

62

Berichte aus dem TFZ

Abgasverhalten von Fahrzeugen im realen Betrieb mit alternativen Kraftstoffen

— Bestimmung mit einem
portablen
Emissionsmesssystem (PEMS)



**Abgasverhalten von Fahrzeugen im realen Betrieb mit alternativen
Kraftstoffen – Bestimmung mit einem portablen
Emissionsmesssystem (PEMS)**



Abgasverhalten von Fahrzeugen im realen Betrieb mit alternativen Kraftstoffen – Bestimmung mit einem portablen Emissionsmesssystem (PEMS)

Georg Huber
Dr. Klaus Thuneke
Dr.-Ing. Peter Emberger
Dr. Edgar Remmele

Berichte aus dem TFZ 62

Straubing, April 2019

Titel: Abgasverhalten von Fahrzeugen im realen Betrieb mit alternativen Kraftstoffen – Bestimmung mit einem portablen Emissionsmesssystem (PEMS)
Autoren: Georg Huber, Dr. Klaus Thuneke, Dr.-Ing. Peter Emberger, Dr. Edgar Remmele
Projektleiter: Dr. Edgar Remmele
Bearbeiter: Georg Huber, Thomas Kießlinger

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie unter dem Förderkennzeichen BE/15/01 gefördert. Die Projektlaufzeit begann am 01.01.2015 und endete zum 30.06.2018. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

© 2019
Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Straubing

Alle Rechte vorbehalten.

Kein Teil dieses Werks darf ohne schriftliche Einwilligung des Herausgebers in irgendeiner Form reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt, verbreitet oder archiviert werden.

Unter Verwendung mineralölfreier Druckfarben (Mineralölanteil < 1 %) gedruckt auf chlorfreiem Papier aus nachhaltiger, zertifizierter Waldbewirtschaftung.

ISSN: 1614-1008

Hrsg.: Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ)
Schulgasse 18, 94315 Straubing
E-Mail: poststelle@tfz.bayern.de
Internet: www.tfz.bayern.de

Redaktion: Georg Huber, Ulrike Ammer
Verlag: Eigenverlag
Erscheinungsort: Straubing
Erscheinungsjahr: 2019
Gestaltung: Georg Huber

Fotonachweis: Georg Huber, Sebastian Mautner, Ulrich Eidenschink

Danksagung

Beim Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie bedanken wir uns für die Finanzierung des Vorhabens. Insbesondere bei Herrn Dr. Klaus Keisel, Herrn Dr. Christoph Härle sowie Herrn Florens Dittrich möchten wir uns für die stets sehr gute Zusammenarbeit und das entgegengebrachte Vertrauen bedanken.

Großer Dank gebührt Herrn Prof. Dr. Jan Czerwinski von der Berner Fachhochschule, Abgasprüfstelle und Motorenlabor (AFHB) sowie seinen Kollegen Yan Zimmerli und Philippe Wili für die hervorragende Kooperation bei der Untersuchung der Realemissionen von Pkw mit alternativen Kraftstoffen.

Ein herzlicher Dank gilt der BayWa AG, besonders Herrn Daniel Steffl und Herrn Hermann Schwankner, sowie der AGCO Fendt GmbH, insbesondere Herrn Walter Wagner, für die Unterstützung des Forschungsvorhabens durch die Bereitstellung eines Pflanzenöltraktors und die stets sehr gute Kooperation.

Auch der AGCO Deutschland GmbH – Geschäftsbereich Valtra, vertreten durch Herrn Peter Kogel, möchten wir für die Bereitstellung eines Dual-Fuel-Traktors danken.

Bedanken möchten wir uns weiterhin beim John Deere European Technology Innovation Center (ETIC) und bei der John Deere GmbH & Co. KG, insbesondere bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Pickel, Herrn Dr.-Ing. Axel Kunz sowie Herrn Michael Hinrichs für die sehr gute Zusammenarbeit und die Bereitstellung eines Pflanzenöltraktors für Versuche.

Ein großer Dank gilt den Bayerischen Staatsforsten, insbesondere Herrn Dr. Michael Kutscher, die uns die Messung eines Harvesters ermöglichten, und den Fahrern Herrn Gregor Friedl und Herrn Gerhard Redenböck, die mit der installierten Messtechnik am Harvester umsichtig die Holzernte durchführten.

Ein herzlicher Dank gilt Herrn Günter Putz vom Gutsbetrieb Mainkofen, auf dessen Flächen wir die Messung eines Traktors durchführen konnten.

Die Autoren

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis.....	11
Abkürzungsverzeichnis	13
1 Einleitung	17
2 Problemstellung und Zielsetzung.....	19
3 Stand des Wissens.....	21
3.1 NRMM PEMS Pilot Programme	21
3.2 Weitere Untersuchungen.....	25
3.3 Zusammenfassung	27
4 Material und Methoden	29
4.1 Portables Emissionsmesssystem	29
4.1.1 Power Distribution and Control Module (PDCM)	30
4.1.2 Fuel Economy Meter (FEM)	32
4.1.3 NO/NO ₂ Gas Analyzer (NO _x).....	33
4.1.4 Total Hydrocarbon and Methane Analyzer (DualFID)	33
4.1.5 Micro Proportional Sampling System (MPS)	33
4.1.6 Particulate Filter System (PFS).....	34
4.1.7 Continuous Particulate Monitor (CPM)	34
4.1.8 In Vehicle Control Module (ICM)	34
4.1.9 IO Module	35
4.2 Mobile Kraftstoffverbrauchsmessung.....	35
4.3 Energieversorgung des PEMS	39
4.3.1 Stromerzeuger	39
4.3.2 Batterie	40
4.3.3 Ladegerät.....	40
4.3.4 Batterieumschalter	40
4.3.5 Ausschließlicher Batteriebetrieb ohne Stromerzeuger	40
4.4 Gesetzliche Vorgaben zur Methodik bei der Durchführung von Realemissionsmessungen	41
4.5 Untersuchte Fahrzeuge	43
4.5.1 Nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte (NRMM)	43
4.5.2 Leichte Personenkraftwagen (Pkw)	46
4.6 Kraftstoffe.....	47
4.7 Teststrecken.....	47
4.7.1 Teststrecken für Traktoren	48
4.7.1.1 Teststrecke für Traktoren Version 2016	48

4.7.1.2	Teststrecke für Traktoren Version 2018	51
4.7.2	Teststrecke für Pkw.....	53
4.8	Stationäre Emissionsmesstechnik	54
4.9	Berechnung der Leistung für die Emissionsbewertung	54
4.10	Korrektur der NO_x-Emissionen um Umgebungsfeuchte und Umgebungstemperatur	56
5	Ergebnisse	57
5.1	Inbetriebnahme des PEMS	57
5.1.1	Erstinbetriebnahme des PEMS	57
5.1.2	Update des PEMS auf Ecostar Plus.....	58
5.1.2.1	DualFID	58
5.1.2.2	CAN-Output.....	59
5.1.2.3	Erfassung von Analogsignalen	59
5.1.2.4	Stromversorgung des PEMS	59
5.1.2.5	Datenaufzeichnung und Datenauswertung.....	60
5.2	Mobiles Kraftstoffverbrauchsmesssystem dQRoad.....	60
5.2.1	Aufbau einer geeigneten Datenerfassung	60
5.2.2	Vergleichsmessungen dQRoad und Kraftstoffwaage	62
5.3	Konstruktion und Fertigung einer PEMS-Box für den Offroad-Einsatz	63
5.4	Vergleichsmessungen am Traktorenprüfstand	65
5.5	Optimierung der Methodik durch wiederkehrende Feldmessungen an einem Fendt 724 Vario S4.....	70
5.6	Straßenfahrten eines Fendt 724 Vario S4 im Betrieb mit Diesel- und Rapsölkraftstoff.....	78
5.7	Straßenfahrten mit einem Traktor Valtra N101 Hi Tech Dual-Fuel.....	88
5.8	Realemissionen eines John-Deere-6215R-Pflanzenöltraktors der Abgasstufe IV	94
5.9	Realemissionen eines John-Deere-1470G-Harvesters im Betrieb mit Diesel- und Rapsölkraftstoff.....	99
5.10	Realemissionen eines Audi A4 flexible fuel und Vergleich mit Ergebnissen vom Abgasprüfstand der FH Bern.....	107
5.11	Realemissionen eines Audi A3 g-tron im Benzin- und CNG-Betrieb	110
	Zusammenfassung	119
	Abstract	123
	Quellenverzeichnis	125

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Festlegung von Mittelungsfenstern auf Grundlage der CO ₂ -Masse nach der „Moving Averaging Window (MAW)“-Methode, eigene Darstellung nach [16]	23
Abbildung 2:	„Not To Exceed (NTE)“-Kontrollbereich im Last-Drehzahl-Kennfeld	24
Abbildung 3:	Aufbau des PEMS in der speziell entwickelten mobilen Schutzbox vor dem Update	29
Abbildung 4:	Einzelkomponenten des portablen Emissionsmesssystems (PEMS), Semtech Ecostar	31
Abbildung 5:	Webbrowserbasierte Benutzeroberfläche des PEMS-Systems nach dem Update	32
Abbildung 6:	Kraftstoffverbrauchsmessgerät dQRoad (links) und Datenerfassungssystem (rechts)	36
Abbildung 7:	Stromerzeuger für den mobilen Betrieb des PEMS	39
Abbildung 8:	Teststrecke für Traktoren Version 2016	50
Abbildung 9:	Höhenprofil der Teststrecke für Traktoren Version 2016	51
Abbildung 10:	Teststrecke für Traktoren Version 2018	52
Abbildung 11:	Höhenprofil der Teststrecke für Traktoren Version 2018	53
Abbildung 12:	Teststrecke für PKW Version 2018	54
Abbildung 13:	Erstinbetriebnahme des PEMS	58
Abbildung 14:	Bildschirmoberfläche des LabVIEW-Programms zur Datenerfassung und Verarbeitung der Signale des dQRoad	61
Abbildung 15:	Ballastgewichte zur Montage an der PEMS-Box	64
Abbildung 16:	PEMS und stationäre Emissionsmesstechnik am Traktorenprüfstand	66
Abbildung 17:	Vergleich mobiler und stationärer Emissionsmesstechnik am Traktorenprüfstand mit drei unterschiedlichen Traktoren, unterschiedlicher Abgasstufe und unter Anwendung verschiedener Testzyklen (Pflügen bzw. Non-Road Transient Cycle (NRTC))	69
Abbildung 18:	PEMS-Messungen auf dem Gutsbetrieb Mainkofen beim Pflügen im Oktober 2015	70
Abbildung 19:	PEMS-Messungen auf dem Gutsbetrieb Mainkofen beim Grubbern im Oktober 2015	71
Abbildung 20:	PEMS-Messprotokoll mit Checkliste	74
Abbildung 21:	PEMS-Messungen mit dem Anbaugerät Kreiselegge im Mai 2017	76
Abbildung 22:	PEMS-Messungen mit den Anbaugeräten Kreiselegge und Sämaschine im Mai 2017	76

Abbildung 23:	PEMS-Messungen mit dem Anbaugerät 7-Schar-Pflug im Oktober 2017	77
Abbildung 24:	Stickstoffoxid-Konformitätsfaktoren aller Mittelwertfenster des Fendt 724 S4 im Betrieb mit Rapsölkraftstoff bei unterschiedlichen Arbeitsvorgängen	78
Abbildung 25:	Fendt 724 Vario S4 mit PEMS im Frontanbau während der RDE-Messungen auf der Traktor-Teststrecke	80
Abbildung 26:	Spezifische NO _x -Emissionen des Traktors bei Straßenfahrten bezogen auf die Zapfwellenarbeit – jeweils drei Wiederholungen inklusive Nicht-Betriebsereignisse	82
Abbildung 27:	Vergleich der NO _x -Emissionsmittelwerte aller gültigen Fenster (Fenstermittelwert) mit dem Quotienten aus NO _x -Schadstoffmasse und gesamter verrichteter Arbeit (einfacher Mittelwert)	84
Abbildung 28:	Fiktiver Emissionsverlauf und Mittelwert der Emission je Fenster mit einer Fensterdauer von 200s	85
Abbildung 29:	Stickstoffoxidemissionen des untersuchten und für Dieselmotorkraftstoff optimierten Traktors bei Straßenfahrten mit Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff bezogen auf die Fahrstrecke (Etappenwert).....	86
Abbildung 30:	Spezifische NO _x -Emissionen des Traktors bei Straßenfahrten bezogen auf die emittierte CO ₂ -Masse – jeweils drei Wiederholungen inklusive Nicht-Betriebsereignisse	88
Abbildung 31:	Valtra N101 Hi Tech Dual-Fuel mit PEMS	89
Abbildung 32:	Emissionen des Traktors Valtra 101 H Dual-Fuel bei RDE-Messungen auf der Traktor-Teststrecke	90
Abbildung 33:	Abweichung des berechneten vom gemessenen Dieselmotorkraftstoffverbrauch mit unterschiedlichen Korrekturfaktoren des Abgasmassenstroms	92
Abbildung 34:	Ausschnitt des Verlaufs des Dieselmotorkraftstoffverbrauchs gemessen mit dQRoad und berechnet nach der Kohlenstoffbilanz-Methode mit verschiedenen Korrekturfaktoren	93
Abbildung 35:	Gesamt-Kraftstoffverbräuche des Traktors bei zwei Diesel- und zwei Dual-Fuel-Messfahrten mit unkorrigiertem und korrigiertem Methanverbrauch.....	94
Abbildung 36:	Pflanzenöltraktor John Deere 6215R mit portablem Emissionsmesssystem	95
Abbildung 37:	Motordrehzahl und -last, Stickstoffoxidemissionen, Abgastemperatur und Gültigkeitsbereiche einer Messfahrt mit Kaltstart und Nicht-Betriebsereignissen	97
Abbildung 38:	Stickstoffoxid-Konformitätsfaktoren aller Mittelwertfenster bei den vier Messfahrten mit Rapsölkraftstoff.....	99
Abbildung 39:	Adapterrahmen zur Montage der PEMS-Box am Heck des Harvesters	101

Abbildung 40:	PEMS-Box am Kran des Forwarders.....	101
Abbildung 41:	Harvester im Einsatz mit PEMS	102
Abbildung 42:	Motordrehzahl und -last, NO _x - und THC-Emissionen, Abgasatemperatur und Gültigkeitsbereiche einer Messfahrt mit Kaltstart und Nicht-Betriebsereignissen.....	104
Abbildung 43:	Kumulierte Stickstoffoxidmasse aufgetragen über der kumulierten Arbeit für Messungen mit Diesel- und Rapsölkraftstoff zu unterschiedlichen Tageszeiten	105
Abbildung 44:	Boxplot-Darstellung der Verteilung der ermittelten Stickstoffoxid- Konformitätsfaktoren bei allen Fahrten gekürzt auf die sechsfache NRTC-Arbeit (144 kWh)	106
Abbildung 45:	Audi Avant A4 2.0 TFSI flexible fuel auf dem Rollenprüfstand der Abgasprüfstelle der FH Bern mit angeschlossener Emissionsmesstechnik	107
Abbildung 46:	Audi Avant A4 2.0 TFSI flexible fuel mit PEMS	108
Abbildung 47:	Änderung der Kohlenstoffmonoxid-, Stickstoffoxid- und Kohlenstoffdioxidemissionen beim Einsatz von E10 bzw. E85 gegenüber E5 bei den durchgeführten Realfahrtmessungen [22]	109
Abbildung 48:	Audi A3 g-tron während der RDE-Fahrten mit installiertem PEMS	110
Abbildung 49:	Installation der Abgasleitung bis zum Flow Tube am Audi A3 g-tron	111
Abbildung 50:	Installiertes PEMS am Heck und im Kofferraum des Audi A3 g-tron	112
Abbildung 51:	Kumulierte CO ₂ -Emissionen über der Fahrstrecke, Höhenprofil und Einteilung in Stadt-, Überland- und Autobahnabschnitte	114
Abbildung 52:	Kumulierte CO-Emissionen über der Fahrstrecke, Höhenprofil und Einteilung in Stadt-, Überland- und Autobahnabschnitte	115
Abbildung 53:	Kumulierte NO _x -Emissionen über der Fahrstrecke, Höhenprofil und Einteilung in Stadt-, Überland- und Autobahnabschnitte	116
Abbildung 54:	Methan- und Gesamtkohlenwasserstoffemissionen des Audi A3 g- tron auf der gesamten Teststrecke und aufgeteilt in Stadt-, Überland- und Autobahnanteil	117
Abbildung 55:	Abgasprobenfilter nach je einer Messfahrt im E10-Betrieb (links) und CNG-Betrieb (rechts).....	118

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Auszug aus dem Kalibrierprotokoll des Kraftstoffverbrauchsmessgeräts dQRoad.....	38
Tabelle 2:	Wärmeausdehnungskoeffizient (γ) verschiedener Kraftstoffe	39
Tabelle 3:	Überblick über die wichtigsten Verordnungen zur Überprüfung der Realemissionen von Verbrennungsmotoren.....	41
Tabelle 4:	Technische Daten des Traktors Fendt 724 Vario S4 [10]	43
Tabelle 5:	Technische Daten des Traktors Valtra N101 Hi Tech [27]	44
Tabelle 6:	Technische Daten des Traktors John Deere 6215R [10]	45
Tabelle 7:	Technische Daten des Harvesters John Deere 1470G [8].....	45
Tabelle 8:	Technische Daten des Audi A4 flexible fuel laut EG-Übereinstimmungsbescheinigung	46
Tabelle 9:	Technische Daten des Audi A3 g-tron laut EG-Übereinstimmungsbescheinigung	46
Tabelle 10:	Verwendete Kraftstoffe mit zugehöriger Norm und im Bericht verwendeten Abkürzungen.....	47
Tabelle 11:	Vergleich des gravimetrisch und mit dQRoad ermittelten Pflanzenölkraftstoffverbrauchs eines Fendt 724.....	62
Tabelle 12:	Versuchsplan für die Straßenfahrten Fendt 724 Vario S4	80
Tabelle 13:	Alternative Auswertungsmethoden	83
Tabelle 14:	Werte für die Berechnung des Referenzwerts für die Auswertung der Emissionsergebnisse nach der CO ₂ -Basis-Methode	87
Tabelle 15:	Eingangswerte für die RDE-Datenauswertung ermittelt auf dem Rollenprüfstand der FH Bern.....	113

Abkürzungsverzeichnis

AGM	Absorbent Glass Mat (absorbierendes Glasvlies)
B20	Dieseldkraftstoff mit einem Anteil von 20 % Biodiesel
C/H-Verhältnis	Kohlenstoff/Wasserstoff-Verhältnis
CADC	Common Artemis Driving Cycles
CF	Conformity Factor (Konformitätsfaktor)
CNG	Compressed Natural Gas (Erdgas)
CPM	Continuous Particulate Monitor
DK	Dieseldkraftstoff
DLG	Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e. V.
DPF	Dieseldpartikelfilter
DualFID	Flammenionisationsdetektor für Methan und Gesamtkohlenwasserstoffe
E10	Ottokraftstoff mit bis zu 10 % Ethanol
E5	Ottokraftstoff mit bis zu 5 % Ethanol
E85	Ethanolkraftstoff
ECU	Engine Control Unit (Motorsteuergerät)
EFM	Exhaust Flow Meter
EGR	Exhaust Gas Recirculation (Abgasrückführung)
FEM	Fuel Economy Meter
FID	Flammenionisationsdetektor
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer
GPS	Global Positioning System
H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
HC	Kohlenwasserstoff
HDV	Heavy Duty Vehicle
He	Helium

ICM	In-Vehicle Control Module
IO	Input/Output Module
ISC	In Service Conformity
ISM	In Service Monitoring
JRC	Joint Research Centre
LDV	Light Duty Vehicle
MAW	Moving Averaging Window
MPS	Micro Proportional Sampling System
MW	Einfacher Mittelwert
NDIR	Non-Dispersive Infrared Spectroscopy
NDUV	Non-Dispersive Ultraviolet Spectroscopy
NEDC	New European Driving Cycle
NMC	Non Methane Cutter
NMHC	Non Methane Hydrocarbons (Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe)
NN	Normal Null
NO	Stickstoffmonoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO _x	Stickstoffoxide
NRMM	Non-Road Mobile Machinery
NRSC	Non-Road Steady Cycle
NRTC	Non-Road Transient Cycle
NTE	Not To Exceed
OBD	On Board Diagnose
PDCM	Power Distribution and Control Module
PDM	Power Distribution Module
PEMS	Portables Emissionsmesssystem
PFS	Particulate Filter System
PKW	Personenkraftwagen

PM	Partikelmasse
PN	Partikelanzahl
RDE	Real Driving Emissions
RK	Rapsölkraftstoff
SCR	Selective Catalytic Reduction (selektive katalytische Reduktion)
THC	Total Hydrocarbons (Gesamtkohlenwasserstoffe)
WLTC	Worldwide harmonized Light Duty Test Cycle
WLTP	Worldwide harmonized Light Vehicles Test Procedure

1 Einleitung

Seit Anfang der 1990er Jahre gibt es eine einheitliche Abgasgesetzgebung in der EU. Seitdem wurden die Grenzwerte bei vorgegebenen standardisierten Prüfzyklen kontinuierlich verschärft. Dies hat dazu geführt, dass bei aktuellen Fahrzeugen Abgasnachbehandlungssysteme eingesetzt werden, um alle limitierten Schadstoffkomponenten – Kohlenstoffmonoxid (CO), Stickstoffoxide (NO_x), Kohlenwasserstoffe (THC), Partikelmasse (PM) – und bei den neuesten Emissionsstufen auch Partikelanzahl (PN) zu reduzieren. Trotz fortschreitender Verschärfung der Abgasgrenzwerte zeigt die kontinuierliche Überwachung der Luftqualität keine wesentliche Verbesserung und an verkehrsnahen Standorten werden noch immer Grenzwerte überschritten [29]. In besonders betroffenen Städten werden deshalb aktuell Fahrverbote für bestimmte Fahrzeuge angeordnet. Es ist zu erwarten, dass sich die tatsächlich ausgestoßenen Emissionen von den am Prüfstand nach standardisierten Prüfzyklen ermittelten Emissionen unterscheiden. Herkömmliche Testzyklen liefern keine realen Fahremissionen limitierter Schadstoffe, weil sie die realen Fahrbedingungen nicht voll abdecken können und am Prüfstand idealisierte Testbedingungen vorherrschen. Es wird davon ausgegangen, dass vor allem nachmotorische Maßnahmen der Abgasnachbehandlung im realen Betrieb geringere Emissionsminderungsraten aufweisen als im Testzyklus. Um Emissionsgrenzwerte im realen Fahrbetrieb einhalten zu können, müssen Abgasnachbehandlungssysteme praktisch kennfeldumfassend, bei einer breiten Palette an Betriebsbedingungen (Drehzahl, Drehmoment, Temperatur etc.) hocheffizient arbeiten und nicht nur für den Testzyklus optimiert sein. Außerdem wurde nachgewiesen, dass Maßnahmen getroffen wurden, die es der Fahrzeugelektronik ermöglichen, zwischen Prüfstandtest und Realfahrt zu unterscheiden, um so unterschiedliche Abgasnachbehandlungsstrategien anzuwenden [3]. Um die realen Emissionen zu messen bzw. um die Erfüllung der Emissionsanforderungen zu überprüfen, sollen aus Sicht des Gesetzgebers zukünftig portable Emissionsmesssysteme (*Portable Emission Measurement System* – PEMS) eingesetzt werden. Studien [21] [7] zu den Abweichungen zwischen dem Emissionsverhalten von Automobilen im Prüfstandstest und im realen Fahrbetrieb, vor allem bei Stickstoffoxiden, bestärken die Forderung, zunächst die Lücken in der europäischen Abgasgesetzgebung zu schließen und die tatsächlichen Emissionen über die gesamte Lebensdauer von Fahrzeugen hinweg zu kontrollieren.

Für Nutzfahrzeuge ist seit der im Jahr 2013 in Kraft getretenen Abgasstufe Euro VI die Prüfung der sogenannten *In Service Conformity* (ISC) am Fahrzeug erforderlich. Dabei werden die Abgasemissionen in Betrieb befindlicher Fahrzeuge in regelmäßigen Abständen über ihre Nutzungsdauer unter realen Fahrbedingungen auf der Straße mit einem PEMS ermittelt. Die gesetzlichen Vorschriften hierzu sind im Wesentlichen in den EU-Verordnungen 582/2011, 64/2012 und 2016/1718 definiert.

Für Pkw wurden 2016, gestützt auf die Verordnung 715/2007, mit den Verordnungen 2016/427 [13] und 2016/646 [14] die ersten beiden Teile der Richtlinien für die Bestimmung von *Real Driving Emissions* (RDE) eingeführt. Und durch die Verordnungen 2017/1151 [16] und 2017/1154 [17] („RDE Package 3“) nochmals überarbeitet und er-

gänzt. Zunächst gilt im Rahmen einer Übergangsphase ein Konformitätsfaktor für Stickstoffoxidemissionen von 2,1, d. h., bei einer RDE-Messung darf der Grenzwert aus 715/2007 um 110 % überschritten werden. In einer zweiten Phase wird der Konformitätsfaktor auf 1,5 gesenkt, sodass nur noch ein Überschreiten des Grenzwerts von 50 % zur Berücksichtigung der zusätzlichen Messunsicherheiten beim Einsatz portabler Emissionsmesssysteme (PEMS) toleriert wird [14]. Der Konformitätsfaktor für die Partikelanzahl beträgt schon ab der Einführung 1,5, für alle anderen limitierten Schadstoffe (CO, THC, THC + NO_x) ist kein Konformitätsfaktor vorgesehen. RDE-Messungen sollen bei der Typzulassung, stichprobenartig bei Neufahrzeugen und auch bei Fahrzeugen mit einer gewissen Laufleistung durchgeführt und so die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte auch im realen Betrieb sichergestellt werden [20]. Zum Zeitpunkt der Berichterstellung wird zudem die Veröffentlichung des „RDE Package 4“ erwartet.

Mit der Verordnung EU 2016/1628 vom 14. September 2016 wurde auch die Überprüfung der Realemissionen nicht für den Straßenverkehr bestimmter mobiler Maschinen und Geräte (*Non-Road Mobile Machinery – NRMM*) gesetzlich verankert. Angelehnt an die Gesetzgebung für schwere Nutzfahrzeuge wurde eine Prüfmethodik zur Überwachung der Einhaltung der Emissionsanforderungen (*In-Service Monitoring*) ausgearbeitet und als Verordnung EU 2017/655 [15] in Kraft gesetzt. Grundlage ist dabei auch der Einsatz portabler Emissionsmesssysteme [19].

Non-Road-Fahrzeuge tragen zu einem wesentlichen Anteil zur Luftverschmutzung im Verkehrssektor bei, da deren Emissionsregulierung deutlich später als bei Nutzfahrzeugen und Pkw eingeführt wurde. 34 % der Partikel und 10 % der Stickstoffoxide, die in Deutschland von Fahrzeugen emittiert werden, entstammen landwirtschaftlichen Maschinen und Geräten [25].

Die Ermittlung der realen Emissionen mit PEMS wird zukünftig bei der Entwicklung und wiederkehrenden Feld-Überprüfung von Fahrzeugen und Arbeitsmaschinen weiter stark an Bedeutung gewinnen. Neben den derzeitigen Einflussgrößen auf die im Testzyklus ermittelten Emissionen von Motoren, wie z. B. Motoreinstellung, Abgasnachbehandlungssystem, Kraftstoff, Prüfzyklus etc., spielen zukünftig auch die Fahrzeuggeometrie, Fahrer, Fahrstil, Verkehrslage bzw. Einsatzart bei NRMM und Umgebungsbedingungen wichtige Rollen. Die Umweltrelevanz der Messergebnisse ist höher, da das reale Einsatzspektrum untersucht wird. Die Messergebnisse sind allerdings nur bedingt reproduzierbar und vergleichbar. Trotzdem ist eine Rückkopplung der PEMS-Ergebnisse in den Entwicklungsprozess von Fahrzeug/Motor notwendig. Die Betrachtung von RDE wird die Konfiguration und den Aufbau von Antriebsstrang und Abgasnachbehandlung verändern, deren Entwicklungsprozess beeinflussen und den Aufwand für Feldtests erhöhen. Resultate werden jedoch geringer emittierende Fahrzeuge und langfristig eine bessere Luftqualität sein [30].

Um die Ziele des Pariser Klimaschutzabkommens zu erreichen, müssen künftig vermehrt regenerative Kraftstoffe eingesetzt werden. Hierfür liegen bisher nur wenige Ergebnisse von Emissionsmessungen unter realen Fahrbedingungen vor.

2 Problemstellung und Zielsetzung

Es wird erwartet, dass in der zukünftigen Abgasgesetzgebung die Bewertung von *Real Driving Emissions* auch im Non-Road-Sektor eine zunehmende Rolle spielen wird. Bisher wurden jedoch nur wenige Emissionsmessungen an Traktoren und anderen Maschinen und Geräten mit einem portablen Emissionsmesssystem im realen Feldeinsatz durchgeführt. Insbesondere für den Betrieb mit Biokraftstoffen liegen zu wenige Erkenntnisse vor. Eine einheitliche Methodik für Realemissionsmessungen war zu Beginn des Projekts vom Gesetzgeber noch nicht definiert und der Einfluss der Methode und der Umgebungsbedingungen auf das Messergebnis ist weitgehend unbekannt. Außerdem liegen noch keine Erfahrungen bezüglich der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und der Höhe des Messfehlers vor.

Ziel des Projekts ist es, ein portables Emissionsmesssystem (PEMS) für gasförmige Emissionskomponenten und Partikelmasse zum schwerpunktmäßigen Einsatz an nicht für den Straßenverkehr bestimmten mobilen Maschinen und Geräten (*Non-Road Mobile Machinery* – NRMM) in Betrieb zu nehmen und eine Auswertungsmethode der Messdaten zu erarbeiten und zu evaluieren, die auch für den Einsatz von Biokraftstoffen, insbesondere Rapsölkraftstoff, geeignet ist. Des Weiteren sollen RDE-Messungen an unterschiedlichen Maschinen und Geräten durchgeführt werden, wobei auch die Betriebsbedingungen der Maschinen variiert und verglichen werden sollen. Neben Dieselkraftstoff sollen die Realemissionen auch mit Rapsölkraftstoff und Methan ermittelt werden.

Anhand der erhobenen Daten kann ein Beitrag zur Bestimmung der tatsächlichen Emissionen mobiler Arbeitsmaschinen geleistet, die Weiterentwicklung biokraftstofftauglicher Antriebssysteme unterstützt und Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität und zum Klimaschutz abgeleitet werden.

3 Stand des Wissens

Im Folgenden wird der Stand des Wissens zum Thema Realfahrt-Emissionen von Fahrzeugen der Non-Road-Kategorie (*Non-Road Mobile Machinery* – NRMM) im Betrieb mit Biokraftstoffen zusammengefasst.

3.1 NRMM PEMS Pilot Programme

Auf EU-Ebene wurde das „NRMM PEMS Pilot Programme“ initiiert, um die Einführung von PEMS als Werkzeug zur Überprüfung der *In-Service Conformity* (ISC) von Non-Road-Fahrzeugen hinsichtlich ihrer Abgasemissionen zu fördern. BONNEL et al. (2013) [2] verfolgten dabei folgende Ziele:

- Validierung des Einsatzes von PEMS (nur gasförmige Schadstoffe, keine Partikelmesstechnik), um die ISC von in NRMM installierten Motoren zu überprüfen,
- Evaluierung und Implementierung des Gas-PEMS-Testprotokolls für NRMM sowie Land- und Forstmaschinen,
- Bereitstellung von Daten für den nachträglichen Abgleich mit den Typgenehmigungsvoraussetzungen nach 97/68/EC,
- Bereitstellung weiterer Daten zum Fortschritt bei Gas-PEMS zur Aufnahme in die europäische Typgenehmigungsgesetzgebung,
- Entwicklung und Veröffentlichung einer Best-Practice-Methode zur Bestimmung der ISC von NRMM sowie Land- und Forstmaschinen mit Gas-PEMS,
- Bewertung des Dialogs zwischen Herstellern und Typgenehmigungsinstitutionen,
- soweit möglich zusätzlich auch Messung von Partikelemissionen während der Messung gasförmiger Emissionen.

In diesem Zusammenhang wurden vornehmlich NRMM sowie Land- und Forstmaschinen mit Selbstzündungsmotoren mit variabler Drehzahl in einem Leistungsbereich von 56 bis 560 kW der Abgasstufe IIIB untersucht. Die verwendeten Messgeräte waren dabei Sensors Semtech-D/DS-, Horiba-OBS- oder vergleichbare Systeme und es wurden folgende Parameter aufgezeichnet: NO_x, CO, CO₂, THC, Abgasmassenstrom, ECU-Daten, GPS- und Wetterdaten. Die Testmaschinen wurden unter üblichen Einsatzzyklen verwendet und je Test musste eine Arbeit von mindestens der drei- bis fünffachen NRTC-Arbeit geleistet werden. Als erster Schritt bei der Auswertung der Daten wurde ein Time-Alignment durchgeführt, um einen zeitlichen Offset zwischen Gasanalysatoren, Abgasmassenstrommessgerät und ECU-Daten auszugleichen. Dabei wurde eine Methode zur Maximierung des Korrelationsfaktors (R^2) erfolgreich angewendet. Als Nächstes erfolgte eine Datenkonsistenz-Überprüfung. Hierbei wurde als Erstes überprüft, ob alle Parameter vorhanden und plausibel sind bzw. im Messbereich der Analysatoren liegen. Als nächster Schritt sollte eine Korrelation zwischen dem auf Basis einer Kohlenstoffbilanz

berechneten und dem von der ECU ausgegebenen Kraftstoffverbrauch berechnet werden. Es war jedoch bei den meisten getesteten Maschinen kein ECU-Signal für den Verbrauch verfügbar, sodass in dieser Hinsicht keine Erkenntnisse gewonnen werden konnten. Im dritten Schritt wurde eine Plausibilitätsprüfung der berechneten Werte für den spezifischen Kraftstoffverbrauch durchgeführt. Dieser wurde aus dem von der Kohlenstoffbilanz abgeleiteten Kraftstoffverbrauch und den ECU-Daten für Drehmoment und Drehzahl berechnet. In den meisten Fällen konnte ein plausibler Wert ermittelt werden. In wenigen Ausnahmefällen wurden jedoch auch abnormale spezifische Verbräuche festgestellt. Da dies vielfältige Ursachen haben kann (z. B. fehlerhafte ECU-Signale), wurden die jeweiligen Maschinenhersteller über die Ergebnisse informiert.

Für die eigentliche Datenauswertung wurden zwei Methoden aus dem Heavy-Duty-Bereich als Grundlage herangezogen und verglichen und sollten an den NRMM-Anwendungsfall angepasst werden: die sogenannte europäische „Moving Averaging Window (MAW)“- und die US-amerikanische „Not to Exceed (NTE)“-Methode.

Bei der MAW-Methode dient als Basis der Zertifizierungsprozess bei der Typgenehmigung. Referenz für die Größe eines Fensters ist die Zyklusarbeit bzw. der Summenwert der CO₂-Masse-Emissionen während des Prüfzyklus, in der Regel *Non-Road Transient Cycle* (NRTC). In Abbildung 1 ist die Festlegung der Dauer der Mittelungsfenster dargestellt. Das erste Fenster startet beim ersten Datenpunkt und bleibt so lange geöffnet, bis die Referenzgröße (einfache NRTC-CO₂-Masse oder -Arbeit) erreicht wurde. Für diesen Bereich werden dann die Mittelwerte der Messsignale gebildet. Das nächste Fenster startet beim zweiten Datenpunkt und endet wieder bei Erreichen der Referenzgröße. Dies wird so oft wie möglich wiederholt. Die minimale Datenfrequenz sollte bei 1 Hz liegen. Ausgeschlossen werden Punkte, an denen die Messgeräte beispielsweise bezüglich einer Nullpunktdrift untersucht werden und bei denen die Daten außerhalb der gültigen Bedingungen liegen (z. B. geografische Höhe, Umgebungstemperatur oder Motor-temperatur nach Richtlinie 2004/26/EC). Eine detaillierte Beschreibung der Methode inkl. Berechnungsformeln und Grafiken kann BONNEL et al. (2013) [2] entnommen werden. Nach der Berechnung der Fenster werden Fenster ausgeschlossen, bei denen die mittlere Leistung unterhalb von 20 % der maximalen Motorleistung liegt (*20 % Power Threshold*). Als Referenzwert für die Emissionen wird dann das kumulative 90. Perzentil herangezogen. Nach ersten Auswertungen stellte sich heraus, dass, im Gegensatz zum Heavy-Duty-Bereich, je nach Anwendungsfall der untersuchten Maschine auch längere Leerlaufphasen auftreten können. Dadurch würde bei nicht angepasster Auswertung das eigentliche Ziel – zu überprüfen, ob der Motor im ausgebauten Zustand die Typgenehmigungsprüfung bestehen würde – verfehlt und das Hauptaugenmerk auf die Leerlaufemissionen gerichtet. Deshalb wurden zusätzlich zu dem *20 % Power Threshold* sogenannte *Working-* und *Non-Working Events* definiert und so längere Leerlaufzeiten herausgefiltert.

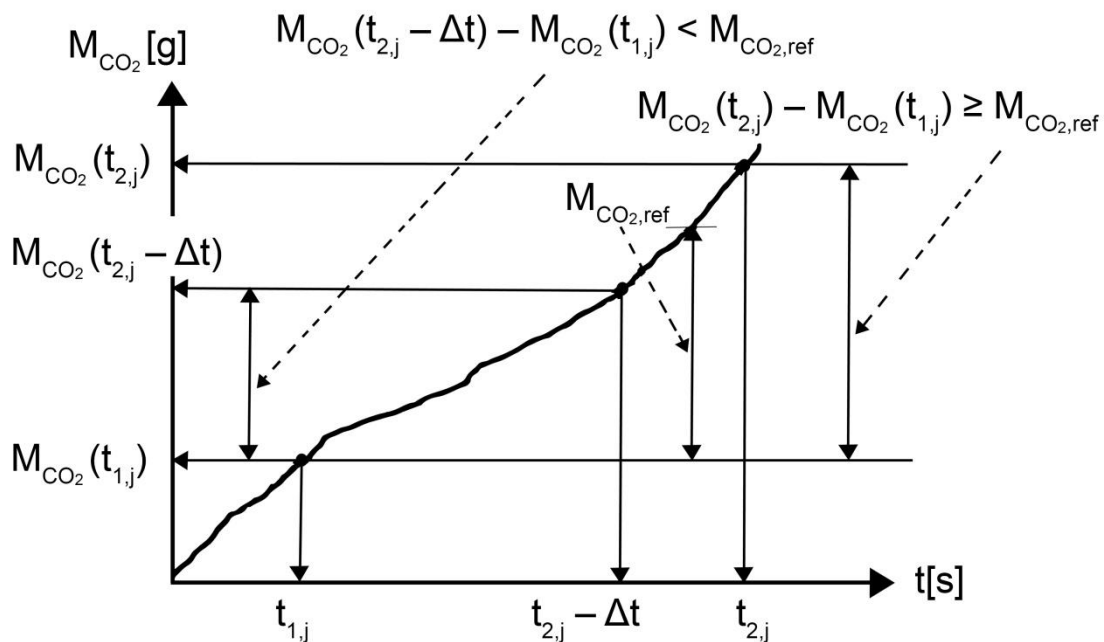
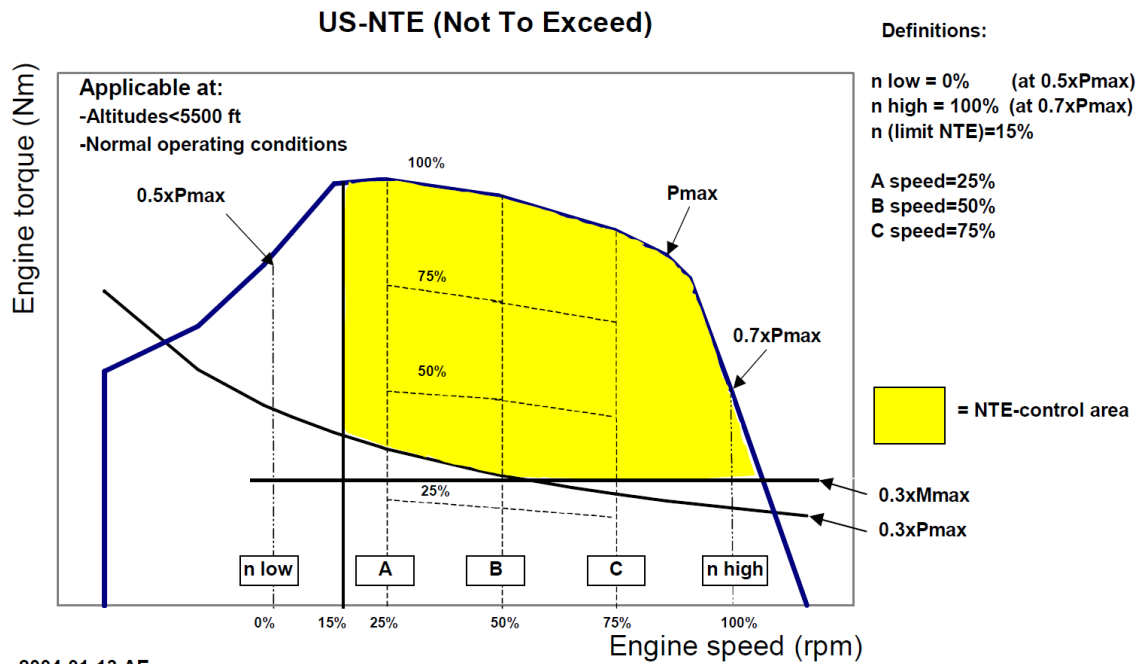


Abbildung 1: Festlegung von Mittelungsfenstern auf Grundlage der CO₂-Masse nach der „Moving Averaging Window (MAW)“-Methode, eigene Darstellung nach [16]

Bei der NTE-Methode wird im Last-Drehzahl-Kennfeld nach bestimmten Regeln ein NTE-Kontrollbereich definiert (siehe Abbildung 2). Für jedes „Event“, bei dem der NTE-Kontrollbereich während einer PEMS-Messung für mindestens 30 s nicht verlassen wird, werden mittlere spezifische Emissionen berechnet. Aufgrund der häufig sehr transienten Belastung der Motoren bei NRMM wurden bei der Auswertung nach der NTE-Methode nur ca. 5–20 % der Daten berücksichtigt und deren mittlere Last liegt fast ausschließlich im hohen Lastbereich. Aus diesen Gründen wurde diese Auswertemethode im Rahmen des NRMM PEMS Pilot Programme nicht weiterverfolgt und stattdessen die MAW-Methode, wie zuvor beschrieben, weiterentwickelt.



Quelle: BONNEL et al. (2013) [2]

Abbildung 2: „Not To Exceed (NTE)“-Kontrollbereich im Last-Drehzahl-Kennfeld

Weitere Empfehlungen nach BONNEL et al. (2013) [2] für PEMS-Messungen bei NRMM sind u. a.:

- Eine Regelung sollte eingeführt werden, die vorschreibt, dass korrekte Drehmoment-Daten von der ECU bereitgestellt werden müssen.
- Die Messgeräte sollten in einer gut belüfteten Box zum Schutz vor Staub, Wasser und Stößen untergebracht sein.
- Die Messgeräte sollten zur Kompensation von Vibrationen und Beschleunigungen flexibel gelagert sein, jedoch auf eine Art und Weise, dass bei einer Bewegung keine Schläuche oder sonstige Bauteile beschädigt werden.
- Es sollte geprüft werden, ob das Exhaust-Flow-Meter (EFM) über einen flexiblen Schlauch mit dem Auspuff verbunden werden kann, sodass dieses am Montagerahmen fixiert werden kann.
- Während der Messung muss ggf. auf die Geräte zugegriffen werden, deshalb sind Vorkehrungen notwendig, die ein sicheres Arbeiten an den installierten Geräten ermöglichen, speziell wenn diese auf dem Dach der Maschine installiert sind.
- Für den Betrieb des PEMS ist ein Generator mit mindestens 2,5 kW Leistung notwendig oder ausreichend Batteriekapazität.
- Eine 1-l-FID-Brenngasflasche reicht für ca. 6 h Betriebszeit des PEMS, größere Flaschen sind empfehlenswert.

