV-Strahlung großteils zu NO₂ umgewandelt wird. Dem direkt emittierten bzw. umgewandelten Stickstoffdioxid wird aufgrund seiner schädigenden Wirkung auf den menschlichen Körper besondere Aufmerksamkeit geschenkt. [1]

Die NO_x Emissionen können innermotorisch mit Hilfe einer Abgasrückführung verringert werden. Für eine effektive Reduktion braucht man aber zusätzlich noch eine Abgasnachbehandlung. Bei Dieselmotoren haben sich zwei Abgasnachbehandlungssysteme etabliert. Dazu gehört der Stickoxidspeicherkatalysator (NSK), der jedoch nur im PKW Sektor Anwendung findet und der „SCR“ Katalysator, der durch den Einsatz von Ammoniak (NH₃) die Stickoxide umwandelt. [2]

3.1.2 Luftschadstoffe aus der unvollständigen Verbrennung

Bei der „unvollständigen“ Verbrennung kann aufgrund von Luftmangel der Kraftstoff nicht zur Gänze abbrennen. Dadurch entstehen unerwünschte Produkte wie Kohlenmonoxid, unverbrannte Kohlenwasserstoffe und Rußpartikel. Dieselmotoren werden zwar global mit Luftüberschuss betrieben, lokal entstehen durch die Direkteinspritzung jedoch „fette“ Zonen in denen eine unvollständige Verbrennung stattfindet. [2]

Kohlenmonoxid (CO) ist ein giftiges Gas, welches aufgrund der hohen Erstickungsgefahr sehr stark limitiert wird. Der Sauerstofftransport im menschlichen Blutkreislauf wird reduziert, da die eingeatmeten CO Moleküle den Platz der O₂ Moleküle am Sauerstoffträger (Hämoglobin) einnehmen und diese verdrängen. [2]

Die Bildung von Kohlenmonoxid kann durch eine vollständige Verbrennung ohne Luftmangel verhindert werden. Bei einem Betrieb unter Luftmangel kann das emittierte CO mit Hilfe eines Oxidationsanalysators zu CO₂ oxidiert werden. [2]

Kohlenwasserstoffe (HC) entstehen großteils bei Verbrennungsprozessen mit Luftmangel bzw. „fetten“ Gemisch-Verhältnissen. Die eingebrachte Kraftstoffmenge kann nicht vollständig umgesetzt werden und wird unverbrannt in Form von HC-Emissionen ausgestoßen. Ein Verbrennungsprozess der nahe an den Zündgrenzen abläuft sowie die Filmbildung an noch kalten Brennraumwänden begünstigen die Bildung von HC-Emissionen. Da einige Kohlenwasserstoffverbindungen eine nachweislich krebserregende Wirkung auf den menschlichen Körper haben, ist der Ausstoß von HC Emissionen gesetzlich limitiert. [2]

Die emittierten Kohlenwasserstoffe können jedoch mit Hilfe eines Oxidationskatalysators sehr effizient in nicht gesundheitsschädigende Komponenten umgewandelt werden, sodass man bei modernen Kraftfahrzeugen kaum noch HC-Emissionen im Abgas findet. [2]

Partikel aus Verbrennungsprozessen sind Konglomerate aus fest, flüssig oder gemischt vorkommenden Stoffen. Dazu zählen Rußpartikel, nicht verbrannter Kraftstoff und kondensiertes Wasser, welches auf den Rußpartikeln mittransportiert wird. Die Rußbildung tritt vor allem in fetten Gebieten des Gemischs und bei mittleren bis hohen Flammentemperaturen

auf. [1]

Zur Einhaltung der Emissionsgrenzwerte werden Partikelfilter eingesetzt. Bei Dieselfahrzeugen werden Dieselpartikelfilter bereits standartmäßig im Abgasnachbehandlungssystem verbaut. [2]

3.1.3 Luftschadstoffe ohne Verbrennungsbasis

In diese Kategorie fallen HC Emissionen, welche sich durch die Verdunstung von Kraftstoffen bilden und Partikel, die ohne Verbrennungsbasis entstehen.

Zu den Partikeln ohne Verbrennungsbasis zählen Bremsabriebe, mechanische Verschleißteile, Staub, Ölpartikel und Katalysatorabriebe.

3.1.4 Umrechnung CO₂- auf Kraftstoffverbrauch für Dieselmotoren

Bei der Emissionsmessung von Fahrzeugen und der anschließenden Auswertung ist es oftmals notwendig, mittels gemessenen CO₂-Emissionen, Aussagen über den Kraftstoffverbrauch zu machen. Der Kraftstoffverbrauch kann mit PEMS nicht direkt gemessen werden, er muss daher durch Anwendung einer Kohlenstoff-Bilanz bestimmt werden.

Die Umrechnung basiert auf der Atomerhaltung von Kohlenstoffatomen. Hierbei werden lediglich die Kohlenstoffatome vom emittierten Kohlenstoffdioxid berücksichtigt. Die Kohlenstoffatome anderer Abgaskomponenten können aufgrund ihrer geringer Konzentration vernachlässigt und nicht berücksichtigt. [1]

Bei herkömmlichen Diesel- und auch Benzin-Kraftstoffen wird ein C/H-Verhältnis von 0.86 angenommen. [1]

$$m_C = m_{CO_2} * \frac{M_C}{M_{CO_2}} = m_{CO_2} * \frac{12}{44} \quad 2$$

$$m_{Kraftstoff} = \frac{m_C}{0.86} = m_{CO_2} * \frac{12}{44} * \frac{1}{0.86} \quad 3$$

Die Kohlenstoffmasse kann aus der Kohlenstoffdioxidmasse und dem Verhältnis der molaren Massen berechnet werden. Im Anschluss kann die Masse des Kraftstoffes durch eine Division durch das C/H-Verhältnis berechnet werden.

Mit einer angenommenen Dichte des Dieselmotorkraftstoffes von 0.83 Kilogramm pro Liter, kann der Kraftstoffverbrauch von der Einheit Kilogramm auf die Einheit Liter umgerechnet werden. [1]

3.2 NRMM

Die Ausdrücke „Non Road Mobile Machinery“ oder „Off Road“ Maschinen werden in wissenschaftlichen Berichten und in Gesetzgebungen häufig mit „NRMM“ abgekürzt. Auch in dieser Arbeit wird diese Abkürzung ihre Anwendung finden.

Der Begriff NRMM umfasst alle mobilen Maschinen und Geräte, welche nicht für den Straßenverkehr bestimmt sind und einen Verbrennungsmotor enthalten. [4]

NRMM finden in unterschiedlichsten Bereichen Gebrauch. Sie werden hauptsächlich in der Landwirtschaft, Industrie und in der Bau- und Forstwirtschaft eingesetzt. [3]

Motoren, die in den mobilen Maschinen und Geräten ihren Einsatz finden, können wie folgt kategorisiert werden:

- NRE: entspricht einem Auffangtatbestand, dh alle in der Folge nicht näher definierten Kategorien gehören hierher
- NRG: nur große Maschinen über 560 kW für den Einsatz in Generatorsätzen
- NRSh: handgeführte Fremdzündungsmotoren (Benzin) unter 19 kW
- NRS: kleine Geräte unter 56 kW und nicht Teil von NRSh, ebenfalls nur Fremdzündungsmotoren
- IWP: Binnenschiffsmotoren ab 19 kW
- IWA: Hilfsmotoren für Binnenschiffe über 19 kW
- RLL: Lokomotiv-Motoren
- RLR: Schienentriebwagen-Motoren
- SMB: Schneemobile-Motoren, die nicht unter NRE fallen (Benzinmotor)
- ATS: "all terrain vehicles" (ATV) und "side-by-side vehicles" (SbS) (Benzinmotor).

Abbildung 3-1: Motorkategorien [5]

Aufgrund der vielfältigen Motoren, mit denen „NRE“ Maschinen ausgestattet werden, kann noch eine weitere Klassifizierung eingeführt werden. Diese ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

Klasse	Art der Zündung	Drehzahl	Leistungsbereich (kW)	Unterklasse	Bezugsleistung
NRE	CI	variabel	$0 < P < 8$	NRE-v-1	Höchste Nutzleistung
	CI		$8 \leq P < 19$	NRE-v-2	
	CI		$19 \leq P < 37$	NRE-v-3	
	CI		$37 \leq P < 56$	NRE-v-4	
	alle		$56 \leq P < 130$	NRE-v-5	
			$130 \leq P \leq 560$	NRE-v-6	
			$P > 560$	NRE-v-7	
	CI	konstant	$0 < P < 8$	NRE-c-1	Nennwert der Nutzleistung
	CI		$8 \leq P < 19$	NRE-c-2	
	CI		$19 \leq P < 37$	NRE-c-3	
	CI		$37 \leq P < 56$	NRE-c-4	
	alle		$56 \leq P < 130$	NRE-c-5	
			$130 \leq P \leq 560$	NRE-c-6	
			$P > 560$	NRE-c-7	

Abbildung 3-2: „NRE“ Unterklassen [4]

Für die verschiedenen Motorkategorien gibt es unterschiedliche Gesetzgebungen und Grenzwerte.

Der, im Zuge dieser Arbeit untersuchte Bagger, fällt mit einer Leistung von 85kW in die Kategorie „NRE-v-5“.

3.2.1 Gesetzgebung und Grenzwerte

Der mit dem Einsatz der Maschinen einhergehende Ausstoß von Schadstoffen, wird durch die Basisrichtlinie 97/68/EG und den Folgerichtlinien geregelt. Die für die unterschiedlichen „NRE“ Motorkategorien geltenden Grenzwerte müssen bei der Typengenehmigung eingehalten werden. Auch die Typengenehmigung an sich variiert in Abhängigkeit der jeweiligen Kategorie, doch darauf wird erst im nächsten Kapitel näher eingegangen.

In der folgenden Abbildung sind die Grenzwerte in Abhängigkeit der jeweiligen Motorkategorie dargestellt.

Emissionsstufe	Motorenunterklasse	Leistungsbereich	Art der Zündung	CO	HC	NO _x	PM Masse	PN	A
		kW		g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	#/kWh	
Stufe V	NRE-v-1 NRE-c-1	0 < P < 8	CI	8,00	(HC + NO _x ≤ 7,50)		0,40 ⁽¹⁾	—	1,10
Stufe V	NRE-v-2 NRE-c-2	8 ≤ P < 19	CI	6,60	(HC + NO _x ≤ 7,50)		0,40	—	1,10
Stufe V	NRE-v-3 NRE-c-3	19 ≤ P < 37	CI	5,00	(HC + NO _x ≤ 4,70)		0,015	1 × 10 ¹²	1,10
Stufe V	NRE-v-4 NRE-c-4	37 ≤ P < 56	CI	5,00	(HC + NO _x ≤ 4,70)		0,015	1 × 10 ¹²	1,10
Stufe V	NRE-v-5 NRE-c-5	56 ≤ P < 130	alle	5,00	0,19	0,40	0,015	1 × 10 ¹²	1,10
Stufe V	NRE-v-6 NRE-c-6	130 ≤ P ≤ 560	alle	3,50	0,19	0,40	0,015	1 × 10 ¹²	1,10
Stufe V	NRE-v-7 NRE-c-7	P > 560	alle	3,50	0,19	3,50	0,045	—	6,00

⁽¹⁾ 0,6 für luftgekühlte Motoren mit Direkteinspritzung und Handstarter.

Abbildung 3-3: Grenzwerte der NRE Motorklassen für die „Stage V“ Abgasnorm [4]

Anders als bei PKW Grenzwerten werden bei „Off Road“ Maschinen die Emissionsmassen der limitierten Abgaskomponenten nicht auf den zurückgelegten Weg in Kilometer, sondern auf die vollbrachte Arbeit in Kilowattstunden bezogen. Somit ist es möglich sowohl mobile, als auch stationäre NRMM miteinander zu vergleichen. Dies ist sinnvoll, da einige Maschinen ihre Motorleistung hauptsächlich zum Arbeiten und nicht zum Fahren nutzen.

3.2.2 Typengenehmigung NRMM

Vor dem Inkrafttreten der aktuellen Abgasnorm, war es ausschließlich notwendig die Motoren der NRMM auf einem Motorenprüfstand zu zertifizieren.

Bei Zertifizierungen müssen Motoren, je nach Kategorie einen oder mehrere Prüfzyklen durchfahren, ohne dabei die Emissionsgrenzwerte zu überschreiten. Zu den gesetzlich relevanten Prüfzyklen zählt zum einen der „NRSC“, der den stationären Betrieb des betrachteten Motors darstellt und zum anderen der „NRTC“, welcher einen dynamischen Motorbetrieb nachstellt.

In den folgenden beiden Abbildungen werden die, bei einer „NRE“ Typengenehmigung, zu absolvierenden Prüfzyklen geteilt in stationäre und transiente Zyklen dargestellt.

Klasse	Drehzahl	Zweck	Unterklasse	NRSC
NRE	variabel	Motor mit variabler Drehzahl und einer Bezugsleistung von weniger als 19 kW	NRE-v-1 NRE-v-2	G2 oder C1
		Motor mit variabler Drehzahl und einer Bezugsleistung von 19 kW oder mehr, aber nicht mehr als 560 kW	NRE-v-3 NRE-v-4 NRE-v-5 NRE-v-6	C1
		Motor mit variabler Drehzahl und einer Bezugsleistung über 560 kW	NRE-v-7	C1
	konstant	Motor mit konstanter Drehzahl	NRE-c-1 NRE-c-2 NRE-c-3 NRE-c-4 NRE-c-5 NRE-c-6 NRE-c-7	D2

Abbildung 3-4: stationäre Prüfzyklen NRE [4]

Mit dem NRSC wird, wie bereits erwähnt das stationäre Verhalten des Motors untersucht. Dabei werden nacheinander vorgegebene Betriebspunkte im Drehzahl-Last Kennfeld angefahren und gemessen. Die Emissionsergebnisse der einzelnen Betriebspunkte fließen mit einer spezifischen Gewichtung in das Gesamtergebnis ein. [4], [8]

Wie in Abbildung 3-4 ersichtlich, müssen in Abhängigkeit der NRE Unterklassen unterschiedliche NRSC Zyklen geprüft werden. Die Unterkategorien des stationären Zyklus unterscheiden sich in der Abfolge der stationären Betriebspunkte, sowie in der Gewichtung der einzelnen Betriebspunkte. [8]

Klasse	Drehzahl	Zweck	Unterklasse	
NRE	variabel	Motor mit variabler Drehzahl und einer Bezugsleistung von 19 kW oder mehr, aber nicht mehr als 560 kW	NRE-v-3 NRE-v-4 NRE-v-5 NRE-v-6	NRTC

Abbildung 3-5: instationäre Prüfzyklen NRE [4]

Neben dem stationären Verhalten ist es auch notwendig das dynamische, instationäre Verhalten des Motors zu überprüfen. Zu diesem Zweck müssen Motoren der entsprechenden Unterklassen den NRTC Zyklus durchfahren.

In einem Zeitraum von 1238 Sekunden werden im Zuge des NRTC Lastprofile verschiedener Maschinentypen durchfahren und das Emissionsverhalten untersucht. Bei der Typengenehmigung wird der transiente Zyklus einmal mit kaltem und einmal mit warmen Motor gefahren. Das Kaltstartergebnis fließt mit einer zehnpromzentigen Gewichtung in das

Gesamtergebnis mit ein. [7], [8]

Vermehrte Kritik an der geringen Aussagekraft von Typengenehmigungen auf Motorprüfständen, führte zu einer Verschärfung. Mit dem Sprung in die aktuelle Abgasnorm „Stage V“ müssen Motorhersteller der Klassen „NRE-v-5“ und „NRE-v-6“ nun zusätzlich die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte im realen Betrieb sicherstellen. Die Aussagekraft ist insofern bedenklich, da manche Maschinen oftmals nur in einem gewissen Drehzahl-Bereich betrieben werden, bei einem NRTC wird aber das gesamte Kennfeld dargestellt.

Die Vermessung der Emissionen im realen Fahrbetrieb der NRMM stellt den Schwerpunkt dieser Arbeit dar. Daher wird speziell auf die ISC Regulierung eingegangen, in welcher die betriebliche Messung ihre Regelung findet.

Da die „In Service Conformity“ Messung auf diesem Gebiet noch relativ neu ist (2017) und die betroffenen „Off Road“ Maschinen in unterschiedlichsten Bereichen ihren Einsatz finden, ist es umso schwieriger eine einheitliche und auch sinnvolle Gesetzgebung für die Messung der „RDE“ Emissionen zu konzipieren.

Aus diesem Grund wurde ein Programm gestartet, welches das Einführen der ISC Messung mithilfe von „PEMS“ in die NRMM-Emissionsgesetzgebung erleichtern soll.

3.2.3 NRMM Pilot Programm- ISC Messung

Das „NRMM Pilot Programm“ kann als Monitoring Phase interpretiert werden. Dabei gilt es die Anwendung von PEMS bei der Messung von Emissionen im realen Fahrbetrieb von mobilen Maschinen und Geräten zu validieren und zu verbessern.

Die Ziele des Programms können wie folgt definiert werden: [9]

- Validierung der Anwendung von PEMS bei ISC-Messungen von „Off Road“ Maschinen
- Evaluierung des PEMS-Testprotokolles für NRMM
- Datenbereitstellung zur Festlegung von Test- und Prüfparameter, die die Anforderungen der Typengenehmigung der 97/68/EG erfüllen
- Bereitstellung von weiteren Informationen für die Anwendung von PEMS im Zusammenhang mit der Gesetzgebung
- Entwicklung und Austausch von "Best-Practice"-Ansätzen für den Einsatz von gasförmigen PEMS in NRMM mit allen relevanten Interessengruppen
- Benchmarking des Dialoges zwischen Hersteller und Typgenehmigungsstelle
- Evaluierung von möglichen Partikelemissionsmessungen, während der gasförmigen Messungen

3.3 Messtechnik für die Vermessung in Betrieb befindlicher NRMM

Das Emissionsverhalten von in Betrieb befindlichen Maschinen und Geräten wird mithilfe von „Portable Emission Measurement Systems“, oder auch kurz als PEMS bezeichnet, aufgezeichnet. Diese Messsysteme werden mit Hilfe einer externen Stromquelle versorgt und sind in der Lage die gasförmigen Emissionskomponenten, sowie die Partikelemissionen von NRMM zu messen. Im Zuge dieser Arbeit wurde ein Messgerät von der Firma AIP eingesetzt.

Heute eingesetzte PEMS bestehen meist aus drei Teilsystemen. Die Schadstoffkomponenten werden mit dem „PEMS-GAS“ gemessen, die Partikelanzahl mittels „PEMS-PN“ und der

Abgasmassenstrom mit Hilfe eines „EFM“-Moduls. Zusätzlich werden die ECU-Daten mit einem externen Rechner aufgezeichnet und ausgewertet.

Damit eine gesetzeskonforme ISC-Messung durchgeführt werden kann, muss das eingesetzte PEMS folgende Messinstrumente enthalten: [5]

- Analysatoren zur Messung der Schadstoffemissionen
- EFM zur Abgasdurchsatzmessung
- Sensorik zur Messung der Umgebungsbedingungen
- Datenlogger zur Speicherung der ECU Daten
- GPS Positionsbestimmung (optional)

Die dabei entstehenden, notwendigen Prüfparameter werden in der Abbildung 3-6 dargestellt.

Parameter	Einheit	Quelle
HC-Konzentration ⁽¹⁾	ppm	Gas-Analysator
CO-Konzentration ⁽¹⁾	ppm	Gas-Analysator
NO _x -Konzentration ⁽¹⁾	ppm	Gas-Analysator
CO ₂ -Konzentration ⁽¹⁾	ppm	Gas-Analysator
Abgasmassendurchsatz ⁽²⁾	kg/h	EFM
Abgastemperatur	°K	EFM oder ECU oder Sensor
Umgebungstemperatur ⁽³⁾	°K	Sensor
Umgebungsdruck	kPa	Sensor
Relative Feuchtigkeit	%	Sensor
Motordrehmoment ⁽⁴⁾	Nm	ECU oder Sensor
Motordrehzahl	rpm	ECU oder Sensor
Kraftstoffdurchsatz des Motors	g/s	ECU oder Sensor
Kühlmitteltemperatur	°K	ECU oder Sensor
Ansauglufttemperatur ⁽³⁾	°K	ECU oder Sensor
Breitengrad des Maschinenstandorts	Grad	GPS (optional)
Längengrad des Maschinenstandorts	Grad	GPS (optional)

Abbildung 3-6: PEMS Prüfparameter [5]

3.3.1 PEMS-Messprinzipien

Es gibt verschiedene Hersteller von „On Board“ Messsystemen. Je nach Messgeräthersteller variieren auch die eingebauten Abgasanalysatoren für die Messung der Abgaskomponenten CO, CO₂, NO und NO₂.

PEMS manufacturer	AVL	HORIBA	AIP	SENSORS
CO/CO ₂ analyser	NDIR ⁽¹⁾	NDIR ⁽¹⁾	NDIR ⁽¹⁾	NDIR ⁽¹⁾
NO analyser	NDUV ⁽²⁾	CLD ⁽³⁾	CLD ⁽³⁾	NDUV ⁽²⁾
NO ₂ analyser	NDUV ⁽²⁾	Calculated from NO and NO _x	PAS ⁽⁴⁾	NDUV ⁽²⁾

Abbildung 3-7: Messprinzipien Gas Analytoren [10]

Die Messung der THC Emissionen erfolgt mit Hilfe eines „FID“ Analysators, während man bei der PN-Messung das Prinzip des „CPC“ nützt.

Die einzelnen Messprinzipien werden im Folgenden genauer betrachtet.

NDIR-Non-Dispersive Infrared Detection

Die Infrarotspektroskopie ist eine Technik, die auf den Schwingungen der Atome eines Moleküls basiert. Ein Infrarotspektrum wird üblicherweise erhalten, indem man Infrarotstrahlung durch eine Probe schickt und bestimmt, welcher Anteil der einfallenden Strahlung bei einer bestimmten Energie absorbiert wird. [14]

Als eine Anwendung der Infrarotspektroskopie begann die nicht-dispersive Infrarot (NDIR)-Gasmessung in den späten 1930er Jahren in den Vereinigten Staaten. Die NDIR-Technik zur Gasmessung zielt auf die Wellenlängenabsorption im Infrarotspektrum als Möglichkeit zur Identifizierung bestimmter Gase. NDIR-Technologien eignen sich zur Erkennung von Luftschadstoffen, die von Emissionsquellen emittiert werden, wie z. B. Kohlenmonoxid (CO) oder Kohlendioxid (CO₂). Ein typisches NDIR besteht aus einer Lichtquelle, einer Gaskammer und einem Detektor. [15]

NDUV-Non-Dispersive Ultra-Violet Detection

„Das Messprinzip entspricht im Wesentlichen jenem des NDIR. Das NDUV-Verfahren bedient sich dabei des Merkmals, dass ein zu analysierendes Gas in einem intrinsischen Wellenlängenbereich ultraviolette Strahlen absorbiert.“ [16]

CLD-Chemiluminescence Detection

Basierend auf dem Chemolumineszenz Prinzip können Stickstoffmonoxide aufgezeichnet werden. Dabei werden durch chemische Reaktionen, Lichtemission ausgelöst und gemessen. Mittels Ozon wird Stickstoffmonoxid zu Stickstoffdioxid aufoxidiert. Ein kleiner Anteil des aufoxidierten NO₂ befindet sich kurz danach in einem aufgeladenen Zustand. Bei dem unverzüglich darauffolgenden Entladungsvorgang werden Lichtquellen in Form von Strahlung freigesetzt. Die freigesetzte Strahlung wird als „Chemolumineszenz-Strahlung“ bezeichnet. Die Intensität dieser Strahlung wird aufgezeichnet und steht in direktem Zusammenhang mit der vorhandenen NO Konzentration. [2]

Vorhandenes NO₂ muss im Vorhinein durch Katalyse zu NO umgewandelt werden. [2]

PAS-Photoacoustic Spectroscopy

Bei der PAS-Technik wird durch gaselektive Absorption eines modulierten Anregungslichts eine akustische Welle erzeugt und über einen akustischen Wandler (z.B. Mikrofone, Quarzstimmgabeln oder Faserspitzen) in ein elektrisches Signal umgewandelt.

Die Gaskonzentration kann somit durch Detektion des PAS-Signales ermittelt werden. Eine Besonderheit der PAS-Technik ist, dass der photoakustische Detektor unabhängig von der optischen Anregungswellenlänge funktioniert. Das bedeutet, dass jede Anregungslichtwellenlänge in der PAS-Technik eingesetzt werden kann. [17]

FID-Flame Ionization Detector

Im FID wird das Abgas über eine Wasserstoffflamme geleitet. Durch die Verbrennung an der Flamme werden ionisierte Kohlenstoffradikale gebildet, welche sich wiederum an einer Elektrode entladen. Der dadurch entstehende Ionisationsstrom kann gemessen werden. Er ist proportional zum Kohlenwasserstoffgehalt. Summarisch können somit alle Kohlenwasserstoffe aufgezeichnet werden. [2]

CPC-Condensate Particle Counter

Zur Messung der Partikelanzahl wird ein CPC verwendet. Da die Abgaspartikel sehr klein sind, können sie ohne Aufbereitung nicht optisch aufgezeichnet werden. Im CPC wird daher Alkohol (1-Butanol) verdampft und somit eine gesättigte Umgebung geschaffen. Die Partikel mit der gesättigten Umgebung werden im Anschluss gekühlt, wodurch das 1-Butanol auf den Partikeln kondensiert. Es entstehen kleine Tröpfchen, die nun mithilfe eines Detektors aufgezeichnet werden können. Die im Photodetektor entstehenden elektrischen Impulse werden gezählt. Das Probengemisch strömt mittels nachgeschalteter kritischer Düse konstant durch den CPC.

EFM-Exhaust Flow Meter

Das EFM basiert auf dem Prinzip der Differenzdruckmessung und dient zur Messung des Abgasmassenstroms. Die Reglementierung verschiedener Abgasmassen erfordert die Messung des Abgasmassenstromes, da mit dem Abgasmassenstrom und den gemessenen Emissionskonzentrationen können die einzelnen Abgasmassen bestimmt werden.

4 Messung

Im Zuge des NRMM Pilot Programms wurden im Auftrag des Umweltbundesamtes ISC Messungen an Baumaschinen verschiedener Art durchgeführt. Der praktische Teil dieser Arbeit umfasste die Messung eines Baggers der Abgasstufe „Stage V“.

Die hohe Anwendungsvielfalt und die stark variierenden Größenunterschiede von „Off Road“ Maschinen stellen Messtechniker vor große Herausforderungen. Die Größe der Baumaschine und die Montagemöglichkeiten sind wichtige Kriterien bei der Wahl eines geeigneten Messgerätes. Auch die unterschiedlichen Eigenschaften der möglichen Messgeräte, wie Größe und Gewicht, müssen berücksichtigt werden.

4.1 Maschine

Bei dem vermessenen Fahrzeug handelt es sich um einen Bagger der Firma Takeuchi mit der Type TB295W. Die in Abbildung 4-1 dargestellte Baumaschine wurde von der Firma Strempfl für die Messungen zur Verfügung gestellt.



Abbildung 4-1: Bagger Takeuchi [11]

4.1.1 Maschinenspezifikation und Abgasnachbehandlung

In der folgenden Abbildung werden wichtige Informationen des Baggers angeführt.

Hauptabmessungen	
Einsatzgewicht* (kg)	10.584 / 10.874**
Gesamtbreite (mm)	2.335
Gesamthöhe (mm)	3.010
Transportlänge (mm)	6.565 / 6.815**
Seitenversetzung li/re (°)	70° / 60°
Dieselmotor	
Deutz	TCD3.6L4 mit Abgasstufe 5
Typ	4-Zylinder, wassergekühlt mit Commonrail, Turbolader
Abgasnachbehandlung	DOC, SCR, DPF
Nennleistung ISO14396 (kW/PS)	85,0 / 116,0 bei 2.000 U/min
Max. Drehmoment (Nm)	460 bei 1.600 U/min
Hubraum (cm³)	3.621
Kühlwasserinhalt (l)	27,0
Motorölinhalt (l)	10,0

Abbildung 4-2: Fahrzeugdaten Takeuchi [11]

Wie aus der Abbildung 4-2 zu entnehmen, ist der Takeuchi Bagger mit einem 4-Zylinder Dieselmotor der Firma Deutz ausgestattet. Der Motor, mit einer Nennleistung von 85 Kilowatt bei einer Nenndrehzahl von 2000 Umdrehungen pro Minute, gilt, im Vergleich zu anderen Motoren dieser Fahrzeugklasse, als eher klein. [11]



Abbildung 4-3: Deutz Motor TCD3.6L4 [11]

Die Abgasnachbehandlung des Deutz Motors ist mit einem Dieseloxydationskatalysator, einem SCR- Katalysator und einem Dieselpartikelfilter ausgestattet. Außerdem verfügt der Motor über ein gekühltes, externes Abgasrückführungssystem. Mit Hilfe dieser modernen Technologien kann die Abgasstufe „Stage V“ erreicht werden. [11]

Wie bereits erwähnt, zählt dieser verbaute 85 Kilowatt Motor zu der bereits definierten Unterkategorie „NRE-v-5“. Der Hersteller muss somit mit dem Inkrafttreten der „Stage V“ Regulierung die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte auch im realen Fahrbetrieb sicherstellen.

4.2 Messtechnik Takeuchi Bagger

Aufgrund der geringen Größe des Takeuchi Baggers kam das verhältnismäßig kleine Messgerät MAHA PEMS der Firma AIP für die ISC Messung zum Einsatz. Die ECU-Daten wurden mit einem externen Rechner aufgezeichnet und gespeichert.

4.2.1 PEMS AIP

In Abbildung 3-7 ist ersichtlich, welche Abgasanalysatoren in dem Messgerät von AIP verbaut sind. Mit diesen Analysatoren können die Abgaskomponenten CO₂, CO, NO und NO₂ gemessen werden. Die Vermessung der gesetzlich ebenso notwendigen Kohlenwasserstoff Emissionen ist mit dem verwendeten Messgerät leider nicht möglich. Dies muss im weiteren Verlauf dieser Arbeit berücksichtigt werden.

Die Partikelanzahl kann mit dem eingebauten CPC-Analysator aufgezeichnet werden. In Abbildung 4-4 ist das verwendete Messgerät von AIP dargestellt.

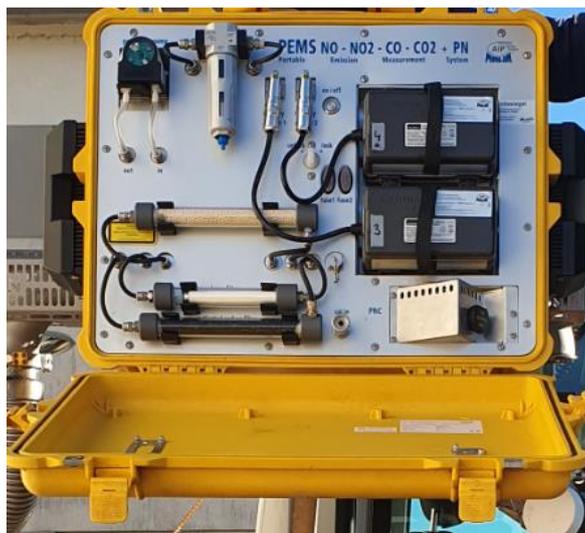


Abbildung 4-4: PEMS AIP

Zur Messung des gesetzlich notwendigen Abgasmassenstromes kommt ein 8 Kilogramm schweres EFM, mit einem Durchmesser von 2,5 Zoll zum Einsatz. Damit ist es möglich Abgasmassenströme von bis zu 270 Gramm pro Sekunde zu messen. Das EFM wird in der Abbildung 4-5 dargestellt.



Abbildung 4-5: EFM

4.2.2 ECU Datenaufzeichnung

Die ECU-Daten werden mit einem externen Rechner über einen „CAN-Bus“ aufgezeichnet und gespeichert. Dazu zählen unter anderem die Daten der Motordrehzahl, des prozentuellen Motordrehmomentes, der AdBlue-Einspritzmenge und verschiedener Temperaturen im Abgasstrang. Mit einer geeigneten Software können die Signale vom Steuergerät in lesbare Größen umgewandelt werden. Es existieren verschiedene Programme zur Aufzeichnung und Speicherung von „On Board“ Daten, welche jedoch im Zuge dieser Arbeit nicht genauer betrachtet werden.

4.3 Messaufbau

Der Messaufbau des vermessenen Takeuchi Baggers wird im Folgenden beschrieben und mit Hilfe von Abbildungen auch visuell dargestellt. Vor dem Messaufbau war es notwendig den Bagger genau zu besichtigen um Montagemöglichkeiten zu finden.



Abbildung 4-6: Messaufbau Rückseite



Abbildung 4-7: Messaufbau Seitenansicht

Wie in den obigen Abbildungen ersichtlich, wurde auf der Baggerhaube eine Palette mit einer Gummimatte als Unterlage verspannt. Die Gummimatte schützte dabei vor Abschürfungen der Oberfläche und verhinderte das verrutschen der Palette. Mit untergelegten Holzlatten wurde eine ausreichend ebene Basis für den Aufbau der weiteren Messtechnik geschaffen. In weiteren Schritten wurde das EFM und der gelbe Messtechnik-Koffer auf einer Montagevorrichtung montiert. Die Vorrichtung wurde im Anschluss auf der Holzpalette fest verschraubt. Bei der Messung von in Betrieb befindlichen Maschinen und Geräten ist neben dem sicheren Stand des Messgeräts auch auf die nötige Erschütterungssicherheit der eingesetzten Messtechnik zu achten. Während eines Messgeschehens kommt es naturgemäß zu Vibrationen und Erschütterungen. Diese höhere Belastung muss bei dem Aufbau und der Verkabelung berücksichtigt werden.

Vom Auspuff ausgehend wurde eine Schlauchverbindung zum EFM gelegt. Die Rohr- und Schlauchenden wurden dabei mit Gummischläuchen und Schellen dicht miteinander verbunden. Die ungünstige Lage des montierten EFM führte zu einer Abgasansammlung neben dem offenen Fenster der Fahrerkabine. Wegen der notwendigen Kabelverbindung vom Messgerät zum Rechner, der in der Fahrerkabine verstaut war, konnte das Fenster nicht geschlossen werden. Um den Fahrer vor einer Abgasansammlung zu schützen, wurde der

Abgasaustritt mit Hilfe eines weiteren Schlauches von der Fahrerkabine weggeleitet. Die elektronische Datenaufzeichnung, in Form eines Rechners, wurde wie bereits erwähnt in der Fahrerkabine untergebracht. Um eine externe Stromversorgung zu gewährleisten wurde des Weiteren ein Notstromaggregat auf der noch freien Fläche der Palette mit mehreren Spanngurten befestigt. Der Aufbau für die ECU-Datenaufzeichnung erfolgt unabhängig von der bereits verbauten Messtechnik, mit einem eigenen Rechner.

