



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

TUM School of Life Sciences

Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik

Reales Abgasemissionsverhalten von Traktoren am Prüfstand und im Feldeinsatz

Johannes Christian Ettl

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Life Sciences der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Agrarwissenschaften genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr. Cordt Zollfrank

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr. Heinz Bernhardt
2. Hon.-Prof. Dr.-Ing. Peter Pickel
3. Prof. Dr.-Ing. Matthias Gaderer

Die Dissertation wurde am 08.06.2020 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die TUM School of Life Sciences am 23.02.2021 angenommen.

Danksagung

Für die Betreuung der Arbeit möchte ich mich sehr herzlich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Heinz Bernhardt bedanken. Weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Pickel und Herrn Prof. Dr.-Ing. Matthias Gaderer für die Übernahme der Koreferate sowie Herrn Prof. Dr. Cordt Zollfrank für den Prüfungsvorsitz.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn Dr. Edgar Remmele, Herrn Dr. Klaus Thuneke und Herrn Dr.-Ing. Peter Emberger für die stets ausgezeichnete fachliche Betreuung, die hervorragende Zusammenarbeit und das produktive Arbeitsklima am Technologie- und Förderzentrum (TFZ). Danken möchte ich auch „den Ölern“ aus der Abteilung Erneuerbare Kraftstoffe und Materialien. Für die Unterstützung bei den Versuchen möchte ich mich bei Herrn Sebastian Kirner, Herrn Martin Speiseder, Herrn Roland Fleischmann, Herrn Thomas Kießlinger, Frau Anja Rocktäschel, Frau Petra Siedersbeck und Herrn Julian Spiegel sehr herzlich bedanken. Zudem gilt mein ausdrücklicher Dank früheren Kollegen, insbesondere Herrn Georg Huber, Herrn Sebastian Mautner und Herrn Dr.-Ing. Matthias Plank, die mir mit sehr guten Ratschlägen zur Seite standen. Dem Leiter des TFZ Herrn Dr. Bernhard Widmann möchte ich für die uneingeschränkte Nutzung der Versuchseinrichtungen danken.

Bedanken möchte ich mich weiterhin bei Herrn Walter Wagner von der AGCO GmbH, bei Herrn Daniel Steffl von der BayWa AG, bei Herrn Dr.-Ing. Axel Kunz von der John Deere GmbH & Co. KG und bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Pickel vom John Deere European Innovation Technology Center für die Bereitstellung von Versuchstraktoren und den stets sehr guten Austausch. Dank gebührt auch den Mitarbeiter*innen der Bayerischen Staatsgüter (BaySG) für die Bereitstellung von Traktoren und für die Unterstützung bei Feldtests. Herrn Marco Landis möchte ich für die Zusammenarbeit bei gemeinsamen Veröffentlichungen und für den Erfahrungsaustausch sehr herzlich danken.

Meiner Frau Christa, meinen Eltern Johann und Gertraud sowie meinen Geschwistern Elisabeth, Martin und Thomas danke ich für die Unterstützung und Zusprüche während der Doktorarbeit.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis.....	9
Abkürzungsverzeichnis	11
1 Einleitung und Problemstellung	15
2 Messung von Abgasemissionen an Traktoren.....	19
2.1 Standardtraktor	19
2.1.1 Dieselmotor.....	19
2.1.1.1 Motorteilsysteme.....	19
2.1.1.2 Verbrennung und Schadstoffe	20
2.1.1.3 Schadstoffreduktion	22
2.1.1.4 Betriebszustände	26
2.1.2 Leistungsübertragung	27
2.1.3 Regenerative Antriebssysteme	29
2.1.4 Arbeitszeitgliederung	33
2.1.5 Motordatenbereitstellung	34
2.2 Prüfstände und Prüfumgebungen	36
2.2.1 Motorenprüfstand.....	36
2.2.2 Traktorenprüfstand.....	37
2.2.3 Rollen-, Naben- oder Bremswagenprüfstand	38
2.2.4 Portables Emissionsmesssystem (PEMS)	40
2.3 Abgasgesetzgebung	41
2.3.1 Prüfzyklen	43
2.3.2 Tatsächlicher Fahrbetrieb	44
2.3.3 Flottenemissionen.....	47
2.4 Erfassung tatsächlicher Traktoremissionen.....	48
2.4.1 Motorbetrieb am Prüfstand.....	48
2.4.1.1 Stationäre Prüfzyklen	48
2.4.1.2 Transiente Prüfzyklen	51
2.4.2 Tatsächlicher Fahrbetrieb im Feld.....	53
2.5 Folgerungen aus dem Stand des Wissens	57
3 Zielsetzung.....	61
4 Material und Methoden	65
4.1 Traktoren und Betriebsstoffe	65
4.2 Messtechnik	68
4.2.1 Traktorenprüfstand.....	68
4.2.2 Portables Emissionsmesssystem (PEMS)	72
4.3 Prüfmethode in Anlehnung an die Gesetzgebung	74

4.3.1	Non-Road Transient Cycle (NRTC).....	74
4.3.2	Abgasemissionen im tatsächlichen Fahrbetrieb mit PEMS.....	76
4.4	Entwicklung der Praxisnahen Traktor-Fahrzyklen (PTFZ)	78
4.4.1	Datenerhebung im Feld.....	78
4.4.2	Algorithmen und Zykluserstellung	79
4.4.3	Verarbeitung der Drehzahl- und Drehmomentdaten.....	86
4.4.4	Anwendung und Auswertung.....	87
4.4.5	Validierung	88
5	Ergebnisse und Diskussion	91
5.1	Transiente Prüfzyklen am Traktorenprüfstand	91
5.2	Anwendung der Praxisnahen Traktor-Fahrzyklen (PTFZ).....	98
5.2.1	Plausibilität	98
5.2.2	Spezifische Abgasemissionen.....	108
5.3	Validierung der PTFZ	109
5.3.1	Abgasemissionen im tatsächlichen Fahrbetrieb	109
5.3.2	Vergleich der Messungen im Feld und am Prüfstand	111
6	Einordnung	121
7	Zusammenfassung	127
9	Anhang.....	147

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schema zur Übertragung des tatsächlichen Fahrbetriebs als Fahrzyklus auf den Prüfstand zur Abgasemissions- und Verbrauchsmessung	17
Abbildung 2:	Aufbau eines Wandstromfilters zur Partikelabscheidung.....	25
Abbildung 3:	Beispielhafte Energiebilanz eines Traktors (nach RENIUS [142], verändert).....	28
Abbildung 4:	Traktorenprüfstand mit einer Wirbelstrombremse an der Traktorzapfwelle (Foto: TFZ, links; Agroscope, rechts [97])	37
Abbildung 5:	Messwagen zur Prüfung nach OECD und des DLG-PowerMix™ nach DEGRELL und FEUERSTEIN (2005) [27] sowie AI und TAUBER (2015) [2]	39
Abbildung 6:	Gesamtfahrzeugprüfstand für Traktoren der AGCO GmbH (nach RÜCKERT et al. (2015) [149]).....	39
Abbildung 7:	Portables Emissionsmesssystem (PEMS) an einem PKW, Traktor und Holzvollernter	40
Abbildung 8:	Schematische Darstellung der acht Prüfphasen des Non-Road Steady Cycle (NRSC).....	43
Abbildung 9:	Verlauf der normierten Motordrehzahl und des Motordrehmoments im Non-Road Transient Cycle (NRTC)	44
Abbildung 10:	Methode der gleitenden Mittelungsfenster (MAW-Methode) auf Basis der CO ₂ -Emissionen (nach [15][55], verändert)	45
Abbildung 11:	NTE-Kontrollbereich in Abhängigkeit der Motordrehzahl und des Motordrehmoments (nach [42][43][15], verändert)	46
Abbildung 12:	Betriebspunkte und deren Gewichtung beim FAT 6-Stufen-Test (links) [146][147] und beim NRSC (rechts) [80]	49
Abbildung 13:	Entwicklung und Anwendung der Praxisnahen Traktor-Fahrzyklen (PTFZ).....	62
Abbildung 14:	Validierung der Praxisnahen Traktor-Fahrzyklen (PTFZ)	63
Abbildung 15:	Versuchstraktoren der Abgasstufe II bis IV	65
Abbildung 16:	Schematische Darstellung des Traktorenprüfstands mit Messsystemen	70
Abbildung 17:	Portables Emissionsmesssystem (PEMS) eingehaust in einer Schutzbox am Traktor IV-c.....	73
Abbildung 18:	Aufteilung der Feldtestdaten in Traktorarbeiten, Teilzeiten und Segmente sowie Fahrzykluserstellung	80
Abbildung 19:	Programmablaufplan (PAP) des Algorithmus zur Prüfung der Datenpunkte (Aufzeichnungsintervall = 1 s) auf Merkmale einer Arbeitsverrichtungszeit	82

Abbildung 20:	Lineare Abhängigkeit zwischen Motordrehzahl n_{CAN} und Stromsignal I_{pedal} zur Steuerung des Gaspedals des Traktors IIIB	86
Abbildung 21:	Korrelation zwischen dem Drehmoment an der Zapfwelle (M_{PTO}) und den beiden CAN-Signale Motordrehzahl (n_{CAN}) und Motordrehmoment (M_{CAN}) aus 129 Betriebspunkten des Traktors IIIB	87
Abbildung 22:	Emissionsmessung im Feld und am Traktorenprüfstand	89
Abbildung 23:	Soll- und Istwerte von Motordrehzahl (n_{Soll} , n_{Ist}) und äquivalentem Motordrehmoment (M_{Soll} , M_{Ist}) des Traktors IIIA bei den NRTC-Varianten mit unterschiedlich langen Mittelungsintervallen	92
Abbildung 24:	Mittelwert und Spannweite von Parametern der Regressionsanalyse zwischen Soll- und Istwerten von Drehzahl und Drehmoment bei NRTC-Varianten 1sNRTC und 10sNRTC mit verschiedenen Traktoren und Kraftstoffen im Kalt- und Warmstart (je $n = 3$)	93
Abbildung 25:	Stickstoffoxid-Emissionen (NO_x) vor und nach der Abgasnachbehandlung im Kalt- und Warmstart (mit je drei Wiederholungen) im 1sNRTC und 10sNRTC für den Traktor IIIB mit Rapsölkraftstoff	95
Abbildung 26:	Positions- und Motordrehzahldaten über die Messzeit (4000 s) während der Arbeit mit der Säkombination (SK) und Gliederung in Teilzeiten	99
Abbildung 27:	Verteilung der Arbeitsverrichtungs-, Wende- und Restzeitsegmente jeder im Feld aufgezeichneten Traktorarbeit und der daraus erstellten Fahrzyklen für den Traktorenprüfstand	100
Abbildung 28:	Im Feld aufgezeichnete und am Traktorenprüfstand in drei Wiederholungen nachgefahrenen Motordrehzahlen (n_{CAN}) und Motordrehmomente (M_{CAN}) sowie die NO_x -, HC-, CO-, CO_2 -, PN-, NH_3 -Emissionen und Abgastemperatur vor und nach der Abgasnachbehandlung (AGN) mit Rapsölkraftstoff	106
Abbildung 29:	Abgasemissionen während praxisnaher Fahrzyklen für Traktorarbeiten (PTFZ) mit Rapsölkraftstoff und Dieselmotorkraftstoff in Bezug auf den Fahrzyklus 10sNRTC mit Diesel ($n = 3$)	108
Abbildung 30:	Kumulierte Häufigkeit der NO_x -, HC-, CO- und PM-Emissionen bei Messungen mit Rapsölkraftstoff beim Pflügen am Traktor IV-c (Auswertung gemäß MAW-Methode [55]) und der Grenzwert für Messungen am Motorenprüfstand [57] sowie Vergleichswerte für NO_x aus den Zyklen NRSC und 10sNRTC am Traktorenprüfstand	110
Abbildung 31:	Verteilung der NO_x - und CO_2 -Abgaskonzentrationen und des Abgasmassenstroms bei drei Einzelmessungen im Feld mit PEMS und am Traktorenprüfstand mit PEMS sowie mit stationären Gasanalysatoren (GA-B) mit Rapsölkraftstoff	113

-
- Abbildung 32: Motordrehzahl (n_{CAN}) und -drehmoment (M_{CAN}), NO_x - und CO_2 -Emissionen, Abgasmassenstrom sowie Betriebstemperaturen beim Pflügen (PF-II) im Feld und am Traktorenprüfstand 115
- Abbildung 33: Mittelwert und Spannweite der NO_x -, CO- und HC-Emissionen im Feld und am Prüfstand über die gesamte (PF-G) und verkürzte Messdauer (PTFZ) gemessen mit PEMS und GA-B im Rapsölkraftstoffbetrieb 118
- Abbildung 34: NO_x -, CO-, HC- und CO_2 -Emissionen vor (GA-A) bzw. nach der AGN (GA-B) sowie Harnstoffverbrauch im PTFZ in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur mit Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff 119

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zeitgliederung landwirtschaftlicher Arbeiten nach WINKLER und FRISCH (2014) [180] (Gliederungsebenen 1 - 2 von 4)	33
Tabelle 2:	Emissionsgrenzwerte der Verordnung 2016/1628 [57] für Dieselmotoren in Arbeitsmaschinen (Abgasstufen I–V).....	42
Tabelle 3:	Kennzahlen zur Berechnung des Verbrauchs im Deutz 5-Punkte Zyklus aus typischen Betriebspunkten von Traktoren bezogen auf die Nenndrehzahl und das Nenndrehmoment ([142], verändert) ...	50
Tabelle 4:	Übersicht zu Untersuchungen mit verschiedenen Methoden zur Bestimmung der Abgasemissionen von Traktoren während landwirtschaftlicher Arbeiten.....	58
Tabelle 5:	Technische Daten der Traktoren und Kurzbezeichnungen.....	67
Tabelle 6:	Anbaugeräte des Traktors IIIB.....	68
Tabelle 7:	Stationäres Gasanalysesystem A (GA-A) zur Bestimmung der gasförmigen Abgasbestandteile an der Messstelle im Rohabgas vor der Abgasnachbehandlung (AGN)	71
Tabelle 8:	Stationäres Gasanalysesystem B (GA-B) zur Bestimmung der gasförmigen Abgasbestandteile an der Messstelle im Reinabgas nach der Abgasnachbehandlung (AGN).....	71
Tabelle 9:	Analysatoren des portablen Emissionsmesssystems (PEMS) zur Erfassung der Abgasbestandteile an der Messstelle im Reinabgas nach der Abgasnachbehandlung (AGN).....	73
Tabelle 10:	Messgenauigkeit der Analysatoren des portablen Emissionsmesssystems (PEMS).....	74
Tabelle 11:	Grenzwerte der Validierungsstatistik im NRTC für Drehzahl, Drehmoment und Leistung gemäß EU-Verordnungen 2016/1628 [30] und 2017/654 [67]	75
Tabelle 12:	Bedingungen zur Streichung von Messwerten für die Regressionsanalyse	76
Tabelle 13:	Aufgezeichnete ECU-Signale der Traktoren IIIB und IV-c	78
Tabelle 14:	Verwendete Arbeitszeitdefinitionen für die landwirtschaftlichen Arbeiten (PF, GR, KE, SK) und Vergleich mit den Terminologien nach TGL 80-22289 und KTBL [28][180].....	81
Tabelle 15:	Arithmetisches Mittel der im Feld über 206 h Betriebszeit aufgezeichneten ECU-Signale n_{CAN} , M_{CAN} , B_{CAN} , T_{CW-CAN} , T_{a-CAN} und V_{CAN} des Traktors IIIB	101
Tabelle 16:	Arithmetisches Mittel der ECU-Signale n_{CAN} , M_{CAN} und B_{CAN} über 206 h Betriebszeit im Feld und über den Fahrzyklus (PTFZ) sowie die prozentuale Abweichung (AW) für jede Traktorarbeit	103

Tabelle 17:	Regressionsgeradensteigung (m), y-Achsenabschnitt (b_{as}) und Bestimmtheitsmaß (R^2) zwischen Soll- und Istwerten am Prüfstand bei drei Wiederholungen ($n=3$) 104
Tabelle 18:	Mittelwert der Umgebungslufttemperatur und des -drucks sowie Kühlmitteltemperatur bei Messbeginn bei drei Messungen im Feld und am Prüfstand 112

Abkürzungsverzeichnis

Kurzbezeichnungen

AGN	Abgasnachbehandlung
AGR	Abgasrückführung
ASC	Ammoniakschlupf-Katalysator
B100	Biodiesel (Fettsäuremethylester)
B7	Diesekraftstoff mit einem Biodiesekraftstoffanteil von 7 Vol.-%
B20	Diesekraftstoff mit einem Biodiesekraftstoffanteil von 20 Vol.-%
BTB	Betriebstagebuch
Bh	Betriebsstunden
Bus	System zur Übertragung von Daten
Ca	Calcium
CAN	Controller Area Network
C ₂ H ₂	Ethin
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
Cu	Kupfer
CNG	Compressed Natural Gas
CR	Common-Rail
DDR	Deutsche Demokratische Republik
DEF	Diesel Exhaust Fluid (wässrige Harnstofflösung)
DI	Direkteinspritzer (engl. Direct Injection)
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DK	Diesekraftstoff
DOC	Oxidationskatalysator (engl. Diesel Oxidation Catalyst)
DPF	Dieselpartikelfilter
ED95	Biokraftstoff auf Basis von Ethanol für Dieselmotoren
ECU	Electronic Control Unit (Motorsteuergerät)
EU	Europäische Union
FAT	Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft u. Landtechnik
FID	Flammenionisations-Detektor
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskop
GA	Stationäres Abgasaasensystem (GA-A, GA-B)
GPS	Global Positioning System
GR	Grubber
H ₂	elementarer Wasserstoff
HC	Kohlenwasserstoffe
HDV	Heavy-duty vehicles (schwere Nutzfahrzeuge)
HNCO	Isocyanensäure
HVO	Hydriertes Pflanzenöl (engl. Hydrotreated Vegetable Oil)

IDI	indirekte Einspritzung (engl. Indirect Injection)
ISC	In-Service Conformity
ISM	In-Service Monitoring
ISO	International Organization for Standardization
ISOBUS	Datenbus-Standard in der Landtechnik (ISO 11783)
JRC	Joint Research Centre (Forschungsstelle der EU-Kommission)
K	Kalium
KTBL	Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft
KE	Kreiselegge
LF	Lastfaktor
LfL	Landesanstalt für Landwirtschaft
MAW	Moving Averaging Window (Auswertemethode)
Mg	Magnesium
MW	Mähwerk
N	atomarer Stickstoff
N ₂	elementarer Stickstoff
N ₂ O	Lachgas
(NH ₂) ₂ CO	Harnstoff
Na	Natrium
NDIR	Nicht-Dispersives-Infrarot-Spektroskop
NDUV	Nicht-Dispersives-Ultraviolet-Spektroskop
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NH ₃	Ammoniak
NO	Stickstoffmonoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO _x	Stickstoffoxide (NO + NO ₂)
NRMM	Non-Road Mobile Machinery (mobile Arbeitsmaschinen)
NRSC	Non-Road Steady Cycle
NRTC	Non-Road Transient Cycle
NTE	Not-To-Exceed (Auswertemethode)
O	atomarer Sauerstoff
O ₂	elementarer Sauerstoff
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
P	Phosphor
PAP	Programmablaufplan
PEMS	Portables Emissionsmesssystem
PCF	Product Carbon Footprints
PD	Prüfdauer (bei der Auswertung von PEMS-Messungen)
PF	Pflug
PKW	Personenkraftwagen
PLD	Pumpe-Leitung-Düse
PM	Partikelmasse
PN	Partikelanzahl

PTFZ	Praxisnahe Traktor-Fahrzyklen
RDE	Real Driving Emissions
RK	Rapsölkraftstoff
S	Schwefel
SAE	Society of Automotive Engineers
SCR	Selective Catalyst Reduction (selektive katalytische Reduktion)
SK	Säkombination
SM	Sämaschine
TFZ	Technologie- und Förderzentrum
TGL	Technischen Normen, Gütevorschriften und Lieferbedingungen
TR	Straßentransport
VTG	Variable-Turbinengeometrie-Lader am Turbolader
WGT	Turbolader nach dem Wastegate-Prinzip
WLTP	Worldwide Harmonized Light Duty Test Procedure
Zn	Zink

Formelzeichen

a	Variable im Algorithmus
b	Variable im Algorithmus
b_{as}	Y-Achsenabschnitt der Regressionsgeraden in min^{-1} , Nm oder kW
b_e	spezifischer Kraftstoffverbrauch in g/kWh
B_{CAN}	Kraftstoffverbrauch aus der ECU in l/h
c	Variable im Algorithmus
CF	Übereinstimmungsfaktor (engl. Conformity Factor)
d	Variable im Algorithmus
dn_{CAN}	Änderungsrate der Motordrehzahl aus der ECU in $\text{min}^{-1} \text{s}^{-1}$
dM_{CAN}	Änderungsrate des Motordrehmoments aus der ECU in $\% \text{s}^{-1}$
e	Variable im Algorithmus
EF_e	Emissionsfaktor für die Flottenbewertung
f	Variable im Algorithmus
f_u	Emissionsfaktor zur Bewertung von Traktor-Fahrzyklen
Hz	Herz
i	Variable im Algorithmus
I_{pedal}	Stromstärke zur Steuerung des Gaspedalstellers in A
L_{CAN}	Motorlast aus der ECU in %
LF	Lastfaktor
m	Steigung der Regressionsgeraden
N	Anzahl der Fahrzeuge einer Kategorie für die Flottenbewertung
n_{CAN}	Motordrehzahl aus der ECU in min^{-1}
ND	jährliche Nutzungsdauer in h
n_L	Grenzwert für die Motordrehzahl im Algorithmus in min^{-1}

n_{LD}	Leerlaufdrehzahl in min^{-1}
n_{ND}	Nenn Drehzahl in min^{-1}
n_{PTO}	Drehzahl an der Zapfwelle in min^{-1}
M_{CAN}	Motordrehmoment aus der ECU in %
M_L	Grenzwert für das Motordrehmoment im Algorithmus in %
M_{PTO}	Drehmoment an der Zapfwelle in Nm
P_B	Brennstoffleistung in kW
P_{Nenn}	mittlere Nennleistung der Fahrzeugkategorie in kW
P_{PTO}	Leistung an der Zapfwelle in kW
Q_m	Abgasmassenstrom in kg/h
R^2	Bestimmtheitsmaß in %
SE	Standardfehler in min^{-1} , Nm oder kW
SPN	Suspect Parameter Number
t	Zeit in s
t_b	Zeitkonstante im Algorithmus in s
t_e	Zeitkonstante im Algorithmus in s
t_A	Arbeitsverrichtungszeit in s
t_G	Gesamtzeit in s
t_W	Wendezeit in s
T	Temperatur in °C
T_{a-CAN}	Umgebungstemperatur aus der ECU in °C
T_{CW-CAN}	Kühlmitteltemperatur aus der ECU in °C
$T_{CW-Start}$	Kühlmitteltemperatur aus der ECU bei Messbeginn in °C
TAF	Transient Adjustment Factor
V_{CAN}	Fahrgeschwindigkeit aus der ECU in km/h
V_{GPS}	Fahrgeschwindigkeit aus den Positionsdaten in km/h
VF	Verschlechterungsfaktor
W_{Ist}	Zyklusarbeit gemessenen im NRTC in kWh
W_{Soll}	theoretische Bezugszyklusarbeit des NRTC in kWh
x	unabhängige Variable
y	abhängige Variable
α	Signifikanzniveau im Hypothesentest (t-Test)
λ	Lamda (stöchiometrisches Luft-Kraftstoff-Verhältnis)
ω	Kurswinkel aus den Positionsdaten in °
d ω	Kurswinkeländerung in ° s ⁻¹
d ω_L	Grenzwert zur Kurswinkeländerung im Algorithmus in ° s ⁻¹

1 Einleitung und Problemstellung

Der menschliche Bedarf an Energie und Ressourcen verursacht Emissionen in die Umwelt. Der Ausstoß an lokalen Schadstoffen gefährdet die Verfügbarkeit sauberer Atemluft und die Treibhausgase (THG) aus der Verbrennung fossiler Energieträger beschleunigen den Klimawandel.

Die Energiewende erfordert eine drastische Reduzierung von THG-Emissionen, eine effiziente, möglichst dezentrale Rohstoffnutzung und die Abkehr von fossilen sowie Hinwendung zu erneuerbaren Energiequellen. Dieser Wandel betrifft alle Sektoren (Strom, Wärme und Mobilität). In der Mobilität ergeben sich vielseitige Anforderungen an neue Energieträger hinsichtlich THG-Emissionen, Energiedichte, Infrastruktur, lokaler Emissionen, Kosten und Toxizität [119]. Bei mobilen Landmaschinen dominiert in Deutschland, nach wie vor der Einsatz des fossilen Dieselmotors [114]. Zur Senkung des "Product Carbon Footprints" (PCF) in der landwirtschaftlichen Produktion stellen regenerative Antriebskonzepte eine umwelt- und klimafreundliche Alternative dar [141]. Für landwirtschaftliche mobile Antriebe sind gas- oder strombasierte Energieträger aufgrund der vergleichsweise geringen Reichweiten und der kaum vorhandenen Infrastruktur nur eingeschränkt geeignet. Der Einsatz hochenergiedichter flüssiger Biokraftstoffe bietet die Chance zur nachhaltigen Flächenbewirtschaftung in landwirtschaftlichen Anwendungen mit hohem Leistungsbedarf. Die Land- und Baumaschinenindustrie setzt daher zur CO₂-Emissionsreduktion neben der Effizienzsteigerung auf die Nutzung von Biokraftstoffen [20]. In Landmaschinen konnte der Biokraftstoffeinsatz bereits mehrfach erfolgreich demonstriert werden [36][49][37][167]. Dennoch müssen sich im Bereich der Landmaschinen neue Antriebslösungen und Kraftstoffe erst etablieren. Aufgrund von THG-Minderungszielen ist zu erwarten, dass die Kraftstoffvielfalt für die motorische Verbrennung durch den Einsatz von Reinkraftstoffen, wie z. B. Rapsölkraftstoff, Biomethan sowie von Mischungen (B7, B20, ED95...) bis hin zur Umsetzung der Vielkraftstofftauglichkeit von Maschinen ("Multi-Fuel-Konzepte") zunimmt.

Die öffentliche Debatte rund um die Grenzwertüberschreitungen in der Schadstoffbelastung in deutschen Innenstädten verdeutlicht den Stellenwert der Luftqualität. Abseits des Straßenverkehrs, im Bereich der mobilen Maschinen (engl. Non-Road Mobile Machinery, kurz NRMM) sind die Landmaschinen der Hauptverursacher von Stickstoffdioxid- (NO_x) und Partikelemissionen [25]. Deshalb werden Abgasemissionen von Traktormotoren seit Jahren durch gesetzliche Regulierungen stufenweise stärker begrenzt. Die Typgenehmigungsprüfung von Traktormotoren wird seit dem Jahr 1999 am Motorenprüfstand im ausgebauten Zustand mit einem stationären Prüfzyklus (Non-Road-Steady-Cycle, kurz NRSC) durchgeführt [56][57]. Es folgten im Jahr 2013 die Einführung eines transienten Prüfzyklus (Non-Road Transient Cycle, kurz NRTC) mit dynamischem Drehzahl- bzw. Drehmomentverlauf und Kaltstartereignissen sowie ab dem Jahr 2019 ein Monitoring der Emissionen im tatsächlichen Fahrbetrieb (engl. Real Driving Emissions, kurz RDE). Die RDE-Messungen mit portablen Emissionsmesssystemen (PEMS) zielen auf die stichprobenartige Überwachung der RDE von Motoren in einer üblichen Anwendung (Maschine,

Arbeit, ...) bei natürlich schwankenden Umgebungsbedingungen (Wetter, Untergrund ...) ab.

In der Forschung wird eine weitere Methode für wiederkehrende Emissions- und Kraftstoffverbrauchsmessungen an Traktoren, ebenfalls unter wiederholbaren Bedingungen angewandt [35]. Dabei kann der stationäre Testzyklus NRSC am eingebauten Motor mittels einer Zapfwellenbremse am Traktor durchgeführt werden. Somit entfällt der Motorausbau im Vergleich zur gesetzlichen Prüfung. Bei der Anwendung des transienten Prüfzyklus NRTC am Traktor mit der Leistungsabnahme an der Zapfwelle reduzieren höhere Trägheitsmomente durch zusätzliche Nebenaggregate sowie Getriebekomponenten die Dynamik im Vergleich zum Motorenprüfstand. LANDIS 2012 [95] schlägt daher eine modifizierte NRTC-Variante für den Traktorenprüfstand vor. Dabei werden die transienten Drehzahl- und Drehmomentvorgaben des NRTC abschnittsweise alle zehn Sekunden (10sNRTC) gemittelt, wodurch die Dynamik reduziert wird, die Zyklusarbeit jedoch unverändert bleibt.

Problemstellung

Angesichts steigender Anforderungen durch die Abgasgesetzgebung an die Luftreinhaltung gilt es, die tatsächlichen Abgasemissionen von Traktoren zu minimieren. Gleichzeitig müssen für den Klimaschutz die THG-Emissionen durch eine Effizienzsteigerung und die Nutzung erneuerbarer Kraftstoffe reduziert werden. Für die Entwicklung schadstoff- und treibhausgasarmer Antriebe sind daher Messmethoden notwendig, welche die Abgasemissionen von Traktoren im tatsächlichen Arbeitseinsatz repräsentativ ermitteln können und eine gezielte Untersuchung von Einflussfaktoren (wie z. B. der Kraftstoffart) ermöglichen. Es ist unklar, ob bisherige Prüfmethoden eine systematische Erfassung der tatsächlichen Emissionen aus landwirtschaftlichen Traktorarbeiten unter kontrollierbaren Umgebungsbedingungen zulassen.

Die gesetzlich vorgeschriebenen Prüfzyklen für die Typgenehmigungsprüfung basieren überwiegend auf Lastprofilen von Baumaschinen und berücksichtigen die in der Praxis vorkommenden transienten Drehzahl- und Drehmomentwechsel nur unzureichend. Auch werden diese nicht am Gesamtsystem Traktor, sondern am ausgebauten Motor angewandt. Darüber hinaus lassen sich die anhand von bestehenden Prüfzyklen ermittelten Abgasemissionen nicht einzelnen landwirtschaftlichen Arbeiten zuordnen. Kenntnisse zu den spezifischen Abgasemissionen des Gesamtsystems Traktor mit Anbaugerät sind jedoch erforderlich, um die Umweltwirkungen landwirtschaftlicher Arbeiten bewerten zu können. Mit neuartigen portablen Emissionsmesssystemen (PEMS) kann das tatsächliche Emissionsverhalten (RDE) von Traktoren unter natürlich schwankenden Umgebungs- und Betriebsbedingungen über einen begrenzten Zeitraum erfasst werden. Messungen mit PEMS erfordern jedoch einen erheblichen Geräte- und Zeitaufwand und verursachen hohe Kosten. Die große Variabilität der Einsatzbedingungen im Feld führt dazu, dass Einzelmessungen meist wenig repräsentativ sind und die Wirkung von Einflussfaktoren auf die Messergebnisse nur eingeschränkt beurteilt werden kann.