- Auch Kalibriergasflaschen müssen an den Ort der PEMS-Messung mitgeführt werden, um die Kalibrierung der Analysatoren vor Ort durchführen zu können. Beschränkungen zum Transport von Gasflaschen in Tunnels und Fähren müssen beachtet werden.
- Falls die Analysatoren mit Umgebungsluft kalibriert werden, muss darauf geachtet werden, dass diese nicht mit Abgasen verunreinigt ist.
- Die Messgeräte sollten während der Messung beispielsweise über eine WiFi-Verbindung online überwacht werden.
- Vorschriften der Straßenverkehrsordnung z. B. hinsichtlich überstehender Ladung und des Mitführens von Gasflaschen müssen eingehalten werden.
- Die verwendeten Notebooks sollten für den Outdoor-Einsatz geeignet sein, d. h. stoßfest, staub- und wassergeschützt, ausreichend Kontrast des Monitors etc.

Wie erwartet wurde auf Basis des NRMM PEMS Pilot Programme eine verbindliche Vorgehensweise bei der Überwachung der Emissionen gasförmiger Schadstoffe von in Betrieb befindlichen Verbrennungsmotoren in nicht für den Straßenverkehr bestimmten mobilen Maschinen und Geräten erarbeitet. Die entsprechende Verordnung EU 2017/655 [15] wurde am 13. April 2017 im Amtsblatt L102 veröffentlicht. Eine Zusammenfassung der Richtlinie erfolgt in Unterkapitel 4.4.

3.2 Weitere Untersuchungen

GIETZELT et al. (2012) [24] führten als Beitrag zum NRMM-PEMS-Pilotprojekt für mobile Maschinen ein Gemeinschaftsprojekt von TÜV Hessen, der AVL Deutschland GmbH, der Deutz AG und der Fendt/AGCO GmbH durch. Dabei wurde ein Motor des Typs Deutz TCD 6,1 L6 am Motorenprüfstand getestet und die stationäre sowie die mobile Messtechnik hinsichtlich der Ergebnisse verglichen. Das verwendete PEMS-System bestand aus einem AVL M.O.V.E. GAS PEMS 493, einem AVL PM PEMS 494, einem SEMTECH-EFM-4"-Abgasmassenstromsensor und weiteren Komponenten zur Spannungsversorgung und Erfassung von Umgebungs-, GPS- und Fahrzeugdaten. Die Abweichungen zwischen mobiler und stationärer Messtechnik waren bei den gasförmigen Emissionen geringer als erwartet und wurden äußerst positiv diskutiert. Lediglich bei sehr geringen Konzentrationen von Schadstoffen kam es zum Teil zu größeren Abweichungen, was durch die großen Messbereiche der mobilen Analysatoren erklärt werden kann. Die Messung der Partikelemissionen (PM) lieferte höhere Differenzen zwischen 10 % und 50 %, jedoch lagen auch hier die Absolutwerte der Emissionen auf einem sehr niedrigen Niveau. Des Weiteren ist zu erwähnen, dass seitens des Gesetzgebers die Partikel-Messprozedur für PEMS noch nicht komplett definiert ist. Nach den Messungen am Motorenprüfstand wurde die mobile Messtechnik an einem Testtraktor der Abgasstufe IIIB (Fendt 720 Vario) mit baugleichem Motor wie am Motorenprüfstand installiert und erste Testfahrten, ein Validierungslauf am Zapfwellenprüfstand und auch Feldmessungen durchgeführt. Beim Vergleich der am Motoren- und Zapfwellenprüfstand mit dem PEMS

ermittelten Emissionswerte lagen die Abweichungen je nach Schadstoff im Bereich von 3 % bis 10 %. Nach den Prüfstandstests wurden unterschiedliche reale Messfahrten durchgeführt: Pflügen (quasi-stationär, volllastnah), Mähen (quasi-stationär, Niedriglast) und eine Transportfahrt (hochtransient). Ausgewertet wurde nach der MAW-Methode mit Bezug auf die Zyklusarbeit, wie es im NRMM-Pilotprogramm der EU beschrieben ist, und auch nach der US-amerikanischen NTE-Methode. Bei der NTE-Auswertung wurden keine Grenzwertüberschreitungen festgestellt, da hier Niedriglastzustände weitgehend ausgeklammert werden. Bei der MAW-Auswertung wurden höhere Emissionen gemessen, der *Conformity Factor* (CF) von 2 wurde jedoch auch stets eingehalten. Dies bedeutet, dass die beim Zertifizierungslauf am Prüfstand gültigen Emissionsgrenzwerte bei der Realfahrt-Messung höchstens um den Faktor 2 überschritten wurden. Ein Zusammenhang zwischen geringer Last, geringer Abgastemperatur und dementsprechend geringerer SCR-Katalysator-Aktivität und den Emissionen konnte festgestellt werden.

MERKISZ et al. (2013) [28] untersuchten die Realemission eines Traktors im Feldeinsatz mit einem Grubber als Anbaugerät. Als Messgeräte dienten ein Semtech-DS-System zur Erfassung der gasförmigen Emissionen und ein Semtech-LAM zur Erfassung der Partikelemissionen, welches nach dem Laser-Streulicht-Verfahren arbeitet. Ausgewertet wurden die Ergebnisse nach der US-amerikanischen NTE-Methode. Es wurde festgestellt, dass bei dieser Traktoranwendung nur ca. 60 % der Betriebszeit des Motors zur Bewertung der Emissionen herangezogen werden können, der Rest fällt nach dieser Auswertung aus dem NTE-Rahmen. Wird der gesamte Messzeitraum betrachtet, sind die spezifischen Emissionen je nach Emissionskomponente 9 % bis 25 % höher. Nach der NTE-Richtlinie ist der gültige *Conformity Factor* bei der untersuchten Maschine 1,25. Das heißt, dass die Emissionen im Realbetrieb um 25 % höher sein dürfen als der gültige Grenzwert für den Zertifizierungslauf am Prüfstand. Nach Meinung der Autoren dürfte dies schwierig zu erfüllen sein, speziell hinsichtlich der Partikel. Die Autoren empfehlen intensive Forschung auf diesem Gebiet, um möglichst viele Erfahrungen bei der Messung von Realemissionen von Non-Road-Fahrzeugen zu sammeln und die Methodik weiterzuentwickeln.

FREY et al. (2008) [23] untersuchten die Realemissionen von 15 Non-Road-Fahrzeugen (fünf Baggerlader, vier Radlader und sechs Motor-Grader) der Abgasstufen Tier 0 bis Tier 2 im Betrieb mit fossilem Dieselkraftstoff und mit einem Kraftstoffgemisch mit 20 % Biodiesel in fossilem Dieselkraftstoff (B20). Gemessen wurde mit einem Montana-System der Clean Air Technologies International, Inc. Dieses besteht aus einem NDIR-Spektrometer zur Bestimmung von CO, THC und CO₂, einer elektrochemischen Messzelle zur Bestimmung der NO-Konzentration und einem Laserstreulichtinstrument zur relativen Bestimmung der Partikelmasse (PM). Im Durchschnitt aller betrachteten Baumaschinen gab es bei den NO-Emissionen im Biokraftstoffbetrieb keinen signifikanten Unterschied zum Dieselbetrieb. Opazität, THC und CO sanken beim Einsatz von B20 jedoch signifikant um 18 %, 26 % und 25 %. Die Emissionsraten sanken auch signifikant mit steigendem Baujahr und höherer Emissionsstufe der Maschinen. Daraus wurde abgeleitet, dass durch den Einsatz neuerer Maschinen in Verbindung mit Biodieselskraftstoff deutliche Emissionseinsparungen erreicht werden können. Mit dem Vorhaben wurde die

Durchführbarkeit von RDE-Messungen mit PEMS an Non-Road-Fahrzeugen demonstriert und auch die Eignung derartiger Messungen zum Vergleich der Emissionsraten unterschiedlicher Maschinen mit verschiedenen Emissionsstufen nachgewiesen. Des Weiteren können mit PEMS-Messungen auch Unterschiede in den Emissionen durch Einsatz unterschiedlicher Kraftstoffe mit biogenem Anteil festgestellt werden. Die zum Einsatz gekommene Laser-Messtechnik zur Bestimmung der Partikelmasse kann nur relative Unterschiede darstellen, aber keine Absolutwerte liefern.

LÓPEZ et al. (2008) [26] untersuchten RDE von Euro-4-Stadtbussen mit unterschiedlichen Abgasnachbehandlungsstrategien und unter Einsatz unterschiedlicher Kraftstoffe (Dieselkraftstoff, Dieselkraftstoff mit 20 % Biodiesel (B20) und reiner Biodiesel (B100)). Ein Teil der Busse war mit Abgasrückführung (EGR) und Dieselpartikelfilter (DPF) ausgestattet, der andere Teil mit einem System zur selektiven katalytischen Reduktion (SCR) der Stickstoffoxide. Das Messsystem bestand aus einem Horiba-OBS-2000-System zur Bestimmung von CO, CO₂, THC und NO_x, einem MAHA-Partikelmessgerät mit Lasermessprinzip, einem Abgasmassenstromsensor zur Berechnung des Kraftstoffverbrauchs über Kohlenstoffbilanzierung, einem Umgebungstemperatur- und -feuchtesensor und einem GPS-Empfänger. Insgesamt wurde die Performance der Busse mit SCR-System besser bewertet, da hier geringere CO₂-, THC- und NO_x-Emissionen bei geringerem Kraftstoffverbrauch auftreten. Die Partikel- und CO-Emissionen sind jedoch höher. Mit steigendem Biodieselanteil wurden unabhängig vom Nachbehandlungskonzept höhere NO_x- und geringere PM-Emissionen gemessen.

PÜTZ et al. (2014) [31] führten exemplarisch an zwei Traktoren und zwei Rübensvollern konsequenter Grenzwertstufen Emissions- und Verbrauchsmessungen im Realbetrieb durch. Dazu wurde ein Semtech-Ecostar-System der Firma Sensors Inc. eingesetzt, das aus den Modulen FID (Kohlenwasserstoffe), NO_x (Stickstoffoxide), FEM (Abgasmassenstrom; Kohlenstoffmonoxid, Kohlenstoffdioxid und Sauerstoff) und PDM (Zentralmodul mit Stromversorgung) aufgebaut war. Die Auswertung der Ergebnisse zeigte, dass die derzeitige NRMM-Typprüfung ausschließlich anhand von Motorprüfstandtests keine verlässliche Emissionsminderung trotz sinkender Grenzwerte bewirkt. Die Repräsentativität der Motortypprüfzyklen NRSC und NRTC und deren letztendliche Aussagekraft angesichts des hohen Diversifikationsgrads im Bereich mobiler Arbeitsmaschinen wird deshalb angezweifelt. Allein die Messungen von Realfahrt-Emissionen werden als aussagekräftig erachtet und deren Eingang in die Maschinenzertifizierung wird empfohlen.

3.3 Zusammenfassung

Da für die Bestimmung der realen Emissionen von Non-Road-Fahrzeugen Vorgaben weder über einheitliche Messverfahren und -geräte noch zur Auswertung der aufgenommenen Daten vorlagen, wurde von der Europäischen Union ein Pilotprogramm initiiert, um Lösungen zu offenen Fragestellungen zu erarbeiten. Am 25.09.2014 wurde ein Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rats über die Anforderungen in Bezug auf die Emissionsgrenzwerte und die Typgenehmigung für Ver-

brennungsmotoren für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte veröffentlicht [12]. Darin wird auch darauf hingewiesen, dass es notwendig ist, eine Prüfmethode zur Überwachung des realen Emissionsverhaltens durch den Einsatz transportabler Emissionsmesseinrichtungen in einem angemessenen zeitlichen Rahmen zu erarbeiten, um die im realen Betrieb abgegebenen Emissionen besser zu überwachen und ein Verfahren zur Überprüfung in Betrieb befindlicher Motoren vorzubereiten. Mit der Verordnung EU 2016/1628 vom 14. September 2016 wurde diese Vorgehensweise für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte auch gesetzlich verankert. Wie erwartet wurde die entsprechende Methodik auf Basis des NRMM PEMS Pilot Programme in der Verordnung EU 2017/655 [15] am 13. April 2017 im Amtsblatt L102 veröffentlicht. Der zum Zeitpunkt Juli 2018 aktuelle Stand der gesetzlichen Rahmenbedingungen in der EU ist in Unterkapitel 4.4 zusammengefasst.

Unabhängig von der zunächst fehlenden gesetzlichen Grundlage wurden bereits Untersuchungen zu realen Abgasemissionen mit unterschiedlichster Messtechnik durchgeführt. Zusätzlich wurden die Daten auf verschiedene Art und Weise aufbereitet, sodass bislang kein einheitlicher Vergleich von Emissionen am Prüfstand und in der Realität möglich ist. Des Weiteren fehlt häufig der Bezug auf die abgegebene Motorleistung gänzlich, da diese im realen Motorbetrieb nicht zur Verfügung steht. Es wäre eine einheitliche Regelung notwendig, wonach vom Motorsteuergerät jeder Maschine ein kontinuierliches Leistungssignal bereitgestellt bzw. eine andere, bereits vorhandene oder messbare Bezugsgröße für die Emissionskomponenten gewählt wird.

Relative Vergleiche zwischen den Realemissionen von Non-Road-Fahrzeugen im Betrieb mit Diesel und Diesel-Biodiesel-Blends zeigen, dass der Biokraftstoffbetrieb auch in der Realität, genau wie am Prüfstand, Vorteile bzgl. der Emissionen haben kann. RDE-Messungen mit pflanzenöl- oder methanbetriebenen Maschinen und Geräten sind bislang nicht bekannt.

4 Material und Methoden

Im Folgenden werden die für die Untersuchungen verwendeten Materialien und Methoden beschrieben.

4.1 Portables Emissionsmesssystem

In Abbildung 3 ist der Aufbau des portablen Emissionsmesssystems (PEMS) Semtech Ecostar der Firma Sensors, Inc., 6812 State Road, Saline, Michigan 48176, USA, in einer mobilen Schutzbox dargestellt. Die Analysatoren zur Bestimmung gasförmiger Abgasemissionen von Verbrennungsmotoren halten die Vorgaben der Richtlinien UNECE.R-49 und Commission Regulation EU No. 582/2011 und US EPA 40CFR part 1065 ein. Im Laufe des Projekts erfolgte ein Update auf das Ecostar-Plus-System. Die wesentlichen Änderungen sind in Abschnitt 5.1.2 beschrieben und im Folgenden nur die nach dem Update vorhandenen Komponenten dargestellt. Diese umfassen Messgeräte und Analysatoren zur Erfassung des Abgasmassenstroms von Kohlenstoffdioxid-, Kohlenstoffmonoxid-, Stickstoffoxid-, Kohlenwasserstoff-, Methan- und Partikelmassemissionen sowie der Motorbetriebsdaten, Umgebungsbedingungen, GPS-Daten und analoger Signale.



Abbildung 3: Aufbau des PEMS in der speziell entwickelten mobilen Schutzbox vor dem Update

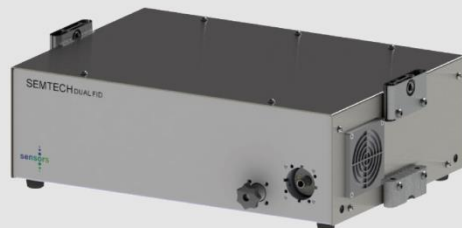
4.1.1 Power Distribution and Control Module (PDCM)

Beim Update auf das Ecostar-Plus-System wurden die beiden PDM (*Power Distribution Module*) durch ein PDCM (*Power Distribution and Control Module*) ersetzt. Dieses stellt die unterbrechungsfreie Spannungsversorgung der Analysatoren sicher und ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Es verfügt über zwei 12-V-Gleichstrom-Eingänge, sodass ein mit 230 V Netzspannung versorgtes Netzteil und eine 12-V-Batterie parallel als Energiequellen genutzt werden können. Sollte eine der beiden Quellen ausfallen, wird unterbrechungsfrei auf die andere Quelle umgeschaltet. Sind beide verfügbar, wird diejenige genutzt, die die höhere Spannung aufweist. Das PDCM verfügt über sieben Anschlussbuchsen für Gas- oder Partikelanalysatoren aus der Ecostar-Serie und eine 230-V-Anschlussbuchse für beispielsweise ein FID oder das Datenerfassungssystem des Kraftstoffverbrauchsmessgeräts dQRoad. Des Weiteren befinden sich in diesem Modul auch die Energieversorgung und die Steuerung der beheizten FID-Leitung. Das PDCM ist zudem auch das zentrale Datenerfassungsmodul des PEMS-Systems und bietet über einen WLAN-Hotspot und LAN-Buchsen die Möglichkeit, sich mit einem PC oder auch einem Tablet-Computer bzw. Smartphone zu verbinden und über eine webbrowserbasierte Benutzeroberfläche (siehe Abbildung 5) das Messsystem zu bedienen.

1 Power Distribution and Control Module (PDCM)



2 Fuel Economy Meter (FEM)

3 NO/NO₂ Gas Analyzer (NO_x)4 THC/CH₄ Dual Flame Ionization Detector (DualFID)

5 Micro Proportional Sampling System (MPS)



6 Remote-Diluter



7 Particulate Filter System (PFS)



8 Continuous Particulate Monitor (CPM)



Quelle: Sensors Inc.

Abbildung 4: Einzelkomponenten des portablen Emissionsmesssystems (PEMS), Semtech Ecostar



Quelle: Sensors Inc.

Abbildung 5: Webbrowserbasierte Benutzeroberfläche des PEMS-Systems nach dem Update

4.1.2 Fuel Economy Meter (FEM)

Das *Fuel Economy Meter* (FEM) ist eine Kombination aus Abgasmassenstrom-Messgerät und CO/CO₂-Analysator, den Aufbau veranschaulicht Abbildung 4.2. Der Kraftstoffverbrauch wird über den im *Flow Tube* nach dem Bernoulli-Prinzip (Pitot-Rohr) gemessenen Abgasmassenstrom und durch Kohlenstoffbilanzierung auf Basis der ermittelten Abgaszusammensetzung und Elementarzusammensetzung des Kraftstoffs berechnet. Des Weiteren ist auch die Probenaufbereitung des Abgases in diesem System integriert. Diese besteht aus einer internen Probenahmesonde, einem beheizten Filter, einem Wasserabscheider und einem Nafion[®]-Trockner. Die getrocknete und gefilterte Probe wird durch einen nicht dispersiven Infrarot-Analysator (NDIR) geleitet und die Konzentrationen von Kohlenstoffmonoxid, Kohlenstoffdioxid und Kohlenwasserstoffen als Hexan bestimmt. Die hier ermittelte Kohlenwasserstoffkonzentration ist jedoch nur

ein sehr grober Richtwert und der Hersteller gibt für diesen Wert in der Spezifikation auch keine Details zur Genauigkeit an. Die präzise Bestimmung der Kohlenwasserstoffemissionen erfolgt mit dem Flammenionisationsdetektor (FID) (siehe Abschnitt 4.1.4). Über einen elektrochemischen Sensor wird im FEM auch die Sauerstoffkonzentration im Abgas bestimmt. Für unterschiedliche Motoren mit unterschiedlichem Abgasmassenstrom sind verschiedene Flow-Tube-Durchmesser verfügbar. Mit den am TFZ vorhandenen 2,5"- und 4"-Flow-Tubes können Abgasmassenströme von ca. 28 bis 670 kg/h bzw. 46 bis 1550 kg/h bei einer Abgastemperatur von 400 °C gemessen werden. Am FEM sind des Weiteren auch eine Wettersonde (Temperatur, relative Feuchtigkeit und Umgebungsdruck) und ein GPS Receiver angeschlossen. Die Umgebungsbedingungen und Positionsdaten werden zusammen mit allen anderen Messwerten aufgezeichnet.

4.1.3 NO/NO₂ Gas Analyzer (NO_x)

In Abbildung 4.3 ist der Stickstoffoxidanalysator dargestellt. Wird dieser in Kombination mit dem FEM betrieben und direkt über diesem platziert, erfolgt die Versorgung des Analysators mit aufbereitetem Abgas durch Verbindungsrohre zwischen den beiden Geräten. Im Stand-alone-Betrieb kann das NO_x-Modul jedoch auch mit einer separaten Probenaufbereitung über die Frontanschlüsse versorgt werden. Die Bestimmung der Stickstoffmonoxid- und Stickstoffdioxid-Konzentrationen im Abgas erfolgt mit einem nicht dispersiven Ultra-Violett-Analysator (NDUV), da in dem hier genutzten Wellenlängenbereich (UV) keine Querempfindlichkeiten zu CO₂ und H₂O auftreten.

4.1.4 Total Hydrocarbon and Methane Analyzer (DualFID)

Das DualFID ist ein Analysator, mit dem die Gesamtkohlenwasserstoff- (THC) und Methankonzentration (CH₄) im Abgas parallel bestimmt werden können. Über eine beheizte Leitung wird zwei Flammenionisationsdetektoren (FID) die zu analysierende Probe zugeführt. Im ersten Schritt wird die Gesamtkohlenwasserstoffkonzentration, im zweiten die Methankonzentration bestimmt, nachdem zunächst alle Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe mit einem Cutter (NMC) entfernt wurden. In Abbildung 4.4 ist das DualFID dargestellt.

4.1.5 Micro Proportional Sampling System (MPS)

Das MPS ist ein Teilstromverdünnungssystem nach den Vorgaben von US EPA CFR 40 part 1065 und ISO 16183; Abbildung 4.5 zeigt das Gerät. In Verbindung mit dem FEM und dem somit vorhandenen Abgasmassenstromsignal kann das MPS als Proportionalverdünner bzw. im Stand-alone-Betrieb auch als Konstantverdünner eingesetzt werden. Im Proportionalmodus ist der Strom des verdünnten Abgases proportional zum Strom des Rohabgases. Dies wird über eine Magnetventilschaltung realisiert. Die eigentliche Verdünnung des Abgases erfolgt mittels Remote-Diluter (siehe Abbildung 4.6) möglichst nahe an der Entnahmestelle, da das Aerosol erst durch die Verdünnung stabilisiert wird.

4.1.6 Particulate Filter System (PFS)

Mit dem in Abbildung 4.7 dargestellten *Particulate Filter System* (PFS) kann die Partikelmasse im Abgas eines Verbrennungsmotors mit der Gravimetrie-Methode bestimmt werden. Das vom MPS verdünnte Abgas wird dem PFS über ein Verbindungsrohr zugeführt und entweder über einen von drei 47-mm-Filterhaltern oder einen Bypass geführt. Die Steuerung erfolgt über Magnetventile. Wird das Abgas durch einen der Filter geleitet, werden die enthaltenen Partikel auf diesem abgeschieden. Durch eine Konditionierung und Wägung der Filter vor und nach der Beladung und mithilfe der vom MPS ermittelten filtrierte Abgasmasse kann die Partikelmassekonzentration im Abgas bestimmt werden. Wechselbare Ein- und Auslasskonen ermöglichen eine Anpassung der Filterfläche und somit der Filteranströmgeschwindigkeit an den jeweiligen Anwendungsfall. Eine integrierte mikroprozessorgesteuerte Heizung hält die Temperatur von verdünntem Abgas und Filtersystem konstant.

4.1.7 Continuous Particulate Monitor (CPM)

Das Modul *Continuous Particulate Monitor* (CPM) basiert auf einem Pegasor[®]-PPS-M-Sensor. In diesem werden die im Abgas eines Verbrennungsmotors enthaltenen Partikel durch eine Corona-Entladung elektrostatisch aufgeladen und in einem Spülstrom berührungsfrei durch den Sensor geführt. Die Ladung der Partikel ist proportional zu deren Größe. Durch ein integriertes Elektrometer wird die Ladung gemessen und je nach Konfiguration des Sensors entweder die Partikelanzahl oder -masse im Abgas ausgegeben. Der verdünnte Abgasprobenstrom wird, wie beim PFS, durch das MPS aufbereitet und dem CPM zugeführt. In Abbildung 4.8 ist das CPM dargestellt.

4.1.8 In Vehicle Control Module (ICM)

Das *In Vehicle Control Module* (ICM) ist die Schnittstelle zwischen PEMS und Fahrzeug. Für eine PEMS-Messung und deren Auswertung sind auch bestimmte Fahrzeugbetriebsdaten (z. B. Motordrehzahl) nötig. Diese Informationen stehen in der Regel im CAN-Bus-Netzwerk von modernen Fahrzeugen zur Verfügung. Im Heavy-Duty-Bereich findet zumeist der J1939- und im Light-Duty-Bereich der OBDII-Standard Anwendung. Das ICM wird über ein entsprechendes Adapterkabel mit der Diagnosesteckdose des Fahrzeugs verbunden und in der Sensor-Tech-Pro-Software der jeweilige Standard ausgewählt. Nachdem automatisch eine Verbindung hergestellt wurde, werden alle verfügbaren Fahrzeug-Signale dargestellt und parallel zu den Daten der Messgeräte aufgezeichnet. Das ICM verfügt auch über einen Not-Aus-Schalter, mit dem das komplette Messsystem im Notfall sofort abgeschaltet werden kann, und über einen Taster, mit dem besondere Ereignisse während der Messung im dazugehörigen Datensatz markiert werden können. Des Weiteren befindet sich am ICM auch eine CAN-Ausgangsschnittstelle, um alle Messdaten zeitsynchron auch an ein externes System, z. B. einen stationären Prüfstand, übertragen zu können.

4.1.9 IO Module

Das *IO Module* ist ein Ein- bzw. Ausgangsmodul, mit dem Signale von analogen Sensoren aufgenommen werden können. Insgesamt stehen fünf Kanäle zur Verfügung, die als Thermoelement- oder Spannungseingang (0 V bis 10 V) parametrisiert und mit einem Skalierungs- und Offsetwert auf die jeweilige Messgröße eingestellt werden können. Beispielsweise kann das Kraftstoffverbrauchsmesssystem dQRoad an einem Eingang mit 0 V bis 10 V angeschlossen werden, der auf 0 kg/h bis 100 kg/h skaliert ist, sodass die Messgröße Kraftstoffmassenstrom direkt in der passenden Einheit aufgezeichnet wird.

4.2 Mobile Kraftstoffverbrauchsmessung

Eine der wichtigsten Größen zur Beurteilung des Betriebsverhaltens, der Effizienz, der Umweltverträglichkeit und auch der Wirtschaftlichkeit eines Fahrzeugs ist der Kraftstoffverbrauch. Dieser kann bei Prüfstandtests sehr einfach gravimetrisch bestimmt werden, indem der Kraftstoffkreislauf aufgetrennt und der Motor aus einem externen Tank, der auf einer geeigneten Waage platziert wird, gespeist wird. Im mobilen Einsatz ist dies u. a. aufgrund von Erschütterungen und Beschleunigungen nicht möglich. Es bestehen allerdings verschiedene Möglichkeiten, den Kraftstoffverbrauch auch im mobilen Betrieb zu erfassen. Eine Möglichkeit ist, den vom Motorsteuergerät zur Verfügung gestellten Wert aus dem CAN-Netzwerk des Fahrzeugs abzurufen. Dieser basiert jedoch in der Regel auf einem Rechenmodell, in welches u. a. die Einspritzventilansteuerzeiten einfließen. Der tatsächliche Verbrauchswert wird nicht direkt gemessen und der Wert wäre theoretisch auch manipulierbar. Des Weiteren würde beim Einsatz eines alternativen Kraftstoffs mit anderen Eigenschaften, z. B. einer höheren Viskosität, ein falscher Wert ausgegeben, wenn das Modell nicht dafür angepasst wurde.

Eine weitere Möglichkeit der mobilen Kraftstoffverbrauchserfassung ist die Kohlenstoffbilanzierung. Wenn mit einem PEMS der Abgasmassenstrom und die Abgaszusammensetzung gemessen werden und die Elementarzusammensetzung des Kraftstoffs bekannt ist, kann aus diesen Informationen der Kraftstoffmassenstrom berechnet werden (siehe Abschnitt 4.1.2 Fuel Economy Meter (FEM)). Dieses System erreicht allerdings seine Grenzen, wenn gleichzeitig mehrere Kraftstoffe mit unterschiedlicher Elementarzusammensetzung und variablem Anteil eingesetzt werden. Beispielsweise muss im Dual-Fuel-Betrieb mit gleichzeitigem Einsatz eines flüssigen und eines gasförmigen Kraftstoffs der Verbrauch einer der Komponenten direkt mit einem geeigneten Messgerät gemessen werden, damit in Verbindung mit der Kohlenstoffbilanz der Verbrauch der anderen Komponente berechnet werden kann. Ein spezielles Gerät zur präzisen mobilen Erfassung des Verbrauchs eines flüssigen Kraftstoffs, welches auch im Rahmen dieses Projekts erprobt wurde, ist das dQRoad der dQdT KG, Krefeld. Dieses wird im Folgenden detailliert beschrieben und ist in Abbildung 6 dargestellt.

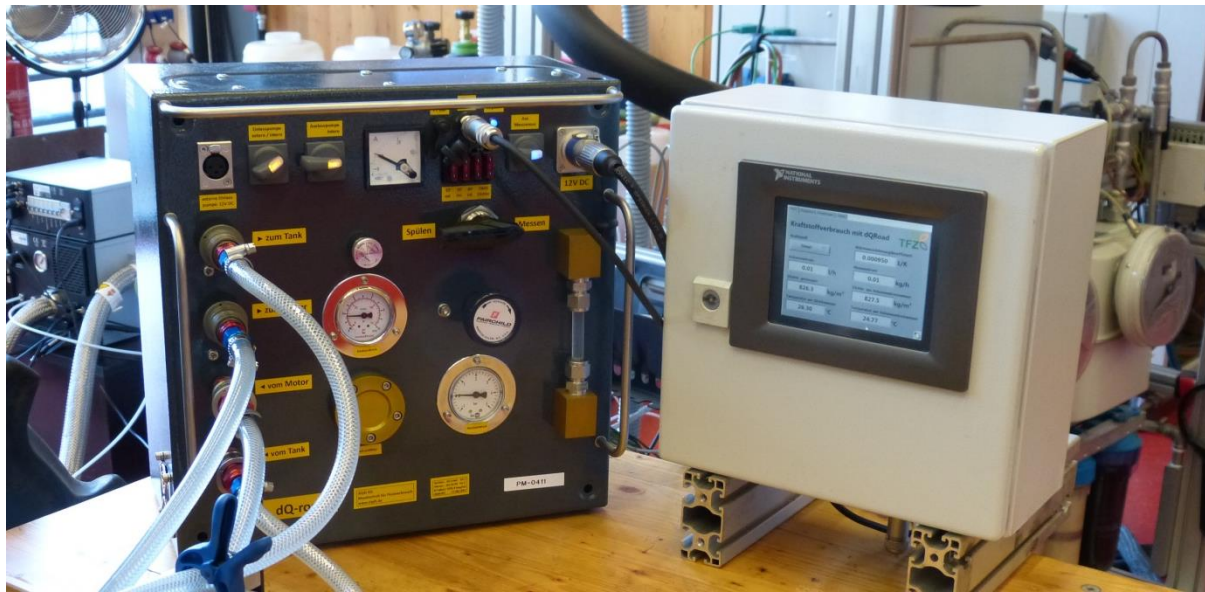


Abbildung 6: Kraftstoffverbrauchsmessgerät dQRoad (links) und Datenerfassungssystem (rechts)

Das Kraftstoffverbrauchsmessgerät dQRoad wird im Fahrzeug zwischen Tank und Motor in Kraftstoffvor- und -rücklauf geschaltet und so ein primärer und sekundärer Kraftstoffkreislauf hergestellt. Je nach Einbauort der Kraftstoffvorförderpumpe (am Tank oder am Motor) des zu vermessenden Fahrzeugs wird im Messsystem eine zusätzliche Pumpe im Primär- oder Sekundärkreislauf integriert, sodass in beiden Kreisen eine Umwälzung stattfindet. Im Primärkreislauf befinden sich also der Tank, eine Förderpumpe und die Leitungen zum und vom Tank. Im Sekundärkreislauf befindet sich ebenfalls eine Förderpumpe und die Leitungen zum und vom Motor. Damit der Kraftstoff im Sekundärkreis nicht überhitzt, befindet sich auch ein Wärmetauscher im Messgerät in dem überschüssige Wärme vom Sekundär- über den Primärkreis in den Kraftstofftank übertragen wird. Wird Kraftstoff im Sekundärkreis vom Motor verbraucht, kann dieser nur durch den eigentlichen Messsensor nachströmen und es wird der tatsächliche Verbrauch gemessen. Der Messsensor besteht aus einer Zahnradpumpe mit Drehzahlregelung und einer Differenzdrucküberwachung. Verändert sich der Differenzdruck über die Pumpe, wird deren Drehzahl so geregelt, dass der Differenzdruck wieder auf null sinkt. Kraftstoff strömt also immer in genau der verbrauchten Menge druckverlustfrei nach. Von der jeweiligen Drehzahl kann der Kraftstoffvolumenstrom ($\dot{V}$) abgeleitet werden. Dazu wird bei der Kalibrierung des Messgeräts die Frequenz des Impulsausgangs bei unterschiedlichen Volumenströmen gemessen und die Anzahl der Impulse pro Milliliter bestimmt (siehe Tabelle 1). Um einen möglichst genauen Wert für den aktuellen Volumenstrom zu erhalten, wird bei der Auswertung der Daten nicht der Mittelwert der Impulse pro Milliliter aller acht Prüfpunkte der Kalibrierung verwendet, sondern in Abhängigkeit der gezählten Impulse pro Messzeitraum ein Wert auf Basis der Daten aus dem Kalibrierprotokoll interpoliert. Die schrittweise Berechnung ist im Folgenden dargestellt:

Zunächst wird die Anzahl der Impulse n im Messzeitraum t ermittelt:

$$n = n(t_1) - n(t_0) \quad (4.1)$$

Im Anschluss wird die mittlere Frequenz f der Impulse im Messzeitraum t ermittelt:

$$f = \frac{n}{t} \quad (4.2)$$

Auf Basis der berechneten Frequenz f kann mit den Daten des Kalibrierprotokolls der durchfluss- bzw. frequenzabhängige Umrechnungsfaktor (K-Faktor) linear interpoliert werden:

$$K(f) = K_0 + \frac{K_1 - K_0}{f_1 - f_0} \cdot (f - f_0) \quad (4.3)$$

Zuletzt erfolgt die Berechnung des Volumenstroms $\dot{V}$:

$$\dot{V} = \frac{n}{K \cdot t} \quad (4.4)$$

Tabelle 1: Auszug aus dem Kalibrierprotokoll des Kraftstoffverbrauchsmessgeräts dQRoad

Durchfluss in l/h	Frequenz des Ausgangssignals in Hz	Ausgangssignal in Impulse/ml
0,21	95,8	1667,38
0,62	288	1662,18
2,01	930	1663,61
6,06	2807	1667,02
15,15	7033	1670,73
40,02	18634	1676,15
64,92	30310	1680,70
89,98	42063	1682,85

Um aus dem Volumenstrom den Massenstrom des Kraftstoffs zu berechnen, sind weitere Sensoren für die Dichte des Mediums (ρ), die Temperatur am Dichtesensor (T_D) und die Temperatur am Volumenstromsensor (T_V) im Messgerät integriert. Zur Kompensation des Kraftstofftemperaturunterschieds zwischen Dichte- und Volumenstromsensor wird die Dichte am Volumenstromsensor über den Wärmeausdehnungskoeffizienten (γ) des jeweiligen Kraftstoffs angepasst. In Formel (4.5) ist die Berechnung des Massenstroms aus den Sensorsignalen und dem Wärmeausdehnungskoeffizienten (siehe Tabelle 1) dargestellt.

$$\dot{m} = \frac{\rho \cdot \dot{V}}{(T_V - T_D) \cdot (1 + \gamma)} \quad (4.5)$$

Tabelle 2: Wärmeausdehnungskoeffizient (γ) verschiedener Kraftstoffe

Kraftstoff	Wärmeausdehnungskoeffizient (γ) in 10^{-3} K^{-1}	Quelle
Rapsöl	0,675	[33]
Diesel	0,95	[6]
Benzin	1,06	[6]
Ethanol	1,1	[6]

4.3 Energieversorgung des PEMS

Eine wichtige Voraussetzung bei der Bestimmung der realen Emissionen von Kraftfahrzeugen ist, dass die Fahrzeuge durch die Messtechnik möglichst wenig beeinflusst und so die Messergebnisse möglichst nicht verfälscht werden. Deshalb ist es notwendig, die Messgeräte nicht vom Fahrzeug mit Energie zu versorgen, sondern eine unabhängige eigene Stromversorgung mitzuführen. Die einzelnen Komponenten sind im Folgenden beschrieben.

4.3.1 Stromerzeuger

Hauptenergiequelle für das PEMS im mobilen Einsatz ist ein Stromerzeuger vom Typ Honda® EU 30i mit einer maximalen Leistung von 3,0 kVA (Dauerleistung 2,6 kVA) (siehe Abbildung 7). Die Spannungsregelung erfolgt über einen Inverter, wodurch auch der Betrieb hinsichtlich der Spannungsqualität sensibler Geräte problemlos möglich ist. Ein Tankvolumen von 5,8 l Benzin ermöglicht ein Tankintervall von bis zu 3,5 h bei Volllast. Das kleinere Modell EU 20i hat sich im Praxiseinsatz als zu leistungsschwach für einen sicheren Dauerbetrieb des Komplettsystems herausgestellt.



Quelle: www.honda.de

Abbildung 7: Stromerzeuger für den mobilen Betrieb des PEMS

4.3.2 Batterie

Wie in Abschnitt 4.1.1 beschrieben erfolgt die eigentliche Spannungsversorgung der Analysatoren über das *Power Distribution and Control Module* (PDCM), welches in der Regel über ein externes Netzteil mit 12 V Gleichspannung gespeist wird. Um aber bei einem kurzzeitigen Ausfall des Stromerzeugers während der Messung keinen Datenverlust zu erleiden bzw. Messungen nicht unbeabsichtigt abzubrechen, empfiehlt sich zusätzlich der Einsatz einer Pufferbatterie. Der vom Hersteller empfohlene und auch verwendete Typ ist ein Q-Quality® 12LC-134 AGM-Akku mit Vlies-Technologie, 12 V Betriebsspannung und einer Kapazität von 143 Ah. Zum Schutz bei Kurzschlüssen wurde eine 100-A-Schmelzsicherung direkt am Plus-Pol der Batterie installiert.

4.3.3 Ladegerät

Der zuvor beschriebene Akku wird von einem Ladegerät vom Typ Cristec CPS3 mit einer Betriebsspannung von 12 V und einem maximalen Ladestrom von 80 A kontinuierlich hinsichtlich des Ladezustands überwacht und bei Bedarf aufgeladen. Versorgt wird es im mobilen Einsatz vom Stromgenerator mit 230 V Wechselspannung.

4.3.4 Batterieumschalter

Um auch die 12-V-Spannungsversorgung abschalten zu können, ist die Installation eines Batterietrennschalters notwendig. Dieser muss einen ausreichend hohen Schaltstrom aufweisen, da im Normalbetrieb Ströme von bis zu 100 A auftreten können. Des Weiteren ist es von Vorteil, das Ladegerät und die Messgeräte unabhängig voneinander mit der Batterie verbinden zu können, um hohe Anlaufspitzenströme zeitlich versetzen zu können. Aus diesem Grund wurde nicht ein einfacher Batterietrennschalter verwendet, sondern ein Batterieumschalter mit einem maximalen Schaltstrom von 200 A und vier Schaltstellungen. Dieser wurde so verdrahtet, dass in Position „0“ sowohl das Ladegerät als auch die Messgeräte von der Batterie getrennt sind. In Position „1“ sind nur Ladegerät und Batterie verbunden, die Batterie wird geladen, die Messgeräte sind ausgeschaltet bzw. werden nur vom Netzteil versorgt. In Position „1&2“ sind sowohl das Ladegerät als auch die Messgeräte mit der Batterie verbunden, dies entspricht der normalen Betriebsposition, in der die Batterie ständig geladen wird und die Messgeräte bei Ausfall der Netz- bzw. Generatorspannung automatisch in den Batteriebetrieb wechseln können. In Position „2“ sind lediglich Messgeräte und Batterie miteinander verbunden; die Batterie wird in diesem Modus nicht aufgeladen. Die Auswahl dieser Schalterstellung ist v. a. beim Wechseln vom Netz- in den Generatorbetrieb vorteilhaft, da so die Anlaufströme von Ladegerät und Messgeräten zeitlich versetzt werden können.

4.3.5 Ausschließlicher Batteriebetrieb ohne Stromerzeuger

Ist eine Versorgung des PEMS mit dem Stromerzeuger nicht möglich und das Messsystem muss über einen längeren Zeitraum ausschließlich mit Batterien betrieben werden,

z. B. bei Messungen an Pkw, ist dies nicht problemlos möglich. Aufgrund der hohen Lastströme vor allem des DualFID mit beheizter Leitung sinkt die Klemmenspannung einer 12-V-AGM-Batterie meist schon nach wenigen Minuten im Betrieb unter die notwendige Eingangsspannung des PDCM und es kann zu Ausfällen einzelner Module kommen. Selbst bei Parallelschaltung von zwei neuen und voll geladenen 160-Ah-Batterien konnte kein stabiler Betrieb des Messsystems über die Dauer einer kompletten Messung erreicht werden. Dieses Problem konnte jedoch durch die Reihenschaltung von zwei 12-V-Batterien und den Einsatz von 24/12-V-DC/DC-Wandlern mit einstellbarer Ausgangsspannung gelöst werden. Verwendet wurden dabei Konverter vom Typ Orion 24/12-70A von Victron Energy®. Diese haben einen Eingangsspannungsbereich von 18 V bis 32 V, eine mit einem Potentiometer einstellbare Ausgangsspannung von 10 V bis 15 V und einen Ausgangsstrom von 70 A. Damit wird nun unabhängig vom Ladezustand der Batterien und vom Laststrom eine konstante Versorgungsspannung des PEMS gewährleistet. Die Kapazität der Batterien kann besser ausgenutzt und es können generell kleinere und leichtere Batterien eingesetzt werden, was vor allem bei begrenzter Zuladung im Pkw-Bereich ein deutlicher Vorteil ist.

4.4 Gesetzliche Vorgaben zur Methodik bei der Durchführung von Realemissionsmessungen

Im Zeitraum des Projekts sind von der Europäischen Union die noch fehlenden gesetzlichen Rahmenbedingungen für die Überprüfung der Realemissionen definiert und die entsprechenden Rechtsvorschriften in Kraft gesetzt worden. In Tabelle 3 sind die wichtigsten Verordnungen aufgelistet.

Tabelle 3: Überblick über die wichtigsten Verordnungen zur Überprüfung der Realemissionen von Verbrennungsmotoren

Kategorie	Relevante Verordnungen
Nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte (NRMM)	2017/655, 2017/654, 2017/656, 2016/1628
Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge	2018/1832, 2017/1154, 2017/1151, 2016/646, 2016/427, 715/2007
Schwere Nutzfahrzeuge	2018/932, 2016/1718, 64/2012, 582/2011

In allen drei Kategorien findet das Prinzip des gleitenden Mittelungsfensters Anwendung. Die Emissionen werden zunächst also nicht für den gesamten Datensatz berechnet, sondern für sich überlappende Teildatensätze, die sogenannten Mittelungsfenster. Die Länge dieser Abschnitte entspricht einer vom Labortest abgeleiteten CO₂-Masse bzw. -Arbeit. Für NRMM entspricht sie der im *Non-Road Transient Cycle* (NRTC) emittierten Arbeit bzw. CO₂-Masse, für Pkw entspricht sie der halben im *Worldwide harmonized*

Light Duty Test Cycle (WLTC) emittierten CO₂-Masse. Die Berechnungen der gleitenden Mittelfenster werden mit dem Zeitinkrement Δt durchgeführt, das der Datenerfassungsdauer (in der Regel 1 s) entspricht. Dadurch ergeben sich pro Realemissionsmessung zumeist mehrere Tausend Teildatensätze, die einzeln betrachtet und je nach Motor- bzw. Fahrzeugkategorie unterschiedlich weiterverarbeitet werden. In den in Tabelle 3 aufgelisteten Verordnungen sind die komplexen Vorgehensweisen detailliert beschrieben. Unabhängig vom Hersteller der eingesetzten Messtechnik können die Rohdatensätze mit dem vom *Joint Research Centre* (JRC) bereitgestellten Excel Add-In „EMROAD“ nach den aktuellen gesetzlichen Vorgaben ausgewertet werden. Dieses Tool wurde von der JRC-Abteilung erstellt, die auch die gesetzlichen Vorgaben ausgearbeitet hat. Anwender von PEMS-Systemen können sich kostenlos in den Verteiler aufnehmen lassen und so stets die aktuellste Version der Software erhalten. Aktuell zum Zeitpunkt Juli 2018 ist die Version 5.96 B3, Ansprechpartner: European Commission, Joint Research Center (JRC), Directorate C – Energy, Transport and Climate, Sustainable Transport Unit C.4, IPR 23, 01/25.