In Abbildung 4-8 ist die „CAN-Bus“ Schnittstelle mit einem passenden Stecker inklusive einem Teil der zum Rechner führenden Kabelverbindung zu erkennen. Darunter wird der Laptop, ausgestattet mit einer entsprechenden Analyse-Software zur Aufzeichnung der „OBD“ Daten dargestellt.



Abbildung 4-8: „CAN Bus“ Anbindung

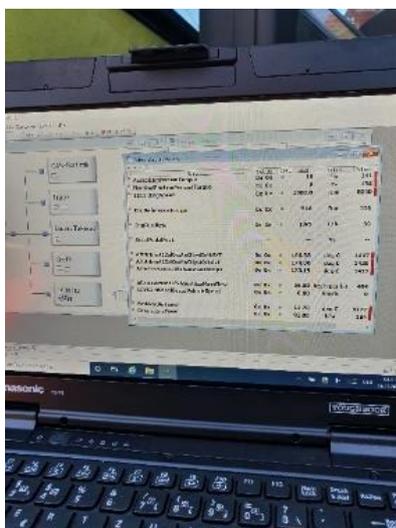


Abbildung 4-9: „ECU“ Datenaufzeichnung

Alle Anschlüsse wurden zusätzlich mit Klebebändern verstärkt, um das Lösen von Steckverbindungen, verursacht durch Erschütterungen, auszuschließen. Die beiden „Toughbooks“ und die Kabelverbindungen wurden trittsicher in der Fahrerkabine verstaut.

4.4 Messdurchführung

Die Messung des Emissionsverhalten von in Betrieb befindlichen NRMM erfordert die Ausarbeitung von Prüfzyklen, welche den realen Arbeitsbetrieb durch das übliche Bedienpersonal bestmöglich widerspiegeln. Es obliegt dem Hersteller und der Behörde zu entscheiden, ob die Überwachungsprüfung mit einem gesamten Betriebszyklus oder als Kombination mehrerer einzelner Betriebszyklen durchgeführt wird. [5]

Die Messung mit einem einzelnen, gesamten Prüfzyklus wird auch als „kontinuierliche“ Datenerfassung bezeichnet. Daten, die während Signalverlusten entstehen, werden ausgeschlossen. Dies gilt jedoch nur für Ausfälle, welche nicht länger als drei Minuten andauern. [5]

Alternativ gibt es die Möglichkeit der „kombinierten“ Datenerfassung, bei der maximal drei Zyklen miteinander kombiniert werden dürfen. Diese Variante ist vor allem für diejenigen NRMM sinnvoll, welche einen großen Anwendungsbereich mit verschiedenen Arbeitszyklen abdecken müssen. Dabei werden alle einzelnen Betriebszyklen, die zumindest eine dynamische Phase enthalten müssen, chronologisch durchgeführt und aneinandergereiht. [5]

Im Zuge dieser Arbeit wurde ein Messprogramm gewählt, welches unter die Kategorie der „kombinierten“ Messung fällt. In späteren Kapiteln wird darauf noch detailliert eingegangen.

Sowohl bei der „kontinuierlichen“ als auch bei der „kombinierten“ Datenerfassung muss eine Mindestprüfdauer abgedeckt werden, um eine gültige Messung zu erzeugen. Die Mindestprüfdauer ist erreicht, wenn die vollbrachte Leistung dem fünf- bis siebenfachen der „NRTC“ Referenzleistung oder wenn die emittierte Kohlenstoffdioxidmasse dem fünf- bis siebenfachen der „NRTC“ Referenzmasse entspricht. [5]

4.4.1 Messprogramm und Messablauf

Bei der Wahl des Messprogrammes für die Messung des Takeuchi Baggers galt es, den „wahren“ Betrieb des Baggers möglichst gut festzuhalten. Die zu berücksichtigenden Kriterien bei der Auswertung eines legitimen Ergebnisses werden später noch genau erläutert. Hier soll lediglich vorgegriffen werden, dass im Zuge der gesetzlich geregelten Ergebnisauswertung die Kaltstartemissionen und die Leerlaufemissionen nahezu komplett aus der Betrachtung ausgeschlossen werden. Mithilfe des in Abbildung 4-10 gewählten Messprogrammes sollen neben den Emissionen im Standardbetrieb bei betriebswarmem Motor die Einflüsse des Kaltstarts und verschieden langer Leerlaufphasen gezielt aufgezeigt werden.

Test	Tätigkeit	Startbedingung	Dauer [min]	Wetter	
Messung 01	Kaltstart + reale Tätigkeit	Kalt	51.8	-2°C, sonnig	← 15 min LL und 36 min Off
Messung 02	Reale Tätigkeit	Warm	28.4	5°C, sonnig	← 3 min LL
Messung 03	Leerlauf + Reale Tätigkeit + Leerlauf + Reale Tätigkeit	Warm	67.6	5°C, sonnig	← 131 min Off
Messung 04	Schweres Graben	Warm	27.8	5°C, sonnig	← 20 sec LL
Messung 05	Fahren	Warm	21.8	6°C, sonnig	

Abbildung 4-10: Messprogramm Takeuchi

Während einer „realen Tätigkeit“ führte der Baggerfahrer übliche Tätigkeiten wie Aufschottern oder leichtes Graben durch. Nach einem Kaltstart ist es üblich den Bagger im Leerlauf einige Minuten „Warmlaufen“ zu lassen. Auch dieses „Warmlaufen“ wurde im Zuge der ersten Messung mitaufgezeichnet. Neben den jeweiligen Umgebungstemperaturen und den Startbedingungen sind in der Abbildung auch die Dauern der realisierten Mess- und Nichtmess-Phasen dargestellt. Die Abkürzung „LL“ bedeutet, dass sich das Fahrzeug im Leerlauf befand und die Abkürzung „Off“ steht für „Motor aus“.

Vor und nach den ersten drei Messungen wurden sogenannte „pre“ und „post“ Testmessungen am PEMS durchgeführt, um mögliche Fehler am Messgerät auszuschließen und die einzelnen Messgeräte neu zu kalibrieren. Aus diesem Grund musste der Takeuchi Bagger zwischen den Messungen die „Kalibrierstation“ befahren. Die Kalibriereinheit und die Gasflaschen mit den Kalibriergasen ist in der folgenden Abbildung dargestellt.



Abbildung 4-11: Messgerät Kalibrierung

Zwischen der vierten und fünften Messung wurde aus Zeitgründen keine Kalibrierung durchgeführt. Die Aufzeichnung wurde lediglich beendet und neu gestartet.

Während und zwischen den Messungen war es wichtig den Messaufbau und die Signalaufzeichnung zu kontrollieren, um auf mögliche Fehler reagieren zu können. Vor Ort wurden die Messdaten des AIP Systems im Bereich des Möglichen auf Vorhandensein und Plausibilität untersucht.

Eine ausführliche Dokumentation des Messgeschehens ist für eine detaillierte Datenausarbeitung und Analyse im Anschluss der Messungen ausschlaggebend. Hierbei müssen vor allem die Wechsel von Betriebs-, Leerlauf- und „Motor aus“-Phasen zeitlich dokumentiert werden. Auch die Phasen zwischen den Messungen müssen nachvollziehbar festgehalten werden. Diese werden für Verhaltensanalysen der Abgasnachbehandlungssysteme benötigt.

4.4.2 Erkenntnisse und Empfehlung zum Messgeschehen

Die Vermessung von in Betrieb befindlichen NRMM verlangt, abhängig vom jeweiligen Maschinentyp, ein individuelles Vorgehen. Neben dem sehr spezifischen Messaufbau gilt auch die Findung eines adäquaten und rechtskonformen Messprogrammes laut Regulierung 2017/655 als wichtiges Kriterium.

Die Art der Datenaufzeichnung sollte unter Berücksichtigung der Anwendungsvielfalt der Maschine und den Umgebungsbedingungen zu einem sinnvollen und realistischen Ergebnis führen.

Kalendertage mit längeren Tageszeiten sind für Messprogramme, wie bei der Messung des Takeuchi Baggers zu bevorzugen. Für die Durchführung einer ISC-Messung sollten mindestens zwei volle Tage eingeplant werden. Die Aufbauarbeiten samt der Überprüfung der Messgeräte nehmen aufgrund der spezifischen Vorgehensweise mehr Zeit in Anspruch als bei PKW ISC-Messungen.

Bei der Messung ist außerdem auf die Möglichkeit einer Dieselpartikelfilterregeneration zu achten. Die „DPF“ Regeneration ist mit vergleichsweise sehr hohen Abgastemperaturen verbunden. Die erhöhten Temperaturen können dazu führen, dass Gummischläuche schmelzen oder Verbindungsschellen gelöst werden. Dies muss beim Aufbau berücksichtigt werden.

4.4.3 Messergebnis Zyklus 01

Bei dieser Messung wurde ein Kaltstart in Kombination mit einer realen Arbeitstätigkeit aufgezeichnet. Diese Messung soll somit zeigen, wie hoch die Kaltstartemissionen sind und wie lange die Maschine braucht, bis sie ihre optimale Betriebsbedingung erreicht hat. Aufgrund der sehr geringen Umgebungstemperatur nahm das bereits erläuterte „Warmlaufen“ knapp 20 Minuten in Anspruch.

Die Vorgehensweise bei der Datenanalyse wird im mithilfe dieser Messung detaillierter aufgezeigt. Im Anschluss werden auch die anderen Messungen genauer betrachtet.

Abgasmassenstrom

Bei der Analyse mussten zunächst die PEMS-Messdaten mit den ECU-Aufzeichnungen synchronisiert werden. Hierbei wurde der gemessene EFM-Abgasmassenstrom mit dem ECU-Abgasmassenstrom verglichen. Obwohl ein Offset zwischen den beiden Größen erkennbar ist, kann dennoch mit Hilfe der Verläufe eine zeitliche Abstimmung erfolgen. Im weiteren Verlauf der Arbeit wurde der EFM-Abgasmassenstrom verwendet, da dieser unabhängig mit dem PEMS gemessen wurde. Die Synchronisation der beiden Signale wird in Abbildung 4-12 dargestellt.

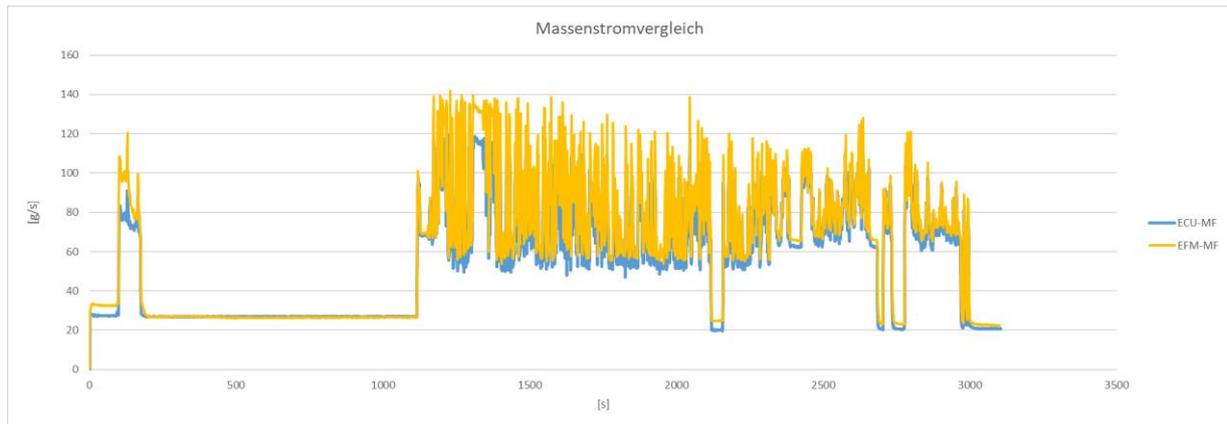


Abbildung 4-12: Massenstromvergleich Messung 01

Die, bei der Berechnung der Emissionsfaktoren in Gramm je Kilowattstunden erforderliche Referenzarbeit wird aus den Messsignalen der ECU-Aufzeichnung berechnet. Im Folgenden wird die Vorgehensweise bei der Bestimmung der geleisteten Arbeit genauer erläutert. Die, aus der ECU stammenden Größen werden mit einer Frequenz von 1Hz ausgegeben.

$$M [Nm] = \frac{ActualEngPercentTorque - NominalFrictionPercentTorque}{100} * EngReferenceTorque \quad 4$$

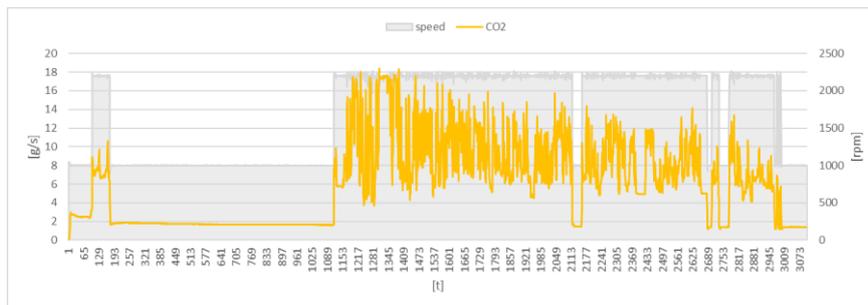
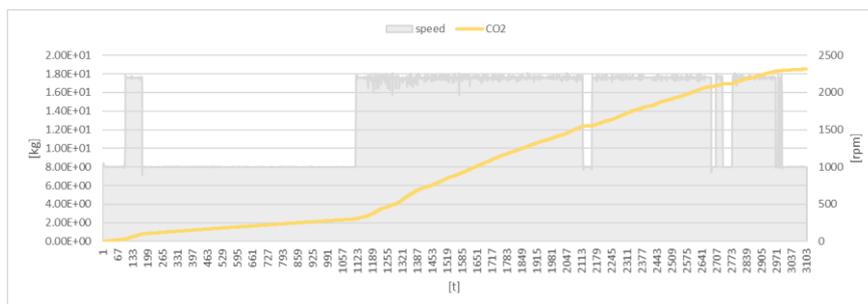
$$[kW] = M[Nm] * EngSpeed \left[\frac{1}{min} \right] * \frac{\pi}{30 * 1000} \quad 5$$

Zur Berechnung der vollbrachten Arbeit werden die sekundlich berechneten, positiven Leistungen in Kilowatt aufsummiert. Um die gewünschte Einheit in Kilowattstunden zu erhalten, erfolgte danach eine Division durch die Zahl 3600.

$$W [kWh] = \frac{\sum P_{pos} [kW]}{3600} \quad 6$$

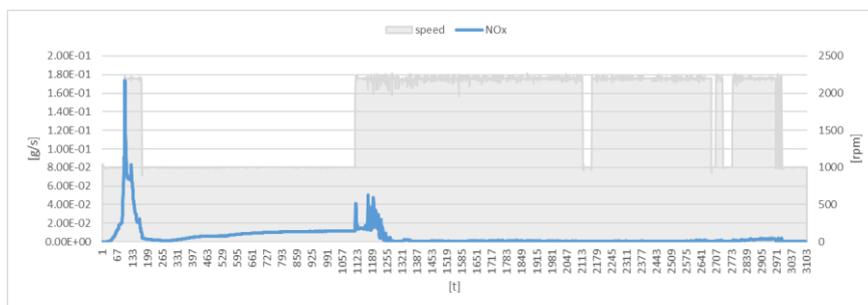
Neben einer Betrachtung der Gesamt- und Phasenergebnisse ist es ebenso notwendig die sekundlichen Aufzeichnungen zu analysieren. Dadurch können mögliche Messfehler oder Signalverluste entdeckt werden.

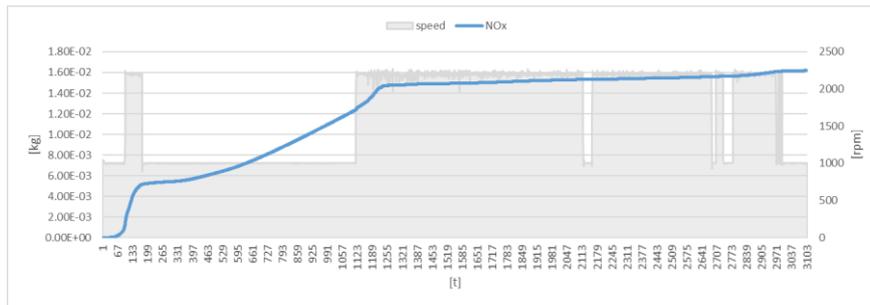
In den darauffolgenden Abbildungen werden die sekundlichen Verläufe und die kumulierten Werte der Messgrößen CO₂, NO_x und PN in Kombination mit der Motordrehzahl dargestellt. Die gemessenen Kohlenmonoxid-Emissionen werden aufgrund der sehr geringen Messwerte, die zum Teil unter der Sensibilitätsgrenze des Messgerätes liegen, nicht dargestellt.

CO₂Abbildung 4-13: CO₂ mit MotordrehzahlAbbildung 4-14: CO₂ kumuliert mit Motordrehzahl

Ein kontinuierliches Wachstum der CO₂-Emissionsmasse nach der Kaltstartphase kann in Abbildung 4-14 beobachtet werden. Die Verläufe deuten weder auf Messfehler noch auf Signalverluste hin.

Eine Analyse des Drehzahl-Verlaufes zeigt, dass sich die Drehzahl während den Betriebstätigkeiten relativ konstant bei 2300 Umdrehungen pro Minute einpendelt. Auch bei den noch folgenden Messungen kann dies beobachtet werden. Der anfängliche Peak in Abbildung 4-13 ist die Folge einer kurzen Ausfahrt aus einem Unterstellungsplatz während der Phase des „Warmlaufens“. Diese kurze Ausfahrt ist vor Allem bei der Analyse der NO_x Ergebnisse von großer Bedeutung.

NO_xAbbildung 4-15: NO_x mit Motordrehzahl

Abbildung 4-16: NO_x kumuliert mit Motordrehzahl

Die beiden obigen Abbildungen lassen erkennen, dass nach etwa 1200 Sekunden nur noch wenig NO_x emittiert wird. Die NO_x-Emissionsmasse, die während der zweiten Phase entsteht, stellt im Verhältnis zu der „Anlauf“-Emissionsmasse nur einen Bruchteil dar. Daraus lässt sich schließen, dass ab Sekunde 1200 die funktionsrelevante SCR-Temperatur erreicht ist und dadurch eine effiziente NO_x Umwandlung erfolgt. Der anfängliche Peak kann durch die kurze Ausfahrt des Baggers aus dem Unterstellungsplatz begründet werden.

PN

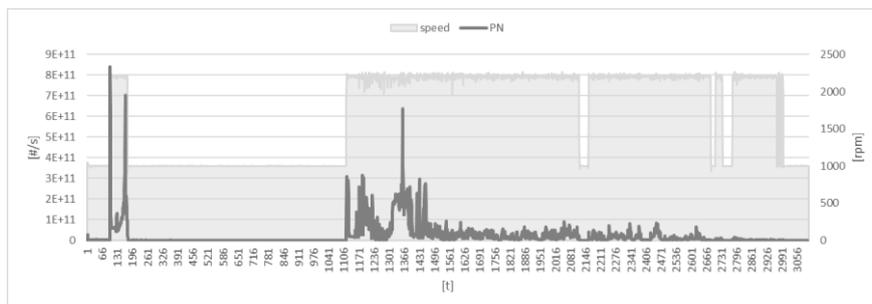


Abbildung 4-17: PN mit Motordrehzahl

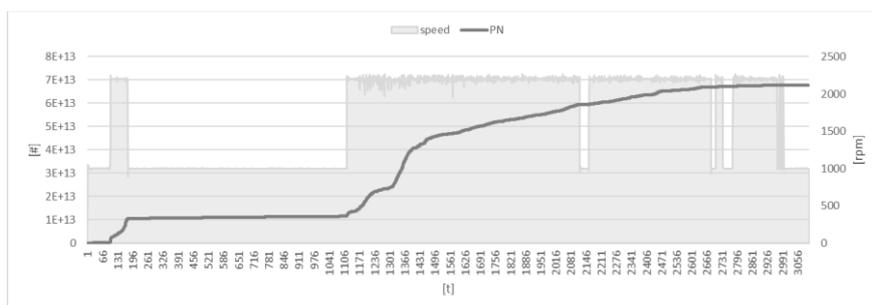


Abbildung 4-18: PN kumuliert mit Motordrehzahl

An sich sind die Verläufe und auch die Ergebnisse dieses Zyklus in einem zu erwartenden Bereich, aber wenn man die Verläufe und Gesamtergebnisse mit den anderen Messungen vergleicht, wird deutlich, dass diese Messung auf einem anderen Niveau als die anderen Messungen liegt. Diese Auffälligkeit wird im Verlauf dieser Arbeit noch genauer betrachtet.

Kraftstoffverbrauch

Neben dem bereits erläuterten Abgasmassenstrom-Vergleich wurde zum Zweck der Datenvalidierung auch eine Analyse des Kraftstoffverbrauchs durchgeführt. Dabei wurde der aufgezeichnete ECU-Kraftstoffverbrauch mit dem berechneten PEMS-Kraftstoffverbrauch verglichen.

Der Kraftstoffverbrauch kann, wie in den theoretischen Grundlagen erläutert, aus den gemessenen Kohlenstoffdioxidemissionen bestimmt werden. Mit Hilfe einer umgekehrten Vorgehensweise kann ausgehend von dem aufgezeichneten ECU-Kraftstoffverbrauch auch auf die CO₂ Emissionen zurückgerechnet werden.

Somit können zwei unabhängige Systeme miteinander verglichen und validiert werden. In Abbildung 4-19 werden die berechneten und gemessenen Verbräuche, sowie Kohlenstoffdioxidwerte dargestellt. Auch die relativen und absoluten Abweichungen, bezogen auf das Ergebnis der AIP-Messung werden in der Abbildung veranschaulicht. Die Abkürzungen „gem.“, „ger.“, „rel“ und „abs“ stehen dabei für „gemessen“, „gerechnet“, „relativ“ und „absolut“.

ECU					
Kraftstoffverbrauch gem.		Kraftstoffverbrauch ger.		CO ₂ ger.	
liter	liter/kWh	kg	g/kWh	kg	g/kWh
6.61	0.34	5.55	288.9	17.51	911.1
AIP					
Kraftstoffverbrauch ger.		Kraftstoffverbrauch ger.		CO ₂ gem.	
liter	liter/kWh	kg	g/kWh	kg	g/kWh
6.99	0.36	5.87	305.5	18.52	963.3
Abweichung AIP zu ECU					
Kraftstoffverbrauch			CO ₂		
abs [l/kWh]	rel [%]			abs [g/kWh]	rel [%]
-0.02	-5.7338295			-52.2	-5.7338295

Abbildung 4-19: Kraftstoffverbrauch Messung 01

Wie in Abbildung 4-19 ersichtlich, liegt die ECU-Aufzeichnung um 5.73 % unter der AIP-Messung. Diese Abweichung liegt im Rahmen der zu erwartenden Genauigkeit der PEMS-Messung und der ECU-Daten. Die Messergebnisse bestätigen sich somit gegenseitig.

Phasentrennung

Der Einfluss des Kaltstarts auf das Emissionsverhalten kann mit Hilfe einer Phasentrennung aufgezeigt werden. Dabei wird die Kaltstartmessung in eine „Anlaufphase“ und eine „Warmphase“ unterteilt. Die Trennung der Phasen erfolgt bei einer Kühlmitteltemperatur von 70°C. Beim Erreichen der Kühlmitteltemperatur von 70°C beim Kaltstart liegt die Temperatur vor SCR bei 290°C. Auch bei den folgenden Messungen kam es aufgrund der Kalibrierprozesse in den Nicht-Messphasen zu einer Abkühlung im Abgastrakt. Anlauf- und Betriebsphase wurden dabei anhand der Temperatur vor SCR von 290°C unterteilt, um hier eine einheitliche Methode zu verwenden und die Ergebnisse somit vergleichbar zu machen. Somit können auch alle anderen Messungen in eine „Anlaufphase“ und eine „Warmphase“ zerlegt werden.

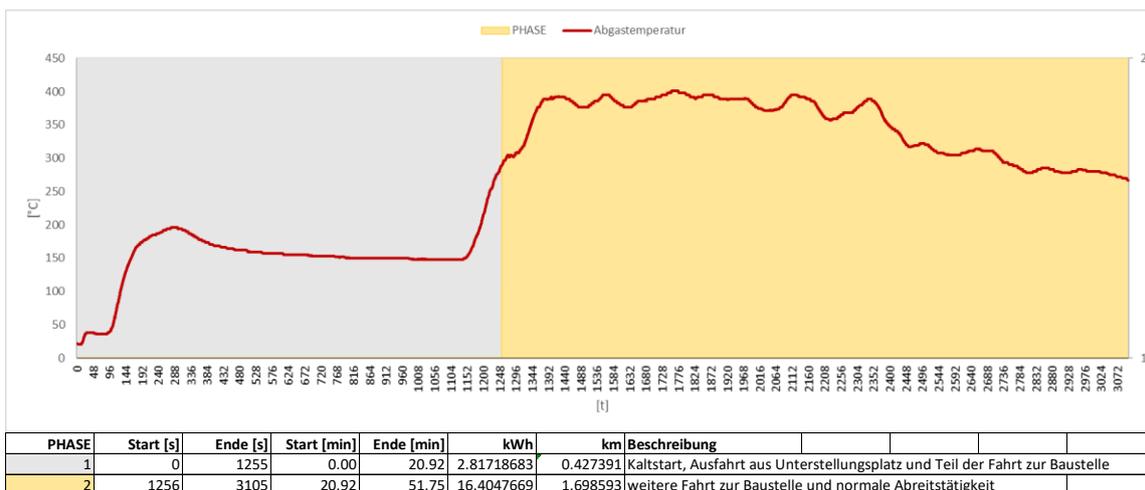


Abbildung 4-20: „Anlaufphase“ und „Warmphase“ Messung 01

4.4.4 Messergebnis Zyklus 02

Mit Hilfe der zweiten Messung wurde versucht, dass Emissionsverhalten des Baggers während einer normalen Arbeitstätigkeit festzuhalten. Vergleicht man diese Messung mit der vorherigen Messung, dann können die Auswirkungen des Kaltstartes deutlich beobachtet werden, obwohl die Maschine am Anfang des Tests ebenso nach einer längeren Leerlauf- und Abschaltphase aufgeheizt werden musste.

Abgasmassenstrom

Die aufgezeichneten Abgasmassenströme der beiden Messsysteme werden in der folgenden Abbildung dargestellt. Auch hier ist ein ähnlicher „Offset“ wie bei Messung 01 zwischen den Messsystemen zu erkennen.

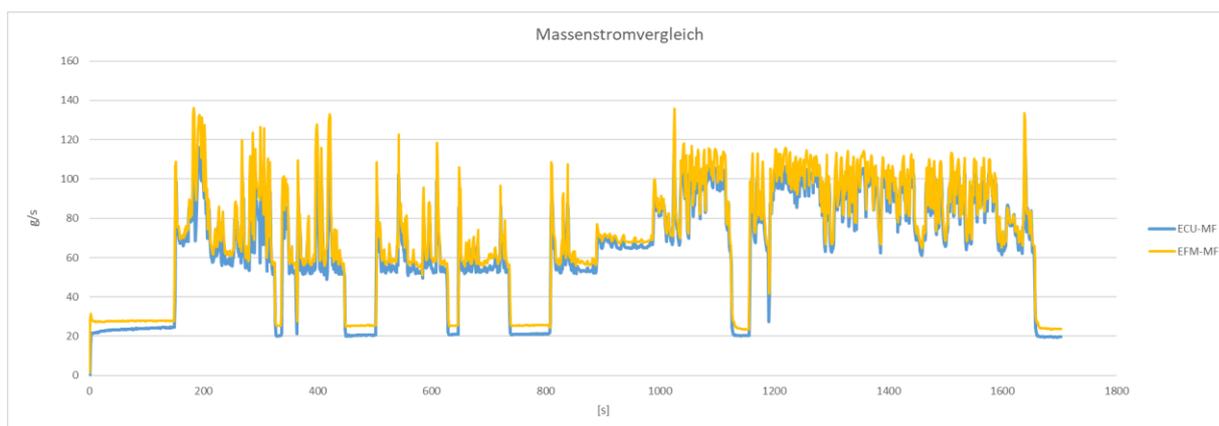


Abbildung 4-21: Massenstromvergleich Messung 02

Wie zuvor werden auch hier die sekundlichen Verläufe der Abgaskomponenten CO₂, NO_x und PN dargestellt.

CO₂

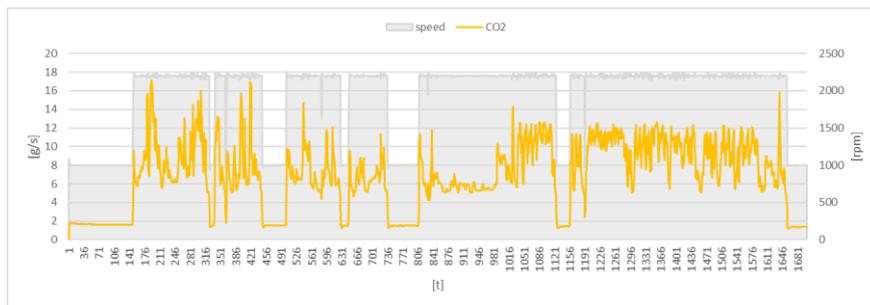
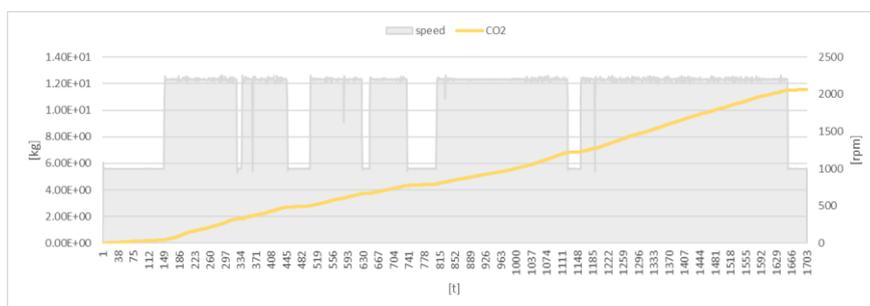
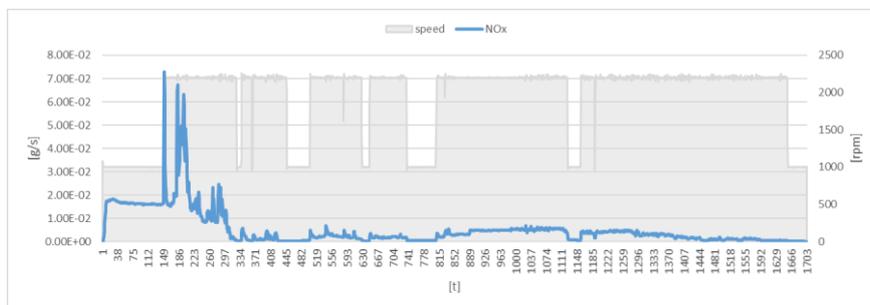
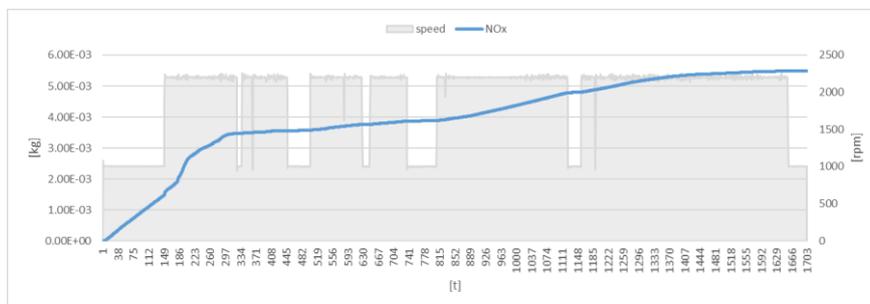
Abbildung 4-22: CO₂ mit Motordrehzahl

Abbildung 4-22 zeigt, dass während normalen Arbeitstätigkeiten immer wieder kurze Nicht-Betriebsphasen vorkommen. Bei der Auswertung werden diese daher nicht speziell berücksichtigt.

Abbildung 4-23: CO₂ kumuliert mit Motordrehzahl

NO_x

Abbildung 4-24: NO_x mit MotordrehzahlAbbildung 4-25: NO_x kumuliert mit Motordrehzahl

Vor dem Start dieser Messung war der Bagger für ca. 15 Minuten im Leerlauf und 35 Minuten abgestellt. Das dadurch verursachte Abkühlen der Abgasnachbehandlung führt zu hohen NO_x-

Emissionen in der Anlaufphase. Während der Warmphase, in der die Abgasnachbehandlung wieder ihre optimalen Betriebsbedingungen erreicht hat, werden im Vergleich zur Anlaufphase nur noch wenig Stickoxide emittiert.

PN

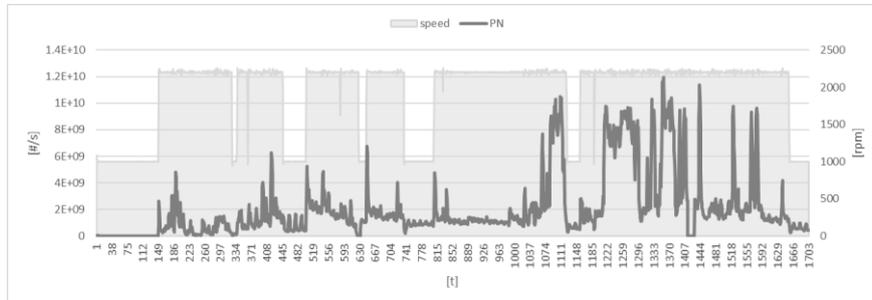


Abbildung 4-26: PN mit Motordrehzahl

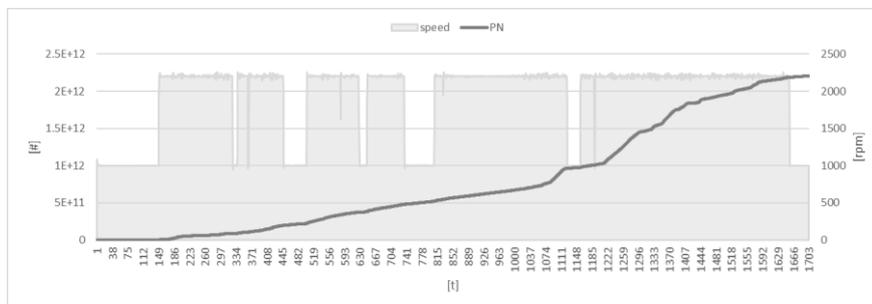


Abbildung 4-27: PN kumuliert mit Motordrehzahl

Im Vergleich mit der ersten Messung, deuten ähnliche Größenordnungen bei den CO₂ und NO_x Messwerten auf keine Auffälligkeiten hin. Eine Analyse der NO_x Emissionswerte, lässt erkennen, dass es einige Zeit in Anspruch nimmt, bis die funktionsrelevante SCR-Temperatur erreicht wird.