Es wäre wünschenswert die bei landwirtschaftlichen Arbeiten auftretenden Lastprofile am Gesamtsystem Traktor reproduzieren zu können und dabei die Abgasemissionen sowie den Verbrauch zu bestimmen. Bei der Anwendung praxisnaher Prüfmethode am Traktorenprüfstand besteht die Unsicherheit, ob transiente Lastprofile aus dem tatsächlichen Fahrbetrieb als Fahrzyklus auf das Gesamtsystem Traktor übertragen werden können.

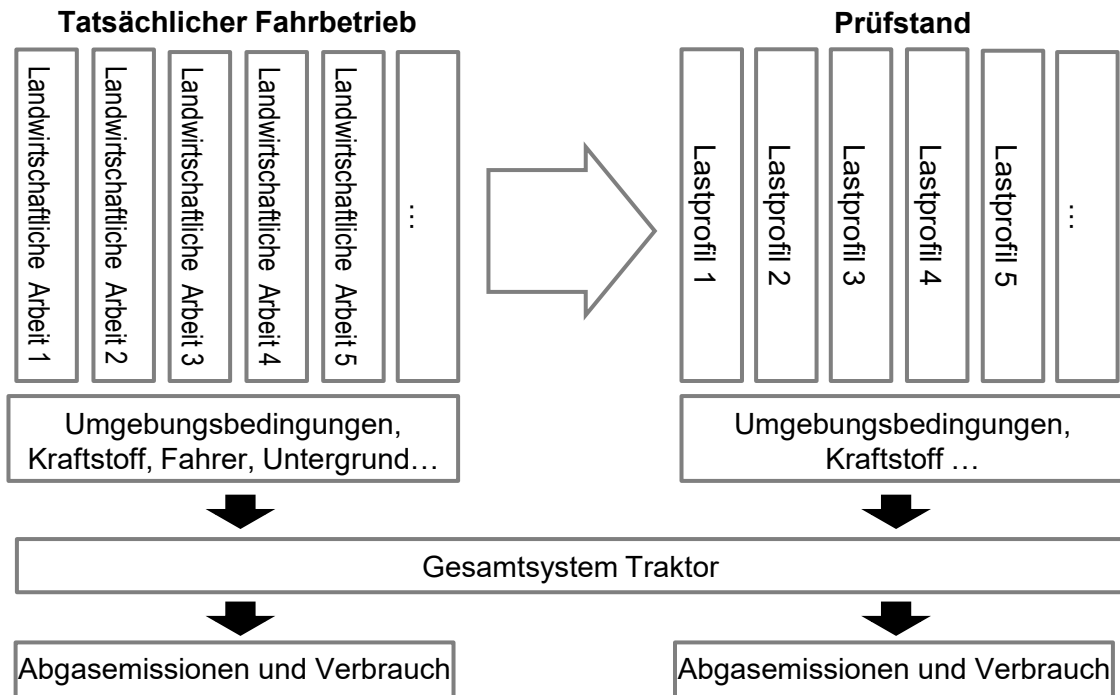


Abbildung 1: Schema zur Übertragung des tatsächlichen Fahrbetriebs als Fahrzyklus auf den Prüfstand zur Abgasemissions- und Verbrauchsmessung

Eine dahingehend neue Methode könnte zur Entwicklungsbegleitung für die Applikation von Motoreinstellungen, des Kraftstoffsystems, des Abgasnachbehandlungssystems ... in der Forschung und Industrie verwendet werden. Ferner können noch nicht vorhandene Daten zur Bewertung der THG und gesetzlich limitierten Abgasemissionen für neue Kraftstoffe und spezifische landwirtschaftliche Arbeiten gewonnen werden.

2 Messung von Abgasemissionen an Traktoren

2.1 Standardtraktor

Der Einsatz von Standardtraktoren hat die Produktivität in der Landwirtschaft signifikant verbessert und hat bis heute einen hohen Stellenwert in der Landtechnik [142]. Allein in Deutschland wurden im Jahr 2018 über 27000 neue Traktoren zugelassen [178]. Im Bereich der Landtechnik haben Traktoren mit 84 % einen deutlich höheren Anteil an den CO₂-Emissionen als Mähdrescher (7 %) und übrige Landmaschinen (9 %) [25]. Ein wesentlicher Grund für die hohe Bedeutung ist, dass mit Traktoren eine Vielzahl von landwirtschaftlichen Arbeiten durchgeführt und somit eine hohe jährliche Auslastung der Maschine erreicht werden kann. Im Vergleich zu Frontsitz- oder Mittelsitztraktoren, Geräteträgern sowie Sonderausführungen kommt den Standardtraktoren, welche einen Fahrersitz im hinteren Bereich des Traktors besitzen, in der Landwirtschaft seit Jahrzehnten die höchste Bedeutung zu [32][142][143]. Der Einsatz von Dieselmotoren in Standardtraktoren ist gegenwärtig Stand der Technik.

2.1.1 Dieselmotor

Im Dieselmotor wird ein Gemisch aus Kraftstoff und Verbrennungsluft durch starke Kompression gezündet. Bei der nachfolgenden Verbrennung wird unter Luftüberschuss die chemische Energie aus dem Kraftstoff in kinetische Energie und Wärme umgewandelt. Das Gesamtsystem des Dieselmotors kann in das Kraftstoffsystem, das Einspritzsystem, das Aufladesystem, das Verbrennungssystem, in mechanische Systeme, das Kühl- und Schmiersystem sowie in das Abgassystem untergliedert werden [115]. Die Teilsysteme und die Abläufe der dieselmotorischen Verbrennung werden von MOLLENHAUER und TSCHÖKE (2007) [115], BASSHUYSEN und SCHÄFER (2015) [12], REIF (2012) [139] sowie MERKER und TEICHMANN (2014) [109] detailliert beschrieben und nachfolgend zusammengefasst.

2.1.1.1 Motorteilsysteme

Dieselmotoren unterscheiden sich in der Ausgestaltung des Brennraums und der Kraftstoffeinspritzung. Bei der indirekten Einspritzung (IDI) in eine Vor- oder Wirbelkammer wird der Kraftstoff mit der Verbrennungsluft vermischt und dann in den Brennraum geleitet. Beim Direkteinspritzer (DI) wird der Kraftstoff direkt im Brennraum in eine Mulde des Kolbenbodens injiziert. DI-Motoren haben sich aufgrund der höheren Effizienz und neuer Einspritz- und Aufladesysteme gegenüber Nebenkammermotoren weitestgehend durchgesetzt. [115]

Die Verbrennungsluftzufuhr in die Brennkammer erfolgt bei Saugmotoren rein durch Unterdruck. Heutzutage ermöglichen Motoren mit Turboaufladung durch gezieltere Zufuhr an komprimierter Verbrennungsluft in den Brennraum eine höhere Motorleistung bei niedrigerem Kraftstoffverbrauch sowie geringeren Abgasemissionen im Vergleich zu

Saugmotoren. Dabei nimmt die Abgasturbine den Abgasstrom auf und überträgt die Energie über eine Welle auf einen Strömungsverdichter auf der Ansaugluftseite [139]. Die optionale Ladedruckregelung dient bei geringem Abgasmassenstrom dazu, ein möglichst hohes Drehmoment zu erreichen und bei hoher Verdichtungsleistung zum Motorteileschutz. Beim "Wastegate"-Turbolader (WGT) kann das Abgas über eine regelbare Bypass-Klappe an der Abgasturbine vorbeigeführt werden. Die Leistung des Turboladers wird bei der variablen Turbinengeometrie (VTG-Lader) hingegen durch verstellbare Schaufeln vor der Abgasturbine ladedruckabhängig eingestellt.

Wesentliche Bestandteile des Niederdruckkraftstoffsystems sind nach REIF (2012) [139] der Kraftstoffbehälter, der Vorfilter, die Kraftstoffpumpe, der Kraftstofffilter und die Kraftstoffleitungen. Das Einspritzsystem bringt den Kraftstoff mit Hilfe einer Pumpe unter hohem Druck in den Brennraum ein. Typische Bauarten sind die Reiheneinspritzpumpe, Verteilereinspritzpumpe, Einzelzylinderpumpe, Pumpe-Düse-Einheit, Pumpe-Leitung-Düse (PLD) sowie Hochdruckspeicher-Systeme (Common-Rail) [115]. Im Gegensatz zu früheren Einspritztechniken sind bei Hochdruckspeicher-Systemen (Common-Rail) die Druckerzeugung und Einspritzung durch die Bevorratung des Kraftstoffs in der Verteilerleiste (Rail) voneinander getrennt. Aufgrund der hohen Freiheitsgrade bei der elektronisch gesteuerten Einspritzung bei hohem Druckniveau bis über 2500 bar sind Common-Rail-Systeme in modernen Dieselmotoren mittlerweile Stand der Technik.

2.1.1.2 Verbrennung und Schadstoffe

Die **dieselmotorische Verbrennung** läuft in den Teilschritten Einspritzung, Strahlzerfall, Kraftstoffverdampfung, Diffusion, Zündung sowie Verbrennung ab und wird in MOLLENHAUER und TSCHÖKE (2007) [115] ausführlich beschrieben. Für die Verdampfung und Gemischbildung muss der Einspritzstrahl in kleine Tropfen mit einer möglichst großen Oberfläche zerfallen. Der „Primärzerfall“ des Kraftstoffs erfolgt in der Einspritzdüse durch Kavitation und turbulente Strömungen. Weiter entfernt von der Düse setzt sich der Zerfall des Strahls durch aerodynamische Kräfte („Sekundärzerfall“) fort. Für die chemischen Verbrennungsreaktionen müssen die Kraftstofftröpfchen in der Verbrennungsluft verdampfen. Dieser Vorgang wird durch den Wärmeübergang der verdichteten Luft zum flüssigen Kraftstoff und durch die einspritzdruckabhängige kinetische Energie des Kraftstoffstrahles beeinflusst. Eine feine Zerstäubung der Kraftstofftropfen begünstigt die Reaktionsgeschwindigkeit und den Verdampfungsprozess. Das Gemisch im Brennraum ist zündfähig, sobald das stöchiometrische Luft-Kraftstoff-Verhältnis, welches auch als Lamda λ bezeichnet wird, im Bereich zwischen 0,5 und 1,5 vorliegt. Die Voraussetzungen zur Selbstzündung werden durch den Druck, die Temperatur, die lokale Dampfkonzentration im Brennraum und durch die Zündwilligkeit des Kraftstoffs bestimmt. Die Zeitspanne zwischen Einspritzbeginn und Zündung wird als Zündverzug bezeichnet, sie beträgt für Dieselmotoren in etwa 0,3 bis 1,5 ms [115]. Der physikalische Zündverzug umfasst dabei den Strahlzerfall, die Verdampfung sowie die Erzeugung eines reaktionsbereiten Luft-Kraftstoffgemisches. Der chemische Zündverzug umfasst die Vorreaktion zur Entstehung von Zündradikalen. Ein geringer Anteil des Kraftstoffs kann sich vor Zündbeginn mit der Verbrennungsluft

vermischen. In dieser frühen Verbrennungsphase wird durch das hohe Luft-Kraftstoff-Verhältnis λ die Entstehung von Partikeln gehemmt und von Stickstoffoxiden (NO_x) begünstigt. Da die Einspritzdauer in vielen Betriebspunkten den Zündverzögerung übersteigt, wird der meiste Kraftstoff in den laufenden Verbrennungsprozess eingespritzt. Der lokale Kraftstoffüberschuss (bei geringem λ) befördert die Partikelemission und hemmt die NO_x -Bildung. Eine inhomogene Ladungs- und Temperaturverteilung kann beispielsweise durch konstruktive Maßnahmen am Motor, durch günstige Kraftstoffeigenschaften (z. B. Temperaturniveau, Heizwert, Dichte, Viskosität ...) und der Ausgestaltung der Einspritzung optimiert werden. So bilden sich die Abgasemissionen aus Produkten vollständiger und unvollständiger Verbrennung abhängig vom Brennverfahren, verwendetem Kraftstoff, der Gemischbildung und den örtlichen Luftverhältnissen. [115]

Unter dem Begriff der **Stickstoffoxide (NO_x)** werden in der Regel die Verbindungen Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO_2) zusammengefasst. Die Emissionen von thermischem NO bildet sich nach den Zeldovich-Reaktionen bei lokalen Spitzentemperaturen über 2000 °C durch die Aufspaltung von lokal überschüssigem elementarem Sauerstoff (O_2) zu atomarem Sauerstoff (O) und der Reaktion mit elementarem Stickstoff (N_2). Der daraus entstehende atomare Stickstoff (N) reagiert mit elementarem Sauerstoff (O_2) weiter zu NO und O . Ferner entstehen in kraftstoffreichen Zonen (z. B. hinter der Flammenfront) NO und Wasserstoff (H) aus OH -Radikalen und N . Die innermotorischen NO_2 -Emissionen haben im Dieselmotorbetrieb in etwa einen Anteil von ca. 10 % an den NO_x -Gesamtemissionen und entstehen aus NO durch die Reaktion mit HO_2 -Radikalen und OH -Radikalen. [115]

Partikel, die festen Bestandteile des Abgases, setzen sich aus elementarem Kohlenstoff (Ruß), organischen Verbindungen, nicht verbrannten Kohlenwasserstoffen oder Sulfaten zusammen. Die Bildung der Sulfate ist stark vom Schwefelgehalt im Motoröl oder Kraftstoff abhängig. Bei der Verbrennung bilden sich Primärpartikel mit einem Durchmesser von unter 10 nm aus. Bei der Elementarkohlenstoff-Hypothese wird angenommen, dass bei der Verbrennung die Kohlenstoffatome zwischenzeitlich elementar vorliegen und unter Sauerstoffentzug Primärpartikel aus hexagonalen und pentagonalen Strukturen entstehen. Ferner besagt die Polyzyklen-Theorie, dass Kraftstoffabbauprodukte bei Sauerstoffmangel zu Ethin (C_2H_2) reagieren. Durch die wiederkehrende Anlagerung von Ethin entstehen polyzyklische Makromoleküle, welche in Schichten die Primärpartikel bilden. Die Primärpartikel schließen sich im Abgasstrom zu Rußagglomeraten mit durchschnittlichen Größen von ca. 80 bis 100 nm zusammen. Die Rußpartikel oxidieren zu großen Teilen beim Sauerstoffkontakt in den luftreichen Zonen im Abgas bei Temperaturen über 700 °C nach. [115]

Kohlenwasserstoffemissionen (HC) entstehen bei unvollständiger Verbrennung des Kraftstoffs. In Betriebspunkten mit geringen Einspritzmengen oder im Kaltstart können niedrige Brennraumtemperaturen die vollständige Kraftstoffverdampfung hemmen. Auch in Brennraumzonen mit starkem Kraftstoffüberschuss können die HC-Emissionen ansteigen, wie es z. B. infolge verkorkter Einspritzdüsen mit unzureichendem Strahlerfall beobachtet werden kann. Nach der Verbrennung verdampfte Kraftstoffreste aus den Düsenöffnungen und dem Sackloch können zudem in das Abgas gelangen. Mit der Entwicklung

hin zu möglichst geringem Sacklochvolumen in neuen Motorengenerationen konnten die HC-Emissionen gesenkt werden. [115]

Bei Dieselmotoren entsteht **Kohlenstoffmonoxid (CO)** in Betriebspunkten nahe der Rußgrenze ($\lambda < 1,2$) bei Sauerstoffmangel und unvollständiger Oxidation des Kraftstoffs. Bei geringen Einspritzmengen können zudem die niedrigen Abgastemperaturen die Nachoxidation von CO im Brennraum und Abgasstrang hemmen. Die CO-Emissionen können durch eine homogene Gemischbildung der Verbrennungsprodukte mit dem Restsauerstoff bei möglichst hohen Temperaturen gemindert werden. Dazu trägt neben der Betriebsweise auch eine optimierte Geometrie von Brennraum und Einspritzung bei. [115]

2.1.1.3 Schadstoffreduktion

Die Schadstoffreduktion beim Betrieb von Dieselmotoren findet durch innermotorische Maßnahmen und mit Abgasnachbehandlung statt.

Die **innermotorischen Einstellungen des Motors** unterliegen häufig einem Zielkonflikt aus Reduktion von Stickstoffoxidemissionen einerseits und Minderung von Partikelemissionen andererseits. Bei frühem **Einspritzbeginn** steigt der Druck im Brennraum schneller an als bei späten Einspritzungen. Bei spätem Einspritzbeginn nehmen die NO_x-Emissionen tendenziell ab, da sich bei zunehmender Expansion der Druck und die Spitzentemperatur im Brennraum verringern. Bei frühem Einspritzbeginn sinken durch die besseren Voraussetzungen für die Aufbereitung des Luft-Kraftstoff-Gemischs die Partikelemissionen und durch die Annäherung an eine isochore Verbrennung der Kraftstoffverbrauch. Bei Common-Rail-Motoren wird je nach Betriebspunkt auch vor und nach der Haupteinspritzung zusätzlich Kraftstoff eindosiert: Eine gering dosierte **Voreinspritzung** beeinflusst vorrangig das Verbrennungsgeräusch. Eine Nacheinspritzung, angelagert an die Haupteinspritzung, kann zu einer besseren Durchmischung des Brennraums und Temperaturanhebung zur Nachoxidation von Ruß beitragen. Bei einer noch späteren **Nacheinspritzung** wird der Kraftstoff im Brennraum nur teilweise verbrannt und oxidiert erst anschließend im Abgasstrang. Die späte Nacheinspritzung kann somit zum Erreichen der Betriebstemperatur der Abgasnachbehandlung (z. B. in Kaltstartphasen) oder Abbau von Ablagerungen im Abgasstrang genutzt werden. Ein höherer **Einspritzdruck** steigert die kinetische Energie des Kraftstoffstrahls und fördert damit die Zerstäubung der Kraftstofftropfen. Die so verbesserte Gemischaufbereitung führt zu einer vollständigeren Verbrennung und geringen Partikel-, HC- und CO-Emissionen. Ferner fördert ein höherer Einspritzdruck die lokalen Spitzentemperaturen und damit die NO_x-Emissionen. Dieser Effekt lässt sich durch eine Abgasrückführung einschränken. [115][139]

Bei der **Abgasrückführung (AGR)** wird zur NO_x-Reduktion ein Teil des Abgasmassenstroms über ein Ventil zurück in den Ansauglufttrakt geleitet. Das zugeführte inerte Abgas verlangsamt den Verbrennungsprozess, führt zu einer späteren Zündung und zu geringeren Spitzentemperaturen. Die spätere Verbrennung bewirkt zudem einen Anstieg des Kraftstoffverbrauchs. Die Verknappung des Sauerstoffstoffangebots im Brennraum begünstigt die unvollständige Verbrennung und damit die Bildung von Ruß und CO. Aufgrund

des Zielkonflikts zwischen NO_x - und Partikelemissionen, muss die AGR-Rate auf die Funktion der nachgeschalteten Abgasnachbehandlung abgestimmt sein. [139][115]

Ein **Dieseloxidationskatalysator (DOC)** besteht aus einem Trägermaterial mit katalytischer Beschichtung und dient in erster Linie dazu, die CO- und HC-Emissionen aus der Verbrennung zu oxidieren. Die Reaktionen finden oberhalb von ca. 200 °C statt und führen zu einer Wärmefreisetzung. In Kombination mit einer späten Kraftstoffnacheinspritzung und dem so erhöhten HC-Ausstoß kann die AGN-Temperatur gezielt angehoben werden. Zudem oxidiert der DOC einen Teil des NO zu NO_2 , welches für die Reaktionsmechanismen in nachgeschalteten AGN-Bauteilen zur Rußoxidation oder für die selektive katalytische Reduktion benötigt wird. [115][139]

Die **selektive katalytische Reduktion** (engl. selective catalytic reduction, kurz **SCR**) dient zur Minderung der NO_x -Emissionen und erfolgt weitestgehend entkoppelt vom Betrieb des Motors durch die Eindüsung eines selektiv wirkenden Reduktionsmittels. Der Einsatz einer Lösung aus 32,5 % reinem Harnstoff und 67,5 % demineralisiertem Wasser (auch Ad-Blue® oder DEF genannt) nach DIN 70070 ist dabei Stand der Technik. Das Reduktionsmittel Ammoniak (NH_3) entsteht in der Thermolyse (2.1) und der Hydrolyse (2.2) aus der injizierten wässrigen Harnstofflösung vor dem Eintritt in den Katalysator. Zunächst wird in der Thermolyse (2.1) der Harnstoff ($(\text{NH}_2)_2\text{CO}$) in Ammoniak (NH_3) und Isocyanensäure (HNCO) umgesetzt:



In der anschließenden Hydrolyse (2.2) reagiert die Isocyanensäure (HNCO) mit Wasser zu NH_3 und CO_2 :



Um Ablagerungsbildung an den Bauteilen des SCR-Systems bei der Thermolyse (2.1) und der Hydrolyse (2.2) zu verhindern sind Betriebstemperaturen oberhalb von 200 °C erforderlich. Die Reduktion der NO_x -Emissionen durch NH_3 im Katalysator erfolgt durch verschiedene SCR-Reaktionen, welche in den Gleichungen (2.3) (2.4) und (2.5) zu sehen sind [139][109].





Die sogenannte schnelle SCR-Reaktion (2.3) entsteht bevorzugt in einem Bereich zwischen 170 °C und 300 °C. Für diese Reaktion im unteren Betriebstemperaturbereich sind für hohe Umsatzraten gleiche Anteile von Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO₂) nötig. Das bevorzugte NO₂/NO-Verhältnis von 1,0 kann durch einen vorangeschalteten Dieseloxydationskatalysator (DOC) erreicht werden, da aus der Verbrennung vorrangig NO hervorgeht. Die langsamer ablaufenden Reaktionen (2.4) und (2.5) erfolgen meist bei NO₂- bzw. NO-Überschuss. In unerwünschten Reaktionen kann sich z. B. Lachgas (N₂O) und H₂O aus NH₃ und NO₂ bilden. Ferner kann die NO_x-Umsatzrate bei hohen Temperaturen über 500 °C durch die direkte Reaktion von Sauerstoff (O₂) mit NH₃ zu elementarem Stickstoff (N₂) und H₂O sinken. [139]

Die NO_x-Umsatzrate wird durch die Dimensionierung, Dosier- sowie Regelstrategie und Beschichtung beeinflusst. Die Dosierung an wässriger Harnstofflösung kann auf Basis von Modellen z. B. in Abhängigkeit der Abgastemperatur, der Motordrehzahl sowie der Einspritzmenge gesteuert werden. Gegenwärtige Systeme regeln die Dosiermenge zusätzlich anhand von NO_x-Sensorsignalen, welche vor und nach dem SCR-System installiert sind. Die Katalysatoren können kurzzeitig NH₃ speichern, wodurch eine kontinuierliche NO_x-Reduktion auch bei schnell wechselnden Betriebsbedingungen im transienten Motorbetrieb möglich ist. Die Dosiermenge wird durch das Feed-Verhältnis ausgedrückt. Es beschreibt das Verhältnis der dosierten NH₃-Konzentration zur zu reduzierenden NO_x-Konzentration nach der Verbrennung und vor dem Eintritt in das SCR-System. Bei geringer Dosiermenge (Feed-Verhältnis < 1) kommt es zu sinkenden Umsatzraten, da nicht genügend NH₃ zur NO_x-Reduktion zur Verfügung steht. Im deutlich überstöchiometrischen Bereich (Feed-Verhältnis > 1) kann überschüssiges NH₃ den Katalysator passieren. Dieser unerwünschte NH₃-Schlupf wird häufig durch einen zusätzlichen NH₃-Oxydationskatalysator (auch NH₃-Sperrkatalysator genannt) reduziert. [139]

Die Herausforderung ist es, die Mindestbetriebstemperatur (engl. light-off temperature) des Katalysators durch eine verbesserte Ammoniakbereitstellung sowie neue Katalysator-technik herabzusetzen und das SCR-System in Kaltstartphasen aufzuheizen. Gegenstand der Forschung ist es zudem die Deaktivierung der katalytischen Beschichtung durch Ablagerungen, thermische Alterung und Katalysatorgifte zu verringern. Katalysatorgifte gelangen durch den Motorabrieb (z. B. Cu), durch Motoröladditive (z. B. Ca, Mg, P, S, Zn) sowie durch den Kraft- und Harnstoff (z. B. P, Ca, Mg, K, Na) in das Abgas [90].

Der **Dieselpartikelfilter (DPF)** wird zur Abscheidung der festen Abgasbestandteile verwendet und ist in modernen Dieselmotoren Stand der Technik. Bei Traktoren der Abgasstufen IIIB und IV werden üblicherweise Wandstromfilter (sogenannte "geschlossene" Partikelfilter) mit einem möglichen Abscheidegrad der Partikelmasse von über 95 % eingesetzt. Wandstromfilter bestehen überwiegend aus Siliziumkarbit oder Cordierit und sind in Kanalstrukturen aufgebaut mit abwechselnd verschlossenen Kanalein- und ausgangsseiten

[109]. Wie in Abbildung 2 gezeigt wird, strömt das Rohabgas in die offenen Kanäle, gelangt dann durch die porösen Keramikstrukturen der 300 bis 400 μm starken Kanalwände bevor es als Reinabgas durch die benachbarten Kanäle wieder aus dem Filter austritt [139].

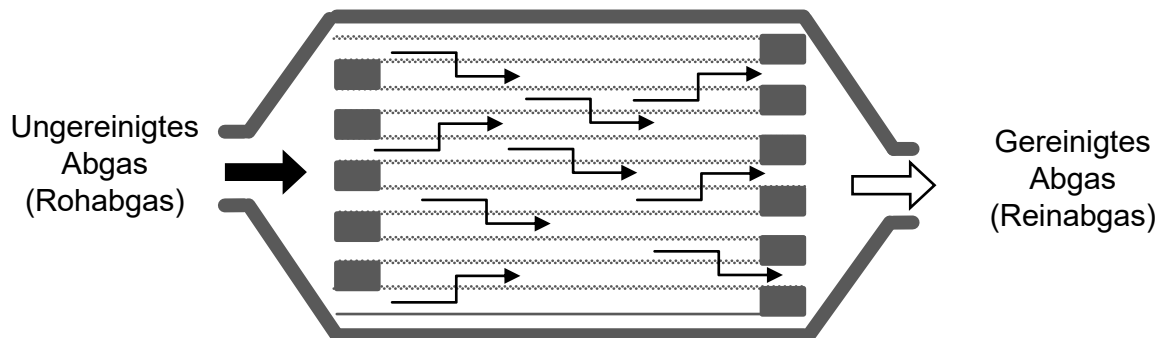


Abbildung 2: Aufbau eines Wandstromfilters zur Partikelabscheidung

Der Abscheidegrad ist von den Parametern Porengröße (üblicherweise zwischen 10 und 30 μm) und Porenvolumen sowie der Zelldichte abhängig. Da die nach der Verbrennung entstehenden agglomerierten Dieselrußpartikel mit ca. 0,1 μm Durchmesser überwiegend kleiner ausfallen als die Porenweite muss sich zur effektiven Abscheidung erst ein Filterkuchen aus diesen Partikeln aufbauen. Ein zunehmender Beladungszustand kann somit die Partikelabscheidungsrate begünstigen. Der im Filter akkumulierte Ruß erzeugt einen Abgasgegendruck. Der Differenzdruck zwischen Ein- und Ausgang des DPF beträgt bei Nenndrehzahl und -last bei einem neuen DPF ca. 30 mbar und sollte im Betrieb durch die Beladung einen kritischen Bereich von 200 bis 300 mbar nicht überschreiten [12]. Durch die zusätzliche Arbeit zum Ausschleiben des Abgases steigt der Kraftstoffverbrauch. Bei hohem Abgasgegendruck über 300 mbar besteht die Gefahr, dass die Funktion des Motors beeinträchtigt wird [12]. Deshalb ist die DPF-Beladung begrenzt und die angesammelten Rückstände müssen regelmäßig aus dem Filter entfernt werden. Der elementare Kohlenstoff (Ruß) kann oberhalb von ca. 500 $^{\circ}\text{C}$ oxidiert werden. Im normalen Betrieb wird eine solche Abgastemperatur dauerhaft meist nicht erreicht, wodurch nach mehreren 100 Bh die Rußbeladungsgrenze erreicht wird. Bei vielen Systemen wird die Abgastemperatur durch eine diskontinuierliche Kraftstoffnacheinspritzung in den Brennraum oder in den Abgasstrang aktiv angehoben und damit der Rußabbrand in Gang gesetzt. Der Einsatz von Katalysatoren und NO_2 als Oxidationsmittel im Abgas ermöglicht die Regeneration auch bei geringen Abgastemperaturen ab etwa 300 $^{\circ}\text{C}$. Bei einem günstigen Verhältnis aus Rußoxidationsrate und Rußmassenstrom kann der DPF auch passiv, das heißt auch ohne aktive Einleitung des Rußabbrands, kontinuierlich unterhalb der Rußbeladungsgrenze betrieben werden. Im Gegensatz zum Ruß verbleibt die Asche nach der Regeneration im DPF und führt somit über die Lebensdauer langsam zu einem Anstieg des Differenzdrucks. Aschebildner werden hauptsächlich über mitverbranntes Motoröl sowie dem verwendeten Harnstoff und Kraftstoff eingetragen. Bei zu hoher Akkumulation an Asche im Partikelfilter muss dieser erneuert oder im ausgebauten Zustand z. B. mit einer Reinigungsflüssigkeit aufbereitet werden. [115][139]

2.1.1.4 Betriebszustände

Die Drehzahl und das Drehmoment von Dieselmotoren werden hauptsächlich durch die Menge des eingespritzten Kraftstoffs geregelt. Der Dieselmotor wird je nach Anwendung auf unterschiedliche Weise betrieben [139][12]:

- Unter **Volllast** gibt die Motorsteuerung die notwendige Einspritzmenge frei, um das höchste Drehmoment abzurufen. Die maximal zulässige Einspritzmenge ist abhängig von der Motordrehzahl und wird von der sogenannten Volllastkennlinie, oder auch Dachkurve genannt, begrenzt. Dieser Betriebszustand kommt bei Traktormotoren beispielsweise bei der schweren Bodenbearbeitung, wie z. B. beim Pflügen vor.
- Im **Leerlauf** wird die Kraftstoffeinspritzung so geregelt, dass die innere Reibung des Motors überwunden wird und sich die Leerlaufdrehzahl einstellt. Dieser Betriebszustand wird auch als Nulllast bezeichnet. Die Leerlaufdrehzahl bewegt sich bei Traktormotoren im Bereich zwischen 600 und 900 min⁻¹.
- Die **Teillast** beschreibt den Motorbetrieb im Bereich zwischen Leerlauf und Volllast. Im Teillastbereich ist der Wirkungsgrad meist geringer als im Volllastbetrieb, da durch die geringere Kraftstoffeinspritzmenge anteilig höhere Verluste (z. B. durch Reibung oder beim Ladungswechsel) im Vergleich zur Volllast auftreten. Der untere Teillastbereich wird auch als Schwachlastbetrieb bezeichnet.
- Im **Schubbetrieb** wird dem Motor, z. B. bei einer Bergabfahrt, zusätzliches Drehmoment über den Fahrtrieb zugeführt. Aufgrund der externen Energiezufuhr wird die Kraftstoffeinspritzung in vielen Fällen ausgesetzt.
- Im **stationären Betrieb** läuft der Motor über einen längeren Zeitraum bei konstanter Drehzahl und konstantem Drehmoment.
- Im **transienten Betrieb** ändern sich die Drehzahl bzw. das Drehmoment des Motors innerhalb weniger Sekunden. Der Zustand wird auch als instationärer bzw. dynamischer Betrieb bezeichnet.