Aufgrund der während der Projektlaufzeit verfügbar gewordenen und verbindlichen Vorgehensweisen wurden sämtliche Messungen, soweit möglich, nach dem Erscheinen der entsprechenden Richtlinien auch nach deren Methodik durchgeführt. Im Ergebnisteil werden jedoch auch andere Möglichkeiten der Datenauswertung aufgezeigt und die unterschiedlichen Ergebnisse verglichen. Für manche Messungen mussten andere Methoden herangezogen werden, beispielsweise für die Messungen an einem Dual-Fuel-Traktor (siehe Kapitel 5.7), da die Gesetzgebung diesen Spezialfall noch nicht abdeckt und auch im EMROAD-Tool keine Auswertung einer Realfahrtmessung eines Fahrzeugs im gleichzeitigen Betrieb mit zwei unterschiedlichen Kraftstoffen vorgesehen ist.

In der EU-Verordnung 2017/655 wurden bei der Interpretation der Gesetzgebung widersprüchliche Angaben in der deutschen und englischen Version bzgl. der Definition der Dauer des Kaltstarts entdeckt. Der Vorgang wurde über das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit zur Klärung bei der Europäischen Kommission in Brüssel weitergeleitet. Bis zur Klarstellung wird nach den Vorgaben der englischen Fassung gearbeitet, da diese auch die Grundlage der Verhandlungen darstellt und für korrekt erachtet wird.

Aktuelle Änderungen, Erweiterungen und Ergänzungen der gesetzlichen Vorgaben können unter den folgenden Links auf der Homepage der Europäischen Kommission heruntergeladen werden:

https://ec.europa.eu/growth/sectors/automotive/environment-protection/non-road-mobile-machinery_en

https://ec.europa.eu/growth/sectors/automotive/legislation/motor-vehicles-trailers_en

4.5 Untersuchte Fahrzeuge

Im Rahmen des Projekts wurden vornehmlich nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte und insbesondere biokraftstofftaugliche Traktoren untersucht, die im Rahmen verschiedener Forschungsvorhaben am Technologie- und Förderzentrum im Praxiseinsatz wissenschaftlich begleitet werden. Des Weiteren wurden auch biokraftstofftaugliche, leichte Personenkraftwagen hinsichtlich ihrer Realemissionen untersucht.

4.5.1 Nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte (NRMM)

An zwei pflanzenöltauglichen Traktoren, an einem Dual-Fuel-Diesel/Methan-Traktor und an einem pflanzenöltauglichen Holzvollernter (Harvester) wurden Messungen durchgeführt.

Traktor Fendt 724 Vario S4

In Tabelle 4 sind die wichtigsten technischen Daten des Traktors aufgelistet. Für den Betrieb mit Rapsölkraftstoff wurde eine vom Hersteller zertifizierte Umrüstung durch die BayWa AG vorgenommen. Die wesentlichen Komponenten und die Funktionsweise sind in ETTL et al. (2019) [10] ausführlich beschrieben. Der Traktor kann mit Diesel und mit Rapsölkraftstoff betrieben werden. Die Motorsteuerung ist jedoch nur für Diesel optimiert und der Traktor hat beim Betrieb mit Rapsölkraftstoff etwa 15 % weniger Leistung [10].

Tabelle 4: Technische Daten des Traktors Fendt 724 Vario S4 [10]

Traktortyp	Fendt Vario 724 S4
Motortyp	Deutz TCD 6.1 L6
Anzahl der Zylinder/Hubraum in l	6/6,1
Nennleistung (EG 97/68 in kW/PS)	174/237
Einspritzsystem	Common-Rail-Hochdruckeinspritzung
Baujahr	2014
Abgasstufe	IV
Getriebe	stufenloses Vario-Getriebe ML 180
Kraftstoff-System	Zwei-Tank-System
Abgasnachbehandlung/ Emissionsminderung	gekühlte, externe Abgasrückführung (AGR), katalytisch beschichteter Dieselpartikelfilter, SCR-System

Traktor Valtra N101 Hi Tech

Tabelle 5 zeigt eine Auswahl an technischen Daten des Traktors. In MAUTNER et al. (2017) [27] ist die Maschine detailliert beschrieben. Der Dual-Fuel-Traktor verfügt über ein Dieselmotorsystem mit Common-Rail-Technik und ein separates CNG-

Kraftstoffsystem. Der Motor arbeitet nach dem Diesel-Zündstrahlprinzip, wobei das Gas in die Ansaugluft injiziert wird. Das Gas-Energie-Verhältnis beträgt je nach Betriebspunkt bis zu 80 % [27].

Tabelle 5: Technische Daten des Traktors Valtra N101 Hi Tech [27]

Traktortyp	Valtra N101 Hi Tech
Motortyp	AGCO Sisu Power 44CTA
Anzahl der Zylinder/Hubraum	4/4.397 cm ³
Nennleistung (Dieselbetrieb)	81 kW/110 PS
Einspritzsystem	Common-Rail
Baujahr	2012
Abgasstufe	IIIA
Gastanks	3
Tankvolumen Gas/Dieseläquivalent	200 l/40 l
Getriebe	Lastschaltgetriebe
Abgasnachbehandlung/ Emissionsminderung	interne Abgasrückführung, Oxidationskatalysator

Traktor John Deere 6215R

Tabelle 6 gibt einen Überblick zu den technischen Daten des Traktors. Bei diesem Fahrzeug wurden die Anpassungen für den ausschließlichen Betrieb mit Rapsölkraftstoff durch den Hersteller John Deere vorgenommen. Auch die Motorsteuerung wurde angepasst, sodass beim Betrieb mit Rapsölkraftstoff die gleiche Nennleistung wie bei der Serien-Dieselskonfiguration vorliegt [10].

Tabelle 6: Technische Daten des Traktors John Deere 6215R [10]

Traktortyp	John Deere 6215R
Motortyp	John Deere PowerTech PVX
Anzahl der Zylinder/Hubraum in l	6/6,8
Nennleistung (EG 97/68 in kW/PS) ohne IPM	158/215
Einspritzsystem	Common-Rail-Hochdruckeinspritzung
Baujahr	2015
Abgasstufe	IV
Getriebe	AutoPowr
Kraftstoff-System	Ein-Tank-System
Abgasnachbehandlung/ Emissionsminderung	gekühlte, externe Abgasrückführung (AGR) Oxidationskatalysator Dieselpartikelfilter SCR-System

Harvester John Deere 1470 G

In Tabelle 7 sind die wichtigsten technischen Daten des Harvesters aufgelistet. Dieser wurde zunächst in der Serien-Dieselfunkonfiguration betrieben und hinsichtlich der Real-emissionen untersucht. Im weiteren Projektverlauf wurde die Maschine von John Deere auf den ausschließlichen Rapsölkraftstoffbetrieb umgerüstet und die Motorsteuerung angepasst. Die wesentlichen Änderungen sind in EMBERGER et al. (2018) [8] beschrieben. Nach der Umrüstung erfolgten weitere Realemissionsmessungen im Betrieb mit Rapsölkraftstoff.

Tabelle 7: Technische Daten des Harvesters John Deere 1470G [8]

Harvester	John Deere 1470G
Motormodell	John Deere PowerTech Plus 6090
Motorfamilie	GJDXL09
Anzahl der Zylinder/Hubraum in l	6/9
Nennleistung (Dieselbetrieb) in kW	200
Einspritzsystem	Common-Rail
Baujahr	2016
Abgasstufe	IV
Kraftstoff-System	Ein-Kraftstoff-System
Abgasnachbehandlung/ Emissionsminderung	gekühlte, externe Abgasrückführung (AGR) Oxidationskatalysator Dieselpartikelfilter, SCR-System

4.5.2 Leichte Personenkraftwagen (Pkw)

Aus dem Dienstwagen-Fuhrpark des TFZ wurden zwei biokraftstofftaugliche Fahrzeuge für Realemissionsmessungen ausgewählt: ein Bioethanol-Pkw (E85) und ein CNG-Pkw.

Audi A4 flexible fuel

In Tabelle 8 sind wichtige technische Daten des Audi A4 flexible fuel zusammengefasst. Der Pkw ist vom Hersteller für den Betrieb mit Ottokraftstoff und Ethanolkraftstoff E85 freigegeben und kann wahlweise damit betankt werden.

Tabelle 8: Technische Daten des Audi A4 flexible fuel laut EG-Übereinstimmungsbescheinigung

Pkw	Audi A4 flexible fuel
Fahrzeugklasse	M1
Anzahl und Anordnung der Zylinder	4; in Reihe
Hubraum	1.984 cm ³
Kraftstoff	Benzin/Ethanol
Höchste Nennleistung	132 kW bei 4000 min ⁻¹
Abgasnorm	EURO 5
Getriebe	Manuell (6-Gang)
Erstzulassung	04.08.2010
Fahrleistung zu Beginn der Tests	195.200 km

Audi A3 g-tron

Tabelle 9 gibt einen Überblick zu wichtigen technischen Daten des Audi A3 g-tron. Der Pkw ist vom Hersteller serienmäßig mit einen Benzintank und CNG-Tanks ausgestattet. Solange sich ausreichend Gas in den Hochdruckspeichern befindet, wird der Motor mit diesem Kraftstoff betrieben. Nur wenn der Druck unter den notwendigen Minimalwert sinkt, wird während des Betriebs automatisch auf den flüssigen Benzin-Kraftstoff umgeschaltet.

Tabelle 9: Technische Daten des Audi A3 g-tron laut EG-Übereinstimmungsbescheinigung

Pkw	Audi A3 Sportback g-tron
Fahrzeugklasse	M1
Anzahl und Anordnung der Zylinder	4; in Reihe
Hubraum	1.395 cm ³
Kraftstoff	Benzin/Erdgas

Höchste Nennleistung	81 kW bei 4800 min ⁻¹
Abgasnorm	EURO 6 W
Getriebe	Automatik (7-Gang)
Erstzulassung	06.07.2016
Fahrleistung zu Beginn der Tests	21.500 km

4.6 Kraftstoffe

Die getesteten Fahrzeuge wurden mit handelsüblichen, an öffentlichen Tankstellen erhältlichen Kraftstoffen betankt, lediglich Rapsölkraftstoff nach DIN 51605 wurde von dezentralen Ölmühlen bezogen und die Fahrzeuge an Eigenverbrauchstankstellen betankt. Bei einem Kraftstoffwechsel im Laufe einer Testreihe wurde der Fahrzeugtank stets so weit wie möglich entleert und mit dem nächsten zu untersuchenden Kraftstoff mehrfach gespült. Im Anschluss erfolgte eine Konditionierfahrt mit dem neuen Kraftstoff mit mindestens der Dauer einer Emissionsmessung. Die im Rahmen des Vorhabens verwendeten Kraftstoffe sind in Tabelle 10 aufgelistet.

Tabelle 10: Verwendete Kraftstoffe mit zugehöriger Norm und im Bericht verwendeten Abkürzungen

Kraftstoff	Abkürzung	Norm
Dieselmkraftstoff	DK	DIN EN 590
Rapsölkraftstoff	RK	DIN 51605
Erdgas/Biomethan (Compressed Natural Gas)	CNG	DIN 51624
Ottokraftstoff mit einem maximalen Ethanolgehalt von 5 % (V/V)	E5	DIN EN 228
Ottokraftstoff mit einem maximalen Ethanolgehalt von 10 % (V/V)	E10	DIN EN 228
Ethanolkraftstoff	E85	DIN 51625

4.7 Teststrecken

Um Vergleiche der Realemissionen von Maschinen im Betrieb mit unterschiedlichen Kraftstoffen anstellen zu können, ist es notwendig, unter möglichst vergleichbaren Bedingungen mehrere Wiederholungen von Messfahrten durchzuführen. Bei Feldarbeiten von Traktoren ist dies nur begrenzt möglich, da die Messungen nur dann durchgeführt werden können, wenn die entsprechenden Arbeiten jahreszeitlich und anbautechnisch erforderlich sind. Diese können in der Regel auch nicht wiederholt werden, z. B. Mähen oder Pflügen. Hinzu kommt die Abhängigkeit von Witterung, Maschinenverfügbarkeit und Bereitschaft der Betreiber der jeweiligen Maschine, sich durch die Messung im normalen

Gebrauch einschränken zu lassen. Beispielsweise sind täglich mehrere Stunden zusätzliche Rüstzeit für die Messtechnik und Pausenzeiten für das Beenden und den Neustart (inkl. Gerätekalibrierung) einer Messung einzukalkulieren. Jedoch hat sich bei den ersten Tests mit einem modernen Traktor herausgestellt, dass Unterschiede in den Emissionen vor allem im niedrigeren Lastbereich, also beispielsweise bei Straßenfahrten, auftreten. Aufgrund dessen wurden auch Messungen von Realemissionen von Traktoren bei Straßenfahrten, die ausschließlich zum Zwecke der Messungen absolviert wurden, durchgeführt. Bei RDE-Messungen an Pkw ist nur eine Fahrt auf öffentlichen Verkehrswegen möglich. Aus diesen Gründen wurden unterschiedliche Testrouten ausgearbeitet.

4.7.1 Teststrecken für Traktoren

4.7.1.1 Teststrecke für Traktoren Version 2016

Nach dem Kenntnisstand Anfang des Jahrs 2016 ist für eine gültige PEMS-Messfahrt nach Möglichkeit mindestens die drei- bis fünffache Zyklusarbeit des NRTC-Prüfzyklus zu absolvieren [2]. Durch eigene Vorversuche wurde ermittelt, dass bei einer Straßenfahrt eines Traktors ohne zusätzliche Belastung, ausgenommen der PEMS-Messtechnik, dazu eine Fahrstrecke von mindestens 40 km notwendig ist. Aus diesem Grund wurde eine Strecke dieser Länge ausgearbeitet, die zusätzlich folgende Kriterien erfüllt:

- günstiger Verkehrsfluss, geringe Stauwahrscheinlichkeit,
- keine Durchfahrtsbeschränkungen bzw. Kraftfahrstraßen,
- Steigungen und Gefälle, um Lastvariationen und Schubbetrieb abbilden zu können,
- größerer Anteil an konstanter Maschinenlast (lange Gerade), da im Praxisbetrieb von Traktoren auch häufig stationäre Betriebsbedingungen vorherrschen,
- keine unübersichtlichen Kreuzungen, da Sichtbeeinträchtigung durch Frontanbau des PEMS besteht,
- Parkmöglichkeit nach etwa der Hälfte der Strecke, um eine längere Leerlaufphase während der Messung zu ermöglichen.

Abbildung 8 zeigt einen Kartenausschnitt und die ausgearbeitete Strecke. Start- und Endpunkt ist das Technologie- und Förderzentrum (TFZ) in der Schulgasse 18 in Straubing. Von hier aus wird die Stadt über die Chamer Straße verlassen. Von der Staatsstraße St 2125 wird links in Richtung Parkstetten über eine übersichtliche Einmündung abgelenkt. In Parkstetten wird der Kreisverkehr an der ersten Ausfahrt wieder verlassen und der abknickenden Vorfahrtstraße weiter gefolgt. Nach dem Überqueren der B 20 und A 3 wird die Ortschaft Agendorf passiert und am Ortsende links abgelenkt. Als Nächstes wird rechts auf die Staatsstraße St 2140 aufgefahren und ihr bis Mitterfels gefolgt. Dieser Abschnitt ist durch eine langgezogene Steigung charakterisiert. In Mitterfels wird rechts in Richtung Steinburg abgelenkt und der kurvigen Berg- und Talstrecke bis zum Kreisverkehr in Steinburg gefolgt. Dieser wird an der ersten Ausfahrt wieder verlassen und als nächstes die Ortschaft Hunderdorf passiert. Ein direkt an der

Staatsstraße St 2139 liegender Parkplatz bietet hier die Möglichkeit, eine längere Leerlaufphase zu simulieren. Nach dem Verlassen der Ortschaft Hunderdorf werden die A 3 und die Donau überquert, bevor rechts auf die Kreisstraße SR 12 abgebogen wird. Der folgende längere Streckenabschnitt weist keine Ortsdurchfahrten und auch keine nennenswerten Steigungen und Gefälle auf und spiegelt somit eine sehr stationäre Lastbedingung wider. Die SR 12 wird nach dem Gut Eglsee rechts in Richtung Hirschberger Ring wieder verlassen. Über die Ittlinger Straße wird schließlich zum Ausgangspunkt zurückgekehrt.



Abbildung 8: Teststrecke für Traktoren Version 2016

In Abbildung 9 ist das Höhenprofil der Teststrecke dargestellt. Das Minimum liegt bei 316 m, das Maximum bei 437 m über dem Meeresspiegel. Die gesamte Strecke liegt also im gemäßigten Höhenlagenbereich unter 700 m [13].

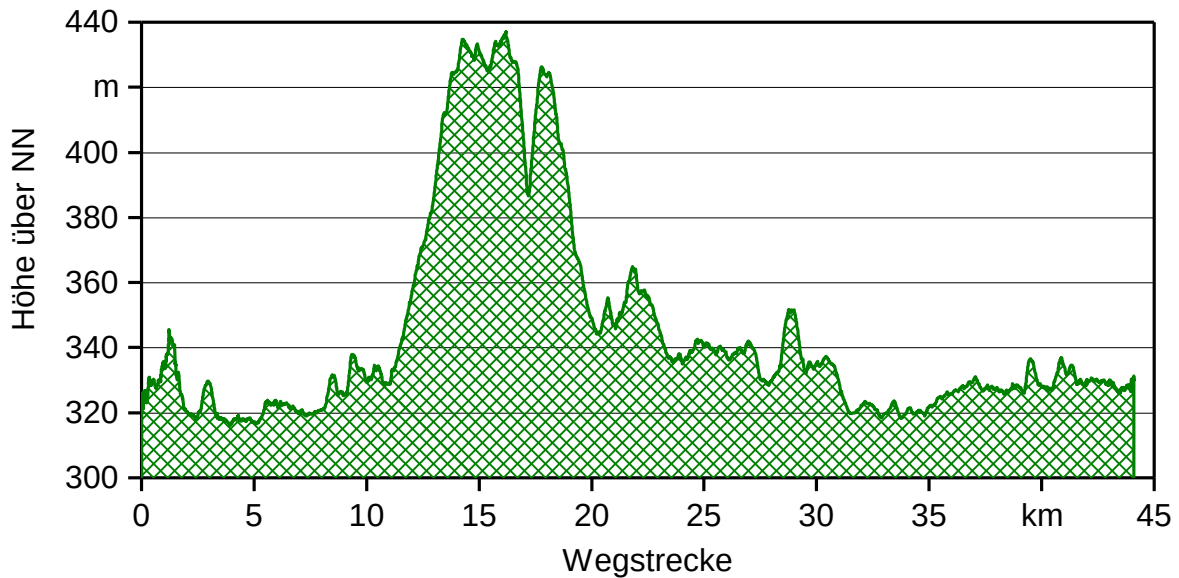


Abbildung 9: Höhenprofil der Teststrecke für Traktoren Version 2016

4.7.1.2 Teststrecke für Traktoren Version 2018

Nach Veröffentlichung der Verordnung EU 2017/655 [15] musste die Streckenauswahl an die neuen Vorgaben angepasst werden. Die befahrenen Straßen bleiben dabei weitgehend dieselben, die Gesamtstrecke wurde jedoch auf ca. 115 km angehoben. Die offizielle Vorgabe für den Umfang der Messung beträgt nun die fünf- bis siebenfache NRTC-Arbeit bzw. -Kohlenstoffdioxidmasse. Des Weiteren wurden im Laufe des Projekts mehrfach deutliche Abweichungen bei der über die CAN-Daten ermittelten Leistung festgestellt (siehe Unterkapitel 4.9). Die NRTC-Arbeit als Basis für die notwendige Messdauer wurde deshalb verworfen und es wird nur noch die während des NRTC am Traktorenprüfstand emittierte Kohlenstoffdioxidmasse als Referenz herangezogen. In Abbildung 10 ist die neue Strecke dargestellt. Im Gegensatz zur Version 2016 wird nun vor dem Überqueren der Donau bei Bogen zweimal rechts auf die St 2125 abgebogen und bei Parkstetten wieder dem ursprünglichen Streckverlauf gefolgt. Der Streckenabschnitt Parkstetten-Mitterfels-Hunderdorf wird im Rahmen einer Messung nun also insgesamt dreimal abgefahren. Abbildung 11 zeigt das Höhenprofil der Traktorteststrecke in der Version 2018.



Abbildung 10: Teststrecke für Traktoren Version 2018

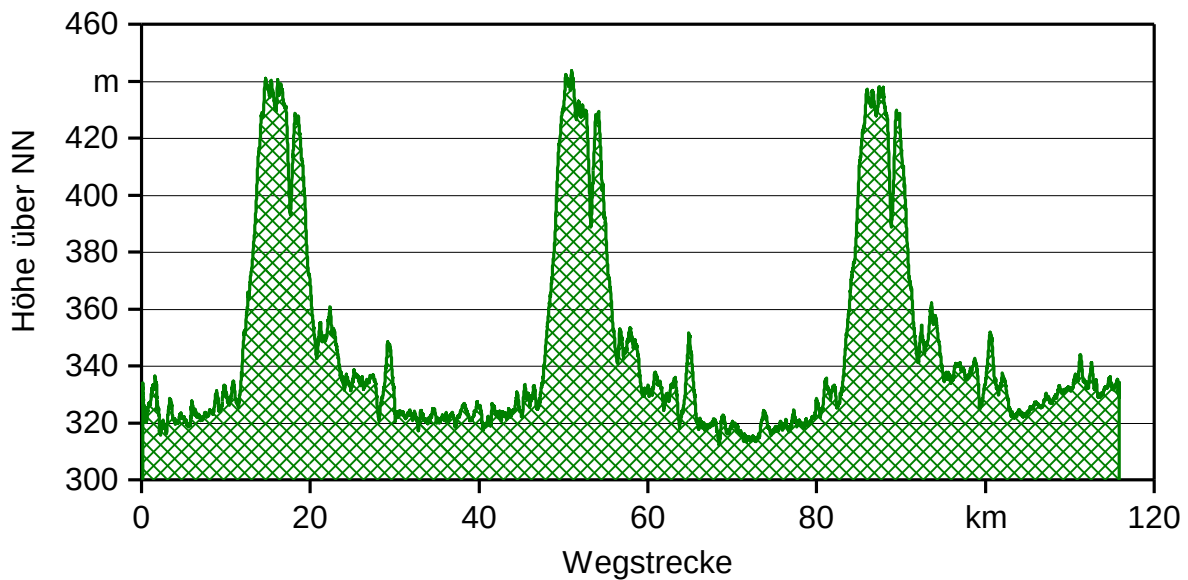


Abbildung 11: Höhenprofil der Teststrecke für Traktoren Version 2018

4.7.2 Teststrecke für Pkw

Im Rahmen einer in diesem Vorhaben betreuten Masterarbeit wurden RDE-Messungen an einem Audi A4 flexible fuel durchgeführt. Dafür musste eine der Gesetzgebung entsprechende Route für die Messfahrten ausgearbeitet werden. Der genaue Streckenverlauf ist in FRANKL (2017) [22] beschrieben. Im weiteren Verlauf des Projekts wurden im Mai 2018 auch RDE-Messungen an einem Audi A3 g-tron durchgeführt. Dafür wurde die Strecke nochmals an die Anforderungen der nun verfügbaren Verordnung EU 2017/1154 [17] angepasst. Demnach soll die Strecke zu je etwa einem Drittel Stadt-, Überland- und Autobahnanteil bestehen und diese Abschnitte auch in dieser Reihenfolge möglichst ohne Vermischung nacheinander abgefahren werden. Die drei Betriebsarten sind dabei durch die tatsächliche Fahrgeschwindigkeit voneinander abgegrenzt und die Anteile können sich von Fahrt zu Fahrt ändern, wenn beispielsweise durch ein langsames vorausfahrendes Fahrzeug der Geschwindigkeitskorridor nicht eingehalten werden kann. Der Stadtbetrieb ist dabei durch Geschwindigkeiten von höchstens 60 km/h, der Landstraßenbetrieb durch Geschwindigkeiten von mindestens 60 und höchstens 90 km/h und der Autobahnbetrieb durch Geschwindigkeiten über 90 km/h gekennzeichnet. Kurzzeitiges Unterschreiten des Soll-Geschwindigkeitsbereichs ist dabei, z. B. bei Ortsdurchfahrten oder dem Passieren von Mautstellen, erlaubt. In Abbildung 12 ist der Streckenverlauf dargestellt. Die Messfahrt beginnt auf dem Gelände des TFZ und es werden zunächst ca. 20 km Strecke im Stadtgebiet Straubing absolviert. Danach beginnt der Überlandanteil über die Ortschaften Parkstetten, Mitterfels, Hunderdorf, Hofweinzier, Niederwinkling bis zur Autobahnauffahrt Metten. Hier beginnt der abschließende Autobahnanteil auf der A 3 bis zur Ausfahrt Straubing. Der Abschnitt der B 20 von der Autobahn bis zur Ausfahrt Straubing Ost wird aufgrund des Ausbauzustands der Straße und der hier möglichen Fahrgeschwindigkeit von über 90 km/h ebenfalls zum Autobahnanteil gezählt. Nach dem Verlassen der B 20 wird unmittelbar ein Parkplatz angefahren, auf dem die

Messung ohne weiteren Stadtanteil beendet wird. Die Gesamtstrecke beträgt ca. 95 km und weist eine theoretische Fahrtzeit von ca. 105 Minuten auf, sodass auch die gesetzlich vorgegebene Prüfdauer zwischen 90 und 120 Minuten bei normaler Verkehrslage eingehalten wird.

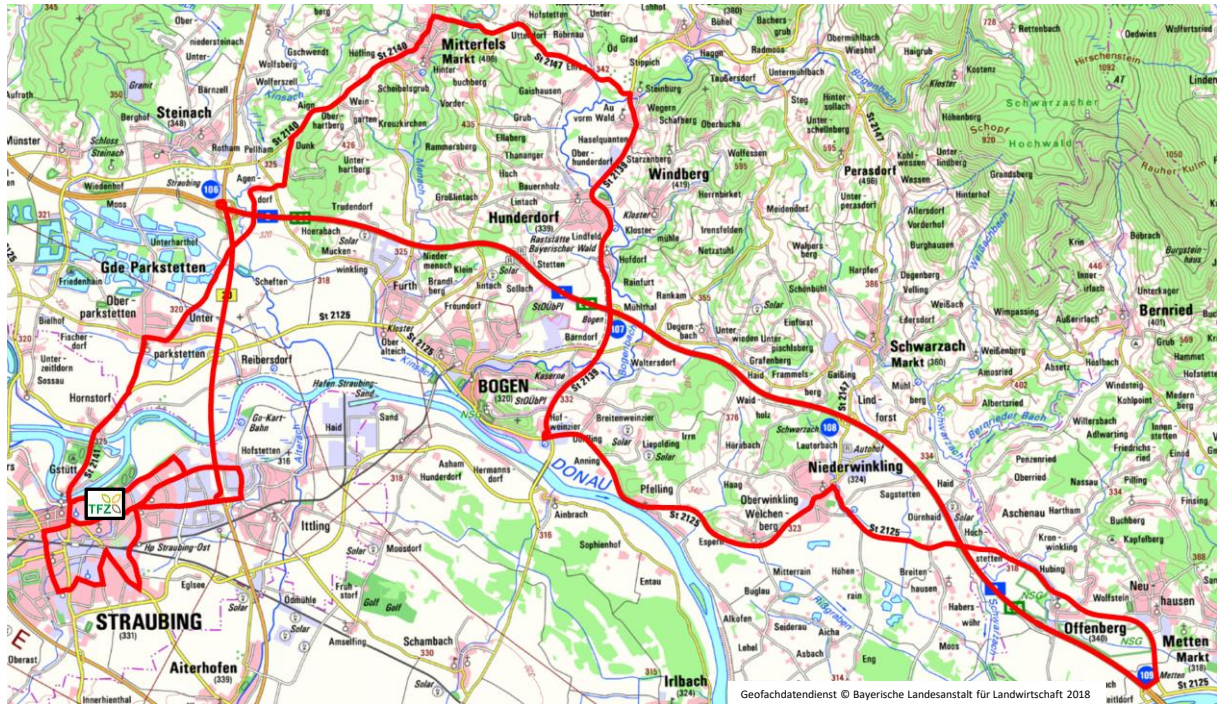


Abbildung 12: Teststrecke für PKW Version 2018

4.8 Stationäre Emissionsmesstechnik

Im Rahmen des Projekts wurden auch Vergleichsmessungen zwischen portabler und stationärer Emissionsmesstechnik durchgeführt. Diese wurden zum einen auf dem Traktorenprüfstand des Technologie- und Förderzentrums in Straubing durchgeführt und zum anderen auf dem Pkw-Rollenprüfstand der Abgasprüfstelle der FH Bern in Biel/Nidau in der Schweiz. Der Traktorenprüfstand ist in Ettl et al. (2019) [10] und der Rollenprüfstand in Czerwinski et al. (2017) [5] detailliert beschrieben.

4.9 Berechnung der Leistung für die Emissionsbewertung

In der Emissionsgesetzgebung für leichte Personenkraftwagen und Nutzfahrzeuge wird die emittierte Schadstoffmasse auf die zurückgelegte Wegstrecke bezogen. Der Grenzwert wird in g/km angegeben. Mithilfe portabler Emissionsmesstechnik können sowohl die Schadstoffmasse (Berechnung über Abgasmassenstrom und Schadstoffkonzentration im Abgas) als auch die zurückgelegte Wegstrecke (GPS) unabhängig bestimmt und zuverlässige Werte errechnet werden.

Für Motoren im Non-Road-Bereich wird der Grenzwert jedoch in g/kWh angegeben. Auch hier kann mit mobiler Emissionsmesstechnik die emittierte Schadstoffmasse, jedoch die Leistung der Maschine bzw. die verrichtete Arbeit während des Emissionstests in der Regel nicht bestimmt werden. Dazu müsste ein Drehmomentsensor an der Kurbelwelle des Motors installiert werden, was jedoch aus Zeit-, Kosten- und Platzgründen für RDE-Messungen an wechselnden Fahrzeugen nicht realisierbar ist. Deshalb ist die einzige praktikable Möglichkeit, das Lastsignal der Motorsteuerung (% vom Maximalwert bei der aktuellen Drehzahl) und die Motordrehzahl aus dem Fahrzeug-CAN-Bus aufzuzeichnen und bei der Auswertung mit einer Volllastkurve des Motors zu verrechnen und so eine theoretische Leistung zu bestimmen. Diese Vorgehensweise birgt jedoch Gefahren, mit unkorrekten Werten zu rechnen. Zum einen kann das Lastsignal ungenau oder manipuliert sein und zum anderen kann auch die zur Verfügung stehende Volllastkurve nicht exakt zum untersuchten Motor passen. Um hier möglichst exakt zu arbeiten, müsste im Rahmen der RDE-Messung auch der Motor ausgebaut und das Lastsignal sowie die Volllastkurve am Motorenprüfstand evaluiert werden.

Beim Einsatz eines alternativen Kraftstoffs mit vom Bezugskraftstoff der Zertifizierung abweichenden Eigenschaften kann das zur Verfügung stehende Lastsignal der Motorsteuerung deutlich von der Realität abweichen, da dies in der Regel auch nur für diesen Bezugskraftstoff kalibriert ist. Eine Korrektur des Signals beim Einsatz alternativer Kraftstoffe ist derzeit nicht möglich. Um im Rahmen dieses Vorhabens und der zur Verfügung stehenden Möglichkeiten dennoch möglichst genaue Messergebnisse zu erzielen, wurden die untersuchten Traktoren auch am Traktorenprüfstand des TFZ einer Leistungsmessung an der Zapfwellenbremse unterzogen und eine möglichst aktuelle Volllastkurve mit dem jeweiligen untersuchten Kraftstoff für die Auswertung herangezogen. Die gemessene Leistung entspricht jedoch nicht der Motorleistung, sondern der Zapfwellenleistung, da Verluste durch Getriebe und Nebenverbraucher am Traktorenprüfstand nicht bestimmt werden können. Die in diesem Bericht angegebenen spezifischen Emissionen in g/kWh von Traktoren beziehen sich daher nicht auf die Motorarbeit, sondern auf die Zapfwellenarbeit. Da die Zapfwellenarbeit im Bereich von 20 % bis 30 % geringer ist als die Motorarbeit, fallen die spezifischen Emissionen entsprechend höher aus. Eine genaue Quantifizierung der Verluste ist jedoch nicht möglich. Für Non-Road-Fahrzeuge, die mit alternativen Kraftstoffen betrieben werden und nicht am Prüfstand hinsichtlich der Leistung untersucht werden können, da sie beispielsweise keine Zapfwelle haben, muss noch eine praktikable Lösung gefunden werden, wie die Volllastkurven mit dem jeweils eingesetzten Kraftstoff bestimmt werden können. Gegebenenfalls kann nur auf Herstellerdaten zurückgegriffen und darauf vertraut werden, dass diese korrekt sind.

Bei schweren Nutzfahrzeugen muss das Drehmomentsignal nach EU-Verordnung 582/2011, Anhang I, Abschnitt 5.2.5 bzw. Anhang II Abschnitt 5.1.2 innerhalb bestimmter Toleranzgrenzen liegen, damit die Prüfung in Betrieb befindlicher Fahrzeuge bestanden werden kann. Für die Bewertung der Realemissionen von Non-Road-Fahrzeugen wurde in der Gesetzgebung (Verordnung EU 2017/655, Anlage 6) auch eine derartige Regelung eingeführt, die jedoch nicht so genau wie bei der HDV-Gesetzgebung wirkt. Gerade im Bereich der NRMM müsste das Lastsignal jedoch hochpräzise sein, da die hierüber

ermittelte Arbeit auch Bezugsgröße für die Emissionsmasse ist und direkt in das mit dem Grenzwert zu vergleichende Endergebnis einfließt. Für Fahrzeuge, die mit unterschiedlichen Kraftstoffen betrieben werden dürfen, müssten auch für jeden zugelassenen Kraftstoff die entsprechenden ECU-Daten in der notwendigen Qualität verfügbar sein. Die Ende Juni 2018 veröffentlichte Verordnung 2018/932 [18] greift diese Problematik im Heavy-Duty-Bereich bereits auf und es soll zukünftig für die durch die zugelassenen alternativen Kraftstoffe verursachte Drehmomentabweichung ein Leistungskorrekturfaktor in den Typgenehmigungsunterlagen angegeben werden. Eine derartige Regelung sollte auch für NRMM umgesetzt werden. Auch eine Vorgehensweise, wenn sich die Leistung eines Motors beispielsweise aufgrund von Verschleißerscheinungen über seine Lebensdauer verändert, sollte noch definiert werden.

4.10 Korrektur der NO_x-Emissionen um Umgebungsfeuchte und Umgebungstemperatur

Bei Realfahrtmessungen ist nach der derzeit gültigen Gesetzgebung (EU-Verordnung 2016/427 für leichte Personenkraftwagen und Nutzfahrzeuge, 582/2001 für schwere Nutzfahrzeuge und 2017/655 für NRMM) keine Korrektur der NO_x-Emissionen um Umgebungstemperatur und -feuchte vorzunehmen. Deshalb werden in diesem Bericht auch nur unkorrigierte Werte verwendet. Da an stationären Prüfständen jedoch in der Regel eine Korrektur der NO_x-Messwerte vorgenommen wird, muss dieser Umstand beim direkten Vergleich von Prüfstands- und Realfahrtmessungen berücksichtigt werden. Bei Vergleichsmessungen mit stationärer und mobiler Messtechnik am Traktorenprüfstand wurden für beide Varianten jeweils unkorrigierte Werte verwendet.

5 Ergebnisse

Im Folgenden werden die erzielten Ergebnisse dargestellt. Diese umfassen die Inbetriebnahme des PEMS und des mobilen Kraftstoffverbrauchsmesssystems dQRoad, Konstruktion und Fertigung einer Schutzbox, Vergleichsmessungen mit dem Traktorenprüfstand, Feld- und Straßenfahrmessungen an verschiedenen Traktoren und einem Harvester sowie RDE-Messungen an zwei Pkw. Die Messungen werden dabei zum Teil mit unterschiedlichen Kraftstoffen durchgeführt. Da erst im Laufe des Projekts vom Gesetzgeber verbindliche Vorgehensweisen für die Durchführung von Realemissionsmessungen definiert wurden, wurden zunächst alternative Auswertungsmethoden angewendet und verglichen. Alle Untersuchungen bis zum Unterkapitel 5.7 wurden vor der Veröffentlichung der entsprechenden Verordnungen durchgeführt und sind deshalb nicht konform mit der nun verbindlich vorgegebenen Methodik. Durch die Erfahrungen und Optimierungsmaßnahmen an der Messtechnik konnten ab dem Zeitpunkt des Inkrafttretens der Gesetzgebung alle weiteren Messungen ab Unterkapitel 5.8 weitgehend nach den nun geltenden Vorgaben durchgeführt werden.

5.1 Inbetriebnahme des PEMS

5.1.1 Erstinbetriebnahme des PEMS

Zur Inbetriebnahme des Messsystems wurde die gesamte Technik zunächst auf einem Rolltisch montiert und dieser an die Fronthydraulik eines Versuchstraktors angekoppelt (siehe Abbildung 13). Die in Unterkapitel 5.3 beschriebene PEMS-Box war zu diesem Zeitpunkt Anfang des Jahrs 2015 noch nicht fertiggestellt, da der genaue Platzbedarf und die günstigste Anordnung der Systemkomponenten erst evaluiert werden sollten. Als Erstes wurden alle Messgeräte angeschlossen und gestartet. Danach wurden erste Kalibrierungen und Tests durchgeführt. Bei einer kurzen Testfahrt auf dem Gelände des TFZ konnten erste Daten gesammelt werden. Mehrere Probleme konnten während der Inbetriebnahme direkt durch den anwesenden Applikationsingenieur des Herstellers behoben werden, weitere im Nachgang beim Hersteller Sensors. Einige wesentliche Funktionen konnten mit dem anfangs ausgelieferten Ecostar-System nicht umgesetzt werden und wurden erst nach einem kompletten System-Update auf die Ecostar-Plus-Plattform realisiert.



Abbildung 13: Erstinbetriebnahme des PEMS

5.1.2 Update des PEMS auf Ecostar Plus

Im Mai 2016 erfolgte das vom Hersteller angekündigte Update des PEMS-Systems auf die neue Ecostar-Plus-Plattform. Dadurch konnten bestellte, aber mit dem alten System nicht realisierbare Funktionalitäten bereitgestellt werden. Nachfolgend sind die wesentlichen Neuerungen beschrieben.

5.1.2.1 DualFID

Bis zum Update konnte das Messsystem nur mit einem Single-FID betrieben werden, es konnten also die Methan-Emissionen von Dual-Fuel-Fahrzeugen nicht separat bestimmt werden. Mit dem zum Update bereitgestellten DualFID ist dies möglich. Das DualFID ist nur mit dem Ecostar-Plus-System kompatibel und hätte mit dem Messsystem vor dem Update nicht betrieben werden können. Bei ersten Messungen fiel auf, dass der NMHC-Katalysator nicht funktionierte und der Methan-Kanal auch sonstige Kohlenwasserstoffe detektiert. Aus diesem Grund musste das granulatformige Katalysatormaterial ausgetauscht werden. Daraufhin erfolgte wieder eine ausreichende Umsetzung von NMHC (Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe). Eine vom Hersteller später bereitgestellte Kundeninformation weist darauf hin, dass zur Kalibrierung des DualFID nicht Propan in Stickstoff

als Kalibriergas, sondern ausschließlich Propan in synthetischer Luft bzw. Methan in Stickstoff bzw. synthetischer Luft verwendet werden darf. Sauerstoffmangel bei der Umsetzung von NMHC hat eine beschleunigte Alterung des Katalysatormaterials zur Folge.

5.1.2.2 CAN-Output

Zur Integration der Messwerte des PEMS in den vorhandenen Traktorenprüfstand wurde zunächst eine sogenannte INCA-Box ausgeliefert, welche die Messdaten als CAN-Signal ausgibt. Diese war jedoch fehlerhaft und es kam häufig zu Verbindungsabbrüchen. Im Rahmen des Updates wurde ein *In-Vehicle Control Module* (ICM) ausgeliefert, das sowohl eine Schnittstelle zur Erfassung der Fahrzeug-CAN-Daten als auch eine CAN-Output-Schnittstelle zur kontinuierlichen Übertragung von Messwerten des PEMS an ein externes Datenerfassungssystem beinhaltet (vgl. Abschnitt 4.1.8).

5.1.2.3 Erfassung von Analogsignalen

Ebenfalls im Rahmen des Updates wurde ein Modul ausgeliefert, mit dem Analogsignale von externen Sensoren erfasst werden und zusammen mit den Messwerten der Gasanalysatoren aufgezeichnet werden können (vgl. Abschnitt 4.1.9). Auf insgesamt fünf Kanälen können Thermoelemente bzw. Sensoren mit einem Ausgangssignal von 0 V bis 10 V angeschlossen werden. Auch eine Aufzeichnung des Kraftstoffverbrauchs, ermittelt mit dem Messsystem dQRoad, ist nun möglich. Zur Integration dieses Moduls in die PEMS-Box wurde eine Edelstahl-Box gefertigt, die den Abmessungen der Analysatoren entspricht und mit den üblichen Schnellverschlüssen auf einem der beiden Messtürme befestigt werden kann. Diese Box beinhaltet auch das neue Netzteil des PEMS-Systems.

5.1.2.4 Stromversorgung des PEMS

Im Rahmen des Updates auf das Ecostar-Plus-System wurden die beiden PDM-Module gegen ein PDCM-Modul ausgetauscht (vgl. Abschnitt 4.1.1). Dieses PDCM verfügt nicht mehr wie die beiden PDM über einen 230-V-Eingang, sondern benötigt ein externes Netzteil, dessen Ausgang an einen der beiden 12-V-Eingänge angeschlossen wird. Der andere 12-V-Eingang ist mit der Pufferbatterie verbunden. Bei den PDM wurde die Pufferbatterie nur belastet, wenn am 230-V-Eingang keine Spannung vorhanden, also z. B. der Generator ausgefallen war. Das PDCM erkennt nun allerdings nicht, an welchem der beiden 12-V-Eingänge die Pufferbatterie und an welchem das Netzteil angeschlossen ist. Es wird immer der Pfad mit der höheren Spannung ausgewählt. Da das Netzteil anfangs eine maximale Ausgangsspannung von nur 13,4 V bereitstellte, das Batterieladegerät jedoch über 14 V, erfolgte die Versorgung des PEMS fast ausschließlich über den Pufferbatterie/Batterieladegerät-Pfad. Dies ist jedoch für den Dauereinsatz nicht optimal und eine Reduktion der Ladespannung würde zu einer unzureichenden Ladung der Batterie führen. Vom Hersteller wurde als Lösung ein Netzteil mit einer höheren Ausgangsspannung bereitgestellt, jedoch kommt es weiterhin in seltenen Fällen dazu, dass der Batte-

riepfad als Spannungsversorgung ausgewählt wird, obwohl auch eine Netzversorgung vorhanden wäre.