Kraftstoffverbrauch

Die relative Abweichung zwischen den beiden Messsystemen beträgt 4.59 %. Auch hier liegt das ECU Signal unter dem Niveau der AIP Messung.

ECU					
Kraftstoffverbrauch gem.		Kraftstoffverbrauch gem.		CO2 ger.	
liter	liter/kWh	kg	g/kWh	kg	g/kWh
4.18	0.34	3.51	286.3	11.06	902.8
AIP					
Kraftstoffverbrauch ger.		Kraftstoffverbrauch ger.		CO2 gem.	
liter	liter/kWh	kg	g/kWh	kg	g/kWh
4.37	0.36	3.67	299.4	11.57	944.2
Abweichung AIP zu ECU					
Kraftstoffverbrauch			CO2		
abs [l/kWh]	rel [%]			abs [g/kWh]	rel [%]
-0.02	-4.59			-41.44	-4.59

Abbildung 4-28: Kraftstoffverbrauch Messung 02

Phasentrennung

Die Grenztemperatur von 290 °C wird nach 311 Sekunden erreicht. Zu diesem Zeitpunkt erfolgt die Trennung zwischen „Anlaufphase“ und „Warmphase“. Wenn die optimale Betriebstemperatur einmal erreicht ist, wird diese in diesem Betriebsmodus auch gehalten.

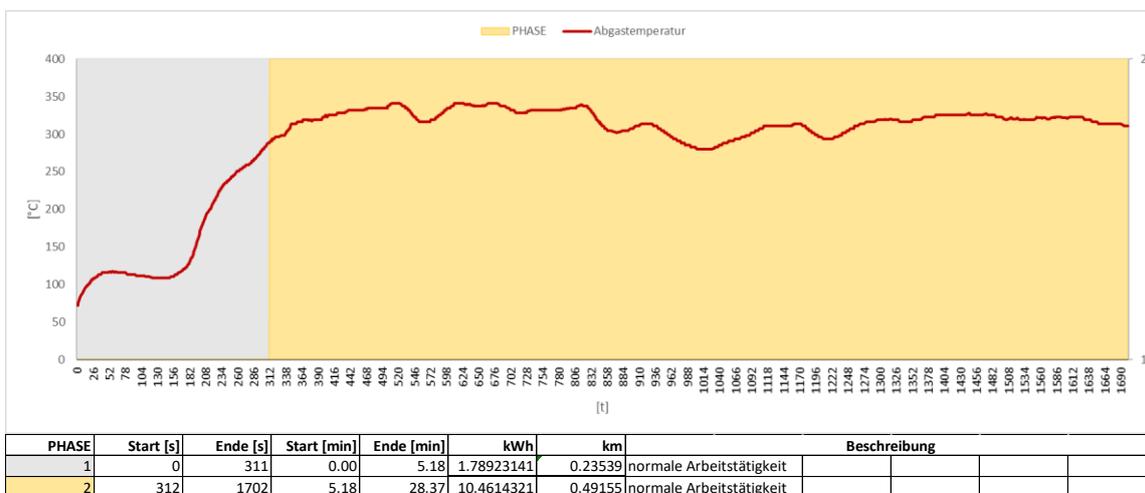


Abbildung 4-29: „Anlaufphase“ und „Warmphase“ Messung 02

4.4.5 Messergebnis Zyklus 03

Bei realen Einsätzen von „Off Road“ Maschinen sind die zwischenzeitlichen Leerlaufphasen nicht zu vernachlässigen. Mit Hilfe der Messung 03 können die Auswirkungen dieser Leerlaufphasen untersucht werden. Die Messung wurde bereits während einer Leerlaufphase gestartet und nach knapp 15 Minuten wurde mit dem Bagger eine übliche Arbeitstätigkeit realisiert. Danach folgte erneut eine 25 Minuten Leerlauf- und eine 15 Minuten lange, normale Betriebsphase.

Abgasmassenstrom

Abbildung 4-30 zeigt die Verläufe der Abgasmassenströme beider Systeme.

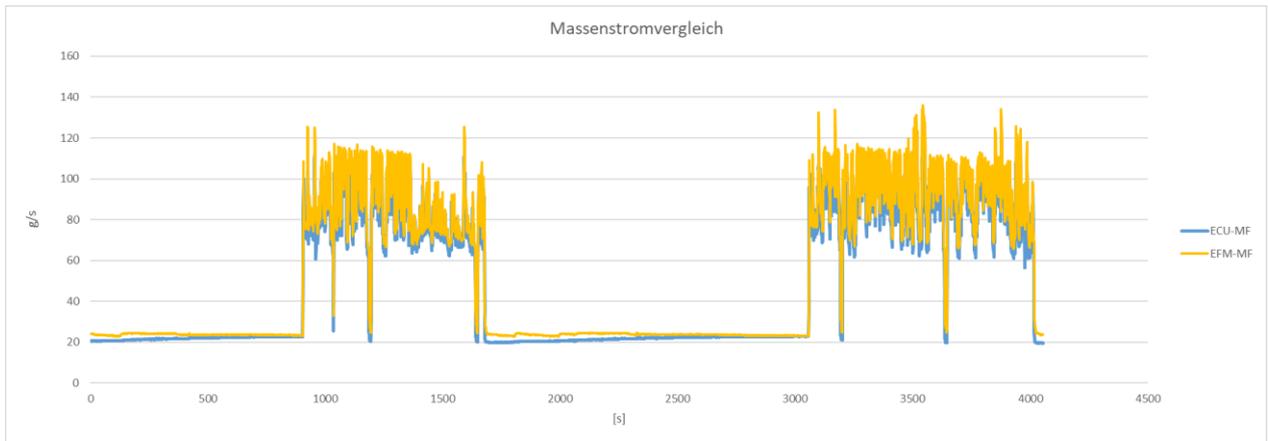


Abbildung 4-30: Massenstromvergleich Messung 03

CO₂

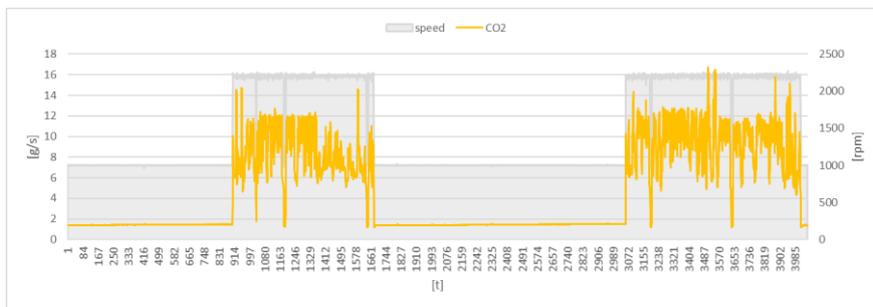


Abbildung 4-31: CO₂ mit Motordrehzahl

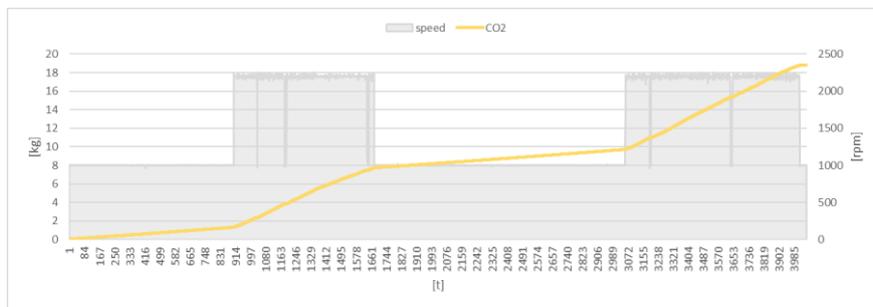
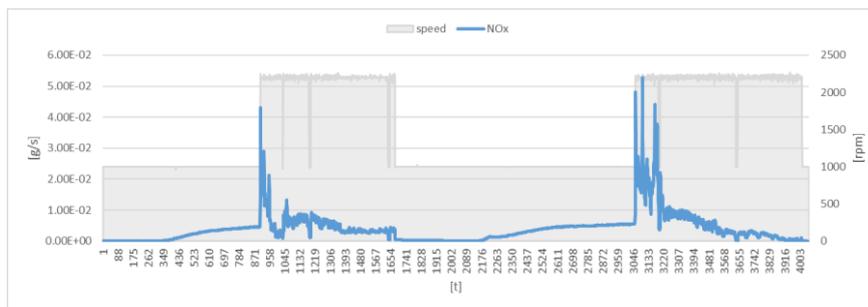
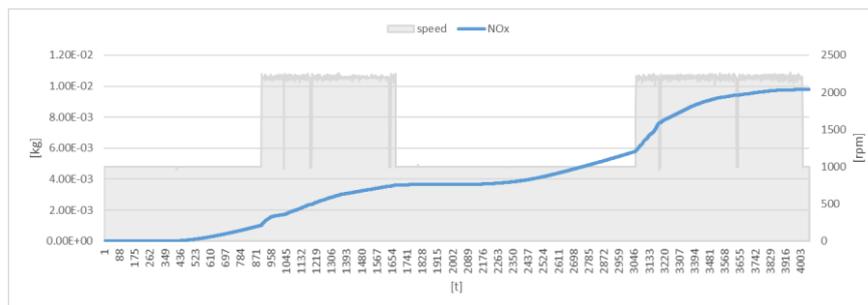


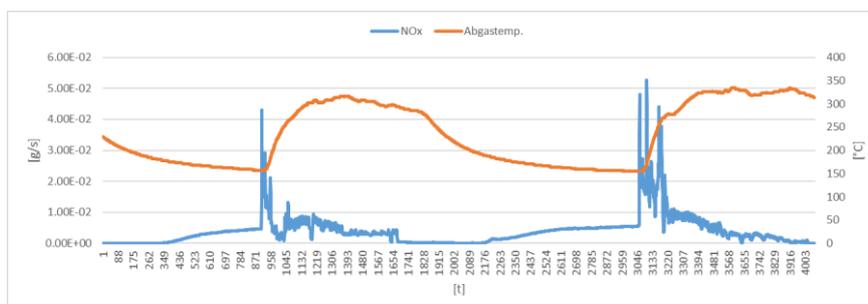
Abbildung 4-32: CO₂ kumuliert mit Motordrehzahl

Die CO₂ Emissionsmasse nimmt vor allem in den Betriebsphasen zu, wobei in den Leerlaufphasen nur ein geringes Wachstum zu erkennen ist. Dies spiegelt sich auch im Kraftstoffverbrauch wider.

NO_xAbbildung 4-33: NO_x mit MotordrehzahlAbbildung 4-34: NO_x kumuliert mit Motordrehzahl

In den Leerlaufphasen kann zunächst kein zusätzlicher Ausstoß von Stickoxiden beobachtet werden. Erst 10 Minuten nach Beginn der Leerlaufphase beginnt die NO_x Emissionsmasse zu steigen. Die erste Leerlaufphase erfolgte im direkten Anschluss an die vorherige Messung. Zu Beginn war das Abgasnachbehandlungssystem daher noch ausreichend warm und im SCR war noch genug NH₃ vorhanden um die Stickoxide effizient umzuwandeln. Durch das fortschreitende Absinken der Temperatur kann der NH₃-Speicher aber nicht mehr befüllt werden. Das NH₃ wird mit der Zeit verbraucht und die Konvertierung im SCR verschlechtert sich. Dies kann sowohl bei der ersten als auch bei der zweiten Leerlaufphase gut beobachtet werden. [2]

Besonders zu Beginn der folgenden Betriebstätigkeiten werden sehr viele Stickoxide emittiert. Die Abnahme der funktionsrelevanten Abgastemperatur ist dafür verantwortlich. Der Temperaturverlauf vor SCR in Kombination mit den emittierten NO_x wird mit Hilfe der nächsten Abbildung dargestellt.

Abbildung 4-35: NO_x mit Abgastemperatur vor SCR

In Abbildung 4-35 kann man die Abnahme der Temperatur vor SCR in den Leerlaufphasen sehr

gut beobachten. Die Grenztemperatur für die Dosierung von AdBlue liegt zwischen 190 °C und 180 °C. Sinkt die Temperatur unter diese Grenze, so können die NO_x Emissionen nicht mehr effizient umgesetzt werden. Das im SCR Katalysator gespeicherte NH₃ wird schnell verbraucht. Abhängig von der Motorlast nimmt es einige Minuten Anspruch bis das notwendige Temperaturniveau zur AdBlue-Dosierung wieder erreicht wird und der NO_x Umsatz wieder effizient erfolgen kann.

PN

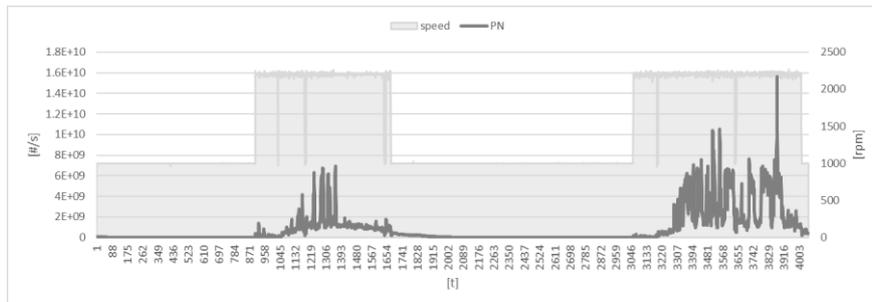


Abbildung 4-36: PN mit Motordrehzahl

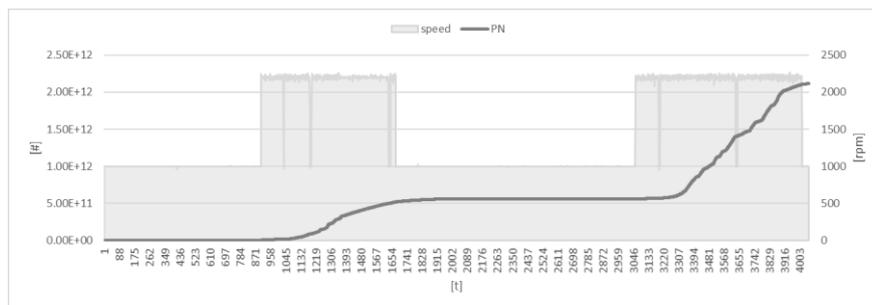


Abbildung 4-37: PN kumuliert mit Motordrehzahl

Die Partikelemission liegt auf einem ähnlichen Niveau wie bei der zweiten Messung. Es sind keine Auffälligkeiten zu erkennen.

Kraftstoffverbrauch

ECU					
Kraftstoffverbrauch gem.		Kraftstoffverbrauch gem.		CO2 ger.	
liter	liter/kWh	kg	g/kWh	kg	g/kWh
6.72	0.33	5.64	280.8	17.80	885.4
AIP					
Kraftstoffverbrauch ger.		Kraftstoffverbrauch ger.		CO2 gem.	
liter	liter/kWh	kg	g/kWh	kg	g/kWh
7.11	0.35	5.98	297.2	18.84	937.3
Abweichung AIP zu ECU					
Kraftstoffverbrauch			CO2		
abs [l/kWh]	rel [%]			abs [g/kWh]	rel [%]
-0.02	-5.86			-51.88	-5.86

Abbildung 4-38: Kraftstoffverbrauch Messung 03

Sowie bei den vorherigen Messungen liegt auch hier die ECU-Aufzeichnung unter dem Niveau der Messung des AIP Systems.

Phasentrennung

Die Phasentrennung erfolgt, wie auch bei den anderen Messungen bei einer Abgastemperatur vor SCR von 290 °C. Bei dieser Trennung sollte jedoch berücksichtigt werden, dass die „Warmphase“ eine Leerlaufphase beinhaltet, bei der die Temperatur unter das Grenzniveau sinkt. Hier wäre auch eine Einteilung in vier Phasen denkbar und sinnvoll. Aus Gründen der Einheitlichkeit wurde im Zuge dieser Arbeit jedoch keine weitere Phasen-Einteilung durchgeführt.

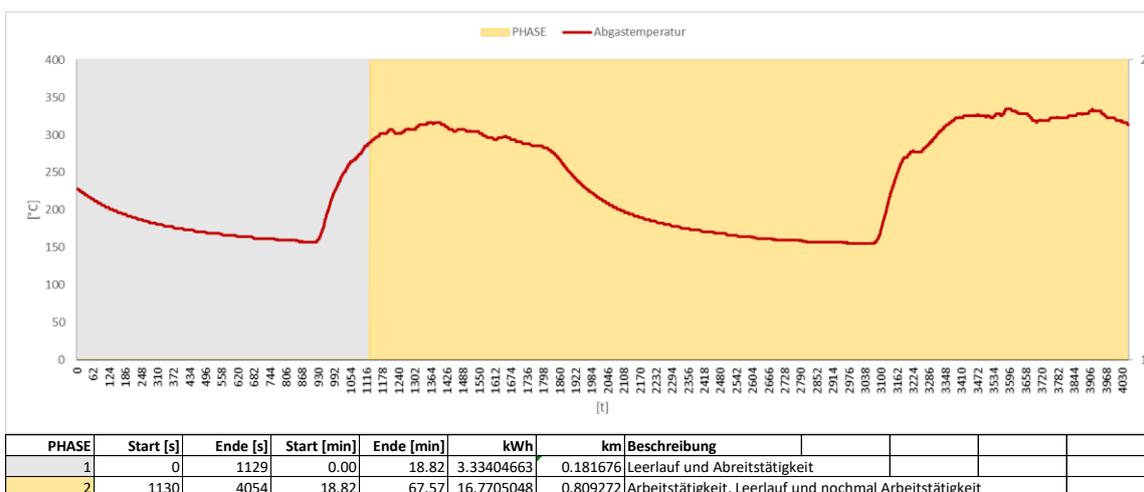


Abbildung 4-39: „Anlaufphase“ und „Warmphase“ Messung 03

4.4.6 Messergebnis Zyklus 04

Im Zuge dieser Messung wurde das Betriebsverhalten des Takeuchi Baggers bei hoher Last aufgezeichnet. Während der Messung übte der Bagger die Tätigkeit „schweres Graben“ aus.

Abgasmassenstrom

Die aufgezeichneten Abgasmassenströme der beiden Messsysteme werden in der folgenden Abbildung dargestellt.



Abbildung 4-40: Massenstromvergleich Messung 04

CO₂

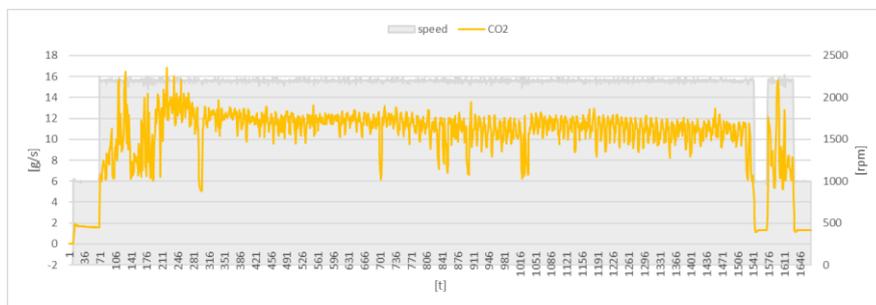


Abbildung 4-41: CO₂ mit Motordrehzahl

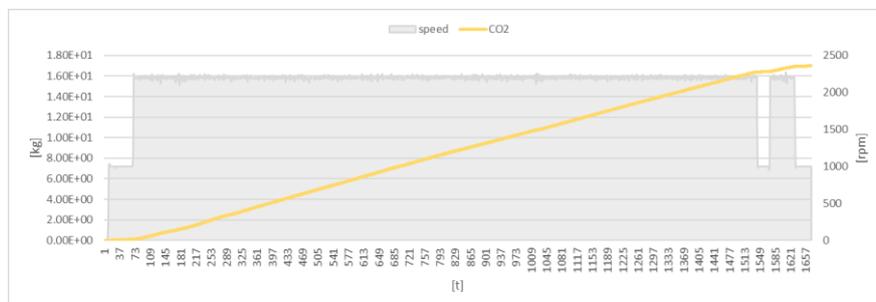
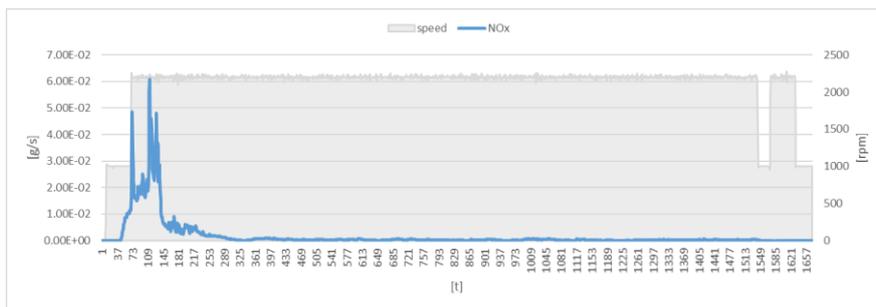
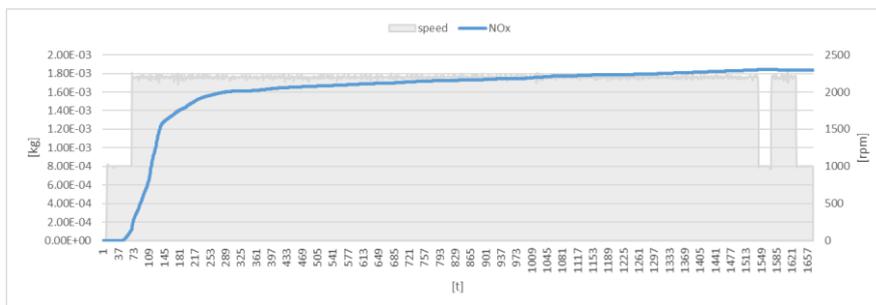


Abbildung 4-42: CO₂ kumuliert mit Motordrehzahl

Die obigen Abbildungen zeigen keine Auffälligkeiten im Zusammenhang mit den CO₂ Messsignalen.

NO_xAbbildung 4-43: NO_x mit MotordrehzahlAbbildung 4-44: NO_x kumuliert mit Motordrehzahl

Die längere Messpause zwischen dieser und der dritten Messung führte zu einem erheblichen Temperaturverlust. Die Stickoxidemissionen stiegen deshalb zu Beginn relativ stark an. Durch den Hochlastbetrieb erwärmte sich das Abgassystem sehr schnell, wodurch die „warme“ Phase mit niedrigem NO_x Ausstoß rasch erreicht wurde.

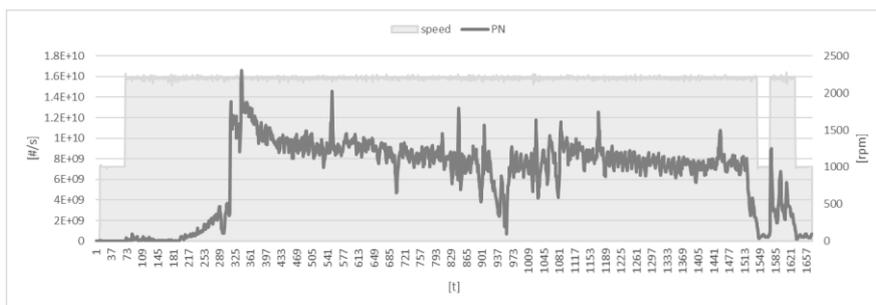
PN

Abbildung 4-45: PN mit Motordrehzahl

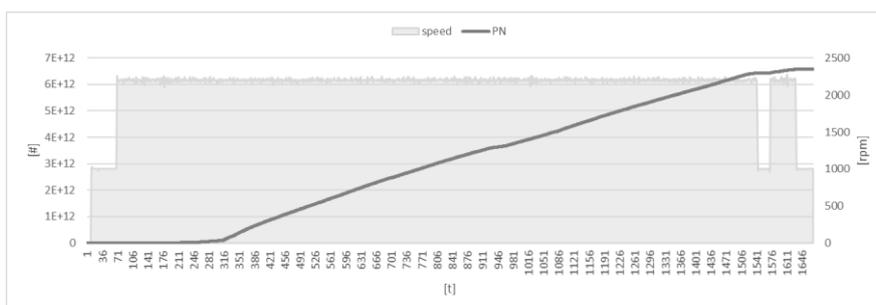


Abbildung 4-46: NOx kumuliert mit Motordrehzahl

Kraftstoffverbrauch

ECU					
Kraftstoffverbrauch gem.		Kraftstoffverbrauch gem.		CO2 ger.	
liter	liter/kWh	kg	g/kWh	kg	g/kWh
6.20	0.31	5.21	260.7	16.41	822.1
AIP					
Kraftstoffverbrauch ger.		Kraftstoffverbrauch ger.		CO2 gem.	
liter	liter/kWh	kg	g/kWh	kg	g/kWh
6.42	0.32	5.39	269.9	16.99	851.1
Abweichung AIP zu ECU					
Kraftstoffverbrauch			CO2		
abs [l/kWh]	rel [%]			abs [g/kWh]	rel [%]
-0.01	-3.53			-29.02	-3.53

Abbildung 4-47: Kraftstoffverbrauch Messung 04

Mit einer relativen Abweichung von rund 3,5 % rücken die beiden Messsysteme bei dieser Hochlastmessung näher zusammen als bei den Messungen zuvor.

Phasentrennung

Durch die längere Pause zwischen den Messungen lag die Starttemperatur vor SCR bei etwa 60 °C. Der rapide Temperaturanstieg, verursacht durch den Hochlastbetrieb, kann in der folgenden Abbildung beobachtet werden. Das Temperaturniveau liegt bei dieser Hochlast-Messung und auch bei der Fahrbetriebs-Messung höher im Vergleich zu den anderen Messungen.

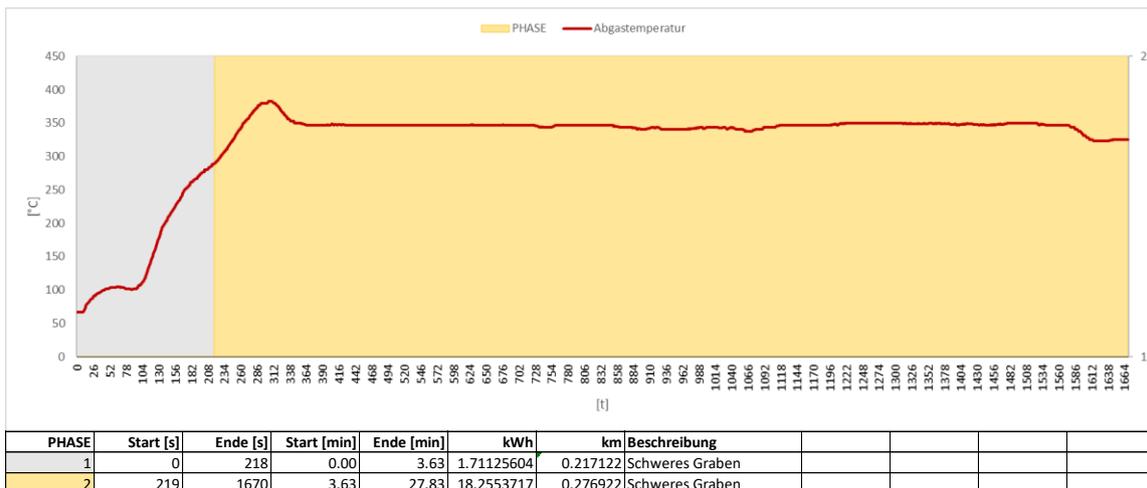


Abbildung 4-48: „Anlaufphase“ und „Warmphase“ Messung 04

4.4.7 Messergebnis Zyklus 05

Mit Hilfe dieser Messung wurde das innerbetriebliche Verhalten des Baggers während eines Fahrbetriebes aufgezeichnet.

Abgasmassenstrom

Der Vergleich zwischen den Abgasmassenströmen zeigt erneut einen deutlichen Niveau-Unterschied.



Abbildung 4-49: Massenstromvergleich Messung 05

CO₂

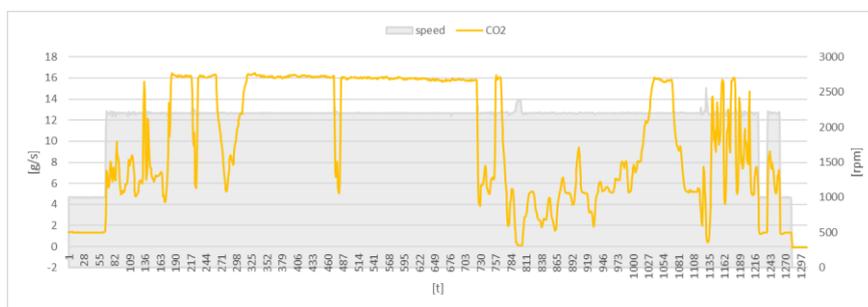


Abbildung 4-50: CO₂ mit Motordrehzahl

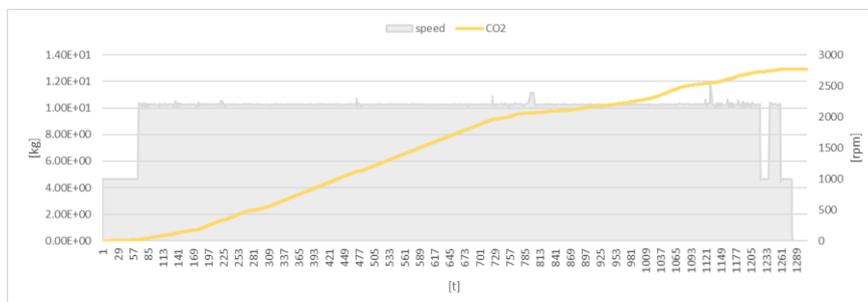
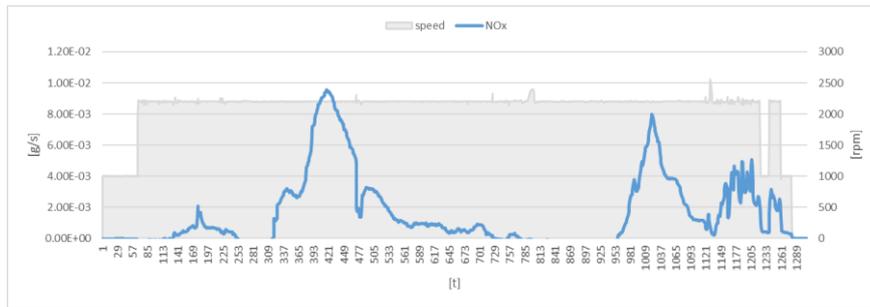
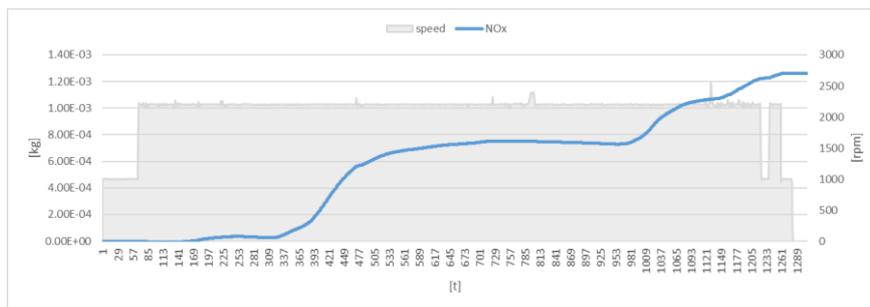


Abbildung 4-51: CO₂ kumuliert mit Motordrehzahl

Das stetige Wachstum der CO₂ Emissionsmasse deutet auf keine Messfehler bzw. Signalverluste hin.

NO_xAbbildung 4-52: NO_x mit MotordrehzahlAbbildung 4-53: NO_x kumuliert mit Motordrehzahl

Die, während dieser Messung, ausgestoßenen Stickoxide sind absolut betrachtet, im Vergleich zu den anderen Messungen sehr gering. Zwischenzeitlich negative Messsignale wurden manuell auf den Wert Null gesetzt. Obwohl die Last während dieser Messung ähnlich verläuft, verändern sich die NO_x-Emissionen relativ stark.

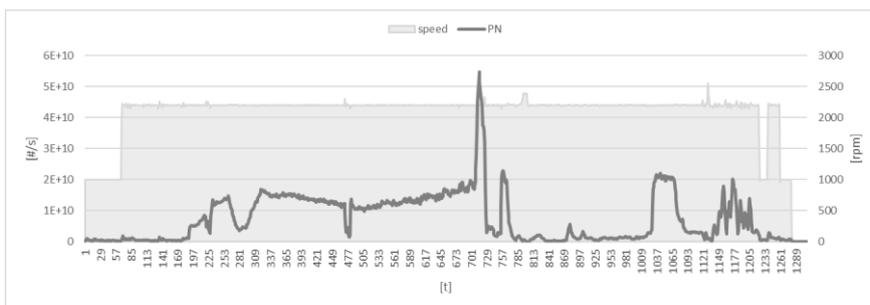
PN

Abbildung 4-54: PN mit Motordrehzahl

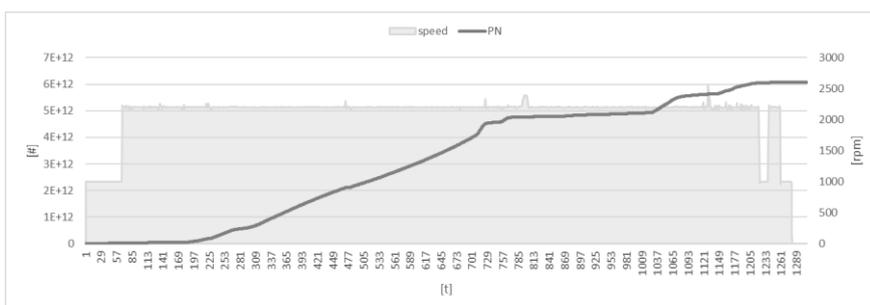


Abbildung 4-55: PN kumuliert mit Motordrehzahl

Auch bei dieser Messung können in Bezug auf die Partikelemission keine Messfehler oder Signalverluste erkannt werden.