In den Anfängen der Abgasgesetzgebung wurde das Emissionsverhalten von Dieselmotoren bei der Typgenehmigung überwiegend im stationären Betrieb erfasst. In der Realität kommt es bei vielen Fahrsituationen, z. B. beim Beschleunigen, Verzögern oder Gangwechsel, zu dynamischen Drehzahl- und Drehmomentänderungen. Im transienten Betrieb beeinflussen die Verzögerungen im Turbolader- sowie im Kraftstoffeinspritzsystem den Ablauf der Gemischaufbereitung im Brennraum und damit die NO_x-, CO-, HC- und PM-Emissionen [105][11][133][134]: Bei einem Leistungsanstieg steht zunächst ein niedriger Abgasmassenstrom, eine niedrige Turboladerdrehzahl und somit ein geringer Ladedruck zur Verfügung. Der für den Leistungsanstieg zusätzlich eingespritzte Kraftstoff neigt unter diesen Bedingungen mit geringem Sauerstoffangebot zur unvollständigen Verbrennung. Ein plötzlicher Drehzahl- oder Drehmomentabfall begünstigt hingegen die Bildung von lokalen Sauerstoff- und Kraftstoffüberschüssen und damit vorrangig den NO_x-Ausstoß [105].

Die Unterschiede zwischen stationärem und transientem Motorbetrieb und die Auswirkungen auf das Emissionsergebnis wurden mehrfach untersucht [183][11][135][184]. YUM et al. (2017) [183] beobachteten die Auswirkungen zyklischer Drehmomentwechsel im Intervall zwischen 20 s und 5 s auf den spezifischen Dieselkraftstoffverbrauch und die NO_x-Emissionen. Lediglich bei den Drehmomentschwankungen im 5 s Intervall im mittleren Lastbereich von 24,6 % stieg der spezifische Kraftstoffverbrauch in g/kWh um bis zu 6,7 % an. Gleichzeitig sank der NO_x-Ausstoß um bis zu 9,1 % im Vergleich zum quasi-stationären Betrieb. Bei höherer mittlerer Last von 41 % bzw. 57 % waren die Ergebnisse im transienten und stationären Betrieb vergleichbar. In der Untersuchung von BANE (2002) [11] stiegen bei einer ähnlichen Versuchsanstellung die NO_x- und CO₂-Emissionen um 6 % sowie CO und PM um 44 bzw. 48 % bei Betriebspunktwechsel in Intervallen von 10 s im Vergleich zum quasi-stationären Betrieb an. Bei zunehmender Dynamik nahmen in den 2 s Intervallen die Emissionen für CO₂ um 1 %, für NO_x um 11 % und für CO sowie PM um 20 % im Vergleich zu den 10 s Intervallen weiter zu.

Neben der Änderungsgeschwindigkeit von Drehzahl und Drehmoment üben auch die Kraftstoffeigenschaften einen Einfluss auf das Emissionsverhalten im transienten Betrieb aus. So stellen RAKOPOULOS et al. (2015) [135] und ZARE et al. (2017) [184] beim Einsatz von Biodiesel (B100) im transienten Motorbetrieb fest, dass durch den Sauerstoffgehalt des Kraftstoffs im Vergleich zum sauerstofffreien Dieselkraftstoff die NO_x-Emissionen ansteigen und die Partikelemissionen sinken. Laut den Autoren förderte die Verfügbarkeit des Sauerstoffs aus dem Kraftstoff im Brennraum die vollständige Verbrennung sowie höhere Spitzentemperaturen im Vergleich zum Diesel in transienten und stationären Phasen. Es wird in der Literatur [154] zudem darauf hingewiesen, dass beim Einsatz eines Kraftstoffs mit geringerer Energiedichte als Dieselkraftstoff und bei dieseloptimierten Motoreinstellungen das Verbrennungsluftverhältnis zunimmt. Das zusätzliche Sauerstoffangebot im Brennraum kann das NO_x-Entstehungspotential deutlich steigern.

2.1.2 Leistungsübertragung

Das Traktorsystem stellt, über das Fahrwerk, die Zapfwelle und Nebenaggregate, dem Anbaugerät mechanische, hydraulische und elektrische Energie zur Verfügung. Abbildung 3 zeigt exemplarisch die Energiebilanz eines Traktors bei der Feldarbeit. Nur ein Teil der zugeführten Brennstoffleistung kann tatsächlich genutzt werden. Als Verluste entstehen Motorabwärme, die überwiegend durch die Kühlung abtransportiert wird sowie Abgaswärme, die durch das Abgassystem in die Umgebung gelangt. Die verbleibende Motorleistung dient überwiegend für den Fahrtrieb und den Antrieb der Zapfwelle. Ein kleinerer Teil davon ist für den Antrieb von Nebenaggregaten notwendig.

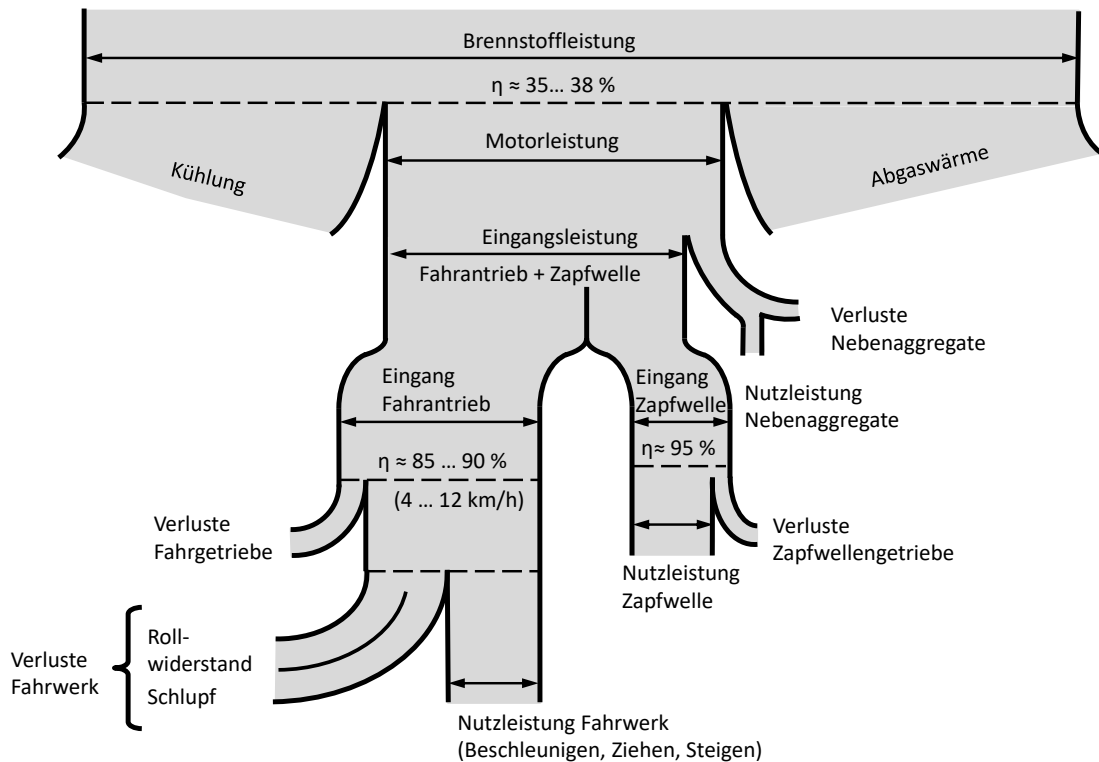


Abbildung 3: Beispielhafte Energiebilanz eines Traktors (nach RENIUS [142], verändert)

Nebenaggregate wie die Schmierölpumpe, die Kühlmittelpumpe, der Lüfter und das Kraftstofffördersystem sichern die einwandfreie Funktion des Motors [12]. Weitere typische motorseitige Verbraucher sind der Druckluft- und Klimakompressor, der elektrische Generator sowie die Hydraulikpumpe [12]. Derzeitige am Markt übliche Traktoren können max. 19 bis 63 kW hydraulische Leistung und max. 0,73 kW elektrische Leistung über den ISOBUS-Standard [78] auf ein Anbaugerät übertragen [66]. Der Wirkungsgrad hydraulischer Systeme in Traktoren beträgt im Mittel ca. 70 % [8]. Es ist zu erwarten, dass aufgrund der höheren Wirkungsgrade von über 90 % sowie der flexiblen Steuer- und Regelbarkeit zukünftig leistungsstärkere elektrische Systeme in Traktoren und Anbaugeräten vermehrt integriert werden [124][66]. Die Leistungsaufnahme von Nebenaggregaten wird auf durchschnittlich acht Prozent [4] der Motorleistung geschätzt. Es ist davon auszugehen, dass der Leistungsbedarf der Nebenaggregate motor- und betriebsspezifisch stark variiert.

Die Getriebesysteme im Traktor übertragen die mechanische Leistung des Verbrennungsmotors auf den Fahrtrieb und die Anbaugeräte (Eingangsleistung). Die Kraftübertragung des Fahrtriebs erfolgt über die Kupplung, das Fahrgetriebe und das Differenzial auf die Hinterräder sowie im Allradbetrieb auch auf die Vorderräder [144]. In Traktoren kommen mechanisch abgestufte und hydrostatisch-stufenlose Fahrgetriebe zum Einsatz [62]. Häufig wird die synchronisierte Gangschaltung eines mechanischen Getriebes mit

Lastschaltstufen kombiniert, um Abstufungen ohne Zugkraftunterbrechung durch die Betätigung der Kupplung zu ermöglichen [62]. Bei hydrostatisch-stufenlosen Fahrtrieben wird die Übersetzung des Getriebes mit der Hydrostatik stufenlos verändert [32]. Der Wirkungsgrad solcher leistungsverzweigter Getriebe ist vom Verhältnis von hydrostatischer zu mechanischer Kraftübertragung abhängig [139]. In der Literatur wird ein durchschnittlicher Getriebewirkungsgrad von 85 bis 90 % angegeben [142][8]. Die Verluste des Fahrwerks bei der Zugarbeit durch Rollwiderstand und Schlupf hängen vom Untergrund (Festigkeit, Bodenart, Feuchte usw.), den Reifenparametern (Innendruck, Dimensionierung, Bauart usw.) und der Traktorbauweise (max. Zugkraft, Gesamtgewicht, Ballastierung usw.) ab [142][62]. Nach den Faustzahlen aus ASAE 2003 [4] setzt der Fahrtrieb auf weichem Ackerboden ca. 49 % der Motorleistung und auf festem Untergrund (wie Beton) ca. 79 % der Motorleistung in Zugleistung um.

Bei Dünge-, Ernte- und Pflegearbeiten wird neben der Zugleistung auch ein wesentlicher Teil der Leistung über die Zapfwelle abgegeben [142]. Die Zapfwellenkupplung und das Zapfwellengetriebe übertragen die Motorleistung über die Front- und Heckzapfwelle auf das Anbaugerät. Die Leistungsverluste von der Kurbelwelle des Motors bis zur Zapfwelle durch Getriebe und Nebenaggregate betragen zwischen 10 und 20 % [4][155][170].

Durch den breiten Fahrgeschwindigkeitsbereich von 2 bis 50 km/h und den variablen Leistungsbedarf landwirtschaftlicher Traktorarbeiten ergeben sich vielfältige Anforderungen an den Motor, das Getriebe und das Fahrwerk [32]. Die Bodenbearbeitung erfordert eine überwiegend hohe Motorleistung, während die Pflegearbeiten mit einer vergleichsweise geringen Motorisierung möglich sind. Der Hauptarbeitsbereich bei landwirtschaftlichen Traktorarbeiten liegt bei einer Fahrgeschwindigkeit zwischen 4 und 12 km/h [142]. Auch nach dem US-amerikanischen Standard ASAE D497.4 [4] werden für typische Feldarbeiten vergleichbare Fahrgeschwindigkeiten von 5 bis 10 km/h für das Pflügen, 8 bis 13 km/h für das Grubbern und 6,5 bis 11,0 km/h für das Säen angegeben. Zudem leisten Traktoren durch den Transport von Getreide, Silagen, Hackfrüchten und Wirtschaftsdüngern einen wesentlichen Beitrag zur gesamten Agrarlogistik [71][13]. Im Vergleich zur Bodenbearbeitung muss der Traktorbetrieb beim Transport hohe Fahrgeschwindigkeiten und häufige Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge realisieren.

2.1.3 Regenerative Antriebssysteme

In der Land- und Forstwirtschaft dominiert nach wie vor der Einsatz von fossilem Dieseldieselkraftstoff. Die Eigenschaften von Dieseldieselkraftstoffen sind für alle Länder der EU einheitlich in der Norm EN 590 definiert. Im Hinblick auf die Herausforderungen der Energiewende sind eine Effizienzsteigerung sowie die Reduktion von Treibhausgasen durch den Einsatz regenerativer Antriebssysteme erforderlich [141][20].

Im Zuge der voranschreitenden Produktivitätssteigerung und Digitalisierung landwirtschaftlicher Prozesse bietet die Einführung elektrischer Antriebssysteme Vorteile bei der Vernetzung, Automatisierung, Regelung und Steuerung [124]. Die Treibhausgasbilanz elektrischer Systeme wird wesentlich vom "getankten" Strommix (Zusammensetzung des Stroms nach Primärenergieträgern) und durch die Emissionen

der Batteriespeicherherstellung beeinflusst [73]. Für die Landwirtschaft wurden bereits Konzepte rein batteriebetriebener Prototyptraktoren vorgestellt [17][89][91]. Die Eintrittshürden in den Markt für Elektrotraktoren sind derzeit primär noch die geringe Energiespeicherdichte, verbunden mit einem hohen Platzbedarf und Gewicht der Batterien und der hohe Investitionsaufwand für die Ladeinfrastruktur bzw. die Energiespeicherung. Gleichzeitig bieten autonome Kleinlandmaschinen mit elektrischen Antrieben ein hohes Potenzial zur Prozessoptimierung im Pflanzenbau [61].

Gasförmige Kraftstoffe, wie Biomethan, bieten eine weitere Möglichkeit zur Nutzung erneuerbarer Energien in Traktoren. Es existieren mehrere Prototypen von gasbetriebenen Traktoren verschiedener Hersteller [157][108]. Die Ergebnisse aktueller Feld- und Prüfstandsstudien mit einem Biomethan-Traktor bestätigen einen guten technischen Entwicklungsstand [108]. Traktoren, welche mit Wasserstoff (H_2) in Verbindung mit der Brennstoffzellentechnologie angetrieben werden, sind derzeit nicht verfügbar.

Hochenergiedichte flüssige Kraftstoffe ermöglichen deutlich höhere Reichweiten als batterieelektrische Antriebe oder der gasförmige Kraftstoff Biomethan. Während sich Traktoren mit Biomethan-, und Elektroantrieb sowie mit synthetischen Kraftstoffen noch im Forschungsstadium befinden, werden Traktoren für den Betrieb mit Biodiesel (Fettsäuremethylester, kurz FAME) [150][181][99] und Rapsölkraftstoff bereits seit vielen Jahren in der Praxis erprobt und es sind marktreife Konzepte verfügbar.

Rapsölkraftstoff für Traktoren

Für den Einsatz von Rapsöl als Kraftstoff in Traktoren sprechen unter anderem die hohe THG-Minderung von bis zu 91 % und eine geringe Ökotoxizität [141][40][16].

Grundvoraussetzung für einen zuverlässigen Motorbetrieb sind die Kenntnisse der Kraftstoffeigenschaften sowie die Einhaltung der Kraftstoffqualität. Die Kenngrößen zur Standardisierung von Rapsöl als Kraftstoff werden in den Untersuchungen von REMMELE (2002) [140] aufgezeigt. Die aktuelle Norm DIN 51605:2016 [29] definiert die Grenzwerte für die kinematische Viskosität, die Dichte, den Heizwert, den Wassergehalt, die Gesamtverschmutzung, die Zündwilligkeit, den Flammpunkt, die Oxidationsstabilität, die Iodzahl und die Säurezahl. Die Elementgehalte der Aschebildner bzw. Katalysatorgifte sind bis auf eine Konzentration an der jeweiligen Nachweisgrenze von 3 mg/kg für Phosphor bzw. 1 mg/kg für Calcium und Magnesium limitiert [29].

Für die Auslegung des Kraftstoffsystems für Rapsölkraftstoff sind die Normparameter [29] kinematische Viskosität, Dichte und Heizwert von wesentlicher Bedeutung. Die kinematische Viskosität von Rapsöl ist bei 20 °C mit 75 mm²/s um ein Vielfaches höher als die kinematische Viskosität von Dieselkraftstoff (mit 5 mm²/s) [58]. Mit steigender Temperatur sinkt die Viskosität des Rapsöls und nähert sich bei etwa 100 °C der geringen Viskosität von Dieselkraftstoff an [179]. Rapsölkraftstoff hat eine Dichte von 950 kg/m³ und besteht zu 10,9 Masse-% aus Sauerstoff (O) [5]. Der sauerstofffreie Dieselkraftstoff hat eine Dichte von 830 kg/m³. Der volumetrische Heizwert von Diesel ist mit ca. 35,8 MJ/l um ca. 3 bis 4 % höher als von Rapsölkraftstoff mit einem Heizwert von ca. 34,6 MJ/l [58].

Die Pflanzenöltraktoren unterscheiden sich in den technischen Lösungen, nach denen die Dieselmotoren auf den Betrieb mit Pflanzenölkraftstoff optimiert sind [169][49]. Die häufigsten mechanischen Eingriffe erfolgen im Niederdruckkraftstoffsystem, welches als Ein- oder Zwei-Tank-System ausgeführt wird:

- Beim Ein-Tank-System sind die Traktoren auf den alleinigen Betrieb mit Rapsölkraftstoff angepasst. Hierbei wird das bereits vorhandene Dieselmotorkraftstoffsystem für den Pflanzenölbetrieb modifiziert. Die Viskositätsunterschiede erfordern eine Anpassung des Kraftstoffsystems z. B. Leitungsquerschnitte, Kraftstoffpumpe oder Kraftstofffilter, um eine ausreichende Fördermenge sowie Zerstäubung des Rapsöls zu erreichen. Ferner haben Traktoren mit einem Ein-Tank-System üblicherweise Vorwärmssysteme installiert.
- Im Zwei-Tank-System werden zusätzlich zum Rapsölkraftstoff geringe Mengen an Diesel als Hilfskraftstoff im Kaltstart- bzw. Niedriglastbetrieb oder zur Regeneration der Abgasmachbehandlung eingesetzt. Hierzu wird ein zweites Niederdruckkraftstoffsystem inklusive Tank, Leitungen, Filter und Pumpe für den Dieselmotorbetrieb ergänzt. Halbautomatische Umschalteinrichtungen aktivieren den Pflanzenölbetrieb, wenn eine vorgegebene Betriebstemperatur des Motors erreicht wird. Der Pflanzenölmodus bleibt so lange aktiv, bis der Bediener einschreitet und wieder den Dieselmotorbetrieb aktiviert oder bestimmte Betriebsbedingungen, z. B. Temperaturen, Last, über eine gewisse Zeitdauer erreicht werden.

Während die Hersteller bzw. Umrüster bei älteren Traktoren die Pflanzenöлтаuglichkeit mit Änderungen am Kraftstoffsystem und mechanischen Maßnahmen am Motor herstellen konnten, gewinnt bei moderneren Common-Rail-Motoren (CR) ab der Abgasstufe IIIA der Eingriff in das Motormanagement an Bedeutung. Die Entwicklung einer mechanischen Steuerung der Einspritzung, z. B. dem Pumpe-Leitung-Düse-Einspritzsystem (PLD), hin zur elektronisch angesteuerten CR-Einspritzung erhöhte die Freiheitsgrade bei der Applikation des Motors für neue Kraftstoffvarianten. Bei PLD-Einspritzsystemen kommt es durch die Viskositäts- und Kompressibilitätsunterschiede von Pflanzenölen im Vergleich zu Dieselmotorkraftstoff zu einer früheren Düsenöffnung und höheren Einspritzmengen, was vielfach eine höhere Leistung zur Folge hat [168]. Bei CR-Motoren ist hingegen bei gleichen Motoreinstellungen mit Pflanzenölkraftstoff eine geringere Motorleistung als mit Dieselmotorkraftstoff festzustellen [49][38]. Grund dafür ist, dass bei einem CR-Einspritzsystem der Kraftstoff nach definierten Vorgaben, unabhängig von der Motordrehzahl und der Pleuellposition injiziert wird. Die Einspritzmenge wird primär durch die Bestromungsdauer des Injektoröffnungsventils bestimmt [139]. Im Pflanzenölbetrieb kann der Durchfluss im Injektor geringer sein als mit Dieselmotorkraftstoff, was einen insgesamt geringeren Masseneintrag je Zeiteinheit in den Brennraum verursacht. Der zusätzlich geringere volumetrische Energiegehalt von Rapsölkraftstoff führt zu einer Minderleistung von bis zu 20 % [47][38], die allerdings durch Anpassungen in der Motorsteuerungssoftware ohne mechanische Eingriffe ausgeglichen werden kann [77]. Trotz der unterschiedlichen Kraftstoffzusammensetzung von Diesel- und Rapsölkraftstoff wurde in stationären Prüfzyklen in Dieselmotoren ein vergleichbarer Wirkungsgrad der dieselmotorischen Verbrennung nachgewiesen [172][33].

Ferner wirkt sich die Kraftstoffzusammensetzung von Rapsöl im Vergleich zum Diesel auf den Verbrennungsprozess und somit auf das Emissionsverhalten aus. Neben dem veränderten Zündverzug [130][33], wird bei Kraftstoffen mit molekular gebundenem Sauerstoff die Verbrennung beschleunigt und es entstehen höhere lokale Spitzentemperaturen im Brennraum [116]. Bei hoher Motorlast wurde mit Rapsölkraftstoff ein höherer NO_x -Ausstoß und geringere CO -, HC - und PM -Emissionen im stationären Betrieb gegenüber dem Dieselmotor beobachtet [125][33][49]. Im Leerlauf oder bei geringer Leistung sind andererseits die CO -, HC - und PM -Emissionen im Rapsöl- im Vergleich zum Dieselmotor erhöht [125][33][49]. In diesen Betriebsphasen herrschen durch die geringe Einspritzmenge und den geringen Ladedruck schlechtere Bedingungen zur Gemischaufbereitung. Zudem begünstigt der geringere Zerstäubungsgrad des eingespritzten Rapsöls im Vergleich zum Diesel eine unvollständige Verbrennung [162]. Es wird in der Literatur [154] zudem darauf hingewiesen, dass beim Einsatz eines Kraftstoffs mit geringerer Energiedichte als Dieselmotor und bei dieselloptimierten Motoreinstellungen das Verbrennungsluftverhältnis zunimmt, was einen deutlichen Einfluss auf das Emissionsverhalten ausüben kann.

Aufgrund der deutlichen Absenkung der Emissionsgrenzwerte [56][57] von Partikelmasse (PM) und Stickstoffoxiden (NO_x) ab der Abgasstufe IIIB wurden neue Motorgenerationen mit komplexer Abgasnachbehandlung (AGN) auch in rapsöltauglichen Traktoren verbaut. Einige Landmaschinenhersteller führten eine Motoroptimierung für eine vorwiegend partikelarme Verbrennung durch, was jedoch die Entstehung von NO_x -Emissionen begünstigt. Die NO_x -Konzentration wird nachgelagert im Abgasstrang mittels eines SCR-Systems gemindert. Eine andere Strategie zur Umsetzung der Abgasstufe IIIB ist der Einsatz einer gekühlten Abgasrückführung (AGR) in Kombination mit einem Partikelfilter (DPF). Üblicherweise erfolgt diese Reinigung des DPF thermisch bei hohen Abgastemperaturen von 550 bis 650 °C, die im täglichen Fahrzeugbetrieb nur mit einer zusätzlich in den Brennraum oder in den Abgasstrang dosierten Dieselmotorleistung erreicht werden können. Pflanzenölkraftstoff ist aufgrund der physikalischen Eigenschaften, z. B. in der Zerstäubung und Verdampfung, nur bedingt zur Kraftstoffnacheinspritzung in den Brennraum nutzbar. Pflanzenölrückstand kann aber im Gegensatz zu Dieselmotorrückstand bereits ab Abgastemperaturen von 315 °C oxidieren und einem zunehmenden Druckverlust im Filter entgegenwirken [76] was eine passive Regeneration ohne aktive Temperaturerhöhung ermöglicht. Dabei soll ein Fließgleichgewicht von abgeschiedener und oxidierender Pflanzenölrückstandsmenge im Partikelfilter erreicht werden. Ein dem Partikelfilter vorgeschalteter Oxidationskatalysator (DOC) wandelt einen Teil des Stickstoffmonoxids (NO) im Abgas zu Stickstoffdioxid (NO_2) um, was die Oxidation des Pflanzenölrückstandes zusätzlich begünstigt. Das Prinzip der passiven Regeneration kommt bereits bei Pflanzenölmotoren mit Partikelfilter zum Einsatz. Untersuchungen von DÜSSELDORF (2015) [31] am Motorenprüfstand und in Feldtests [77][49] zeigen eine gute Funktion des Konzepts bei der Verwendung von Rapsölkraftstoff nach DIN 51605. Rapsölmotoren der Abgasstufe IV mit kombiniertem DOC, DPF und SCR-System funktionierten in Feld- und Prüfstandsuntersuchungen ordnungsgemäß [49][77].

Das Betriebsverhalten von rapsölkraftstofftauglichen Traktoren wurde in einer Reihe von Forschungsarbeiten, unter anderem von APFELBECK et al. (1992) [6], HÖCK et al. (1994)

[75], HASSEL et al. (2005) [70], DÖNGES et al. (2006) [30], RATHBAUER et al. (2008) [138], SY et al. (2009) [166], THUNEKE et al. (2009) [169], THE 2nd VEGOIL CONSORTIUM (2011) [167], EMBERGER et al. (2013) [37][38], HUBER et al. (2015) [77], Ettl et al. (2016) [47] und Ettl et al. (2019) [49] untersucht.

2.1.4 Arbeitszeitgliederung

Die Unterteilung der Arbeitszeit landwirtschaftlicher Verfahren in einzelne Prozesse schafft unter anderem die Grundlage für eine arbeitswirtschaftliche Auswertung und Optimierung. Historisch bedingt entstanden durch die Teilung Deutschlands zwei Standards zur Arbeitszeitgliederung in der Landwirtschaft. In der ehemaligen Deutschen Demokratischen Republik (DDR) wurde der Fachbereichsstandard TGL 22289 geschaffen [28]. In Westdeutschland war hingegen die Zeitgliederung des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) gängig [1]. Eine überarbeitete Version der KTBL-Gliederung veröffentlichten WINKLER und FRISCH (2014) [180]. In Tabelle 1 sind die zugehörigen ersten zwei von vier Gliederungsebenen sowie die entsprechenden Teilzeiten aufgelistet.

Tabelle 1: Zeitgliederung landwirtschaftlicher Arbeiten nach WINKLER und FRISCH (2014) [180] (Gliederungsebenen 1 - 2 von 4)

Gliederungsebene 1	Gliederungsebene 2
T ₁ Hauptzeit	T ₁₁ Arbeitsverrichtungszeit
	T ₁₂ Wendezeit
	T ₁₃ Be- und Entladezeit
	T ₁₄ Ablaufbedingte Wartezeit
	T ₁₅ Einstellungszeit
	T ₁₆ Arbeitsbedingte Erholungszeit
T ₂ Störzeit	T ₂₁ Funktionelle und technische Störzeit
	T ₂₂ Organisationsbedingte Störzeit
	T ₂₃ Witterungsbedingte Störzeit
	T ₂₄ Persönliche Verteilzeit
T ₃ Nebenzeit	T ₃₁ Versorgungszeit
	T ₃₂ Arbeitsvorbereitungszeit

In Forschungsarbeiten z. B. von SONNEN (2007) [161], HEIZINGER (2014) [71], KORTENBRUCK et al. (2014) [93] und HANKE et al. (2018) [67] werden Maschinen- und Positionsdaten mit unterschiedlichen Methoden verarbeitet, um den landwirtschaftlichen Traktortransport oder Feldeinsatz in Teilzeiten zu gliedern. FECHNER und UEBE (2018) [60] schlagen eine weitere Vereinheitlichung der Definitionen für die Teilzeiten vor und geben Beispiele für den Anwendungsbereich des Pflanzenbaus. Damit soll eine bessere Nutzbarkeit von

Maschinendaten für die automatische Zeiterfassung erreicht werden und die Vergleichbarkeit der erhobenen Teilzeiten steigen.

2.1.5 Motordatenbereitstellung

In der Landtechnik hat sich der ISOBUS-Standard nach ISO 11783 [78] zur herstellerübergreifenden Steuerung und zum Datenaustausch zwischen Traktor und Anbaugerät etabliert. Der ISOBUS-Standard [78] kommuniziert über den CAN-Bus (Controller Area Network) und integriert Bestandteile des Protokolls J1939 der "Society of Automotive Engineers" (SAE) [151]. Das SAE J1939 Protokoll wird bei den Nutzfahrzeugen und mobilen Arbeitsmaschinen zur Kommunikation der internen Steuergeräte von Motor, Getriebe und weiteren Fahrzeugsystemen verwendet [185].

Die Informationen aus der Motorsteuerung (Electronic Control Unit, kurz ECU) stehen über Diagnoseschnittstellen zur Verfügung und können zur Arbeitszeitanalyse bei der Feldarbeit bzw. Logistik [93][71][67] sowie zur Bewertung von Motorauslastung bei der gesetzlichen Abgasmessung [57][51][52] oder des Kraftstoffverbrauchs [3][153][156] verwendet werden. Folgende J1939-Signale, welche durch die „Suspect Parameter Number“ (SPN) gekennzeichnet werden, finden breite Anwendung in Forschung und Gesetzgebung:

- Die Drehzahl des Motors wird durch das Signal *Actual engine speed* (SPN 190) in min^{-1} ausgegeben.
- Das berechnete Drehmoment des Motors wird mit dem Signal *Actual engine - percent torque* (SPN 513) in % bezogen auf das Referenzmotordrehmoment (SPN 65251) angegeben. Der Referenzwert *Engine Reference Torque* in Nm (SPN 65251) ist herstellerseitig in der ECU hinterlegt und ändert sich auch nicht, wenn ein anderes Drehmomentkennfeld aktiviert wird.
- Das Signal *Engine Percent load at current speed* (SPN 92) in % beschreibt hingegen das Verhältnis aus dem tatsächlichen Drehmoment zum maximalen Drehmoment, welches bei der aktuellen Motordrehzahl verfügbar ist. Beim Abbremsen des Motors und negativen Drehmomenten ist der Ausgabewert auf Null begrenzt.
- Das ECU-Signal *Engine fuel rate* (SPN 183) gibt das verbrauchte Kraftstoffvolumen pro Betriebsstunde in l/h wieder.

Motordrehzahlsensoren ermitteln die Stellung der Kurbelwelle und der Kolben [139]. Hierzu werden Induktivsensoren eingesetzt, die aus einem Dauermagneten und einem Polstift mit einer Wicklung bestehen. Der Sensor erfasst über die Spannung die Stärke des Magnetfelds, welches durch die Drehung eines ferromagnetischen Pulsrads an der Kurbelwelle erzeugt wird. Die Signalabschwächungen, welche durch Lücken in der Verzahnung des Impulsrads ausgelöst werden, lassen auf die Stellung der Kurbelwelle schließen. Aufgrund des physikalischen Messprinzips ist die Genauigkeit der Motordrehzahlsensoren (SPN 190) in den Traktoren sehr hoch [148].