5.1.2.5 Datenaufzeichnung und Datenauswertung

Vor dem Update auf das Ecostar-Plus-System kam es immer wieder vor, dass Datensätze von Messungen unvollständig aufgezeichnet wurden, nicht ausgewertet werden konnten oder erst gar nicht vom Messsystem auf einen PC heruntergeladen werden konnten. Dieser Umstand konnte durch die Optimierung des Datenflusses im Rahmen des Ecostar-Plus-Updates und mehrerer folgender Software-Updates behoben werden. Außerdem war bislang keine Auswertung einer Messung an einem Fahrzeug im Betrieb mit mehr als einem Kraftstoff möglich. Die Dual-Fuel-Berechnung auf Basis einer Kohlenstoffbilanz wurde durch eine neue Software-Version des Auswertungstools eingeführt.

5.2 Mobiles Kraftstoffverbrauchsmesssystem dQRoad

Das mobile Kraftstoffverbrauchsmesssystem dQRoad der Firma dQ/dt ist nicht mit einer zum PEMS-System der Firma Sensors Inc. kompatiblen Datenschnittstelle ausgestattet. Deshalb musste zunächst eine geeignete Datenerfassung aufgebaut werden, bevor erste Vergleichsmessungen durchgeführt werden konnten.

5.2.1 Aufbau einer geeigneten Datenerfassung

Das Kraftstoffverbrauchsmesssystem dQRoad liefert im Standardumfang die Messwerte der einzelnen Sensoren in unterschiedlichen Formaten. Der Volumenstromsensor liefert eine hochfrequente TTL-Impulsfolge (5 V) mit bis zu 50 kHz, der Temperatursensor am Dichtesensor liefert ein Pt100-Signal und der Dichtesensor gibt den Wert für Dichte und Temperatur am Dichtesensor über eine serielle Schnittstelle digital aus. Da im mobilen Einsatz der Messwert vom PEMS-System aufgezeichnet werden muss und hierfür nur ein Analogeingangskanal mit 0 V bis 10 V zur Verfügung steht, müssen die einzelnen Signale mit einem geeigneten System erfasst, verarbeitet und der berechnete Massenstrom als 0–10-V-Signal ausgegeben werden. Dazu wurde Hardware von National Instruments ausgewählt und die notwendige Software mit LabVIEW programmiert. Die Hardware wurde in einem kompakten Schaltschrank installiert, sodass diese auch für den Feldeinsatz geschützt ist. Die Hauptkomponenten sind das Analogerfassungsmodul NI USB-6211 und der Industrie-PC NI TPC-2206 mit Touchscreen. Die Berechnungsweise ist in Unterkapitel 4.2 beschrieben. Abbildung 14 zeigt die Benutzeroberfläche der Software auf dem Touchscreen. Hier muss vor der Messung nur die Art des Kraftstoffs manuell ausgewählt werden, damit das Programm mit dem richtigen Wert für den Wärmeausdehnungskoeffizienten arbeitet. Alles Weitere erfolgt vollautomatisch.

The screenshot shows a LabVIEW front panel titled 'Kraftstoffverbrauch mit dQRoad' with the TFZ logo. It features a tabbed interface with 'Werte' (Values) selected. The parameters and their current values are as follows:

Parameter	Value	Unit
Kraftstoff (Fuel)	Rapsöl	
Wärmeausdehnungskoeffizient (Coefficient of thermal expansion)	0,00	1/K
Volumenstrom (Volume flow rate)	0,00	l/h
Massenstrom (Mass flow rate)	0,00	kg/h
Dichte gemessen (Measured density)	0,0	kg/m ³
Dichte am Volumenstromsensor (Density at volume flow sensor)	0,0	kg/m ³
Temperatur am Dichtesensor (Temperature at density sensor)	0,00	°C
Temperatur am Volumenstromsensor (Temperature at volume flow sensor)	0,00	°C

Abbildung 14: Bildschirmoberfläche des LabVIEW-Programms zur Datenerfassung und Verarbeitung der Signale des dQRoad

Da das Kraftstoffmassenstrommessgerät auch stationär am Traktorenprüfstand des TFZ eingesetzt werden soll, wurde neben dem Analogausgang für das Massenstromsignal auch eine digitale serielle Schnittstelle programmiert, mit der die gemessenen bzw. berechneten Werte des dQRoad als String in folgendem Format ausgegeben werden:

dQRoad a.aaaa b.bbbb c.cccc d.dddd e.eeee EOL

Zu Beginn steht als Anzeige des Beginns eines neuen Datensatzes der Name des Messgeräts „dQRoad“, danach folgen fünf Fließkommazahlen mit einer Genauigkeit von vier Stellen und als Abschluss ein *End-of-line Character*. Dieser kann beim Auslesen der Schnittstelle als *Termination Character* verwendet werden und den Lesevorgang beenden. Die Fließkommazahlen stehen für: a = Volumenstrom in l/h, b = Temperatur am Volumenstromsensor in °C, c = Dichte in kg/m³, d = Temperatur am Dichtesensor in °C und e = Massenstrom in kg/h.

5.2.2 Vergleichsmessungen dQRoad und Kraftstoffwaage

Bei ersten Versuchen mit dem Kraftstoffverbrauchsmesssystem zeigte sich eine sehr gute Korrelation zwischen dem gravimetrisch bestimmten Wert und dem Messwert des dQRoad. Allerdings konnte im reinen Pflanzenölbetrieb mit dem dQRoad nur ein maximaler Massenstrom von ca. 25 kg/h dargestellt werden. Als Ursache wurde die Überstrombegrenzung des Messsensors ermittelt. Aufgrund der gegenüber Dieselmotorkraftstoff deutlich erhöhten Viskosität von Pflanzenölkraftstoff ist auch ein deutlich höheres Drehmoment der Pumpe notwendig. Deshalb wurde die Versorgungsspannung des Antriebsmotors von 12 V auf 24 V erhöht. Durch diese Maßnahme konnte der maximale Massenstrom im Pflanzenölbetrieb nahezu verdoppelt werden. Als weiterer Lösungsansatz, um den Nennmassenstrom von 90 kg/h auch mit Pflanzenöl zu erreichen, wurde vom Hersteller zusätzlich der Motor der Grundausstattung gegen einen drehmomentstärkeren Motor ausgetauscht. Nach diesen Modifikationen wurde eine Testmessung am Traktorenprüfstand durchgeführt. Dazu wurde an einem Traktor (Fendt 724) sowohl eine Waage (Mettler Toledo Präzisionswaage KB60) zur gravimetrischen Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs als auch das dQRoad angeschlossen. Anschließend wurde die Leistung des Traktors im Abstand von einer Minute stufenweise um jeweils 10 kW von 10 kW auf 120 kW gesteigert und so auch der Verbrauch stetig erhöht. Die ermittelten Verbräuche lagen dabei zwischen ca. 12 kg/h und 38 kg/h. Insgesamt wurde der Versuch dreimal hintereinander durchgeführt und jeweils ca. 5 kg Pflanzenölkraftstoff verbraucht. Die Ergebnisse dieses Tests sind in Tabelle 11 dargestellt. Im Mittel zeigte das dQRoad im gemessenen Bereich mit Pflanzenölkraftstoff einen um 0,8 % geringeren Verbrauch an als die gravimetrische Bestimmung. Die Abweichung des Kraftstoffmassenstroms steigt mit sinkender Kraftstofftemperatur und steigendem Durchfluss leicht an. Dies ist auf die Viskosität des Mediums zurückzuführen. Insgesamt ist eine ausreichende Genauigkeit des Messsystems auch im Pflanzenölbetrieb gewährleistet.

Tabelle 11: Vergleich des gravimetrisch und mit dQRoad ermittelten Pflanzenölkraftstoffverbrauchs eines Fendt 724

Parameter	Wdh. 1	Wdh. 2	Wdh. 3	Mittelwert
Gravimetrische Bestimmung: Masse des verbrauchten Kraftstoffs in kg	4,943	5,043	5,044	5,010
Mittlere Kraftstofftemperatur in °C	46,9	50,1	53,6	50,2
Abweichung des mit dQRoad ermittelten Verbrauchs von der gravimetrischen Bestimmung				
– absolut in kg	–0,048	–0,041	–0,031	–0,040
– relativ in %	–0,97	–0,82	–0,61	–0,80

5.3 Konstruktion und Fertigung einer PEMS-Box für den Offroad-Einsatz

Auf Basis der Erkenntnisse des NRMM-PEMS-Pilotprogramms, der Informationen des Messgeräteherstellers und eines Erfahrungsaustauschs mit anderen PEMS-Anwendern wurde eine Box für das portable Emissionsmesssystem mit folgenden Anforderungen konstruiert und gefertigt:

- Schutz der Messgeräte vor Staub, Schmutz und Wasser,
- Schutz der Messgeräte vor Fremdkörpern,
- Schutz der Messgeräte bei Kollisionen,
- Schutz der Messgeräte vor Vibrationen und Stößen,
- ausreichende Belüftung der Messgeräte zum Schutz vor Überhitzung,
- Aufnahme von Zusatzkomponenten wie Stromversorgung und Gasflaschen,
- Bereitstellen verschiedener Standard-Koppeleinrichtungen zur einfachen Fixierung an Front- und Heckkraftheber sowie Frontlader,
- leichte Zugänglichkeit der Messgeräte zu Kalibrier- und Wartungszwecken,
- Ersatz für bzw. Kombination mit Frontballastgewicht,
- Signalisierung eines Generatorsausfalls.

Der Grundrahmen besteht aus einer 80 mm × 80 mm Stahlrohrkonstruktion mit einer Breite von 1.400 mm, einer Höhe von 1.200 mm und einer Tiefe von 1.000 mm. Daran ist eine Euro-Norm-Frontladeraufnahme fest verschweißt, sodass die Box direkt an einen Standard-Frontlader angekoppelt werden kann. Durch Einsatz eines Dreipunktadapters kann die Box auch an Front- und Heckkraftheber von Traktoren angekoppelt werden. Der Einsatz einer derartigen Adaptierung bietet den Vorteil, dass im Frontladereinsatz kein Adapter notwendig ist und dieser weniger stark belastet wird und im Einsatz am Front- bzw. Heckkraftheber eine zusätzliche gewünschte Ballastierung durch den Dreipunktadapter erfolgt. Bei besonders schweren Anbaugeräten am Heck von Traktoren kann es notwendig sein, die PEMS-Box zusätzlich zu ballastieren, damit die Vorderräder des Traktors stets ausreichenden Bodendruck bewahren. Dazu wurden drei 20-mm-Stahlplatten mit Abmaßen von 1.000 mm × 1.400 mm und einer Masse von je ca. 220 kg angefertigt (siehe Abbildung 15), die nach Bedarf an die Unterseite der PEMS-Box geschraubt werden können.



Abbildung 15: Ballastgewichte zur Montage an der PEMS-Box

Aufgrund der geplanten Einsatzbedingungen wurde die Box mit robustem, korrosionsbeständigem Aluminium-Riffelblech mit Moosgummi-Abdichtung verkleidet. Dies soll Schutz vor Fremdkörpern, Schmutz und Wasser bieten und auch kleineren Kollisionen standhalten. Durch die Dicke des Materials von 4 mm ist eine ausreichende Steifigkeit gewährleistet. Die strukturierte Oberfläche ist weniger empfindlich gegenüber Kratzern und Dellen als beispielsweise eine lackierte oder Edelstahl-Oberfläche.

Den Boden der PEMS-Box bildet eine wasserbeständige 18-mm-Mehrschicht-Holz-Siebdruckplatte. Darauf sind die Stahlgrundplatten der Messgeräte-Stacks verschraubt. Zwischen den Grundplatten und den Messgeräten befinden sich Drahtseilswingungs-dämpfer zum Schutz vor Vibrationen und Stößen. Um ein Kippen bzw. zu weites Aus-schwenken der Messgerädetürme zu unterbinden, wurde an der Oberseite ebenfalls eine höhenverstellbare Drahtseilfederlagerung installiert.

Um eine gute Zugänglichkeit zu den Messgeräten zu bewahren, wurden an der Frontseite zwei Türen installiert, sodass sich bei Bedarf die gesamte Frontfläche einfach öffnen lässt. Durch zwei Spannverschlüsse und eine Moosgummiabdichtung sind ein sicheres Schließen und Schutz vor Staub und Feuchtigkeit gewährleistet. Die Oberseite der Box ist ebenfalls durch eine Klappe geschlossen. Diese ist mit zwei Gasdruckfedern ausgestattet, um das Öffnen zu erleichtern. Des Weiteren wurden deren Auslegung und Lagerung so gewählt, dass die Klappe sowohl in der offenen als auch in der geschlossenen Stellung arretiert. In der geschlossenen Stellung kann die Klappe durch zwei zusätzliche Spannverschlüsse gegen selbsttätiges Öffnen bei Stößen gesichert werden.

Die Belüftung der PEMS-Box erfolgt über zwei 12-V-Axiallüfter, welche beide Luft von außen durch eine Filtermatte ansaugen und ins Innere des Gehäuses blasen. Die abströmende Luft kann über eine Öffnung für die Probenahmeleitungen und Verbindungskabel der Messgeräte entweichen. Durch diese Arbeitsweise der Belüftung wird ein Eindringen von Staub weitestgehend vermieden.

Im Inneren der ausreichend dimensionierten Box wurden verschiedene Halterungen zur sicheren Fixierung einer 12-l-He/H₂-Flasche als Brenngas für den FID, einer Stickstoffflasche zur Nullpunktkalibrierung und für die 12-V-Pufferbatterie installiert. Auch das Ladegerät der Batterie befindet sich im Inneren. Für das Stromaggregat hingegen wurde eine Halterung außerhalb der Box vorgesehen, da Abwärme und Abgase des Antriebsmotors die Messgeräte beeinträchtigen würden.

Da am Generator mehr als ein Gerät mit 230 V betrieben wird, ist es notwendig, eine Fehlerstromschutzeinrichtung vorzusehen und metallische Gehäuseteile mit dem Erdungsanschluss des Generators zu verbinden. Sonst könnten im Fehlerfall gefährliche Berührspannungen vorherrschen und lebensgefährliche Stromschläge drohen. Deshalb wurde in der PEMS-Box ein Stromverteilerkasten, der zunächst mit zwei 30-mA-Fehlerstromschutzschaltern ausgestattet wurde, installiert. Bei der Überprüfung der Auslösecharakteristik der Fehlerstromschutzschalter wurde dann jedoch festgestellt, dass mangels Erdung während des Betriebs der Box keine zuverlässige Abschaltung im Fehlerfall erfolgt. Nach weiterer Recherche, wie hier der notwendige Personenschutz vor elektrischen Schlägen realisiert werden kann, wurde ein Isolationsüberwachungsgerät der Firma Bender installiert. Dieses Gerät überprüft in regelmäßigen Abständen, ob ein Fehler in der Isolation der spannungsführenden Komponenten vorliegt. Zusätzlich wird täglich bei der Inbetriebnahme des Generators die Prüftaste dieses Geräts betätigt und so sich zusätzlich vergewissert, dass keine Gefahr für das Bedienpersonal besteht. Es wird des Weiteren kontinuierlich durch eine Relaischaltung überwacht, ob die 230-V-Versorgung während des Betriebs ausfällt (z. B. Generatorausfall, Abschaltung durch Isolationsüberwachungsgerät). Sollte dies der Fall sein, wird eine Blitzleuchte aktiviert, die dem Bedienpersonal bzw. Fahrer den Fehler anzeigt. Die Warnleuchte selbst wird von der 12-V-Pufferbatterie gespeist.

5.4 Vergleichsmessungen am Traktorenprüfstand

Um die mobile Messtechnik (PEMS) mit der stationären Messtechnik am Traktorenprüfstand hinsichtlich der Messgenauigkeit zu vergleichen, wurde das PEMS parallel am Traktorenprüfstand betrieben und Messungen mit unterschiedlichen Traktoren und Messzyklen durchgeführt. In Abbildung 16 sind Traktor und Messsysteme dargestellt.



Abbildung 16: PEMS und stationäre Emissionsmesstechnik am Traktorenprüfstand

Für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte (NRMM) sind die Emissionen in g/kWh zu ermitteln. Dieser Wert wird bei Messungen mit dem PEMS für jeden Schadstoff aus drei Faktoren berechnet. Die Konzentration der Schadstoffe im Abgas wird mit den Gasanalysatoren (vgl. Unterkapitel 4.1) bestimmt, der Abgasmassenstrom wird mit dem Flow Tube direkt gemessen und die Leistung des Motors wird über ein elektronisches Signal der Motorsteuerung und eine Vollastkurve berechnet. Am Traktorenprüfstand wird die Schadstoffkonzentration ebenfalls mit einem Gasanalysator, jedoch mit einem anderen Messprinzip (FTIR) bestimmt. Der Abgasmassenstrom wird über den gravimetrisch bestimmten Kraftstoffverbrauch und die Abgaszusammensetzung berechnet und nicht direkt gemessen. Die Leistung wird mit einer Wirbelstrombremse an der Zapfwelle abgenommen und mittels Drehzahl- und Drehmomentsensor bestimmt. Aufgrund der unterschiedlichen Bestimmungsmethoden der einzelnen Pfade und einer entsprechenden Verkettung von Fehlern bei der Berechnung der auf die Zyklusarbeit bezogenen Schadstoffmasse ist eine Abweichung beider Endergebnisse zu erwarten. In Abbildung 17 sind die Ergebnisse der einzelnen Faktoren, ermittelt mit dem PEMS und mit der stationären Messtechnik am Traktorenprüfstand, gegenübergestellt. Es wurden je drei Messungen mit drei Traktoren unterschiedlicher Abgasstufen und unter Anwendung verschiedener Messzyklen betrachtet. In der Grafik stellt jeder Punkt den Mittelwert der jeweiligen Messgröße während der gesamten Messung dar. Dabei ist die Abszisse der mit der stationären Messtechnik ermittelte Wert und die Ordinate der mit der portablen Technik (PEMS) ermittelte Wert.

Kohlenstoffdioxidkonzentration

Für die Kohlenstoffdioxidkonzentration ergibt sich unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Messprinzipien eine gute Übereinstimmung innerhalb eines Korridors von ca. 6 % Abweichung. Der Messbereich des portablen Analysators reicht von 0 % bis 18 % und deckt den auftretenden Wertebereich gut ab.

Kohlenstoffmonoxidkonzentration

Beim Kohlenstoffmonoxid treten deutliche Abweichungen zwischen stationärer und portabler Messtechnik auf. Hier ist zu berücksichtigen, dass der portable Analysator einen Messbereich von 0 % bis 8 % bzw. 80.000 ppm aufweist. Der Hersteller gibt eine Genauigkeit von 0,3 % vom Messbereichsendwert bzw. 2 % vom Messwert an, je nachdem welcher Wert größer ist. Zusätzlich ist eine Nullpunktdrift von 2 % pro Stunde zulässig. Die großen Abweichungen sind also durch den ausgedehnten Messbereich des mobilen Analysators begründet. Bei modernen Dieselmotoren treten häufig nur Kohlenstoffmonoxidemissionsspitzen beim Kaltstart auf und werden nach dem Aufwärmen durch den Oxidationskatalysator weitgehend abgebaut. Es wäre ein zweiter, niedrigerer Messbereich mit höherer Genauigkeit bei geringer CO-Konzentration wünschenswert, der vom Messsystem automatisch ausgewählt wird, wenn die Messwerte im Laufe des Tests dauerhaft absinken.

Stickstoffoxidkonzentration

Bei der Stickstoffoxidkonzentration wurden insgesamt sehr gute Übereinstimmungen festgestellt. Der Messbereich des NO-Kanals beträgt 0 ppm bis 3.000 ppm und des NO₂-Kanals 0 ppm bis 1.000 ppm. Bei modernen Dieselmotoren mit selektiver katalytischer Reduktion kann die Stickstoffoxidkonzentration nach dem Erreichen der Betriebsbedingungen über weite Strecken auf einstellige ppm-Werte abgesenkt werden. Deshalb wäre auch hier ein zusätzlicher niedriger Messbereich wünschenswert, der den Messfehler bei geringer Schadstoffkonzentration minimiert.

Kohlenwasserstoffkonzentration

Bei den Kohlenwasserstoffemissionen wurde bei dem älteren Traktor der Abgasstufe IIIA mit einem höheren Emissionsniveau eine sehr gute Übereinstimmung festgestellt. Bei den neueren Modellen wurden insgesamt sehr niedrige Kohlenwasserstoffkonzentrationen mit deutlichen Abweichungen zwischen den Analysatoren beobachtet. Das mobile FID hat vier unterschiedliche Messbereiche, die jedoch nur manuell ausgewählt werden können. Für die ausgewählten Untersuchungen wurde ein mittlerer Messbereich bis 1000 ppmC ausgewählt, der alle Emissionsspitzen abdeckt. Es wäre jedoch auch bei diesem Analysator eine automatische Umschaltung auf den niedrigen Messbereich bis 100 ppmC wünschenswert, um die Genauigkeit bei geringsten Schadstoffkonzentrationen zu erhöhen.

Abgasmassenstrom

Trotz der grundsätzlich verschiedenen Prinzipien zur Ermittlung des Abgasmassenstroms portabler und stationärer Messtechnik wurde eine sehr gute Übereinstimmung festgestellt. Der Einfluss des Messfehlers dieses Faktors ist deshalb als eher gering ein-

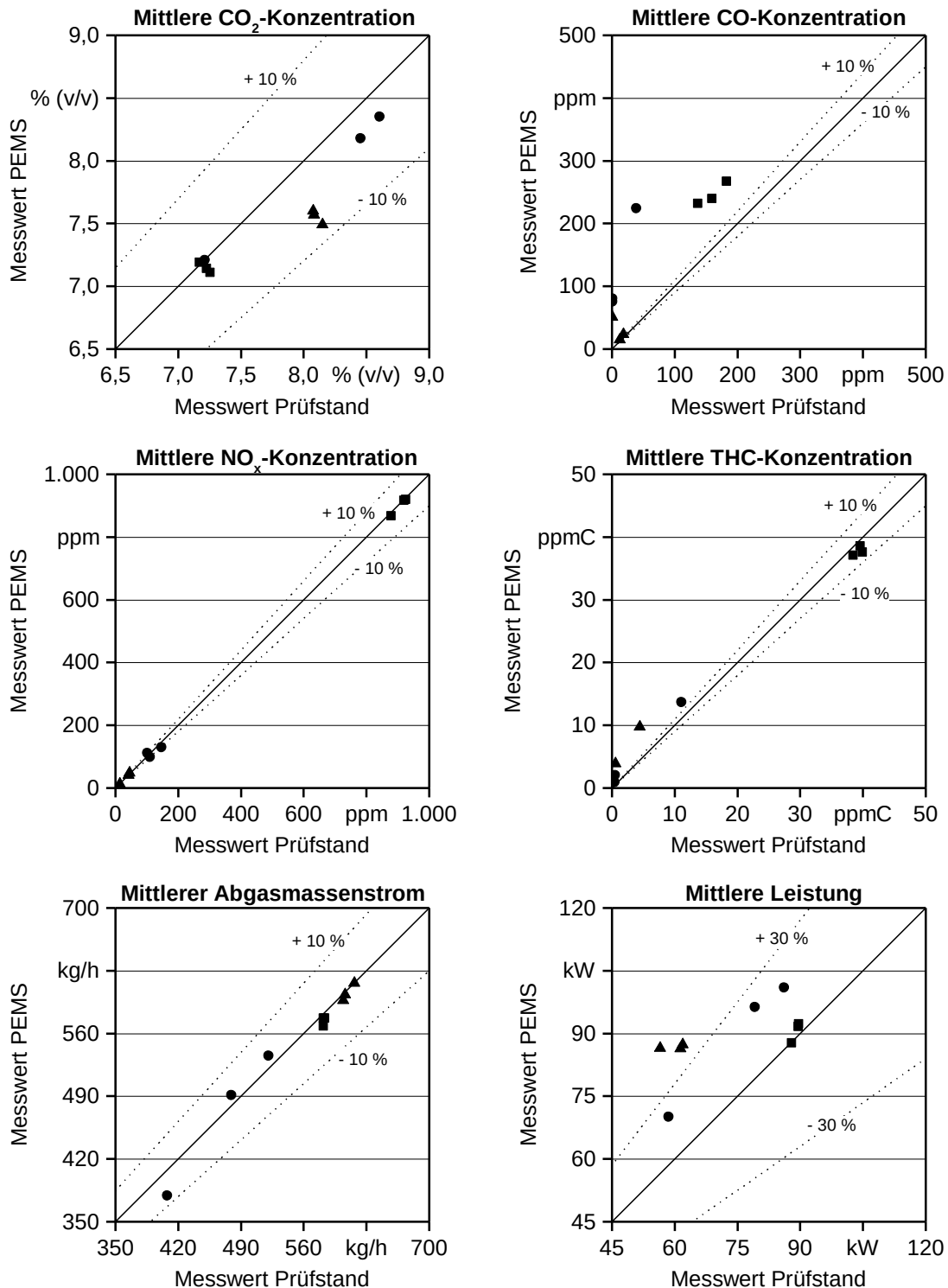
zuschätzen. Abhängig vom erwarteten Abgasmassenstrom des Motors sollte der Flow-Tube-Durchmesser jedoch passend ausgewählt werden.

Motorleistung

Die Motorleistung kann am Traktorenprüfstand nicht direkt gemessen werden, sondern es wird mit einer Wirbelstrombremse die Leistung an der Zapfwelle bestimmt. Diese weicht von der Kurbelwellenleistung des Motors aufgrund von Nebenverbräuchern und Verlusten im Antriebsstrang ab. Abhängig von Betriebspunkt und Maschine kann der Unterschied 20–30 % betragen. Vom PEMS werden die Signale Motordrehzahl und Motorlast bei aktueller Drehzahl aufgezeichnet. Mit einer zuvor bestimmten Volllastkennlinie, die ebenfalls an der Zapfwelle gemessen wurde, kann eine Leistung berechnet werden. Dies entspricht, bis auf den Ort der Leistungsabnahme, auch weitgehend der vorgesehenen Methodik der In-Service-Monitoring-Gesetzgebung. Die Grafik zeigt, dass vor allem hier enorme Abweichungen zwischen dem berechneten (PEMS) und gemessenen Mittelwert (Prüfstand) je Test auftreten können. Vor allem wenn ein hochtransienter Testzyklus mit mittlerer Last (NRTC) betrachtet wird, wird von der portablen Messtechnik oft ein viel höherer Wert ermittelt. Bei einem Zyklus, der hauptsächlich stationäre Volllast darstellt (Pflügen), kann die Übereinstimmung jedoch auch sehr gut sein. Vor allem bei mittlerer und niedriger Motorauslastung beeinflussen nicht abschaltbare Nebenverbraucher und Getriebeverluste die Größe der Differenz. Eine allgemeingültige Korrektur ist nicht möglich.

Fazit

Bei Vergleichsmessungen am Traktorenprüfstand mit stationärer Messtechnik und portablem Emissionsmesssystem wurden sehr gute Übereinstimmungen bei den gemessenen Emissionskonzentrationen festgestellt. Es wäre jedoch wünschenswert, dass vor allem bei der Untersuchung von Maschinen der neuesten Abgasstufe ein zweiter Messbereich für niedrige Konzentrationen zur Verfügung steht, der bei Bedarf automatisch ausgewählt wird. Beim Abgasmassenstrom wurde ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung zwischen mobiler und stationärer Messtechnik nachgewiesen. Die größte Abweichung und damit der größte Einfluss auf das Emissionsergebnis in g/kWh treten bei der Bestimmung der Leistung auf.



Legende:

- 1 Traktor A, Abgasstufe IIIA, Pflügen (n=3)
- 2 Traktor B, Abgasstufe IV, Pflügen mit unterschiedlicher Schlaglänge (n=3)
- ▲ 3 Traktor C, Abgasstufe IV, NRTC (n=3)

Abbildung 17: Vergleich mobiler und stationärer Emissionsmesstechnik am Traktorenprüfstand mit drei unterschiedlichen Traktoren, unterschiedlicher Abgasstufe und unter Anwendung verschiedener Testzyklen (Pflügen bzw. Non-Road Transient Cycle (NRTC))

5.5 Optimierung der Methodik durch wiederkehrende Feldmessungen an einem Fendt 724 Vario S4

Nach der Fertigstellung der PEMS-Box und der Installation aller Messgeräte und Zubehörteile wurden erste Messungen im Feld durchgeführt. Dazu wurde das Messsystem an einem Fendt 724 Vario SCR der Abgasstufe IV installiert und dessen Emissionen während des Pflügens bzw. Grubbers aufgezzeichnet. Der Traktor wurde von der BayWa AG auf Pflanzenölbetrieb umgerüstet. Getestet wurde auf Äckern des Gutsbetriebs Mainkofen. Abbildung 18 und Abbildung 19 zeigen den Traktor mit installiertem PEMS bei den Messungen. Die prinzipielle Vorgehensweise erfolgte zunächst nach dem damaligen Stand des Wissens in Anlehnung an das *NRMM PEMS Pilot Programme* (siehe Unterkapitel 3.1).



Abbildung 18: PEMS-Messungen auf dem Gutsbetrieb Mainkofen beim Pflügen im Oktober 2015



Abbildung 19: PEMS-Messungen auf dem Gutsbetrieb Mainkofen beim Grubbern im Oktober 2015

Während dieser Versuche wurde Folgendes festgestellt: Der vom PEMS-Hersteller empfohlene Generator ist ohne Reserve ausgelegt. Bei nicht vollständig aufgeladener Pufferbatterie übersteigt der Strombedarf des Messsystems und des Batterieladegeräts die Dauerleistung des Stromerzeugers (Honda EU20i, 1,6 kVA Dauerleistung). Bei vollständig aufgeladener Batterie würde die Leistung für die Versorgung des PEMS ausreichen, zusätzliches Messequipment, wie z. B. das mobile Kraftstoffverbrauchsmessgerät dQRoad, könnten jedoch nicht mehr versorgt werden. Außerdem sind die Anlaufströme von PEMS und Batterieladegerät so hoch, dass der Stromerzeuger kurzzeitig stark überlastet wurde und sofort eine Sicherheitsabschaltung erfolgte, wenn beide gleichzeitig eingeschaltet wurden. Um dies zu verhindern, müssen beide Verbraucher zeitversetzt eingeschaltet werden. Dies kann über den in Abschnitt 4.3.4 beschriebenen Batterieumschalter erfolgen. Um Problemen mit der Stromversorgung des Messgeräts aus dem Weg zu gehen, wurde der ursprünglich beschaffte Stromerzeuger Honda EU20i gegen das leistungsstärkere Modell Honda EU30i mit 2,6 kVA Dauerleistung ausgetauscht, mit dem bislang keine Probleme mit der Stromversorgung mehr zu verzeichnen waren.

Vor dem Update konnte die Überwachung der Funktion des PEMS während einer Messung nur über ein mittels USB-Kabel verbundenes Notebook erfolgen. Dies erwies sich als unpraktisch, da dem Beifahrer auf einem Traktor nur sehr wenig Platz zur Verfügung steht und die Erschütterungen und Wendemanöver während der Feldarbeit das Bedienen eines Rechners nahezu unmöglich machen. Für Messungen z. B. an einem Forst-

Harvester ist eine Kabelverbindung ausgeschlossen, da derartige Maschinen in der Regel keinen Platz für einen Beifahrer bieten und auch ein Aufenthalt im Gefahrenbereich während der Fällarbeiten verboten ist. Wünschenswert war daher eine drahtlose Verbindung mit ausreichender Reichweite, sodass die Überwachung der Messung vom Feldrand erfolgen kann. Seit dem Update des Messsystems verfügt dieses über eine integrierte WLAN-Funktionalität. Nach weiteren Messungen wurde eine ausreichende Reichweite auch bei Anwendung im Forst festgestellt. Sollte bei zukünftigen Anwendungen eine noch höhere Reichweite erforderlich sein, könnte alternativ die Fernüberwachung auch über eine Remotedesktop-Anwendung erfolgen. Dafür ist aber eine stabile und schnelle Internetanbindung sowohl eines Rechners, der mit dem PEMS verbunden ist, als auch eines Überwachungsrechners (z. B. am Feldrand) notwendig. Dies setzt wiederum eine ausreichende Mobilfunknetzabdeckung am Ort der Messung voraus.

Laut StVZO darf bei einem Traktor im öffentlichen Straßenverkehr der Abstand zwischen den senkrechten Querebenen, die das vordere Ende des Frontanbaugeräts und die Mitte des Lenkrads berühren, nicht mehr als 3,5 m betragen [4]. Beim Anbau der PEMS-Box an der Fronthydraulik des hier verwendeten Traktors wird dieses Maß jedoch überschritten. Es ist daher notwendig, dass stets eine Begleitperson auf dem Traktor mitfährt, die bei Sichtfeldeinschränkungen an Ausfahrten oder Straßeneinmündungen als Einweiser fungieren kann. Straßenfahrten mit dem PEMS an der Fronthydraulik eines in der Größe mit dem Fendt Vario 724 vergleichbaren Traktors sind daher nur mit Begleitperson zulässig. Zukünftig können ggf. auch Kamerasysteme eingesetzt werden, falls diese die entsprechende Zulassung erhalten.

Der Aufbau des PEMS mit Schutzbox hat sich als sehr praktikabel erwiesen. Das Ankoppeln funktioniert problemlos und in sehr kurzer Zeit. Auch bei Regen schützt die Box die empfindliche Messtechnik zuverlässig vor Wasser und Schmutz. Die Lüftung der Box hat sich bei den bisher aufgetretenen Umgebungsbedingungen ebenfalls sehr gut bewährt. Die Innentemperatur – mit sämtlichen Messgeräten und deren Beheizung im eingeschalteten Zustand – lag lediglich ca. 10 °C über der jeweiligen Umgebungstemperatur. Selbst bei Messungen mit hohen Außentemperaturen und direkter Sonneneinstrahlung auf die Box im Sommer kam es zu keinen hitzebedingten Betriebsstörungen. In den während der Projektlaufzeit eingeführten gesetzlichen Regelungen wurden auch Grenzen für die Umgebungstemperatur festgeschrieben, sodass bei zulässigen Bedingungen eine Überhitzung der Analysatoren nahezu ausgeschlossen werden kann. Die Ansaugfilter und Kiemenbleche boten bislang ausreichend Schutz vor angesaugtem Schmutz und Regenwasser. Die Installation des EFM (Abgasmassenstromsensor) am Auspuff bildet den größten Aufwand beim Aufbau der PEMS-Messtechnik. Aufgrund der rauen Fahrbedingungen muss das ca. 10 kg schwere Gerät und zusätzlich die Last der Messgasleitungen mit einer geeigneten Halterung am Rahmen des Traktors abgestützt werden. Außerdem muss ein spezielles Auspuffendrohr mit einem passenden Flansch zur gasdichten Ankopplung der Messtechnik an die Maschine gefertigt werden. Diese Abstützung und der Testauspuff müssen für jeden Traktor individuell angepasst oder gefertigt werden und verursachen dadurch einen beträchtlichen Material- und Arbeitszeitaufwand. Auch die Lagerhaltung der Halterungen und Auspuff-Endrohre für alle mehrmals zu ver-

messenden Fahrzeuge sollte bedacht werden. Eine Alternative wäre, das EFM fest an der PEMS-Box zu installieren und eine flexible Schlauchleitung vom Ende des Abgasrohrs zum Abgasstrommessgerät zu verlegen. Diese Überlegung wurde auch bereits vom JRC angeregt [2]. Allerdings wäre dafür ein mindestens 4 bis 5 m langer Schlauch notwendig, der gasdicht, bis mind. 500 °C temperaturbeständig, ausreichend flexibel, nicht abgasgegendruckerhöhend, isoliert oder ggf. sogar beheizbar ist. Eine derartige Konstruktion ist jedoch bislang nicht bekannt geworden. Außerdem könnten sich hier im Betrieb Innenwandanlagerungen (Rußablagerungen, Kondensate) lösen und die Messergebnisse verfälschen (Memory-Effekte).

Bis eine PEMS-Messung gestartet werden kann, ist eine Vielzahl an Arbeitsschritten notwendig. Deshalb ist es von Vorteil, ein Protokoll mit Checkliste zu führen, um sämtliche Aktionen zu dokumentieren und Fehler bei der Messung zu vermeiden. Aus diesem Grund wurde auf Basis der Erfahrungen ein Formular erstellt (siehe Abbildung 20). Damit sollten Bedienfehler weitgehend ausgeschlossen werden können.

Protokoll – PEMS

Datum: _____ Traktor: _____
 Betriebstunden: Start: _____ Ende: _____
 Kraftstoff: _____ Name/Fahrer: _____ / _____

- ☐ Filter DualFID gewechselt (nur wenn FID ausgeschaltet, kein AW-Filter notwendig)
- ☐ Flaschendruck Brenngas notieren: _____ bar (Verbrauch sollte bei ca. 2 bar/h liegen)
- ☐ Filter EFM gewechselt (Falls SCR-System vorhanden, AW-Filter verwenden)
- ☐ Messsystem eingeschaltet und komplett aufgewärmt
- ☐ Silicagel gewechselt
- ☐ Audit Standard und Fuel Type ausgewählt
- ☐ Zeit synchronisiert
- ☐ Data Units „Metric“ ausgewählt
- ☐ Pufferbatterie vollständig geladen
- ☐ Stromerzeuger aufgetankt (Super), Ölstand kontrolliert und Luftfilter gereinigt
- ☐ DualFID Brenngas aufgedreht und auf 3,5 bar eingestellt, Range ausgewählt
- ☐ Messgeräte kalibriert (DualFID mit 1,5 bar, Range kontrollieren!)
- ☐ CPM Zero durchgeführt (CPM Setup, Zero)
- ☐ MPS Dthroat angepasst (MPS in Constant, Bypass Pump On)
- ☐ Filter in PFS eingelegt, Filternummern entsprechend Position notieren
- ☐ Maximal zu erwartender Abgasmassenstrom eingestellt (PFS Setup, MPS Dil. Val., Max Exh. Fl.)
- ☐ EFM „Zero Pressures“ und „Back Purge“ durchgeführt
- ☐ Messdatei angelegt, Name notieren
- ☐ Gaseous in Sample (Sample Flow OK? 1,5 l/min)
- ☐ PFS in Bypass, Pump On
- ☐ MPS in Proportional
- ☐ Kontrolle auf Fehlermeldungen („alles grün ???“)
- ☐ Kontrolle ob CAN-Daten auflaufen (Protokoll korrekt? Bei J 1939 die anderen Protokolle deaktiv.)
- ☐ PEMS-Aufbau und Leitungen kontrolliert (Sicherungen, Splinte etc.)
- ☐ Stromerzeuger gestartet, Stromversorgung hergestellt und kontrolliert
- ☐ Prüftaste Isolationsüberwachung betätigt (>1,5 s)
- ☐ dQRoad eingeschaltet, richtigen Kraftstoff gewählt, auf Fehlermeldungen geprüft
- ☐ Türen und Klappe der PEMS-Box verriegelt, Lüfter an
- ☐ Videoaufzeichnung gestartet
- ☐ Aufzeichnung gestartet, Uhrzeit notieren
- ☐ PFS Filterpfad ausgewählt
- ☐ Traktor starten und Fahrt beginnen
- ☐ Curb Idle Load bestimmen: _____
- ☐ Analysator-Drift nach der Fahrt kontrollieren

Uhrzeit	Filter 1	Filter 2	Filter 3	Beschreibung des Arbeitsvorganges Dateiname
__: __	17/ __ - __	17/ __ - __	17/ __ - __	
__: __	17/ __ - __	17/ __ - __	17/ __ - __	
__: __	17/ __ - __	17/ __ - __	17/ __ - __	

Abbildung 20: PEMS-Messprotokoll mit Checkliste

Die während der ersten Messungen erlangten Kenntnisse flossen in einen Verbesserungsprozess der Box und auch der Methodik bei der Durchführung von Realemissionsmessungen ein. Beispielsweise wurden noch Blinker und externe WLAN-Antennen an der Box installiert. Die Wettersonde, die bei den ersten Messungen noch am Dach des Traktors installiert war, wurde ebenfalls an der Box befestigt, da so zum einen weniger Installationsaufwand verursacht wird und zum anderen hier auch eine geringere Beeinflussung der Umgebungstemperatur durch die heiße Abgasfahne besteht. Im Inneren der Box wurde noch ein Adsorbergehäuse für Silcagel installiert, mit dem die Spülluft der Probentrockner vorgetrocknet wird, sodass auch bei sehr feuchtem Abgas und hoher Umgebungsluftfeuchte eine ausreichend geringe Feuchtigkeit der Abgasprobe erreicht werden kann. Des Weiteren wurde in der Box auch noch eine Stickstoffflasche installiert, sodass in den gesetzlich vorgegebenen Intervallen jederzeit eine Nullpunktkalibrierung der Analysatoren durchgeführt werden kann.

Durch diese kontinuierlichen Verbesserungen und den Erfahrungsgewinn ist ein Stand erreicht worden, mit dem zuverlässig Realemissionsmessungen an Traktoren und anderen Non-Road-Fahrzeugen nach der gültigen Gesetzgebung durchgeführt werden können. Lediglich die Partikelanzahl kann noch nicht erfasst werden, da hierfür der notwendige Analysator nicht zur Verfügung steht. Für NRMM ist die Erfassung der Partikelemissionen nach Verordnung EU 2017/655 aber nicht erforderlich.

In Abbildung 21, Abbildung 22 und Abbildung 23 ist der Traktor bei weiteren Messungen und unterschiedlichen Einsatzzwecken während der Projektlaufzeit dargestellt.



Abbildung 21: PEMS-Messungen mit dem Anbaugerät Kreiselegge im Mai 2017



Abbildung 22: PEMS-Messungen mit den Anbaugeräten Kreiselegge und Sämaschine im Mai 2017



Abbildung 23: PEMS-Messungen mit dem Anbaugerät 7-Schar-Pflug im Oktober 2017

Die Ergebnisse der Feldmessungen wurden u. a. in Ettl et al. [10] ausführlich ausgewertet und veröffentlicht und werden deshalb an dieser Stelle nur kurz zusammengefasst.

Insgesamt zeigte sich bei den untersuchten Arbeitsvorgängen ein sehr geringes Emissionsniveau. Bei den untersuchten Arbeitsvorgängen, die im Nachhinein noch nach der erst später vorliegenden EU-Verordnung 2017/655 ausgewertet werden konnten, wiesen stets mindestens 90 % der Mittelungsfenster einen Stickstoffdioxid-Konformitätsfaktor unter 1 auf. In Abbildung 24 sind die Ergebnisse als Boxplot dargestellt. Bei den Messungen mit der Kreiselegge wurde die geforderte mindestens erforderliche fünffache CO₂-Masse des Referenzzyklus nicht ganz erreicht, trotzdem konnten aufgrund der gegenüber den anderen Arbeitsvorgänge geringeren mittleren Motorauslastung mehr Mittelungsfenster gebildet werden. Die im Feld ermittelten Emissionen waren mehrheitlich deutlich geringer als bei Messungen nach standardisierten Prüfzyklen am Traktorenprüfstand. Ein möglicher Grund dafür ist eine konstant hohe Abgastemperatur bei den leistungsintensiven realen Arbeitsvorgängen und dadurch hohe Umsatzraten der Abgasnachbehandlung. Die Kaltstartemissionen haben jedoch einen deutlichen Einfluss auf das Gesamtergebnis. Eine Verschiebung des Messbeginns in Abhängigkeit der Kühlmitteltemperatur und eine längere Gesamtmessdauer, beispielsweise durch Anwendung ei-

nes Arbeitsvorgangs mit mittlerer Last, können bei der Auswertung zu einer Verbesserung des Ergebnisses führen.