Kraftstoffverbrauch

ECU					
Kraftstoffverbrauch gem.		Kraftstoffverbrauch gem.		CO2 ger.	
liter	liter/kWh	kg	g/kWh	kg	g/kWh
4.81	0.29	4.04	247.0	12.75	778.9
AIP					
Kraftstoffverbrauch ger.		Kraftstoffverbrauch ger.		CO2 gem.	
liter	liter/kWh	kg	g/kWh	kg	g/kWh
4.88	0.30	4.10	250.7	12.94	790.4
Abweichung AIP zu ECU					
Kraftstoffverbrauch			CO2		
abs [l/kWh]	rel [%]			abs [g/kWh]	rel [%]
0.00	-1.4811352			-11.5	-1.4811352

Abbildung 4-56: Kraftstoffverbrauch Messung 05

Die Kraftstoffverbräuche der beiden Systeme passen mit einer relativen Abweichung von rund 1.5% bei dieser Messung am besten zusammen.

Phasentrennung

Die Emissionsmessung während des Fahrbetriebes erfolgte direkt im Anschluss an die Hochlastmessung. Die gesamte Messung kann als warm und stabil betrachtet werden.

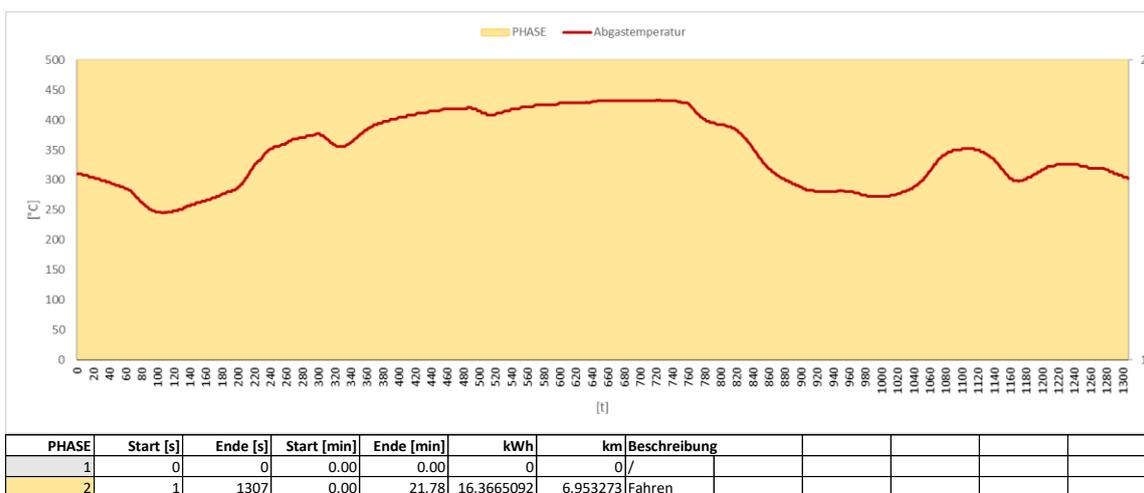


Abbildung 4-57: „Anlaufphase“ und „Warmphase“ Messung 05

4.4.8 Übersicht Messergebnisse

Für einen übersichtlichen Vergleich der einzelnen Messungen werden zunächst die Gesamt- und Phasenergebnisse in den folgenden drei Abbildungen dargestellt. Die Ergebnisse der Schadstoffkomponenten werden, wie bei „Off Road“ Maschinen üblich, in Gramm je Kilowattstunden angegeben. Sowie bei den Abgaskomponenten wird auch der Kraftstoffverbrauch auf jene Arbeit bezogen, die während einer Messung erbracht wurde. Neben den Schadstoffkomponenten und den Verbräuchen werden auch die jeweiligen Messdauern und die erbrachten Arbeiten dargestellt.

Gesamt-	CO ₂	CO	NO _x	NO	Verbrauch	PN	Arbeit	Dauer
	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[#/kWh]	[kWh]	[min]
Kaltstart + realerBetrieb	963.33	0.017	0.842	0.717	288.93	3.53E+12	19.2	51.8
realer Betrieb	944.23	0.001	0.448	0.258	286.30	1.8E+11	12.3	28.4
Leerlauf + realerBetrieb + Leerlauf + realerBetrieb	937.27	0.000	0.487	0.235	280.78	1.05E+11	20.1	67.6
schweres Graben	851.14	0.000	0.092	0.060	260.71	3.29E+11	20.0	27.8
Fahren	790.39	0.000	0.077	0.041	247.00	3.72E+11	16.4	21.8

Abbildung 4-58: Gesamtergebnisse

Bereits hier erkennt man einen deutlichen Größenunterschied bei den gemessenen Partikelanzahlen zwischen der Kaltstartmessung und den anderen Messungen. Auf diesen Unterschied wird im Laufe dieser Arbeit noch genauer eingegangen.

Die Ergebnisse der Phasentrennung werden in den beiden folgenden Abbildungen übersichtlich dargestellt. Messung 5 wurde sofort nach Beendigung von Messung 4 gestartet und somit gibt es bei dieser Messung keine Anlaufphase.

Anlaufphase	CO ₂	CO	NO _x	NO	Verbrauch	PN	Arbeit	Dauer
	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[#/kWh]	[kWh]	[min]
Kaltstart + realerBetrieb	1313.90	0.114	5.232	4.582	355.68	8.04E+12	2.8	20.9
realer Betrieb	965.02	0.004	1.930	1.706	292.74	4.77E+10	1.8	5.2
Leerlauf + realerBetrieb + Leerlauf + realerBetrieb	986.02	0.000	0.637	0.479	292.87	1.39E+10	3.3	18.8
schweres Graben	883.84	0.000	0.880	0.591	276.55	8.48E+09	1.7	3.6
Fahren	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]

Abbildung 4-59: Ergebnisse Anlaufphase

Warmphase	CO ₂	CO	NO _x	NO	Verbrauch	PN	Arbeit	Dauer
	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[#/kWh]	[kWh]	[min]
Kaltstart + realerBetrieb	903.12	0.000	0.088	0.053	277.46	2.75E+12	16.4	30.8
realer Betrieb	940.68	0.000	0.194	0.010	285.20	2.03E+11	10.5	23.2
Leerlauf + realerBetrieb + Leerlauf + realerBetrieb	927.58	0.000	0.457	0.187	278.38	1.24E+11	16.8	48.8
schweres Graben	848.07	0.000	0.018	0.010	259.23	3.6E+11	18.3	24.2
Fahren	790.39	0.000	0.077	0.041	247.00	3.72E+11	16.4	21.8

Abbildung 4-60: Ergebnisse Warmphase

Die Abweichungen der Gesamt- und Phasenergebnisse werden für die gemessenen Schadstoffkomponenten CO₂, CO und NO_x in den folgenden drei Abbildungen mit Hilfe von Balkendiagrammen visuell dargestellt.

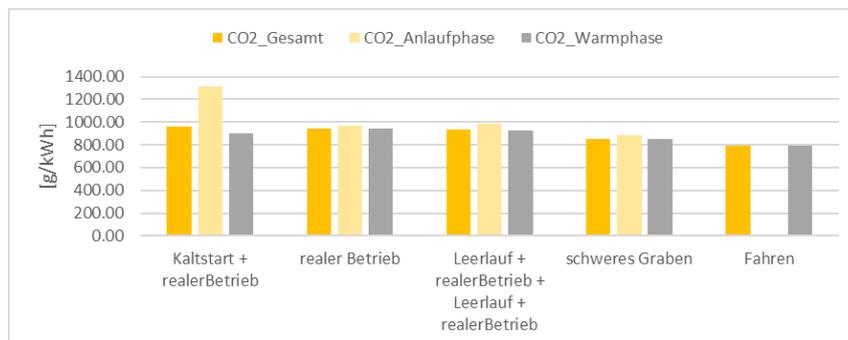


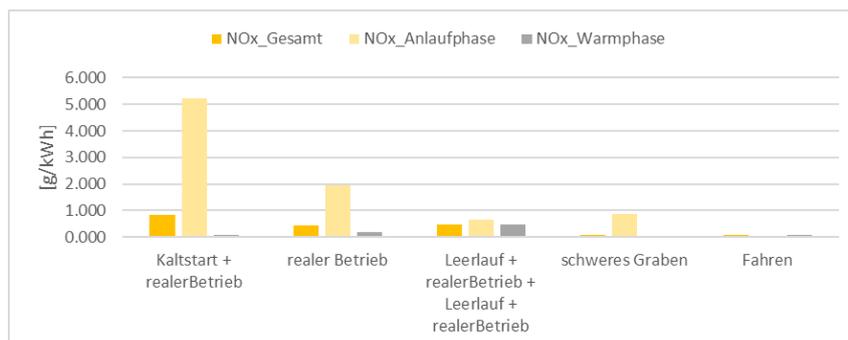
Abbildung 4-61: Vergleich CO₂

Der Vergleich zwischen den Kohlenstoffdioxid Ergebnissen zeigt, dass in den Anlaufphasen, referenziert auf die erbrachte Arbeit, mehr ausgestoßen wird als in den Warmphasen. Vor allem bei der Kaltstartmessung kann dieser Unterschied deutlich beobachtet werden. Mögliche Gründe dafür sind die höhere Reibung, die Kraftstoffkondensation an den Zylinderwänden und eine allgemein unsauberere Verbrennung während des Kaltstartes. Auch bei den anderen Messungen wird während der Anlaufphasen mehr CO₂ ausgestoßen als in den Warmphasen. Als Ursache dafür werden spezielle Heizstrategien, zur schnelleren Erhöhung der Temperaturen im Abgasstrang, vermutet. Die Relevanz der Anlaufphasen in Bezug auf den Kraftstoffverbrauch ist daher unumstritten.



Abbildung 4-62: Vergleich CO

Aus Abbildung 4-62 kann interpretiert werden, dass die Kohlenmonoxid Emissionen im verbauten DOC, ab Erreichung einer gewissen Temperatur, vollkommen umgesetzt werden. Nur in den Anlaufphasen der ersten beiden Messungen kann ein im Vergleich zum Grenzwert von 5 g/kWh geringer CO-Ausstoß gemessen werden. Diese Erkenntnis ist vor allem für die gesetzlich vorgeschriebene Ergebnisauswertung, welche in Kapitel 5 erläutert wird, von großer Bedeutung.

Abbildung 4-63: Vergleich NO_x

Bevor die Stickoxidemissionen effizient umgesetzt werden können, muss der SCR ausreichend erhitzt sein. In den Anlaufphasen, speziell im Kaltstart, sind daher deutlich höhere NO_x Emissionen erkennbar. Die Maschine hat zwar eine Abgasrückführung zur innermotorischen NO_x-Reduktion, jedoch reicht diese Methode wie hier ersichtlich nicht aus, um die NO_x-Emissionen auf das geforderte Niveau in Stufe V zu reduzieren. Nur sehr geringe Unterschiede bei den Ergebnissen der „Warmphasen“, mit Ausnahme der dritten Messung, deuten darauf hin, dass das Leistungsniveau bei betriebswarmer Abgasnachbehandlung nur wenig Einfluss auf den NO_x-Ausstoß hat. Die Niveau-Unterschiede zwischen Anlauf- und Warmphase nehmen mit jeder Messung fortlaufend ab. Aufgrund der 15 Minuten Leerlaufphase und der 35 Minuten Abstellphase kam es vor der zweiten Messung zu einer Abkühlung der ANB. Dadurch sind bei der zweiten Messung die Unterschiede bei den NO_x Emissionsergebnissen zwischen Anlaufphase und Warmphase deutlich zu erkennen. Bei der dritten Messung ist das Ergebnis der „Warmphase“ aufgrund der darin inkludierten Leerlaufphase etwas höher als die Warmphasen-Ergebnisse der anderen Messungen. Die gut zweistündige Abstellphase zwischen Messung 03 und 04 führte zu einem deutlichen Temperaturverlust in der ANB, wodurch die Emissionen in der Anlaufphase der vierten Messung wieder anstiegen. Während der Warmphase der vierten Messung und der gesamten fünften Messung wurden nur sehr geringe Mengen an Stickoxiden emittiert.

4.4.9 Auffälligkeiten

Die detaillierte Analyse der zykluspezifischen Messdaten zeigt deutliche Unterschiede bei den gemessenen Partikelanzahlen. Diese Unterschiede werden in der folgenden Abbildung noch einmal dargestellt. Hier ist vor allem das Zyklusergebnis der „Warmphase“, hier als „Phase 2“ bezeichnet, auffällig. Dieses liegt bei der ersten Messung um einen Faktor 10 höher als die „Phase 2“ Ergebnisse der anderen Messungen, obwohl die Maschine keine besonderen Auffälligkeiten wie z.B. eine Partikelfilterregeneration, zeigte.

	PN [#kWh]		
	Gesamt	Phase 1	Phase 2
Kaltstart+realerBetrieb	3.53E+12	8.04E+12	2.75E+12
realerBetrieb	1.80E+11	4.77E+10	2.03E+11
Leerlauf+realerBetrieb+Leerlauf+realerBetrieb	1.05E+11	1.39E+10	1.24E+11
schweres Graben	3.29E+11	8.48E+09	3.60E+11
Fahren	3.72E+11 [-]		3.72E+11

Abbildung 4-64: Messwerte Partikelanzahl

Nach Auskunft des Herstellers liegt die Ursache dieser Messunterschiede an einem Fehler im Messsystem. Der Differenzdrucksensor im CPC Analysator lieferte fehlerhafte Signale. Eine zu niedrige Verdünnung des Abgasmassenstromes war die Folge. Die Verdünnung kann mit Hilfe eines „Verdünnungsfaktors“ aufgezeigt werden. Informationen zur Ermittlung dieses Faktors blieben leider vorenthalten. Unterschreitet der Verdünnungsfaktor den Grenzwert von 0,2, so können Messfehler nicht ausgeschlossen werden, laut den Informationen von AIP.

Ausgehend von diesen Informationen wurden die Messdaten untersucht. In der Abbildung darunter werden die gemessenen „Roh“-Emissionen kombiniert mit dem entsprechenden Verdünnungsfaktor für die Kaltstartmessung dargestellt.

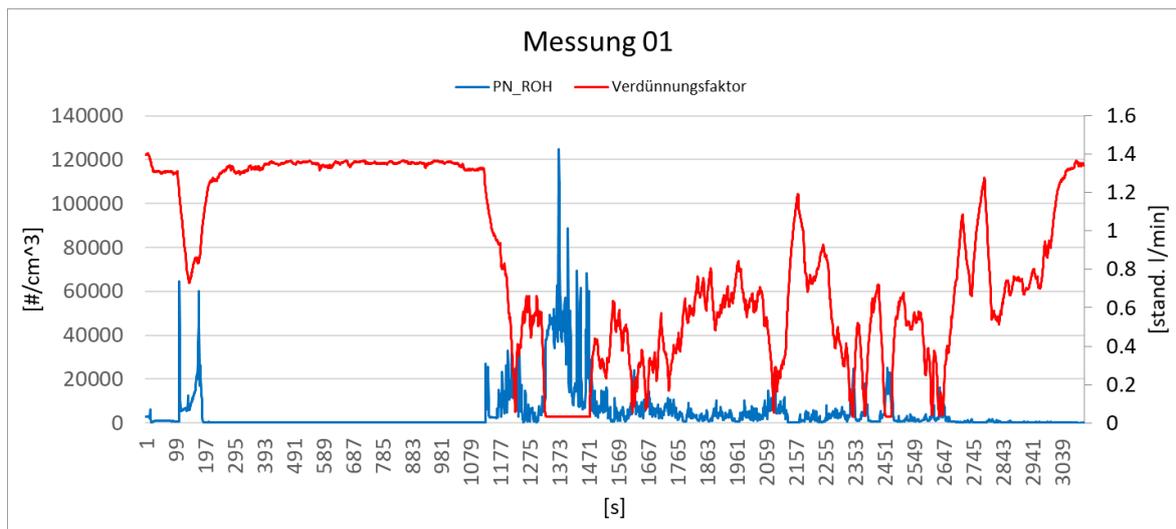


Abbildung 4-65: Verdünnungsfaktor mit Partikelanzahl

Sowie bei dieser Kaltstartmessung unterschreitet der Verdünnungsfaktor auch bei den anderen Messungen den Grenzwert von 0,2 häufig. Ein Fehler der Partikelergebnisse kann somit für keine der Messungen ausgeschlossen werden. Ein Vorschlag von AIP nur die Teile zu nehmen, bei denen der Verdünnungsfaktor größer als 0,2 ist, wurde nicht umgesetzt, da dieser Schritt wissenschaftlich nicht genau nachvollziehbar war, da AIP, wie bereits erwähnt, genauere Informationen bezüglich des Verdünnungsfaktors nicht teilte. Die Ergebnisse sind somit unbrauchbar. Dies muss im weiteren Verlauf dieser Arbeit leider zur Kenntnis genommen werden.

4.5 Erkenntnisse

Aufgrund der geringen Größe der Baumaschine war eine Messung mit dem AIP-System möglich und auch sinnvoll. Das deutlich größere „AVL MOVE“ konnte aufgrund dessen Größe und Gewicht nicht verwendet werden.

Die Messung im November zeigte, dass Wintertage für Messgeschehen dieser Art nicht optimal geeignet sind. Zeitaufwendige Auf- und Abbauarbeiten sprechen für eine Messung in den Monaten mit längeren Tageslichtanteilen.

Eine Einteilung in mehrere Messzyklen ist sinnvoll, da es unbedingt notwendig ist, die Aufzeichnungen zu überprüfen. Die auf einer Baustelle üblichen Erschütterungen können zu Signalverlusten oder Problemen mit der Messtechnik führen. Ob die Probleme bei der PN-Messung mit den Erschütterungen während der Messung in Zusammenhang stehen, kann nicht

ausgeschlossen werden. Dabei sollte natürlich auf die in der Gesetzgebung festgelegte maximale Anzahl von Teilzyklen geachtet werden. Aufgrund der großen Einsatzbreite von NRMM wäre eine gesetzliche Erhöhung der möglichen Teilzyklen sinnvoll.

Die Messergebnisse zeigen, dass das Emissionsverhalten des Baggers während der definierten Warmphasen auf einem geringen und zufriedenstellenden Niveau liegt. Kohlenmonoxid wird lediglich während des Kaltstarts und in den anfänglichen Anlaufphasen emittiert. Die detaillierte Analyse der NO_x Emissionen liefert die Erkenntnis, dass vor Allem der Kaltstart, die Anlaufphasen und die zwischenzeitlichen Leerlaufphasen emissionskritisch zu betrachten sind.

5 Auswertung nach ISM Verordnung

Die Auswertung der gesetzlich relevanten Emissionsergebnisse kann mit Hilfe eines Microsoft Excel Add-in Programmes erfolgen. Das Programm wird als EMROAD-Tool bezeichnet und wird von der europäischen Union zur Verfügung gestellt.

Für eine gültige Auswertung muss ein Gesamttest zusammengefügt werden, der verschiedene Anforderungen erfüllt. Diese wurden bereits in Kapitel 4.4 erläutert.

5.1 EMROAD

EMROAD wurde als Forschungswerkzeug entwickelt, das in erster Linie dazu dient, die Entwicklung von PEMS-Datenauswertungsmethoden für die Emissionsgesetzgebung zu unterstützen. [18]

Es erfüllt die in der Regulierung 2017/655 definierten gesetzlichen Anforderungen für die Auswertung der PEMS Messdaten.

Mit bereits vordefinierten Vorlagen können Messdaten einfach importiert werden. Dabei muss auf das benötigte Format der importierten Messdaten und auf deren Einheiten geachtet werden. Zudem müssen noch einige Maschinen- und Testspezifische Daten eingetragen werden, bevor die Berechnung erfolgen kann.

Der hinterlegte Berechnungsalgorithmus basiert auf dem Prinzip der Einteilung in Betriebsereignisse und Nicht-Betriebsereignisse. Nur Betriebsereignisse fließen in die Berechnung der Emissionsergebnisse mit ein. Die Kriterien bei der Definition von Betriebs- oder Nicht-Betriebsereignissen werden in Kapitel 5.1.1 veranschaulicht.

Die Berechnung der Emissionsmassen gasförmiger Schadstoffe beruht auf der Methode „Moving Average Windows“. Diese wird im deutschsprachigen Kontext auch als „Mittlungsfenster“-Methode bezeichnet. In Kapitel 5.1.2 wird die Methode erklärt.

5.1.1 Definition von Nicht-Betriebsereignissen

Nicht-Betriebsereignisse sind Ereignisse oder Phasen, ... [5]

- ... bei denen die Motorleistung unter 10% der maximalen Nutzleistung des Motors liegt.
- ... die während des kalten Motorzustandes aufgezeichnet werden. Der kalte Zustand liegt vor, bis die Kühlmitteltemperatur erstmals 70°C erreicht hat oder bis nach dem Zeitpunkt, wo sich die Kühlmitteltemperatur in einem Toleranzbereich von +/- 2 °C stabil über einen Zeitraum von fünf Minuten verhält. Es tritt jenes Kriterium in Kraft,

welches zuerst erreicht wird. Allenfalls endet die Kaltstartphase maximal 20 Minuten nach Motorstart.

Außerdem werden die aus der obigen Definition erhaltenen Betriebsereignisse als Nicht-Betriebsereignisse bezeichnet, wenn... [5]

- ... die Betriebsereignisse kürzer als zwei Minuten andauern und von Nicht-Betriebsereignissen, die länger als zwei Minuten sind, umgeben sind.
- ... eine Anlaufphase nach einem längeren Nicht-Betriebsereignis (>10 Minuten) vorherrscht. Der Beginn des Betriebsereignisses wird bis zum Erreichen einer Abgastemperatur von 523 K oder bis zu einer maximalen Dauer von vier Minuten als Nicht-Betriebsereignis gewertet.

Nicht-Betriebsereignisse können hingegen als Betriebsereignisse definiert werden, wenn... [5]

- ...diese nicht länger als zwei Minuten andauern. Die Nicht-Betriebsereignisse werden dann mit den umgebenden Betriebsereignissen zusammengeführt.
- ... diese in einem Zeitraum von zwei Minuten nach einem Betriebsereignis stattfinden. Damit wird die Auslaufphase in die Betrachtung miteinbezogen.

5.1.2 „Mittelungsfenster“-Methode

Die Berechnung der Emissionsmassen gasförmiger Schadstoffkomponenten erfolgt mit Hilfe der „Mittelungsfenster“-Methode. Dabei entspricht die Arbeit oder die CO₂ Masse eines Mittelungsfensters genau der Arbeit oder der CO₂ Masse der NRTC Referenzmessung. [5]

Abhängig von der Datenerfassungsdauer werden laufend neue Mittelungsfenster gebildet. Bei einer Frequenz von 1 Hz wird zum Beispiel jede Sekunde ein neues Mittelungsfenster gestartet. Für jedes Mittelungsfenster werden die Schadstoffemissionen durch Integration bestimmt. Die Datenerfassungsdauer entspricht eine Sekunde oder weniger. [5]

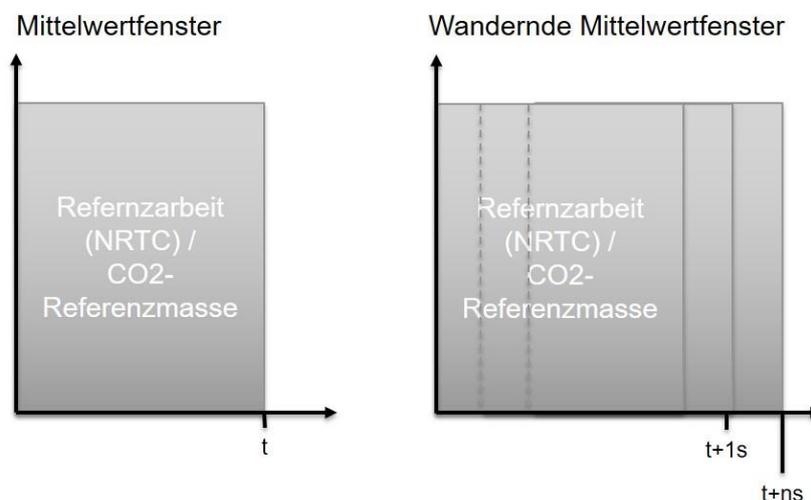


Abbildung 5-1: „Mittelungsfenster“-Methode

Die Mittelungsfenster-Methode kann auf zwei verschiedene Arten erfolgen und beide Varianten müssen vorgelegt werden. Dazu gehört einerseits die Variante auf Basis der Zyklusarbeit und andererseits die Variante auf Basis der CO₂ Masse. Im Zuge dieser Arbeit wird lediglich die Variante auf Basis der Zyklusarbeit angewendet, da die Ergebnisse der Auswertung lediglich zum Zweck der Forschung verwendet werden. [5]

Bei der Variante auf Basis der CO₂ Masse gilt ein Mittelungsfenster als gültig, wenn dessen Dauer die Maximaldauer nicht überschreitet. Die Maximaldauer berechnet sich wie folgt. [5]

$$D_{max} = 3600 \times \frac{W_{Ref}}{0.2 \times P_{max}}$$

Bei der Variante auf Basis der Zyklusarbeit sind jene Mittelungsfenster gültig, deren Leistungsdurchschnitt über 20 % der maximalen Motorleistung liegen. [5]

In beiden Fällen gilt die Auswertung nur dann als legitim, wenn die Anzahl der gültigen Mittelungsfenster größer oder gleich der Anzahl der ungültigen Fenster ist. [5]

5.2 Prüfergebnisse

Die gesetzlich geregelte ISM Prüfung von NRMM erfordert die Bereitstellung folgender Prüfungsergebnisse. [5]

- Gemessene Momentan-Konzentration
- Durchschnittliche Emissionskonzentration der gesamten Überwachungsprüfung
- Errechnete Momentan-Emissionsmasse
- Integrierte Emissionsmasse der gesamten Überwachungsprüfung
- Verteilung der Übereinstimmungsfaktoren der gültigen Fenster (Maximum, Minimum und kumulatives 90. Perzentil)
- Verteilung der Übereinstimmungsfaktoren aller Fenster (Maximum, Minimum und kumulatives 90. Perzentil)

Die Berechnung der Übereinstimmungsfaktoren, im englischsprachigen Kontext auch als „Conformity Factors“ bezeichnet, wird nun genauer erläutert. Diese Faktoren geben an, wie sich die betrachtete Komponente gegenüber ihrem entsprechenden Limit verhält.

Für den Fall der Variante auf Basis der Zyklusarbeit können die Übereinstimmungsfaktoren pro Fenster (CF_Z) wie folgt berechnet werden.

$$CF_Z = \frac{e_{gas}}{L} \quad 7$$

$$e_{gas} = \frac{m}{W} \quad 8$$

Mit:

CF_Z	-	Übereinstimmungsfaktor Variante-Zyklusarbeit
e_{gas}	g/kWh	Bremsspezifische Emissionsmasse
W	kWh	Motorarbeit des Mittelungsfensters
m	mg	Emissionsmasse des Mittelungsfensters
L	g/kWh	Grenzwert im „NRTC“

Im Fall der Variante auf Basis der CO₂ Masse lautet die Berechnung der Übereinstimmungsfaktoren je Fenster (CF_{CO_2}) hingegen:

$$CF_{CO_2} = \frac{CF_I}{CF_C} \quad 9$$

$$CF_I = \frac{m}{m_{CO_2}} \quad 10$$

$$CF_C = \frac{m_L}{m_{CO_2,Ref}} \quad 11$$

Mit:

CF_{CO_2}	-	Übereinstimmungsfaktor Variante-CO ₂ Masse
CF_I	-	Verhältnis im Betrieb
CF_C	-	Verhältnis der Zertifizierung
m_{CO_2}	kg	CO ₂ Masse des Mittelungsfensters
$m_{CO_2,Ref}$	kg	Referenzmasse CO ₂ „NRTC“
m_L	mg	Grenzwert im „NRTC“

5.3 Vorgehensweise bei der Auswertung

In diesem Kapitel werden die notwendigen Tätigkeitsschritte beschrieben, die im Zuge der Datenauswertung mittels EMROAD zu erledigen sind.

Der Algorithmus zur Betriebsereigniseinteilung wurde auch manuell umgesetzt und überprüft. Auch darauf wird im weiteren noch genauer eingegangen.

5.3.1 Zusammenführung der Einzelmessungen und zu beachtende Kriterien

Zunächst wurden alle Messaufzeichnungen in einem geeigneten Format zu einem Gesamttest zusammengefügt. Obwohl für gültige Ergebnisse nur maximal drei einzelne Aufzeichnungen verwendet werden dürfen, wurden zum Zweck der Vollständigkeit alle fünf Zyklen chronologisch aneinandergereiht. Der erstellte Gesamtzyklus deckt somit einen großen betrieblichen Tätigkeitsbereich des Baggers ab.

Auch die Leerlauf- und „Motor Aus“-Phasen zwischen den Messungen wurden berücksichtigt. In Abbildung 5-2 wird der zusammengereihte Gesamttest abgebildet. Dabei wird die prozentuale Motorleistung über der Zeit in Sekunden aufgetragen.

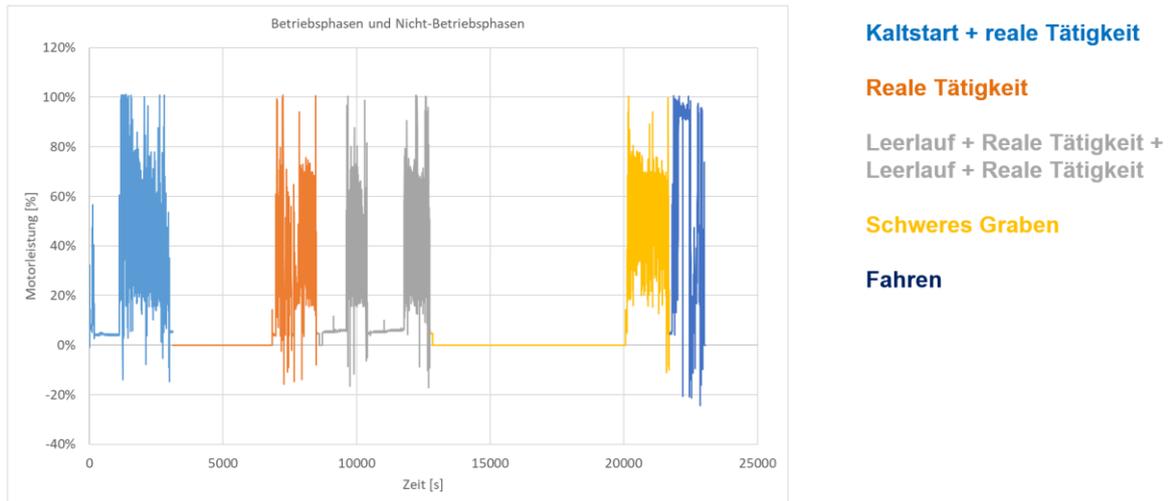


Abbildung 5-2: Gesamttest

Die fünf Zyklen sind in der Abbildung farblich getrennt dargestellt. Dieser Gesamttest kann nun direkt als Input im EMROAD-Tool vorgegeben werden. Das Ausfiltern der Nicht-Betriebsphasen erfolgt dort automatisch. Zudem wurde wie bereits erwähnt eine manuelle Filterung durchgeführt.

Die Ergebnisse der manuellen und automatischen Filterung werden im folgenden Kapitel veranschaulicht.

5.3.2 Einteilung in Nicht-Betriebsereignis und Betriebsereignis

Der im EMROAD-Tool realisierte Algorithmus zur Betriebsereignis-Einteilung kam zu dem, in Abbildung 5-3 dargestellten Ergebnis.

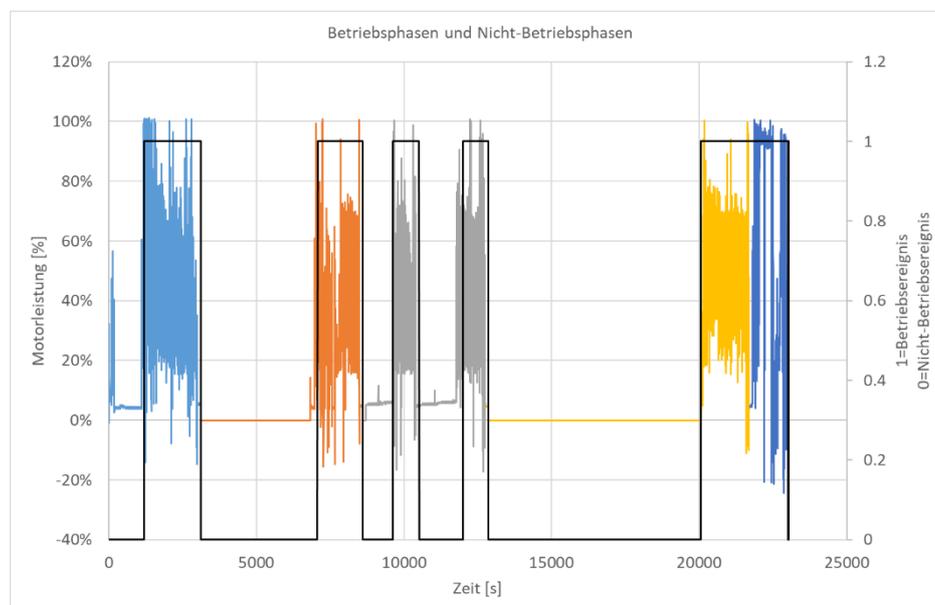


Abbildung 5-3: EMROAD Betriebsereigniseinteilung

Der Verlauf der schwarzen Linie zeigt ob und wie lange ein Betriebsereignis vorliegt. Liegt der Wert auf 1 dann handelt es sich um ein Betriebsereignis, während der Wert 0 auf ein Nicht-

Betriebsereignis hinweist. Es ist gut zu erkennen, dass der erste Teil, der Kaltstartteil als Nichtbetriebsereignis gewertet wird. Zudem wird beim zweiten Teil der grauen Messung die Anlaufphase ebenfalls weggeschnitten, da das vorherige Nicht-Betriebsereignis länger als 10 Minuten dauerte. Diese Anlaufphase wurde aber nicht bei allen Zyklen richtig erkannt.