Kraftstoffverbrauch und Drehmoment werden anhand der Signalwerte mit motorherstellerspezifischen Algorithmen in der Motorsteuerung (ECU) berechnet. Es ist davon auszugehen, dass die Motordrehzahl, die Bestromungsdauer des Injektors sowie die Kraftstofftemperatur einen hohen Einfluss auf die Ausgabewerte beider Kenngrößen haben. Die Genauigkeit des berechneten Drehmoments und Kraftstoffverbrauchs bei Traktoren wird in Forschungsarbeiten unterschiedlich eingeschätzt:

Die Untersuchung von ČUPERA und SEDLÁK (2011) [22] zeigt eine uneinheitliche Qualität des ECU-Kraftstoffverbrauchsignals (SPN 183) an vier Traktoren der Abgasstufe IIIA mit einer Nennleistung zwischen 64 und 255 kW bei Vergleichsmessungen mit einem Kraftstoffverbrauchsmessgerät (Sitrans FC MassFlo Mass 6000), welche nach dem Durchflussprinzip nach Coriolis arbeitet. Der Zusammenhang beider Verbrauchswerte lässt sich mit einer linearen Regression bei einem Bestimmtheitsmaß (R^2) von bis zu 99 % ableiten. Dennoch gibt es im oberen oder unteren Messbereich bei einzelnen Traktoren Abweichungen von -1 % bis 41 % zwischen den Werten aus der Motorsteuerung und dem Verbrauchsmessgerät am Traktorenprüfstand. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommt auch MARX (2015) [107], welcher die Genauigkeit des ECU-Kraftstoffverbrauchssignals im stationären Motorbetrieb mit einem Coriolis-Massendurchflussmesser am Traktorenprüfstand überprüfte. Die Abweichungen der Messwerte lagen im unteren Lastbereich des Motors bei ± 5 % und bei hoher Last ± 1 %.

ČUPERA und SEDLÁK (2011) [21] stellen in weiteren Forschungsarbeiten an einem Claas Axion 850 Cebis (169 kW Nennleistung, Abgasstufe IIIA, DPS 6068HRT83 Motor) Abweichungen von bis zu 40 % zwischen dem Drehmoment auf Basis der ECU-Signale (SPN 513) und dem ermittelten Drehmoment an der Traktorzapfwelle fest. Die Abweichungen nehmen bei abfallendem Drehmoment überproportional zu. Mit einem mehrfachquadratischen Regressionsmodell können diese Abweichungen auf ein Niveau von $\pm 2,5$ % der maximalen Leistung reduziert werden. Bei ČUPERA et al. (2013) [23] zeigt das gleiche Regressionsmodell, dass aus den Daten der ECU eines John Deere 8320R mit 239 kW Nennleistung die Zugleistung mit einer Genauigkeit von ± 4 kW berechnet werden kann.

MERKISZ et al. (2016) [113] vergleichen ebenso das ECU-Drehmoment mit dem an der Zapfwelle gemessenen Drehmoment eines Fendt 828 Vario der Abgasstufe IV im Betrieb mit Dieselkraftstoff. Die Übereinstimmung beider Messwerte nimmt hier bei steigendem Drehmoment zu. So beträgt die prozentuale Drehmomentabweichung bei einer Motordrehzahl von 1400 min^{-1} sowie einem Drehmoment von 300 Nm (M_{PTO}) ca. 43 %, bei 700 Nm ergibt sich hingegen eine Abweichung von lediglich 13 %. Mit einer Korrekturformel kann die Abweichung auf 3 % bei 300 Nm bzw. 10 % bei 700 Nm gesenkt werden. Die Autoren weisen darauf hin, dass das ECU-Drehmoment nicht ungeprüft verwendet werden sollte und es unter Umständen einer nachträglichen Korrektur bedarf.

Das Drehmomentsignal aus der Motorsteuerung zeigt bei ROHRER et al. (2018) [148] eine starke Korrelation mit einem an einer Wirbelstrombremse an der Kurbelwelle eines John Deere Motors (4045HG485, Abgasstufe IIIA) gemessenen Drehmoment. Das berechnete Drehmoment ist jedoch über den gesamten Messbereich konstant um 23 Nm höher als das am Prüfstand gemessene Drehmoment.

In Pilotprogrammen zur Durchführung von portablen Emissionsmessungen in BONNEL et al. (2011) [14] bei schweren Nutzfahrzeugen und in BONNEL et al. (2013) [15] bei NRMM wurden die ECU-Signale ebenfalls überprüft. Die Ergebnisse sind aber, abhängig vom Fahrzeug, teilweise nicht plausibel. Insbesondere das Drehmomentsignal, welches zur Berechnung der spezifischen Emissionen und des Abgasmassenstroms aus dem realen Fahrbetrieb verwendet wird, gilt es, laut den Autoren, zu überprüfen.

2.2 Prüfstände und Prüfumgebungen

Ein Fahrzeug und dessen Bauteile durchlaufen während der Entwicklung und Qualitätssicherung eine Vielzahl von Prüfumgebungen [39][122]. Zur Überprüfung des Abgasemissionsverhaltens von Traktormotoren existieren in der Gesetzgebung und in der Forschung mehrere Herangehensweisen. Durch die Wahl der Prüfumgebung entscheidet sich, welche Komponenten des Antriebsstrangs, z. B. Nebenaggregate oder Getriebe, zusätzlich zum Motor auf die Messung Einfluss nehmen, wie die Umgebungsbedingungen kontrolliert werden können und an welcher Stelle die Drehmomente erfasst werden. Auch der Aufwand und die Kosten für die Messung variieren. Die Abgasemissionen von Traktoren werden üblicherweise am Motorenprüfstand, am Traktorenprüfstand oder zukünftig häufiger auch im tatsächlichen Fahrbetrieb im Feld erhoben. Die Kraftstoffverbrauchs- und Leistungsmessungen sowie die Funktionsprüfung werden zudem an Rollen-, Naben- oder Bremswagenprüfständen durchgeführt.

2.2.1 Motorenprüfstand

Am Motorenprüfstand wird der Verbrennungsmotor getrennt von weiteren Antriebsstrangkomponenten hinsichtlich des Betriebs- und Emissionsverhaltens untersucht. Diese Prüfumgebung ist in der Forschung für nahezu alle Motortypen gängig [122] und ist bei der Typgenehmigung von Non-Road-Fahrzeugen in der Abgasgesetzgebung gefordert [57]. Es gibt daher zahlreiche Anbieter von Motorprüfständen in modularer Ausführung [122]. Neben der Erfassung des Abgasemissionsverhaltens und des Kraftstoffverbrauchs wird der Prüfstand auch zur Überprüfung einzelner Komponenten des Motorsystems z. B. hinsichtlich der thermomechanischen Ermüdung genutzt [122]. Das Drehmoment des Motors wird üblicherweise an der Kurbelwelle bzw. an der Schwungscheibe erfasst.

Die Steuerung des Drehmoments erfolgt über Wirbelstrombremsen, hydraulische Bremsen oder Asynchron- sowie Synchronmaschinen. Asynchron- und Synchronmaschinen können nicht nur zum Bremsen sondern auch zum Antreiben (auch Schleppen genannt) des Motors genutzt werden [122]. Transiente Prüfzyklen mit schnellen Drehzahl- und Drehmomentwechseln können realisiert werden, da aufgrund weniger Bauteile zwischen dem Verbrennungsmotor und dem Belastungssystem geringe Trägheitsmomente entstehen. Am Motorenprüfstand besteht eine gute Zugänglichkeit zum Motor- und Abgasnachbehandlungssystem. Das Anbringen von Messstellen zur Druck-, Temperatur-, Verbrauchs- und Emissionsmessung, z. B. die Zylinderdruckindizierung, wird dadurch erleichtert. Zudem können optional Konditionierungssysteme für das Motoröl, das Kühlmittel, die

Ansaugluft, die Umgebungsluft und den Abgasegendruck installiert werden. Somit kann eine hohe Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Messergebnisse erreicht werden. Am Motorenprüfstand kann jedoch der Aufbau des Abgas-, Ansaugluft-, Kraftstoff-, Kühl- und Schmiersystems im Vergleich zur realen Anwendung abweichen, da eine Motorenserie meist in verschiedenen Fahrzeugtypen Anwendung findet. Für Wiederholungsmessungen eines Motors, welcher im tatsächlichen Betrieb im Fahrzeug eingesetzt wird, ist dessen meist aufwändiger Aus- und Einbau erforderlich.

2.2.2 Traktorenprüfstand

Der Traktorenprüfstand, zum Teil auch als Zapfwellenprüfstand bezeichnet, dient zur Beurteilung des Betriebs- und Emissionsverhaltens von Motor- und Abgassystemen, welche bereits in einem Traktor verbaut sind. Beispiele für Traktorenprüfstände sind in Abbildung 4 zu sehen.



Abbildung 4: *Traktorenprüfstand mit einer Wirbelstrombremse an der Traktorzapfwelle (Foto: TFZ, links; Agroscope, rechts [97])*

Hauptbestandteil eines Traktorenprüfstands ist eine Wirbelstrombremse, die mit einer Gelenkwelle am Zapfwellenausgang des Traktors gekoppelt und das Belastungsprofil vorgibt. Das Zapfwellengetriebe überträgt die Bremskraft zur Kurbelwelle des Motors. Dadurch kann der Motor bis zu seiner Leistungsgrenze belastet werden. Weltweite Anwendung an Traktoren findet diese Testmethode bei der Leistungs- und Kraftstoffverbrauchsmessung nach OECD Standard Code 2 [120]. Im Vergleich zur Messung am Motorenprüfstand werden am Traktorenprüfstand Traktormotoren zusammen mit der gesamten Peripherie, wie Nebenaggregate, Lüfter, Generator, Hydraulikpumpe sowie Druckluft- und Klimakompressor geprüft [97]. Das Drehmoment, welches an der Zapfwelle gemessen wird, fällt durch die Verluste des Zapfwellengetriebes und zusätzlicher Nebenaggregate geringer aus als an der Kurbelwelle am Motorenprüfstand. Typischerweise liegen die Verluste je nach Traktor zwischen 10 % und 20 % [155][4][170]. Die zusätzlichen Motor- und Getriebebauteile am Gesamtfahrzeug erhöhen auch das Trägheitsmoment und verringern die Dynamik des Drehzahl- und Drehmomentwechsels im Vergleich zum ausgebauten Motor [95].

Traktorenprüfstände werden beispielsweise in Forschungsarbeiten von Ettl et al. (2016) [47], Landis (2014) [96], Prankl und Schaufler (2006) [131], Siedlecki et al. (2017) [159],

MÜLLEROVÁ et al. (2011) [118] und SILVEIRA DE FARIAS et al. (2019) [160] zur Abgasemissionsmessung genutzt. Dabei wird vor allem der Einfluss von Kraftstoffeigenschaften, Motoreinstellungen oder von Traktorbauteilen (z. B. von Partikelfiltern) auf das Emissionsverhalten untersucht. In einem Ringversuch von EMBERGER et al. (2011) [35] werden die Abgase eines Traktors mit einer Kraftstoffcharge an den Traktorenprüfständen dreier Prüfinstitute nacheinander gemessen. Die Messergebnisse für die NO_x- und CO₂-Emissionen sowie für den Kraftstoffverbrauch waren gut vergleichbar. Einzig die HC-Emissionen zeigten aufgrund des geringen Emissionsniveaus höhere relative Abweichungen.

2.2.3 Rollen-, Naben- oder Bremswagenprüfstand

Abseits der Abgasemissionsprüfung werden Traktoren zur Leistungs- und Kraftstoffstoffverbrauchs- messung auf Rollen-, mit Naben- oder mit Bremswagenprüfständen geprüft.

In der Prüfvorschrift nach OECD Standard Code 2 [120] ist zusätzlich zur Prüfung der Zapfwellenleistung das Vorgehen bei der Zugleistungsprüfung beschrieben. Mit den Kenngrößen der Zugleistung und des Kraftstoffverbrauchs soll ermittelt werden, wie effizient die Motorleistung über den Fahrtrieb auf den Boden übertragen wird. Bei der Prüfung zieht der Traktor auf einem Beton- oder Asphaltuntergrund einen Messwagen, welcher definiert gebremst werden kann. Die OECD-Prüfmethode wurde beispielsweise in den USA im so genannten "Nebraska Test" realisiert, wodurch Leistungs- und Kraftstoffverbrauchsdaten für zahlreiche Traktoren verfügbar sind [176]. In der deutschen OECD-Prüfstelle wird zusätzlich der so genannte DLG-PowerMix™ an den Prüftraktoren angewandt. Der DLG-PowerMix™ -Traktortest bietet die Möglichkeit, den Verbrauch an Kraftstoff und wässriger Harnstofflösung zwischen unterschiedlichen Traktormodellen unter landwirtschaftlichen Einsatzbedingungen zu vergleichen [27][2]. Der Prüfzyklus umfasst Lastkollektive von Transportarbeiten sowie von Arbeiten mit den Anbaugeräten Pflug, Grubber, Mähwerk, Kreiselegge, Miststreuer und Ballenpresse. Die Messung wird im Freien auf einer asphaltierten Teststrecke am DLG-Testzentrum Technik & Betriebsmittel in Groß-Umstadt durchgeführt. Der Traktor zieht den Messwagen, welcher in Abbildung 5 zu sehen ist. Dieser ist mit einer Wirbelstrom- und Hydraulikbremse ausgestattet und bestimmt die Zug-, Zapfwellen- sowie Hydraulikleistung.

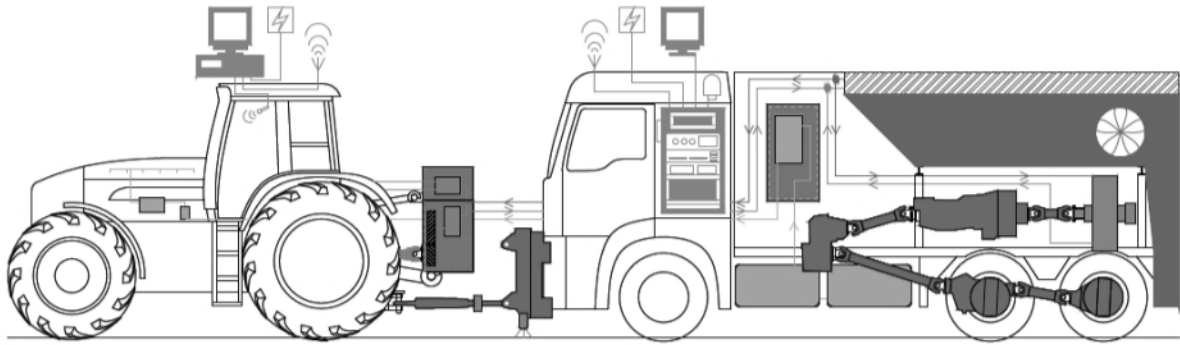


Abbildung 5: Messwagen zur Prüfung nach OECD und des DLG-PowerMix™ nach DEGREL und FEUERSTEIN (2005) [27] sowie AI und TAUBER (2015) [2]

Die Untersuchungen von BACK et al. (2011) [9] sowie STARK und PIEKE (2017) [163] an einem Radnabenprüfstand zeigen, dass eine Nachbildung der DLG-PowerMix™-Zyklen mittels Radnaben-, Hydraulik- und Zapfwellenbremse in einem geschlossenen Prüfstand möglich ist und die Messdaten zur Fahrzeugsimulation verwendet werden können. AI und TAUBER (2015) [2] stellen eine Methode zur Anwendung des DLG-PowerMix™ am Rollenprüfstand vor. Die Zugleistung der Traktoren wird über den Reifen auf Rollen übertragen und gemessen. Der Durchmesser und die Beschichtung der Rollen beeinflussen dabei die Traktion des Traktors im Fahrbetrieb. Im Vergleich zum DLG-PowerMix™-Messwagen sind am Rollenprüfstand eine höhere Dynamik bei der Zugkraftmessung sowie eine Klimatisierung der Umgebungsluft möglich. RÜCKERT et al. (2015) [149] zeigen einen vergleichbaren Versuchsaufbau eines Rollenprüfstands für Traktoren, der für die Entwicklung der Traktoren des Herstellers AGCO GmbH genutzt wird und in Abbildung 6 zu sehen ist. Auch ENGELMANN et al. (2019) [41] nutzten einen Rollenprüfstand erfolgreich zur Wiederholung von portablen Emissionsmessung eines Traktors.



Fotos: AGCO GmbH [149]

Abbildung 6: Gesamtfahrzeugprüfstand für Traktoren der AGCO GmbH (nach RÜCKERT et al. (2015) [149])

2.2.4 Portables Emissionsmesssystem (PEMS)

Die Messung der Emissionen im realen Fahrbetrieb (engl.: Real Driving Emissions, RDE) sind in der EU-Gesetzgebung seit 2011 für schwere Nutzfahrzeuge vorgeschrieben [51][52]. RDE-Messungen wurden danach schrittweise auch für weitere Fahrzeugen eingeführt. Abbildung 7 zeigt die vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten eines portablen Emissionsmesssystems (PEMS) am Beispiel eines PKW auf der Straße, eines Traktors im Feld oder eines Holzvollernters im Forst.



Abbildung 7: Portables Emissionsmesssystem (PEMS) an einem PKW, Traktor und Holzvollernter

Die große Bandbreite an Umwelteinflüssen wie Temperaturen, Erschütterungen, Vibrationen, Staub und Nässe erfordern eine speziell für diesen Einsatz entwickelte Messtechnik. Die Genauigkeit der PEMS-Messtechnik wurde vor allem mit Straßenfahrzeugen im Vergleich zur Prüfstandsmesstechnik getestet:

Für RDE-Messungen an Personenkraftwagen (PKW) wird ab der Verordnung (EU) 2016/427 [53] eine Validierung der Messtechnik des PEMS am Rollenprüfstand gefordert. Die Abweichungen aus den Validierungsmessungen im WLTP verschiedener Institutionen wurden von der offiziellen EU-Forschungsstelle (JRC) für die NO_x -Emissionen und den Abgasmassenstrom ausgewertet [63]. Von den 218 Vergleichsmessungen sind über 95 % der Messergebnisse innerhalb der maximal zulässigen Abweichung von $\pm 15\%$ oder $\pm 15 \text{ mg/km}$ für NO_x . Für den Abgasmassenstrom werden Abweichungen bis über 10 % zwischen portabler und stationärer Messtechnik angegeben. Auch in einer weiteren Arbeit wurden die Emissionen von PKW am Rollenprüfstand parallel mit zwei PEMS (Horiba OBS-ONE, AVL M.O.V.E) und einem stationären Referenzmesssystem (AVL AMA i60) erfasst [177]. Die Abgaskonzentrationen während verschiedener Prüfzyklen weichen bei den portablen Messsystemen um maximal 2 % für CO_2 und um maximal 5 % für NO_x im Vergleich zur stationären Referenzmesstechnik ab. Die Unterschiede zwischen den Emissionswerten liegen für die CO_2 - und die NO_x -Masse innerhalb von 10 % bzw. 15 % und für den Abgasmassenstrom unterhalb von 10 %. Die Autoren bewerten die Genauigkeit der portablen Emissionsmesssysteme demnach als gesetzeskonform [53]. Forschungsbedarf besteht hinsichtlich des Einflusses abweichender Umgebungsbedingungen (z. B.

Lufttemperatur und -druck) und der Fahrzeugbeschleunigung auf die Messgenauigkeit einer PEMS-Messung im Vergleich zum Prüfstand. CAO et al. (2016) [19] vergleichen die Emissionswerte, die mit einem PEMS (AVL M.O.V.E) ermittelt wurden mit stationärer Emissionsmesstechnik. Beide Messsysteme wurden bei Straßenfahrten und am Rollenprüfstand im Laderaum eines LKW mitgeführt [86]. Der NO_x -Messfehler zwischen den Systemen liegt bei einem Emissionsniveau von 0,1 bis 1,0 g/kWh in einem Bereich von $\pm 15\%$. Nur bei NO_x -Konzentrationen unterhalb 0,1 g/kWh, nahe der Nachweisgrenze, steigt der Messfehler auf über $\pm 15\%$ an. Die mittleren CO- und HC-Emissionen weichen zwischen den Analysatoren um 4 % CO und 12 % HC voneinander ab. Die mit dem PEMS ermittelten CO_2 -Emissionen sind im Mittel um ca. 2 % höher als bei der stationären Emissionsmesstechnik. APPEL et al. (2019) [7] stellten bei einer Fehleranalyse an vier PKW und drei PEMS einen Gesamtmessfehler von 32 mg NO_x/km fest. Bezogen auf den Grenzwert von 80 mg NO_x/km beträgt die Abweichung somit 40 %.

2.3 Abgasgesetzgebung

Die Entwicklung neuer Motorgenerationen für Traktoren wurde in den letzten Jahren maßgeblich durch die Minderung der Abgasemissionen bei gleichzeitigem Erhalt der Effizienz und Betriebssicherheit geprägt. Die Typgenehmigung land- und forstwirtschaftlicher Maschinen erfolgt nach der EU-Verordnung 167/2013 [57]. Dabei wird bei der Regulierung der Schadstoffemissionen für Motoren bis zur Abgasstufe IV auf die EU-Richtlinie 97/68/EG [56] verwiesen, die aufgrund der Einführung der Abgasstufe V durch die EU-Verordnung 2016/1628 [57] ersetzt wurde. Tabelle 2 zeigt die Grenzwerte der darin limitierten Emissionskomponenten Stickstoffoxide (NO_x), Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC), Partikelmasse (PM) und Partikelanzahl (PN).

Insbesondere für die NO_x - und Partikel-Emissionen wurden die gesetzlichen Vorgaben in den letzten Jahren erheblich verschärft. Die EU-Verordnung 2016/1628 [57] beinhaltet zudem die Rahmenbedingungen der Abgasstufe V, die ab 2019 für die ersten Motorenklassen angewandt wird. Neben einer Ausweitung auf leistungsschwächere und -stärkere Motorenklassen umfasst der Entwurf unter anderem die zusätzliche Limitierung der ausgestoßenen Partikelanzahl (PN) und eine weitere Verschärfung der Partikelmasse-Emissionen im Vergleich zur Abgasstufe IV.

Tabelle 2: Emissionsgrenzwerte der Verordnung 2016/1628 [57] für Dieselmotoren in Arbeitsmaschinen (Abgasstufen I–V)

Nennleistung P_N in kW	NO _x g/kWh	HC g/kWh	CO g/kWh	Partikel- masse g/kWh	Partikel- anzahl #/kWh	Inkrafttre- ten/ Datum
Stufe I						
$37 \leq P_N < 75$	9,2	1,3	6,5	0,85	-	Apr. 1999
$75 \leq P_N < 130$	9,2	1,3	5,0	0,70	-	1999
$130 \leq P_N \leq 560$	9,2	1,3	5,0	0,54	-	1999
Stufe II						
$18 \leq P_N < 37$	8,0	1,5	5,5	0,8	-	2001
$37 \leq P_N < 75$	7,0	1,3	5,0	0,4	-	2004
$75 \leq P_N < 130$	6,0	1,0	5,0	0,3	-	2003
$130 \leq P_N \leq 560$	6,0	1,0	3,5	0,2	-	2002
Stufe IIIA						
$19 \leq P_N < 37$	7,5 (NO _x + HC)		5,5	0,6	-	2007
$37 \leq P_N < 75$	4,7 (NO _x + HC)		5,0	0,4	-	2008
$75 \leq P_N < 130$	4,0 (NO _x + HC)		5,0	0,3	-	2007
$130 \leq P_N \leq 560$	4,0 (NO _x + HC)		3,5	0,2	-	2006
Stufe IIIB						
$37 \leq P_N < 56$	4,7 (NO _x + HC)		5,0	0,025	-	2013
$56 \leq P_N < 75$	3,3	0,19	5,0	0,025	-	2012
$75 \leq P_N < 130$	3,3	0,19	5,0	0,025	-	2012
$130 \leq P_N \leq 560$	2,0	0,19	3,5	0,025	-	2011
Stufe IV						
$56 \leq P_N < 130$	0,4	0,19	5,0	0,025	-	Okt. 2014
$130 \leq P_N \leq 560$	0,4	0,19	3,5	0,025	-	2014
Stufe V						
$0 < P_N < 8$	7,5 (NO _x + HC)		8,0	0,4	-	2019
$8 \leq P_N < 19$	7,5 (NO _x + HC)		6,6	0,4	-	2019
$19 \leq P_N < 37$	4,7 (NO _x + HC)		5,0	0,015	$1 \cdot 10^{12}$	2019
$37 \leq P_N < 56$	4,7 (NO _x + HC)		5,0	0,015	$1 \cdot 10^{12}$	2019
$56 \leq P_N < 130$	0,4	0,19	5,0	0,015	$1 \cdot 10^{12}$	2020
$130 \leq P_N \leq 560$	0,4	0,19	3,5	0,015	$1 \cdot 10^{12}$	2019
$P_N > 560$	3,5	0,19	3,5	0,045	-	2019

2.3.1 Prüfzyklen

In der EU-Verordnung 2016/1628 [57] und der delegierten Verordnung 2017/654 [54] sind zudem geltende Prüfzyklen zur Bestimmung der Abgasemissionen im stationären und transienten Betrieb beschrieben.

Der Non-Road Steady Cycle (NRSC) wird im stationären Motorbetrieb durchgeführt. Der Prüfzyklus entspricht der ISO-Norm 8178-4 C1 [80] und ist außerdem in der EU- und US-Gesetzgebung verankert. Der stationäre Prüfzyklus ist für alle Abgasstufen durchzuführen und besteht aus acht Prüfphasen im Motorkennfeld, die in einer festgelegten Reihenfolge eingestellt und gewichtet werden. Bei den ersten vier Prüfphasen wird die vom Hersteller angegebene Nenndrehzahl angefahren. Für drei weitere Prüfphasen unterschiedlicher Leistung wird eine Zwischendrehzahl angefahren, die dort festgelegt wird, wo der Motor sein höchstes Drehmoment besitzt. Liegt das höchste Drehmoment jedoch bei unter 60 % der Nenndrehzahl, wird die Zwischendrehzahl bei 60 % der Nenndrehzahl festgelegt, liegt es bei mehr als 75 %, werden 75 % der Nenndrehzahl als Zwischendrehzahl definiert. Die letzte Prüfphase des Prüfzyklus ist der Leerlaufbetriebspunkt. Abbildung 8 zeigt die Prüfphasen, welche bei Nenndrehzahl mit 100 %, 75 %, 50 %, und 10 % Motorlast, bei der Zwischendrehzahl mit 100 %, 75 %, 50 % Motorlast sowie im Leerlauf absolviert werden.

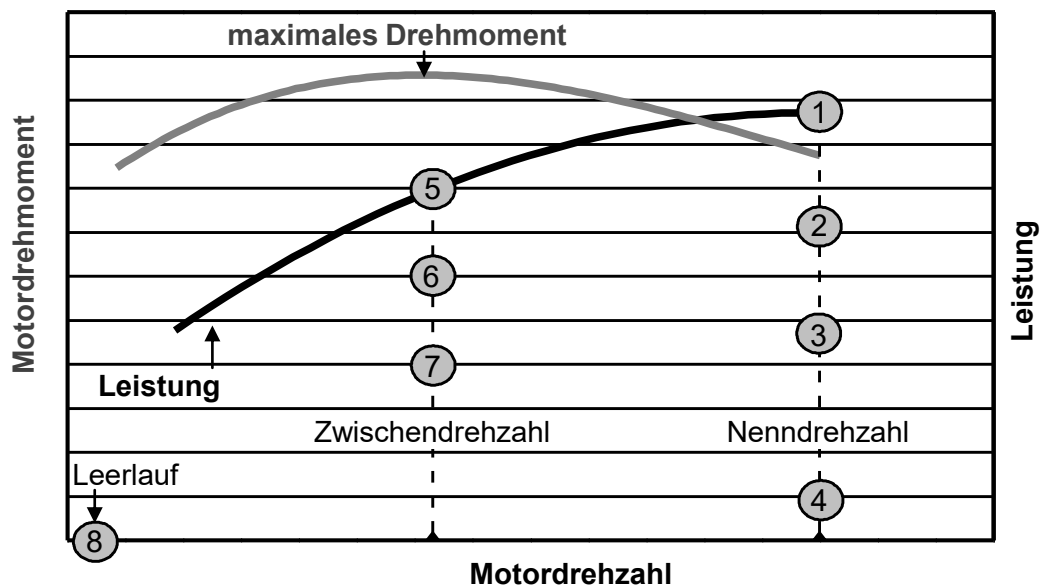


Abbildung 8: Schematische Darstellung der acht Prüfphasen des Non-Road Steady Cycle (NRSC)

TREIBER et al. (1991) [171] beschreiben die Hintergründe der Entwicklung des NRSC. Vor der Einführung des NRSC [56][57] wurden Motoren für Traktoren sowie für schwere Nutzfahrzeuge (HDV) bei der Typgenehmigung gemeinsam im 13-Stufen-Test am Motorenprüfstand geprüft. Der Prüfzyklus war in der Richtlinie 88/77/EWG [137] bzw. ECE Regulierung Nr. 49 beschrieben und bestand aus 13 stationären Prüfphasen. Der Motor wurde bei Nenndrehzahl sowie bei der Drehzahl, bei der das höchste Motordrehmoment anliegt,

jeweils bei 100 %, 75 %, 50 %, 25 % und 10 % Motorlast geprüft. Zudem wurden zu Beginn, in der Mitte sowie am Ende des Zyklus drei Phasen im Leerlauf am Motorenprüfstand absolviert.

Ab der Abgasstufe IIIB ist zusätzlich der Non-Road Transient Cycle (NRTC) im transienten Motorbetrieb vorgeschrieben. Der NRTC beinhaltet schnell wechselnde Betriebspunkte und wird zuerst im Kaltstart und anschließend im Warmstart durchgeführt. Die Emissionen der limitierten Abgaskomponenten des Warmstarts werden in der EU-Gesetzgebung zu 90 % und die Emissionen des Kaltstarts zu 10 % gewichtet. In der US-Gesetzgebung wird der Warmstart zu 95 % und der Kaltstart zu 5 % gewertet [42][43]. Abbildung 9 zeigt den Verlauf der normierten Motordrehzahl und des Motordrehmoments im Non-Road Transient Cycle (NRTC) und die zugrundeliegenden Fahrzeugprofile.