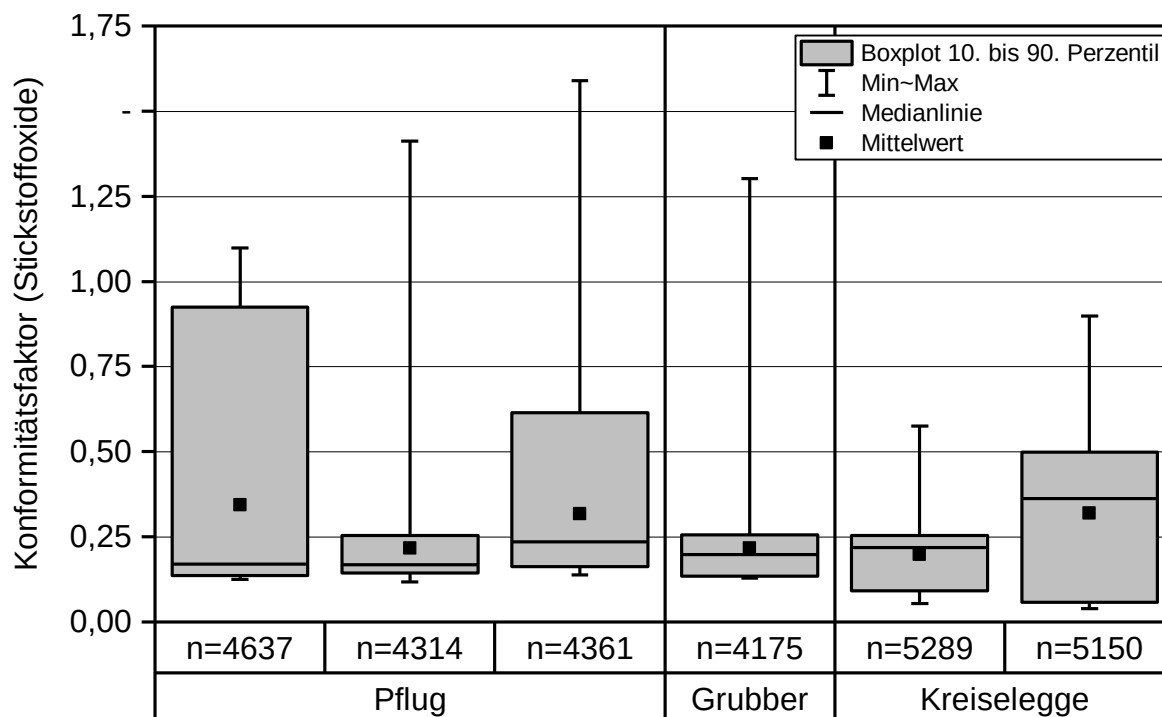


Abbildung 24: Stickstoffoxid-Konformitätsfaktoren aller Mittelwertfenster des Fendt 724 S4 im Betrieb mit Rapsölkraftstoff bei unterschiedlichen Arbeitsvorgängen

Aufgrund der vom Gesetzgeber erlaubten großen Variabilität bei den Randbedingungen eines Realfahrttests erscheint es kaum legitim, einzelne Messungen quantitativ miteinander zu vergleichen, wenn sich die Emissionen zudem auf geringstem Niveau im Bereich der Bestimmungsgrenze der Messtechnik bewegen. Aufgrund der zufälligen und nicht wiederholbaren Testbedingungen können die Emissionsgrenzwerte zwar als Vergleichswert herangezogen werden, jedoch erscheint lediglich eine qualitative Aussage über die Einhaltung möglich. Nichtsdestotrotz wurden im folgenden Kapitel möglichst konstante Rahmenbedingungen geschaffen, um den Einfluss des Kraftstoffs auf das reale Emissionsverhalten des auch in diesem Kapitel untersuchten Traktors einschätzen zu können.

5.6 Straßenfahrten eines Fendt 724 Vario S4 im Betrieb mit Diesel- und Rapsölkraftstoff

Mit einem Fendt 724 Vario S4, der mit einem Zwei-Tank-System auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff umgerüstet wurde, wurden PEMS-Messungen auf der Traktor-Teststrecke (vgl. Abschnitt 4.7.1) durchgeführt. Dabei wurden Fahrten mit Kaltstart, Warmstart und Warmstart mit einer zehnminütigen Leerlaufphase zur etwa der Hälfte der

Strecke durchgeführt. Diese wurden dreifach wiederholt und jeweils mit Diesel- und mit Rapsölkraftstoff durchgeführt. In Tabelle 12 ist der Versuchsplan dargestellt. Es ist zu erwähnen, dass die Tests noch nicht nach den Anforderungen der zum Zeitpunkt der Messungen noch nicht veröffentlichten Verordnung EU 2017/655 für NRMM, sondern in Anlehnung an die bereits bekannte HDV-Gesetzgebung bzw. des NRMM-PEMS-Pilotprogramms durchgeführt wurden. Kaltstart und Non-Working-Events wurden vor der Auswertung nicht aus dem Datensatz ausgeschlossen und auch die Testdauer wurde kürzer, als die aktuelle Gesetzgebung fordert, ausgewählt, was einen großen Einfluss auf das Gesamtergebnis hat. Insgesamt ist diese Testreihe daher als ein Worst-Case-Szenario zu betrachten. Des Weiteren war die Motorsteuerung des Traktors nicht speziell auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff abgestimmt.

Aufgrund des Zwei-Tank-Systems wird vor dem Abstellen des Traktors im Normalbetrieb immer ein gewisser Anteil Diesel in den Rapsöltank gespült. Deshalb wurde während der Messungen eine Kraftstoffprobe aus dem Rapsöltank analysiert und ein Dieselanteil von 15 % (m/m) festgestellt. Während der Messungen mit Rapsölkraftstoff wurde das Spülen mit Dieselmotorkraftstoff bewusst unterdrückt und der Traktor auch mit Rapsöl gestartet, um die Kaltstartemissionen beim Startvorgang mit Rapsölkraftstoff erfassen zu können und auch keinen weiteren Dieselmotorkraftstoffeintrag in den Rapsöltank zu verursachen. Da auch kein Rapsölkraftstoff nachgetankt wurde, kann der Dieselanteil im Rapsöltank während der Messkampagne als konstant angenommen werden. Bei der Auswertung der Ergebnisse wurden keine Ausschlusskriterien berücksichtigt und alle Messpunkte vom Starten bis zum Abstellen des Motors herangezogen. Um Unterschiede zwischen Kalt- und Warmstartmessungen betrachten zu können, wäre beispielsweise eine Auswertung, die erst ab dem Erreichen einer bestimmten Motorkühlwassertemperatur beginnt, nicht sinnvoll. Kaltstart bedeutet dabei, dass der Motor zum ersten Mal an diesem Tag gestartet wurde und zum Beginn der Messungen Umgebungstemperaturniveau aufweist. Warmstart bedeutet, dass sich der Motor beim Startvorgang und Messbeginn aufgrund einer vorhergehenden Messung noch im nahezu betriebswarmen Zustand befindet.

Tabelle 12: Versuchsplan für die Straßenfahrten Fendt 724 Vario S4

Tag	Kraftstoff	Fahrt 1: Start: 9:00 Uhr		Fahrt 2: Start: 11:00 Uhr		Fahrt 3: Start: 13:00 Uhr	
		Start	Leerlaufphase	Start	Leerlaufphase	Start	Leerlaufphase
1	RK	kalt	nein	warm	ja	warm	nein
2	RK	kalt	nein	warm	nein	warm	ja
3	RK	kalt	nein	warm	ja	warm	nein
4	DK	kalt	nein	warm	nein	warm	ja
5	DK	kalt	nein	warm	ja	warm	nein
6	DK	kalt	nein	warm	nein	warm	ja

RK: Rapsölkraftstoff DIN 51605

DK: Dieselloskraftstoff DIN EN 590



Abbildung 25: Fendt 724 Vario S4 mit PEMS im Frontanbau während der RDE-Messungen auf der Traktor-Teststrecke

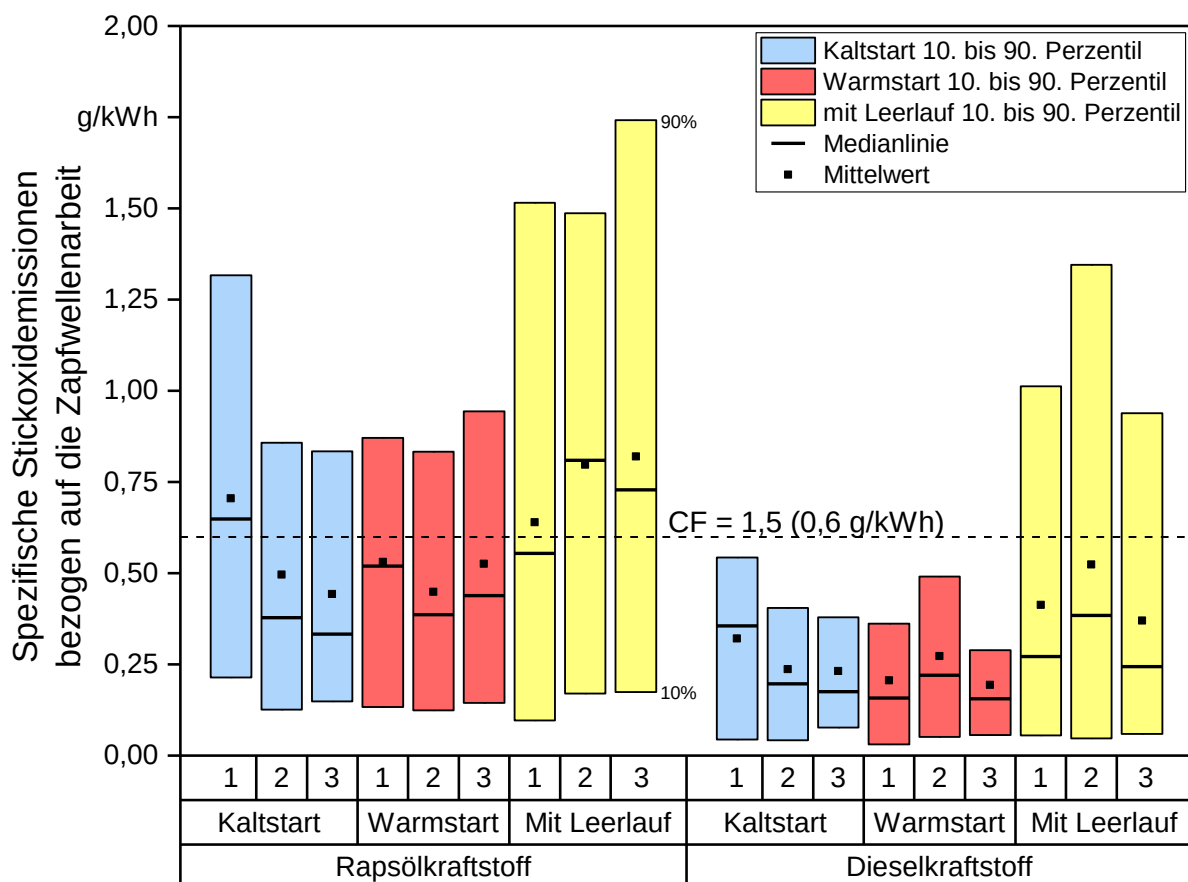
In Abbildung 26 ist der Vergleich der Stickstoffoxidemissionen beim Einsatz von Rapsöl- und Dieselloskraftstoff, bei Kalt- und Warmstartbedingungen sowie bei Fahrten mit einer zehnminütigen Leerlaufphase in Form eines Boxplots dargestellt. Die farbigen Boxen stellen dabei den Streubereich der nicht feuchtekorrigierten Mittelwerte der Stickstoffoxidemissionen aller Mittelungsfenster (*Work Windows*) nach der Moving-Averaging-

Window-Methode aller 18 durchgeführten Straßenfahrten dar. Des Weiteren sind auch der Median sowie das arithmetische Mittel aller Fenster dargestellt. In Anlehnung an die In-Service-Conformity-Gesetzgebung bei schweren Lkw muss das 90. Perzentil dieser Verteilung das 1,5-Fache des Grenzwerts der jeweiligen Emissionskomponente der für das Fahrzeug gültigen Abgasstufe unterschreiten (Konformitätsfaktor $CF = 1,5$). Der hier untersuchte Traktor unterliegt der Abgasstufe IV mit einem NO_x -Grenzwert von $0,4 \text{ g/kWh}$, damit muss das 90. Perzentil unter einem Wert von $0,6 \text{ g/kWh}$ bezogen auf die Kurbelwellenarbeit des Motors liegen. Da aus den in Unterkapitel 4.8 erläuterten Gründen diese nicht vorliegt, wurden für die Berechnung der Leistung auf dem eigenen Zapfwellenprüfstand ermittelte Vollastkurven verwendet, wodurch die Emissionen nicht auf die tatsächliche Motorleistung, sondern auf die geringere Zapfwellenleistung bezogen sind. Die ermittelten und dargestellten leistungsbezogenen Emissionswerte sind daher auch um ca. 20 bis 30 % höher als die auf die tatsächliche Motorleistung bezogenen Emissionswerte.

Im Rapsölkraftstoffbetrieb sind die Streubreiten der Fenstermittelwerte größer und auch der Median sowie die arithmetischen Mittelwerte liegen deutlich höher als im Dieselmotorbetrieb. Bei keiner der neun Fahrten mit Rapsölkraftstoff liegen 90 % der Fenstermittelwerte unter dem Konformitätsfaktor von 1,5. Im Dieselmotorbetrieb hingegen liegt das 90. Perzentil bei allen Kalt- und Warmstartfahrten ohne Leerlaufphase unter $0,6 \text{ g/kWh}$. Tritt jedoch während der Testfahrt eine zehnmündige Leerlaufphase auf, steigt der Anteil der Fenster mit höheren mittleren NO_x -Emissionen an und es weisen nicht mehr die geforderten 90 % der Mittelungsfenster einen Konformitätsfaktor unter 1,5 auf. In dieser Darstellung wird auch deutlich, dass zwischen den einzelnen Fahrten, trotz identischer Streckenführung und möglichst vergleichbarer Rahmenbedingungen, klare Unterschiede im Emissionsergebnis auftreten können. Diese sind u. a. auf einen von Fahrt zu Fahrt anders gearteten Verkehrsfluss zurückzuführen. Längere Leerlaufphasen während der Messung wirken sich stärker auf das Gesamtergebnis aus als die Motortemperatur beim Start der Messung. Zwischen den Kalt- und Warmstartmessungen sind kaum Unterschiede feststellbar. Das Ergebnis der PEMS-Messung ist also sehr stark von der Verkehrslage abhängig. Längere Leerlaufphasen, bei denen das Temperaturniveau der Abgasnachbehandlung unter den optimalen Arbeitsbereich sinkt, beispielsweise aufgrund eines geschlossenen Bahnübergangs, können über das Bestehen des Emissionstests entscheiden, falls diese „Non-Working-Events“ nicht herausgefiltert werden.

Insgesamt ist das Stickstoffoxidemissionsniveau sowohl im Dieselmotor- als auch im Rapsölbetrieb als sehr positiv zu bewerten. Durch eine Optimierung der Motorsteuerung für den Biokraftstoff, die zum Zeitpunkt der Messungen nicht stattgefunden hatte, besteht hier noch deutliches Verbesserungspotenzial. Es ist zu erwarten, dass die Emissionsgrenzwerte eingehalten werden können, falls die Messungen nach den Vorgaben der Verordnung 2017/655 für Non-Road-Maschinen wiederholt würden. Durch die verlängerte Testdauer haben die kurzen Phasen mit erhöhten Emissionen einen immer geringeren Einfluss auf das Gesamtergebnis. Zudem werden Kaltstart und Nicht-Betriebsereignisse ausgeschlossen.

Bei den anderen limitierten Emissionskomponenten Kohlenstoffmonoxid (CO), Gesamtkohlenwasserstoffe (THC) und Partikelmasse (PM) wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den Kraftstoffen oder Kalt- und Warmstart mit und ohne zehninminütige Leerlaufphase festgestellt. Alle Werte sind auf sehr niedrigem Niveau deutlich unterhalb der jeweiligen Grenzwerte und alle Fenster weisen einen Konformitätsfaktor unter 1 auf. Lediglich beim Kaltstart im Rapsölbetrieb wurden leicht erhöhte Kohlenwasserstoffemissionen gemessen, die jedoch zu keiner Grenzwertüberschreitung führen. Ein Kaltstart mit Rapsöl ist zudem bei dem untersuchten Traktor mit Zwei-Tank-System im normalen Betrieb nicht vorgesehen.



Anmerkung: Die Messfahrten wurden noch nicht konform zur Verordnung EU 2017/655 durchgeführt und die Motorsteuerung des Traktors ist nur für den Dieselmotorbetrieb optimiert. Der Konformitätsfaktor von 1,5 wurde in Anlehnung an die HDV-ISC-Gesetzgebung ausgewählt. Für NRMM wurde noch kein Konformitätsfaktor definiert.

Abbildung 26: Spezifische NO_x -Emissionen des Traktors bei Straßenfahrten bezogen auf die Zapfwellenarbeit – jeweils drei Wiederholungen inklusive Nicht-Betriebsereignisse

Weitergehende Untersuchung der Auswertungsmethode und Alternativen

Um den Einfluss der Auswertungsmethode weiter zu untersuchen, wurden neben der reinen Betrachtung des Konformitätsfaktors des 90. Perzentils nach der MAW-Methode

auch alternative Verfahren betrachtet. In Tabelle 13 sind die unterschiedlichen Methoden kurz erläutert.

Tabelle 13: Alternative Auswertungsmethoden

Methode	Einheit	Erläuterung
Fenstermittelwert	g/kWh	Es werden nach der MAW-Methode die „Work-Windows“ berechnet (vgl. Unterkapitel 3.1) und im Anschluss der Mittelwert aller Fenster gebildet.
Einfacher Mittelwert	g/kWh	Es wird die gesamte emittierte Schadstoffmasse durch die gesamte verrichtete Arbeit während des Tests dividiert.
Inside-out	g/kWh	Es wird zunächst der gesamte Rohdatensatz in der Mitte geteilt und der hintere Teil vor den Vordere gestellt, sodass die Daten von Anfang und Ende der Messung nun in der Mitte stehen. Danach wird der Fenstermittelwert gebildet.
Etappenwert	g/km	Es wird die gesamte emittierte Schadstoffmasse durch die zurückgelegte Wegstrecke geteilt.
CO ₂ -Basis	g/kg	Es werden nach der MAW-Methode die „CO ₂ -Fenster“ gebildet (vgl. Unterkapitel 3.1) und unter Berücksichtigung der gesamten Zyklusarbeit und der gesamten emittierten CO ₂ -Masse beim Referenzzyklustest am Prüfstand die Einhaltung des Konformitätsfaktor-Limits überprüft. Bezugsgröße ist hier nicht die geleistete Arbeit, sondern die emittierte CO ₂ -Masse.

Zunächst wurde der „einfache Mittelwert“ mittels Division der gesamten emittierten Schadstoffmasse durch die gesamte während des Tests verrichtete Arbeit ermittelt. In Abbildung 27 sind die unterschiedlichen Mittelwerte gegenübergestellt. Die Fenstermittelwerte sind dabei stets deutlich geringer als die einfachen Mittelwerte. Dies kann dadurch begründet werden, dass zu Beginn der Messung, wenn das Abgasnachbehandlungssystem noch nicht auf Betriebstemperatur ist und deshalb erhöhte Emissionen auftreten, auch weniger Fenster geöffnet sind, bei denen die hohen Anfangsemissionen zur Mittelwertbildung herangezogen werden. Die Stickstoffoxidemissionen sind im Betrieb mit Rapsölkraftstoff stets höher, da die Motorsteuerung dieses Traktors nur auf Dieselmotorkraftstoff optimiert ist und im Betrieb mit RK die gleichen Parameter trotz unterschiedlicher Kraftstoffeigenschaften verwendet werden.

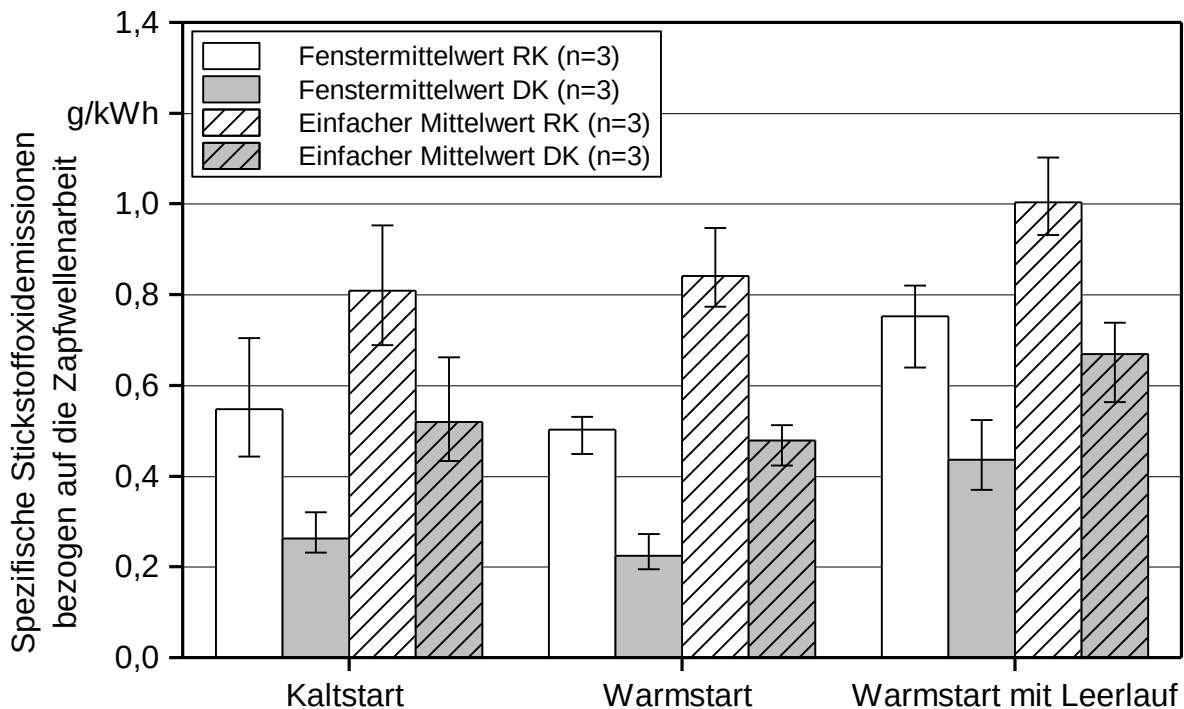


Abbildung 27: Vergleich der NO_x -Emissionsmittelwerte aller gültigen Fenster (Fenstermittelwert) mit dem Quotienten aus NO_x -Schadstoffmasse und gesamter verrichteter Arbeit (einfacher Mittelwert)

In Abbildung 28 soll dies nochmals verdeutlicht werden. Es wurde ein fiktiver Verlauf einer Emission mit einer Dauer von 1.000 s entworfen. Die Dauer eines Mittelungsfensters beträgt 200 s. Im Emissionsverlauf tritt am Anfang, in der Mitte und am Ende eine Emissionsspitze mit einer Länge von 30 s und der fünffachen Höhe des Normalwerts auf. Nach 200 s wird das erste Fenster geschlossen und der erste Mittelwert gebildet. In diesem Fenster ist die komplette Emissionsspitze vom Anfang enthalten und es entsteht ein lokales Maximum des Mittelwertverlaufs. Bereits im zweiten Fenster sinkt der Mittelwert, da die Spitze nicht mehr komplett in die Berechnung einfließt und dies setzt sich für die folgenden Fenster entsprechend fort. Insgesamt fließt die Emissionsspitze am Anfang der Messung nur in 30 Fenster ein. Die Emissionsspitze am Ende der Messung fließt ebenfalls nur in 30 Fenster ein, da nur Fenster berücksichtigt werden, die eine Gesamtdauer von 200 s erreichen. Bei der Emissionsspitze in der Mitte der Messung sind jedoch stets 200 Fenster geöffnet, sodass der Emissionspeak in insgesamt 230 Fenstern ganz oder teilweise zur Mittelwertbildung herangezogen wird. Trotz gleicher absoluter Emissionswerte der drei Peaks wird der mittlere in der Moving-Averaging-Window-Methode deutlich stärker gewichtet und Emissionen, die am Anfang und Ende einer Messung auftreten, fließen mit geringerer Bedeutung für die Gesamtbetrachtung in die Mittelwertbildung ein. Für diesen Beispielfall wäre der einfache Mittelwert der Messung 13,6 g/kWh, der Fenstermittelwert jedoch nur 11,7 g/kWh, da die Peaks am Anfang und Ende weniger stark gewichtet werden.

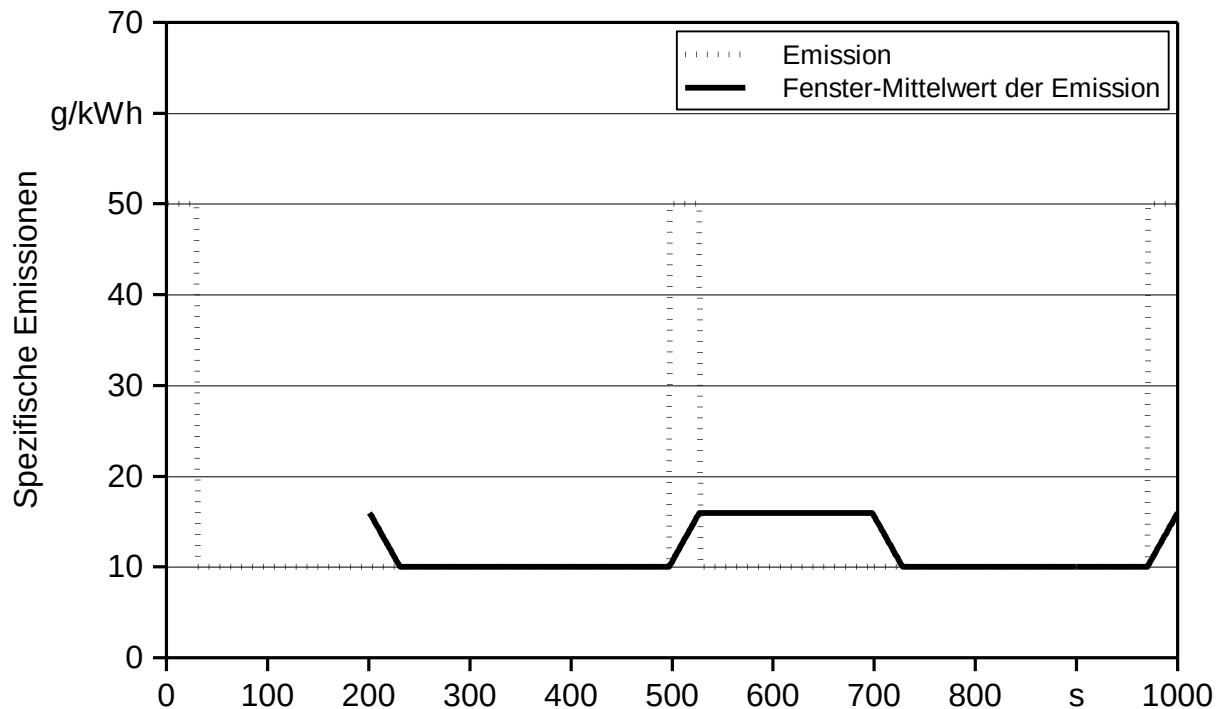


Abbildung 28: Fiktiver Emissionsverlauf und Mittelwert der Emission je Fenster mit einer Fensterdauer von 200s

Um die Auswirkungen der Berechnungsweise der Emissionen weitergehend zu untersuchen, wurde eine Inside-out-Berechnung durchgeführt. Dazu wurde ein Datensatz in der Mitte geteilt und der hintere Teil vor den vorderen Teil gesetzt, sodass die Emissionswerte vom Anfang und Ende der Messung nun in der Mitte des Datensatzes stehen. Bei dieser Messfahrt traten mittlere NO_x -Emissionen (einfacher Mittelwert) von 0,77 g/kWh auf. Bei der üblichen MAW-Berechnung wurde ein Fenstermittelwert von 0,45 g/kWh bestimmt, bei der Inside-out-Berechnung mit 0,79 g/kWh sogar ein höherer als der einfache Mittelwert. Der Anteil der Fenster mit einem Konformitätsfaktor unter 1,5 sinkt von 71 % auf 60 %, wenn statt der üblichen Fensterberechnung die Inside-out-Methode angewendet wird, da nun die höheren Anfangsemissionen aufgrund des „kalten“ Abgasnachbehandlungssystems in den stärker gewichteten mittleren Abschnitt der Messung verschoben wurden.

Um trotz der Unsicherheiten allein aufgrund der Auswertungsmethodik und der Problematik des unpräzisen Lastsignals (vgl. Unterkapitel 4.8) dennoch einen objektiven Vergleich der Emissionen eines Traktors im Betrieb mit Diesel- bzw. Rapsölkraftstoff zu erreichen, wurden in Abbildung 29 die Stickstoffoxidemissionen bezogen auf die Fahrstrecke dargestellt. Hier wurde die gesamte emittierte Stickstoffoxidmasse durch die tatsächlich gefahrene Strecke geteilt und somit alle Abschnitte der Messfahrt gleich gewichtet (Etappenwert). Dabei zeigt sich, dass der untersuchte und auf den Betrieb mit Dieselmotorkraftstoff optimierte Traktor im realen Betrieb mit Rapsölkraftstoff, bei der gewählten Teststrecke, ca. 60 % mehr Stickstoffoxide emittiert als im Betrieb mit Dieselmotorkraftstoff. Auf-

grund des hohen Einflusses der Verkehrslage und für die Ursachensuche notwendiger zusätzlicher Daten, die im Rahmen einer PEMS-Messung jedoch nicht ermittelt werden können, wie z. B. AdBlue-Verbrauch, Abgasrückführrate oder Rohemissionswerte vor der Abgasnachbehandlung, kann an dieser Stelle keine eindeutige Begründung für die höheren Emissionen im Rapsölbetrieb angeführt werden. Mit einem PEMS kann lediglich der Ist-Zustand im realen Betrieb ermittelt werden. Für tiefergehende Untersuchungen bzw. die Optimierung des Systems sind jedoch umfangreichere Messtechnik und wiederholbare Bedingungen notwendig.

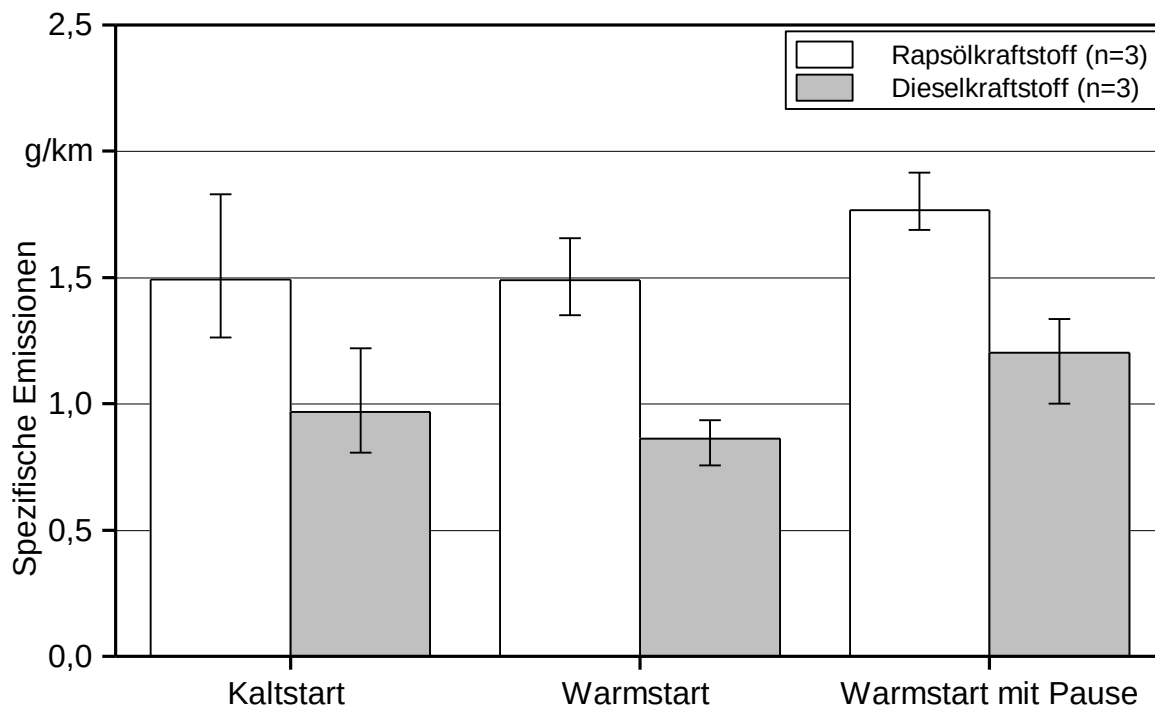


Abbildung 29: Stickstoffoxidemissionen des untersuchten und für Dieselmotorkraftstoff optimierten Traktors bei Straßenfahrten mit Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff bezogen auf die Fahrstrecke (Etappenwert)

Eine weitere Methode zur Bewertung der Messergebnisse ist die CO₂-Basis-Methode. Dabei werden ebenfalls Fenster gebildet, deren Länge jedoch nicht von der verrichteten Arbeit, sondern von der emittierten CO₂-Masse abhängt. Dies bietet den Vorteil, dass kein Lastsignal benötigt wird und die CO₂-Masse mit dem PEMS bestimmt werden kann. Es wird jedoch vorausgesetzt, dass mit gleicher emittierter CO₂-Masse auch immer die gleiche Arbeit verrichtet wird. Wird in der Realität jedoch mehr Kohlenstoffdioxid pro kWh Motorarbeit emittiert als am Prüfstand, kann auch im gleichen Maße mehr Masse des jeweiligen limitierten Schadstoffs ausgestoßen werden. Diese Abweichung kann bei der PEMS-Messung auch nicht festgestellt werden, wenn die tatsächliche Arbeit nicht bekannt ist. Eine weitere Voraussetzung zur Anwendung dieser Methode ist, dass die bei einem Prüfstandstest unter Anwendung des Referenzzyklus ermittelte gesamte Motorarbeit und die gesamte emittierte CO₂-Masse bekannt sind. Bei Traktoren ist dies in der

Regel der NRTC (*Non-Road Transient Cycle*), der aufgrund seiner hohen Dynamik nur begrenzt am Traktorenprüfstand abgebildet werden kann. Für die folgende Auswertung wurden daher Messwerte vom Traktorenprüfstand unter Anwendung eines abgewandelten Zyklus mit geringerer Dynamik (10s-NRTC) herangezogen. Die Zyklusarbeit bezieht sich nicht auf die tatsächliche Motorarbeit, sondern wiederum auf die Zapfwellenarbeit. Voraussetzung für diese Art der Auswertung ist also auch ein Prüfstandslauf, um die notwendigen Daten für die Auswertung der PEMS-Messung zu generieren.

Die Berechnung des Referenzwerts zur Überprüfung des Konformitätsfaktors erfolgt nach Formel (5.1 und in Tabelle 14 sind die für die unterschiedlichen Kraftstoffe eingesetzten und berechneten Werte dargestellt. In Anlehnung an die HDV-Gesetzgebung wurde ein Konformitätsfaktor (CF) von 1,5 als Grenzwert für das 90. Perzentil verwendet. Für NRMM ist noch kein CF definiert.

$$Ref (CF = 1,5) = 1,5 \cdot \frac{GW \cdot W(Zyklus)}{m_{CO_2}(Zyklus)} \quad (5.1)$$

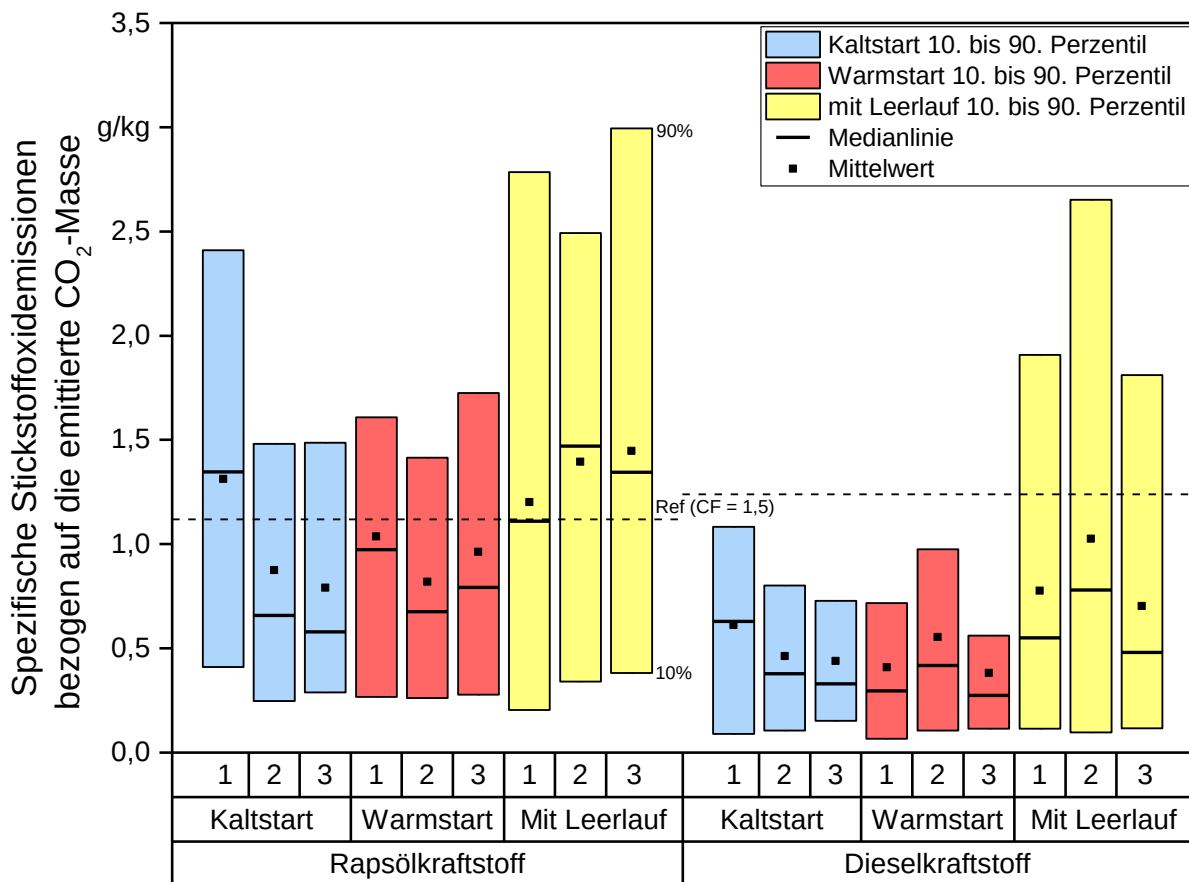
Tabelle 14: Werte für die Berechnung des Referenzwerts für die Auswertung der Emissionsergebnisse nach der CO₂-Basis-Methode

Kraftstoff	Grenzwert für Stickstoffoxid in g/kWh	Emittierte CO ₂ -Masse im Referenzzyklus in kg	Verrichtete Arbeit im Referenzzyklus in kWh	Referenzwert in g/kg
	<i>GW</i>	<i>m_{CO₂}(Zyklus)</i>	<i>W(Zyklus)</i>	<i>Ref (CF = 1,5)</i>
Rapsöl	0,4	8,6	16	1,12
Diesel	0,4	9,2	19	1,24

In Abbildung 30 sind die NO_x-Emissionsmessergebnisse der Straßenmessungen nach der CO₂-Basis-Methode als Boxplot dargestellt. Die gestrichelten Linien stellen den Referenzwert für den jeweiligen Kraftstoff dar, der von 90 % der CO₂-Fenster unterschritten werden muss. Es zeigt sich, dass nach dieser Art der Auswertung die Stickstoffoxidgehaltsgrenzwerte im Rapsölbetrieb nicht eingehalten werden können. Im Dieselmotorbetrieb liegen bei den Kalt- und Warmstartmessungen ohne zehnmündige Leerlaufphase mehr als die geforderten 90 % der CO₂-Fenstermittelwerte unter dem Referenzwert. Tritt jedoch eine längere Leerlaufphase auf, sinkt auch im Dieselmotorbetrieb der Anteil der Fenster mit einem Konformitätsfaktor unter 1,5 deutlich ab.

Mit der CO₂-Basis-Methode kann nur eine qualitative Aussage getroffen werden, ob Emissionsgrenzwerte nach den speziellen Kriterien dieser Auswerteprozedur eingehalten werden oder nicht. Für einen Vergleich der tatsächlichen Emissionen beim Einsatz unterschiedlicher Kraftstoffe scheint diese Methode weniger geeignet. Zudem sind für

diese Methode auch aktuelle Messdaten vom Traktorenprüfstand bzw. noch besser vom Motorenprüfstand notwendig, die – wenn überhaupt möglich – nur unter erheblichem Aufwand generiert werden können.



Anmerkung: Die Messfahrten wurden noch nicht konform zur Verordnung EU 2017/655 durchgeführt und die Motorsteuerung des Traktors ist nur für den Dieselmotorbetrieb optimiert. Der Konformitätsfaktor von 1,5 wurde in Anlehnung an die HDV-ISC-Gesetzgebung ausgewählt. Für NRMM wurde noch kein Konformitätsfaktor definiert.

Abbildung 30: Spezifische NO_x-Emissionen des Traktors bei Straßenfahrten bezogen auf die emittierte CO₂-Masse – jeweils drei Wiederholungen inklusive Nicht-Betriebsereignisse

5.7 Straßenfahrten mit einem Traktor Valtra N101 Hi Tech Dual-Fuel

Mit einem Valtra N101 Hi Tech Dual-Fuel wurden ebenfalls PEMS-Messfahrten auf der Traktor-Teststrecke durchgeführt (siehe Abbildung 31). Von insgesamt neun Messfahrten konnten nur zwei Warmstartmessungen im reinen Dieselmotorbetrieb und zwei Warmstartmessungen im Dual-Fuel-Betrieb ausgewertet werden. Bei den anderen fünf Messungen traten Fehler am Traktor bzw. Bedienungsfehler durch den Fahrer oder Fehler an der Messtechnik auf.



Abbildung 31: Valtra N101 Hi Tech Dual-Fuel mit PEMS

Der Traktor wurde für die Messungen mit Dieselkraftstoff (B7) nach DIN EN 590 und mit Biomethan nach DIN 51624 von einer öffentlichen Tankstelle betankt. Der Dieserverbrauch wurde mit dem Kraftstoffverbrauchsmesssystem dQRoad (vgl. Unterkapitel 4.2) kontinuierlich während der Fahrt erfasst. Gleichzeitig wurden der Abgasmassenstrom und die Abgaszusammensetzung bestimmt. Über eine Kohlenstoffbilanzierung kann somit der Massenstrom des Biomethans berechnet werden.

Für die folgende Betrachtung der Emissionen wird nur die Etappenwert-Methode herangezogen, da im Dual-Fuel-Betrieb des Traktors das – für die anderen Methoden notwendige – Motorlast-Signal sehr stark abweicht und kein objektiver Vergleich zwischen den Kraftstoffvarianten möglich wäre. Auch die CO₂-Basis-Methode zur Auswertung wurde aufgrund der geringen Aussagekraft bei gleichzeitig hohem Aufwand nicht angewendet.

In Abbildung 32 sind die ermittelten Emissionen während der auswertbaren Testfahrten dargestellt. Im Dieselpetrieb sind die Kohlenstoffdioxid-Emissionen im Mittel geringfügig höher und die Kohlenstoffmonoxid-Emissionen etwas geringer als im Dual-Fuel-Betrieb. Die Stickstoffoxid-Emissionen sind im Diesel-Betrieb ca. 10 % höher als im Dual-Fuel-Betrieb. Im Dual-Fuel-Betrieb treten Kohlenwasserstoffemissionen (THC) in Höhe von über 6 g/km auf. Diese bestehen zum größten Teil aus Methan, dem Kraftstoffanteil, der Motor und Oxidationskatalysator unverbrannt passiert. Im reinen Dieselpetrieb sind keine Kohlenwasserstoff- bzw. Methanemissionen im ausgewählten Messbereich von 0 ppm

bis 30.000 ppm) nachweisbar. Die Partikelmassemissionen sind im Diesel- und im Dual-Fuel-Betrieb mit je ca. 160 mg/km gleich hoch.