Die manuelle Einteilung führt auf ein leicht abweichendes Ergebnis. Dies betrifft speziell die Anlaufphasen nach längeren Nichtbetriebsereignissen. Dieses wird in der nächsten Abbildung dargestellt.

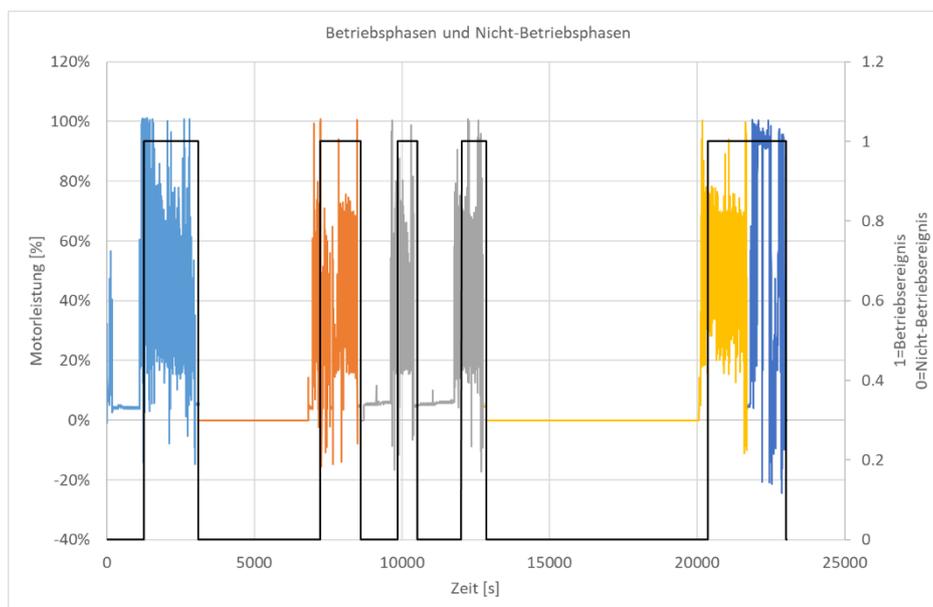


Abbildung 5-4: Manuelle Betriebsereigniseinteilung

Im folgenden Kapitel werden die Unterschiede anhand eines direkten Vergleiches noch deutlicher dargestellt.

5.3.3 Unterschiede bei Betriebsereigniseinteilung zwischen Manuell und EMROAD

Durch das Übereinanderlegen der Verläufe der EMROAD Einteilung und der manuellen Einteilung können die Unterschiede deutlich erkannt werden. Die schwarze Linie stellt die EMROAD Einteilung dar und die rosarote Linie zeigt den Verlauf der manuellen Einteilung.

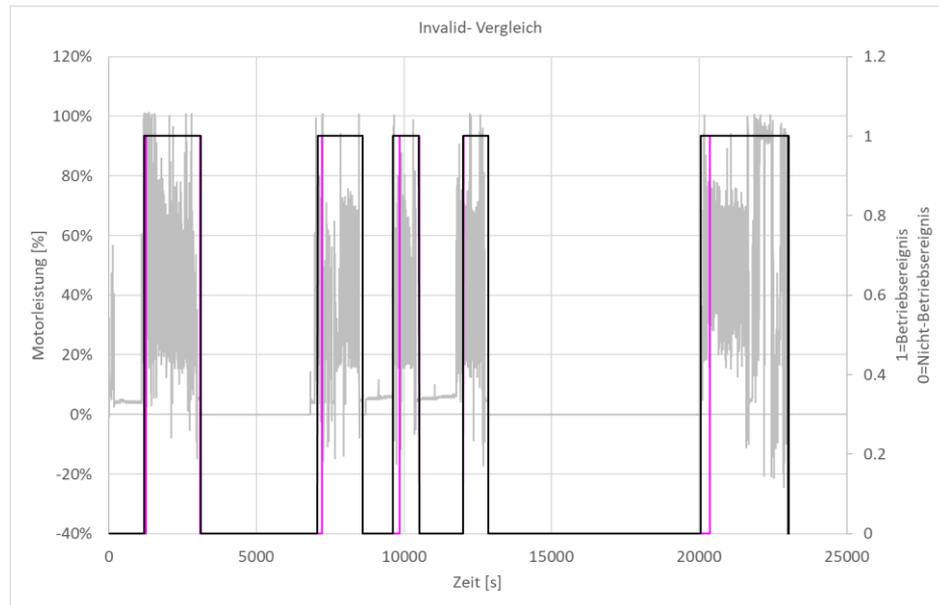


Abbildung 5-5: EMROAD und manuelle Einteilung

Die Einteilung mittels EMROAD (schwarze Linie) führt, wie oben abgebildet auf ein falsches Ergebnis. Die Anlaufphasen werden nicht korrekt berücksichtigt. Die Ursache konnte im Zuge dieser Arbeit leider nicht geklärt werden.

Nichtsdestotrotz wurden auf Basis beider Varianten Ergebnisse berechnet. Die Ergebnisse und deren Unterschiede werden in Kapitel 5.4 dargestellt.

5.3.4 Gesamtzyklus aus manueller Betriebsereigniseinteilung

In diesem Kapitel wird der manuell erstellte Gesamtzyklus visuell dargestellt. Abbildung 5-6 zeigt den Gesamtzyklus, der nun lediglich Betriebsereignisse enthält. Alle Nichtbetriebsereignisse wurden entfernt.

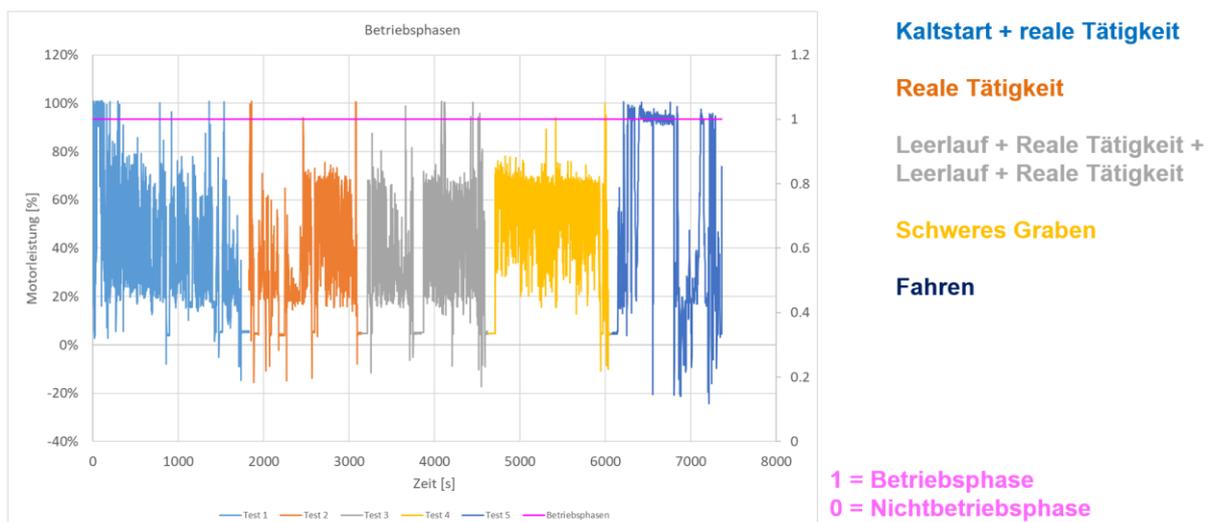


Abbildung 5-6: Manuell erstellter Gesamtzyklus mit ausschließlich Betriebsereignissen

Mit einer Länge von knapp 7500 Sekunden und einer erbrachten Arbeit von 72.30 Kilowattstunden erfüllt dieser Gesamtzyklus, mit Ausnahme der überschreitenden Zyklusanzahl, die gesetzlichen Anforderungen.

5.4 Ergebnisse und Analysen

Der Gesamttest wurde wie bereits erwähnt für beide Einteilungsvarianten ausgewertet. Die Ergebnisse und deren Unterschiede werden in Kapitel 5.4.1 aufgezeigt.

Zusätzlich wurde auch für die dritte Messung eine Auswertung durchgeführt und Ergebnisse berechnet, da diese Messung aufgrund des hohen Leerlaufanteiles besonders interessant ist. Darauf wird in Kapitel 5.4.2 näher eingegangen.

5.4.1 Ergebnisse der Gesamttest Auswertung

Die folgende Tabelle zeigt die Gesamtergebnisse für die Betriebsereignisse im gesamten Test. Dabei werden aber noch keine Mittelungsfenster gebildet, sondern kumulierte Werte dargestellt. Die Daten beider Betriebsphaseneinteilungsvarianten sind darin enthalten. Die Abkürzung „BSFC“ bedeutet „Brake Specific Fuel Consumption“. Dieser Wert stellt den Kraftstoffverbrauch bezogen auf die vollbrachte Arbeit dar. Die Emissionen werden in gleicher Form dargestellt.

		EMROAD	EMROAD
BRAKE SPECIFIC EMISSIONS		manuelle NBP-Einteilung	EMROAD NBP-Einteilung
Work	kWh	72.30	79.63
BSFC	g/kWh	272.01	272.78
Average Power	kW	35.36	35.24
Average Power	%	41.60	41.46
Average Engine Speed	rpm	2044.75	2044.47
Average Torque	N.m	156.10	155.66
CO	g/kWh	0.00000	0.00002
CO2	g/kWh	872.53	874.91
NOx	g/kWh	0.164	0.226
NOx Corrected	g/kWh	0.16	0.23
NO2	g/kWh	0.13	0.13

Abbildung 5-7: Ergebnisse Gesamttest Auswertung

Mit Hilfe der manuellen Einteilung erhält man eine integrierte Zyklusarbeit von 72.30 Kilowattstunden. Diese liegt deutlich unter der Arbeit, die man durch Anwendung der EMROAD Einteilung erhält. Die absolute Abweichung von 7.33 Kilowattstunden kann mit dem falschen Berücksichtigen der Anlaufphasen begründet werden. Dies hat Einfluss auf alle Komponenten, aber vor allem auf NO_x, da in den Anlaufphasen die Konvertierung im SCR-Katalysator aufgrund des geringeren Temperaturniveaus noch auf geringerem Niveau ist.

Neben den kumulierten Ergebnissen über den gesamten Testzählen auch die Übereinstimmungsfaktoren, die auf Basis des 90 Perzentils der gültigen Mittelungsfenster berechnet werden, zu den wichtigsten Prüfungsergebnissen.

Die Übereinstimmungsfaktoren aller gültigen Fenster wird mittels Abbildung 5-8 aufgezeigt. Da die Kohlenwasserstoffemissionen mit dem Messgerät von AIP nicht aufgezeichnet wurden, sind in der Tabelle lediglich die Ergebnisse der Schadstoffkomponenten NO_x und CO zu finden.

Die vier unterschiedlichen Ergebnisse pro Abgaskomponente stellen den Durchschnittswert, den Maximalwert, den Minimalwert und das „90. Perzentil“ aller gültigen Fenster dar.

Übereinstimmungsfaktoren zeigen, wie hoch die Emissionsergebnisse im Vergleich zum gültigen Emissionsgrenzwert der jeweiligen Komponente liegen und besitzen daher keine Einheit. Die Berechnung der Übereinstimmungsfaktoren wurde bereits im Kapitel 5.2 mit den Formeln 7 – 11 dargestellt.

Wird anstelle des tatsächlichen Emissionsgrenzwerts der Grenzwert mit 1 g/kWh parametrisiert, dann werden keine Verhältniswerte, sondern die Emissionsergebnisse in Gramm je Kilowattstunde ausgegeben. Diese Methode wurde hier angewendet.

		EMROAD
Percentil- Ergebnisse		manuelle NBP-Einteilung
Hot_CO_AVG	-	0.000000
Hot_CO_MIN	-	0.000000
Hot_CO_MAX	-	0.000000
Hot_CO_90% CUMULATIVE PERCENTILE	-	0.000000
Hot_NOx_AVG	-	0.205195
Hot_NOx_MIN	-	0.017456
Hot_NOx_MAX	-	0.436137
Hot_NOx_90% CUMULATIVE PERCENTILE	-	0.386451

Abbildung 5-8: Übereinstimmungsfaktoren Gesamttest

Kohlenmonoxid wurde ausschließlich in den Anlaufphasen der ersten beiden Messungen ausgestoßen. Durch das Filtern der Nichtbetriebsereignisse fällt dieser CO Ausstoß aus der Betrachtung. Die Ergebnisse der CO Fenster liegen daher alle auf dem Wert 0. Der Unterschied zwischen dem größten NOx-Fenster und dem kleinsten NOx-Fenster ist sehr groß. Der Wert des maximalen Fensters liegt mit 0.436 g/kWh über dem Grenzwert von 0.4 g/kWh. Ausschlaggebend für die Bewertung ist jedoch das 90. Perzentil Fenster. Mit einem Wert von 0.386 g/kWh liegt es knapp unter dem gesetzlichen Grenzwert.

Das 90. Perzentil entspricht dem Ergebniswert eines speziell gewählten Fensters. Aus allen gültigen Fenstern wird jenes gewählt, welches bezogen auf den Ergebniswert, 90 % kleinere Fenster und 10 % größere Fenster aufweist. Die Wahl des 90. Perzentil Fensters geschieht mittels EMROAD automatisch. In Abbildung 4-9 wird das 90. Perzentil Fenster für die Emissionskomponente NO_x mit Hilfe des grünen Pfeiles dargestellt. Die blaue Linie stellt alle, nach Größe aneinandergereihten Ergebniswerte der gültigen Fenster dar.

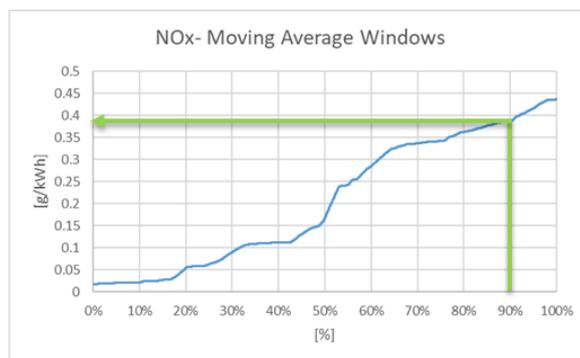


Abbildung 5-9: 90. Perzentil

Im Folgenden werden die Ergebnisse der 90. Perzentile für CO und NO_x mit den Durchschnittswerten des Gesamtzyklus verglichen. Damit soll untersucht werden, wo denn die Ergebnisse des 90. Perzentils im Vergleich zu der Zyklusdurchschnittswerte liegen. Die Durchschnittswerte wurden zum einen mit Hilfe aller Daten, also inklusive Nicht-Betriebsereignissen und zum anderen mit den gefilterten Daten, ohne Nicht-Betriebsereignisse berechnet. In der Abbildung darunter werden die genannte Größen dargestellt.

	EMROAD 90- Perzentil g/kWh	Durchschnittswerte Betriebsphasen g/kWh	Durchschnittswerte inkl. Betriebs- und Nichtbetriebsphasen g/kWh
CO	0.000	0.000	0.004
NOx	0.386	0.164	0.393

Abbildung 5-10: Vergleich „90. Perzentil“ mit Durchschnittswerten

Wie bereits gezeigt liegen die 90. Perzentile unter den Grenzwerten, aber interessant ist auch, dass die Durchschnittswerte über die Betriebsphasen und auch die Durchschnittswerte über den gesamten Test, also inkl. Nichtbetriebsphasen unter den jeweiligen Grenzwerten liegen. Die Grenzwerte können in Abbildung 3-3 nachgeschlagen werden. In Abbildung 5-11 werden die Unterschiede mit Hilfe von Balkendiagrammen visuell verdeutlicht.

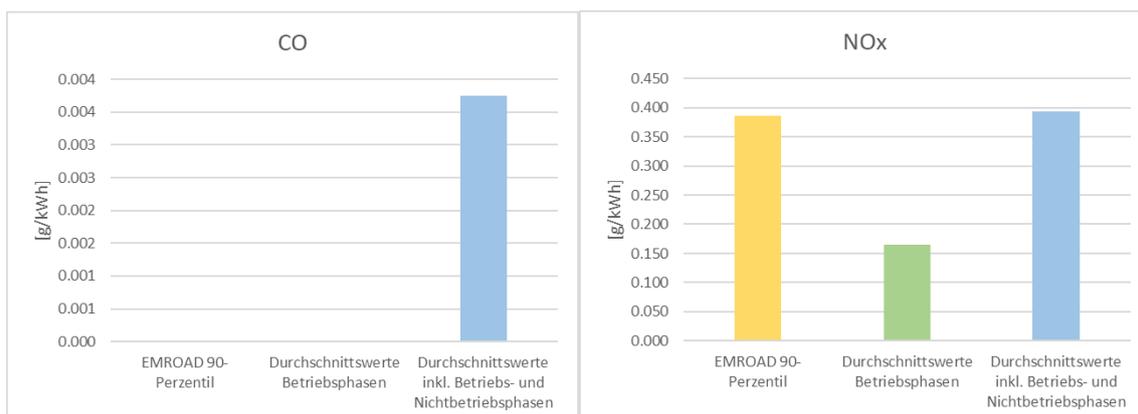


Abbildung 5-11: Darstellung „90 Perzentil“ zu Durchschnittswerten

Das NO_x Balkendiagramm zeigt, dass zwischen dem grünen und dem blauen Balken ein deutlicher Unterschied vorliegt. Dieser Unterschied spiegelt den Einfluss der ausgeschnittenen Nicht-Betriebsereignisse wider.

Obwohl lediglich Betriebsereignisse in die Berechnung einfließen, liegt der Wert des 90. Perzentiles knapp unter dem blauen Durchschnittswert auf einem ähnlichen Niveau. Diese Ergebnisse machen den Eindruck, dass zumindest für NO_x durch die Anwendung des 90. Perzentils das endgültige Ergebnis auf dem Niveau des Gesamttests inkl. Nichtbetriebsereignisse ist. Dies ist in diesem Fall aber zufällig durch die Zusammensetzung des Testzyklus. Die statistische Methode des 90. Perzentils kann keine physikalischen Zusammenhänge abbilden.

Im CO-Balkendiagramm verschwindet der Balken durch das Ausschneiden der Nicht-Betriebsereignisse vollständig, da er den Wert 0 annimmt. Hier sieht man auch, dass das 90. Perzentil und der Gesamtzyklus inkl. Nichtbetriebsphasen keinen Zusammenhang haben.

5.4.2 Ergebnis Auswertung Messung 03

Der aus Leerläufen und Betriebstätigkeiten bestehende Einzelzyklus wurde einzeln mit dem EMROAD-Tool ausgewertet. Auch hier erfolgte eine manuelle Einteilung in Betriebsereignisse und Nicht-Betriebsereignisse. Die Auswertung dieses Zyklus erfüllt zwar nicht die Anforderungen bezüglich der Mindestprüfdauer, zeigt aber anschaulich den Einfluss der weggeschnittenen Leerlaufphasen.

In Abbildung 5-12 wird der Zyklus 03 dargestellt. Wie im Kapitel davor wird auch hier die Einteilung in Betriebsereignis und Nicht-Betriebsereignis mit Hilfe der schwarzen Linie gezeigt.

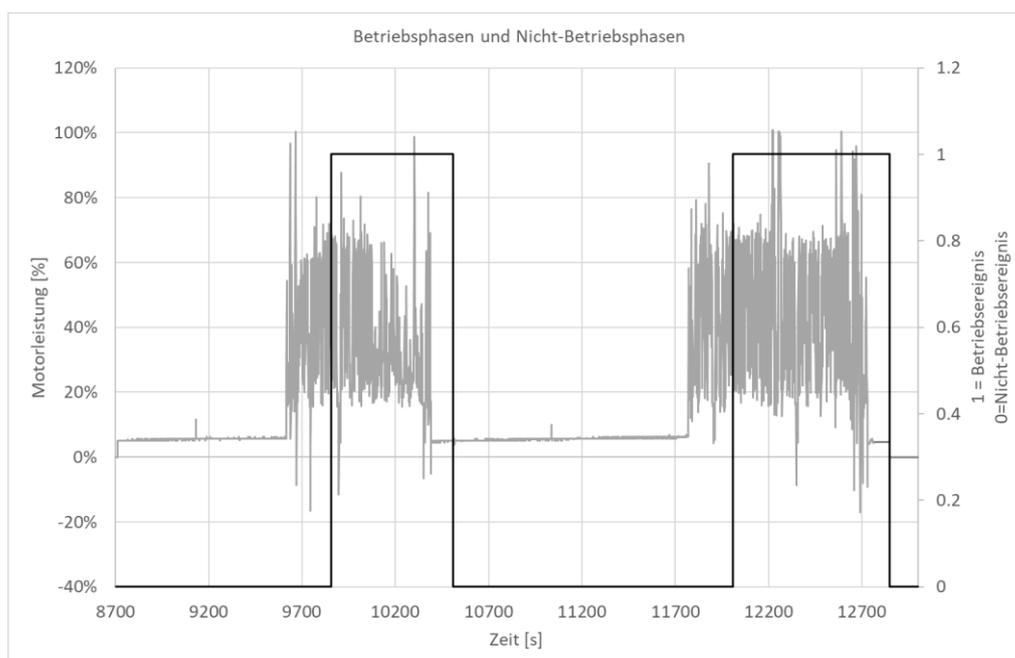


Abbildung 5-12: Messung 03 Betriebsereignis Einteilung

Bereits in dieser Abbildung lässt sich erkennen, dass mehr als die Hälfte der Messung weggeschnitten wird und somit nicht in das Gesamtergebnis mit einfließt.

Die Ergebnisse der Auswertung werden in den folgenden Abbildungen nun dargestellt.

		EMROAD
BRAKE SPECIFIC EMISSIONS		manuelle NBP-Einteilung
Work	kWh	12.56
BSFC	g/kWh	286.07
Average Power	kW	30.33
Average Power	%	35.69
Average Engine Speed	rpm	1987.41
Average Torque	N.m	135.30
THC	g/kWh	0.00
CO	g/kWh	0.00
CO2	g/kWh	917.86
NOx	g/kWh	0.38
NOx Corrected	g/kWh	0.38

Abbildung 5-13: Ergebnis-Auswertung Messung 03

Die integrierte Zyklusarbeit über den gefilterten Zyklus beträgt 12.56 Kilowattstunden. Der Wert für den Kraftstoffverbrauch liegt, sowie auch die Emissionsfaktoren für CO₂ und NO_x über dem Niveau der Werte des Gesamttests. Dies kann zum einen auf das niedrigere Leistungsniveau und zum anderen auf mögliche spezielle Heizstrategien, die besonders bei diesen Phasen nach längerem Leerlauf aktiv sind, begründet werden.

Obwohl die Messdaten der Leerlaufphasen nicht in den Ergebnissen berücksichtigt werden, haben diese dennoch einen erheblichen Einfluss auf das NO_x Ergebnis. Während einer Leerlaufphase werden die im SCR gespeicherten NH₃ Reserven verbraucht um den NO_x Ausstoß entgegenzuwirken. Dies geschieht während eines gewissen Zeitraumes sehr gut, doch dauert die Leerlaufphase länger an, dann wird das gespeicherte NH₃ verringert und damit sinkt auch die Konvertierung. Ohne NH₃ kann kein NO_x-Umsatz erfolgen und der Ausstoß steigt. Nach dem Ende einer Leerlaufphase dauert es einige Zeit bis die Abgastemperatur hoch genug (mindestens 200 °C) ist, damit aus dem eingespritzten AdBlue wieder NH₃ erzeugt werden kann und dieses somit zur NO_x-Konvertierung verwendet werden kann. [1]

Die Übereinstimmungsfaktoren aller gültigen Fenster des Einzelzyklus werden mittels Abbildung 5-14 dargestellt. Erneut sind in der Tabelle lediglich die Ergebnisse der Schadstoffkomponenten NO_x und CO als g/kWh Werte zu finden.

		EMROAD
Percentil- Ergebnisse		manuelle NBP-Einteilung
Hot_CO_AVG	-	0.000000
Hot_CO_MIN	-	0.000000
Hot_CO_MAX	-	0.000000
Hot_CO_90% CUMULATIVE PER	-	0.000000
Hot_NOx_AVG	-	0.389487
Hot_NOx_MIN	-	0.344087
Hot_NOx_MAX	-	0.436396
Hot_NOx_90% CUMULATIVE PE	-	0.425654

Abbildung 5-14: Übereinstimmungsfaktoren Messung 03

Auch hier entsprechen alle CO Ergebnisse dem Wert 0. Die Werte des größten NO_x-Fensters liegen wie auch der Wert des 90. Perzentil-Fensters über dem gesetzlichen Grenzwert. Lediglich der Wert des geringsten NO_x-Fensters liegt mit einem Wert von 0.344 g/kWh unterhalb der gesetzlichen Grenze.

Wie beim Gesamtzyklus kann auch hier der Vergleich zwischen den 90. Perzentil Ergebnissen und den Durchschnittswerten aufgezeigt werden. In den beiden folgenden Abbildungen werden diese Werte dargestellt und verglichen.

	EMROAD 90- Perzentil	Durchschnittswerte Betriebsphasen	Durchschnittswerte inkl. Betriebs- und Nichtbetriebsphasen
	g/kWh	g/kWh	g/kWh
CO	0.000	0.000	0.000
Nox	0.426	0.383	0.487

Abbildung 5-15: Vergleich 90. Perzentil mit Durchschnittswerten NO_x Messung 03

In den Nicht-Betriebsphasen dieser Messung wurden keine Kohlenmonoxid-Emissionen gemessen.

Nur der aus den Betriebsereignissen berechnete Durchschnittswert, liegt unter dem gesetzlichen Grenzwert von 0.4 Gramm je Kilowattstunde. Die beiden anderen Werte liegen darüber.

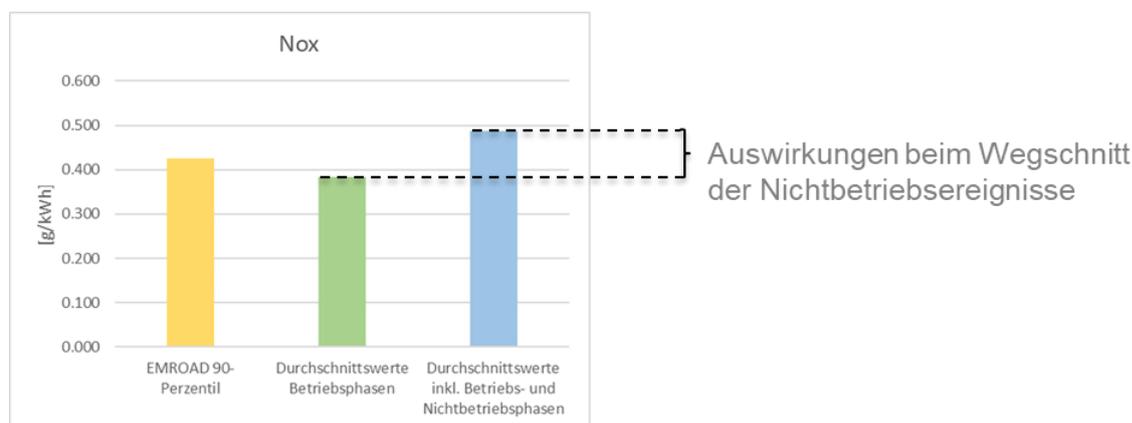


Abbildung 5-16: Darstellung 90. Perzentil zu Durchschnittswerten NO_x Messung 03

Auch hier weichen die Durchschnittswerte wieder relativ stark voneinander ab. Dies wird durch die strichlierten Linien in Abbildung 5-16 dargestellt. Der Wert des 90. Perzentils liegt im Gegensatz zu den Ergebnissen aus Kapitel 5.4.1 bei diesem Test deutlich näher am Zyklusmittelwert ohne Nichtbetriebsphasen. Dies zeigt nochmal, dass es keinen Zusammenhang zwischen dem 90. Perzentil und dem Beachten von Betriebs- und Nichtbetriebsphasen gibt.

5.5 Erkenntnisse zur Auswertung

Das gewählte Messprogramm deckt mit den fünf Einzelmessungen den großen Tätigkeitsbereich des Baggers sehr gut ab. Die gesetzlichen Anforderungen können mit diesem Programm jedoch nicht erfüllt werden. Um den Anforderungen gerecht zu werden, dürfen maximal drei Einzelmessungen zusammengefügt werden. Da im zugrundeliegenden Projekt aber auch Emissionsfaktoren für spezielle Betriebsbedingungen erstellt werden sollen, ist diese Aufteilung ein guter Kompromiss, der beide Aufgabenstellung in gewisser Weise erfüllt.

Der auf Betriebsereignisse gefilterte Gesamtzyklus muss dem fünf- bis siebenfachen der NRTC Referenzarbeit entsprechen. Leerlauf- und Kaltstartmessungen verlängern die Testdauer, da

diese keine Betriebsereignisse darstellen und somit nicht in die Betrachtung der Gesamtarbeit miteinfließen. Zudem werden dadurch emissionskritische Phasen ausgeschlossen, die in der Realität doch einen nicht zu vernachlässigenden Anteil am Gesamtbetrieb haben.

Baumaschinen, wie der Takeuchi Bagger, verbringen laut einer niederländischen Studie einen erheblichen Teil ihrer Betriebszeit im Leerlauf. Der Anteil der Leerlaufphasen variiert zwischen 18 % und 57 % der Gesamtbetriebszeit. Die Maschinen emittieren einen erheblichen Teil, nämlich 12% bis 51% ihrer gesamten NO_x Emissionen im Leerlauf. Bei der Studie wurden neben zwei Baggern auch ein Radlader und ein Traktor untersucht. [11]

Bei der Gesamttestauswertung liegen das 90. Perzentil, sowie die Durchschnittswerte der gasförmigen Emissionen unter dem gesetzlichen Grenzwert. Die Auswertung der dritten Messung ergab für die Komponente NO_x ein anderes Ergebnis. Das 90. Perzentil liegt wie auch der Durchschnittswert, welcher die Nicht-Betriebsereignisse einschließt, über dem gesetzlichen Grenzwert. Die Auswirkungen der Leerlaufphasen können dadurch deutlich erkannt werden.

Die Ursache, warum die manuelle Betriebsereignis-Einteilung unterschiedliche Ergebnisse im Vergleich zur EMROAD Betriebsereignis-Einteilung liefert, konnte im Zuge dieser Arbeit nicht gefunden werden.

6 Simulation

Für die Simulationstätigkeiten wurde das Programm PHEM verwendet. Im Kapitel 5-1 wird dieses Simulationsprogramm kurz erklärt.

Nachfolgend wird auch auf die von PHEM benötigten „Inputdaten“ und auf die Methode der Normierung näher eingegangen.

6.1 PHEM

PHEM macht es möglich für unterschiedlichste Fahrzeuge Simulationsmodelle zu erstellen. Mit Hilfe dieser Modelle lassen sich Kraftstoffverbrauch und Emissionen in Abhängigkeit des vorgegebenen Fahr- bzw. Arbeitszyklus simulieren. Um der wachsenden Komplexität von modernen Abgasnachbehandlungsmodellen gerecht zu werden, wird PHEM kontinuierlich weiterentwickelt. Die Abbildung 6-1 zeigt schematisch das zugrundeliegende Berechnungsmodell auf Basis der Fahrzeuglängsdynamik. Ausgehend von der gemessenen Geschwindigkeit, der Steigung und den Fahrwiderständen kann die Motorleistung berechnet werden. Im Fall der NRMM ist die Geschwindigkeit nicht der entscheidende Faktor, deshalb bietet PHEM auch die Möglichkeit Drehzahl- und Leistungsverläufe vorzugeben. [13]

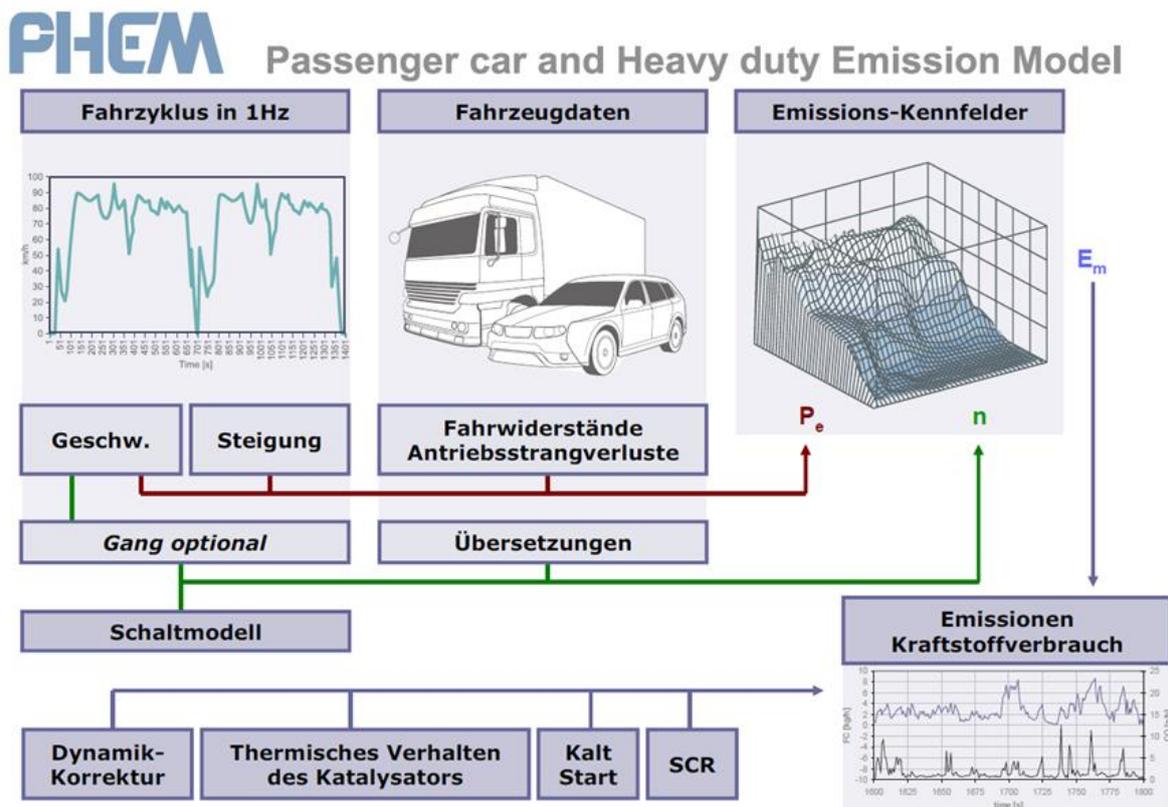


Abbildung 6-1: Berechnungsmodell PHEM [13]

Mit Hilfe von PHEM können aus gemessenen Daten Emissionskennfelder erstellt werden. Dabei werden allen Betriebspunkten im Kennfeld die entsprechenden Schadstoffkomponenten zugeordnet. Betriebspunkte werden mit den beiden Größen Drehzahl und Leistung definiert.