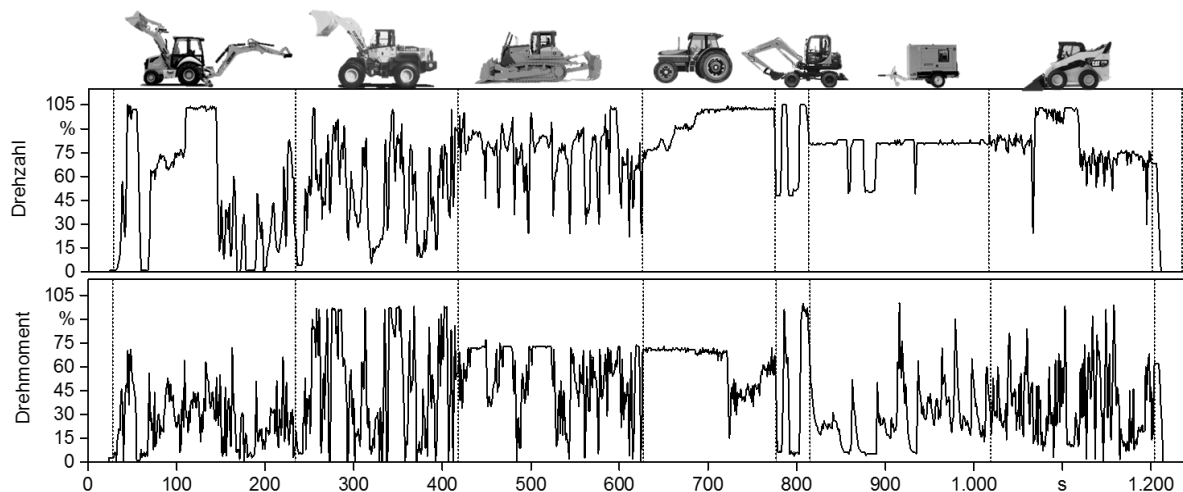


Abbildung 9: Verlauf der normierten Motordrehzahl und des Motordrehmoments im Non-Road Transient Cycle (NRTC)

Der NRTC beginnt und endet mit 28 s bzw. 34 s andauernden Leerlaufphasen, welche in Summe 5 % der gesamten Zykluszeit umfassen. Weitere Zyklussegmente mit unterschiedlich dynamischem Drehzahl- und Drehmomentverlauf stammen, nach UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (2003) [174], aus Arbeiten mit einem Baggerlader (29 bis 234 s), einem Radlader (235 bis 418 s), einer Planierfräse (419 bis 627 s), einem Traktor (628 bis 777 s), einem Bagger (778 bis 812 s), einem Schweißaggregat (816 bis 1019 s) und einem Kompaktlader (1020 bis 1204 s). Der Zyklusabschnitt des Traktors hat einen Zeitanteil von 12 % und unterscheidet sich vom restlichen Zyklus aufgrund der geringeren Drehzahl- und Drehmomentdynamik.

2.3.2 Tatsächlicher Fahrbetrieb

Seit dem Jahr 2019 ist mit Einführung der Abgasstufe V die Aufzeichnung der Emissionen im tatsächlichen Fahrbetrieb (Real Driving Emissions, RDE) erforderlich, welche mit

portabler Emissionsmesstechnik (Portable Emission Measurement System, PEMS) erfasst werden. Mit der EU-Verordnung 2017/655 [55] wird die Abgasgesetzgebung nach EU-Verordnung 2016/1628 [57] um die Vorschriften für Emissionsmessungen im realen Betrieb ergänzt. Der Gesetzgeber verlangt durch das sogenannte **"In-Service-Monitoring" (ISM)** ab der Abgasstufe V vom Hersteller einen Bericht der Emissionsergebnisse im realen Fahrzeugbetrieb. Verpflichtende Emissionsgrenzwerte sind jedoch nach wie vor nur für die Testzyklen NRSC und NRTC am Motorenprüfstand definiert.

MAW-Methode. Die Messungen für das ISM werden in Europa nach der Methode der gleitenden Mittelungsfenster (Moving Averaging Window, MAW) ausgewertet [57][55]: Bei der MAW-Methode werden die Messdaten in sekundlich beginnende Mittelungsfenster unterteilt. Das erste Fenster beginnt beim ersten Datenpunkt, das zweite Fenster startet beim zweiten Datenpunkt und so weiter. Jedes Fenster bleibt so lange geöffnet bis genau die CO₂-Referenzmasse oder die Referenzarbeit (in kWh) erreicht wird, welche vorab im NRTC am Motorenprüfstand gemessen wurde. Die Masse der Emissionen wird für die Mittelungsfenster durch Integration bestimmt, wie in Abbildung 10 anhand der CO₂-Bezugsmasse ($m_{\text{CO}_2, \text{ref}}$) gezeigt und bei BONNEL et al. (2013) [15] detailliert beschrieben wird.

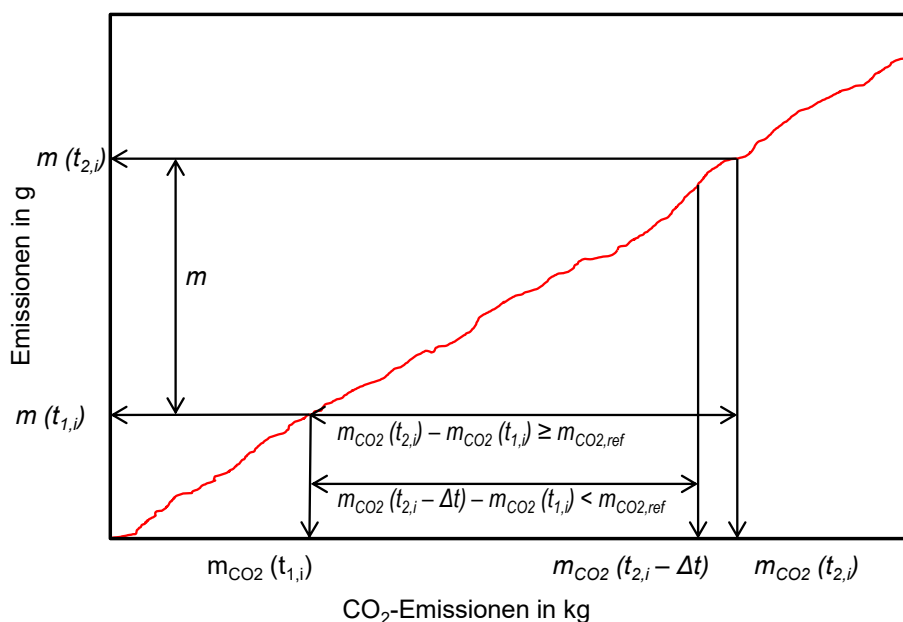


Abbildung 10: Methode der gleitenden Mittelungsfenster (MAW-Methode) auf Basis der CO₂-Emissionen (nach [15][55], verändert)

Für die Auswertung werden jedoch nicht alle Daten einer Messfahrt berücksichtigt. Die Auswertungsprozedur beginnt, wenn die Kühlmitteltemperatur zum ersten Mal 70 °C ($T_{\text{CW-Start}}$) nach dem Motorstart erreicht hat, aber spätestens zwanzig Minuten nach dem Motorstart. Leerlauf- und Teillastphasen werden abhängig von der Dauer, als sogenannte „Non-Working Events“ eingestuft und von der Auswertung ausgeschlossen.

Für alle gültigen Fenster werden die Übereinstimmungsfaktoren (engl.: Conformity Factor, CF) gebildet. Diese errechnen sich aus dem Verhältnis der mittleren Emissionen jedes

Mittelungsfensters (in g/kWh) und den gültigen Emissionsgrenzwerten der NRMM-Gesetzgebung. Für jede Messfahrt wird eine zulässige Prüfdauer (PD) definiert, die das Fünf- bis Siebenfache der Referenzarbeit aus dem NRTC umfassen muss.

NTE-Methode. In den USA werden mit der Einführung der Abgasstufe Tier 4i die Emissionen im tatsächlichen Fahrbetrieb an Traktoren entsprechend der „In-Use-Compliance“ (IUC) geprüft und mit der "Not-to-Exceed" (NTE) Methode ausgewertet [42][43].

Die Vorschriften zur Anwendung und Auswertung wird in BONNEL et al. (2013) [15] zusammengefasst und sind ausführlich in der US-Gesetzgebung [42][43] beschrieben. Für die Auswertung werden die Messdaten berücksichtigt, bei denen die Drehzahl und das Drehmoment des Motors in 30 aufeinanderfolgenden Sekunden im NTE-Kontrollbereich liegen. Der NTE-Kontrollbereich ist in Abbildung 11 als blauer Bereich im Motorkennfeld dargestellt.

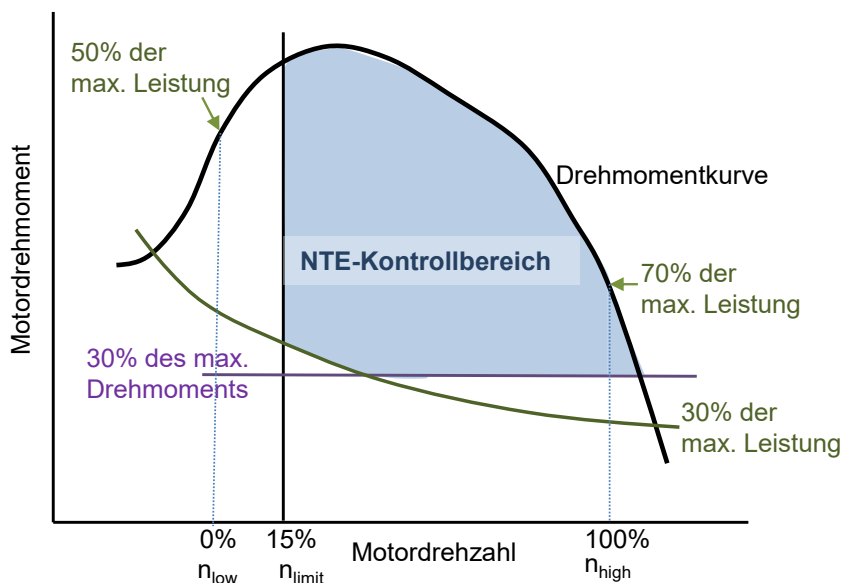


Abbildung 11: NTE-Kontrollbereich in Abhängigkeit der Motordrehzahl und des Motordrehmoments (nach [42][43][15], verändert)

Der NTE-Kontrollbereich befindet sich oberhalb von 30 % der maximalen Motorleistung und oberhalb von 30 % des maximalen Motordrehmoments. Ferner wird der Bereich der Motordrehzahl nach unten hin begrenzt (n_{limit}). Die untere Begrenzungsdrehzahl n_{limit} liegt bei 15 % des Drehzahlbereichs zwischen der niedrigen ($n_{\text{low}} = 0\%$) und hohen ($n_{\text{high}} = 100\%$) Motordrehzahl. Die Motordrehzahl n_{high} liegt bei 70 % der maximalen Leistung und die Motordrehzahl n_{low} liegt bei 50 % der maximalen Leistung vor. Ferner werden die NO_x - oder HC-Emissionsmesswerte bei Motoren mit Abgasmachbehandlung (AGN) bei einer Abgastemperatur unter 250 °C nicht gewertet. Nach der NTE-Methode dürfen die Messwerte für jede Abgaskomponente das 1,25- bis 1,5-fache des Grenzwertes, welcher für Messungen im NRTC bzw. NRSC gilt, nicht überschreiten.

2.3.3 Flottenemissionen

Zur Folgeabschätzung der Non-Road Abgasgesetzgebung existieren in Europa und den USA theoretische Modelle, welche die Entwicklung des gesamten Schadstoffausstoßes oder Kraftstoffverbrauchs für Dieselmotoren verschiedener Fahrzeuge (z. B. landwirtschaftliche Traktoren) berechnen [175][104][72][74][152][158][182]. Die Ergebnisse der Modellrechnungen dienen zur politischen Entscheidungsfindung für zukünftige Maßnahmen in der Luftreinhaltung und für die THG-Minderung. Die Formel (2.6) zeigt die grundlegende Berechnungsmethode der absoluten jährlichen Emissionen einer Fahrzeugkategorie, welche je nach Studie leicht abweichen kann:

$$E_e = \frac{N \cdot ND \cdot P_{Nenn} \cdot LF \cdot EF_e \cdot VF_e}{1000} \quad (2.6)$$

E_e	absolute jährliche Emissionen einer Fahrzeugkategorie (in kg)
e	Emissionskomponente (NO _x , HC, CO, PM oder CO ₂ /b _e)
N	Bestand der Fahrzeugkategorie (Anzahl)
ND	jährliche Nutzungsdauer (Bh/a)
P_{Nenn}	mittlere Nennleistung der Fahrzeugkategorie (kW)
LF	Lastfaktor aus mittlerer abgerufener Leistung durch Nennleistung
EF_e	Emissionsfaktor (g/kWh)
VF_e	Verschlechterungsfaktor über die Lebensdauer z. B. durch Verschleiß

Basierend auf den Zulassungs- bzw. Verkaufszahlen und der Lebensdauer wird der Bestand (N) einer Fahrzeugkategorie (z. B. für Traktoren zwischen 75 und 130 kW Nennleistung und der Abgasstufe IIIA) abgeschätzt. Die Emissionsfaktoren (EF_e) für die limitierten Abgaskomponenten stützen sich, je nach Studie, auf gesetzliche Grenzwerte (siehe Tabelle 2) oder auf Emissionsmessergebnisse vom Motorenprüfstand. Liegen keine NRTC-Messwerte aus der Typenprüfung vor, werden die Emissionen aus dem NRSC gewertet und mit dem Anpassungsfaktor für den transienten Motorbetrieb TAF_e korrigiert, welcher für Traktoren zwischen 1,00 und 2,57 schwankt [74][152][175]. Der Lastfaktor (LF) gibt an, wie hoch der Motor einer Fahrzeugkategorie im Mittel ausgelastet wird. Definiert ist der Faktor als Verhältnis der mittleren genutzten Motorleistung des Fahrzeugs im Fahrbetrieb zur installierten Nennleistung des Motors (P_{Nenn}). Für Traktoren ist die Schwankungsbreite des LF von 0,2 bis über 0,6 sehr groß [175][104][72][74][158][152]. Die Berechnungsmodelle gehen zudem von einer Zunahme des Emissionsverhaltens über die Lebensdauer von bis zu 47 % durch Verschleiß und Alterung aus. Dieser Effekt soll mit dem Verschlechterungsfaktor VF abgebildet werden, welcher den Emissionsfaktor abhängig vom mittleren Betriebsstundenzählstand einer Fahrzeugkategorie korrigiert.

WINTHER und DORE (2017) [182] weisen zudem darauf hin, dass in der zukünftigen Flottenbewertung die Berücksichtigung der Ergebnisse aus Emissionsmessungen im tatsächlichen Fahrbetrieb (RDE) anzustreben ist. Jedoch liegen diesbezüglich im Bereich der NRMM kaum Messdaten vor und es wird angenommen, dass die Ergebnisse zwischen den NRMM-Anwendungen stark variieren können.

2.4 Erfassung tatsächlicher Traktoremissionen

An den Methoden zur Erhebung von Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs von Traktoren wird seit Jahrzehnten geforscht. Veränderte Rahmenbedingungen durch neue Abgasgesetzgebungen sowie der Fortschritt in der Motoren- und Prüfstandstechnik beeinflussen dabei das Vorgehen und die Ergebnisse.

2.4.1 Motorbetrieb am Prüfstand

Am Prüfstand werden Traktorenmotoren entweder bei stationären Drehzahl- und Drehmomenteinstellungen oder beim Durchfahren eines transienten Belastungsprofils mit schnellen Betriebspunktwechseln getestet.

2.4.1.1 Stationäre Prüfzyklen

RINALDI und NÄF (1992) [146] untersuchen die Verteilung von Motordrehzahl- und Dieselverbrauchsmessdaten zweier Traktoren mit 48 kW und 97 kW Nennleistung bei insgesamt 14 Traktorarbeiten auf drei unterschiedlich strukturierten landwirtschaftlichen Betrieben. Ein zusätzlich installierter induktiver Sensor am Schwungrad des Motors und ein Durchflussmessgerät im Dieselkraftstoffsystem dienen zur Datenerfassung im Feld. Bei gleichartigen Traktorarbeiten (z. B. beim Pflügen) auf den Betrieben sind die Motordrehzahl- und Verbrauchskennwerte bei beiden Traktoren ähnlich verteilt. Die Betriebsstruktur hat somit nur einen geringen Einfluss auf die gemessene Motorcharakteristik. Da jedoch die Feldtestdaten deutlich vom (damals üblichen) stationären 13-Stufen-Test ([137], siehe Kapitel 2.3.1) abweichen, wird von den Autoren der sogenannte FAT 6-Stufen-Test mit sechs stationären Betriebspunkten im Motorkennfeld vorgeschlagen. Abbildung 12 zeigt den FAT 6-Stufen-Test im Vergleich zum gegenwärtig geltenden NRSC.

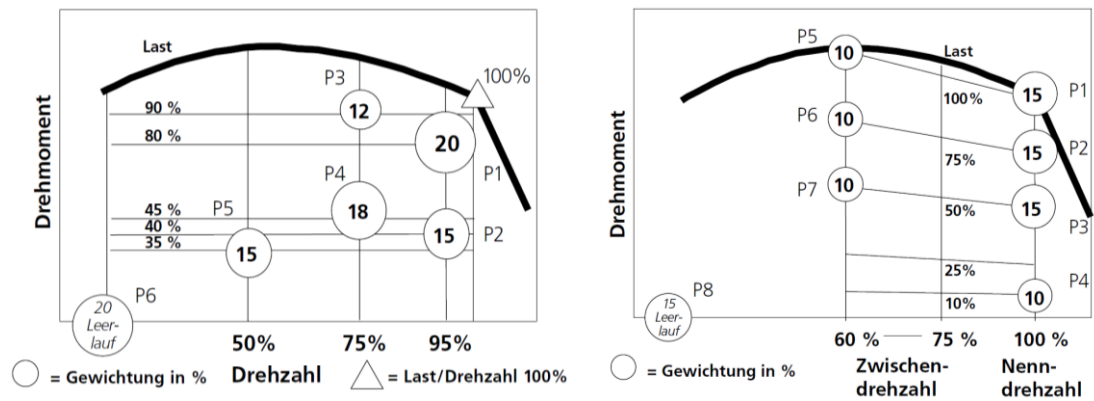


Abbildung 12: Betriebspunkte und deren Gewichtung beim FAT 6-Stufen-Test (links) [146][147] und beim NRSC (rechts) [80]

Die Messergebnisse von 112 Traktoren für NO_x , HC und CO beim FAT 6-Stufen-Test und beim NRSC werden in der Untersuchung von RINALDI und STADLER (2002) [147] zur Bildung eines Emissionsmodells verwendet. Die Abgasemissionswerte (z) werden durch ein quadratisches Regressionsmodell (z, x, y) in Abhängigkeit der Motordrehzahl (x) und der Motorleistung (y) ermittelt. Die Festdaten (x, y) dreier Traktoren bei je sechs landwirtschaftlichen Arbeiten werden in die Regressionsgleichungen eingesetzt. Es zeigt sich eine Emissionsreduzierung, insbesondere der CO und HC-Emissionen, durch den Einsatz damaliger neuerer Motorgenerationen bei den landwirtschaftlichen Traktorarbeiten. Ferner weicht das Emissionsverhalten der Traktoren je nach zu Grunde gelegter Motordrehzahl und -leistung deutlich vom Ergebnis des NRSC ab.

Zur realitätsnahen Kraftstoffverbrauchsermittlung von Traktoren wird in RENIUS (1987) [142] auf den sogenannten 5-Punkte-Mischverbrauch verwiesen, welcher bereits seit dem Jahr 1980 intern bei Deutz-Fahr verwendet wird. Diese Prüfmethode wird daher auch als "Deutz 5-Punkte Zyklus" bezeichnet [68]. Hierbei werden fünf stationäre Betriebspunkte im Motorkennfeld aus dem OECD-Testverfahren zur Kraftstoffverbrauchbestimmung (in g/kWh) herangezogen [120]. Das Ziel ist es, mit diesem Test den Teillastbereich des Motors realitätsnah abzubilden. Dies geschieht durch die Gewichtung der Betriebspunkte A bis F aus Tabelle 3 mit den Kennzahlen der Leistung und des Zeitanteils.

Tabelle 3: Kennzahlen zur Berechnung des Verbrauchs im Deutz 5-Punkte Zyklus aus typischen Betriebspunkten von Traktoren bezogen auf die Nenndrehzahl und das Nenndrehmoment ([142], verändert)

Betriebspunkte	Drehmoment in %	Drehzahl in %	Leistung in %	Zeitanteil in %	Arbeit
A	88	95	83,6	31	Schwere Arbeiten
B	48	85	40,8	18	Mittlere Arbeiten / Transporte
C	40	53	21,2	19	Pflegearbeiten
D	15	100	15,0	20	Leichte Transporte
E	0	40	0	12	Leerlauf

Der Deutz 5-Punkte Zyklus wurde in weiteren Untersuchungen auch zur Emissionsbewertung herangezogen. HANSSON et al. (2001) [68] untersuchen die NO_x-, HC- und CO-Emissionen eines Valmet 420 DS Motors mit 70 kW Nennleistung am Motorenprüfstand unter Anwendung der Prüfzyklen NRSC [57] und 13-Stufen-Test [137]. Durch eine bilineare Interpolation der Emissionswerte aus dem 13-Stufen-Test am Motorenprüfstand entstehen Emissionskennfelder in Abhängigkeit von Motordrehzahl und -drehmoment. Im Feld wurden die Motordrehzahl, der Kraftstoffverbrauch und die Abgastemperatur mit zusätzlichen Sensoren an einem 70 kW Traktor mit einem vergleichbaren Motor erfasst. Mit Vergleichsmessungen am Motorenprüfstand wurde die Sensorik kalibriert und das Drehmoment aus Feldtestdaten errechnet [69]. Die Aufzeichnungen von Motordrehzahl und Motordrehmoment aus dem Feld von acht landwirtschaftlichen Arbeiten und die Betriebspunkte des Deutz 5-Punkte Zyklus wurden mit Daten der Emissionskennfelder kombiniert. Die resultierenden HC- und CO-Emissionen sind bei den Traktorarbeiten und im Deutz 5-Punkte Test im Mittel höher als bei den standardisierten Prüfzyklen NRSC und 13-Stufen-Test. Die Unterschiede bei den NO_x-Emissionen sind hingegen zwischen den Prüfzyklusvarianten weniger stark ausgeprägt. HANSSON et al. (2001) [68] resümieren, dass es nicht möglich erscheint, Gewichtungsfaktoren für stationäre Prüfzyklen zu entwickeln, mit denen ein repräsentatives Ergebnis für alle Traktoreinsatzzwecke erzielt werden kann.

JANULEVIČIUS et al. (2013) [84] errechnen aus im Motorsteuerungsgerät (ECU) gespeicherten Daten und stationären Emissionsmessungen am Traktorenprüfstand die Gesamtemissionen eines Massey Ferguson MF 6499 Traktors mit einem Sisu 74 CTA Motor (7,4 l Hubraum, 160,3 kW, Abgasstufe IIIA) im Dieselbetrieb. Die Häufigkeitsverteilungen der Motordrehzahlen und der Einspritzmengen wurde über die herstellereigene Software (MF WinEEM3) von der ECU ausgelesen. Bei den Messungen im stationären Motorbetrieb nach OECD Standard Code 2 [120] wurden am Traktorenprüfstand die Leistung, der Kraftstoffverbrauch sowie die NO_x-, CO- und CO₂-Emissionen erfasst. Die Gesamtemissionen über 1000 h Einsatzzeit errechneten sich durch die Zuordnung der am Prüfstand erfassten Emissionskennfelder und der Eintrittshäufigkeit des Betriebspunktes aus der ECU-Feldtestdatenhistorie. Die Gesamtemissionen des MF-Traktors wurden mit einer vergleichbaren Methode beim

Pflügen [85] und beim Säen [87] ermittelt. Ferner wurden in den Untersuchungen zusätzlich die Not-To-Exceed (NTE) Auswertemethode aus der US-Gesetzgebung angewandt [83][82]. Es zeigt sich eine deutliche Verzerrung des Emissionsergebnisses bei Anwendung der NTE-Methode, da je nach Messfahrt und Feldgröße zahlreiche Betriebspunkte, insbesondere während der Wendezeit, nicht gewertet werden.

2.4.1.2 Transiente Prüfzyklen

LINDGREN (2004) [103] untersuchte das Emissionsverhalten verschiedener NRMM-Anwendungen (u. a. auch von Traktoren ohne AGN) zur Bestimmung der mittleren jährlichen Gesamtemissionen. Die Analyse von Drehzahl- und Kraftstoffverbrauchsdaten aus dem realen Einsatz von Traktoren zeigte signifikante Unterschiede sowohl zwischen den NRMM-Anwendungen als auch beim Vergleich mit dem 13-Stufen-Test und dem NRSC. So waren bei den stationären Prüfzyklen auf Basis von Traktorarbeiten niedrigere NO_x -Emissionen aber höhere HC- und CO-Emissionen zu verzeichnen als beim NRSC. Auf Basis von transienten und stationären Messungen am Motorenprüfstand wurde zusätzlich ein Modell zur Abschätzung der Emissionen in tatsächlichen Betrieb erstellt. Im transienten Motorbetrieb erhöhten sich dabei insbesondere die PM-Emissionen und der Kraftstoffverbrauch deutlich im Vergleich zum stationären Betrieb.

STARR et al. (1999) [165] entwickelten Prüfzyklen aus Betriebsdatenaufzeichnungen eines Radladers (insgesamt 26 Bh), eines Schweißaggregats (insgesamt 8 Bh) und eines Kompaktladers (insgesamt 12 Bh) zur Anwendung am Motorenprüfstand. Das Drehmoment beim Einsatz des Radladers errechnete sich dabei aus den Signalen des Motorsteuergärts und den Herstellerangaben zum Motordrehmomentkennfeld. Beim Schweißaggregat dienten die elektrische Ausgangsleistung sowie der Wirkungsgrad des Geräts zur Drehmomentbestimmung. Beim Kompaktlader erfolgte eine Korrelation zwischen dem am Motorenprüfstand gemessenen Drehmoment an der Kurbelwelle und der Position des Regelgestänges an der Einspritzpumpe. Die Aufzeichnungen von Motordrehzahl und -drehmoment wurden in 19 Minuten andauernde Segmente unterteilt und die zugehörige Häufigkeitsverteilungen errechnet. Repräsentative Segmente ergeben sich durch den Vergleich der Häufigkeitsverteilungen zwischen den einzelnen Segmenten und der Gesamtmessung mit Hilfe des Chi-Quadrat-Tests. Zusätzlich wurden noch besonders transiente Segmente anhand der Höhe der Drehzahl- und Drehmomentänderung für jedes Fahrzeug identifiziert.

Mit einer ähnlichen Methode wie STARR et al. (1999) [165] erstellten ULLMAN et al. (1999) [173] drei Prüfzyklen für einen landwirtschaftlichen Traktor, einen Baggerlader und ein Kettenfahrzeug mit einer Dauer von acht bis zwölf Minuten. Das Motordrehmoment wurde über ein Regressionsmodell abhängig von der Position der Regelstange an der Einspritzpumpe abgeleitet. Abweichend zu STARR et al. (1999) [165] wurden bei ULLMAN et al. (1999) [173] bei der Erstellung des Prüfzyklus auch die Änderungsgeschwindigkeit von Drehzahl, Drehmoment und Leistung sowie mehrere Arbeitsgänge berücksichtigt. Der John Deere 4960 Traktor (170 kW Nennleistung) hatte bei sechs verschiedenen Arbeiten (mit je vier Feldüberfahrten pro Arbeitsgerät über eine Länge von einem Kilometer)

insgesamt geringere Drehzahl- und Drehmomentschwankungen und einen niedrigeren Leerlaufanteil (von insgesamt 6 %) als die beiden Baumaschinen. Die Messungen von STARR et al. (1999) [165] und ULLMAN et al. (1999) [173] flossen in die Entwicklung des NRTC ein, wie in dem Dokument der UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (2003) [174] erläutert wird.

LJEWski et al. (2012) [102] untersuchten an einen Traktor der Abgasstufe IIIA (193 kW, 7,1 Liter Hubraum, ohne Abgasnachbehandlung) die NO_x-, CO-, HC-, PM- und PN-Emissionen mit Dieselkraftstoff. Dabei wurden zwei halbstündige transiente Drehzahl- und Drehmomentsequenzen (aus nicht näher genannten Traktorarbeiten) als ECU-Signale aufgezeichnet und am Traktorenprüfstand nachgebildet. Mit welcher Methode die aufgezeichneten ECU-Signale am Prüfstand nachgebildet wurden und wie hoch dabei die Abweichungen ausfielen, geht aus der Untersuchung nicht hervor. Es zeigt sich aber, dass das Emissionsverhalten deutlich vom Drehzahl- und Drehmomentverlauf beeinflusst wird und je nach Prüfsequenz von den gesetzlichen Vorgaben abweicht. Insbesondere in Phasen mit hohem Drehmoment (1050 Nm) und hoher Drehzahl (2000 min⁻¹) steigen die NO_x- und PM-Emissionen an und liegen über den Grenzwerten, welcher zum Zeitpunkt der Untersuchung für Motoren der Abgasstufe IIIA bei der Typgenehmigung galt.

In den Untersuchungen von LANDIS (2012) [95] und (2014) [96] wurde ein Prüfzyklus auf Basis des NRTC für die Anwendung am Traktorenprüfstand vorgestellt. Mit dem transienten Prüfzyklus soll das Emissionsverhalten von Traktoren realitätsgetreuer abgebildet werden, als mit dem stationären NRSC. Anders als auf dem Motorenprüfstand, verhindert die Trägheit des Getriebes und der Nebenaggregate der Traktoren, dass der hochdynamische NRTC ohne Anpassungen am Zapfwellen gebundenen Traktorenprüfstand durchlaufen werden kann. Die NRTC-Vorgaben aus der Gesetzgebung werden daher in Intervallen von zehn Sekunden gemittelt (10sNRTC). Emissionsmessungen mit dem 10sNRTC konnten am Traktorenprüfstand der Forschungsanstalt Agroscope (Ettenhausen, Schweiz) an 26 Traktoren durchgeführt werden.

LEE et al. (2015) [98] untersuchten den Kraftstoffverbrauch eines LS Mtron L7040 Traktors aus Korea mit 71 kW Nennleistung (ohne AGN) bei der Feldarbeit mit einer Ballenpresse und an einem vergleichbaren Motor am Motorenprüfstand. Im Feld wurde das Drehmoment mit zusätzlich installierter Messtechnik an der Getriebeeingangswelle, am Zapfwellengetriebe und am Hydrauliksystem gemessen. Ein Durchflussmesser im Kraftstoffsystem ermittelte zusätzlich den Verbrauch. Aus den Drehmomentdaten wurde ein transienter Prüfzyklus für Messungen am Motorenprüfstand erzeugt. Es ergab sich kein statistisch signifikanter Unterschied im Kraftstoffverbrauch zwischen dem Ballenpressen im Feld und der Messung am Motorenprüfstand.

2.4.2 Tatsächlicher Fahrbetrieb im Feld

Neben Messungen am Prüfstand, fanden auch mehrere Untersuchungen zum Kraftstoffverbrauchs- und Abgasemissionsverhalten im tatsächlichen Fahrbetrieb bei der Feldarbeit von Traktoren statt.