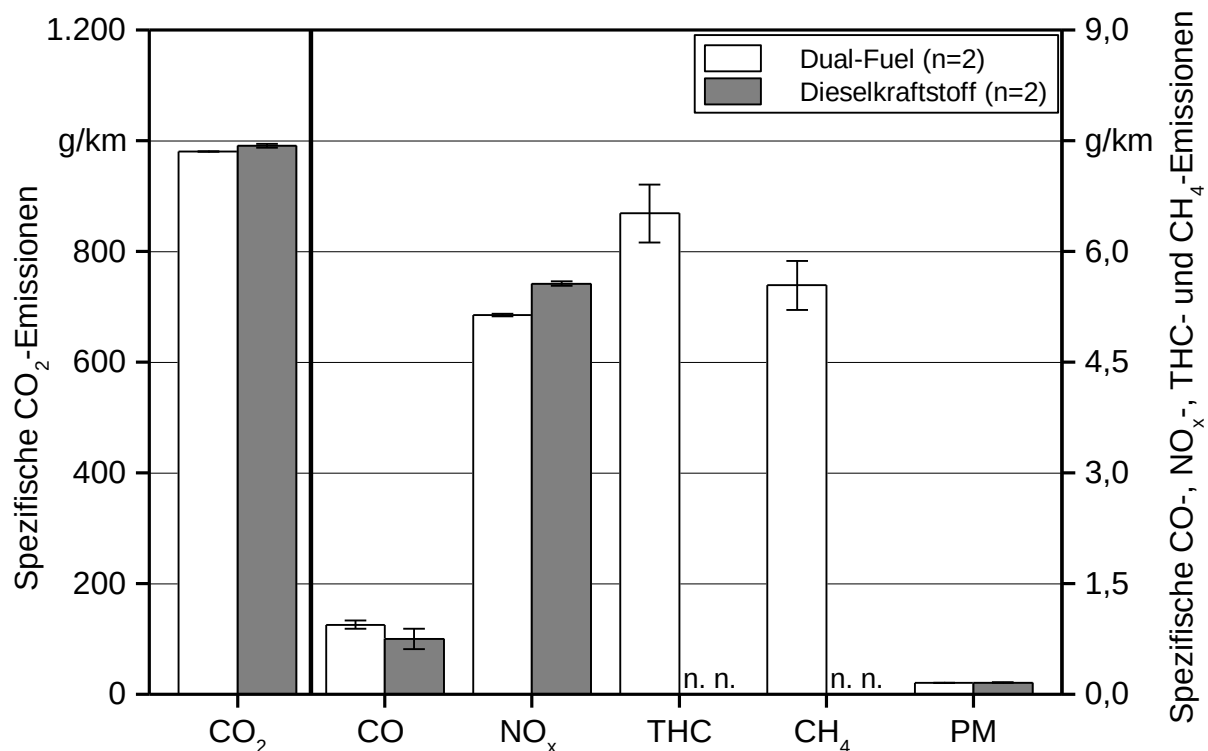


Abbildung 32: Emissionen des Traktors Valtra 101 H Dual-Fuel bei RDE-Messungen auf der Traktor-Teststrecke

Neben den Emissionen wurde auch der Kraftstoffverbrauch im Diesel- und Dual-Fuel-Betrieb eingehend untersucht und eine geeignete Methode zur Auswertung entwickelt. Diese wird im Folgenden näher beschrieben.

In die Berechnung des Methanverbrauchs fließen Abgasmassenstrom und -zusammensetzung, Dieselskraftstoffmassenstrom und -zusammensetzung sowie die molare Zusammensetzung des gasförmigen Kraftstoffs ein. Hinzu kommt ein schnelleres Ansprechverhalten des Kraftstoffmassenstrommessgeräts dQRoad, sodass vor allem in den transienten Lastbereichen hohe Abweichungen auftreten. In einem ersten Schritt muss deshalb zunächst eine Korrektur des Zeitversatzes zwischen dem über eine Kohlenstoffbilanz auf Basis von Abgasmassenstrom und -zusammensetzung berechneten Gesamtkraftstoffverbrauch und dem gemessenen Dieselskraftstoffverbrauch durchgeführt werden. Dies kann über die vom Hersteller bereitgestellte Postprocessing-Software automatisiert auf Basis einer Methode zur Bestimmung des maximalen Bestimmtheitsmaßes berechnet werden. Im nächsten Schritt müssen der über die Kohlenstoffbilanz berechnete und der tatsächlich gemessene Dieselskraftstoffverbrauch einander angeglichen werden. Dazu empfiehlt sich, eine oder mehrere Fahrten im reinen Dieselsbetrieb ohne Methanverbrauch auszuwerten und einen Korrekturfaktor K zu bestimmen, unter Anwendung dessen mit beiden Verbrauchsbestimmungsmethoden vergleichbare Kohlen-

stoffmassenströme über den Dieserverbrauch ($\dot{m}_{C,DK}$) und den Abgasmassenstrom ($\dot{m}_{C,Abgas}$) ermittelt werden. Dies soll anhand folgender Formel (5.2) dargestellt werden.

$$\dot{m}_{C,DK} = K \cdot \dot{m}_{C,Abgas} \quad (5.2)$$

Wird nun eine Dual-Fuel-Fahrt ausgewertet, stehen nur der gesamte Abgasmassenstrom aus Diesel- und Methanverbrauch und der gemessene Dieserverbrauch zur Verfügung. Um die Abweichung zwischen den Verbrauchsbestimmungsmethoden zu berücksichtigen, wird der Kohlenstoffmassenstrom im Abgas ($\dot{m}_{C,Abgas}$) auch im Dual-Fuel-Betrieb mit dem Korrekturfaktor K aus dem reinen Diesetrieb verrechnet. Der Kohlenstoffmassenstrom aus dem Methanverbrauch entspricht der Differenz aus dem korrigierten gesamten emittierten Kohlenstoffmassenstrom im Abgas ($\dot{m}_{C,Abgas}$) und dem aus dem Dieserverbrauch resultierenden Kohlenstoffmassenstrom ($\dot{m}_{C,DK}$), wie Formel (5.3) zeigt.

$$\dot{m}_{C,CNG} = K \cdot \dot{m}_{C,Abgas} - \dot{m}_{C,DK} \quad (5.3)$$

Da die Elementarzusammensetzung von Methan bzw. CNG bekannt ist, kann aus dem ermittelten Kohlenstoffmassenstrom der CNG-Kraftstoffmassenstrom berechnet werden.

Wird die Abweichung der beiden Bestimmungsmethoden nicht ausgeglichen, wird die Differenz der Ergebnisse als Gasverbrauch interpretiert und das Ergebnis stark verfälscht. Am Prüfstand wurde eine hohe Genauigkeit des dQRoad nachgewiesen (vgl. Unterkapitel 5.1), deshalb wird dieser Wert als Referenz angenommen und der berechnete Kraftstoffverbrauch durch Korrektur des Abgasmassenstromsignals angepasst. In Abbildung 33 ist die Abweichung des berechneten vom gemessenen Dieseldieselfkraftstoffverbrauch dargestellt. Ohne Korrektur wurde bei zwei ausgewerteten Messfahrten ein um mehr als 8 % höherer Kraftstoffverbrauch berechnet. Wird der Abgasmassenstrom korrigiert, ergibt sich bei einem Korrekturfaktor von 0,935 eine minimale Abweichung für Messfahrt 1 und bei einem Korrekturwert von 0,930 eine minimale Abweichung für Messfahrt 2. Die geringste mittlere Abweichung tritt bei einem Korrekturfaktor von 0,930 auf. Aus diesem Grund wird bei den folgenden Dual-Fuel-Auswertungen der Abgasmassenstrom vor der Berechnung des Methanverbrauchs mit dem Faktor 0,930 korrigiert. Bestimmt wurden die Korrekturfaktoren iterativ, d. h., es wurde die Datenauswertung mehrfach wiederholt und der Korrekturfaktor Schritt für Schritt angenähert, bis das Optimum erreicht wurde.

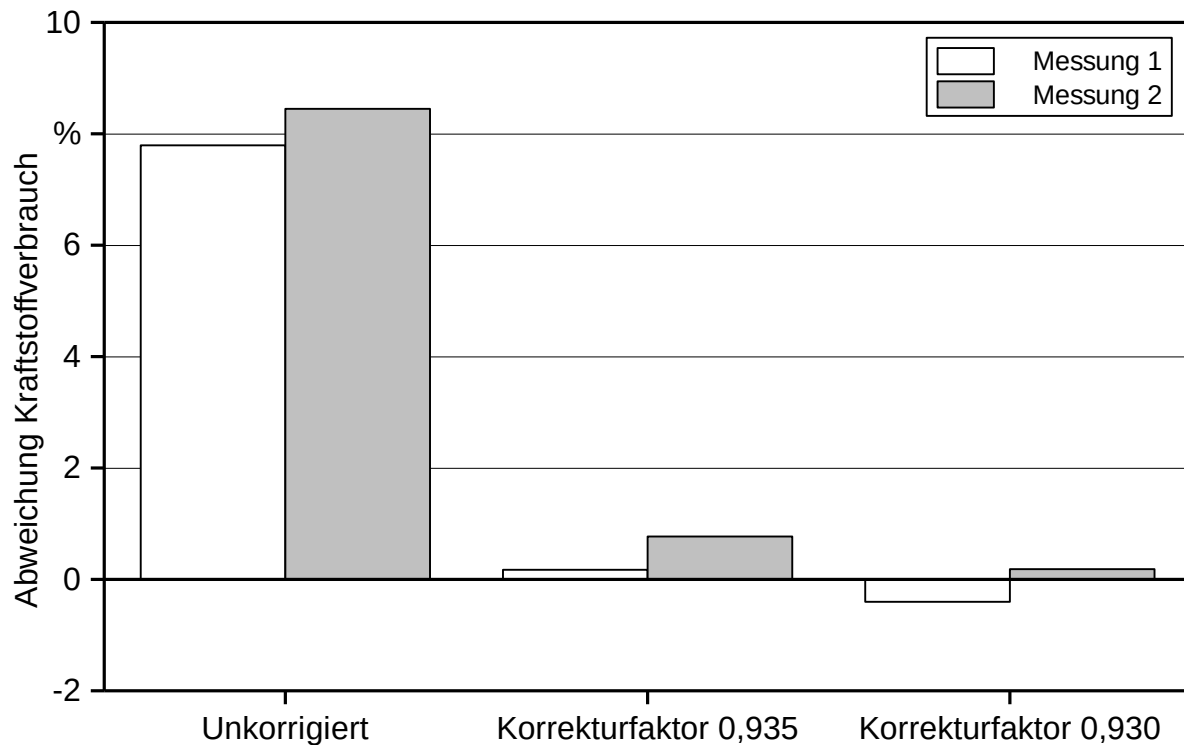


Abbildung 33: Abweichung des berechneten vom gemessenen Dieselkraftstoffverbrauch mit unterschiedlichen Korrekturfaktoren des Abgasmassenstroms

In Abbildung 34 ist der Verlauf des Kraftstoffverbrauchs gemessen mit dQRoad und berechnet mit unterschiedlichen Korrekturfaktoren des Abgasmassenstroms dargestellt. Es wird deutlich, dass der unkorrigierte berechnete Wert im oberen Bereich den gemessenen Wert deutlich überschreitet. Des Weiteren werden positive oder negative Verbrauchsspitzen vom Kraftstoffmassenstrommessgerät besser dargestellt als bei den berechneten Werten. Bei Letzteren werden, aufgrund des trägeren Ansprechverhaltens, Spitzen deutlich geglättet. In Bereichen, in denen ein Kraftstoffverbrauch nahe null gemessen wurde, sinken alle berechneten Werte hingegen nicht auf null ab. Insgesamt weisen der gemessene Verlauf und die berechneten und korrigierten Verläufe eine sehr gute Übereinstimmung auf.

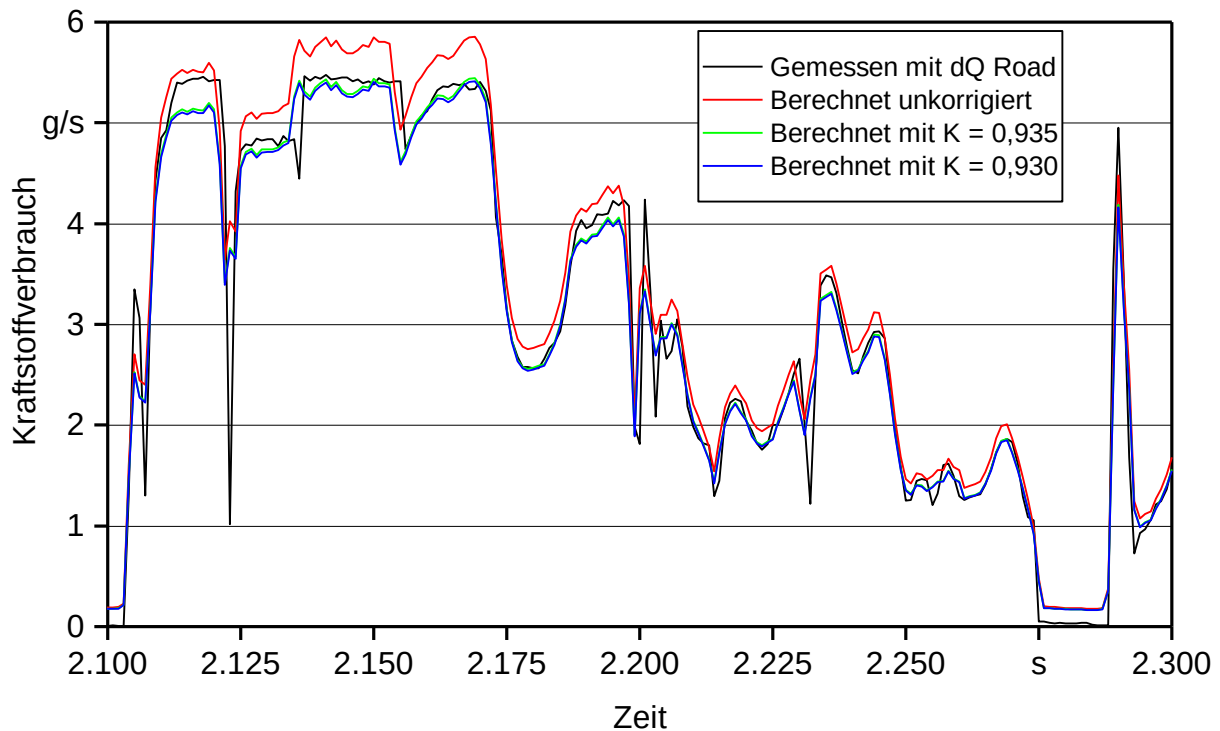


Abbildung 34: Ausschnitt des Verlaufs des Dieselkraftstoffverbrauchs gemessen mit dQRoad und berechnet nach der Kohlenstoffbilanz-Methode mit verschiedenen Korrekturfaktoren

In Abbildung 35 sind die Gesamt-Kraftstoffverbräuche des Valtra-Traktors bei zwei Diesel- und zwei Dual-Fuel-Messfahrten dargestellt. Zum einen wurde der mit dem Kraftstoffmessgerät dQRoad gemessene Dieselverbrauch der Fahrten gegenübergestellt und zum anderen auch der unkorrigierte und korrigierte Methan-Verbrauch. Korrigiert wurde dabei wie beschrieben der Abgasmassenstrom mit einem Wert von 0,930, um eine möglichst gute Korrelation des gemessenen und berechneten Dieselverbrauchs zu erreichen. Bei Messung 2 lag der Anteil des Gases am Kraftstoffverbrauch bei ca. 11 % (m/m), bei Messung 1 nur bei etwa 9 % (m/m). Auch hier wird die starke Auswirkung auf den berechneten Gasverbrauch deutlich, wenn eine relativ geringe Abweichung zwischen gemessenem und berechnetem Dieselverbrauch nicht korrigiert wird. Insgesamt wird im Dual-Fuel-Betrieb nur etwa 1 kg Dieselkraftstoff eingespart, jedoch 1,5 kg Methan zusätzlich verbraucht, wobei der massebezogene Heizwert des Gases sogar höher ist als derjenige des Dieselkraftstoffs. Dies erklärt, dass der Dual-Fuel-Betrieb bei diesem Fahrzeug und dem untersuchten Einsatzzweck nicht wie erwartet zu deutlich geringeren Tailpipe-CO₂-Emissionen führt (siehe Abbildung 32).

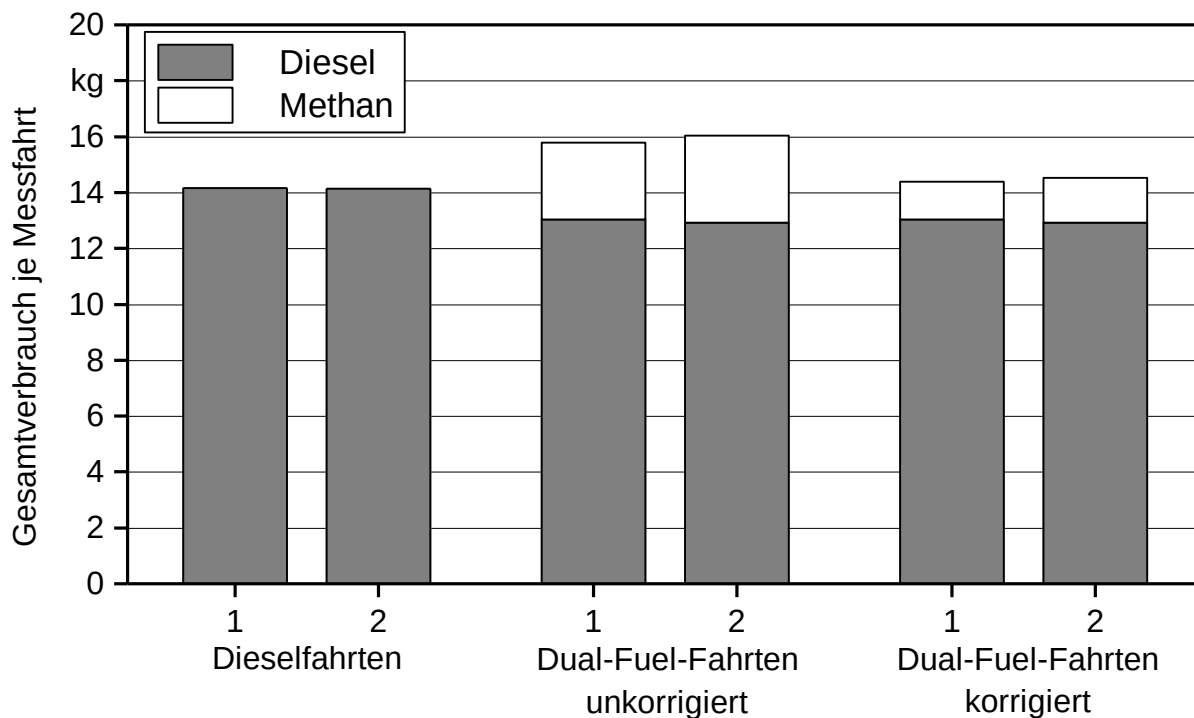


Abbildung 35: Gesamt-Kraftstoffverbräuche des Traktors bei zwei Diesel- und zwei Dual-Fuel-Messfahrten mit unkorrigiertem und korrigiertem Methanverbrauch

Stellt man nun die Gesamtemissionen von mehr als 250 g Methan je Dual-Fuel-Fahrt dem Gesamtgasverbrauch von ca. 1,5 kg gegenüber, bedeutet dies, dass in diesem Anwendungsfall mehr als 16 % des eingesetzten Gases unverbrannt in die Atmosphäre ausgestoßen werden. Es besteht also noch deutliches Entwicklungspotenzial bei diesem Prototyp-Traktor, um die Treibhausgaseinsparung durch den Einsatz des regenerativen Methans nicht durch höhere direkte Treibhausgasemissionen wieder zu relativieren.

5.8 Realemissionen eines John-Deere-6215R-Pflanzenöltraktors der Abgasstufe IV

Gegen Ende des Projekts wurde von John Deere ein Pflanzenöltraktor 6215R der Abgasstufe IV für Prüfstands- und Realemissionsmessungen zur Verfügung gestellt. Nach Abschluss der stationären Messungen am Traktorenprüfstand wurde die Maschine mit dem portablen Emissionsmesssystem ausgestattet und In-Service-Conformity-Messungen nach der nun vorliegenden Gesetzgebung (Verordnung EU 2017/655 [15]) durchgeführt. Da im zur Verfügung stehenden Zeitraum saisonal bedingt keine anderen adäquaten Einsatzmöglichkeiten für den Traktor möglich waren, wurden auch mit dieser Maschine Straßenfahrten durchgeführt. Erfahrungsgemäß stellt diese Art des Einsatzes mit abschnittsweise geringer und hochtransienter Last bei vergleichsweise geringer Abgastemperatur höchste Ansprüche an das Abgasnachbehandlungssystem. In Abbildung

36 ist der mit Messtechnik ausgestattete Traktor dargestellt. Die PEMS-Box wurde in diesem Fall an die Heckhydraulik angekoppelt und das Abgas-Flowmeter vertikal am Auspuff installiert. Vorteil der Heck- gegenüber der Frontmontage ist, dass nicht zwangsläufig eine zweite Person als Einweiser während der gesamten Messung mitfahren muss.



Abbildung 36: Pflanzenöltraktor John Deere 6215R mit portablem Emissionsmesssystem

Nach einer ersten Messfahrt und deren Auswertung wurde die Fahrroute nochmals erweitert (siehe Abschnitt 4.7.1.2), sodass während des Tests die ca. sechsfache Kohlenstoffdioxidmasse wie beim NRTC-Zyklus am Traktorenprüfstand emittiert wird. Dazu sind bei diesem Traktor eine Fahrstrecke von ca. 115 km und eine Fahrzeit von ca. 2,5 h notwendig. Die Messungen wurden dreimal ohne Pause und einmal mit drei unterschiedlich langen Leerlaufphasen durchgeführt. Die Auswertung erfolgte mit dem vom Joint Research Centre (JRC) entwickelten und kostenlos bereitgestellten Excel Add-In „EMROAD V5.96 B3“, mit dem Auswertungen nach den Vorgaben der aktuellen EU-Gesetzgebung durchgeführt werden können.

Hinsichtlich der Kohlenstoffmonoxid- und Kohlenwasserstoffemissionen wurde festgestellt, dass erwähnenswerte Emissionen dieser Schadstoffe bei sämtlichen Tests fast ausschließlich während der Kaltstartphase auftreten, die jedoch gemäß der Gesetzgebung nicht für die Bewertung des Emissionsverhaltens der untersuchten Maschine herangezogen wird. Auf eine weitere Betrachtung wird deshalb an dieser Stelle verzichtet.

Stickstoffoxidemissionen wurden ebenfalls hauptsächlich während der Kaltstartphase und nach sogenannten Non-Working-Events bzw. Nicht-Betriebsereignissen gemessen. Als Kaltstartphase ist der Zeitraum vom Starten des Motors bis zum Erreichen einer Kühlwassertemperatur von 70 °C bzw. einer Stabilisierung innerhalb von fünf Minuten auf einen Wert von ± 2 K definiert. Die Kaltstartphase darf zudem maximal 20 Minuten lang sein. Danach werden die Daten für die Gesamtbetrachtung herangezogen, egal ob die anderen Kriterien erreicht sind. Der Algorithmus zur Bestimmung gültiger Betriebsereignisse ist in der Verordnung EU 2017/655, Anlage 4 detailliert beschrieben.

In Abbildung 37 sind u. a. die Signalverläufe von Motordrehzahl und Motorlast während einer Messfahrt, bei der bewusst Leerlaufphasen eingelegt wurden, dargestellt. Mithilfe des EMROAD-Auswertungstools wurden bei diesem Datensatz der Kaltstart am Anfang der Fahrt und drei Nicht-Betriebsereignisse identifiziert und somit insgesamt vier Zeiträume mit ungültigen Betriebsbedingungen für die weitere Auswertung ausgeschlossen. Im vierten Abschnitt der Grafik wird deutlich, dass am Anfang der Messung die höchsten Stickstoffoxidemissionen auftreten, bis die Abgasnachbehandlung die notwendige Betriebstemperatur von über 200 °C erreicht. Nach den drei Leerlaufphasen treten jeweils kleinere Emissionsspitzen auf, da die Abgastemperatur im Leerlauf stark absinkt und erst einige Minuten nach erneuter Belastung des Motors wieder auf das notwendige Niveau ansteigt. Beim ersten und längsten Non-Working-Event (> 10 min) werden entsprechend der Gesetzgebung auch noch die dem Nicht-Betriebsereignis folgenden vier Minuten bzw. der Zeitraum bis zum Erreichen einer Abgastemperatur von mindestens 250 °C für ungültig erklärt. Dadurch wird hier fast die gesamte dem Nicht-Betriebsereignis folgende Emissionsspitze von der Gesamtbetrachtung der Emissionen ausgeschlossen. Bei den anderen beiden kürzeren Non-Working-Events (< 10 min) ist dies nicht der Fall und die Stickstoffoxidspitzen fließen in die Auswertung mit ein. Im unteren Teil der Abbildung 37 ist die kumulierte Stickstoffoxidmasse zum einen über die gesamte Fahrt und zum anderen nur für die gültigen Abschnitte der Messung ohne Kaltstart und Non-Working-Events dargestellt. Wird die Fahrt also nach der gesetzlichen Vorgabe ausgewertet, werden 56 % der emittierten Stickstoffoxidmasse nicht berücksichtigt. Insgesamt kann das Emissionsverhalten des hier betrachteten Pflanzenöltraktors als sehr gut bezeichnet werden, da trotz geringer und transienter Last im Straßenbetrieb die Abgasnachbehandlung bereits nach wenigen Minuten Aufwärmzeit zuverlässig eingreift und die Emissionen nahezu vollständig reduziert.

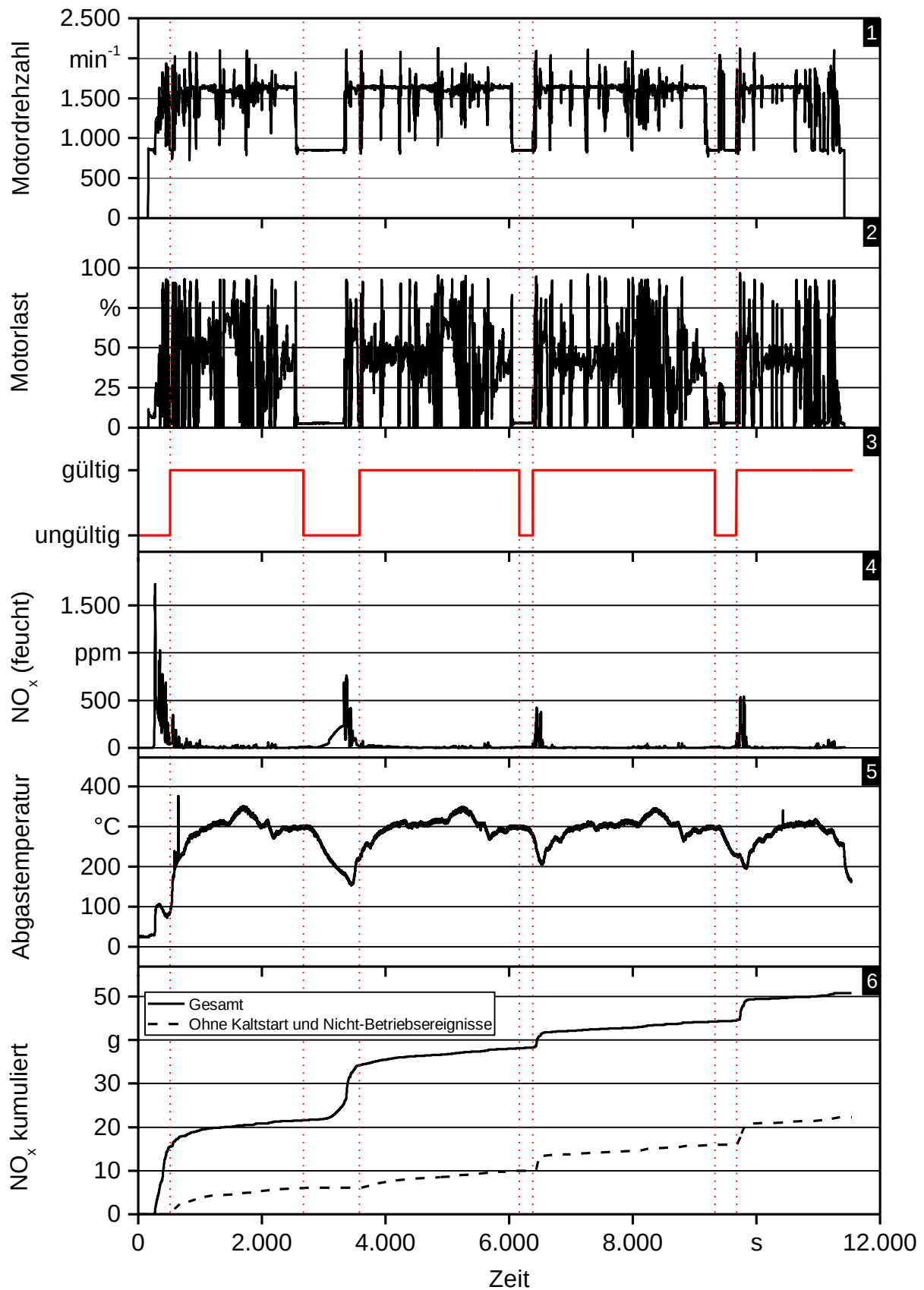
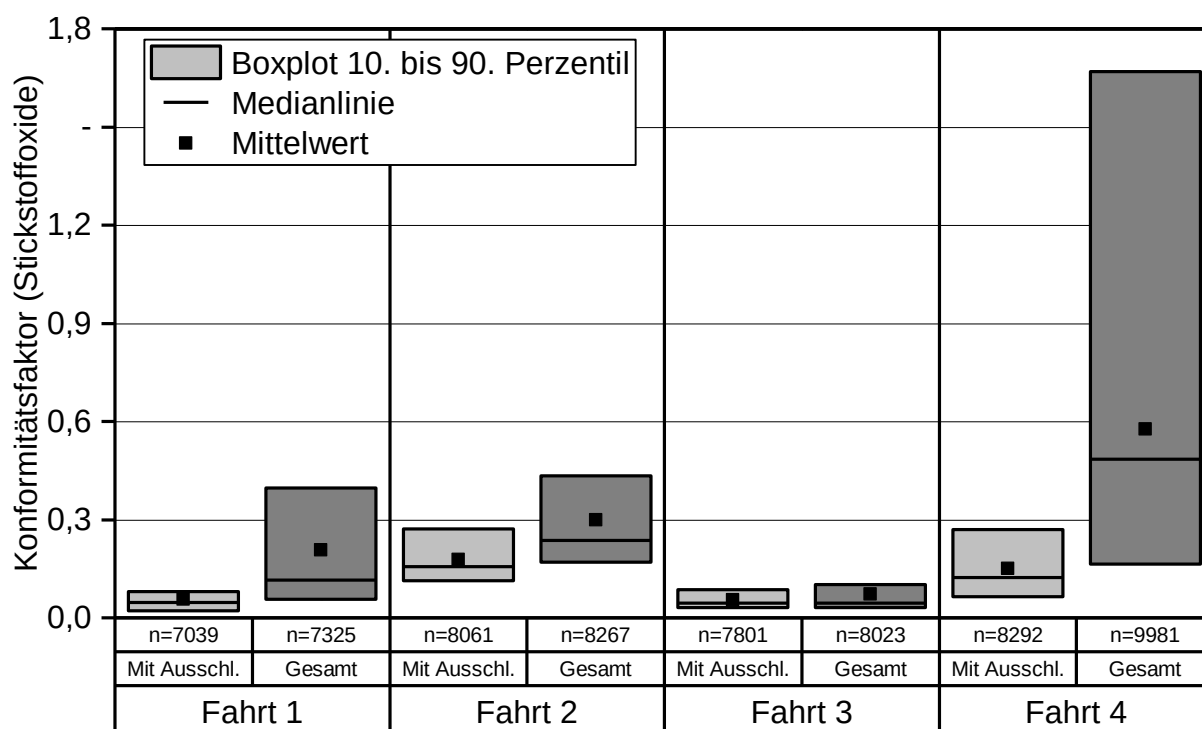


Abbildung 37: Motordrehzahl und -last, Stickstoffoxidemissionen, Abgastemperatur und Gültigkeitsbereiche einer Messfahrt mit Kaltstart und Nicht-Betriebsereignissen

In Abbildung 38 sind die bei den vier Messfahrten mittels EMROAD ermittelten Stickstoffoxid-Konformitätsfaktoren der Mittelwertfenster als Boxplot dargestellt. Rechts ist das Ergebnis für jede Fahrt ohne Ausschließungen eingezeichnet und links mit Ausschließungen nach der aktuellen Gesetzgebung. Das bedeutet, dass die Kaltstartphase und längere Leerlaufphasen aus dem Datensatz nach dem vorgegebenen Algorithmus entfernt wurden. Bislang wurde kein Grenzwert bzw. maximaler Konformitätsfaktor für NRMM festgelegt, es muss jedoch der Konformitätsfaktor für das kumulative 90. Perzentil ermittelt und angegeben werden. Bei der aktuellen Gesetzgebung für schwere Nutzfahrzeuge müssen 90 % der Mittelungsfenster einen Konformitätsfaktor unterhalb 1,5 aufweisen. Die komplette Box, die das 10. bis 90. Perzentil repräsentiert, müsste also unterhalb dieses Werts liegen. Das Emissionsergebnis hinsichtlich der Stickstoffoxide kann also, auch auf diese Art bewertet, als hervorragend bezeichnet werden. Wenn die gesetzlich vorgeschriebenen Ausschließungen vorgenommen werden, liegt das 90. Perzentil stets unterhalb eines Konformitätsfaktors von 0,3. Selbst ohne die notwendigen Ausschließungen wird die Grenze aus der Nutzfahrzeug-Gesetzgebung eingehalten, wenn keine längeren Leerlaufphasen während des Tests auftreten. Bei Fahrt 4 mit langen Leerlaufphasen und Betrachtung ohne Ausschließungen liegt der Wert auch nur knapp über 1,5. Bei derart niedrigen Stickstoffoxidemissionen ist auch die Grenze der Messtechnik erreicht. Bei den Messungen mit Ausschließungen wurden mittlere Stickstoffoxidkonzentrationen im einstelligen ppm-Bereich bestimmt. Der Messbereichsendwert des NO-Kanals liegt bei 3.000 ppm, des NO₂-Kanals bei 1.000 ppm. Laut Gesetzgebung ist eine Nullpunkt-Drift von bis zu 2 % des Messbereichsendwerts, also 60 ppm bzw. 20 ppm, erlaubt und es muss nur eine Korrektur durchgeführt werden, wenn die Drift größer als 2 % ist. Bei dem vorhandenen Messgerät tritt erfahrungsgemäß bei ausreichender Aufwärmzeit und einer Messdauer von zwei bis drei Stunden eine Nullpunkt-drift weit unter 2 % auf. Der NO-Kanal driftet im Bereich von ca. -1 ppm bis -10 ppm und der NO₂-Kanal im Bereich 0 ppm bis +5 ppm. Dennoch hat ein unterschiedliches Driftverhalten bei den unterschiedlichen Messungen natürlich deutlichen Einfluss auf das Gesamtergebnis. Präzisere mobile Messgeräte sind zum Stand August 2018 noch nicht am Markt verfügbar, jedoch bei den Geräteherstellern in Planung.

Neben den gasförmigen Schadstoffen wurden bei den vorliegenden Messungen auch die Partikelmasse-Emissionen bestimmt. Eine Auswertung der Daten war jedoch nicht möglich, da die eingesetzten Filter eine zu geringe Beladung (< 0,1 mg) aufweisen. Aufgrund des derart niedrigen PM-Emissionsniveaus scheint eine Einhaltung des Grenzwerts jedoch auch während der Realfahrt als wahrscheinlich.



„Mit Ausschließungen“ bedeutet, dass die Kaltstartphase und Nicht-Betriebsereignisse vor der Fensterberechnung entsprechend der gültigen Gesetzgebung aus dem Datensatz ausgeschlossen wurden. Bei Fahrt 4 traten drei Nicht-Betriebsereignisse auf, bei den anderen Fahrten keines.

Abbildung 38: Stickstoffoxid-Konformitätsfaktoren aller Mittelwertfenster bei den vier Messfahrten mit Rapsölkraftstoff

5.9 Realemissionen eines John-Deere-1470G-Harvesters im Betrieb mit Diesel- und Rapsölkraftstoff

Im Rahmen des Projekts „Rapsölkraftstoff als Energieträger für den Betrieb eines forstwirtschaftlichen Vollernters (Harvester)“, kurz „Rapster“, mit den Projektpartnern Bayerische Staatsforsten, John Deere, Donau Wald Forstmaschinen und Technologie- und Förderzentrum wurden Realemissionsmessungen an einem forstwirtschaftlichen Harvester vom Typ John Deere 1470G durchgeführt. Die Forstmaschine wurde zunächst in der serienmäßigen Dieselmotorkraftstoff-Konfiguration ausgeliefert und im Laufe des Projekts auf den Rapsölkraftstoff-Betrieb umgerüstet und optimiert. Vor und nach der Umrüstung erfolgten Realemissionsmessungen mit den unterschiedlichen Kraftstoffen beim normalen Ernteeinsatz der Maschine im Ebersberger Forst. Die Messungen sollten dabei nur zu möglichst geringen Ausfallzeiten der Maschine führen und die Installation der Messtechnik musste am Einsatzort im Wald erfolgen. Die Messkampagne pro Kraftstoff dauerte jeweils fünf Tage, wobei jeweils am Montag Anreise und Installation der Messtechnik erfolgten, Dienstag bis Donnerstag Messungen durchgeführt wurden und am Freitag die Demontage und die Rückreise stattfanden. Aufgrund des sehr begrenzten Zeitrahmens für die Messungen und des Einsatzorts des Harvesters im Forst ohne Werkstatt bzw. Maschinenhalle und elektrischen Strom stellten diese Messungen eine besondere Herausforderung dar. Sämtliche fahrzeugspezifischen und forsttauglichen Anbauteile zur Anbindung des Flow Tubes am Auspuff sowie der PEMS-Box am Heck des Harvesters

mussten vorab konstruiert und gefertigt werden. Abbildung 39 zeigt den speziell angefertigten Adapterrahmen für die PEMS-Box am Heck des Harvesters. Abbildung 40 zeigt die PEMS-Box am Kran des Forwarders, mit dessen Hilfe die Box am Adapterrahmen am Harvester eingehängt wurde. In Abbildung 41 ist schließlich der gesamte Aufbau des PEMS am Harvester während der ersten Messkampagne mit Dieselmotorkraftstoff ersichtlich. Für die zweite Messkampagne mit Rapsölmotorkraftstoff wurden noch die Blinker an der Box demontiert, da diese beim ersten Einsatz beschädigt worden waren, und ein zusätzlicher Schutzbügel zum Abweisen von Ästen und zum Schutz des Flow Tubes installiert. Da auch für die Aufwärmphase der Messgeräte und in den Pausen zwischen den Messungen kein Netzstrom zur Verfügung steht, empfiehlt es sich, einen zweiten Generator zu verwenden, sodass der an der PEMS-Box installierte Stromerzeuger zwischendurch abgestellt und abgekühlt werden kann, bevor der Benzintank für die Messungen wieder aufgefüllt und so die Gefahr einer Verpuffung oder eines Brandes beim Tanken minimiert wird. Da ein Harvester nicht über einen Beifahrersitz verfügt, kann die Messtechnik während des Betriebs nur aus der Ferne überwacht werden. Dies geschieht über die integrierte WLAN-Funktionalität des PDCM. Während des Betriebs des Harvesters müssen von Personen 90 m Sicherheitsabstand eingehalten werden. Dies bedeutet, dass auch über diese vergleichsweise große Distanz eine stabile Netzwerkverbindung möglich sein muss. Während der gesamten Messungen war dies auch problemlos möglich, wenn dem Harvester mit ausreichendem Sicherheitsabstand kontinuierlich zu Fuß gefolgt wurde. Für eine permanente Überwachung der Messtechnik per WLAN von einem festen Standort aus ist der Aktionsradius der Forstmaschine während eines zwei- bis dreistündigen Tests zu groß. Eine Remote-Desktop-Verbindung war im Ebersberger Forst nicht möglich, da die Mobilfunkabdeckung hierfür zu gering ist. Des Weiteren empfiehlt es sich, zur Kommunikation alle beteiligten Personen mit einem Funkgerät auszustatten.



Abbildung 39: Adapterrahmen zur Montage der PEMS-Box am Heck des Harvesters



Abbildung 40: PEMS-Box am Kran des Forwarders



Abbildung 41: Harvester im Einsatz mit PEMS

Für die Auswertung der Messdaten wurde das Excel Add-In EMROAD 5.96 B3 (siehe Unterkapitel 4.4) verwendet. Die notwendigen Volllastkurven wurden vom Projektpartner John Deere am Motorenprüfstand ermittelt und zur Verfügung gestellt. Auf dem verwendeten Motorenprüfstand konnte mit einem Motor dieser Leistungsklasse jedoch kein NRTC dargestellt werden, sodass die NRTC-Zyklusarbeit entsprechend der Methodik zur Ermittlung der Sollwertvorgabe für den Prüfstand auf Basis der Volllastkurve bestimmt wurde. Die Motorsoftware wurde so adaptiert, dass der Motor im Rapsölbetrieb die gleiche Volllastkurve wie im Dieselbetrieb aufweist. Für beide Betriebsarten gilt demnach eine Referenzarbeit für die Mittelungsfenster von 24 kWh. Eine Auswertung auf Basis von CO₂-Mittelungsfenstern ist in diesem Fall aufgrund der fehlenden Labormessungen nicht möglich. Bei dieser Messung ist auch zu beachten, dass sich die Volllastkurve nicht – wie bei den Messungen an Traktoren – auf die Zapfwellenarbeit bezieht, sondern auf die tatsächliche Kurbelwellenarbeit. Die Emissionsergebnisse beziehen sich bei dieser Maschine damit auch auf die Kurbelwellenarbeit.

In Abbildung 42 sind einige wichtige Signalverläufe während einer Messung mit Rapsölkraftstoff (RK1) dargestellt. Zunächst sind Motordrehzahl und -last eingezeichnet. Auf Basis dieser Informationen und auch der Kühlmitteltemperatur wurden von der Auswertungs-Software der Kaltstart und zwei Nicht-Betriebsereignisse als ungültige Abschnitte der Messung erkannt (siehe dritter Abschnitt der Grafik). Der Kaltstart ist bei den Messungen relativ kurz, da der Harvester mit einer Standheizung ausgerüstet ist, die jeden Tag vor Arbeitsbeginn bis zu zwei Stunden in Betrieb ist, um das Hydrauliköl und nach der Umrüstung auch das Rapsölkraftstoff-System vorzuwärmen. Dabei steigt auch die Motortemperatur, als Kriterium für das Ende des Kaltstarts, schon mit an. Die Abgasnachbehandlung bleibt jedoch noch weitgehend kalt. Ein großer Teil der NO_x-

Emissionsspitze am Anfang der Messung fließt deshalb in die Betrachtung mit ein. Während der beiden Nicht-Betriebsereignisse sinkt die Abgastemperatur zwar deutlich ab, aber nicht so weit, dass im Anschluss Emissionsspitzen aufgrund abgekühlter Abgasnachbehandlung entstehen. Aufgrund dieser Gegebenheiten fließt bei diesem Fahrzeug trotz ungültiger Betriebsabschnitte der größte Teil der Stickstoffoxidemissionen auch in die Gesamtbetrachtung ein.