Ausgehend von einem fahrzeugspezifischen Emissionskennfeld können dann für beliebige Betriebszyklen die Emissionen simuliert werden. Des Weiteren kann zudem auch ein Abgasnachbehandlungsmodell dem Simulationsmodell hinzugefügt werden. Unter anderem können damit auch Wärmeverluste über die Systemgrenzen modelliert und Katalysatortemperaturen und darauf folgend Konvertierungsraten berechnet werden.

6.1.1 Normierung

Um Motorfamilien oder unterschiedlich starke Motoren, mit ähnlichen Eigenschaften vergleichbar zu machen, wird eine Normierung angewendet. Dabei werden die Motordrehzahl, die Motorleistung und die Emissionswerte in normierter Form dargestellt. Mit Hilfe der Nennleistung, der Nenndrehzahl und der Leerlaufdrehzahl können die normierten Größen sehr einfach bestimmt werden. Die dazugehörigen Berechnungsvorschriften werden im Folgenden veranschaulicht.

$$P_{e,norm} = \frac{P_e}{P_{rated}} \quad 12$$

$$n_{norm} = \frac{n - n_{idle}}{n_{rated} - n_{idle}} \quad 13$$

$$m_{Emission,norm} = \frac{m_{Emission}}{P_{rated}}$$

14

6.2 PHEM Inputdaten für Kennfelderstellung

Ein Emissionskennfeld deckt den gesamten Betriebsbereich eines Fahrzeuges mit Hilfe von Betriebspunkten ab. Jedem Betriebspunkt können berechnete Größen für die Schadstoffkomponenten und den Kraftstoffverbrauch zugeordnet werden. Messdaten bilden die Basis für die Erstellung eines Emissionskennfeldes. Zudem werden aber auch noch weitere Informationen benötigt, welche im Folgenden genauer beschrieben werden.

6.2.1 Fahrzeug- bzw. Maschinendaten

Maschinenspezifische Informationen werden in einem für PHEM geeigneten Format hinterlegt. Das sogenannte „Vehicle File“ enthält unter anderem die Nennleistung, die Nenndrehzahl, die Leerlaufdrehzahl und das Trägheitsmoment des Motors. Diese genannten Größen zählen zu den wichtigsten maschinenspezifischen Parametern für die Erstellung eines geeigneten Simulationsmodelles.

6.2.2 Vollast- und Schleppkurve

Die Vollastkurve des verbauten 85 kW Deutz-Motors wurde mittels Recherche leider nicht ausfindig gemacht. Stattdessen konnte die Vollastkurve eines 100 kW Deutz-Motors, der praktisch dieselben Eigenschaften wie der 85 kW Motor besitzt, gefunden werden. Diese ist in der kommenden Abbildung durch eine graue Linie mit der Kennzeichnung „TCD 3.6“ dargestellt.

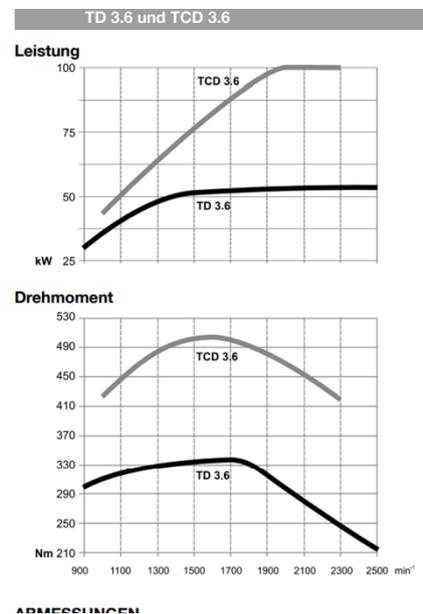


Abbildung 6-2: Vollastkurve 100kW TCD 3.6 Deutz Motor [12]

Ausgehend von dieser Vollastkurve wurde durch Analyse des Takeuchi Betriebsbereiches, eine für den 85 kW Motor angepasste Vollastkurve abgeleitet. Auch bei der manuellen Erstellung einer geeigneten Schleppkurve wurden die Betriebsbereiche berücksichtigt. Dabei wurde eine Schleppkurven-Vorlage abhängig vom Betriebsbereich manuell angepasst.

Zur Darstellung des Betriebsbereiches wird die Leistung über der Drehzahl aufgezeichnet. Die dabei verwendeten Daten stammen aus der ECU-Datenaufzeichnung. Die Darstellung des Betriebsbereiches erfolgt mithilfe der Abbildung 6-3.

Darin sind die Datenpunkte der einzelnen Messung farblich getrennt aufgetragen. Volllast- und Schleppkurve werden ebenso in der folgenden Abbildung veranschaulicht.

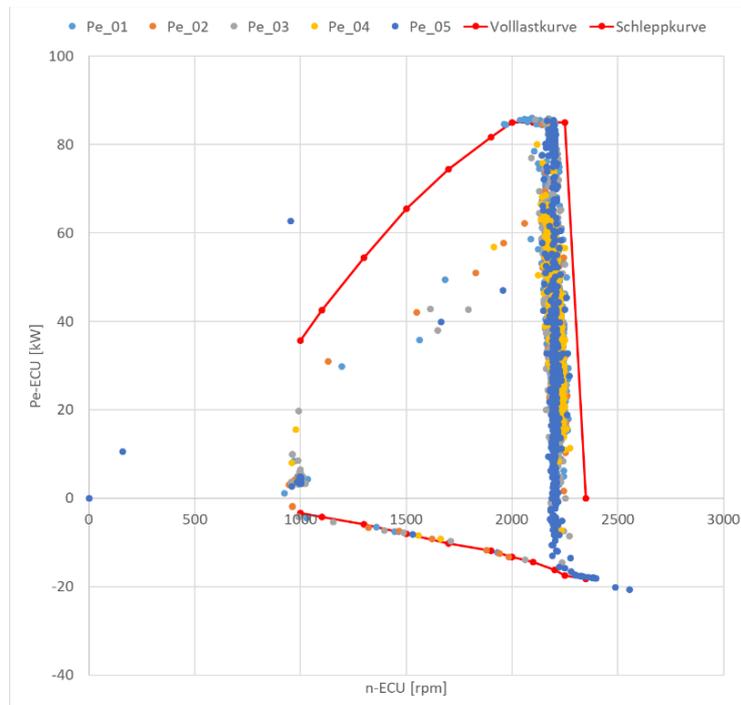


Abbildung 6-3: Betriebsbereich mit Volllast- und Schleppkurve

6.2.3 Zyklus aus Messdaten

Um ein Simulationsmodell zu erstellen, ist es notwendig die gemessenen Daten in einem geeigneten Format zu hinterlegen. Hierfür werden der Kraftstoffverbrauch sowie die Emissionsgrößen kombiniert mit der normierten Drehzahl und der normierten Leistung in einem File mit „csv“ Format gespeichert und in PHEM implementiert.

Für die Erstellung des Emissionsmodelles werden nur jene Daten verwendet, welche während Betriebsereignissen aufgezeichnet wurden, da diese den Betrieb bei warmem Motor und Abgasnachbehandlung darstellen. Mögliche Emissionserhöhungen in den Nichtbetriebsphasen können durch das bereits erwähnte Abgasnachbehandlungsmodell abgebildet werden. Dieses wird in Kapitel 6.6 genauer beschrieben.

Aufgrund der sehr unterschiedlichen Betriebsbedingungen wurden neben einem Gesamtzyklus, der alle Einzelmessungen zu einer großen Messung zusammenfasst, auch zyklusspezifische Inputfiles erstellt.

6.3 CO₂ Leistungsinterpolation

Durch die Anwendung dieser Methode kann auf Basis eines durchschnittlichen CO₂-kennfelds die Motorleistung mithilfe der gemessenen CO₂-Emissionen und der Motordrehzahl bestimmt werden. Das verwendete Basiskennfeld ist das durchschnittliche Euro VI Kennfeld für schwere Nutzfahrzeuge, das auch im HBEFA verwendet wird. [21]

Diese Methode zur Leistungsberechnung wird angewendet, wenn keine Leistungsdaten, zum Beispiel bei PEMS Messungen, über die ECU ausgelesen werden können. In diesem Fall konnte die Leistung über ECU erfasst werden und deshalb eignet sich diese Maschine zur Validierung der CO₂-Leistungsinterpolation für NRMM. [19]

Gibt man den Gesamtzyklus, einschließlich dem über CO₂ bestimmten Verbrauch kombiniert mit dem Verbrauchskennfeld und der Vollastkurve vor, dann kann der Leistungsverlauf simuliert werden. Der simulierte Leistungsverlauf kann dann im Anschluss mit dem aufgezeichneten ECU-Leistungsverlauf verglichen werden. Der Vergleich ist in Abbildung 6-4 dargestellt.

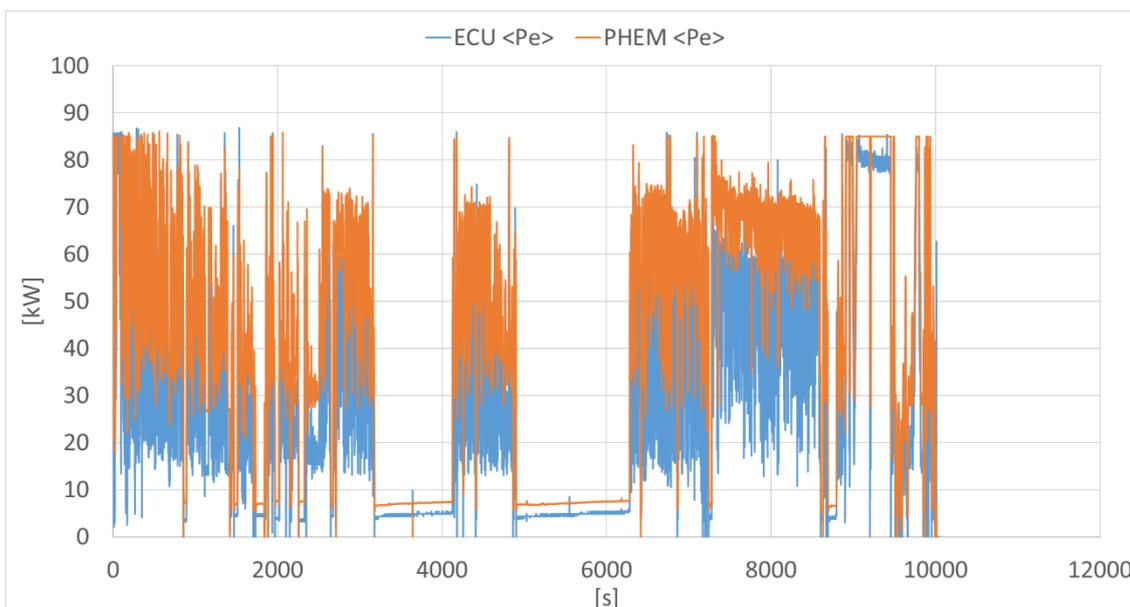


Abbildung 6-4: Leistungsvergleich „ECU“ zu „PHEM“

Bereits in dieser Abbildung lässt sich erkennen, dass die simulierte Leistung deutlich über der aufgezeichneten liegt. Die Integration der beiden Verläufe liefert die dazugehörigen erbrachten Arbeiten. Ein Vergleich dieser beiden Werte in Abbildung 6-5 zeigt den Unterschied noch einmal sehr deutlich.

ECU	81.2328861 [kWh]
PHEM	112.766424 [kWh]

Abbildung 6-5: gemessene Arbeit zu simulierter Arbeit

Die berechnete Leistung weicht von der aufgezeichneten ECU-Leistung ab. Der Wirkungsgrad des Takeuchi Motors ist somit geringer als der des HBEFA-Durchschnittsmotors. Das Basiskennfeld scheint für die Anwendung im Bereich von NRMM nicht geeignet zu sein.

Aus diesem Grund werden für die weiteren Simulationsschritte lediglich die über ECU aufgezeichneten Leistungsdaten verwendet.

6.4 Erstellung Emissionskennfeld - Betriebsphasen

Nur Betriebsereignisse wurden als Input für die Kennfelderstellung verwendet. Links in Abbildung 6-6 wird noch einmal der Gesamtzyklus, exklusive Nicht-Betriebsereignisse dargestellt. Die fünf einzelnen Messungen sind darin farblich getrennt.

Sowohl für den gesamten Zyklus, als auch für die einzelnen Zyklen wurden Emissionskennfelder erstellt. Wie in der Abbildung ersichtlich wurden in Summe sechs Kennfelder erstellt, mit denen im Anschluss eine Nachrechnung erfolgen kann.

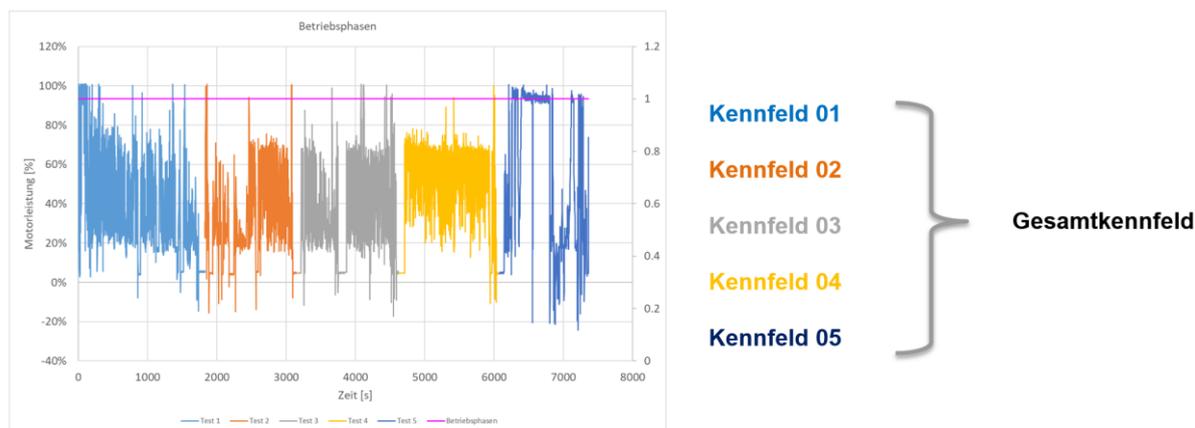


Abbildung 6-6: Kennfelderstellung

Das Gesamtkennfeld deckt den gesamten, gemessenen Tätigkeitsbereich der Arbeitsmaschine ab. Für maschinenspezifische Aussagen ist es daher den Teilkennfeldern vorzuziehen. Da die Maschine zumeist nur in einem bestimmten Drehzahlbereich betrieben wird, deckt das erstellte Kennfeld diesen Betriebsbereich zwar gut ab, andere Betriebsbereiche werden jedoch nur wenig bis gar nicht abgedeckt. Mit diesem Kennfeld können daher keine anderen Maschinen simuliert werden.

Da die fünf Messungen aber sehr unterschiedliche Betriebsbedingungen widerspiegeln, weichen die Teilkennfelder teilweise deutlich vom Gesamtkennfeld ab. Die Einzelkennfelder helfen aber die Emissionssituation in speziellen Betriebsituationen besser nachzuvollziehen. Diese Unterschiede werden im nächsten Kapitel aufgezeigt.

6.5 Nachrechnung-Betriebsphasen

Auf Basis der erstellten Kennfelder wurden alle fünf Zyklen nachgerechnet. Als Input dienen „Files“, welche nun lediglich Leistungs- und Drehzahlverlauf beinhalten. Da bei der Erstellung der Kennfelder ausschließlich Betriebsereignisse verwendet wurden, werden im Zuge dieser Nachrechnung ohne Abgasnachbehandlungsmodell auch nur Betriebsereignisse in den „Input-Files“ vorgegeben.

Im Zuge der Analyse wurden die Schadstoffkomponenten CO₂ und NO_x untersucht. Eine Untersuchung der Kohlenmonoxid- und Partikelemissionen bringt aus bereits bekannten Gründen keine zusätzlichen Erkenntnisse.

6.5.1 Zyklus 01

Die beiden Abbildungen 6-7 und 6-8 zeigen die Unterschiede zwischen den Messergebnissen

und den Simulationsergebnissen für die Abgaskomponenten CO₂ und NO_x. G-KF steht dabei immer für das Gesamtkennfeld und E-KF für das dem Zyklus entsprechende Einzelkennfeld. Auf der linken Seite sind die Zahlenwerte dargestellt und rechts ist noch ein Balkendiagramm zur besseren Veranschaulichung.

CO ₂ _TP		
Messung	Simulation_GesamtKF	Simulation_EinzelKF
903.55 [g/kWh]	854.57 [g/kWh]	873.46 [g/kWh]
Abweichung Simulation/Messung - absolut		
	-48.98 [g/kWh]	-30.09 [g/kWh]
Abweichung Messung/Simulation- relativ		
	-5.42 [%]	-3.33 [%]

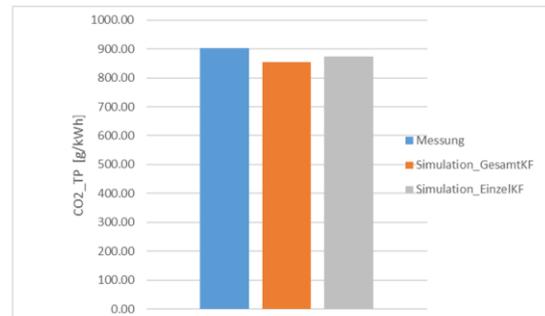


Abbildung 6-7: CO₂ Vergleich Nachrechnung Zyklus 01 mit G-KF und E-KF

NO _x _TP		
Messung	Simulation_GesamtKF	Simulation_EinzelKF
0.09 [g/kWh]	0.16 [g/kWh]	0.10 [g/kWh]
Abweichung Simulation/Messung - absolut		
	0.07 [g/kWh]	0.01 [g/kWh]
Abweichung Messung/Simulation- relativ		
	81.15 [%]	12.45 [%]

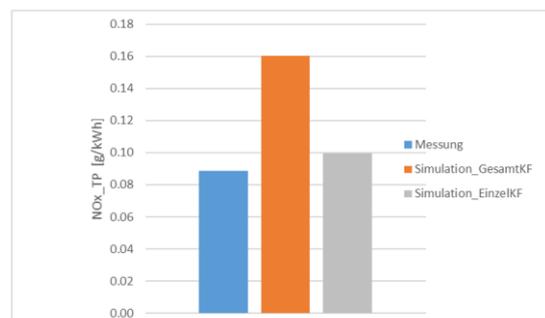


Abbildung 6-8: NO_x Vergleich Nachrechnung Zyklus 01 mit G-KF und E-KF

Die Simulationsergebnisse für Kohlenstoffdioxid unterschätzen die Messung um 5,4 % für das Gesamtkennfeld und um 3,3 % für das Einzelkennfeld. Somit liegen beide Ergebnisse im Rahmen der zu erwartenden Genauigkeit des Simulationsmodelles.

Die Analyse der NO_x Ergebnisse zeigt, dass die Nachrechnung mit dem Gesamtkennfeld um mehr als 80 % über der Messung und der Nachrechnung mit dem Einzelkennfeld liegt. Hier ist aber auch die geringe absolute Emissionsmasse bzw. Abweichung zu beachten. Das Gesamtkennfeld stellt somit das prinzipielle Emissionsniveau richtig dar. Die Ergebnisse zeigen, dass in den Betriebsphasen dieser Messung verhältnismäßig weniger NO_x emittiert wurde als im Durchschnitt. Die Simulation mit dem Einzelkennfeld liefert zufriedenstellende NO_x Ergebnisse. Das Simulationsergebnis weicht nur mit 12.45 % vom Messergebnis ab und liegt somit in der zu erwartenden Modellgenauigkeit.

In den kommenden Kapiteln werden dieselben Abbildungen erneut verwendet, um die Ergebnisse der restlichen Zyklen zu veranschaulichen.

6.5.2 Zyklus 02

CO ₂ _TP			
Messung		Simulation_GesamtKF	Simulation_EinzelKF
937.91	[g/kWh]	889.36	893.91
Abweichung Simulation/Messung - absolut			
		-48.55	-44.00
Abweichung Messung/Simulation - relativ			
		-5.18	-4.69

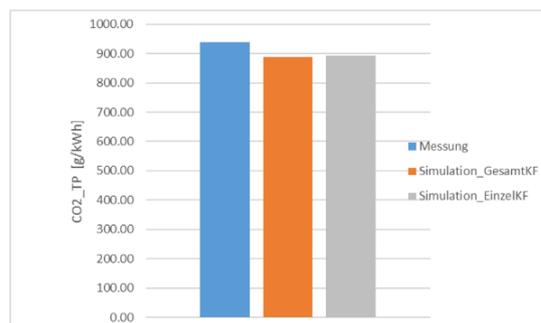


Abbildung 6-9: CO₂ Vergleich Nachrechnung Zyklus 02 mit G-KF und E-KF

NO _x _TP			
Messung		Simulation_GesamtKF	Simulation_EinzelKF
0.32	[g/kWh]	0.18	0.32
Abweichung Simulation/Messung - absolut			
		-0.13	0.00
Abweichung Messung/Simulation - relativ			
		-41.88	0.70

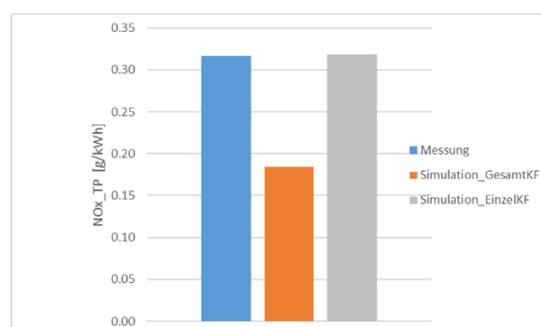


Abbildung 6-10: NO_x Vergleich Nachrechnung Zyklus 02 mit G-KF und E-KF

Die Unterschiede bei den Kohlenstoffdioxid-Emissionen verändern sich im Vergleich zum ersten Zyklus nicht. Auch bei den noch folgenden Zyklen verhält sich der Trend zur Unterschätzung gleich, deswegen werden nachfolgend die CO₂ Ergebnisse zwar dargestellt aber nicht weiter kommentiert.

Die Ergebnisse der Messung und der Nachrechnung mit dem Einzelkennfeld liegen auf einem ähnlichen Niveau. Anders als bei dem ersten Zyklus landet das Ergebnis der Gesamtkennfeldsimulation jedoch unter dem Niveau der anderen Ergebnisse. In den Betriebsereignissen dieser Messung wurden daher mehr Stickoxide emittiert als im Schnitt.

6.5.3 Zyklus 03

CO ₂ _TP			
Messung		Simulation_GesamtKF	Simulation_EinzelKF
914.55	[g/kWh]	853.12	855.06
Abweichung Simulation/Messung - absolut			
		-61.43	-59.49
Abweichung Messung/Simulation - relativ			
		-6.72	-6.50

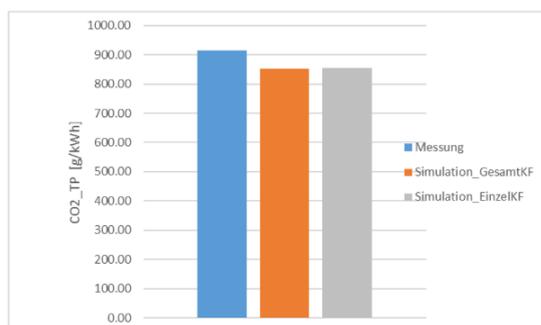
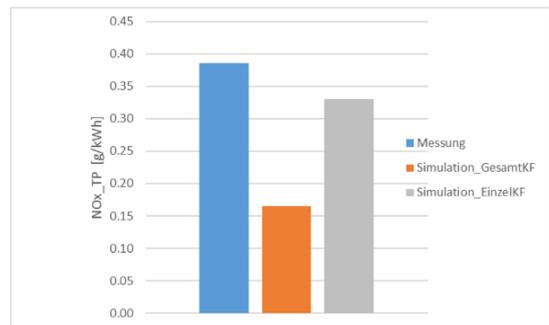


Abbildung 6-11: CO₂ Vergleich Nachrechnung Zyklus 03 mit G-KF und E-KF

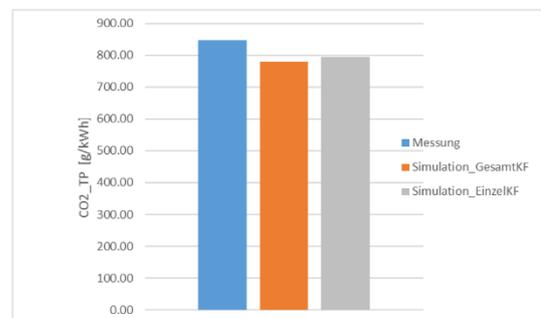
NO _x _TP			
Messung		Simulation_GesamtKF	Simulation_EinzelKF
0.39	[g/kWh]	0.17	0.33
Abweichung Simulation/Messung - absolut			
		-0.22	-0.06
Abweichung Messung/Simulation- relativ			
		-57.11	-14.36

Abbildung 6-12: NO_x Vergleich Nachrechnung Zyklus 03 mit G-KF und E-KF

Die NO_x Ergebnisse dieses Zyklus zeigen Ähnlichkeiten zum vorherigen Zyklus. Auch hier liegt das Ergebnis der Nachrechnung mit dem Gesamtkennfeld unter dem Niveau der beiden anderen Ergebnisse. Während der Betriebsereignisse dieser Messung wurden überdurchschnittlich viele Stickoxide emittiert. Bei der Analyse dieses Zyklus sollte beachtet werden, dass es sich hierbei um die Messung mit den hohen Leerlaufanteilen handelt. Es werden zwar nur die Betriebsphasen nachgerechnet, aber auch in diesen Betriebsphasen sind, aus den bereits genannten Gründen, die Einflüsse der Leerlaufphasen zu erkennen. Der gesamte Zyklus, einschließlich der Leerlaufphasen, kann erst mit Hilfe eines zusätzlich implementierten ANB-Modelles nachgerechnet werden. Darauf wird in Kapitel 6.6 noch genauer eingegangen.

6.5.4 Zyklus 04

CO ₂ _TP			
Messung		Simulation_GesamtKF	Simulation_EinzelKF
847.26	[g/kWh]	780.06	795.26
Abweichung Simulation/Messung - absolut			
		-67.20	-52.00
Abweichung Messung/Simulation- relativ			
		-7.93	-6.14

Abbildung 6-13: CO₂ Vergleich Nachrechnung Zyklus 04 mit G-KF und E-KF

NO _x _TP			
Messung		Simulation_GesamtKF	Simulation_EinzelKF
0.022	[g/kWh]	0.132	0.020
Abweichung Simulation/Messung - absolut			
		0.11	0.00
Abweichung Messung/Simulation- relativ			
		506.04	-7.85

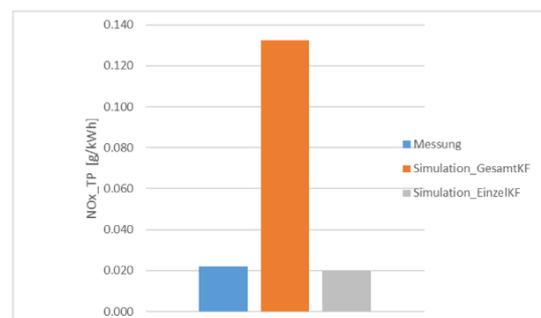
Abbildung 6-14: NO_x Vergleich Nachrechnung Zyklus 04 mit G-KF und E-KF

Abbildung 6-14 zeigt, dass die Simulation mit dem Gesamtkennfeld auf ein um den Faktor 10 höheres Ergebnis führt. Zyklus 04 emittierte daher verhältnismäßig wenig Stickoxid. Das Messergebnis und die Ergebnisse der Einzelkennfeldsimulation sind jedoch sehr niedrig. Mithilfe der gemessenen Daten kann dafür kein spezieller Grund ausgemacht werden. Zum Teil liegen, wie bereits früher erwähnt die aufgezeichneten NO_x Ergebnisse unter der Sensibilitätsgrenze des Analysators. Bei Ergebnissen auf diesem sehr geringen Niveau ist das Level zwar passend, aber die genauen Werte müssen kritisch betrachtet werden.

6.5.5 Zyklus 05

CO ₂ _TP		
Messung	Simulation_GesamtKF	Simulation_EinzelKF
790.39 [g/kWh]	798.19 [g/kWh]	749.38 [g/kWh]
Abweichung Simulation/Messung - absolut		
	7.79 [g/kWh]	-41.01 [g/kWh]
Abweichung Messung/Simulation- relativ		
	0.99 [%]	-5.19 [%]

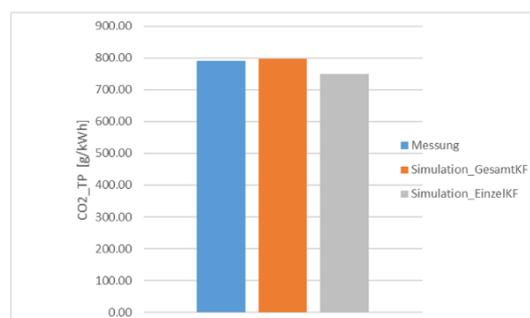


Abbildung 6-15: CO₂ Vergleich Nachrechnung Zyklus 05 mit G-KF und E-KF

NO _x _TP		
Messung	Simulation_GesamtKF	Simulation_EinzelKF
0.128 [g/kWh]	0.135 [g/kWh]	0.109 [g/kWh]
Abweichung Simulation/Messung - absolut		
	0.01 [g/kWh]	-0.02 [g/kWh]
Abweichung Messung/Simulation- relativ		
	5.73 [%]	-14.33 [%]

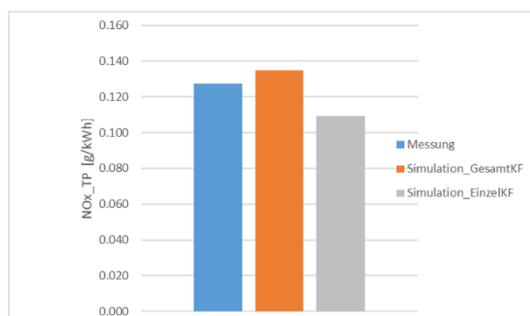


Abbildung 6-16: NO_x Vergleich Nachrechnung Zyklus 05 mit G-KF und E-KF

Bei diesem Zyklus, der den Fahrbetrieb des Baggers abbildet, passen die drei NO_x Ergebnisse im Vergleich zu den anderen Zyklen sehr gut zusammen. Die Simulation mit dem Gesamtkennfeld liefert hier ein besseres Ergebnis als die Simulation mit dem Einzelkennfeld. Die Simulation mit dem Einzelkennfeld ist aber trotzdem im Bereich der Modellgenauigkeit.

6.6 Implementierung Abgasnachbehandlungsmodell

Mit den bereits erstellten Kennfeldern können die Emissionen und Kraftstoffverbräuche der Betriebsereignisse nachgerechnet werden. Sollen jedoch die gesamten Zyklen, einschließlich der Nicht-Betriebsereignisse, wie z.B. Kaltstart und längere Leerlaufphasen, dargestellt werden, muss das Simulationsmodell auch den Temperatureinfluss auf die Konvertierung im SCR-Katalysator berücksichtigen. Diese Einflüsse sind bereits bei Zyklus 03, der in seiner Betriebsphase einen längeren Leerlaufteil enthält, zu sehen. Die gemessenen NO_x-Emissionen werden bei diesem Test vom Gesamtkennfeld um 57.11 Prozent unterschätzt. Daher muss das bereits bestehende Simulationsmodell noch um ein Abgasnachbehandlungsmodell erweitert werden. Dieses ist modular aufgebaut.

Das Abgasnachbehandlungsmodell besteht aus mehreren Modulen, welche in dem Kapitel 6.6.1 näher beschrieben werden. Zusätzlich wird in dem ANB-Modell ein maschinenspezifisch angepasstes Temperaturmodell hinterlegt. Eine detaillierte Beschreibung dazu folgt in Kapitel 6.6.2. Das Simulationsmodell mit ANB soll dazu dienen die NO_x-TP Emissionen auch in den Nicht-Betriebsphasen abzubilden. Daher muss auch ein NO_x-EO Kennfeld hinterlegt werden. Zudem müssen auch die Konvertierungsraten in Abhängigkeit des jeweiligen Betriebspunktes vorgegeben werden. In den Nicht-Betriebsphasen, in denen eine Abkühlung eintritt werden die NO_x-TP Emissionen dann aus den NO_x-EO Emissionen und den Konvertierungsraten bestimmt. Erläutert wird diese Vorgehensweise in Kapitel 6.6.3.

Während Durchmesser, Längen und Module des Abgasstranges für alle Zyklen ident sind, werden die Starttemperaturen der einzelnen Module und der NH₃-Beladungszustand des SCR-Katalysators für die einzelnen Zyklen bei der Modellvalidierung angepasst.

Informationen über das Abgasnachbehandlungsmodell werden in einem „exs- File“ gespeichert und im Simulationsprogramm hinterlegt. Unter anderem werden in diesem „File“ folgende Größen und Kurven gespeichert und parametrisiert.

- Geometrie und Masse der Abgasnachbehandlungskomponenten
- Größen zur Charakterisierung des Wärmeverhaltens einzelner Komponenten
- Durchschnittliche Abkühlkurven der Komponenten
- Anfangszustände abhängig vom jeweiligen Zyklus
 - o Starttemperaturen der Komponenten
 - o NH₃ Füllstand im SCR Katalysator

6.6.1 Module der Abgasnachbehandlung

Auf Basis von Fotos und Broschüren wurde der Abgasstrang des Takeuchi Baggers anhand seiner realen Abgasnachbehandlung in PHEM aufgebaut. Abbildung 6-17 zeigt das in PHEM implementierte Abgasnachbehandlungsmodell, bestehend aus einer Kombination von DOC und DPF, einem Rohr, dem SCR und einem weiteren Rohr. Das letzte Rohr gehört dabei nicht mehr zur Abgasnachbehandlung des Baggers, wird aber benötigt um die Temperaturverluste in der Zuleitung zum EFM inkl. Temperatursensor darstellen zu können, da das Modell anhand gemessener Temperaturen abgestimmt wird. Die Module wurden anfangs mit entsprechenden Erfahrungswerten parametrisiert.