LI et al. (2006) [99] untersuchten die NO_x -Emissionen und den Kraftstoffverbrauch bei der Bodenbearbeitung und beim Säen von Sojabohnen auf einem 12 ha großen Feld. Die Messungen fanden an einem Traktor ohne AGN mit Diesel- (DK) sowie einem Biodieselmotorkraftstoff (B100) aus Sojaöl und den zwei Mischungsvarianten B20 und B50 statt. Während der Feldversuche konnte über Ventile zwischen den Zusatztanks mit den vorgemischten Kraftstoffvarianten umgeschaltet werden. Der Forschungstraktor hatte Messtechnik zur Erfassung der Zugleistung, des Kraftstoffverbrauchs, des Abgasmassenstroms und der NO_x -Emissionen installiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Kraftstoffeffizienz beim Säen geringer ist als bei der Bodenbearbeitung. Die Autoren führen dies auf einen höheren Niedriglastanteil der Arbeiten mit der 3 m breiten Sämaschine, im Vergleich zur Bodenbearbeitung bei einer Arbeitsbreite von 6 m, zurück. Die NO_x -Emissionen sind mit Biodiesel (B100) um 2,3 % beim Säen und um 13,1 % bei der Bodenbearbeitung höher als im Dieselmotorbetrieb. Bei steigendem Biodieselanteil (B50 oder B100) nimmt der volumetrische Kraftstoffverbrauch (in l/ha) aufgrund des geringeren Energiegehalts von B100 im Vergleich zum DK um 4 % zu. Die Messung mit DK und der B20-Variante liefern dagegen vergleichbare Ergebnisse. Die flächenspezifischen CO_2 -Emissionen (in g/ha), welche aus dem Kraftstoffverbrauch und CO_2 -Emissionsfaktoren errechnet wurden, sind mit reinem Biodiesel (B100) um bis zu 78,5 % geringer als mit Dieselmotorkraftstoff.

PÜTZ et al. (2014) [132] untersuchten mit einem PEMS (Sensors Semtech Ecostar) die NO_x -, CO- und HC-Emissionen an zwei Traktoren der Abgasstufen IIIA und IIIB beim Pflügen sowie an zwei Zuckerrübenvollerntern (der Abgasstufen IIIB und IV) bei einer Straßenfahrt. Unerwarteterweise liegen die NO_x -Emissionen des Traktors der Abgasstufe IIIB mit SCR-System beim Pflügen höher als beim Traktor mit der niedrigeren Abgasstufe IIIA (mit AGR und DPF). Die Autoren kommen daher zum Schluss, dass für eine Beurteilung des Emissionsverhaltens im tatsächlichen Fahrbetrieb am Gesamtfahrzeug notwendig ist. Ferner wird vorgeschlagen, auch die Methoden am Prüfstand zu erweitern, um die charakteristischen Einsatzfälle aus dem realen Einsatz geeigneter abdecken zu können.

Mit einem portablen Emissionsmessgerät (AVL M.O.V.E) untersuchten GIETZELT et al. (2012) [65] einen Fendt Vario 720 SCR der Abgasstufe IIIB im Dieselmotorbetrieb. Am Motorenprüfstand fanden zudem Emissionsmessungen am Deutz Motor TCD 6.1 L6 mit mobilen und stationären Analysatoren unter Anwendung des NRTC und NRSC statt. Am Traktorenprüfstand wurden am Traktor Fendt Vario 720 SCR mit baugleichem Motor sechs Prüfphasen des NRSC mit mobiler Messtechnik wiederholt. Der Vergleich der Emissionen am Motoren- und Traktorenprüfstand diente zur Funktionsprüfung des Traktors und der mobilen Messtechnik. Die mittlere Differenz zwischen den Motoren- und Traktorenprüfstandstests liegt bei den CO_2 -Emissionen unter 3 %, bei den NO_x - und CO-Emissionen unter 5 % sowie bei den HC-Emissionen unter 10 %. Die Messabweichungen werden von den Autoren als gering eingestuft. Die Emissionsmessungen beim Mähen, Pflügen und

Straßentransport im Feld wurden mit der MAW- und der NTE-Methode ausgewertet. Mit der NTE-Methode aus der US-Gesetzgebung liegen die Emissionen bei allen Arbeiten unterhalb der zugehörigen Grenzwerte, da bei der NTE-Methode überwiegend Betriebspunkte mit hoher Motorlast gewertet werden, bei denen das SCR-System und der DOC aktiv sind. Gemäß der NTE-Methode werden kritische Betriebszustände für die Abgasnachbehandlung mit Abgastemperaturen unter 250 °C nicht berücksichtigt. Nach der MAW-Auswertemethode fallen die Emissionswerte insbesondere durch die stärkere Berücksichtigung der Niedriglast höher aus als mit der NTE-Methode. Je nach Traktorarbeit schwanken bei der Auswertung nach der MAW-Methode die mittleren Übereinstimmungsfaktoren (Conformity factor, CF) der NO_x-Emissionen zwischen 0,9 und 1,4 und die der PM-Emissionen zwischen 0,7 und 1,9. Die HC- und CO-Emissionen liegen mit einem CF < 0,18 durchgängig deutlich niedriger als der Grenzwert der Abgasstufe IIIB (CF = 1). Innerhalb der gleichen Traktorarbeit variiert das Ergebnis stark durch die Wahl von Auswertebeginn und -ende. Ferner wird auf den erheblichen Aufwand für die Durchführung von portablen Emissionsmessungen an Traktoren hingewiesen.

In der Untersuchung von MERKISZ et al. (2013) [112] erfolgte eine PEMS-Messung (Fa. Sensors, Semtech DS) an einem John Deere Traktor (122 kW Maximalleistung) der Abgasstufe IIIA beim Grubbern mit Dieselkraftstoff. Die Auswertung basiert auf der NTE-Methode (Not-To-Exceed). Es zeigt sich, dass bis zu 40 % der Drehzahl- und Drehmomentwerte beim Grubbern außerhalb des NTE-Kontrollbereichs liegen. Die gültigen CO-Emissionen sowie der Summenwert aus den HC- und den NO_x-Emissionen liegen dabei 50 % bzw. 23 % unter dem Grenzwert der Abgasstufe IIIA für Prüfstandsmessungen. Dagegen übersteigen die PM-Emissionen beim Grubbern den Grenzwert annähernd um das Dreifache. Mit einem vergleichbaren Versuchsaufbau wurde in MERKISZ et al. (2015) [110] der Einfluss der Fahrgeschwindigkeiten beim Grubbern auf die CO₂-Emissionen untersucht. Die Höhe der CO₂-Emissionen von 14,6 kg/ha bei 5 km/h, von 18,8 kg/ha bei 15 km/h sowie von 15,4 kg/ha bei 15 km/h lässt keinen Zusammenhang erkennen. Das PEMS von MERKISZ et al. (2013) [112] auch kam in den Untersuchungen von LIJEWSKI et al. (2013) [100][101] bei einem Harvester (Abgasstufe IIIA, 129 kW Nennleistung) zum Einsatz. Bei der Forstarbeit liegen die CO-Emissionen deutlich niedriger als der Grenzwert der Abgasstufe IIIA. Die mittleren PM-Emissionen sowie die NO_x- und HC-Summenwerte sind im realen Betrieb hingegen doppelt so hoch als der Grenzwert für Prüfstandsmessungen. MERKISZ et al. (2016) [111] stellen fest, dass die Motoreinsatzbedingungen landwirtschaftlicher Fahrzeuge stark variieren und dadurch die Anforderungen der NTE-Auswertemethode, vor allem die Mindestverweilzeit von 30 Sekunden im NTE-Kontrollbereich, selten erfüllt werden. Daher werden Änderungsvorschläge für die Auswertung von Emissionsmessungen bei landwirtschaftlichen Arbeiten mit der NTE-Methode diskutiert. Als weitere geeignete alternative Auswertung für PEMS-Messungen an Traktoren nennen die Autoren die MAW-Methode [57][55] aus der EU-Gesetzgebung.

PIRJOLA et al. (2017) [127] untersuchten die NO_x- und PN-Emissionen eines Traktors mit dem AGCO Power 44 AWI Motor (99 kW Nennleistung, Abgasstufe IIIB) beim Straßentransport mit Dieselkraftstoff und hydriertem Pflanzenölkraftstoff (engl. Hydrotreated Vegetable Oils, kurz HVO). Die Emissionen beim Straßentransport wurden nach dem Austritt

in die Umgebung innerhalb der Abgasfahne mit einem so genannten „Schnüffler“ [126] bestimmt. Die Abgasanalytik befand sich in einem nachgezogenen Messwagen. Die Motorabgase wurden im Feld somit abweichend zur Abgasgesetzgebung nicht direkt am Abgasrohr entnommen und über eine Leitung zu den Analysatoren geführt. Die Drehzahl- und Lastsignale aus der Motorsteuerung (ECU) wurden beim Straßentransport aufgezeichnet und an einem vergleichbaren Motor am Motorenprüfstand wiederholt. Mit welcher Methode die ECU-Signale am Prüfstand nachgebildet wurden und wie groß die Abweichungen sind geht aus der Untersuchung nicht hervor. Beim Betrieb mit HVO liegen die PN-Emissionen auf der Straße um 44 % und im Labor um 2 % niedriger als mit Dieselmotorkraftstoff. Die NO_x-Emissionen sind beim Straßentransport um ca. 50 % höher als am Motorenprüfstand. Beim HVO-Einsatz verringern sich die NO_x-Emissionen insgesamt um etwa 20 % im Vergleich zum Dieselmotortrieb.

LOVARELLIA et al. (2018) [106] erfassten mit einem PEMS (Fa. Testo 350) die NO_x-, CO- und CO₂-Emissionen eines Valtra N101 Traktors (82 kW Nennleistung, Abgasstufe IIIA, ohne AGN) beim Pflügen, Kreiseleggen, Eggen, Säen und Walzen im Dieselmotorkraftstoffbetrieb. Mit Hilfe von Positionsdaten wurden verschiedene Teilzeiten (wie z. B. die Wendezeiten) unterschieden. Die Ergebnisse zeigen, dass das Emissionsverhalten nicht allein von der Traktorarbeit (wie z. B. Pflügen) selbst, sondern auch von der Verteilung aus den einzelnen Teilzeiten (z. B. Arbeitszeit oder Wendezeiten) beeinflusst werden kann. Ein zusätzliches erstelltes Regressionsmodell auf Basis der ECU-Drehzahl und des ECU-Drehmoments zeigt nur eine geringe Abweichung bei der Schätzung der im Feld auftretenden CO₂-Emissionen bzw. des Kraftstoffverbrauchs (Bestimmtheitsmaß R² von 0,72 bis 0,95). Bei den NO_x- (R² von 0,22 bis 0,48) und CO-Emissionen (R² von 0,05 bis 0,19) weicht das Modellergebnis deutlich höher von den tatsächlichen Emissionen ab.

Bisher wurde der Einfluss der Prüfumgebung (realer Feldeinsatz oder Prüfstand) sowie der Umgebungsbedingungen (z. B. Temperatur) auf das Emissionsverhalten von Traktoren noch nicht hinreichend untersucht. Für moderne Motoren mit Abgasnachbehandlung liegen diesbezüglich nur Untersuchungen für PKW hinsichtlich der NO_x- und CO₂-Emissionen mit Dieselmotorkraftstoff vor.

KWON et al. (2017) [94] stellen bei Messungen mit einem PEMS (Horiba OBS-2200) an zwei PKW mit dem Emissionsstandard EURO 6 fest, dass es bei Umgebungstemperaturen von 0 °C bis 5 °C zu um 82 bis 192 % höheren NO_x-Emissionen kommt als bei 15 bis 20 °C. Auch KADIJK et al. (2016) [88] kommen zu dem Ergebnis, dass die NO_x-Emissionen bei Umgebungslufttemperaturen von 0 bis 5 °C um den Faktor 7 bis 9 höher liegen als bei 20 bis 30 °C. Der NO_x-Anstieg wird in beiden Untersuchungen auf die Reduzierung der AGR-Rate durch die Motorsteuerung zum Schutz des Motors zurückgeführt. Dadurch soll bei niedrigeren Umgebungstemperaturen die Ablagerungsbildung aus Kondenswasser und Partikeln im AGR-Kühler, Ansaugluftbereich oder im Partikelfilter vermieden werden. Eine Metastudie von BALDINO et al. (2017) [10] zeigt, dass die RDE von PKW (EURO 5 und 6) durchschnittlich um die Faktoren 4 bis 5 für NO_x und 1,3 für CO₂ höher liegen als der Grenzwert für Prüfstandsmessungen. Nur rund 10 % der getesteten PKW mit dem Emissionsstandard EURO 6 emittierten im realen Fahrbetrieb weniger oder gleich viel NO_x als der Prüfstandsgrenzwert. Ferner stellen DEGRAEUWE und WEISS (2017) [26] bei PEMS-

Messfahrten mit vergleichbaren Betriebsbedingungen (z. B. Fahrgeschwindigkeit, Beschleunigung, Umgebungstemperatur und Steigung) zum „Neuen europäischen Fahrzyklus“ (kurz NEFZ) am Rollenprüfstandsmessung rund 206 % höhere NO_x-Emissionen fest. Die Ergebnisse der PKW-Messungen verdeutlichen, dass die Wahl der Prüfumgebung (Straße oder Prüfstand) sowie die Umgebungstemperatur einen deutlichen Einfluss auf das Emissionsverhalten ausüben.

2.5 Folgerungen aus dem Stand des Wissens

Traktoren und andere Landmaschinen sind innerhalb der Klasse der mobilen Maschinen und Geräte (NRMM) eine der Hauptquellen für Abgasemissionen, wie Stickstoffoxide (NO_x), Partikelemissionen und Kohlenstoffdioxid (CO_2) [25][72]. Wie auch bei anderen Fahrzeugkategorien wurden die Abgasemissionsgrenzwerte für NRMM in den letzten Jahren zunehmend verschärft [57].

Die Einhaltung der Grenzwerte wird bei der Typgenehmigung an ausgebauten Motoren unter Anwendung des Non-Road Steady Cycles (NRSC) und Non-Road Transient Cycles (NRTC) am Motorenprüfstand geprüft [57][54]. Im Rahmen von Forschungsarbeiten haben sich zudem Leistungs- und Emissionsmessungen am Traktorenprüfstand bewährt, wo die Messung am Gesamtfahrzeug (Traktor) erfolgt. Dabei wird die Leistung üblicherweise mit einer Wirbelstrombremse, die über eine Zapfwelle mit dem Traktor verbunden ist, abgenommen. Als Prüfzyklus hat sich hierfür der stationäre NRSC bewährt [35][159][117][168]. Darüber hinaus können auch Messungen bei transientem Motorbetrieb in Anlehnung an den NRTC durchgeführt werden [95][96]. Da im Gegensatz zum Motorenprüfstand bei Messungen am Gesamttraktor das insgesamt trägere System den Motordrehmoment- und Drehzahlwechsel in transienten Phasen verlangsamt, ist eine Anpassung des NRTC für den Traktorenprüfstand erforderlich. So können die Drehzahl- und Drehmomentvorgaben des NRTC in Intervallen von z. B. 10 s gemittelt werden (10sNRTC), wodurch zwar die Dynamik reduziert wird, die Zyklusarbeit jedoch konstant bleibt. Untersuchungen mit einem derartig angepassten NRTC wurden bislang kaum durchgeführt. Unklar ist auch, ob Lastprofile aus dem realen Praxisbetrieb an einem Traktorenprüfstand in unveränderter Dynamik nachgefahren werden können.

Bisherige Forschungsarbeiten zeigen, dass der Drehzahl- und Drehmomentverlauf von Dieselmotoren einen starken Einfluss auf das Emissionsverhalten und den Kraftstoffverbrauch ausübt [11][105][133]. Da das tatsächliche Belastungsprofil bei landwirtschaftlichen Traktorarbeiten gegenüber dem NRSC, 13-Stufen-Test oder OECD Standard Code 2 stark abweicht [145][145][103] (der NRTC basiert hauptsächlich auf Baumaschinenarbeiten [174][164][173]) werden abseits der Typgenehmigungsprüfung die Emissionen landwirtschaftlicher Maschinen anhand einer Vielzahl erweiterter bzw. angepasster Methoden erhoben. Tabelle 4 zeigt eine Übersicht an Untersuchungen zur Bestimmung der Abgasemissionen von Traktoren bei unterschiedlichen landwirtschaftlichen Arbeiten und die dabei verwendeten Prüfmethode. Diese werden in Kapitel 2.4 näher beschrieben.

Tabelle 4: Übersicht zu Untersuchungen mit verschiedenen Methoden zur Bestimmung der Abgasemissionen von Traktoren während landwirtschaftlicher Arbeiten

Quelle	Abgasstufe	Kraftstoff	Feld-test		Prüfzyklus am Prüfstand							PEMS				
			Messtechnik (n, M, b _e)	ECU-Signale	stationär	transient	Modellierung Emissionen	Messung im Feld	Gesetzgebung							
					Deutz 5-Punkte	13-Stufen-Test	FAT 6-Stufen	OECD Code 2	NRSC	NRTC	10SNRTC	Eigener Zyklus				
RINALDI & NÄF (1992) [146]	-1)	DK	■	□	□	M	M	□	□	□	□	□	□	□	□	□
STARR et al. (1999) [165]	-1)	DK	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
ULLMAN et al. (1999) [173]	-1)	DK	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
HANSSON et al. (2001) [68]	-1)	DK	■	□	M	M	□	□	M	□	□	□	■	□	□	□
RINALDI & STADLER (2002) [147]	-1)	DK	■	□	□	□	M	□	M	□	□	□	■	□	□	□
LINDGREN (2004) [103]	-1)	DK	■	□	M	M	□	□	M	□	□	M	■	□	□	□
LI et al. (2006) [99]	-1)	DK B100	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■	□	□
LIJEWSKI et al. (2012) [102]	IIIA	DK	□	■	□	□	□	□	□	□	□	T	□	□	□	□
GIETZELT et al. (2012) [64]	IIIB	DK	□	■	□	□	□	□	M T	M	□	□	□	■	□	NTE MAW
JANULEVIČIUS et al. (2013) [84] und [85][87][83][82]	IIIA	DK	□	■	□	□	□	T	□	□	□	□	■	□	□	NTE
MERKISZ et al. (2013) [112] und [110][111][101]	IIIA	DK	□	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■	□	NTE
LANDIS et al. (2014)[96]	IIIA	DK	□	■	□	□	□	□	T	□	T	□	□	□	□	□
PÜTZ et al. (2014) [132] (nur Traktormessungen)	IIIA- IIIB	DK	□	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■	□	□
LEE et al. (2015) [98]	-1)	DK	■	□	□	□	□	□	□	□	□	M	□	□	□	□
PIRJOLA et al. (2017) [127]	IIIB	DK HVO	□	■	□	□	□	□	M	□	□	M	□	□	□	□
LOVARELLIA et al. (2018) [106]	IIIA	DK	□	■	□	□	□	□	□	□	□	□	■	■	□	□

1) vor Einführung der Abgasstufe I

M Motorenprüfstand
T Traktorenprüfstand

■ zutreffend
□ nicht zutreffend

Stationäre Prüfzyklen. In früheren Untersuchungen wurden auf Basis einer Datenerhebung im Feldtest traktorspezifische stationäre Prüfzyklen zur Emissionsmessung erstellt.

Über die Häufigkeitsverteilung von Drehzahl und Drehmoment der Feldtestdaten wurden typische Betriebspunkte identifiziert, die als Grundlage für die Prüfzyklen am Motorenprüfstand dienen [68][146]. Umgekehrt bildeten Messergebnisse aus standardisierten Prüfzyklen (z. B. 13-Stufen-Test [137][137], NRSC [57] oder OECD Standard Code 2 [120]) am Motorenprüfstand [69][68][147] oder am Traktorenprüfstand [18][85][84] die Datenbasis zur Modellierung des Emissionsverhaltens in der Praxis. Mit betriebspunktabhängigen Regressionsmodellen wurden dabei aus der im Feld aufgezeichnete Motordrehzahl- und Drehmomentverteilung die mittleren Abgasemissionen über die Betriebsdauer bestimmt.

Transiente Prüfzyklen. Neuere Untersuchungen zeigen, dass dynamische Drehzahl- und Laständerungen von Dieselmotoren einen signifikanten Einfluss auf die Abgasemissionen und den Kraftstoffverbrauch haben [11][105][133][136]. Daher wurden transiente Prüfzyklen entwickelt, die Drehzahl-/Lastprofile aus realen Traktorarbeiten beinhalten [105][164][102]. Verfügbare transiente Prüfmethoden unterscheiden jedoch nicht zwischen verschiedenen Traktorarbeiten oder Teilzeiten (wie z. B. Arbeitsverrichtungszeit oder Wendezeit). Darüber hinaus wurden sie für die Anwendung im ausgebauten Zustand am Motorenprüfstand entwickelt.

Kraftstoff. Die Untersuchung der Abgasemissionen während landwirtschaftlicher Traktorarbeiten fand bislang hauptsächlich mit Dieselmotoren statt. Lediglich zwei Arbeiten untersuchten zudem den kraftstoffspezifischen Einfluss von Biodiesel (B100) [99] bzw. hydrierten Pflanzenölen (HVO) [127] auf das Emissionsverhalten. Als klimaschonende Alternative zu Diesel hat sich vor allem auch der Einsatz von Rapsölkraftstoff nach DIN 51605 [29] in Traktoren bewährt [125][46][77]

Traktor und Motorentechnik. Die überwiegenden Untersuchungen zur Entwicklung von Prüfmethoden fanden an Traktoren mit der Abgasstufe IIIA bzw. mit noch älterer Motorentechnologie (vor der Einführung der Abgasstufe I) statt. Daher ist das Emissionsverhalten von modernen Traktoren mit Common-Rail-Kraftstoffeinspritzung und mit Abgasnachbehandlung (AGN) wie z. B. DOC, DPF oder SCR-System unter landwirtschaftlichen Einsatzbedingungen wenig geprüft.

Datenerfassung im Feldtest. Bei Untersuchungen an früheren Motorengenerationen ohne Common-Rail Einspritzsystem musste zur Datenerhebung im Feld aufwendige Messtechnik für die Erfassung von Drehzahl (n), Drehmoment (M) und des Kraftstoffverbrauchs (b_e) an den Traktoren installiert werden [146][103][164][173][99][147]. In modernen Traktoren ist die Verwendung von Drehzahl-, Drehmoment- oder Kraftstoffverbrauchssignalen aus dem Motorsteuergerät (engl. Engine Control Unit, kurz ECU), welche durch die Industriestandards ISO 11783 [78] bzw. SAE J1939 [151] über den CAN-Bus bereitgestellt werden, in Forschungsarbeiten der Landtechnik [18][156][123] sowie auch in der Gesetzgebung für Messungen mit einem PEMS [57][15] üblich. Hinsichtlich der Qualität der Drehmoment- oder Kraftstoffverbrauchssignale existieren noch Unsicherheiten. Die von der ECU berechneten Signale erreichten, je nach Art des Parameters und des Motortyps, erst nach einer Korrektur eine ähnlich hohe Genauigkeit wie bei der Messung mit Prüfstandsanalytoren [3][128][129][148][24][23][21]. Die Anwendbarkeit von aus der ECU ausgelesenen

Motordrehzahl- und Motordrehmomentsignalen zur Erstellung transienter Prüfzyklen für einzelne Traktorarbeiten und Teilzeiten wurde nicht untersucht.

Mit der Einführung der Abgasstufe V in der EU sind im sogenannten "In-service monitoring" (ISM) die Emissionen im tatsächlichen Betrieb (engl. Real Driving Emissions - RDE) von Traktoren und anderen NRMM aufzuzeichnen. Die Messdatenauswertung erfolgt nach der Moving Averaging Window (MAW) Methode, welche dem Gesetzgeber übermittelt wird [55]. Aufgrund der bisher geringen RDE-Datenbasis für NRMM, wurde kein gesetzlicher Grenzwert definiert. In der Abgasgesetzgebung für schwere Nutzfahrzeuge (HDV) [51][52] müssen nach der MAW-Methode bei einer RDE-Messung mindestens 90 % der Emissionswerte niedriger ausfallen als das 1,5-fache des Grenzwerts für Prüfstandsmessungen. Die Abgasemissionen mehrstündiger Messungen an Traktoren im tatsächlichen Fahrbetrieb variieren indessen stark [64][106]. Je nach Motor, Arbeit oder Auswertemethode liegen die Emissionen oberhalb oder unterhalb des Grenzwerts, welcher für die Messungen am Motorenprüfstand gilt [64]. Mehrere Untersuchungen [83][82][112] an Traktoren zeigen, dass anders als bei der MAW-Methode, die alternative Not-To-Exceed (NTE) Auswertemethode aus der US-Gesetzgebung große Anteile einer RDE-Messung, hauptsächlich aufgrund des transienten Motorbetriebs außerhalb des NTE-Kontrollbereichs, nicht berücksichtigt. Bei Vergleichsmessungen zwischen einem Traktor beim Straßentransport und einem baugleichen Motor am Motorenprüfstand kam es bei gleicher physikalischer Arbeit zu deutlichen Abweichungen im Emissionsverhalten [127]. Untersuchungen aus dem PKW-Bereich bestätigen, dass die Wahl der Prüfumgebung (Feldarbeit oder Prüfstand) sowie die Umgebungstemperatur einen erheblichen Einfluss auf das Emissionsverhalten ausüben [94][88][10][26]. Beim Vergleich stationärer Gasanalysatoren und portabler Emissionsmesstechnik (PEMS) ergaben sich Abweichungen innerhalb von $\pm 15\%$ bei der NO_x -Masse sowie im Bereich von $\pm 10\%$ bei der CO_2 -Masse bzw. beim Abgasmassenstrom [177][63]. Den Einfluss unterschiedlicher Umgebungsbedingungen auf die Messgenauigkeit im tatsächlichen Fahrbetrieb gilt es ferner noch weiter zu untersuchen [177].

Vorhandene Prüfmethode zur Erfassung tatsächlicher Abgasemissionen von Traktoren werden am ausgebauten Motor durchgeführt, spiegeln das Lastprofil aus dem tatsächlichen Betrieb von Traktoren nicht wider oder repräsentieren nur einen kurz andauernden Traktoreinsatz unter natürlich schwankenden Umgebungsbedingungen. Eine Methode zur systematischen Erfassung der tatsächlichen Emissionen am Gesamtfahrzeug Traktor bei verschiedenen landwirtschaftlichen Traktorarbeiten unter kontrollierbaren Umgebungsbedingungen liegt nach aktuellem Stand des Wissens nicht vor.

3 Zielsetzung

Ziel der Untersuchung ist es, eine Methode zu entwickeln, mit der die tatsächlichen Abgasemissionen (NO_x , CO, HC, PM, CO_2) von Traktoren bei verschiedenen landwirtschaftlichen Arbeiten unter wiederholbaren Bedingungen ermittelt werden können. Die Emissionsmessungen sollen am Gesamtsystem Traktor mit geringem Messtechnikaufwand durchführbar sein, eine lange Einsatzzeit repräsentieren sowie unabhängig von äußeren Umwelteinflüssen (Witterung, Untergrund, Fahrer ...) erfolgen können.

Das erste Teilziel umfasst die Prüfung, ob und wie gut an einem Traktorenprüfstand transiente Drehzahl- und Drehmomentverläufe an verschiedenen Traktoren mithilfe einer Wirbelstrombremse und eines Gaspedalstellers umsetzbar sind. Als Belastungsprofil soll der Prüfzyklus Non-Road Transient Cycle (NRTC) dienen, welcher hochtransiente Lastprofile aus Baumaschinenarbeiten enthält und für die Anwendung am ausgebauten Motor konzipiert wurde. Die Sollvorgaben des NRTC für Drehzahl und Drehmoment sollen unverändert (1sNRTC) und gemittelt in 10 s Intervallen (sogenannter 10sNRTC [95]) auf den Traktorenprüfstand übertragen werden. Der Grad an Übereinstimmung der Sollvorgaben für Drehzahl, Drehmoment und Leistung mit den Messwerten soll zur Beurteilung der Eignung des Traktorenprüfstands für die Anwendung transienter Fahrzyklen dienen.

Nach Überprüfung der grundsätzlichen Eignung des Traktorenprüfstands sollen in einem zweiten Schritt neue Fahrzyklen entwickelt werden, die auf dem tatsächlichen Fahrbetrieb von Traktoren basieren. Die Entwicklung und Anwendung der Praxisnahen Traktor-Fahrzyklen (PTFZ) umfasst die Teilzeile 2A bis 2D, welche in Abbildung 13 schematisch dargestellt werden.

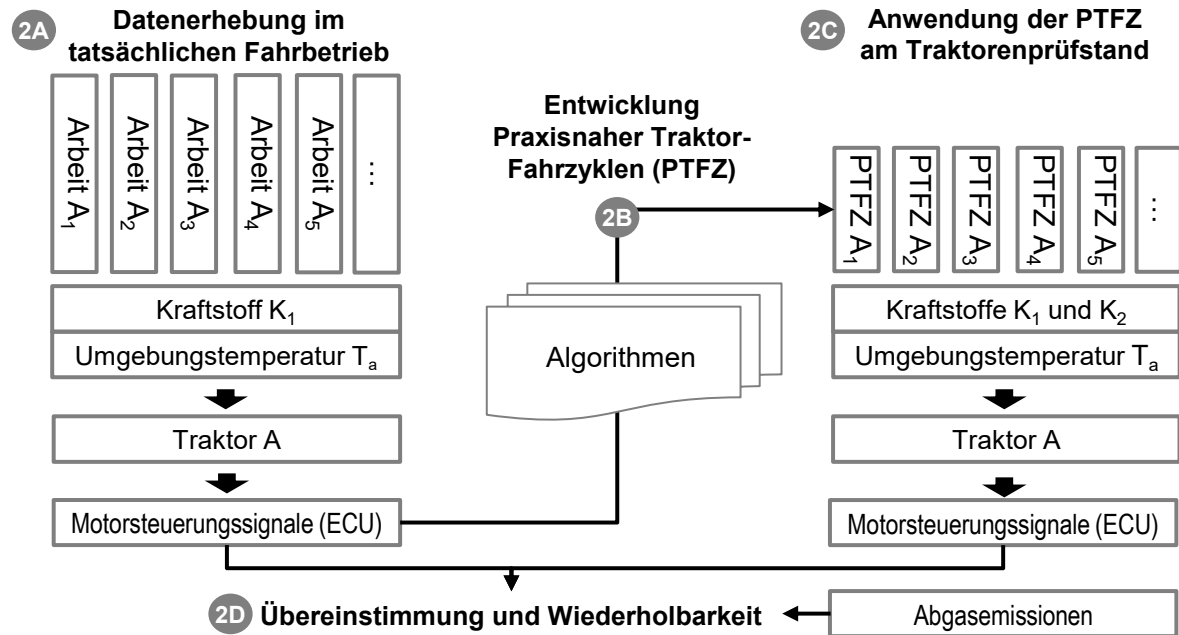


Abbildung 13: Entwicklung und Anwendung der Praxisnahen Traktor-Fahrzyklen (PTFZ)

- 2A Es gilt vorab die Fahrzeug- und Positionsdaten sowie die Umgebungsbedingungen eines Traktors (A) im tatsächlichen Fahrbetrieb über ein Jahr hinweg zu erheben.
- 2B Die Daten zur Entwicklung der Praxisnahen Traktor-Fahrzyklen (PTFZ) sollen primär aus den standardisierten Signalen der Motorsteuerung (ECU) stammen. Über Algorithmen sollen Drehzahl- und Drehmomentsequenzen zusammengefügt werden, die für alle durchgeführten Traktorarbeiten (wie z. B. Pflügen, Grubbern, Transport) repräsentativ sind. Diese Sequenzen sollen dann entsprechend der Häufigkeit ihres Auftretens zu PTFZ kombiniert werden.
- 2C Die PTFZ sollen auf den Traktorenprüfstand übertragen und die Emissionsmessungen mit zwei Kraftstoffarten (K_1 , K_2) unter vergleichbarer Umgebungstemperatur (T_a) zum tatsächlichen Fahrbetrieb im Feld durchgeführt werden.
- 2D Als Beurteilungskriterium soll die Übereinstimmung der im Feld gemessenen und am Prüfstand reproduzierten ECU-Signale sowie die Wiederholbarkeit der Messung des Abgasemissionsverhaltens am Prüfstand herangezogen werden

Abschließend soll im dritten Abschnitt geprüft werden, ob mit den PTFZ am Prüfstand die Emissionen aus dem tatsächlichen Fahrbetrieb reproduziert werden können. Abbildung 14 zeigt das Schema der Methodvalidierung mit den zugehörigen Unterpunkte 3A bis 3C.