Bei den Kohlenwasserstoffemissionen (THC) wurden in regelmäßigen Abständen ungewöhnliche Peaks beobachtet, die auch eine leichte Erhöhung der Abgastemperatur nach sich ziehen (siehe Abbildung 42, Abschnitt 4). Nach Rücksprache mit dem Motorenhersteller wurde als Ursache ein regelmäßiges kurzes Spülen der Regenerierdüse identifiziert. Dadurch soll die Düse, die zum Einspritzen von Kraftstoff in das Abgas nach Turbolader zur aktiven Regeneration der Abgasnachbehandlung dient, vor Verschmutzungen geschützt werden. Da diese Spitzen den Hauptanteil der gesamten THC-Emissionen bilden und nichts mit dem verwendeten Kraftstoff bzw. kraftstoffspezifischen Motoreinstellungen zu tun haben, werden diese an dieser Stelle nicht noch detaillierter betrachtet. Unabhängig vom Kraftstoff und ungeachtet dieser ungewöhnlichen Spitzen wird der gültige Grenzwert für Kohlenwasserstoff- und auch Kohlenstoffmonoxidemissionen stets weit unterschritten. Auch die Partikelmasseemissionen konnten bei den vorliegenden Messungen nicht ausgewertet werden. Bei der Hälfte der eingesetzten Filter war die Masse nach der Beladung geringer als vor der Messung. Bei der anderen Hälfte war die Beladung geringer als 0,1 mg. Die eingesetzte mobile Messtechnik zur Bestimmung der Partikelmasseemissionen kommt demnach bei diesem modernen Dieselmotor mit Partikelfilter an ihre Nachweisgrenze. Hier sollten zukünftig mobile Partikelzähler, wie sie mittlerweile auf dem Markt angeboten werden, zum Einsatz kommen und die Partikelanzahl (PN) statt der Partikelmasse (PM) bestimmt werden.

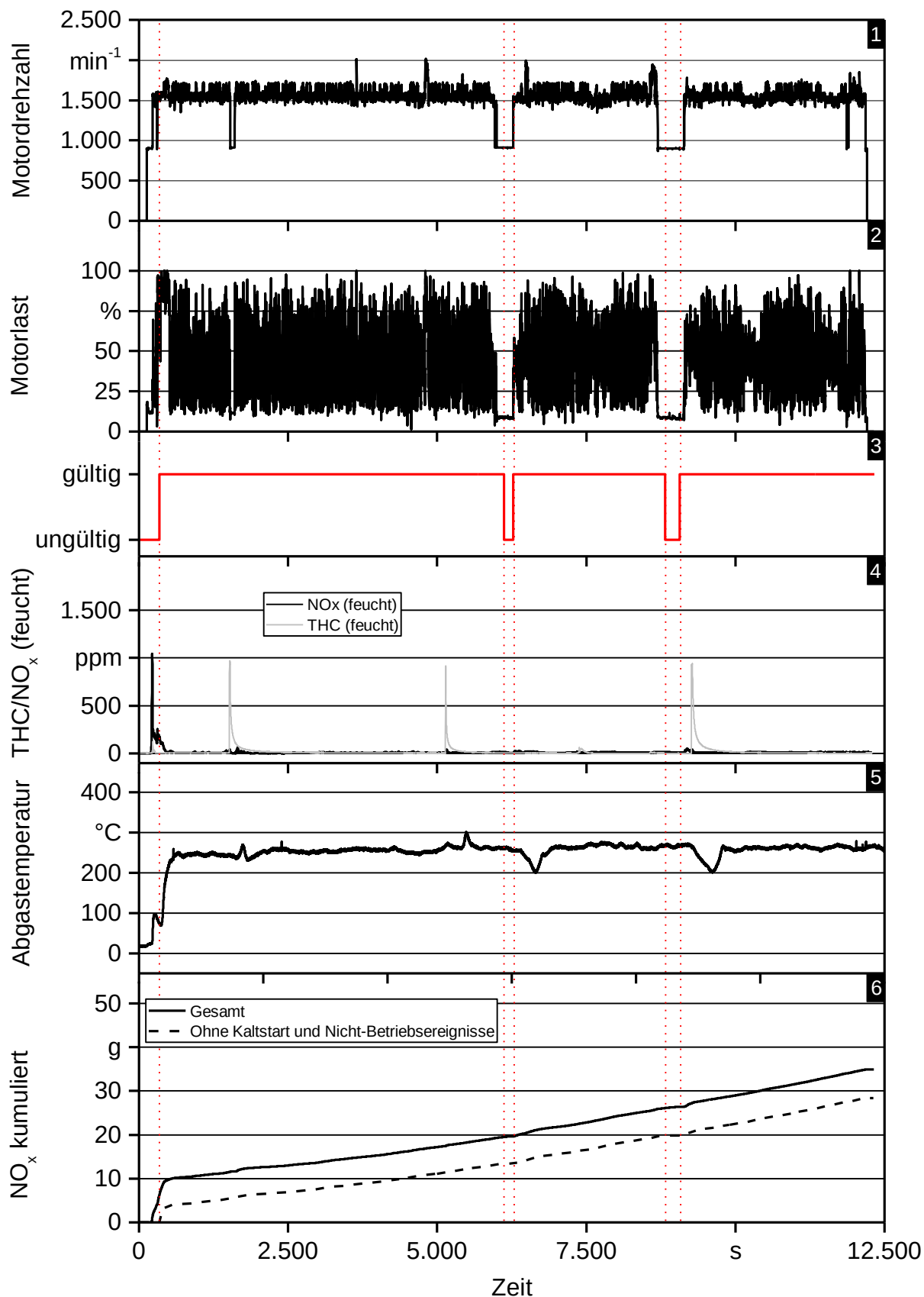


Abbildung 42: Motordrehzahl und -last, NO_x- und THC-Emissionen, Abgastemperatur und Gültigkeitsbereiche einer Messfahrt mit Kaltstart und Nicht-Betriebsereignissen

In Abbildung 43 ist die kumulierte Stickstoffoxidmasse über der kumulierten Arbeit der acht betrachteten Messungen mit beiden Kraftstoffen dargestellt. Es fällt auf, dass die am Nachmittag durchgeführten Messungen immer geringere Emissionen am Anfang des Tests aufweisen als die vormittags durchgeführten Messungen. Ein Grund dafür ist sicherlich, dass das Aggregat während der Mittagspause nicht auf ein Temperaturniveau abkühlt, wie beim ersten Start am Morgen und dadurch die Abgasnachbehandlung schneller die notwendige Betriebstemperatur erreicht. Des Weiteren weisen, mit einer Ausnahme, alle Kurven nach dem Kaltstart eine ähnliche Steigung auf und verlaufen weitgehend parallel. Da die kumulierte Arbeit der Messungen zum Teil erheblich variiert und dies auch einen deutlichen Einfluss auf das Ergebnis der Mittelungsfenster-Methode hat, werden im nächsten Schritt die Messungen auf eine Länge von 144 kWh, was der sechsfachen NRTC-Arbeit entspricht und im Bereich der Vorgaben der Verordnung EU 2017/655 liegt, gekürzt.

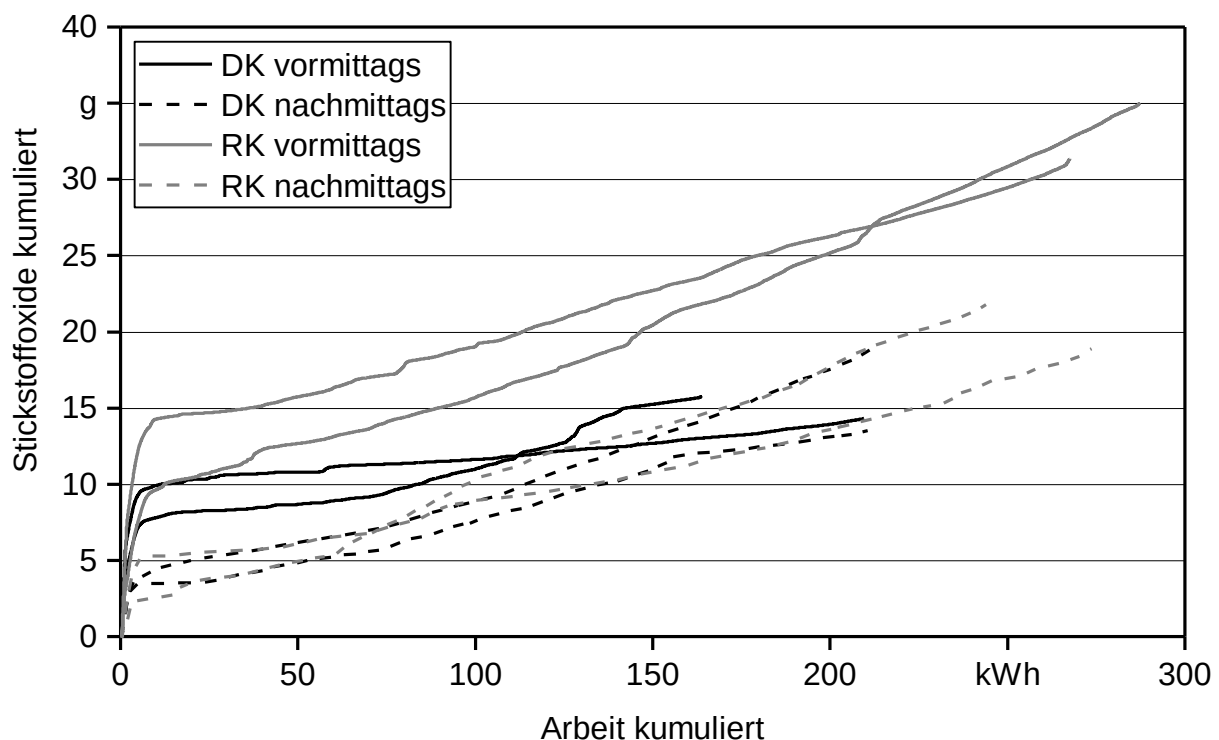


Abbildung 43: Kumulierte Stickstoffoxidmasse aufgetragen über der kumulierten Arbeit für Messungen mit Diesel- und Rapsölkraftstoff zu unterschiedlichen Tageszeiten

In Abbildung 44 ist die Verteilung der Stickstoffoxid-Konformitätsfaktoren aller acht Messungen im Diesel- bzw. Rapsölkraftstoffbetrieb als Boxplot dargestellt. Kaltstart und Nicht-Betriebsereignisse wurden vor der Fensterberechnung aus dem Datensatz ausgeschlossen. Des Weiteren sind nur Fenster bis zum Erreichen der sechsfachen NRTC-Arbeit (144 kWh) berücksichtigt. Unter diesen Rahmenbedingungen weisen alle verbleibenden Mittelungsfenster bei allen Tests und unabhängig vom Kraftstoff Konformitätsfak-

toren unter eins auf. Betrachtet man das 90. Perzentil, liegt dies bei allen Messungen sogar unter 0,5. Mit dem regenerativen wie auch mit dem fossilen Kraftstoff ist das Emissionsniveau sehr gering. Wenn der aufgewärmte Motor ohne längere Pause unter Last betrieben wird, treten über weite Strecken Emissionen im nur einstelligen ppm-Bereich auf und sind deshalb mit der vorhandenen Messtechnik kaum noch bestimmbar.

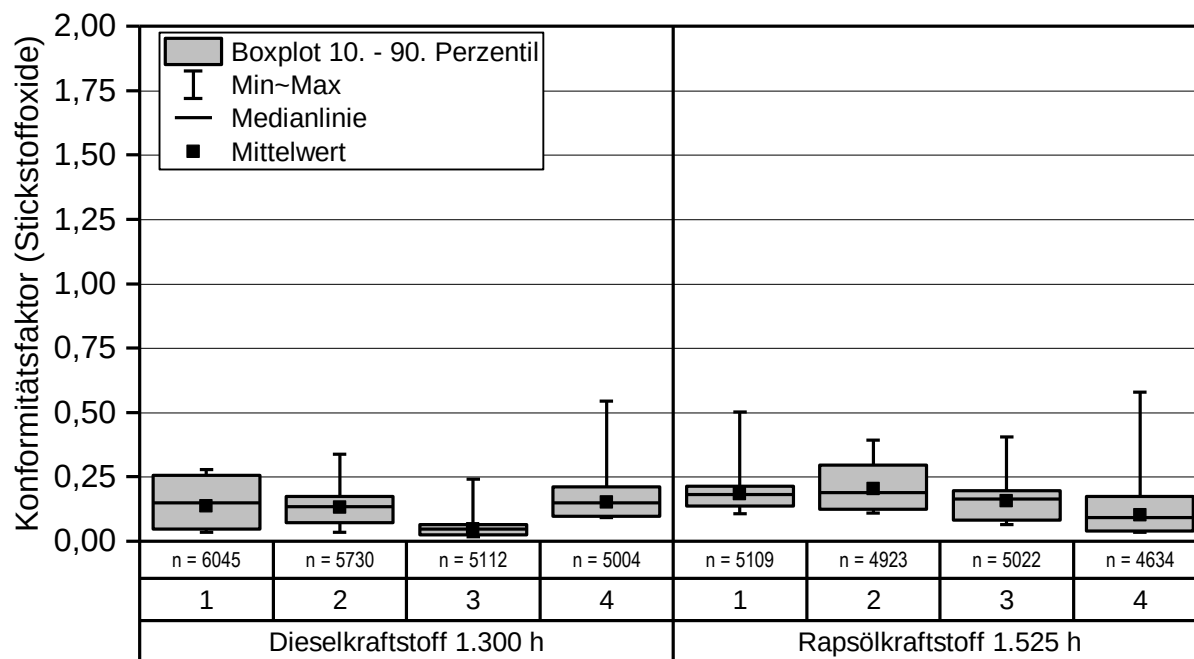


Abbildung 44: Boxplot-Darstellung der Verteilung der ermittelten Stickstoffoxid-Konformitätsfaktoren bei allen Fahrten gekürzt auf die sechsfache NRTC-Arbeit (144 kWh)

5.10 Realemissionen eines Audi A4 flexible fuel und Vergleich mit Ergebnissen vom Abgasprüfstand der FH Bern

Auf dem Rollenprüfstand der Abgasprüfstelle der FH Bern in Biel/Nidau in der Schweiz wurde zunächst ein Audi Avant A4 2.0 TFSI flexible fuel integriert und das TFZ-PEMS von Sensors Inc. sowie das PEMS der FH Bern vom Typ Horiba OBS-ONE angeschlossen (siehe Abbildung 45). Zusätzlich wurde auch die stationäre Emissionsanalytik des Abgasprüfstands eingebunden. Somit kann überprüft werden, inwieweit beide mobile Messsysteme von der zertifizierten stationären Messtechnik abweichen. Insgesamt wurden acht Einzelmessungen auf dem Rollenprüfstand durchgeführt. Es wurden sowohl die standardisierten Prüfzyklen WLTC (*Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Cycle*), NEDC (*New European Driving Cycle*) und CADC (*Common Artemis Driving Cycle*) als auch ein Stufentest, bei dem unterschiedliche stationäre Lastpunkte für eine Dauer von jeweils fünf Minuten angefahren wurden, durchgeführt. Die Auswertung der Daten dieser Vergleichsmessungen wurde in CZERWINSKI et al. (2017) [5] veröffentlicht. Insgesamt wurde eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den mit der stationären Messtechnik und den mit beiden portablen Emissionsmessgeräten unterschiedlicher Hersteller ermittelten Messwerten erreicht.



Abbildung 45: Audi Avant A4 2.0 TFSI flexible fuel auf dem Rollenprüfstand der Abgasprüfstelle der FH Bern mit angeschlossener Emissionsmesstechnik

Abbildung 46 zeigt den untersuchten Audi A4 mit dem installierten PEMS. Auf einem umfunktionierten Heckfahrradträger wurden das Abgasmassenstrommessgerät und das Probenahmesystem befestigt. Die Probenahmeleitungen wurden in das Fahrzeug geführt, wo sich die Analysatoren befinden. Untersucht wurden Partikelmasse-, Stickstoffoxid-, Kohlenstoffmonoxid- und Kohlenstoffdioxidemissionen des Fahrzeugs im Betrieb mit E5, E10 und E85. Auf den Einsatz des DualFID wurde in diesem Fall aus Sicherheitsgründen verzichtet, da zum Betrieb das Mitführen einer He/H₂-Gasflasche im Innenraum des Fahrzeugs notwendig ist und der Stromverbrauch des FID mit beheizter Leitung zusätzlich zu den anderen Gasanalysatoren und Partikelmasse-Messgeräten ausschließlich mit Batterien und unter Einhaltung der maximalen Zuladung des Fahrzeugs kaum darstellbar ist. Das Mitführen des Stromerzeugers am oder im Fahrzeug stellt hier ebenfalls keine Alternative dar.



Abbildung 46: Audi Avant A4 2.0 TFSI flexible fuel mit PEMS

Die Ergebnisse der Realfahrtmessungen wurden in FRANKL (2017) [22] ausführlich veröffentlicht. In Abbildung 47 sind die wichtigsten Ergebnisse zusammenfassend dargestellt. Hier wurden zusätzlich zu der gesetzlichen vorgeschriebenen Methodik auch Warmstartmessungen durchgeführt, d. h., der Motor war zu Beginn des RDE-Tests noch nahezu auf Betriebstemperatur durch eine vorhergehende Fahrt. Neben der gleitenden Mit-

telwertfenstermethode (MAW) wurde auch der einfache Mittelwert (MW), d. h. die Gesamtemissionsmasse geteilt durch die Gesamtfahrstrecke ohne Gewichtung in der Grafik dargestellt. Beim Betrieb des Fahrzeugs mit E85 (85 % v/v Ethanol) wird ein hohes Emissionseinsparpotenzial gegenüber dem Kraftstoff mit nur 5 % v/v Ethanol (Super E5) deutlich. Die Kohlenstoffmonoxidemissionen sind mit E85 im Mittel um über 40 % geringer, wenn der RDE-Test bereits mit betriebswarmem Motor beginnt. Ist der Motor am Beginn noch kalt, sind die Emissionen noch um über 30 % niedriger. Auch bei den Stickstoffoxidemissionen ist der Vorteil im E85-Betrieb höher, wenn der Test keinen echten Kaltstart beinhaltet. Hier ist eine Reduktion um über 30 % möglich. Mit Kaltstart sinkt der Vorteil um etwa die Hälfte. Es wird auch deutlich, dass die Art der Berechnungsmethode – *Moving Averaging Window* oder einfacher Mittelwert – einen klaren Einfluss auf das Emissionsergebnis haben kann. Die Kohlenstoffdioxidemissionen sind im Betrieb mit E85 um etwa 8 % geringer als beim Einsatz von E5. Betrachtet wurden hier ausschließlich die gemessenen Tailpipe-Emissionen und die Unterschiede sind vornehmlich auf die unterschiedlichen C/H-Verhältnisse der Energieträger zurückzuführen. Für eine ganzheitliche Betrachtung ist zusätzlich noch der Treibhausgasvorteil des Biokraftstoffs zu berücksichtigen.

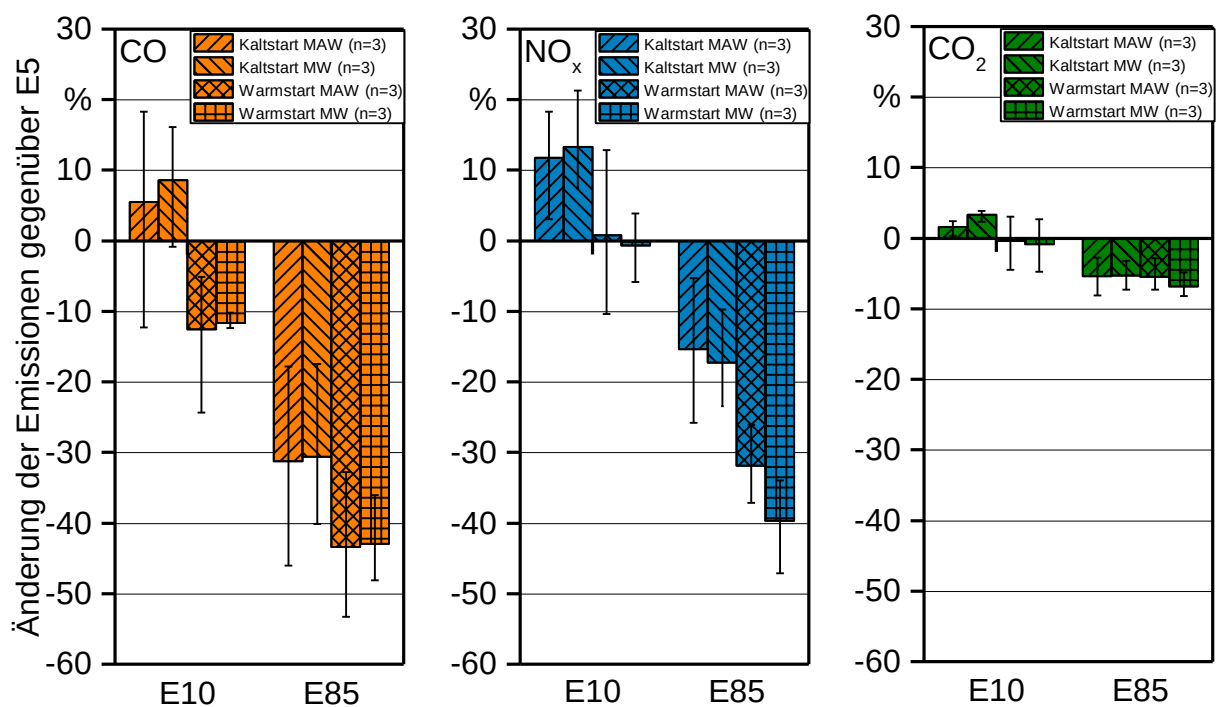


Abbildung 47: Änderung der Kohlenstoffmonoxid-, Stickstoffoxid- und Kohlenstoffdioxidemissionen beim Einsatz von E10 bzw. E85 gegenüber E5 bei den durchgeführten Realfahrtmessungen [22]

5.11 Realemissionen eines Audi A3 g-tron im Benzin- und CNG-Betrieb

Der Audi A3 g-tron kann bivalent sowohl mit Benzin als auch mit CNG (*Compressed Natural Gas*) betrieben werden und ist dafür mit den notwendigen Tanks und Kraftstoffsystemen für beide Betriebsarten ausgestattet. Da CNG fast ausschließlich aus Methan besteht, das das geringste C/H-Verhältnis aller Kohlenwasserstoffe aufweist, werden alleine basierend auf dieser chemischen Zusammensetzung bei gleichem Energieeinsatz etwa 25 % weniger CO₂ freigesetzt als bei der Verbrennung von Benzin oder Diesel. Wird Biomethan als Kraftstoff eingesetzt, kann der Treibhausgasausstoß weiter abgesenkt werden. Aus der Literatur ist jedoch auch bekannt, dass derartige Fahrzeuge einen Methanschlupf aufweisen können, der sich aufgrund des um das 25-Fache höheren Treibhausgaspotenzials von Methan wiederum deutlich negativ auf die Umweltbilanz des Fahrzeugs auswirken kann [1]. Deshalb wurden auch an diesem Fahrzeug die Realmissionen untersucht. In Abbildung 48 ist das Fahrzeug mit installierter Messtechnik dargestellt.



Abbildung 48: Audi A3 g-tron während der RDE-Fahrten mit installiertem PEMS

Installation der Messtechnik am Fahrzeug

Da sich bei diesem Fahrzeug die Gastanks für den CNG-Betrieb unter dem Kofferraum befinden, wurde das Auspuffendrohr vom Hersteller nicht komplett bis zum Heck geführt, sondern die Abgase werden schon vor der Hinterachse zur Fahrbahn hin nach unten abgeleitet. Deshalb stellt die Anbindung des Abgas-Flowmeters hier eine besondere

Herausforderung dar. Es musste eine flexible und isolierte Verlängerung des Abgasrohrs gebaut werden, die die Bewegung der Hinterachse ausgleichen kann, einen ausreichenden Hitzeschutz für die Gastanks bietet und trotzdem noch eine ausreichende Bodenfreiheit für den Straßeneinsatz gewährleistet. In Abbildung 49 ist die zusätzlich installierte Abgasleitung vom Auspuffendrohr bis zum Flow Tube dargestellt. Zur Befestigung der flexiblen Leitung wurde zunächst die komplette Auspuffanlage ausgebaut und am Ende ein V-Band-Flansch angeschweißt, sodass hier die flexible Rohrleitung mit einer Flanschschelle befestigt werden kann. Zudem wurde im Bereich der Stoßstange ein zusätzlicher Halter als zweiter Fixpunkt installiert. Das Flow Tube ist mit einem weiteren Halter und einer Gewindestange an der Abschlepphakenaufnahme befestigt. Alle Übergangsstellen der metallischen Rohre sind zusätzlich zur Abdichtung und als axiale Verschiebesicherung mit Silikonschläuchen und Schlauchschellen fixiert. Es wurde darauf geachtet, dass die metallischen Rohre ausreichend weit ineinander ragen, sodass der Abgasstrom nicht mit den Silikonschläuchen in Berührung kommen kann und eine Verfälschung der Messergebnisse durch den Kunststoff ausgeschlossen wird.



Abbildung 49: Installation der Abgasleitung bis zum Flow Tube am Audi A3 g-tron

Da bei diesem Fahrzeug besonders die Methanemissionen von großem Interesse sind, wurde bei den Messungen auch das DualFID eingesetzt (vgl. Abschnitt 4.1.4). Zum Betrieb dieses Analysators ist ein Brenngasgemisch aus 40 % Wasserstoff in Helium notwendig. Dieses Gas wird in der Regel in 200-bar-Druckgasflaschen bereitgestellt und der

Betriebsdruck mit einem Druckminderer auf den Eingangssollwert von 3,5 bar reduziert. Um Gewicht und Platz beim Aufbau zu sparen und nicht unnötig viel des brennbaren Gases im Innenraum des Autos mitführen zu müssen, kamen bei diesen Messungen nicht die üblichen 10-l-, sondern die kleineren 2-l-Flaschen zum Einsatz. Die Brenngasflasche mit Druckminderer wurde zusätzlich zum Schutz in einem Aluminiumkoffer befestigt und dieser wiederum fest im Innenraum des Fahrzeugs montiert. In Abbildung 50 ist der Aufbau der Messtechnik am Heck bzw. im Kofferraum des Fahrzeugs dargestellt. Im Kofferraum links ist die Aluminiumbox mit der Brenngasflasche ersichtlich, rechts die Gasanalysatoren und davor ein Adsorbergehäuse mit Silicagel zur Vortrocknung von Umgebungsluft für den Sample-Trockner. Am Heck befinden sich Flow Tube und Wetersonde, montiert an der Abschlepphakenhalterung. Im Bild nicht sichtbar ist der GPS-Empfänger, welcher mit einer Magnethalterung auf dem Dach befestigt wurde. Die notwendigen Verbindungsleitungen zwischen Flow Tube und Analysatoren wurden durch die Heckklappe geführt. Diese wurde während der Messungen möglichst weit geschlossen und mit einem Kettenglied und einem Karabinerhaken im Schloss gesichert.



Abbildung 50: Installiertes PEMS am Heck und im Kofferraum des Audi A3 g-tron

Aufgrund des hohen Stromverbrauchs des DualFID mit der dazugehörigen beheizten Leitung wurden für diesen Aufbau zwei Batterien in Reihe geschaltet und mit zwei 24/12-V-DC/DC-Wandlern, wie in Abschnitt 4.3.5 beschrieben, eine konstante Versorgungsspannung bereitgestellt. Nur dadurch ist ein stabiler mehrstündiger reiner Batteriebetrieb des Gesamtsystems möglich.

Untersuchungen auf dem Rollenprüfstand der FH Bern

Für die Auswertung der Ergebnisse der RDE-Messungen mit dem PEMS sind nach der aktuellen Gesetzgebung (EU-Verordnung 2017/1154 [17]) auch immer Messungen auf einem Rollenprüfstand notwendig, um die Normalität der Realfahrt mit dem WLTP-Zyklus abzugleichen. Dazu werden die mittleren CO₂-Emissionen der Prüfphasen *Low*, *High* und *Extra High* bestimmt, mit einem definierten Faktor multipliziert, über der mittleren Geschwindigkeit aufgetragen und die charakteristische Kurve aufgespannt. Nach der Realfahrt wird überprüft, ob eine ausreichende Anzahl an Mittelungsfenstern Werte aufweist, die innerhalb der Toleranzbänder der charakteristischen Kurve liegen und die Fahrt gültig ist. Des Weiteren wird die gesamte CO₂-Masse, die während des WLTP-Zyklus emittiert wird, erfasst, da die Länge der Mittelungsfenster bei der RDE-konformen Auswertung auf die Hälfte dieser Masse festgelegt ist. Zur Ermittlung der benötigten Werte wurden stationäre Emissionsmessungen auf dem Rollenprüfstand der FH Bern an der Abgasprüfstelle in Nidau durchgeführt. Für beide Kraftstoffe bzw. Betriebsarten des Fahrzeugs, Benzin und CNG, wurden jeweils zwei WLTC-Prüfungen durchgeführt und die Mittelwerte der Ergebnisse berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 15 zusammengefasst. Aus diesen Daten ist bereits ersichtlich, dass im CNG-Betrieb unter vergleichbaren Bedingungen um ca. 23 % geringere CO₂-Tailpipe-Emissionen auftreten.

Tabelle 15: Eingangswerte für die RDE-Datenauswertung ermittelt auf dem Rollenprüfstand der FH Bern

	Benzin	CNG
CO ₂ -Referenzmasse in kg	1,744	1,345
WLTC-Referenzwert „Low Speed“ in g/km	201,3	168,6
WLTC-Referenzwert „High Speed“ in g/km	128,8	99,9
WLTC-Referenzwert „Extra High Speed“ in g/km	145,9	109,8

Ergebnisse der RDE-Messfahrten

Es wurden im Benzin- (E10) bzw. CNG-Betrieb jeweils drei Messungen auf der Teststrecke für Pkw (Version 2018) durchgeführt und die Kohlenstoffdioxid-, Kohlenstoffmonoxid-, Stickstoffdioxid-, Methan- und Kohlenwasserstoffemissionen untersucht. Bei allen Fahrten wurden die Bedingungen hinsichtlich Streckenzusammensetzung und Fahrdynamik nach Verordnung EU 2017/1154 eingehalten. Nur bei der Messung E10 #1 wurde im Autobahnbetrieb eine geringfügig zu hohe Fahrdynamik festgestellt. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte mit der vom *Joint Research Centre* bereitgestellten Software

EMROAD in der Version 5.96 B3. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Messungen dargestellt.

Kohlenstoffdioxid

Im Benzinbetrieb wurden durchschnittliche CO₂-Emissionen in Höhe von 173 g/km gemessen, im CNG-Betrieb nur 128 g/km. Bei den hier ausgewerteten Realfahrten war die Kohlenstoffdioxideinsparung (Tailpipe) beim Einsatz von Methan als Kraftstoff mit über 35 % höher als erwartet und am Rollenprüfstand ermittelt. In Abbildung 51 ist die kumulierte Kohlenstoffdioxidmasse über der Fahrstrecke dargestellt. Des Weiteren wurden auch das Höhenprofil der Fahrstrecke und eine grobe Einteilung in Stadt-, Überland- und Autobahnabschnitt eingezeichnet. Es sind deutliche Anstiege in der Steigung der Kurven bei ansteigenden Streckenabschnitten und Beschleunigungsvorgängen auf der Autobahn zu erkennen, die jedoch im CNG-Betrieb weniger stark ausgeprägt sind. Wie beim WLTC-Test auf dem Rollenprüfstand steigt die CO₂-Einsparung durch den Einsatz von Methan als Kraftstoff bei Abschnitten mit höherer Durchschnittsgeschwindigkeit an.

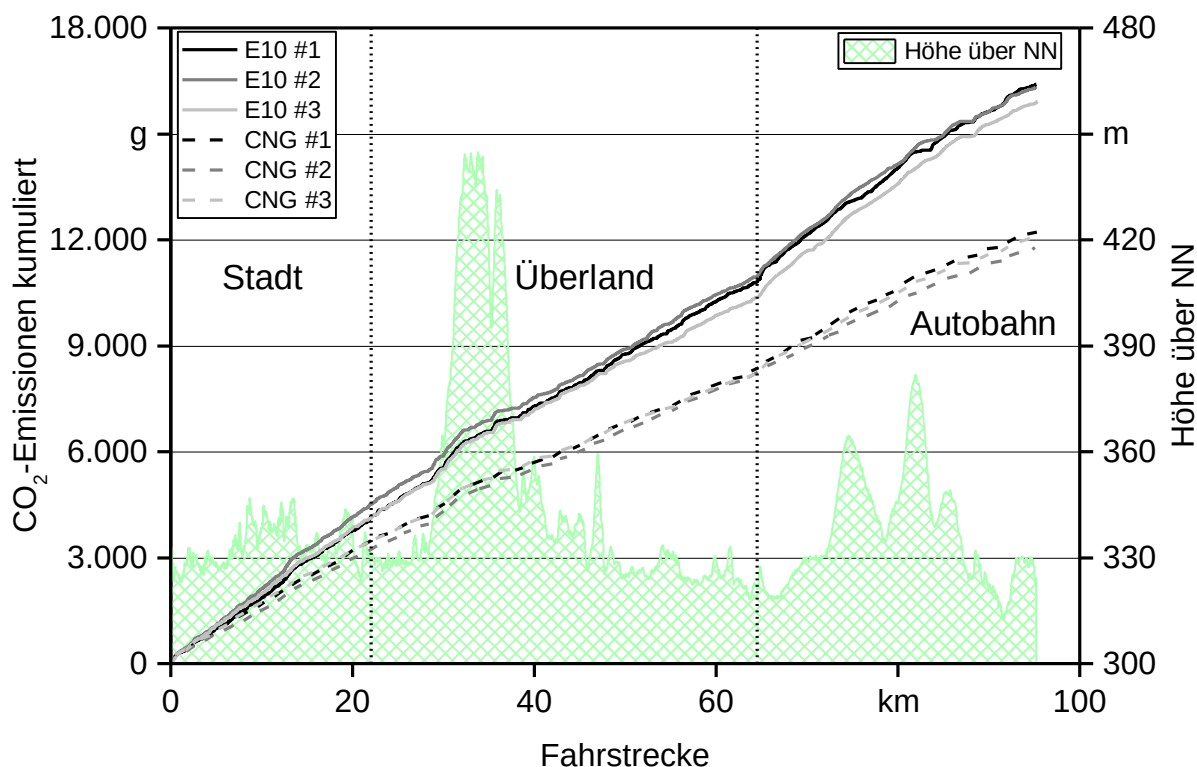


Abbildung 51: Kumulierte CO₂-Emissionen über der Fahrstrecke, Höhenprofil und Einteilung in Stadt-, Überland- und Autobahnabschnitte

Kohlenstoffmonoxid

In Abbildung 52 sind die kumulierten CO-Emissionen über der Fahrstrecke dargestellt. Auch hier sind deutliche Unterschiede im Betrieb mit den beiden Kraftstoffen erkennbar. Im Benzinbetrieb entsteht beispielsweise beim Kaltstart eine Emissionsspitze, die beim Gasbetrieb nicht auftritt und v. a. im Autobahnabschnitt treten im Mittel höhere Kohlenstoffmonoxidemissionen beim Einsatz von E10 auf. Hier sticht vor allem die Fahrt E10 #1

heraus, bei der auch die höchste Fahrdynamik, knapp über den zulässigen Werten, ermittelt wurde. Bei der Bergfahrt von Streckenkilometer 29 bis 32 ist bei allen Fahrten ein sprunghafter Anstieg in den CO-Emissionen erkennbar. Bei Auswertung und Gewichtung der Daten nach den Vorgaben der aktuellen Gesetzgebung und unter Verwendung der EMROAD-Software werden im Benzinbetrieb im Mittel der drei Fahrten 182 mg/km und im CNG-Betrieb 91 mg/km Kohlenstoffmonoxid emittiert. Es wird also von dem getesteten Fahrzeug im Realbetrieb und unabhängig vom Kraftstoff der Grenzwert der aktuellen Abgasnorm Euro 6d-TEMP von 1.000 mg/km eingehalten.

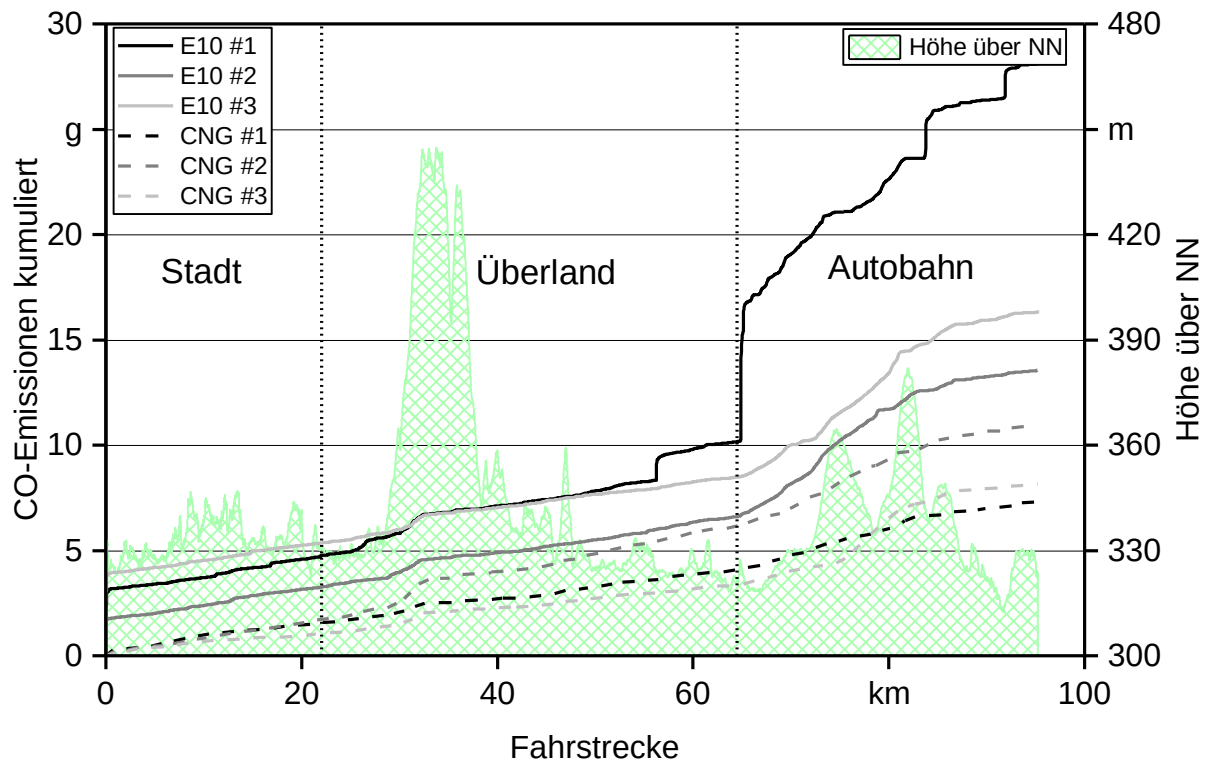


Abbildung 52: Kumulierte CO-Emissionen über der Fahrstrecke, Höhenprofil und Einteilung in Stadt-, Überland- und Autobahnabschnitte

Stickstoffoxide

In Abbildung 53 sind die kumulierten NO_x-Emissionen über der Fahrstrecke dargestellt. Dabei fällt vor allem auf, dass im CNG-Betrieb deutlich höhere Emissionen beim Kaltstart und im folgenden Stadtbetrieb auftreten. Bei Auswertung und Gewichtung der Daten nach den Vorgaben der aktuellen Gesetzgebung und unter Verwendung der EMROAD-Software werden im Benzinbetrieb im Mittel der drei Fahrten 5,5 mg/km und im CNG-Betrieb 8,7 mg/km Stickstoffoxide emittiert. Es wird also von dem getesteten Fahrzeug im Realbetrieb und unabhängig vom Kraftstoff der Grenzwert von 60 mg/km (bzw. 126 mg/km mit Konformitätsfaktor 2,1) der aktuellen Abgasnorm Euro 6d-TEMP eingehalten.

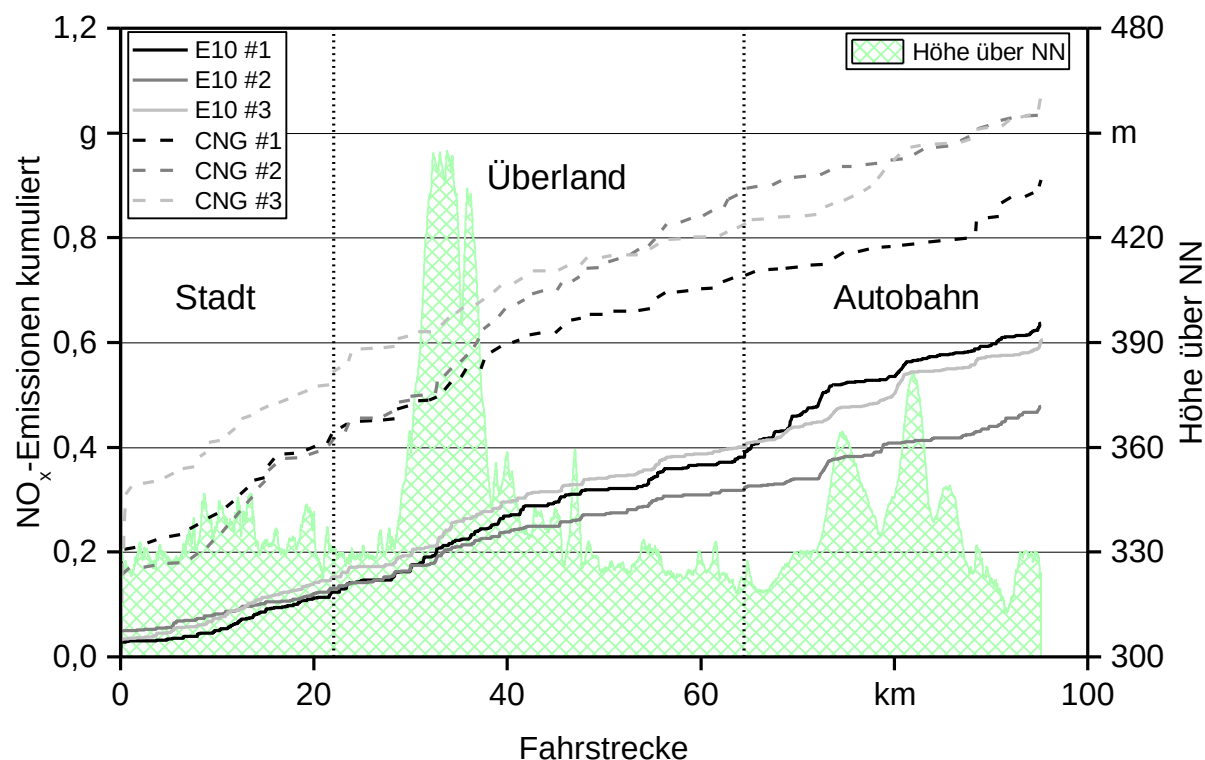


Abbildung 53: Kumulierte NO_x -Emissionen über der Fahrstrecke, Höhenprofil und Einteilung in Stadt-, Überland- und Autobahnabschnitte

Kohlenwasserstoffe und Methan

Bei den RDE-Messungen am Audi A3 g-tron wurden mit einem DualFID sowohl die Gesamtkohlenwasserstoff- als auch die Methanemissionen erfasst. Die Gesamtkohlenwasserstoffe (THC) enthalten dabei auch das zusätzlich separat erfasste Methan (CH_4). Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe (NMHC) können als Differenz aus THC und CH_4 berechnet werden. Die Daten wurden wiederum mit EMROAD ausgewertet. In Abbildung 54 sind die Ergebnisse zusammengefasst dargestellt.

Im CNG-Betrieb bestehen die Kohlenwasserstoffemissionen zum überwiegenden Teil aus Methan. Die höchsten Werte treten dabei beim Kaltstart und im Autobahnanteil auf. Besonders im Autobahnanteil sind jedoch auch hohe Abweichungen zwischen den einzelnen Messfahrten erkennbar.

Im E10-Betrieb bestehen Kohlenwasserstoffemissionen vorwiegend aus Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffen, die auch fast ausschließlich während des Kaltstarts und der Autobahnfahrt auftreten.

Der Grenzwert für Kohlenwasserstoffe liegt bei 100 mg/km (Euro 5 und 6). Wird also die gesamte Fahrt betrachtet, wird der Grenzwert unabhängig vom verwendeten Kraftstoff bei allen Fahrten eingehalten. Auch die klimaschädliche Wirkung durch das im CNG-Betrieb emittierte Methan ist nahezu vernachlässigbar. Die im Mittel emittierten 25 mg/km Methan, verrechnet mit dem Treibhauspotenzial von 25, ergeben ein CO_2 -

Äquivalent von nur ca. 0,6 g/km bzw. einen Anteil von nur 0,5 % an den gesamten Treibhausgasemissionen.