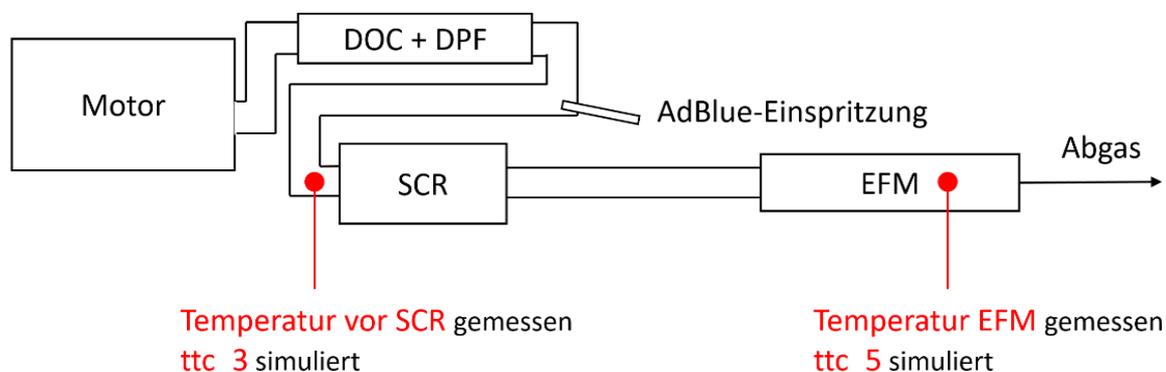


Abbildung 6-17: Modell der Abgasnachbehandlung

Bei den dargestellten Temperaturen „ttc_3“ und „ttc_5“ handelt es sich um simulierte Temperaturen. Die Abkürzung „ttc“ steht dabei für die Temperatur eines Temperatursensors, d.h. diese Temperatur kann direkt mit den gemessenen Temperaturen verglichen werden. PHEM berechnet dazu noch die Materialtemperaturen der einzelnen Module und die entsprechende Temperatur des Abgases. Dabei entspricht „ttc_3“ der Temperatur vor „SCR“ und „ttc_5“ der Temperatur im EFM. Es wurden hier speziell diese beiden Temperaturen hervorgehoben, da genau an diesen Stellen Messwerte vorhanden sind und das Simulationsmodell somit genau anhand dieser abgestimmt werden kann.

6.6.2 Erstellung Temperaturmodell

Die Basis des Modelles bildet das HBEFA „Engine Out“ Durchschnitts-Temperaturkennfeld. Dieses stellt die Abgastemperaturen in Abhängigkeit von Leistung und Drehzahl für ein durchschnittliches schweres Nutzfahrzeug der Emissionsstufe Euro VI dar.

Unter Verwendung dieses Basiskennfeldes und der Basisparametrierung der Abgasnachbehandlungskomponenten können die genannten Zieltemperaturen nur unzufrieden stellend nachsimuliert werden.

Das zu niedrige Temperaturniveau des Basiskennfeldes wurde iterativ erhöht und die Parameter der Abgasnachbehandlungsmodule solange angepasst, bis die Zieltemperaturen im Rahmen der Modellgenauigkeit von PHEM nachsimuliert werden konnten.

Das iterativ angepasste Temperaturkennfeld wird in der folgenden Abbildung dargestellt. In einem dreidimensionalen Diagramm wird die „EO“-Temperatur über der normierten Drehzahl und der normierten Leistung aufgetragen.

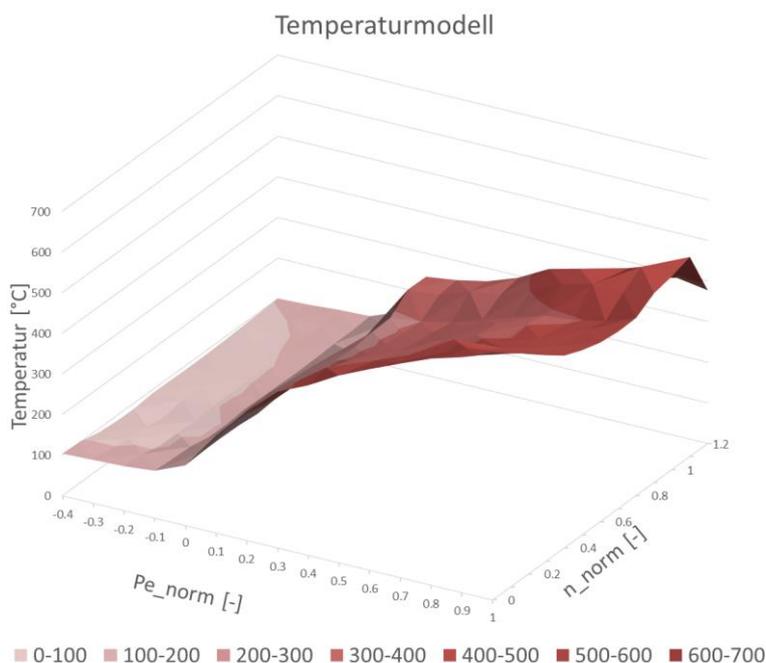


Abbildung 6-18: Temperaturkennfeld „Engine Out“

Der Vergleich zwischen den simulierten und aufgezeichneten Temperaturen wird mit den nachfolgenden Abbildungen veranschaulicht. Folgende Größen werden darin abgebildet.

- Simulierte und aufgezeichnete Temperatur vor SCR (simuliert – aufgezeichnet)
- Simulierte und aufgezeichnete Temperatur EFM (simuliert – aufgezeichnet)
- Normierte Drehzahl und Leistung (Drehzahl – Leistung)

Abbildung 6-19 zeigt die Ergebnisse der Simulation des ersten Zyklus. Der starke Temperaturanstieg während des Kaltstartes kann nicht nachgebildet werden. Ab Beginn der Betriebstätigkeit nähern sich die Signale der simulierten und der gemessenen Temperatur einander an. Auch die Hochtemperaturen können mit dem Simulationsmodell nicht optimal nachgestellt werden.

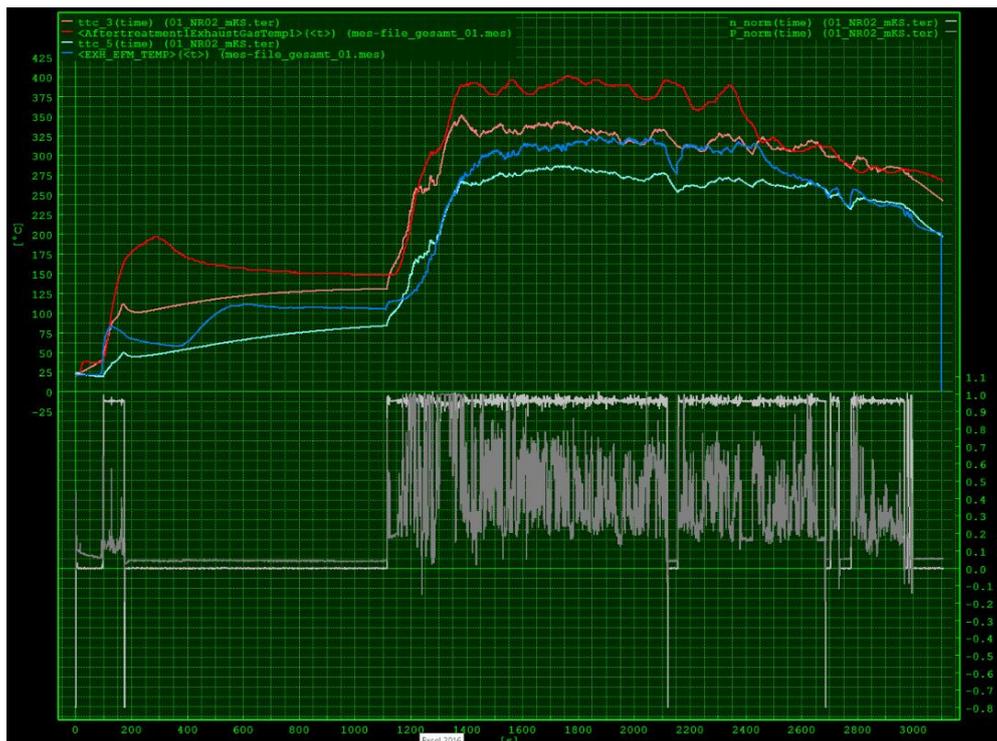


Abbildung 6-19: Temperaturvergleich Zyklus 01

In der folgenden Abbildung werden die Simulations-Ergebnisse des zweiten Zyklus dargestellt. Obwohl die Hochtemperaturen in der ersten Hälfte des Zyklus nicht nachgebildet werden können, passen die simulierten Temperaturen in der zweiten Hälfte des Zyklus sehr gut zur Realität.

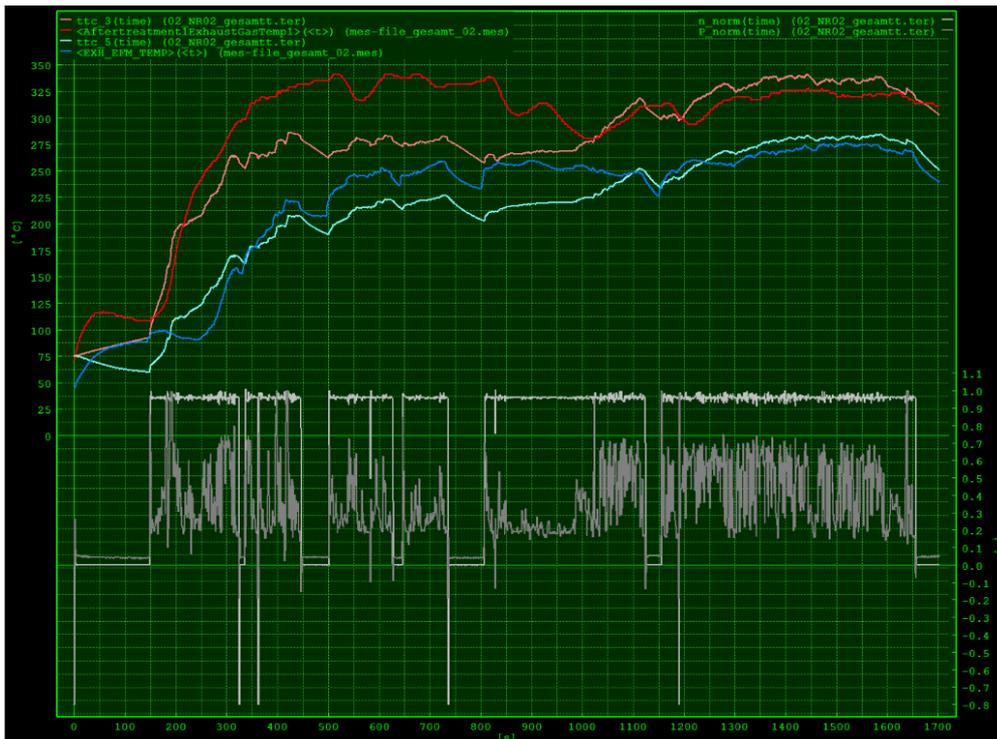


Abbildung 6-20: Temperaturvergleich Zyklus 02

Der Temperaturvergleich des dritten Zyklus zeigt, dass die Abkühl- und Aufheizphasen nach und vor den Leerlaufphasen sehr gut nachgebildet werden können.

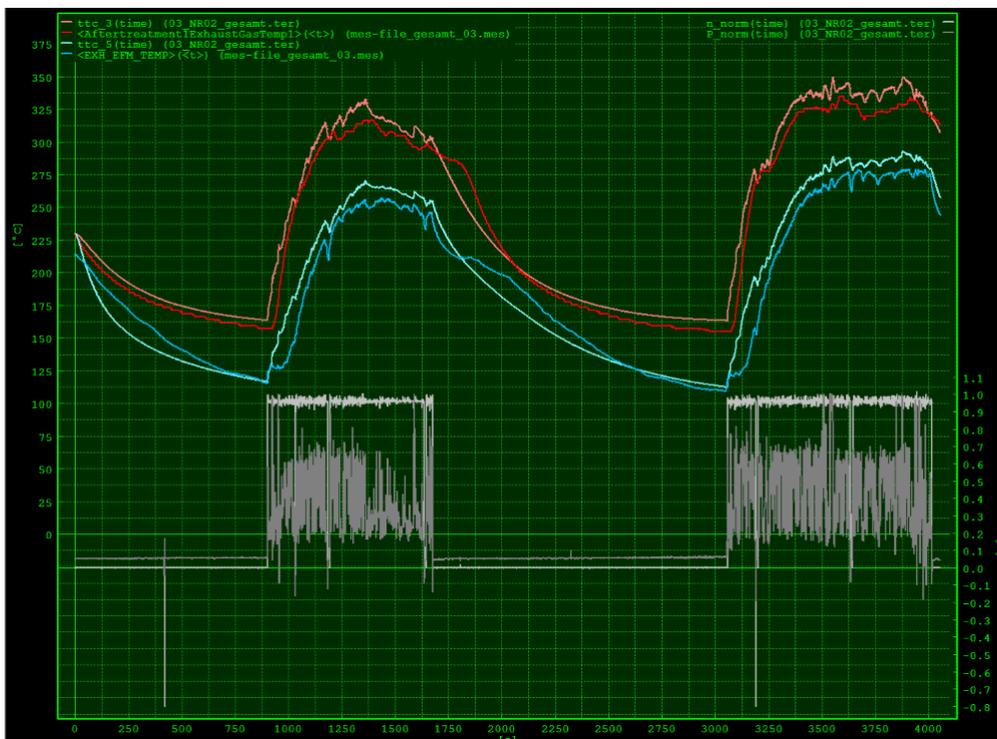


Abbildung 6-21: Temperaturvergleich Zyklus 03

Auch die Nachrechnung des vierten Zyklus liefert anschauliche Ergebnisse.

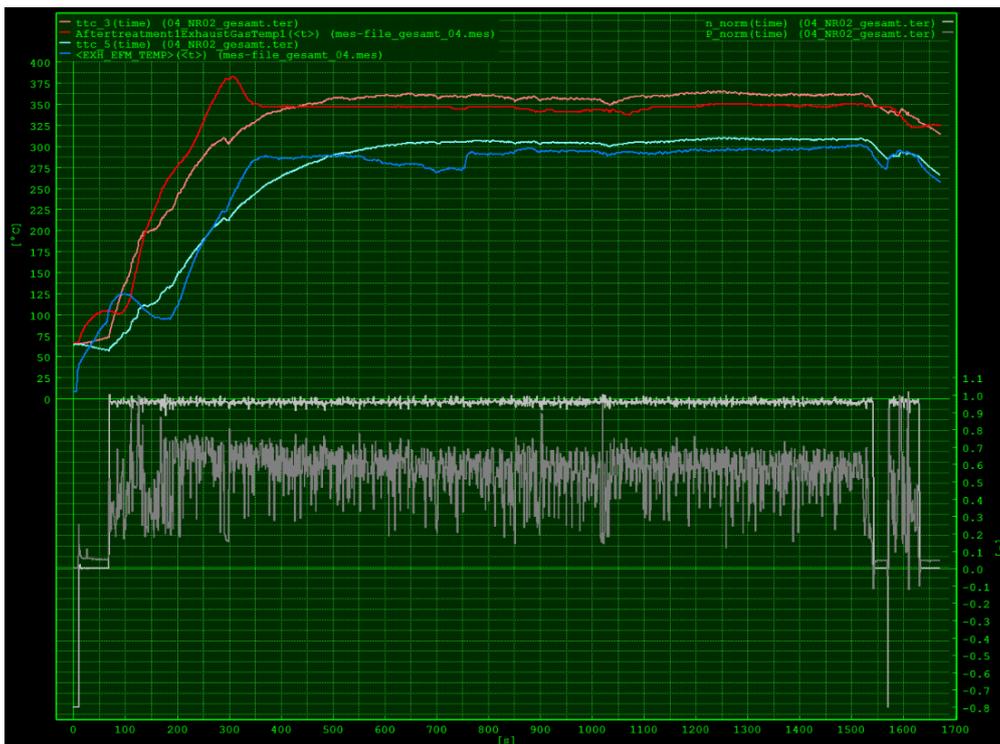


Abbildung 6-22: Temperaturvergleich Zyklus 04

Abbildung 6-23 stellt den Temperaturvergleich des fünften Zyklus dar. Die simulierten Temperaturen stimmen mit den gemessenen Temperaturen gut überein.

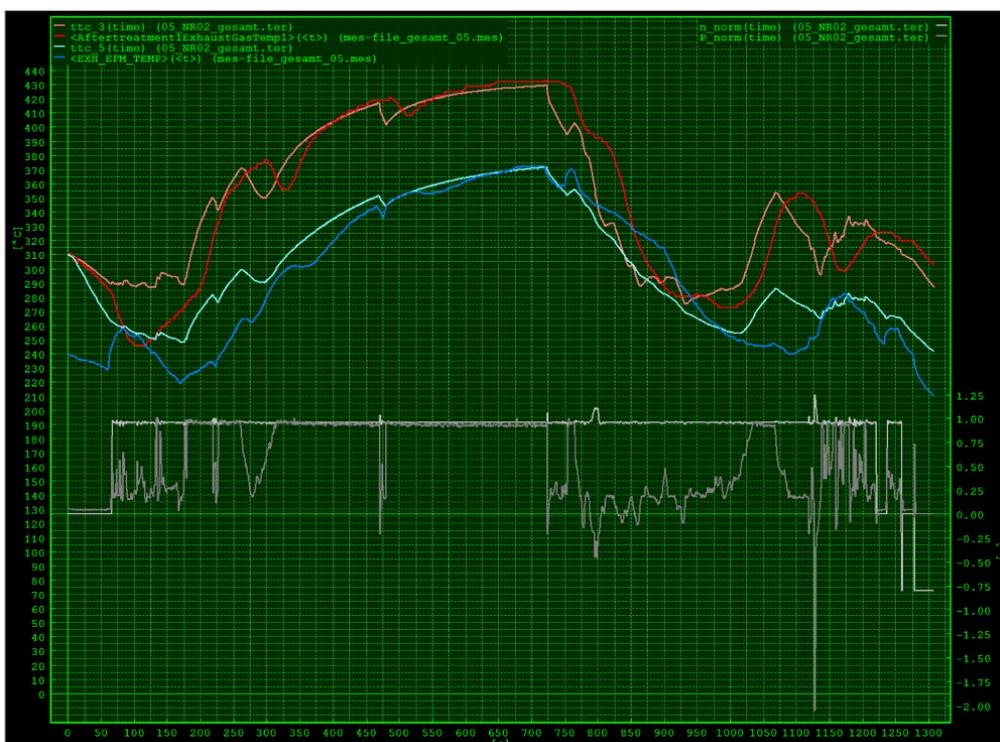


Abbildung 6-23: Temperaturvergleich Zyklus 05

Mit Hilfe des Temperaturmodelles können die Zieltemperaturen nachsimuliert werden. In den Hochtemperaturbereichen von Messung 01 und 02 erreichen die simulierten Temperaturen jedoch nicht ganz das Niveau der Messwerte. Eine Anpassung in Richtung dieser Hochtemperaturen ist möglich. Im Gegensatz muss dann aber eine Abweichung in den Niedertemperaturphasen in Kauf genommen werden. Die folgenden Kapitel zeigen aber, dass die Genauigkeit im niederlastigen Temperaturbereich für die Modellgenauigkeit in Bezug auf die finalen Emissionen wichtiger ist, deshalb wird diese Ungenauigkeit im höheren Temperaturbereich in Kauf genommen.

6.6.3 Berechnung NO_x Engine Out Kennfeldemissionen

In den Nicht-Betriebsphasen, in denen die Temperatur im Abgasstrang abnimmt können die emittierten NO_x Emissionen nicht mehr effizient umgesetzt werden. Diese Thematik wurde bereits in Kapitel 4.4 ausführlich behandelt. Ein Simulationsmodell soll natürlich auch Zyklen mit Kaltstart oder längeren Leerlaufphasen darstellen können. Aus diesem Grund ist es notwendig für die Berechnung der Konvertierungen im SCR Katalysator ein temperaturabhängiges Model zu erstellen. Da aber keine NO_x-EO Emissionen gemessen wurden, müssen diese ebenso simuliert werden. Zur Erstellung des Simulationsmodelles wird folgende Methode verwendet.

Basierend auf dem, anhand von Messdaten erstellten NO_x-TP Gesamtemissionskennfeld für den Takeuchi Bagger und einem generischen MAN SCR-Konvertierungskennfeld wurden die NO_x EO-Kennfeldemissionen abgeleitet. Da die NO_x-EO Emissionen nicht gemessen wurden, sind die Konvertierungsraten im SCR-Katalysator auch nicht bekannt. Deshalb wurde das SCR-Konvertierungskennfeld des MANs, dessen Motor und Abgasnachbehandlung ähnlich zum Takeuchi Bagger sind, für die Herleitung der NO_x-EO Emissionen verwendet. Die Berechnung kann mithilfe der Abbildung 6-24 schematisch dargestellt werden.

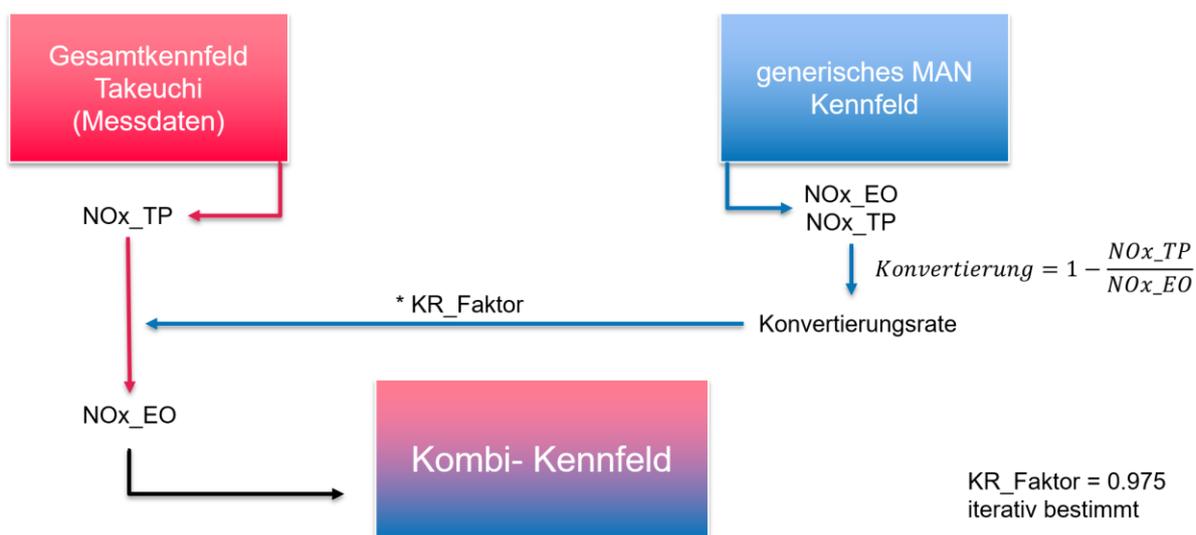


Abbildung 6-24: Berechnung NO_x-EO Kennfeldemissionen

Es wird davon ausgegangen, dass die Konvertierungen im SCR in Abhängigkeit von Leistung und Drehzahl für den MAN gleich wie die des Takeuchi Baggers sind. Somit kann auf Basis dieser Konvertierung von den gemessenen NO_x-TP Emissionen auf die NO_x-Emissionen des Takeuchi Baggers in den einzelnen Betriebspunkten zurückgerechnet werden. Bei den folgenden Nachrechnungen der Tailpipe Emissionen kann man erkennen, dass die Genauigkeit

der Simulation durch das Anpassen der NO_x-EO Werte mit Hilfe des in der Graphik dargestellten KR-Faktors gesteigert werden kann. Dieser wurde iterativ bestimmt und senkt die Konvertierungsraten, wodurch in weiterer Folge auch die NO_x-EO Kennfeldemissionen auf ein niedrigeres Niveau verringert werden. Der Faktor, in der Abbildung als „KR_Faktor“ bezeichnet, entspricht dem Wert 0.975.

6.7 Nachrechnung mit Gesamtkennfeld inklusive Abgasnachbehandlung

Mit Hilfe des erstellten Temperatur- und Abgasnachbehandlungsmodelles können die Zyklen, samt Nicht-Betriebsereignissen, nachgerechnet werden. Dazu wurden die Startbedingungen wie NH₃-Beladung des SCR oder die Temperaturen der einzelnen Module der Abgasnachbehandlung zyklusspezifisch angepasst.

Bevor die Simulationsergebnisse aufgezeigt werden, folgt im nächsten Kapitel noch eine Erläuterung der wichtigsten Simulationsparameter.

6.7.1 Wichtige Simulationsparameter

Einige allgemeine und zyklusspezifische Simulationsparameter werden in diesem Kapitel erklärt.

- Volumen SCR Katalysator → 10 Liter

Das Volumen wurde auf Basis von Datenblättern abgeschätzt und iterativ angepasst. Dabei gilt es vor Allem den NH₃ Speicher bestmöglich zu modellieren. Der definierte Wert ist allgemein gültig und unabhängig vom jeweiligen Zyklus.

- KR Faktor → 0,975

Wie bereits in einem früheren Kapitel erwähnt, wurde dieser Faktor iterativ bestimmt. Auch dieser Faktor liegt für alle Zyklen auf demselben Wert.

- NH₃ Beladungszustände im SCR

Die zyklusspezifischen Anfangszustände des NH₃ Speichers wurden abgeschätzt und iterativ angepasst. Die Abschätzung basiert auf Informationen bezüglich des Fahrzeugzustandes in den Nicht-Messphasen. Nach längeren Leerlaufphasen sollte das Niveau z.B. niedriger sein, da in der Leerlaufphase bereits NH₃ verbraucht wurde und durch die geringen Abgastemperaturen keine AdBlue Einspritzung möglich ist. Die NH₃-Beladung liegt in jedem Fall in einem Bereich zwischen 0% und 50%.

- Temperaturlimit für NH₃ Einspritzung

Dank der aufgezeichneten „AdBlue“ Einspritzmenge konnte das Temperaturlimit, ab welcher die Einspritzung erfolgt, einfach herausgefunden werden. Abbildung 5-24 zeigt den Verlauf der Einspritzmenge kombiniert mit der Temperatur vor SCR für den dritten Zyklus. Abbildung 6-25 lässt erkennen, dass dieses Temperaturlimit zwischen 260 °C und 270 °C liegt. Zyklusübergreifend liegt die Grenztemperatur im Mittel bei 270 °C. Dieser Grenzwert kann somit allgemein für alle Zyklen im Simulationsmodell parametrisiert werden. Diese liegt zwar im Vergleich zu Werten der Literatur sehr hoch, ist aber durch Messwerte belegt. [20]

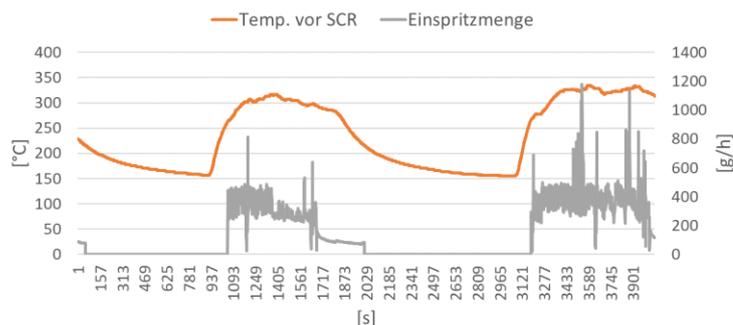
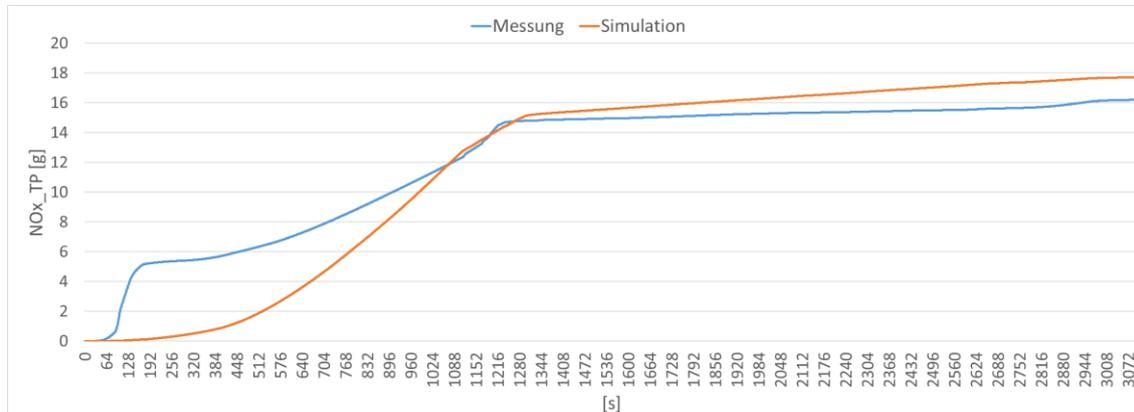


Abbildung 6-25: Temperaturlimit für NH3 Einspritzung

6.7.2 Zyklus 01

Ausschließlich die NO_x Ergebnisse werden durch die Simulation mit Abgasnachbehandlungsmodell verändert. Alle anderen Ergebnisse weichen nicht von den in Kapitel 5.4 bereits gezeigten Ergebnissen ab.

Eine detailliertere Erkenntnis erhält man mit Hilfe der nachfolgenden Abbildung. Darin werden die kumulierten Emissionsmassen für den Kaltstart dargestellt. Darin lässt sich erkennen, dass der „Peak“ in der Anfangsphase nicht nachsimuliert werden kann. Offensichtlich wird aber der Punkt, ab dem die Konvertierung im SCR-Katalysator gut funktioniert und die kumulierten Emissionen deutlich flacher ansteigen, gut getroffen. Somit bildet die Simulation den Kaltstart gut nach.

Abbildung 6-26: kumulierte NO_x _TP Messung zu Simulation Zyklus 01

In Abbildung 6-27 werden die Ergebnisse der NO_x _TP Emissionen, welche zum einen aus den Mess- und zum anderen aus den Simulationsdaten berechnet wurden und das „Engine out“ Simulationsergebnis dargestellt. Im Balkendiagramm ist der Niveauunterschied zwischen „Engine out“ und „Tailpipe“ deutlich zu erkennen. Dieser Unterschied steht im direkten Zusammenhang mit dem SCR-Umsatz. Die absolute und auch die relative Konvertierung wird in den Tabellen angegeben. Das NO_x _EO Simulationsergebnis liegt mit 2.48 Gramm je Kilowattstunde unter dem zu erwartenden Wert für eine solche Motorenkategorie. Dies ergibt sich aus der Kombination der niedrigen „Tailpipe“ Messwerte und der Erstellung des NO_x -EO Kennfeldes auf Basis der Konvertierungen des zugrundeliegenden MAN LKWs. Aber das Modell stellt, wie bereits erwähnt, die Tailpipeemissionen sehr gut dar. Diese sind entscheidend für die Bewertung des Emissionsverhaltens. In Abbildung 6-27 stehen die Abkürzungen „sim.“

und „SIM“ für „simuliert“ und die Abkürzungen „gem.“ und „GEM“ für „gemessen“. Auch die Abweichungen zwischen den Simulationsergebnissen und den Ergebnissen aus den Messdaten werden in der folgenden Abbildung gezeigt.

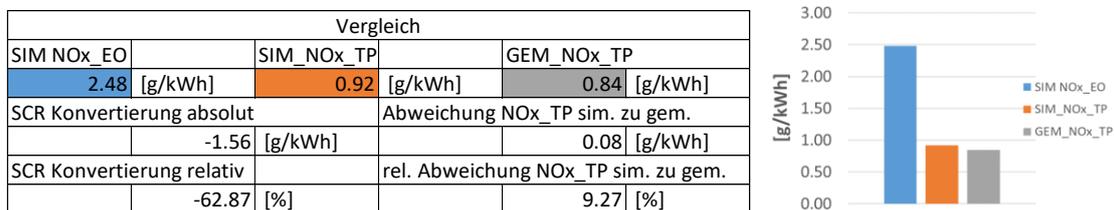


Abbildung 6-27: SCR Umsatz Zyklus 01

6.7.3 Zyklus 02

Das nachgerechnete Ergebnis auf Basis des erstellten Simulationsmodelles stimmt für diesen Zyklus sehr gut mit dem Messergebnis überein. Die Abweichung beträgt nur knapp 4 %. Auch die kumulierten Emissionsmassen, welche in Abbildung 6-28 dargestellt werden, verlaufen ähnlich zueinander. Normale Betriebstätigkeiten können mit dem Modell gut abgebildet werden.

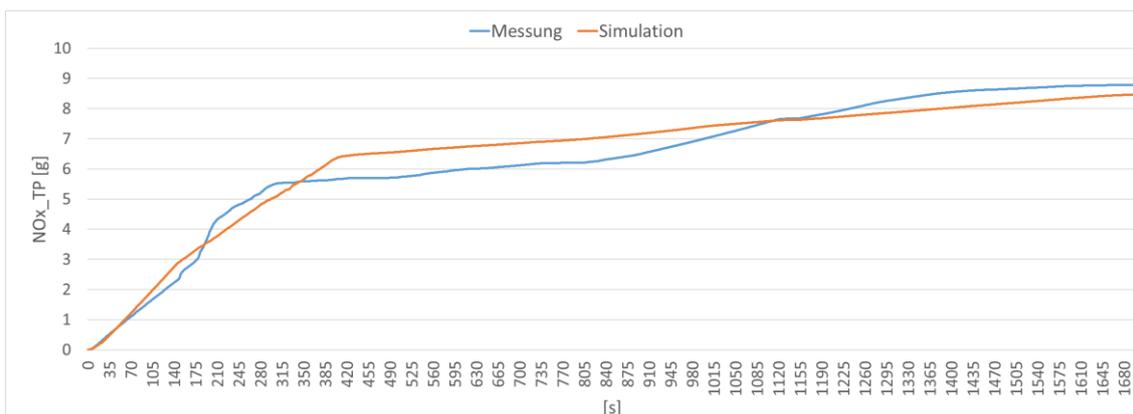


Abbildung 6-28: Verlauf NO_x_TP Messung zu Simulation Zyklus 02

Der SCR Katalysator senkt das Gesamtergebnis von 2.03 Gramm je Kilowattstunde auf einen Wert im Bereich von 0.7 Gramm je Kilowattstunde herab. Dies wird durch das Balkendiagramm auf der rechten Seite nochmal schön dargestellt. Das Simulationsergebnis unterschätzt das Ergebnis aus den Messdaten um knapp 4 %.