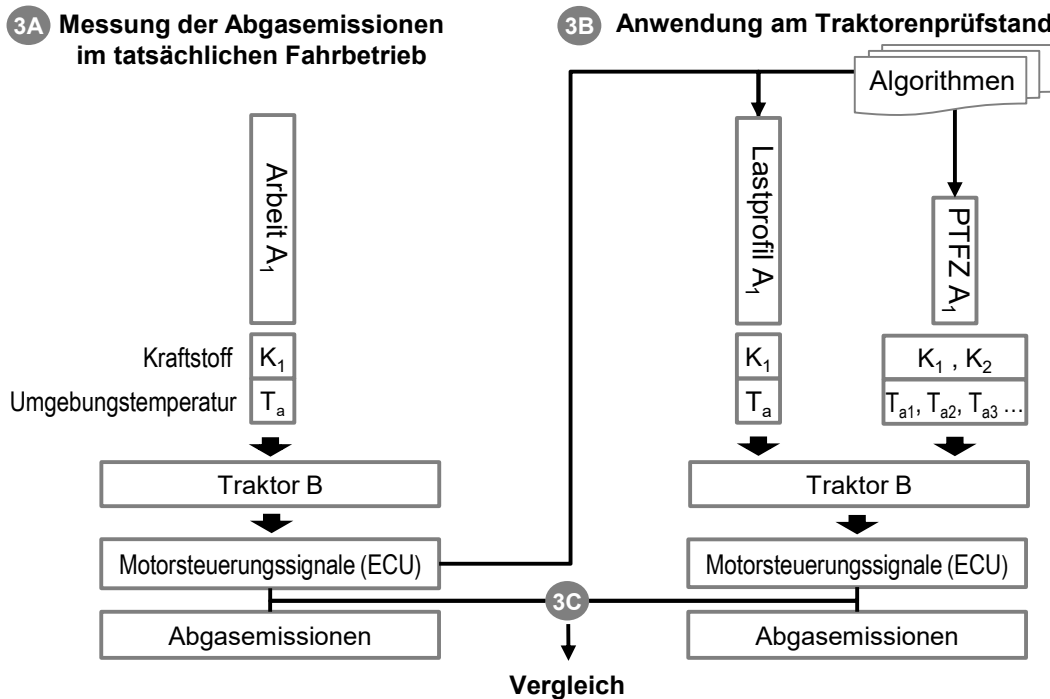


Abbildung 14: Validierung der Praxisnahen Traktor-Fahrzyklen (PTFZ)

3A Zur Validierung sollen an einem weiteren Traktor (B) mit einem portablen Emissionsmesssystem (PEMS) die Abgasemissionen im tatsächlichen Fahrbetrieb (RDE) einer Traktorarbeit erhoben werden.

3B Das Lastprofil der ECU-Signale aus den PEMS-Messungen soll wie im Feld aufgezeichnet sowie nach der Auswahl repräsentativer Segmente durch die Algorithmen als PTFZ am Prüfstand nachgestellt werden. Zusätzlich soll im PTFZ die Variation der Umgebungstemperatur ($T_{a1}, T_{a2}, T_{a3}, \dots$) und der Kraftstoffart (K_1, K_2) den Einfluss abweichender Bedingungen auf das Emissionsergebnis im Vergleich zur RDE-Messung untersuchen.

3C Dabei soll die Übereinstimmung der am Prüfstand gemessenen Abgasemissionen mit den tatsächlichen Emissionen aus dem Feld verglichen werden.

Weitere Einflussgrößen ausgehend von der Maschine, dem Prüfstand und der Umwelt werden dokumentiert und fließen in die Ergebnisbetrachtung ein.

Die Ergebnisse können zur Entwicklungsbegleitung für die Applikation von Motoreinstellungen, des Kraftstoffsystems oder des Abgasnachbehandlungssystems in der Forschung und Industrie verwendet werden. Ferner können noch nicht vorhandene Daten zur Bewertung der THG und gesetzlich limitierten Abgasemissionen für neue Kraftstoffe und spezifische landwirtschaftliche Arbeiten gewonnen werden.

4 Material und Methoden

In diesem Kapitel werden zunächst die Traktoren, Betriebsstoffe sowie Messtechnik für die Prüfung von transienten Drehzahl- und Drehmomentverläufen am Traktorenprüfstand beschrieben. Anschließend werden Feldtestdaten aufgezeichnet, um individuelle praxisnahe Traktor-Fahrzyklen (PTFZ) für verschiedene landwirtschaftliche Arbeiten zu entwickeln. Zur Validierung der Methode der PTFZ werden Messungen mit einem portablen Emissionsmesssystem (PEMS) im tatsächlichen Fahrbetrieb durchgeführt und mit den Ergebnissen am Traktorprüfstand verglichen.

4.1 Traktoren und Betriebsstoffe

Im Rahmen der Versuche werden sechs biokraftstofftaugliche **Traktoren** der Abgasstufe II bis IV hinsichtlich ihres Betriebsverhaltens am Prüfstand untersucht. Abbildung 15 zeigt die Traktoren exemplarisch im Feldeinsatz.



Abbildung 15: Versuchs-traktoren der Abgasstufe II bis IV

Der Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160 (Traktor II) erfüllt die Anforderungen der Abgasstufe II und ist mit einem Deutz Motor der Baureihe BF6M1013EC mit einem Pumpe-Leitung-Düse Hochdruckeinspritzsystem (PLD) ausgestattet. Der Traktor wurde mit einem Ein-Tank-System durch die Firma Hausmann, Wülfershausen auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff umgerüstet.

Der Traktor Valtra N101 Hi Tech (Traktor IIIA) verfügt über ein Common-Rail-Einspritzsystem und eine interne Abgasrückführung zur Verringerung des Ausstoßes an Stickstoffoxiden. Der AGCO Sisu Power 44CTA Motor erfüllt im Dieselpetrieb die Anforderungen der

Abgasstufe IIIA. Der Traktor ist Teil einer Kleinserie des Herstellers, welcher auch für den Betrieb mit Methan (Compressed Natural Gas, CNG) geeignet ist [108]. Der CNG-Betrieb wurde für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit nicht aktiviert. Die Motoreinstellungen sind somit auf den Einsatz mit Dieselkraftstoff optimiert.

Der Fendt Vario 718 SCR (Traktor IIIB) besitzt eine Nennleistung von 133 kW. Die Emissionen des Deutz TCD 6.1 L6 Common-Rail-Motors mit sechs Zylindern, 6,06 Liter Hubraum und 133 kW Nennleistung werden durch ein Abgasnachbehandlungssystem (AGN) mit einem Dieseloxydationskatalysator (DOC) und einem SCR-System reduziert. Der Traktor wurde von der BayWa AG für den Betrieb mit Rapsölkraftstoff umgerüstet. Hierzu wurde ein Zwei-Tank-System eingebaut. Dabei wird Dieselkraftstoff während der Start- und Spülphase aus einem 90 l Zusatztank entnommen. Der vorhandene Tank mit 400 l Fassungsvermögen, der vor der Umrüstung als Dieseltank diente, wird für den Rapsölkraftstoff verwendet. Ferner befindet sich in der Kabine ein Bedienteil, welches es dem Fahrer ermöglicht, zwischen Diesel- und Rapsölbetrieb zu wählen. In der Untersuchung von Ettl et al. (2019) [49] wird der Aufbau und die Funktion des Kraftstoffsystems erläutert.

Der Pflanzenöltraktor John Deere 6210R (Traktor IV-a) basiert auf einem Serien-Traktor der Abgasstufe IIIB. Die Anforderungen der Abgasstufe IV wurden durch den Austausch des serienmäßigen durch ein Prototyp-Abgasnachbehandlungssystem erreicht. Die nachgerüstete Prototyp-AGN beinhaltet einen DOC, einen Dieselpartikelfilter (DPF) mit passiver Regeneration und ein SCR-System. Der Aufbau und die Funktion der AGN wird in der Untersuchung von Huber et al. (2015) [77] im Detail erläutert.

Der John Deere 6215R (Traktor IV-b) ist ein Vorserienfahrzeug der aktuellen Abgasstufe IV mit 158 kW Nennleistung. Der Traktor mit DOC, DPF und SCR-System wurde direkt vom Hersteller auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff im Ein-Tank-System umgerüstet. Die Motorsteuerungssoftware der Traktoren IV-a und IV-b sind vom Hersteller auf den abschließlichen Betrieb mit Rapsölkraftstoff optimiert.

Der Pflanzenöltraktor Fendt Vario 724 S4 (Traktor IV-c) besitzt einen 6-Zylinder-Common-Rail-Deutz-Motor der Abgasstufe IV mit 174 kW Nennleistung. Das Abgas wird mit einem DOC, katalytisch beschichtetem DPF und einem SCR-System nachbehandelt. Der Traktor wurde von der BayWa AG für den Betrieb mit Rapsölkraftstoff umgerüstet. Diese Umrüstlösung wurde vom Hersteller freigegeben. Es wird ein vergleichbares Rapsölkraftstoffsystem wie beim Traktor IIIB verwendet. Die Einstellungen der Motorsteuerungseinheit (ECU) der Traktoren IIIB und IV-c bleiben bei der Umrüstung unverändert und damit auf den Betrieb mit Dieselkraftstoff optimiert. In Tabelle 5 sind die technischen Daten aller Traktoren zusammengefasst.

Tabelle 5: Technische Daten der Traktoren und Kurzbezeichnungen

Traktor	II	IIIA	IIIB	IV-a	IV-b	IV-c
Hersteller	Deutz-Fahr	AGCO Valtra	AGCO Fendt	John Deere	John Deere	AGCO Fendt
Modell	Agrotron TTV 1160	N101 Hi Tech	Vario 718 SCR	6210R	6215R	Vario 724 S4
Abgasstufe [57]	II	IIIA	IIIB	IV	IV	IV
Anzahl Zylinder	6	4	6	6	6	6
Hubraum in Liter	7,2	4,4	6,1	6,8	6,8	6,1
Einspritzsystem	PLD ^{a)}	CR ^{b)}	CR ^{b)}	CR ^{b)}	CR ^{b)}	CR ^{b)}
Nennleistung [57]	113 kW	81 kW	133 kW	154 kW	158 kW	174 kW
Ladeluftkühlung	ja	ja	ja	ja	ja	Ja
Turbolader	einstufig	einstufig	WG ^{d)}	VTG ^{c)}	VTG ^{c)}	WG ^{d)}
Abgasrückführung (AGR)	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja
Oxidationskatalysator (DOC)	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja
Partikelfilter (DPF)	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja
SCR-System	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja
Stufenloses Getriebe	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja
Kraftstoff (Herstellerefreigabe)	RK	DK CNG	RK DK	RK	RK	RK DK

^{a)}PLD = Pumpe-Leitung-Düse, ^{b)}CR = Common-Rail, ^{c)}VTG = Variable-Turbinengeometrie-Lader,
^{d)}WG = Waste-Gate, ^{e)}DK = Dieselmotorkraftstoff, ^{f)}RK = Rapsölkraftstoff, ^{g)}CNG = Compressed Natural Gas

Anbaugeräte

Bei den Traktoren IIIB und IV-c werden Messdaten im Feld bei landwirtschaftlichen Arbeiten erhoben. Diese beiden Traktoren werden für die Felduntersuchung ausgewählt, da der Einfluss von Abgasnachbehandlung auf die Abgasemissionen bei landwirtschaftlichen Traktorarbeiten betrachtet werden kann und eine Variation der Kraftstoffart möglich ist. Tabelle 6 zeigt die technischen Daten der Anbaugeräte des Traktors IIIB auf der Versuchstation Karolinenfeld der bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). Im Arbeitsvorgang Säkombination (SK) wurden die Kreiselegge (KE) und die Sämaschine (SM) im Heckanbau des Traktors gemeinsam verwendet. Beim Straßentransport (TR) kamen überwiegend zwei Anhänger mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 13 t der Fa. Obermaier und 18 t der Fa. Brantner zum Einsatz.

Der Traktor IV arbeitet auf dem landwirtschaftlichen Gutsbetrieb Mainkofen des Bezirks Niederbayern mit einem Fünf-Schar-Pflug Pöttinger Servo 45 (PF).

Tabelle 6: Anbaugeräte des Traktors IIIB

Anbaugerät	Kürzel	Marke/Model	Arbeitsbreite
Pflug	PF	Lemken Euro Pal OF	1,2 m mit vier Scharkörper
Sämaschine	SM	Lemken-Saphier 7 B	3 m
Grubber	GR	Rabe Fieldbird	6 m
Kreiselegge	KE	Lemken Zirkon 8/300	3 m
Mähwerk	MW	Krone EasyCut 32CV (2 Stück)	3 m Front- und 3 m Heckmähwerk je mit einem Futteraufbereiter

Betriebsstoffe

Am Traktorenprüfstand und im Feldeinsatz werden Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff sowie wässrige Harnstofflösung als Betriebsstoffe verwendet. Die Eigenschaften des Rapsölmotorkraftstoffs entsprechen den Qualitätskriterien der DIN 51605:2016 [29]. Der verwendete Referenzdiesel mit der Qualität CEC RF 06 03 genügt den Anforderungen für Typgenehmigungen für Motoren der Abgasstufen IIIB und IV. Im Feldeinsatz des Traktors IIIB wird als Hilfskraftstoff im Zwei-Tank-System Dieselmotorkraftstoff nach EN 590 getankt. Das SCR-System der Traktoren der Abgasstufen IIIB bzw. IV wurde mit wässriger Harnstofflösung nach DIN 70070 bzw. ISO 22241 versorgt.

4.2 Messtechnik

Die Emissionsmessungen erfolgen am Traktorenprüfstand mit stationären Gasanalysatoren und im Feld mit einem portablen Emissionsmesssystem (PEMS).

4.2.1 Traktorenprüfstand

Der Traktorenprüfstand des Technologie- und Förderzentrums ist für die Messung von gasförmigen Abgaskomponenten und Partikelmasse-Emissionen von Traktoren konzipiert. Die Emissionsmessungen am Prüfstand erfolgen in Anlehnung an die EU-Verordnungen 2016/1628 [30] und 2017/654 [65].

Anders als bei Typgenehmigungsprüfungen am Motorenprüfstand, bei denen die Motorleistung und Motordrehzahl direkt an der Kurbelwelle bestimmt wird [30][65] (vgl. Kapitel 2.3.1), wird am Traktorenprüfstand die Leistung an der Zapfwelle P_{PTO} nach OECD Standard Code 2 [120] ermittelt. Dazu dient eine Wirbelstrombremse (Eggers PT 301 MES, max. 340 kW, Auflösung 0,1 kW) mit der das Drehmoment (M_{PTO}) und die Drehzahl (n_{PTO}) an der Zapfwelle gemessen wird (4.1).

$$P_{PTO} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{PTO} \cdot M_{PTO}}{60000} \quad (4.1)$$

P_{PTO} : Leistung an der Zapfwelle in kW

n_{PTO} : Drehzahl an der Zapfwelle in min^{-1}

M_{PTO} : Drehmoment an der Zapfwelle in Nm

Das Getriebeübersetzungsverhältnis (i_{PTO}) zwischen Motor und Zapfwelle beträgt bei der eingestellten Zapfwellengeschwindigkeit von 1000 min^{-1} rund $2,0 \pm 0,05$ und ist abhängig vom Traktor. Wird das Drehmoment an der Zapfwelle (M_{PTO}) durch i_{PTO} dividiert ergibt sich das äquivalente Motordrehmoment (M_{Eng}). Die äquivalente Motordrehzahl (n_{Eng}) wird durch Multiplikation der Drehzahl an der Zapfwelle (n_{PTO}) mit i_{PTO} errechnet.

Der Wirkungsgrad an der Zapfwelle (P_{PTO}/P_B) beschreibt das Verhältnis aus der Leistung an der Zapfwelle P_{PTO} zur zugeführten Brennstoffleistung P_B . Die Brennstoffleistung P_B wird anhand des Kraftstoffverbrauchs und des analysierten Heizwerts von $11,92 \text{ kWh/kg}$ für Diesel- bzw. von $10,32 \text{ kWh/kg}$ für Rapsölkraftstoff bestimmt

Nach der EU-Verordnung 2016/1628 [30] und 2017/654 [65] ist die unkorrigierte Motorenleistung bei der Auswertung der Ergebnisse heranzuziehen, jedoch werden Bedingungen für die Gültigkeit der Messung gestellt. Der Faktor f_a (4.2) ist zur Überprüfung der Gültigkeit der Umgebungsparameter atmosphärischer Druck p_s in kPa und Umgebungstemperatur T_a in K definiert:

$$f_a = \left(\frac{99}{p_s}\right)^{0,7} \cdot \left(\frac{T_a}{298}\right)^{1,5} \quad (4.2)$$

Eine Prüfung der Abgasemissionen ist gültig, wenn die Bedingung $0,93 \leq f_a \leq 1,07$ erfüllt wird. Alle in der vorliegenden Arbeit durchgeführten NRTC-Messungen in Anlehnung an die Gesetzgebung bewegen sich im Rahmen dieses Gültigkeitsbereichs. Die Umgebungslufttemperatur am Prüfstand wird durch entsprechende Einstellung an der Lüftungsanlage gesteuert.

Für eine schnellere und genauere Einstellung der Betriebspunkte wird die Ansteuerung von Drehzahl und Drehmoment automatisiert. So erfolgt die Einstellung des Gaspedals mittels eines elektrischen Zylinders (RACO K6E4-105). Das Drehmoment wird durch eine Vorgabe des Erregerstroms der Wirbelstrombremse bestimmt. Es werden ferner PID-Regler (engl. Proportional-Integral-Derivative) zur Regelung des Drehmoments an der

Zapfwelle sowie zur Regelung der Stellung des Gaspedals eingesetzt. Die beiden Stellgrößen werden mit der Prüfstandssoftware sekundlich (1 Hz) vorgegeben.

Der Kraftstoffverbrauch wird mittels Waage (Mettler-Toledo KB60.2) über die Gewichtsabnahme der Kraftstoffmenge im Versuchstank erfasst. Dazu wird am Traktor das Kraftstoffsystem im Kraftstoffvorlauf und -rücklauf aufgetrennt und ein Versuchskraftstoffbehälter anstelle des Fahrzeugtanks verwendet, dessen Masse über die Waage kontinuierlich erfasst wird. Der Verbrauch an wässriger Harnstofflösung des SCR-Systems wird ebenfalls gravimetrisch bestimmt. Dazu wird ein externer Harnstofftank auf einer Tischwaage (Mettler-Toledo KA32s) platziert und mit dem SCR-System des Traktors verbunden. Beeinträchtigungen der Wägung durch Luftbewegungen werden durch eine Einhausung des Versuchsaufbaus minimiert.

Abbildung 16 zeigt den schematischen Aufbau des Traktorenprüfstands mit Wirbelstrombremse, Gaspedalsteller, Gas- und Partikelanalytoren vor (GA-A) und nach (GA-B) der AGN sowie der Kraftstoff- und Harnstoffwaagen.

Emissionsanalytik (GA-B) nach der Abgasnachbehandlung (AGN)

FTIR (AVL SESAM)
PM Verdünnungstunnel
Particle Analyzer (DMS500)

Gaspedalsteller
RACO K6E4-105

Emissionsanalytik (GA-A) vor der AGN

FID (M&A ThermoFID)
NDIR (ABB AO 2020)
NDUV (ABB AO 2020)

Wirbelstrombremse
EGGERS PT 301 MES

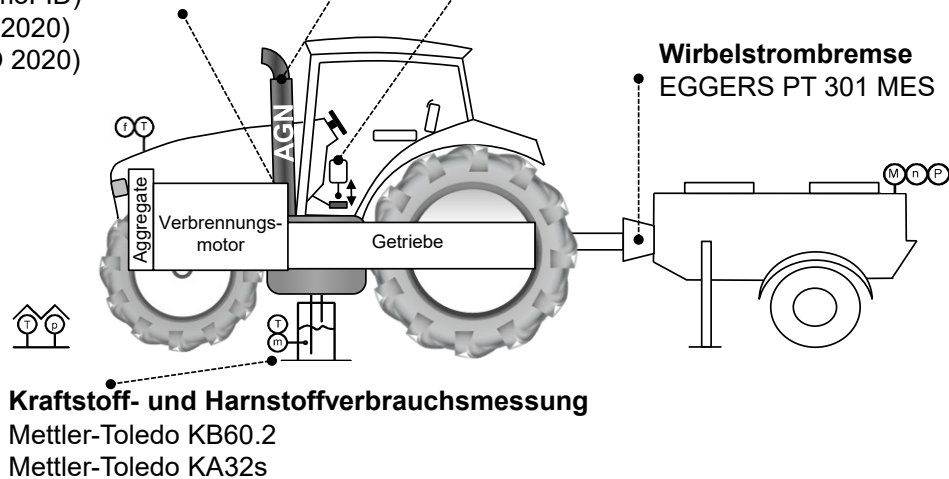


Abbildung 16: Schematische Darstellung des Traktorenprüfstands mit Messsystemen

Emissionsmesstechnik am Prüfstand

Für die Bestimmung der gasförmigen Emissionen werden zwei stationäre Gasanalyssysteme bestehend aus einer Kombination von Analysatoren verwendet.

Die Stickstoffoxide (NO_x), Kohlenwasserstoffe (HC), Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlestoffdioxid (CO₂), Lachgas (N₂O) und Ammoniak (NH₃) im Abgas nach der Abgasnachbehandlung (AGN) wurden mit einem SESAM 4 der Fa. AVL Emission Test Systems (GA-B) gemessen. Das stationäre Gasanalyssystem (GA-A) misst direkt am Abgasrohr nach dem Motor im Rohabgas vor der Abgasnachbehandlung (vor AGN). Eine Übersicht über die technischen Daten der Gasanalyatoren geben Tabelle 7 und Tabelle 8. Die maximale lineare Messwertabweichung der Analysatoren von GA-A und GA-B beträgt laut Herstellerangaben unter ±2 %.

Tabelle 7: Stationäres Gasanalyssystem A (GA-A) zur Bestimmung der gasförmigen Abgasbestandteile an der Messstelle im Rohabgas vor der Abgasnachbehandlung (AGN)

Messgröße	Messgerät/Hersteller	Messprinzip/Messverfahren
CO ₂ , CO	AO 2020 Fa. ABB	Nicht-Dispersives-Infrarot-Spektroskop (NDIR)
NO _x ¹⁾	AO 2020 Fa. ABB	Nicht-Dispersives-Ultraviolett-Spektroskop (NDUV)
HC ²⁾	ThermoFID Fa. M & A GmbH	Flammenionisations-Detektor (FID)

¹⁾ NO_x = NO + NO₂

²⁾ Summe der flüchtigen organischen Verbindungen; Messung im heißen Abgas

Tabelle 8: Stationäres Gasanalyssystem B (GA-B) zur Bestimmung der gasförmigen Abgasbestandteile an der Messstelle im Reinabgas nach der Abgasnachbehandlung (AGN)

Messgröße	Messgerät/Hersteller	Messprinzip/Messverfahren
CO ₂ , CO NO _x ¹⁾ N ₂ O, NH ₃	SESAM 4 Fa. AVL	Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskop (FTIR)
HC ²⁾	SESAM 4 Fa. AVL	Flammenionisations-Detektor (FID)
O ₂	SESAM 4 Fa. AVL	Paramagnetischer Detektor (PMD)

¹⁾ NO_x = NO + NO₂

²⁾ Summe der flüchtigen organischen Verbindungen; Messung im heißen Abgas

Der Abgasmassenstrom Q_m wird über eine Kohlenstoffbilanz aus dem Massenstrom des Kraftstoffs, der gravimetrischen Zusammensetzung des Kraftstoffs, der Abgaszusammensetzung (gemessen mit GA-B) und der Umgebungsfeuchte berechnet. Das Vorgehen

erfolgt hier in Anlehnung an Untersuchungen von MAUTNER et al. (2017) [108] und THUNEKE et al. (2009) [169] sowie in der ISO 8178 [79][80].

Die Partikelemissionen (PM) werden diskontinuierlich im verdünnten Abgas erfasst. Bei der Messung wird aus dem Abgasstrom ein Teilgasstrom entnommen und über ein Übertragungsrohr in den Verdünnungstunnel geleitet. Über die Zufuhr von Verdünnungsluft wird der verdünnte Abgasstrom unmittelbar über dem Filterhalter auf Temperaturen zwischen 42 und 52 °C konditioniert. Die Partikelabscheidung erfolgt in einem Filtergehäuse durch ein im Abstand von 17 mm hintereinander angeordnetes Filterpaar (Hauptfilter und Nachfilter). Zur Abscheidung dienen teflonbeschichtete Glasfaserfilter (Pall Life Sciences, Emfab™ Filters, TX40HI20WW, 44 mm Durchmesser) mit einem Abscheidegrad von 99,9 % Dioctylphtalat (DOP 0,3 µm).

Die Partikelanzahl (PN) wird mit einem Differential Mobility Spectrometer DMS 500 der Firma Cambustion Ltd. gemessen. Bei dem Messgerät handelt es sich um ein „Electrical-Sensing Mobility Spectrometer“. Mit dem Spektrometer kann die Partikelgrößenverteilung von Dieselmotorabgasen gemessen und daraus die Partikelanzahl bestimmt werden. Erfasst werden die für Dieselmotorabgas relevanten Partikel im Bereich von 5 nm bis 1000 nm. Für diesen Bereich werden Partikelanzahlkonzentrationen $dN/d\log D_p$ für 38 Partikelgrößenintervalle ausgegeben. Bei der Auswertung wurden die Gesamtpartikelanzahl betrachtet und dadurch keine Aufteilung Nukleations- oder Akkumulationspartikel vorgenommen. In Ettl et al. (2016) [47] erfolgt eine weiterführende Beschreibung der grundsätzlichen Funktionen des Messgeräts.

Alle Messwerte werden kontinuierlich mit einer Frequenz von einem Hertz erfasst und mithilfe eines elektronischen Datenerfassungs- und Steuerungssystems (LabView™) der Firma National Instruments Corp. aufgezeichnet. In weiteren Untersuchungen ist der Versuchsbau detailliert beschrieben [49][47][33][169].

4.2.2 Portables Emissionsmesssystem (PEMS)

Das portable Emissionsmesssystem (PEMS), welches am Traktor IV-c beim Pflügen im Feld und bei Vergleichsmessungen am Traktorenprüfstand eingesetzt wurde, ist in Abbildung 17 zu sehen. Das PEMS der Firma Sensors, Inc. beinhaltet eine Abgasmassenstrommessung sowie Analysatoren für die NO_x-, CO-, CO₂-, HC- und Partikelmasseemissionen. Eine Metallbox schützt die Messgeräte vor Wasser- und Staubeintrag sowie Vibrationen. Je nach Einsatzzweck kann die Schutzbox mit Gewichten ausgestattet werden, um den Traktor optimal für den Feldeinsatz auszubalancieren. Die Stromversorgung wird unabhängig vom Trägerfahrzeug durch einen 3 kW Generator (Honda EU 30i) in Kombination mit einer Batterie gewährleistet. Tabelle 9 zeigt die Messgrößen und -verfahren des PEMS zur Analyse der Abgasbestandteile an der Messstelle nach der Abgasnachbehandlung. Ferner wird darin die Genauigkeit der Analysatoren im PEMS in Tabelle 10 angegeben.

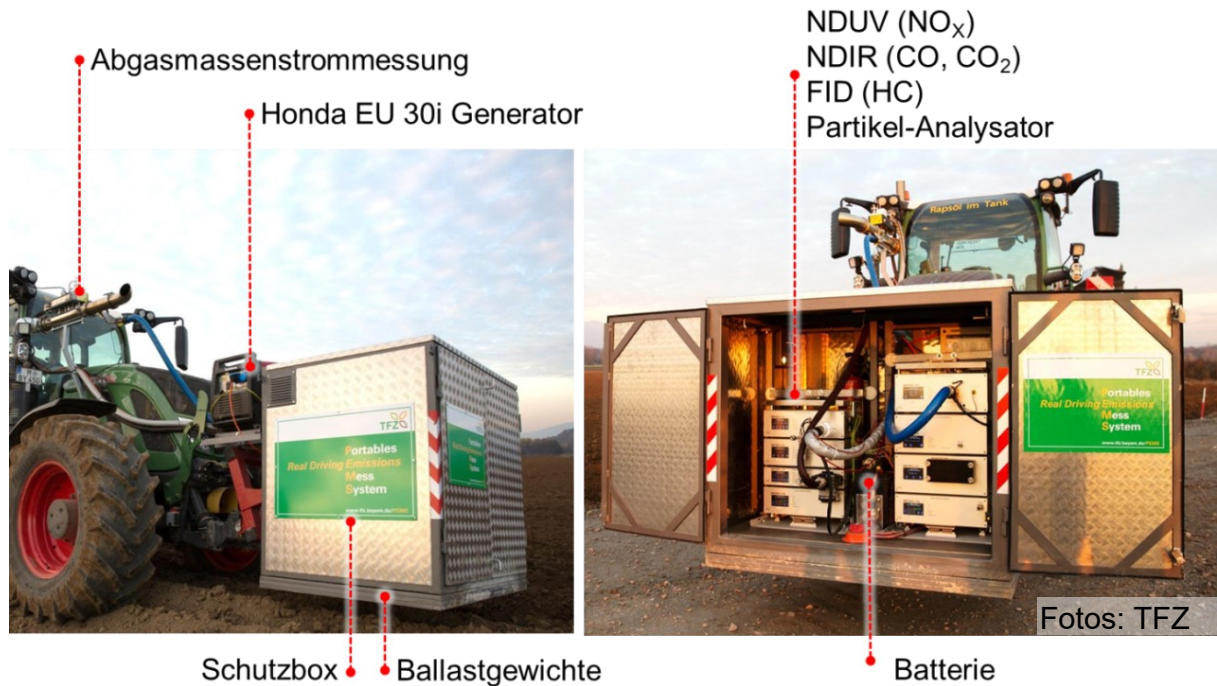


Abbildung 17: Portables Emissionsmesssystem (PEMS) eingehaust in einer Schutzbox am Traktor IV-c

Tabelle 9: Analysatoren des portablen Emissionsmesssystems (PEMS) zur Erfassung der Abgasbestandteile an der Messstelle im Reinabgas nach der Abgasmachbehandlung (AGN)

Messgröße	Messgerät	Messprinzip/Messverfahren
CO, CO ₂ , Abgasmas- senstrom	Fuel Economy Meter (FEM)	Kombination aus Nicht-Dispersives-Infrarot-Spektroskop (NDIR) und Differenzdruck-Durchflussmesser
NO, NO ₂	NO _x -Modul	Nicht-Dispersiver-Ultra-Violett-Analysator (NDUV)
HC	FID-Modul	Flammenionisations-Detektor (FID)
PM	Micro-Proportional Sample System (MPS), Continuous Particulate Module (CPM), Particulate Filter System (PFS)	Kombination aus Abgasverdün- nung, Elektrometer und Partikel- massenabscheidung

Tabelle 10: Messgenauigkeit der Analytoren des portablen Emissionsmesssystems (PEMS)

Messgröße	Genauigkeit bezogen auf den		Messbereich
	aktuellen Messwert ¹⁾	Endwert des Messbereichs ¹⁾	
NO	±2 %	±3 %	0 bis 3000 ppm
NO ₂	±2 %	±3 %	0 bis 1000 ppm
CO	±2 %	±0,3 %	0 bis 8 Vol.-%
CO ₂	±2 %	±0,3 %	0 bis 18 Vol.-%
HC	±2 %	±0,3 %	0 bis 100 ppm C1
Abgasmassenstrom	±2 %	±0,5 %	30 bis 2000 kg/h
Abgastemperatur	±1 % oder 2 K	-	-5 bis 700 °C

¹⁾ Die Angabe mit der höchsten Abweichung bzw. geringsten Genauigkeit zählt für die Bewertung

4.3 Prüfmethoden in Anlehnung an die Gesetzgebung

An allen Traktoren werden Messungen im Non-Road Steady Cycle (NRSC) und Non-Road Transient Cycle (NRTC) in Anlehnung an die EU-Verordnung 2016/1628 [30] absolviert. Der NRSC beinhaltet acht stationäre Prüfphasen im Motorkennfeld und der NRTC besteht aus einem transienten Drehzahl- und Drehmomentverlauf (siehe Kapitel 2.3.1). Ab der Abgasstufe V müssen darüber hinaus die Emissionen im tatsächlichen Fahrbetrieb mit PEMS im Feld dem Gesetzgeber berichtet werden. Die Auswertung der Emissionswerte erfolgt mit der MAW-Methode nach der EU-Verordnung 2017/655 [55].