Ursächlich für die trotzdem zu minimierenden Methanemissionen bei derartigen Fahrzeugen kann u. a. die bei modernen turboaufgeladenen, direkteinspritzenden Ottomotoren häufig angewendete Ventilüberschneidung (*Scavenging*) sein, die dazu dient, den Massenstrom am Turbolader und damit das Motordrehmoment bei geringer Motordrehzahl zu erhöhen. Dadurch kann das in das Saugrohr eingeblasene Methan direkt in das Abgassystem gelangen. Hinzu kommen eine längere Aufwärmdauer und eine schlechtere Konvertierungsrate des Katalysators im Methanbetrieb, da konventionelle Abgasnachbehandlungssysteme nur begrenzt geeignet sind, das stabile Methan-Molekül zu oxidieren [1] [32].

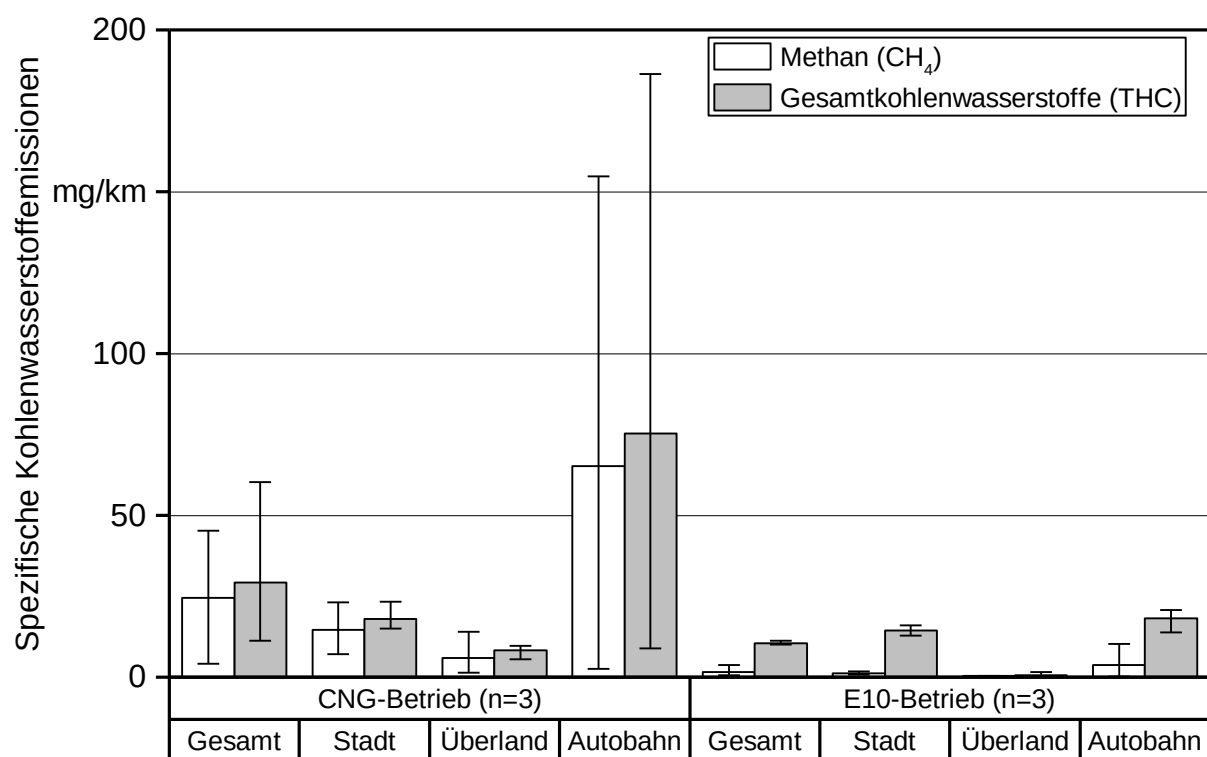


Abbildung 54: Methan- und Gesamtkohlenwasserstoffemissionen des Audi A3 g-tron auf der gesamten Teststrecke und aufgeteilt in Stadt-, Überland- und Autobahnanteil

Partikel

Bei den RDE-Messungen am Audi A3 g-tron wurde auf die Bestimmung der Partikelemissionen verzichtet. Die am TFZ vorhandene Messtechnik zur Ermittlung der Partikelmasse konnte aus Platz- und Gewichtsgründen in diesem Fahrzeug nicht eingesetzt werden. Des Weiteren sind hinsichtlich der Partikelmassemissionen von derart modernen Fahrzeugen nach dieser Methodik erfahrungsgemäß kaum verwertbare Ergebnisse zu erwarten. Ein moderner mobiler Partikelzähler wäre auch unter Berücksichtigung der gesetzlichen Vorgaben für diese Messaufgabe das Mittel der Wahl, stand jedoch für die

Messungen nicht zur Verfügung. Nichtsdestotrotz wurde zumindest ein qualitativer Unterschied in den Partikelemissionen im Benzin- im Vergleich zum CNG-Betrieb festgestellt (siehe Abbildung 55). Links ist hier ein Abgasprobenfilter mit deutlichen dunklen Ablagerungen nach nur einer Messfahrt mit E10 zu erkennen. Auf dem rechten Filter ist nach der gleichen Einsatzzeit im CNG-Betrieb noch keine Ablagerung zu erkennen.

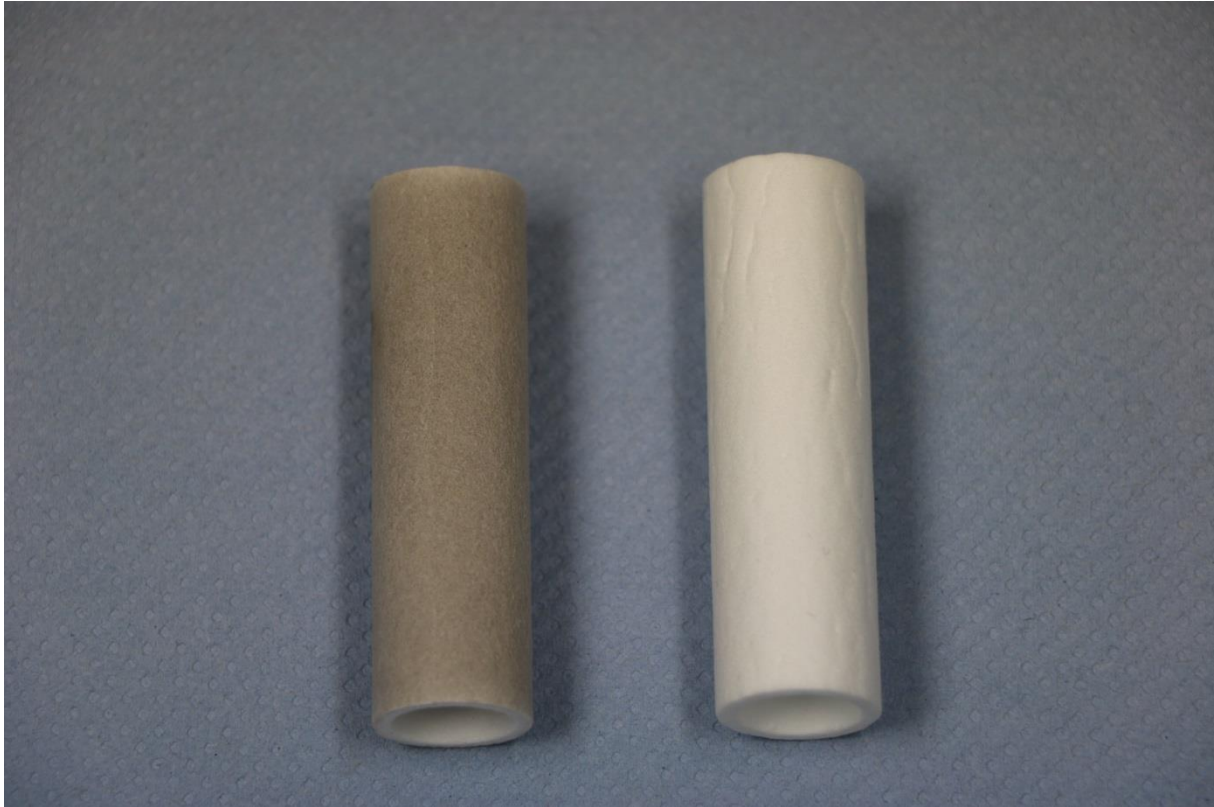


Abbildung 55: Abgasprobenfilter nach je einer Messfahrt im E10-Betrieb (links) und CNG-Betrieb (rechts)

Zusammenfassung

Das reale Emissionsverhalten (*Real Driving Emissions* – RDE) von Maschinen gewinnt bei der zukünftigen Gesetzgebung zunehmend an Bedeutung. Im Bereich der mobilen Arbeitsmaschinen des Non-Road-Sektors, z. B. Traktoren, wurden bisher nur sehr wenige Emissionsmessungen unter realen Bedingungen durchgeführt und für die Nutzung von Biokraftstoffen liegen kaum Erkenntnisse vor. Außerdem war eine einheitliche Methodik zur Durchführung von Realemissionsmessungen zu Beginn des Projekts vom Gesetzgeber noch nicht definiert und der Einfluss von Methode und Umgebungsbedingungen auf das Messergebnis sowie die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse waren weitgehend unbekannt.

Ziel des Projekts ist es daher, ein portables Emissionsmesssystem (PEMS) für gasförmige Emissionskomponenten und Partikelmasse zum schwerpunktmäßigen Einsatz an nicht für den Straßenverkehr bestimmten mobilen Maschinen und Geräten (*Non-Road Mobile Machinery* – NRMM) in Betrieb zu nehmen sowie eine Auswertemethode der Messdaten zu erarbeiten und zu evaluieren, die auch für den Einsatz von Biokraftstoffen geeignet ist. Des Weiteren sollen RDE-Messungen an unterschiedlichen Maschinen bei variierenden Betriebsbedingungen und mit unterschiedlichen Kraftstoffen durchgeführt und verglichen werden.

Zur Anwendung kam das portable Emissionsmesssystem (PEMS) vom Typ Semtech Ecostar Plus der Firma Sensors, Inc., das aus folgenden wesentlichen Komponenten besteht:

- *Fuel Economy Meter* (Bestimmung von Abgasmassenstrom, Kohlenstoffmonoxid und Kohlenstoffdioxid),
- *NO/NO₂ Gas Analyser* (Bestimmung von Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid),
- *DualFID* (Bestimmung von Methan und Gesamtkohlenwasserstoffen),
- *Micro Proportional Sampling System* (Verdünnung des Abgasteilstroms),
- *Particulate Filter System* (diskontinuierliche Bestimmung der Partikelmasse im verdünnten Abgas),
- *Continuous Particulate Monitor* (Bestimmung der Partikelanzahl bzw. -masse mittels eines Elektrometers),
- *Power Distribution and Control Module* (Stromversorgung und Steuerung der einzelnen Module und Datenerfassung).

Anfängliche Probleme mit den Analysatoren und der Datenkommunikation konnten durch System- und Softwareupdates weitgehend abgestellt werden. Der DualFID, der insbesondere für die Messungen mit Methan von Bedeutung ist, wurde nachträglich in das System integriert und die Datenkommunikation zwischen dem PEMS-System und dem mobilen Kraftstoffverbrauchsmesssystem dQRoad konnte mit einer auf LabVIEW basierenden Schnittstelle realisiert werden, sodass alle Messdaten parallel aufgezeichnet werden können. Für das PEMS wurde ein geeignetes Schutzgehäuse für den Feldeinsatz entwickelt, das sich bei zahlreichen Messungen im Praxiseinsatz sehr gut bewährt hat.

Zu Beginn des Projekts gab es keine gesetzliche Grundlage für die Bestimmung von Realemissionen von NRMM. Deshalb wurden erste Messungen in Anlehnung an das *NRMM PEMS Pilot Programme* der EU bzw. der Methodik für schwere Nutzfahrzeuge mit der Auswertungsmethode *Moving Averaging Window* durchgeführt. Erst im April 2017 wurde mit Veröffentlichung der Verordnung EU 2017/655 eine Vorgehensweise für die Überwachung der Emissionen von Verbrennungsmotoren in NRMM definiert. Diese Methode ist auch für den Einsatz von Biokraftstoffen anwendbar und zur Datenauswertung wird die Moving-Averaging-Window-Methode herangezogen. Ab der Veröffentlichung wurden alle Messungen wenn möglich auch nach den Vorgaben dieser Verordnung durchgeführt. Da sich im Gegensatz zum Pilot-Programm die vorgeschlagene Messdauer verlängert hat, konnten nicht alle Messungen nach der nun gültigen Berechnungsmethode nachträglich ausgewertet werden.

Die Emissionsgrenzwerte für NRMM werden in g/kWh angegeben. Die Bezugsgröße für die mit dem PEMS ermittelten Schadstoffmassen ist also die verrichtete Arbeit des Motors und diese muss somit auch während der Realfahrt-Messungen bestimmt werden. Eine praktikable Lösung dafür ist die Aufzeichnung des Lastsignals der Motorsteuerung. Mithilfe dieses Signals und einer Volllastkurve für den jeweiligen Motor im Betrieb mit dem zu untersuchenden Kraftstoff kann die verrichtete Arbeit berechnet werden. In der Praxis erweist sich dies allerdings als problematisch, da für die untersuchten prototypischen Maschinen zum Teil keine Motor-Volllastkurven im Betrieb mit den untersuchten alternativen Kraftstoffen vorliegen. Zusätzlich wurde bei Vergleichsmessungen am Traktorenprüfstand festgestellt, dass die vom Lastsignal abgeleitete Arbeit von der tatsächlichen Arbeit erheblich abweichen kann. Eine zuverlässige und genaue Berechnung der tatsächlichen Leistung des Motors während der Realfahrt ist deshalb nur bedingt möglich und es ist hier die größte Ungenauigkeit bei der Berechnung der leistungsbezogenen Schadstoffmasse zu erwarten. Seitens der Motorenhersteller sollte sichergestellt werden, dass das Lastsignal zukünftig für alle zugelassenen Kraftstoffe in der notwendigen Qualität vorliegt. Bei den relevanten Schadstoffkonzentrationen und dem Abgasmassenstrom zeigten sich hingegen sehr gute Übereinstimmungen zwischen stationärer und portabler Messtechnik.

An einem Fendt-Traktor, der mit einem Zwei-Tank-System auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff nach DIN 51605 umgerüstet wurde, wurden Realfahrtemissionen bei unterschiedlichen Feldarbeiten gemessen und ausgewertet. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Emissionsgrenzwerte bei den untersuchten Arbeitsvorgängen (Pflügen, Grubbern, Eggen) mit überwiegend mittlerer bis hoher und stationärer Motorlast auch im Betrieb mit Rapsölkraftstoff nach DIN 51605 eingehalten werden können.

Neben den Messungen im Feldeinsatz wurden auch Straßenfahrten mit dem PEMS an unterschiedlichen Traktoren durchgeführt, da sich bei den Feldmessungen herausstellte, dass vor allem im transienten Niedriglastbereich deutliche Unterschiede im Emissionsverhalten mit unterschiedlichen Kraftstoffen auftreten können. Des Weiteren bieten Straßenfahrten im Gegensatz zu Feldarbeiten den Vorteil, dass Messungen jederzeit wiederholt werden können und nur bei weitgehend konstanten Umgebungs- und Betriebsbedingungen Vergleiche zwischen dem Einsatz unterschiedlicher Kraftstoffe gezogen

werden können. Weitgehende Unabhängigkeit von den Witterungsverhältnissen und dem saisonalen Feldarbeitsaufwand sind weitere Vorteile. Hinzu kommt die Möglichkeit, die gemessenen Emissionen auch auf die Fahrstrecke beziehen zu können, wie dies in der Gesetzgebung für Pkw angewendet wird, um so unabhängig vom ECU-Motorlastsignal Ergebnisse bewerten zu können.

Bei derartigen Straßenfahrten mit dem bereits bei Feldarbeiten untersuchten Fendt-Pflanzenöltraktor wurden hinsichtlich der Kohlenstoffmonoxid-, Kohlenwasserstoff- und Partikelmasseemissionen keine signifikanten Unterschiede im Betrieb mit Diesel- oder Rapsölkraftstoff nach DIN 51605 festgestellt. Die Stickstoffoxidemissionen sind jedoch im Rapsölkraftstoffbetrieb bezogen auf die Fahrstrecke höher als im Dieselpetrieb. Bei diesen Straßentests wurden auch Fahrten mit einer zehnminütigen Leerlaufphase nach etwa der halben Wegstrecke durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass sich dadurch die mittleren Stickstoffoxidemissionen verdoppeln können. Der Anteil der Mittelungsfenster mit einem Konformitätsfaktor unter 1,5 sinkt unabhängig vom Kraftstoff um über 20 Prozentpunkte. Dabei ist zu beachten, dass diese Messungen nicht nach Verordnung EU 2017/655 durchgeführt und keine sogenannten Non-Working-Events ausgeschlossen wurden.

Bei einem Valtra-Dual-Fuel-Diesel/Methan-Traktor wurden RDE-Messungen auf derselben Straßenroute wie mit dem Fendt-Traktor durchgeführt. Die Tests wurden im reinen Dieselpetrieb und im Dual-Fuel-Betrieb mit Diesel und Methan wiederholt. Dabei wurde der Dieselpverbrauch mit dem mobilen Kraftstoffverbrauchsmesssystem dQRoad erfasst und der Gasverbrauch über eine Kohlenstoffbilanz berechnet. Dafür musste zunächst eine Vorgehensweise entwickelt werden, um die Genauigkeit bei der Bestimmung des Gasverbrauchs zu verbessern. Bei den Messungen zeigte sich, dass die Kohlenstoffdioxid- und Stickstoffoxidemissionen im Dual-Fuel-Betrieb etwas geringer sind als im reinen Dieselpetrieb, die Kohlenstoffmonoxidemissionen sowie der Kraftstoffverbrauch jedoch etwas höher ausfallen. Ein großer Nachteil ist, dass im Dual-Fuel-Betrieb bei diesem Versuchsträger sehr hohe Kohlenwasserstoffemissionen auftreten, die zum größten Teil aus unverbranntem Methan bestehen. Der Methanschluß beträgt trotz Oxidationskatalysator mehr als 16 % bei diesem aus dieser Hinsicht auch ungünstigen Lastprofil mit einem großen Anteil an hoher Drehzahl bei geringer Last. Hier besteht bei diesem Traktor-Prototyp noch Optimierungspotenzial.

Weitere Messungen wurden an einem John-Deere-Pflanzenöltraktor der Abgasstufe IV durchgeführt. Messungen und Datenauswertung erfolgten nach Verordnung EU 2017/655. Es wurde festgestellt, dass von dem auf den Pflanzenölpetrieb angepassten Motor unter dem vorliegenden anspruchsvollen Lastprofil die Grenzwerte aller limitierten gasförmigen Schadstoffe eingehalten werden können.

An einem John-Deere-1470G-Harvester wurden weitere Realemissionsmessungen nach Verordnung EU 2017/655 durchgeführt. Da diese Maschine täglich unter ähnlichen Betriebsbedingungen und unabhängig von Jahreszeit und Witterung im Einsatz ist, liegen prinzipiell täglich ausreichend lange und für eine konforme Realemissionsmessung geeignete Betriebsintervalle des Motors vor. Die Rahmenbedingungen stellen angesichts

des permanenten Einsatzes der Maschine im Wald jedoch eine besondere Herausforderung bei der Planung und Durchführung der Tests dar. Es wurde je eine Messreihe im Diesel- (vor der Umrüstung der Maschine) und im Rapsölkraftstoffbetrieb (nach der Umrüstung der Maschine) durchgeführt. Mit beiden Kraftstoffen liegen die Konformitätsfaktoren der limitierten gasförmigen Emissionskomponenten unter 1, was auf ein ordnungsgemäßes Emissionsverhalten hinweist.

Neben den Messungen an Fahrzeugen der Non-Road-Kategorie wurden auch zwei Pkw untersucht. Dazu wurde eine der aktuellen Gesetzgebung entsprechende Fahrroute ausgearbeitet und Messungen auf einem Rollenprüfstand durchgeführt, um die Normalität der Realfahrten überprüfen zu können. Bei einem Audi-flexible-fuel-Fahrzeug für Ottokraftstoff und Ethanol E85 in beliebigen Anteilen zeigte sich, dass durch einen hohen Ethanolanteil im Kraftstoff die Kohlenstoffmonoxid- und Stickstoffoxidemissionen deutlich gesenkt werden können. Bei einem bivalenten Audi-CNG-Fahrzeug wurden im Gasbetrieb geringere CO- und CO₂-Emissionen im Vergleich zum Benzinbetrieb festgestellt. Die Stickstoffoxid- und Kohlenwasserstoffemissionen sind jedoch höher, liegen aber unterhalb der für das Fahrzeug geltenden Grenzwerte.

Bei allen Vergleichsmessungen sollte beachtet werden, dass der Einfluss der zufälligen Bedingungen während einer Realfahrtmessung in vielen Fällen größer ist als der Einfluss des Kraftstoffs. Bei modernen Verbrennungsmotoren wird das Emissionsniveau zu einem großen Anteil durch die Effizienz des Abgasnachbehandlungssystems bestimmt. Deshalb wirken sich Betriebsbedingungen, wie z. B. längere Phasen mit geringer Last, bei der die Temperatur der Katalysatoren unter deren Betriebsbereich sinkt, stark negativ auf die Gesamtemissionen aus. In den nun gültigen Verordnungen für die Überprüfung der Realemissionen werden derartige Bedingungen weitgehend aus der Gesamtbetrachtung ausgeschlossen oder weniger stark gewichtet. Auch wenn das Non-Working-Ereignis selbst ausgeschnitten, d. h. nicht ausgewertet wird, ist die „Nachwirkung“ des abgekühlten Abgasnachbehandlungssystems über die erhöhten Emissionen deutlich in den Messergebnissen erkennbar. Daher erscheint ein Vergleich einzelner Fahrten, Fahrzeuge oder Kraftstoffe bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen nicht legitim.

Während der Messungen kann eine große Bandbreite an Messwerten der einzelnen Schadstoffkanäle festgestellt werden. Häufig treten bei modernen Fahrzeugen über weite Strecken sehr geringe Konzentrationen nahe der Bestimmungsgrenze, aber auch einzelne Spitzen auf, die den gesamten Messbereich der Analysatoren erfordern. Bei aktuellen portablen Emissionsmesssystemen gibt es bei den meisten Analysatoren nur einen Messbereich, der im unteren Bereich nicht mehr die notwendige Messgenauigkeit aufweist. Für zukünftige Messgerätegenerationen wäre es wünschenswert, einen zusätzlichen niedrigen Messbereich und eine automatische Messbereichsauswahl zu entwickeln und einzuführen, da eine genaue Quantifizierung der Emissionen von Motoren der neuesten Abgasstufe mit der aktuellen Messtechnik und deren Drift- und Rauschverhalten nur bedingt möglich ist.

Abstract

The Real Driving Emissions (RDE) of vehicles and machinery is becoming increasingly important in current and future legislation. In the field of non-road mobile machinery (NRMM), e.g. tractors, very few emission measurements have so far been carried out under real-world conditions, and there is hardly any knowledge available, especially with regard to the use of biofuels. In addition, a standardized methodology for performing real driving emission measurements on NRMM was not yet defined by the legislator at the beginning of the project, and the influence of the method and variable environmental conditions on the measurement result and the reproducibility of the results were largely unknown.

As part of the project, a portable emission measurement system (PEMS) for gaseous emission components and particulate matter was put into operation and for the use on non-road mobile machinery a protective housing was developed. Furthermore, evaluation methods of the measurement data were investigated and adjusted for the use of biofuels. In addition, RDE measurements were carried out and compared on different machines under varying operating conditions and with different fuels.

It was proven that modern tractors and a forestry harvester operating on rapeseed oil fuel in accordance with DIN 51605 can comply with the emission limit values applicable to test bench tests even in real operation in the field, and in some cases fall well below them. Over long distances, very low pollutant concentrations close to the determination limit of the measurement system were determined. However, emission peaks can occur during a cold start or after longer idling phases, which can have a major influence on the result of the test.

In addition to the measurements on vehicles of the non-road category, two passenger cars were also examined. Therefore a driving route in accordance with current legislation was worked out and measurements were carried out on a chassis dynamometer in order to be able to check the normality of the test drives. In the case of a flexible-fuel vehicle for petrol and ethanol in any proportion, it was found that a high content of ethanol in the fuel can significantly reduce carbon monoxide and nitrogen oxide emissions. In the case of a bivalent CNG vehicle, lower carbon monoxide and carbon dioxide emissions were found in gas operation compared with petrol operation. However, nitrogen oxide and hydrocarbon emissions are higher, but below the limits applicable to the vehicle.

With a portable emission measurement system a wide variety of vehicles with different fuels can be reliably tested. Thus, an extremely helpful measurement method is available to record emissions in real operation and to identify possibilities for further improvement of emission behavior.

Quellenverzeichnis

- [1] BASSHUYSEN, R. v. (Hrsg.) (2017): Ottomotor mit Direkteinspritzung und Direkteinblasung. Ottokraftstoffe - Erdgas – Methan - Wasserstoff. Ulrich Spicher und 30 Mitautoren. Unter Mitarb.v. U. Baretzky, U. Baron, H. Bühl, M. Clade, W. Dörmer, H. Eichlseder et al. 4., überarb. u. erw. Aufl. ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 621 Seiten, ISBN 978-3-658-12214-0
- [2] BONNEL, P.; PERUJO, A.; PROVENZA, A.; VILLAFUERTE, M. (2013): Non Road Engines Conformity Testing Based on PEMS. Lessons Learned from the European Pilot Program. European Commission (EC) (Hrsg.). Mitarbeiter: Stein, J.; Stark, A.; Marchetti, M.; Holmberg, J.; Ahlberg, J.; Williams, P.; Walker, E.; Knuth, H.-W.; Feisel, K.; Taylor, T.; Pease, N.; Woeldgen, J.-J.; Savvidis, D. Ispra: Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport (IET). JRC Scientific and Policy Reports, Nr. EUR 26438 EN, 45 Seiten, ISBN 978-92-79-35091-7
- [3] BROOKS, P. A.; UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA) (2015): Re: Notice of Violation. Certified Mail an Empfänger: D. Geanacopoulos, S. Johnson, Volkswagen Group of America, Inc., Volkswagen AG and AUDI AG. Washington, D. C., 18. September 2015, 6 Seiten
- [4] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG (2009): Merkblatt für Anbaugeräte. Sonderdruck. Verkehrsblatt-Dokument Nr. B 3666, Bereich: Kfz-Überwachung, F. 15, Version 11/09. Fundstelle: Verkehrsblatt - Amtsblatt des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung der Bundesrepublik Deutschland, Nr. 24 vom 31.12.2009, VO-Nummer 218
- [5] CZERWINSKI, J.; COMTE, P.; ZIMMERLI, Y.; CACHON, L.; REMMELE, E.; HUBER, G. (2017): Research of Emissions with Gas PEMS and PN PEMS. In: EMPA SWISS FEDERAL LABORATORIES FOR MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY (Hrsg.): 22nd International Transport and Air Pollution Conference. TAP Conference 2017. Zurich, Switzerland, 15.-16. November. EMPA Materials Science & Technology, Department for Mobility, Energy and Environment, Automotive Powertrain Technologies Laboratory. Zurich: EMPA Materials Science and Technology, S. 1-11
- [6] DEACADEMIC.COM (2019): Academic dictionaries and encyclopedias. Deutsch. Wikipedia. Ausdehnungskoeffizient. URL: <http://deacademic.com/dic.nsf/dewiki/115068/Ausdehnungskoeffizient> Stand: 31.01.2019
- [7] DOBRINDT, A.; ODENWALD, M.; ZINKE, E.; WACHTMEISTER, G. (2016): Bericht der Untersuchungskommission „Volkswagen“. Untersuchungen und verwaltungsrechtliche Maßnahmen zu Volkswagen, Ergebnisse der Felduntersuchung des Kraftfahrt-Bundesamtes zu unzulässigen Abschaltvorrichtungen bei Dieselfahrzeugen und Schlussfolgerungen. Stand: April 2016. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (Hrsg.). Berlin, 128 Seiten
- [8] EMBERGER, P.; MAUTNER, S.; HUBER, G.; THUNEKE, K.; REMMELE, E. (2018): Betrieb eines forstwirtschaftlichen Vollernters mit Rapsölkraftstoff - Betriebserfahrungen und Emissionsverhalten im realen Betrieb. In: NELLES, M. (Hrsg.): 12. Rostocker Bioenergieforum. Tagungsband. Universität Rostock, 28.- 29. Juni. Schriftenreihe Umweltingenieurwesen, Nr. 78. Rostock: Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Professur Abfall- und Stoffstromwirtschaft, S. 217-226

- [9] Ettl, J.; Huber, G.; Bernhardt, H.; Thüneke, K. (2016): Reale Emissionen eines pflanzenöltauglichen Traktors gemessen mit PEMS und am Traktorenprüfstand. ATZ offhighway, Jg. 9, Nr. 11, S. 48-53
- [10] Ettl, J.; Thüneke, K.; Emberger, P.; Remmele, E. (2019): Langzeitmonitoring von Abgasemissionen, Effizienz und Betriebssicherheit pflanzenöltauglicher Traktoren auf den bayerischen staatlichen Versuchsbetrieben. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) (Berichte aus dem TFZ, 60)
- [11] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2011): Verordnung (EU) Nr. 582/2011 der Kommission vom 25. Mai 2011 zur Durchführung und Änderung der Verordnung (EG) Nr. 595/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen (Euro VI) und zur Änderung der Anhänge I und III der Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates. Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 54, Nr. L 167, vom 25.6. 2011, S. 1-168
- [12] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2014): Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über die Anforderungen in Bezug auf die Emissionsgrenzwerte und die Typgenehmigung für Verbrennungsmotoren für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte. Text von Bedeutung für den EWR. 2014/0268 (COD). Europäische Kommission (Hrsg.). Brüssel, 62 Seiten
- [13] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2016): Verordnung (EU) 2016/427 der Kommission vom 10. März 2016 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 6). Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 59, Nr. L 82, S. 1-98
- [14] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2016): Verordnung (EU) 2016/646 der Kommission vom 20. April 2016 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 6). Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 59, Nr. L 109, S. 1-22
- [15] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2017): Delegierte Verordnung (EU) 2017/655 der Kommission vom 19. Dezember 2016 zur Ergänzung der Verordnung (EU) 2016/1628 des Europäischen Parlaments und des Rates in Hinblick auf die Überwachung der Emissionen gasförmiger Schadstoffen von in Betrieb befindlichen Verbrennungsmotoren in nicht für den Straßenverkehr bestimmten mobilen Maschinen und Geräten. Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 60, Nr. L 102, S. 334-363
- [16] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2017): Verordnung (EU) 2017/1151 der Kommission vom 1. Juni 2017 zur Ergänzung der Verordnung (EG) Nr. 715/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Fahrzeugreparatur- und -wartungsinformationen, zur Änderung der Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 der Kommission sowie der Verordnung (EU) Nr. 1230/2012 der Kommission und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 der Kommission. Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 60, Nr. L 175, S. 1-643

- [17] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2017): Verordnung (EU) 2017/1154 der Kommission vom 7. Juni 2017 zur Änderung der Verordnung (EU) 2017/1151 der Kommission zur Ergänzung der Verordnung (EG) Nr. 715/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Reparatur- und Wartungsinformationen für Fahrzeuge, zur Änderung der Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 der Kommission und der Verordnung (EU) Nr. 1230/2012 der Kommission sowie zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 und der Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates in Bezug auf Emissionen leichter Personenkraftwagen und Nutzfahrzeuge im praktischen Fahrbetrieb (Euro 6). Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 60, Nr. L 175, S. 708-732
- [18] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2018): Verordnung (EU) 2018/932 der Kommission vom 29. Juni 2018 zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 582/2011 in Bezug auf die Bestimmungen über Prüfungen mit portablen Emissionsmesssystemen (PEMS) und die Anforderungen an eine Typgenehmigung aufgrund von Vielstofffähigkeit. Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 61, Nr. L 165, S. 32-34
- [19] EUROPÄISCHES PARLAMENT; EUROPÄISCHER RAT (2016): Verordnung (EU) 2016/1628 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. September über die Anforderungen in Bezug auf die Emissionsgrenzwerte für gasförmige Schadstoffe und luftverunreinigende Partikel und die Typgenehmigung 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. Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 59, Nr. L 252, S. 53-117
- [20] EUROPEAN COMMISSION (2015): Fragen und Antworten zu Emissionsgrenzwerten für Luftschadstoffe. Brüssel, 25. September 2015, European Commission, Press Release Database. 4 Seiten, URL: http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-15-5705_de.htm, Stand: 05.10.2016
- [21] FRANCO, V.; POSADA SÁNCHEZ, F.; GERMAN, J.; MOCK, P. (2014): Real-world exhaust emissions from modern Diesel cars. A meta-analysis of PEMS emissions data from EU (Euro 6) and US (Tier 2 Bin 5/ULEV II) Diesel passenger cars. Part 1: Aggregated results. International Council on Clean Transportation Europe (ICCT) (Hrsg.). ICCT White Paper, Nr. 10 (October) 2014. Beijing, Berlin, Brussels, San Francisco, Washington, D. C., 53 Seiten
- [22] FRANKL, M. (2017): Realemissionen eines Flexible Fuel Vehicles (FFV) beim Betrieb mit ethanolhaltigen Kraftstoffen. Masterarbeit. Technische Universität München, München, Straubing. Wissenschaftszentrum Straubing, 91 Seiten
- [23] FREY, H.; RASDORF, W.; KIM, K.; PANG, S.-H.; LEWIS, P. (2008): Comparison of Real-World Emissions of B20 Biodiesel versus Petroleum Diesel for Selected Non road Vehicles and Engine Tiers. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Jg. 2058, S. 33-42

- [24] GIETZELT, C.; KNUTH, H. W.; HEINLE, H. (2012): Mobile “in-use“-Emissionsmessung bei realen Agraranwendungen. Ein Beitrag zu EU-PEMS Pilotprojekt für mobile Maschinen (NRMM). In: AVL DEUTSCHLAND GMBH (Hrsg.): Abgas- und Partikel-Emissionen. Beiträge - Proceedings. 7. Internationales Forum. Ludwigsburg, Forum am Schloßpark, 6.-7. März. Mainz-Kastel: AVL Deutschland GmbH, S. 70-80, ISBN 978-3-00-032668-4.
- [25] HELMS, H.; HEIDT, C. (2014): Erarbeitung eines Konzeptes zur Minderung der Umweltbelastung aus NRMM (non road mobile machinery) unter Berücksichtigung aktueller Emissionsfaktoren und Emissionsverminderungsoptionen für den Bestand. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Forschungskennzahl 3710 45 191, UBA-FB 001913, Abschlussdatum: Dezember 2013. Durchführung: ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.). UBA-Texte, Nr. 24/2014. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 98 Seiten
- [26] LÓPEZ, J. M.; JIMÉNEZ, F.; APARICIO, F.; FLORES, N. (2009): On-road emissions from urban buses with SCR+Urea and EGR+DPF systems using diesel and biodiesel. Transportation Research Part D: Transport and Environment, Jg.14, Nr.1, S. 1–5
- [27] MAUTNER, S.; EMBERGER, P.; THUNEKE, K.; REMMELE, E. (2017): Emissions- und Betriebsverhalten eines Biomethantraktors mit Zündstrahlmotor. In Kooperation mit: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), ACGO Deutschland GmbH Geschäftsbereich Valtra Afcon Oy. Berichte aus dem TFZ, Nr. 51. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 122 Seiten, ISSN 1614-1008
- [28] MERKISZ, J.; LIJEWSKI, P.; FUC, P.; WEYMANN, P. (2013): Exhaust emission tests from non-road vehicles conducted with the use of PEMS analyzers. Eksploatacja i niezawodność – Maintenance and reliability, Jg. 15, Nr. 4, S. 364-368
- [29] MINKOS, A.; DAUERT, U.; FEIGENSPAN, S.; KESSINGER, S.; NORDMANN, S.; HIMPEL, T. (2018): Luftqualität 2017. Vorläufige Auswertung. Stand: Januar 2018. Umweltbundesamt (UBA)(Hrsg.). Für Mensch & Umwelt – Hintergrund. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 28 Seiten, ISSN 2363-829X
- [30] MÖNCH, L.; LANGE, M. (2016): Fortschreibung der RDE Gesetzgebung und damit verbundene Herausforderungen. Umweltbundesamt. Vortrag auf dem FAD-Workshop „RDE und mobile Abgasmesstechnik - II“ vom 16. bis 17. Juni 2016 in Radebeul. Dresden: FAD e. V., s. p.
- [31] PÜTZ, R.; BRANDL, M.; LEHNER, J. (2014): Analyse der Emissionen von Landmaschinen im Realbetrieb. In: VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E. V. (VDI); MAX-EYTH-GESELLSCHAFT AGRARTECHNIK (MEG) (Hrsg.): Agrartechnik im Dialog mit Politik und Gesellschaft. Conference Agricultural Engineering. LAND. TECHNIK AgEng 2014, 72. International Conference on Agricultural Engineering. ESTREL Berlin, 19. u. 20. November. VDI-Berichte, Nr. 2226. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 465-474, ISBN 978-3-18-09222-3
- [32] REIF, K. (HRSG.) (2014): Ottomotoren-Management. Steuerung, Regelung und Überwachung. 4., vollst. neubearb. Aufl. Bosch-Fachinformation Automobil. Wiesbaden: Springer Vieweg, 466 Seiten, ISBN (e-Book) 978-3-8348-2102-7, ISSN 2627-2172

-
- [33] SCHARNOW, R. (2007): Flüssige Waren. In: GESAMTVERBAND DER DEUTSCHEN VERSICHERUNGSWIRTSCHAFT E. V. (GDV) (Hrsg.). Containerhandbuch, Deutsche Version. Die Ware im Container. Berlin, URL: <http://www.containerhandbuch.de>, Stand:31.01.2019

Berichte aus dem TFZ

Bisher erschienene Ausgaben der Schriftenreihe des Technologie- und Förderzentrums:

1	Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich Projektphase 1: Erhebung der Ölqualität und Umfrage in der Praxis
2	Erprobung der Brennwerttechnik bei häuslichen Holzhackschnitzelheizungen mit Sekundärwärmetauscher
3	Daten und Fakten zur dezentralen Ölgewinnung in Deutschland
4	Untersuchungen zum Feinstaubausstoß von Holzzentralheizungsanlagen kleiner Leistung
5	Qualität von kaltgepresstem Rapsöl als Speiseöl und Festlegung eines Qualitätsstandards
6	Entwicklung einer Prüfmethode zur Bestimmung der Cetanzahl von Rapsölkraftstoff
7	Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Rapsöl als Kraftstoff und dem Motorenöl in pflanzenöлтаuglichen Motoren
8	Wärmegewinnung aus Biomasse – Begleitmaterialien zur Informationsveranstaltung
9	Maize as Energy Crop for Combustion – Agricultural Optimisation of Fuel Supply
10	Staubemissionen aus Holzfeuerungen – Einflussfaktoren und Bestimmungsverfahren
11	Rationelle Scheitholzbereitstellungsverfahren
12	Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich - Technologische Untersuchungen und Erarbeitung von Qualitätssicherungsmaßnahmen
13	Getreidekörner als Brennstoff für Kleinf Feuerungen – Technische Möglichkeiten und Umwelteffekte
14	Mutagenität der Partikelemissionen eines mit Rapsöl- und Dieselmkraftstoff betriebenen Traktors

15	Befragung von Betreibern dezentraler Ölsaatenverarbeitungsanlagen
16	Schnellbestimmung des Wassergehaltes im Holzscheit
17	Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell
18	Miscanthus als Nachwachsender Rohstoff – Ergebnisse als bayerischen Forschungsarbeiten
19	Miscanthus: Anbau und Nutzung – Informationen für die Praxis
20	Prüfung der Eignung von Verfahren zur Reduktion ablagerungs- und aschebildender Elemente in Rapsölkraftstoff bei der dezentralen Erzeugung
21	Kleine Biomassefeuerungen – Marktbetrachtungen, Betriebsdaten, Kosten und Wirtschaftlichkeit
22	Partikelemissionen aus Kleinfeuerungen für Holz und Ansätze für Minderungsmaßnahmen
23	Bewertung kostengünstiger Staubabscheider für Einzelfeuerstätten und Zentralheizungskessel
24	Charakterisierung von Holzbriketts
25	Additivierung von Rapsölkraftstoff – Auswahl der Additive und Überprüfung der Wirksamkeit
26	Status quo der dezentralen Ölgewinnung – bundesweite Befragung
27	Entwicklung einer Siloabdeckung aus Nachwachsenden Rohstoffen
28	Sorghumhirse als Nachwachsender Rohstoff – Sortenscreening und Anbauszzenarien
29	Sorghum als Energiepflanze – Optimierung der Produktionstechnik
30	Ethanol aus Zuckerhirse – Gesamtkonzept zur nachhaltigen Nutzung von Zuckerhirse als Rohstoff für die Ethanolherstellung
31	Langzeiterfahrungen zum Einsatz von Rapsölkraftstoff in Traktoren der Abgasstufe I und II
32	Pflanzenöltaugliche Traktoren der Abgasstufe IIIA – Prüfstandsuntersuchungen und Feldeinsatz auf Betrieben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft

33	Betriebs- und Emissionsverhalten eines pflanzenöltauglichen Traktors mit Rapsöl, Sojaöl und Sonnenblumenöl
34	Dezentrale Ölsaatenverarbeitung 2012/2013 – eine bundesweite Befragung
35	Additivierung von Rapsölkraftstoff – Projektphase 2: Langzeit- und Prüfstandsuntersuchungen
36	Nutzer- und Brennstoffeinflüsse auf Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen
37	Screening und Selektion von Amarantsorten und -linien als spurenelementreiches Biogassubstrat
38	Untersuchung der Praxistauglichkeit eines Elektrofilters für Kleinfeuerungsanlagen
39	Eignung von Buchweizen und Quinoa als späte Zweitfrüchte für die Biogasnutzung
40	Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel
41	Qualitätssicherung bei der dezentralen Herstellung von Rapsölkraftstoff nach DIN 51605
42	Weiterentwicklung einer Siloabdeckung auf Basis nachwachsender Rohstoffe
43	Brennstoffqualität von Holzpellets
44	Herstellung und Demonstration der Praxistauglichkeit von Traktoren mit Motoren der Abgasstufe IV im Betrieb mit Pflanzenöl
45	ExpResBio – Methoden
46	Qualität von Holzhackschnitzeln in Bayern
47	Pflanzenöltaugliche Traktoren der Abgasstufen I bis IIIB
48	Sorghum als Biogassubstrat – Präzisierung der Anbauempfehlungen für bayrische Anbaubedingungen
49	Zünd- und Verbrennungsverhalten alternativer Kraftstoffe
50	Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern – Analyse und Bewertung ökologischer und ökonomischer Wirkungen nach der ExpResBio-Methode
51	Emissions- und Betriebsverhalten eines Biomethantraktors mit Zündstrahlmotor

52	Schnellbestimmung des Wassergehalts von Holzhackschnitzeln
53	Bioenergieträger mit Blühaspekt: Leguminosen-Getreide-Gemenge
54	Dauerkulturen – Aufzeigen der bayernweiten Anbaueignung
55	Lagerung von Holzhackschnitzeln
56	Holzhackschnitzel aus dem Kurzumtrieb
57	Optimierungspotentiale bei Kaminöfen - Emissionen, Wirkungsgrad und Wärmeverluste
58	Überführung einer Siloabdeckung auf Basis Nachwachsender Rohstoffe in die Praxisreife
59	Regionalspezifische Treibhausgasemissionen der Rapserzeugung in Bayern
60	Langzeitmonitoring pflanzenöltauglicher Traktoren der Abgasstufen I bis IV
61	Nutzereinflüsse auf die Emissionen aus Kaminöfen
62	Abgasverhalten von Fahrzeugen im realen Betrieb mit alternativen Kraftstoffen – Bestimmung mit einem portablen Emissionsmesssystem (PEMS)