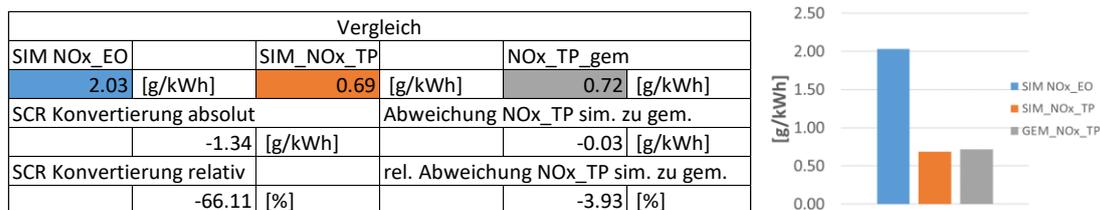


Abbildung 6-29: SCR Umsatz Zyklus 02

6.7.4 Zyklus 03

Das Ergebnis der Nachrechnung liegt unter dem Messergebnis. Die Abweichung von 15 % liegt aber im Rahmen der möglichen Genauigkeit des PHEM Modells. Dieser Zyklus zeigt die gute Funktionalität des Abgasnachbehandlungsmodells, da dieser am Anfang und in der Mitte eine längere Leerlaufphase beinhaltet. Das Modell muss daher sowohl das Aufheizen als auch das Abkühlen der Abgasnachbehandlung abbilden können. Die Verläufe der kumulierten Emissionsmassen werden mit Hilfe der Abbildung 6-30 veranschaulicht.

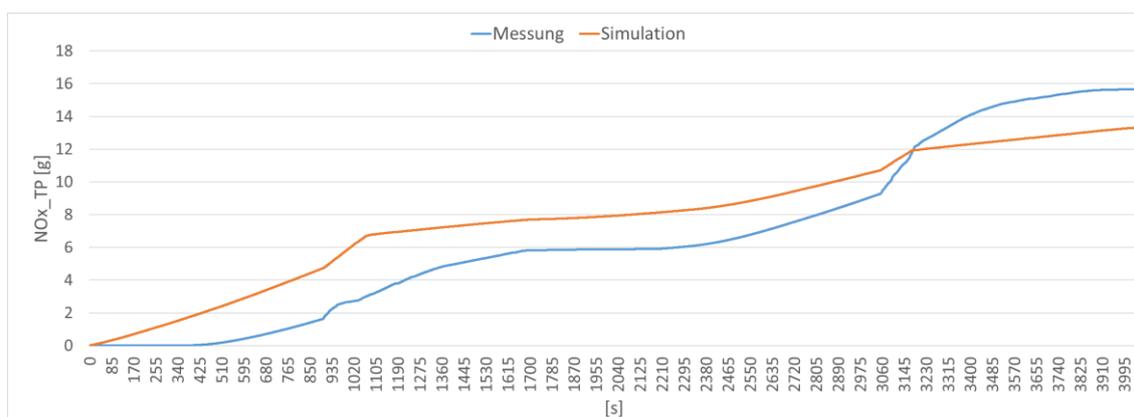


Abbildung 6-30: Verlauf NO_x_TP Messung zu Simulation Zyklus 03

Der SCR Umsatz und die NO_x_EO Ergebnisse liegen im Vergleich zu den anderen Zyklen auf einem ähnlichen Niveau. Das Simulationsergebnis liegt bei diesem Zyklus um 0.12 Gramm je Kilowattstunde unter dem Messergebnis.

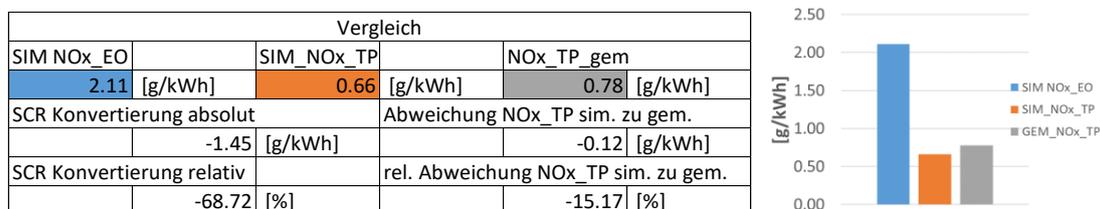


Abbildung 6-31: SCR Umsatz Zyklus 03

6.7.5 Zyklus 04

Die Emissionsergebnisse dieses höherlastigen Zyklus sind im Vergleich zu den anderen Zyklen sehr niedrig. Dies ist bereits in Kapitel 4.4 beschrieben.

Wenn man die Simulation nun mit dem Gesamtmodell durchführt, dann ergeben sich final zu hohe Emissionen. Es kann zwar der Peak am Anfang in der Anlaufphase nachsimuliert werden, aber die Emissionen in der Betriebsphase sind zu hoch. Um das Ergebnis auf den Tailpipe Endwert zu trimmen, gibt es nun aber noch die Möglichkeit, die NH₃-Startbeladung auf 40 % zu parametrieren. Damit ergibt die Nachrechnung ein Ergebnis, welches das Messergebnis nahezu genau trifft. Die Analyse in Abbildung 6-36 zeigt aber, dass der anfängliche „Peak“ mit dieser NH₃-Beladung nicht nachsimuliert werden kann. Zudem ist dies auch nicht unbedingt sinnvoll, da bei einer anderen Zykluslänge der Endwert trotzdem nicht getroffen wird, da die Emissionen während der Betriebsphase durch das Gesamtkennfeld überschätzt werden.

Wie bereits in Kapitel 4.4 aufgezeigt, führt die Simulation mit dem Gesamtkennfeld zu den hohen NO_x_TP Emissionen während der Betriebsereignisse dieses Zyklus. Somit kann auf Basis des Gesamtkennfeldes kein optimales Ergebnis erreicht werden.

Die Nachrechnung mit der Annahme einer 40 prozentigen Beladung wird in orange und die Nachrechnung mit einer angenommenen Beladung von 0 % in grau dargestellt. Die Nachrechnung mit einer Beladung von 0% stellt dabei das finale Modell dar, da es den realen Bedingungen entspricht.

NO _x _TP		
Messung		Simulation
0.15 [g/kWh]		0.15 [g/kWh]
		Simulation_0%Beladung
		0.25 [g/kWh]
Abweichung Simulation/Messung - absolut		
		0.00 [g/kWh]
		0.11 [g/kWh]
Abweichung Messung/Simulation- relativ		
		-1.51 [%]
		72.24 [%]

Abbildung 6-32: NO_x_TP Messung zu Simulation Zyklus 04

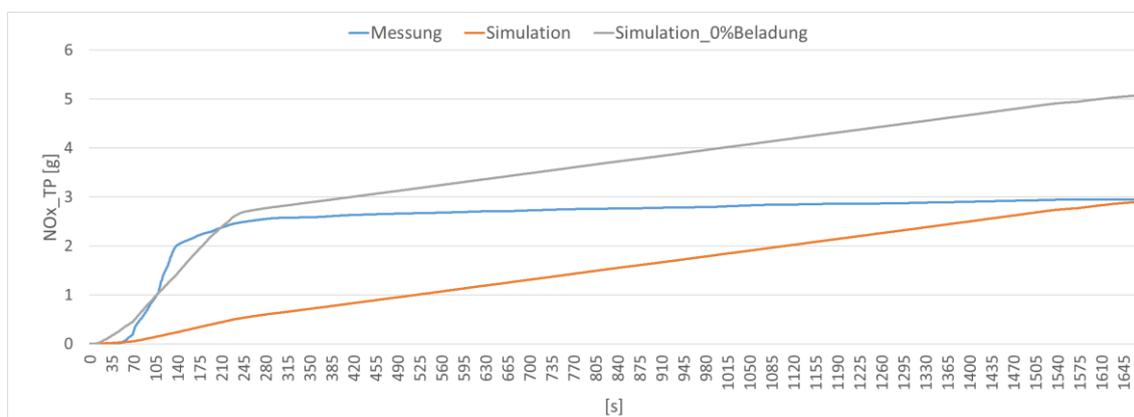


Abbildung 6-33: Verlauf NO_x_TP Messung zu Simulation Zyklus 04

Abbildung 6-37 gibt, wie auch bei den vorherigen Zyklen, Auskunft über die Stickoxid Umsetzung im SCR Katalysator. Die „Motor aus“ NO_x Emissionen liegen bei diesem Zyklus deutlich unter dem üblichen Durchschnitt. Die gemessenen und simulierten Ergebnisse weichen mit gut 40% voneinander ab.

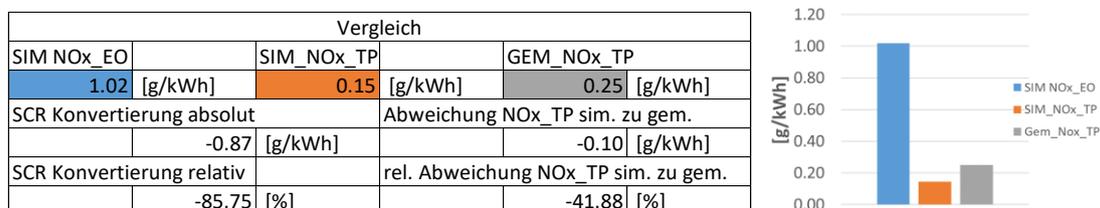


Abbildung 6-34: SCR Umsatz Zyklus 04

6.7.6 Zyklus 05

Auch hier sind die Emissionsergebnisse sehr niedrig. Die Nachrechnung mittels Simulationsmodell führt hier jedoch auf ein sehr zufriedenstellendes Ergebnis. Auch die kumulierten Emissionsmassen können mit dem Modell gut nachsimuliert werden. Da es

während und vor diesem Zyklus zu keiner Abkühlung gekommen ist, greift das implementierte ANB-Modell nicht in die Simulation ein. Lediglich die zusätzlich simulierte Nicht-Betriebsphasen verändern das Ergebnis im Vergleich zu dem Ergebnis in Kapitel 6.5.5. Aufgrund der nur sehr selten vorkommenden Nicht-Betriebsphasen kann aber keine augenscheinliche Abweichung zwischen den Ergebnissen beobachtet werden.

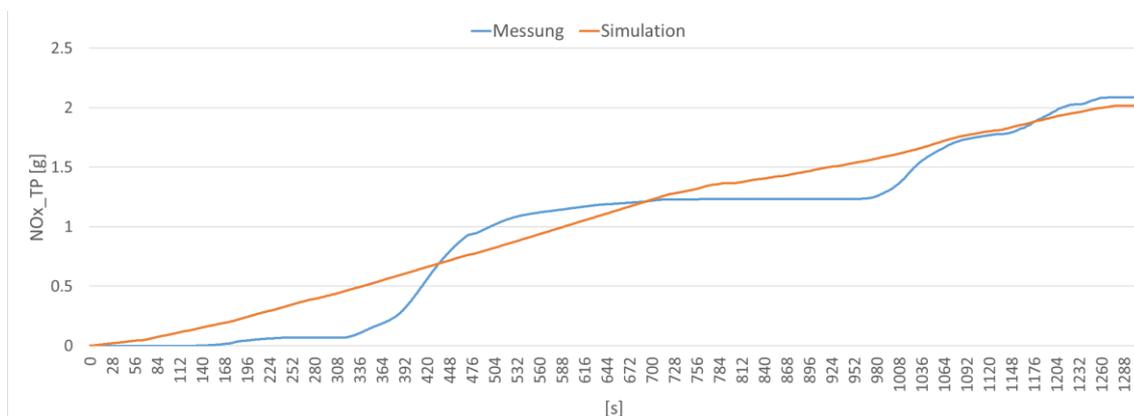


Abbildung 6-35: Verlauf NO_x _TP Messung zu Simulation Zyklus 05

Vergleicht man die NO_x _EO mit den NO_x _TP Emissionen, so kann ein ähnliches Bild wie bei dem vorherigen Zyklus beobachtet werden. Die Simulationsergebnisse stimmen mit den Ergebnissen aus den Messdaten sehr gut überein. Dies wird in Abbildung 6-36 dargestellt.

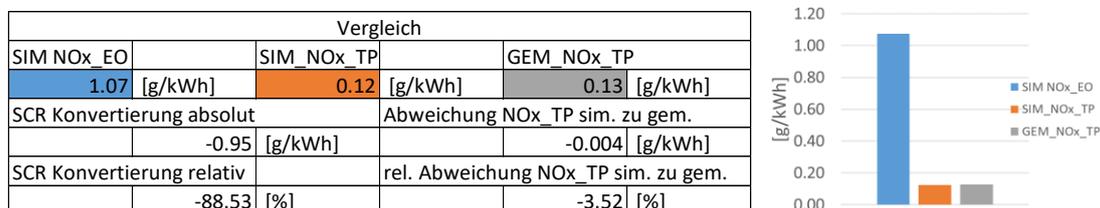


Abbildung 6-36: SCR Umsatz Zyklus 05

6.8 Analyse und Interpretation der Simulation

Die Abweichung zwischen der aufgezeichneten und simulierten Leistung deutet darauf hin, dass der Takeuchi Bagger bezüglich des Kraftstoffverbrauches deutlich über dem HBEFA Durchschnitt liegt. Dies sollte an weiteren Baumaschinen geprüft werden und gegebenenfalls sollten extra Kennfelder für Baumaschinen erstellt werden.

Vergleicht man die nachgerechneten Zyklen auf Basis des erstellten Gesamtkennfeldes mit denen auf Basis der Einzelkennfelder, so kommt man ohne Zweifel zum Schluss, dass die einzelnen Zyklen besser mit den Einzelkennfeldern nachsimuliert werden können. Vor allem Zyklus 04 sticht in diesem Zusammenhang besonders hervor. Das liegt vor allem an den stark variierenden Testbedingungen. Aussagen über den gesamten Tätigkeitsbereich können aber lediglich mit dem Gesamtkennfeld getroffen werden. Die Tatsache, dass bei dieser Nachrechnung nur Betriebsereignisse simuliert wurden, darf dabei nicht außer Acht gelassen werden.

Bei der Erstellung eines allgemeinen Temperaturmodelles müssen alle Zyklen berücksichtigt werden. Mit Hilfe einer iterativen Vorgangsweise können die Simulationsparameter, wie z.B.

Wärmekapazitäten der ANB-Module, Wärmeübergangszahlen an Rohrwänden und Modulen, Kennzahlen der Wärmestrahlung und des konvektiven Wärmeüberganges, etc. optimiert werden. Die in den Hochlast-Zyklen aufgezeichneten Hochtemperaturen können mit dem Modell nicht optimal dargestellt werden. Fahrzeuginterne Heizstrategien können die Ursache dafür sein. Unsere Messdaten geben darüber aber keine Auskunft.

Die Berechnung der NO_x-EO Kennfeldemissionen mit der in Kapitel 6.6 beschriebenen Methode wird verwendet, wenn keine NO_x-EO Emissionen gemessen wurden. Aufgrund fehlender Informationen bezüglich üblicher EO-Emissionen von NRMM, musste auf ein generische „Engine out“ Kennfeld eines schweren Nutzfahrzeuges zurückgegriffen werden. Die Kombination aus dieser Methode und der Abstimmung auf die finalen Tailpipe Emissionen führt zu verhältnismäßig geringen Stickoxidemissionen am Motorausgang. Übliche NO_x-EO Emissionsfaktoren von in etwa 4 Gramm je Kilowattstunde werden unterschritten. Es wäre hilfreich, wenn in weiterer Folge Messdaten zu NO_x-EO Emissionen aufgezeichnet werden, welche als Basis für noch folgende Maschinen verwendet werden könnten.

Die Simulations-Ergebnisse der Tailpipe Emissionen auf Basis des Modelles mit ANB treffen die Messdaten im Durchschnitt sehr gut. Besonders hervorzuheben ist dabei die Genauigkeit der Nachrechnung des zweiten Zyklus.

Die nur geringen gemessenen Kohlenmonoxid Emissionen in den Betriebsphasen der anfänglichen Messungen werden bei der Erstellung des Emissionsmodelles zwar berücksichtigt, haben aufgrund der nur kurzen Aufzeichnungsperioden aber wenig Einfluss. Die CO Messdaten entstanden größtenteils in Nicht-Betriebsphasen. Diese wurden bei der Kennfelderstellung nicht berücksichtigt. Die Nachrechnung der CO Emissionen mit dem Simulationsmodell gestaltet sich daher als schwierig.

7 Schlussfolgerung

Die Durchführung einer Emissionsmessung an einer Baumaschine erfordert die Vorbereitung eines anforderungsgerechten Messprogrammes, welches die realen Bedingungen darstellt und die Wahl eines geeigneten PEMS. Auch für die Erstellung eines maschinenspezifischen Simulationsmodelles ist eine aussagekräftige Messung ausschlaggebend. Die große Bandbreite der heute eingesetzten NRMM macht ein einheitliches Vorgehen im Zusammenhang mit der ISC Messung unmöglich. Der Messaufbau hängt stark von dem verwendeten Messgerät und der zu vermessenden Maschine ab und muss daher im Vorhinein gut durchdacht und geplant werden. Die Anwendung einer „kombinierten“ Messung, in der die Messung aus mehreren Einzelmessungen besteht ist sinnvoll, da es unbedingt notwendig ist, die Aufzeichnungen zwischen den Messungen zu überprüfen. Erschütterungen könnten zu Signalverlusten und somit zu ungültigen oder fehlerhaften Aufzeichnungen führen. Außerdem können dadurch einzelne Betriebsbereiche besser beschrieben und analysiert werden. Die in der Gesetzgebung festgelegte maximale Anzahl von Teilzyklen darf bei „kombinierten“ Messungen aber nicht überschritten werden. Aufgrund der großen Einsatzbreite von Baumaschinen wäre eine gesetzliche Erhöhung der möglichen Teilzyklen für einen einfacheren Messbetrieb denkbar.

Die Messung und die nachfolgende Datenanalyse zeigten, dass der Kraftstoffverbrauch des Takeuchi Baggers über dem durchschnittlichen HBEFA Verbrauch von schweren Nutzfahrzeugen liegt. Um dies auch bei anderen Maschinen zu prüfen und gegebenenfalls eigene NRMM Verbrauchskennfelder zu generieren, sollte die Datenlage bei Baumaschinen erweitert werden. Die NO_x Ergebnisse sind während der Betriebsphasen verhältnismäßig niedrig. Während der Kaltstartphase und den Leerlaufphasen ist dies aber nicht der Fall. Leider können die Partikelergebnisse aufgrund der fehlerhaften Verdünnung nicht in die Bewertung miteinfließen. Der Bagger emittiert im Betrieb nur geringfügige Mengen an Kohlenmonoxid, was auf eine effiziente Umwandlung im Oxidationskatalysator hindeutet. THC-Emissionen können mit dem verwendeten Messgerät von AIP nicht aufgezeichnet werden. Durch die vorgeschriebene Auswertung der Messergebnisse mittels EMROAD werden emissionskritische Ereignisse, wie Leerlauf- und Kaltstartphasen schlichtweg ausgeschlossen. Erfahrungen und Studien zeigen jedoch, dass genau diese Phasen einen erheblichen Anteil an der Gesamtbetriebszeit und somit des gesamten Emissionsausstoßes der Maschinen ausmachen. Mit einer Anpassung jenes Algorithmus, welcher die Einteilung in Betriebsereignisse vornimmt, könnte der Tätigkeitsbereich von NRMM realitätsnäher bewertet werden. Vor allem die Analyse der dritten Messung mit einem Leerlaufanteil von knapp 50 % zeigt den Einfluss der ausgeschnittenen Nicht-Betriebsereignisse sehr gut.

Die anschließende Simulation mit einer Analyse der Simulationsergebnisse hat gezeigt, dass die Nachrechnungen mit den Einzelkennfeldern bessere Ergebnisse liefern als die Nachrechnungen mit dem Gesamtkennfeld. Das liegt vor allem an den stark unterschiedlichen Prüfbedingungen. Diese Unterschiede erschweren auch die Erstellung eines zyklusübergreifenden Temperaturmodelles. Das iterativ bestimmte Temperaturkennfeld kann die Zyklen zwar befriedigend nachstellen, Hochtemperaturen können jedoch nicht optimal nachsimuliert werden. Das finale Modell gilt aber als allgemeingültig und deckt den gesamten Betriebsbereich der Maschine ab. Die verwendete Methode zur Berechnung der NO_xEO Kennfeldemissionen kann einfach angewendet werden, führt jedoch zu sehr niedrigen Stickoxid Emissionsergebnissen am Motorausgang. Das Gesamtmodell inklusive Abgasnachbehandlung zeigt aber sowohl in den Betriebs- als auch in den Nicht-Betriebsphasen gute Ergebnisse für NO_x und spiegelt das reale Emissionsverhalten des gemessenen Baggers wider. Speziell das Aufheiz- und Abkühlverhalten während und nach längeren Leerlaufphasen oder im Kaltstart kann dadurch sinnvoll dargestellt werden.

Literatur

- [1] Sams Theodor.: Schadstoffbildung und Emissionsminimierung bei KFZ. Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2016
- [2] Sturm Peter.; Hausberger Stefan.: Umweltauswirkungen des Verkehrs. Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2020
- [3] Helms Heinrich.; Heidt Christoph.: Erarbeitung eines Konzepts zur Minderung der Umweltbelastung aus NRMM (non road mobile machinery) unter Berücksichtigung aktueller Emissionsfaktoren und Emissionsverminderungsoptionen für den Bestand, Umweltbundesamt Deutschland, 2014
- [4] Europäische Union: Verordnung (EU) 2016/1628 über die Anforderungen in Bezug auf die Emissionsgrenzwerte für gasförmige Schadstoffe und luftverunreinigende Partikel und die Typp Genehmigung für Verbrennungsmotoren für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte, zur Änderung der Verordnungen (EU) Nr. 1024/2012 und (EU) Nr. 167/2013 und zur Änderung und Aufhebung der Richtlinie 97/68/EG
- [5] Europäische Union: Verordnung (EU) 2017/655 zur Ergänzung der Verordnung (EU) 2016/1628 des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Überwachung der Emissionen gasförmiger Schadstoffe von in Betrieb befindlichen Verbrennungsmotoren in nicht für den Straßenverkehr bestimmten mobilen Maschinen und Geräten
- [6] Steinsberg A.: Motoren für mobile Maschinen neu geregelt, WKO, 2016
- [7] Fecke M.: Bewertung der Energieeffizienz von Baumaschinen mithilfe einer praxisnahen Lastzyklusentwicklung für einen In-Situ-Test, Dissertation, Wuppertal 2018
- [8] Europäische Union: Richtlinie 2004/26/EG über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte. ABl. Nr. L 225 vom 25.06.2004
- [9] European Commission: NON ROAD ENGINES CONFORMITY TESTING BASED ON PEMS, Luxembourg 2013
- [10] JRC: Real Driving Emissions, 2018-2019 assessment of Portable Emissions Measurement Systems (PEMS) measurement uncertainty, Luxembourg 2020
- [11] TNO: Use of construction machines and the associated NOx and CO2 emissions, 2018
- [12] DEUTZ: Datenblatt Deutz TCD 3.6, Köln 2016
- [13] Hausberger, S.; Rexeis, M.; Dippold, M.: User Guide to the PHEM Emission Model (Status 22.01.2018). Graz University of Technology, 2018
- [14] Stuart B.: Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Application, John Wiley and Sons, Ltd., Sydney 2004

- [15] J.Y. Wong, R.L. Anderson: Non- Dispersive Infrared Gas Measurement, IFSA, Oak Ridge, Tennessee 2012
- [16] Blassnegger J.: PEMS, On-Board Messtechnik. In: Laborübung Motor und Umwelt. Skriptum, Technische Universität Graz, 2015
- [17] Y. Pan, L. Dong, X. Yin, H. WU: Compact and Highly Sensitive NO₂ Photoacoustic Sensor for Environmental Monitoring, Molecules, 2020
- [18] European Comission-Joint Research Centre: EU Real Driving Emissions Regulations: Analysis of PEMS data: EU-EMROAD Tool, 2019
- [19] Matzer C.: Bestimmung von Kraftstoffverbrauch und Abgasemissionen von Pkw in realen Betriebszuständen mittels Messung und Simulation, Dissertation, Graz 2020
- [20] Weller K.: Emission Models for Heavy Duty Vehicles Based on On-road Measurements, Dissertation, Graz 2020
- [21] Matzer C.; Weller K.; Dippold M.; Lipp S.; Röck M.; Rexeis M.; Hausberger S.: Update of emission factors for HBEFA Version 4.1, Graz 2019

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Motorkategorien [5].....	5
Abbildung 3-2: „NRE“ Unterklassen [4]	6
Abbildung 3-3: Grenzwerte der NRE Motorklassen für die „Stage V“ Abgasnorm [4].....	7
Abbildung 3-4: stationäre Prüfzyklen NRE [4].....	8
Abbildung 3-5: instationäre Prüfzyklen NRE [4]	8
Abbildung 3-6: PEMS Prüfparameter [5]	10
Abbildung 3-7: Messprinzipien Gas Analysatoren [10]	11
Abbildung 4-1: Bagger Takeuchi [11]	13
Abbildung 4-2: Fahrzeugdaten Takeuchi [11]	13
Abbildung 4-3: Deutz Motor TCD3.6L4 [11].....	14
Abbildung 4-4: PEMS AIP	15
Abbildung 4-5: EFM	15
Abbildung 4-6: Messaufbau Rückseite	16
Abbildung 4-7: Messaufbau Seitenansicht.....	16
Abbildung 4-8: „CAN Bus“ Anbindung	17
Abbildung 4-9: „ECU“ Datenaufzeichnung.....	17
Abbildung 4-10: Messprogramm Takeuchi	18
Abbildung 4-11: Messgerät Kalibrierung	19
Abbildung 4-12: Massenstromvergleich Messung 01.....	21
Abbildung 4-13: CO ₂ mit Motordrehzahl	22
Abbildung 4-14: CO ₂ kumuliert mit Motordrehzahl.....	22
Abbildung 4-15: NO _x mit Motordrehzahl	22
Abbildung 4-16: NO _x kumuliert mit Motordrehzahl.....	23
Abbildung 4-17: PN mit Motordrehzahl	23
Abbildung 4-18: PN kumuliert mit Motordrehzahl.....	23
Abbildung 4-19: Kraftstoffverbrauch Messung 01	24
Abbildung 4-20: „Anlaufphase“ und „Warmphase“ Messung 01	25
Abbildung 4-21: Massenstromvergleich Messung 02.....	25
Abbildung 4-22: CO ₂ mit Motordrehzahl	26
Abbildung 4-23: CO ₂ kumuliert mit Motordrehzahl.....	26
Abbildung 4-24: NO _x mit Motordrehzahl	26
Abbildung 4-25: NO _x kumuliert mit Motordrehzahl.....	26
Abbildung 4-26: PN mit Motordrehzahl	27
Abbildung 4-27: PN kumuliert mir Motordrehzahl	27
Abbildung 4-28: Kraftstoffverbrauch Messung 02	28

Abbildung 4-29: „Anlaufphase“ und „Warmphase“ Messung 02	28
Abbildung 4-30: Massenstromvergleich Messung 03.....	29
Abbildung 4-31: CO ₂ mit Motordrehzahl	29
Abbildung 4-32: CO ₂ kumuliert mit Motordrehzahl.....	29
Abbildung 4-33: NO _x mit Motordrehzahl	30
Abbildung 4-34: NO _x kumuliert mit Motordrehzahl.....	30
Abbildung 4-35: NO _x mit Abgastemperatur vor SCR	30
Abbildung 4-36: PN mit Motordrehzahl	31
Abbildung 4-37: PN kumuliert mit Motordrehzahl.....	31
Abbildung 4-38: Kraftstoffverbrauch Messung 03	32
Abbildung 4-39: „Anlaufphase“ und „Warmphase“ Messung 03	32
Abbildung 4-40: Massenstromvergleich Messung 04.....	33
Abbildung 4-41: CO ₂ mit Motordrehzahl	33
Abbildung 4-42: CO ₂ kumuliert mit Motordrehzahl.....	33
Abbildung 4-43: NO _x mit Motordrehzahl	34
Abbildung 4-44: NO _x kumuliert mit Motordrehzahl.....	34
Abbildung 4-45: PN mit Motordrehzahl	34
Abbildung 4-46: NO _x kumuliert mit Motordrehzahl.....	34
Abbildung 4-47: Kraftstoffverbrauch Messung 04	35
Abbildung 4-48: „Anlaufphase“ und „Warmphase“ Messung 04	35
Abbildung 4-49: Massenstromvergleich Messung 05.....	36
Abbildung 4-50: CO ₂ mit Motordrehzahl	36
Abbildung 4-51: CO ₂ kumuliert mit Motordrehzahl.....	36
Abbildung 4-52: NO _x mit Motordrehzahl	37
Abbildung 4-53: NO _x kumuliert mit Motordrehzahl.....	37
Abbildung 4-54: PN mit Motordrehzahl	37
Abbildung 4-55: PN kumuliert mit Motordrehzahl.....	37
Abbildung 4-56: Kraftstoffverbrauch Messung 05	38
Abbildung 4-57: „Anlaufphase“ und „Warmphase“ Messung 05	38
Abbildung 4-58: Gesamtergebnisse	39
Abbildung 4-59: Ergebnisse Anlaufphase.....	39
Abbildung 4-60: Ergebnisse Warmphase.....	39
Abbildung 4-61: Vergleich CO ₂	40
Abbildung 4-62: Vergleich CO	40
Abbildung 4-63: Vergleich NO _x	41
Abbildung 4-64: Messwerte Partikelanzahl	41

Abbildung 4-65: Verdünnungsfaktor mit Partikelanzahl	42
Abbildung 5-1: „Mittelungsfenster“-Methode	44
Abbildung 5-2: Gesamttest.....	47
Abbildung 5-3: EMROAD Betriebsereigniseinteilung	47
Abbildung 5-4: Manuelle Betriebsereigniseinteilung	48
Abbildung 5-5: EMROAD und manuelle Einteilung.....	49
Abbildung 5-6: Manuell erstellter Gesamtzyklus mit ausschließlich Betriebsereignissen	49
Abbildung 5-7: Ergebnisse Gesamttest Auswertung	50
Abbildung 5-8: Übereinstimmungsfaktoren Gesamttest.....	51
Abbildung 5-9: 90. Perzentil	51
Abbildung 5-10: Vergleich „90. Perzentil“ mit Durchschnittswerten	52
Abbildung 5-11: Darstellung „90 Perzentil“ zu Durchschnittswerten	52
Abbildung 5-12: Messung 03 Betriebsereignis Einteilung	53
Abbildung 5-13: Ergebnis-Auswertung Messung 03	54
Abbildung 5-14: Übereinstimmungsfaktoren Messung 03	54
Abbildung 5-15: Vergleich 90. Perzentil mit Durchschnittswerten NO _x Messung 03	55
Abbildung 5-16: Darstellung 90. Perzentil zu Durchschnittswerten NO _x Messung 03	55
Abbildung 6-1: Berechnungsmodell PHEM [13].....	57
Abbildung 6-2: Volllastkurve 100kW TCD 3.6 Deutz Motor [12].....	58
Abbildung 6-3: Betriebsbereich mit Volllast- und Schlepplastkurve.....	59
Abbildung 6-4: Leistungsvergleich „ECU“ zu „PHEM“	60
Abbildung 6-5: gemessene Arbeit zu simulierter Arbeit	60
Abbildung 6-6: Kennfelderstellung.....	61
Abbildung 6-7: CO ₂ Vergleich Nachrechnung Zyklus 01 mit G-KF und E-KF.....	62
Abbildung 6-8: NO _x Vergleich Nachrechnung Zyklus 01 mit G-KF und E-KF	62
Abbildung 6-9: CO ₂ Vergleich Nachrechnung Zyklus 02 mit G-KF und E-KF.....	63
Abbildung 6-10: NO _x Vergleich Nachrechnung Zyklus 02 mit G-KF und E-KF	63
Abbildung 6-11: CO ₂ Vergleich Nachrechnung Zyklus 03 mit G-KF und E-KF.....	63
Abbildung 6-12: NO _x Vergleich Nachrechnung Zyklus 03 mit G-KF und E-KF	64
Abbildung 6-13: CO ₂ Vergleich Nachrechnung Zyklus 04 mit G-KF und E-KF.....	64
Abbildung 6-14: NO _x Vergleich Nachrechnung Zyklus 04 mit G-KF und E-KF	64
Abbildung 6-15: CO ₂ Vergleich Nachrechnung Zyklus 05 mit G-KF und E-KF.....	65
Abbildung 6-16: NO _x Vergleich Nachrechnung Zyklus 05 mit G-KF und E-KF	65
Abbildung 6-17: Modell der Abgasnachbehandlung	66
Abbildung 6-18: Temperaturkennfeld „Engine Out“	67
Abbildung 6-19: Temperaturvergleich Zyklus 01	68

Abbildung 6-20: Temperaturvergleich Zyklus 02.....	69
Abbildung 6-21: Temperaturvergleich Zyklus 03.....	69
Abbildung 6-22: Temperaturvergleich Zyklus 04.....	70
Abbildung 6-23: Temperaturvergleich Zyklus 05.....	70
Abbildung 6-24: Berechnung NO _x _EO Kennfeldemissionen.....	71
Abbildung 6-25: Temperaturlimit für NH ₃ Einspritzung	73
Abbildung 6-26: kumulierte NO _x _TP Messung zu Simulation Zyklus 01	73
Abbildung 6-27: SCR Umsatz Zyklus 01	74
Abbildung 6-28: Verlauf NO _x _TP Messung zu Simulation Zyklus 02	74
Abbildung 6-29: SCR Umsatz Zyklus 02	74
Abbildung 6-30: Verlauf NO _x _TP Messung zu Simulation Zyklus 03	75
Abbildung 6-31: SCR Umsatz Zyklus 03	75
Abbildung 6-32: NO _x _TP Messung zu Simulation Zyklus 04	76
Abbildung 6-33: Verlauf NO _x _TP Messung zu Simulation Zyklus 04	76
Abbildung 6-34: SCR Umsatz Zyklus 04	76
Abbildung 6-35: Verlauf NO _x _TP Messung zu Simulation Zyklus 05	77
Abbildung 6-36: SCR Umsatz Zyklus 05	77