4.3.1 Non-Road Transient Cycle (NRTC)

Im Non-Road Transient Cycle (NRTC) ändern sich Drehzahl- und Drehmomentverhältnisse des Motors sekundlich in unterschiedlichem Ausmaß. Der Prüfzyklus besteht aus einer Kaltstart- und einer Warmstartphase inklusive einer dazwischenliegenden Abkühlphase. Die drei Phasen dauern jeweils 20 Minuten und entsprechen zusammen einer Messung. Bevor ein Kaltstart durchgeführt werden darf, muss der Traktor konditioniert werden. Die Temperaturen des Motoröls, des Kühlmittels und der Abgasnachbehandlung müssen für 15 Minuten möglichst konstant im Bereich zwischen 20 und 30 °C liegen. Wird der Motor gestartet, beginnt eine 20 Minuten andauernde definierte Abfolge von Drehzahl- und Drehmomentwechseln mit gleichzeitiger Emissionsmessung am Traktor. Unmittelbar nach dem Zyklus wird der Motor abgestellt und die Messung beendet.

Der NRTC wird an den Traktoren in zwei Varianten angewandt. An allen Traktoren (II, IIIA, IIIB, IV-a, IV-b und IV-c) wird der 10sNRTC nach LANDIS (2012) [95] mit reduzierter Dynamik angewandt. Ferner wird der 1sNRTC, welcher ohne Mittelung der gesetzlichen NRTC-

Vorgaben und somit mit hoher Dynamik angewandt wird, an den Traktoren IIIA, IIIB, IV-a und wird IV-b geprüft.

Mit Hilfe der **Validierungsstatistik** gemäß den EU-Verordnungen 2016/1628 [57] und 2017/654 [54] wird geprüft, wie genau der NRTC am Traktorenprüfstand durchgeführt werden kann. Dazu erfolgt eine lineare Regressionsanalyse ($y = m \cdot x + b_{as}$) zwischen den in den Verordnungen vorgegebenen Sollwerten x und den gemessenen Istwerten y für die äquivalente Motordrehzahl, das äquivalente Motordrehmoment sowie die Leistung an der Zapfwelle. Die Steigung der Regressionsgeraden m , der Y-Achsenabschnitt b_{as} , die Standardfehler SE vom Schätzwert von y über x und das Bestimmtheitsmaß R^2 dienen als Beurteilungskriterien. Tabelle 11 zeigt die Grenzwerte der Validierungsstatistik aus den betreffenden EU-Verordnungen. Der Soll-Ist-Vergleich der Beurteilungskriterien mit den Grenzwerten weist auf die Güte der Messung hin.

Tabelle 11: Grenzwerte der Validierungsstatistik im NRTC für Drehzahl, Drehmoment und Leistung gemäß EU-Verordnungen 2016/1628 [30] und 2017/654 [67]

Beurteilungskriterien	Drehzahl	Drehmoment	Leistung
Standardfehler des geschätzten Verlaufs y über x (SE)	$\leq 5,0$ % der maximalen Prüfdrehzahl	$\leq 10,0$ % des maximalen Drehmoments	$\leq 10,0$ % der maximalen Leistung
Steigung der Regressionsgeraden (m)	0,95 - 1,03	0,83 - 1,03	0,89 - 1,03
Bestimmtheitsmaß (R^2)	≥ 97 %	≥ 85 %	≥ 91 %
Y-Achsenabschnitt der Regressionsgeraden (b)	$\leq 10,0$ % der Leerlaufdrehzahl	± 20 Nm oder, falls größer ± 2 % des höchsten Drehmoments	± 4 kW oder, falls größer, ± 2 % der höchsten Leistung

Es ist zulässig einzelne Datenpunkte für die Berechnung der Regressionsgerade zu streichen. In den Bedingungen A, B und C aus Tabelle 12 werden anhand der Leerlaufdrehzahl (n_{LD}), der Sollwerte und Istwerte für Drehzahl (n_{Soll} , n_{Ist}) sowie Drehmoment (M_{Soll} , M_{Ist}) sowie des maximalen Drehmoments (M_{Max}) die Möglichkeiten einer Punktstreichung geprüft. Treten gemäß der Bedingung A Drehmomentabweichungen im Leerlauf auf, dann können die Werte für die Drehzahl und Leistung gestrichen werden. Bei Drehzahl- und Drehmomentabweichungen ist es unter Erfüllung der Bedingungen B oder C möglich, die Einzelwerte für Drehzahl, Drehmoment sowie Leistung oder für die Berechnung der Regression auszunehmen.

Tabelle 12: Bedingungen zur Streichung von Messwerten für die Regressionsanalyse

Bedingungen	
A	$n_{\text{Soll}} = n_{\text{LD}}$ und $M_{\text{Soll}} = 0 \%$ und $M_{\text{Ist}} > (M_{\text{Soll}} - 0,02 \cdot M_{\text{Max}})$ und $M_{\text{Ist}} < (M_{\text{Soll}} + 0,02 \cdot M_{\text{Max}})$
B	$n_{\text{Ist}} \leq 1,02 \cdot n_{\text{Soll}}$ und $M_{\text{Ist}} > M_{\text{Soll}}$ oder $n_{\text{Ist}} > n_{\text{Soll}}$ und $M_{\text{Ist}} \leq M_{\text{Soll}}$ oder $n_{\text{Ist}} > 1,02 \cdot n_{\text{Soll}}$ und $M_{\text{Soll}} < M_{\text{Ist}} \leq (M_{\text{Soll}} + 0,02 \cdot M_{\text{Max}})$
C	$n_{\text{Ist}} \geq 0,98 \cdot n_{\text{Soll}}$ und $M_{\text{Ist}} < M_{\text{Soll}}$ oder $n_{\text{Ist}} < n_{\text{Soll}}$ und $M_{\text{Ist}} \geq M_{\text{Soll}}$ oder $n_{\text{Ist}} < 0,98 \cdot n_{\text{Soll}}$ und $M_{\text{Soll}} > M_{\text{Ist}} \geq (M_{\text{Soll}} + 0,02 \cdot M_{\text{max}})$

n_{Soll} = Soll-Drehzahl, n_{Ist} = Ist-Drehzahl, n_{LD} = Leerlaufdrehzahl,
 M_{Soll} = Soll-Drehmoment, M_{Ist} = Ist-Drehmoment, M_{Max} = max. Drehmoment

Schließlich wird die gemessene Zyklusarbeit W_{Ist} (in kWh) mit der theoretischen Bezugszyklusarbeit W_{Soll} (in kWh) gegenübergestellt. Eine Punktstreichung ist dabei nicht möglich. Die zulässige Abweichung von W_{Ist} zu W_{Soll} beträgt dabei - 15 % bis + 5 %. Ebenso werden die Zyklusergebnisse der Emissionen und des Verbrauchs aus den NRTC-Prüfzyklen werden mit den Ergebnissen des NRSC verglichen.

4.3.2 Abgasemissionen im tatsächlichen Fahrbetrieb mit PEMS

Die Emissionsmessungen im tatsächlichen Fahrbetrieb werden nach der Methode der gleitenden Mittelungsfenster (engl. Moving Averaging Window, kurz MAW) nach EU-Verordnung 2016/1628 [57] sowie der delegierten EU-Verordnung 2017/655 [55] (NRMM-Gesetzgebung) ausgewertet. Die gesetzeskonformen Berechnungen erfolgen mit der Software EMROAD 5.96 Build 3, die von der gemeinsamen Forschungsstelle der Europäischen Kommission (Joint Research Centre, JRC) erstellt wurde.

Die Auswertungsprozedur beginnt, wenn die Kühlmitteltemperatur zum ersten Mal 70 °C ($T_{\text{CW-Start}}$) nach dem Motorstart erreicht hat, aber spätestens 20 Minuten nach dem Motorstart. Bei der MAW-Methode werden die Messdaten danach in sekundlich beginnende Mittelungsfenster unterteilt. Jedes Fenster umfasst dieselbe CO_2 -Masse von 17,1 kg CO_2 , welche am Traktorenprüfstand im 10sNRTC mit Rapsölkraftstoff ermittelt wurde. Da keine Leistungsdaten zur Bestimmung der Kurbelwellenarbeit im Rapsölbetrieb vorliegen, wird die Zyklusarbeit aus den Leistungsdaten der Untersuchungen von Ettl et al. (2019) [49], gemessen an der Zapfwelle nach OECD Standard Code 2 [120], abgeleitet. Aufgrund mechanischer Verluste und zusätzlicher Nebenaggregate im Antriebsstrang ist die Zyklusarbeit, gemessen an der Zapfwelle, geringer und damit auch die spezifischen Emissionen entsprechend höher als an der Kurbelwelle. Wie auch bei den Messungen am

Traktorenprüfstand wird dieser Unterschied nicht korrigiert d. h. bei den Übereinstimmungsfaktoren (CF) beziehen sich die Grenzwerte auf die Kurbelwellenarbeit und die Messwerte auf die Zapfwellenarbeit. Somit entstehen durch den Bezug auf die Zapfwellenanstatt auf die Kurbelwellenleistung zwischen 10 und 19 % [155][4][170] höhere Emissionsergebnisse.

Für jede Messung wird die definierte Prüfdauer (PD) nach EU-Verordnung 2017/655 [54] festgelegt, wonach die Messung das fünf- bis siebenfache der CO₂-Referenzmasse aus dem NRTC enthalten muss. Die Messdauer wurde für alle Messfahrten auf das Siebenfache der CO₂-Referenzmasse aus dem NRTC begrenzt.

4.4 Entwicklung der Praxisnahen Traktor-Fahrzyklen (PTFZ)

Aus den Daten der Traktoren IIIB und IV-c im Feldeinsatz werden Fahrzyklen für verschiedene Traktorarbeiten gebildet, die am Traktorenprüfstand nachgestellt und mithilfe von PEMS-Messungen am Traktor IV-c validiert werden.

4.4.1 Datenerhebung im Feld

Die Dokumentation des Betriebsverhaltens im Feld erfolgt durch die kontinuierliche Aufzeichnung von Motorsteuerungsdaten am Traktor IIIB und IV-c mit einer Frequenz von einem Hertz (ein Messwert pro Sekunde). Dabei werden die Signale aus dem CAN-Bus des Traktors von dem Datenlogger Vector GL1010 mithilfe des Protokolls SAE J1939 [151] aufgezeichnet. Der Datenlogger wurde mit dem Diagnoseanschluss des G-BUS verbunden. Im Protokoll SAE J1939 [151] wird für jeden CAN-Bus-Parameter eine sogenannte SPN (Suspect Parameter Number) zugeteilt. Tabelle 13 beinhaltet die SPN (Suspect Parameter Number) der aufgezeichneten Parameter Motordrehzahl (n_{CAN}), Motordrehmoment (M_{CAN}), Motorlast bei zugehöriger Drehzahl (L_{CAN}), Kraftstoffverbrauch (B_{CAN}), Umgebungstemperatur (T_{a-CAN}), Fahrgeschwindigkeit (v_{CAN}) und Kühlmitteltemperatur (T_{CW-CAN}).

Tabelle 13: Aufgezeichnete ECU-Signale der Traktoren IIIB und IV-c

Kürzel	Einheit	SPN	SPN-Bezeichnung (engl.)	SPN-Bezeichnung (dt.)
n_{CAN}	min^{-1}	190	Engine Speed	Motordrehzahl
M_{CAN}	%	513	Actual Engine - Percent Torque	Motordrehmoment
L_{CAN}	%	92	Engine Percent Load At Current Speed	Motorlast bei zugehöriger Drehzahl
B_{CAN}	l/h	183	Engine Fuel Rate	Kraftstoffverbrauch
T_{a-CAN}	$^{\circ}\text{C}$	171	Ambient Air Temperature	Umgebungstemperatur
v_{CAN}	Km/h	904	Front Axle Speed	Fahrgeschwindigkeit
T_{CW-CAN}	$^{\circ}\text{C}$	110	Engine Coolant Temperature	Kühlmitteltemperatur

Regelmäßige Aufzeichnungen in Betriebstagebüchern erfolgen, um die Einsatzbedingungen, Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten sowie gegebenenfalls Störungen zu dokumentieren. Darin halten die Fahrer die Einsatzzeit in Bh für jede Traktorarbeit bzw. jedes Anbaugerät und das nachgetankte Kraftstoffvolumen fest. In Anhang 1 ist das Layout des Betriebstagebuchs (BTB) abgebildet. Durch die Aufzeichnung der Parameter wie Motorölstand, Startverhalten, Tankmengen, Fehlercodes sollen mögliche Störungen erfasst werden, welche sich auf die Erstellung des Zyklus auswirken könnten.

Die Positionangaben bestehend aus geographischen Länge (engl. Longitude) und Breite (engl. Latitude) werden aus den GPS-Daten (Global Positioning System) mit einem Empfänger (RM Michaelides electronics, CANview® GPS 5107, 22 Kanäle, 10 Hz Aktualisierungsrate, 3 m Genauigkeit) ermittelt. Aus den GPS-Koordinaten wurden neben der Fahrgeschwindigkeit (v_{GPS}) und -strecke (s_{GPS}) unter anderem der Kurswinkel (ω) bestimmt. Dieser Parameter dient zur Unterteilung in Teilzeiten und gibt den Winkel zwischen der aktuellen Fahrtrichtung relativ zum Norden ($\omega = 0^\circ$) wieder. Fährt das Fahrzeug beispielsweise in Richtung Osten so beträgt der Kurswinkel $\omega = 90^\circ$, während der Kurswinkel von $\omega = 180^\circ$ eine Fahrt in Richtung Süden und der Kurswinkel von $\omega = 270^\circ$ in Richtung Westen angibt. Die Kurswinkeländerung ($d\omega$) wird sekundlich durch die Ableitung des Kurswinkels (ω) über die Zeit bestimmt.

Die Einzeldatensätze der Motorsteuerungs- und Positionsdaten werden anhand des Zeitstempels synchronisiert und zu einer gemeinsamen Datei zusammengefügt. Die Datenverarbeitung erfolgt mit der Software CANGraph der Vector Informatics GmbH (Stuttgart, Deutschland), Microsoft Excel mit Visual Basic for Applications (VBA) und OriginPro 2015G der OriginLab Corporation (Northampton, USA).

4.4.2 Algorithmen und Zykluserstellung

Die Daten aus dem Motorsteuergerät (ECU), des GPS-Empfängers sowie aus dem Betriebstagebuch (BTB) werden in einem Datensatz zusammengefasst. Der Datensatz wird danach aufgeteilt in einzelne Traktorarbeiten sowie in charakteristische Motordrehzahl- und Drehmomentsegmente, die bestimmte Teilzeiten repräsentieren. Abbildung 18 zeigt schematisch den Ablauf der Aufteilung der Feldtestdaten und die Auswahl repräsentativer Segmente zur Fahrzykluserstellung.

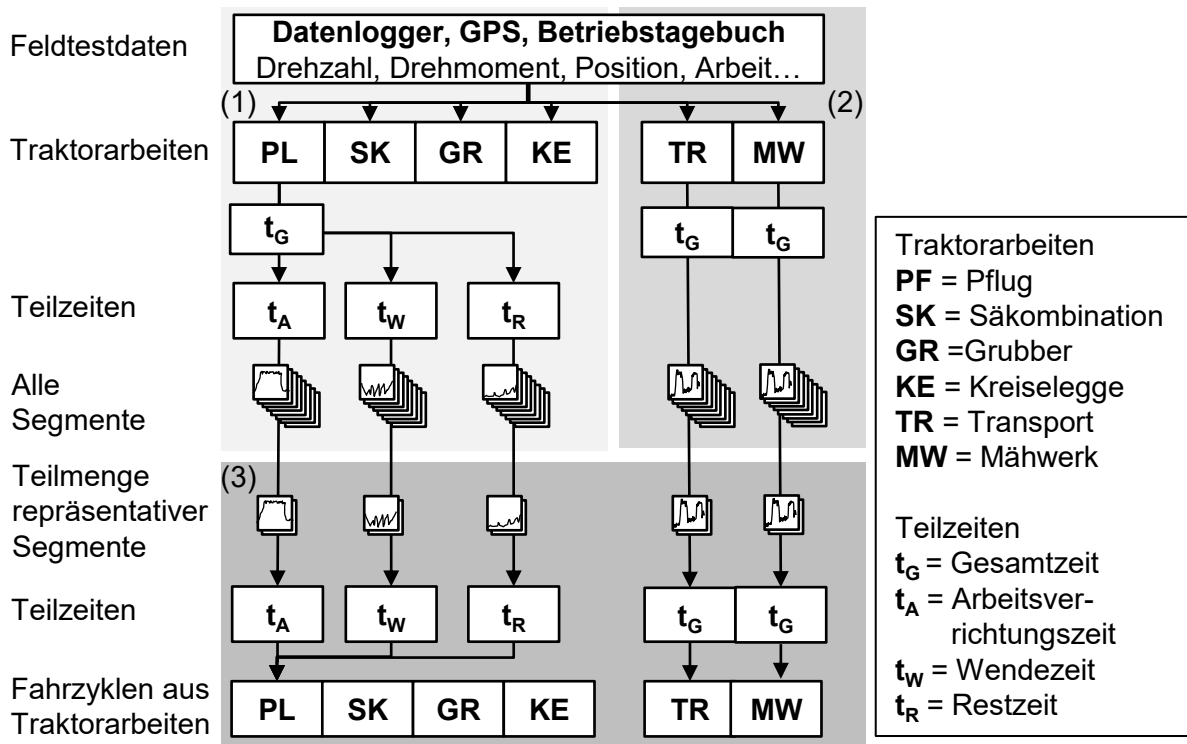


Abbildung 18: Aufteilung der Feldtestdaten in Traktorarbeiten, Teilzeiten und Segmente sowie Fahrzykluserstellung

Das Vorgehen bei der Aufgliederung in Segmenten unterscheidet sich zwischen Verfahren (1) der Bodenbearbeitung inkl. dem Säen und (2) dem Straßentransport sowie Mäharbeiten. Die Auswahl repräsentativer Segmente (3) und die Fahrzykluserstellung erfolgt für alle Arbeiten gleichermaßen.

(1) Bodenbearbeitung und Säen

Zunächst wird die Gesamtzeit (t_G) der Traktorarbeiten bei der Bodenbearbeitung (PF, GR, KE) sowie Säkombination (SK) in die Teilzeiten Arbeitsverrichtungszeit (t_A), Wendezeit (t_W) und Restzeit (t_R) unterteilt. Die Definitionen der Arbeitszeit erfolgt in Anlehnung an die Zeitgliederungen der TGL 80-22289 [28] sowie den Vorgaben des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL) aus WINKLER und FRISCH (2014) [180]. Ein Vergleich der Begriffe und Abkürzungen in den Zeitgliederungsschemata zeigt die Tabelle 14.

Tabelle 14: *Verwendete Arbeitszeitdefinitionen für die landwirtschaftlichen Arbeiten (PF, GR, KE, SK) und Vergleich mit den Terminologien nach TGL 80-22289 und KTBL [28][180]*

Arbeitszeitdefinitionen	TGL 80-22289 [28]	KTBL (nach [180])
Gesamtzeit t_G	Gesamtzeit T_{08}	Gesamtzeit t_g
Arbeitsverrichtungszeit t_A	Reine Arbeitszeit (Grundzeit) T_1	Arbeitsverrichtungszeit t_{11}
Wendezeit t_W	Zeit für das Wenden T_{21}	Wendezeit t_{21}
Restzeit $t_R = t_G - t_A - t_W$	Keine Definition $\triangleq T_{08} - T_1 - T_{21}$	Keine Definition $\triangleq t_g - t_{11} - t_{21}$

Die **Gesamtzeit** t_G umfasst bei dieser Untersuchung die gesamte Zeit der Datenaufzeichnung einer Traktorarbeit. Die Zeit bei abgestelltem Motor wurde nicht erfasst, da diese Stillstandzeiten für Abgas erfassung nicht relevant sind. Somit weicht die **Gesamtzeit** t_G in dieser Arbeit von den Definitionen zur Gesamtzeit T_{08} nach TGL [28] bzw. t_g nach KTBL [180] ab, in denen weitere Teilzeiten z. B. Reparatur- oder Stillstandzeiten ohne einen Motorbetrieb enthalten sind.

- Die **Arbeitsverrichtungszeit** t_A umfasst die Zeit zur Erledigung der tatsächlichen Arbeit, wie z. B. das unmittelbare Bearbeiten des Bodens mit einem Anbaugerät. Die Arbeitsverrichtungszeit ist durch hohe Motordrehzahl- und Motordrehmomentwerte sowie nur geringe Änderungen der Fahrtrichtung gekennzeichnet.
- Die **Wendezeit** t_W beschreibt die Zeit für die Summe aller Wendemanöver zwischen dem Anheben und Wiedereinsetzen des Arbeitsgeräts am Vorgewende bei gleichzeitigem Fahrtrichtungswechsel. Zusätzliche Pausen oder Tätigkeiten sind darin nicht inbegriffen. Durch das Verzögern und Beschleunigen beim Wenden des Fahrzeugs verändern sich Motordrehzahl und Motordrehmoment vergleichsweise stark und liegen im Mittel auf einem geringeren Niveau als bei der Arbeitsverrichtungszeit (t_A).

Die restliche Zeit, die nicht den Teilzeiten t_G , t_A und t_W zugeordnet werden kann wird als **Restzeit** t_R definiert. Die **Restzeit** t_R ergibt sich aus der Gesamtzeit (t_G) abzüglich Arbeitsverrichtungszeit (t_A) und Wendezeit (t_W). So sind beispielsweise Pflege-, Wartungs- und Einstellzeiten an den Maschinen sowie weitere Tätigkeiten in die Restzeit inbegriffen, welche außerhalb der Arbeitsverrichtungszeit (t_A) und Wendezeit (t_W) bei laufendem Motor durchgeführt werden.

Zur automatisierten Unterscheidung von Teilzeiten dient ein Algorithmus. Damit wird ein Datensatz, der z. B. beim Traktor IIIB aus insgesamt 82 Bh Pflügen besteht (PF) in 1415 Segmente Arbeitsverrichtungszeit (t_A), 1441 Segmente Wendezeit (t_W) und 284 Restzeitsegmente (t_R) aufgeteilt. Jedes einzelne Segment besteht aus einer Reihe aufeinanderfolgender Messdaten mit einer Aufzeichnungsfrequenz von einem Datensatz pro Sekunde. Abbildung 19 zeigt den ersten Teil des Algorithmus in Form eines Programmablaufplans (PAP). Der PAP wurde mit der Anwendung "Visual Basic for Applications (VBA)" realisiert.

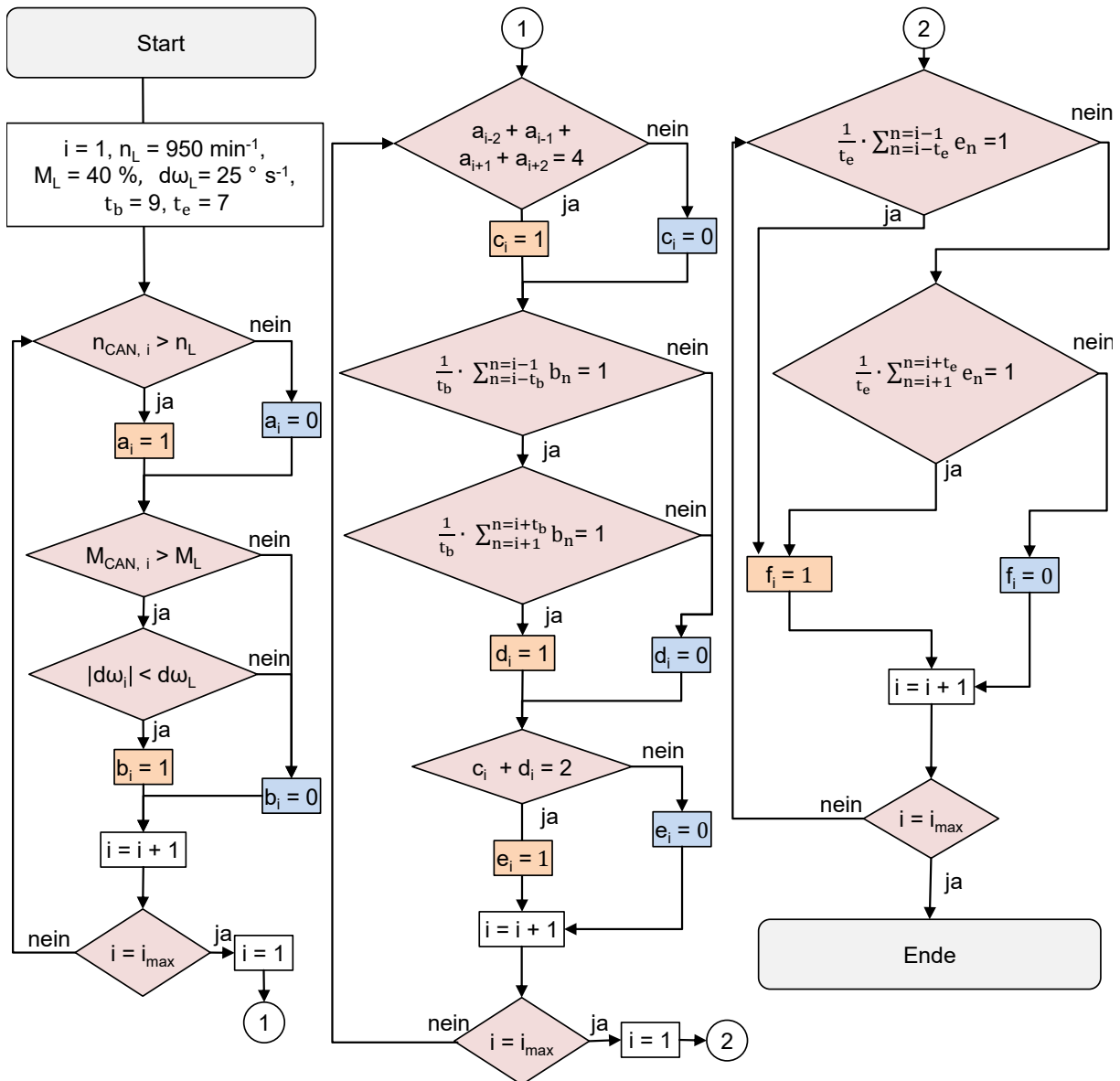


Abbildung 19: Programmablaufplan (PAP) des Algorithmus zur Prüfung der Datenpunkte (Aufzeichnungsintervall = 1 s) auf Merkmale einer Arbeitsverrichtungszeit

Für jede Zeile i wurden mit einer Abtastrate von einer Sekunde (1 Hz) die booleschen Variablen a , b , c , d , e und f definiert. Die boolesche Variable kann nur die Werte 0 oder 1 annehmen:

- Der Wert 1 einer Variablen zeigt an, dass eine Entscheidung im PAP mit „Ja“ beantwortet wurde. Damit besitzt der Datenpunkt das Merkmal einer Arbeitsverrichtungszeit (t_A).

- Bei einer „Nein“-Entscheidung im PAP wird die Variable mit dem Wert 0 beschrieben. Dies bedeutet, dass der entsprechende Datensatz das Merkmal einer Wende- (t_W) oder Restzeit (t_R) enthält.

Im ersten Schritt des Algorithmus werden Grenzwerte definiert, um den Datensatz den Variablen 1 oder 0 zuzuordnen. Die Grenzwerte für die Motordrehzahl n_L , das Motordrehmoment M_L und die Kurswinkeländerung $d\omega_L$ sowie die zwei Zeitkonstanten t_b und t_e wurden bei der Analyse der Daten beim Pflügen eines Feldes unter Berücksichtigung von Literaturangaben [18][129][81][153][82][1] ermittelt. Die Grenzwerte wurden bei der Voruntersuchung schrittweise verschärft, bis zusammenhängende Segmente der Arbeitsverrichtungszeit durch den Algorithmus (aus Abbildung 19) identifiziert werden konnten. Die so gewonnenen Vorgaben für n_L , M_L , $d\omega_L$, t_b und t_e wurden für die Arbeiten in der Bodenbearbeitung (PF, GR, KE) und mit der Säkombination (SK) übernommen.

Variable a: In der ersten Entscheidung des Programmablaufplans (PAP) gemäß Abbildung 19 wird geprüft, ob die Motordrehzahl n_{CAN} über dem Wert von $n_L = 950 \text{ min}^{-1}$ liegt ($a_i = 1$). Während der Arbeitsverrichtungszeit ist nämlich von einem kontinuierlich hohen Motordrehzahlniveau (n_{CAN}) auszugehen. So liegt die Motordrehzahl beispielsweise bei der Untersuchung von BURGUN et al. (2013) [18] beim Pflügen dauerhaft über 1500 min^{-1} . Es wird daher ausgeschlossen, dass die Drehzahl während der Arbeitsverrichtungszeit (t_A) in den Niedrigdrehzahlbereich zwischen der Leerlaufdrehzahl ($n_{LD} = 792 \text{ min}^{-1}$) und 950 min^{-1} ($n_L = n_{LD} \cdot 1,2$) absinkt ($a_i = 0$).

Variable b: Eine weitere Bedingung für die Zuordnung eines Datenpunkts zur Arbeitsverrichtungszeit (t_A) ist ein hohes Motordrehmoment, was durch die Entscheidung $M_L > 40 \%$ für jeden Datenpunkt abgefragt wird. Die Untersuchung von PITLA et al. (2016) [129] gibt einen Anhaltswert für die Festlegung des Grenzwerts M_L . Die Werte für M_{CAN} häuften sich bei der Feldarbeit im Bereich über 50 %, bei Wendezeit zwischen 23 und 33 % und Leerlaufphasen zwischen 8 und 13 %. Zudem wird die Änderung des Kurswinkels aus den Positionsdaten durch den Algorithmus abgefragt. Während der Arbeitsverrichtungszeit (t_A), z. B. beim Pflügen in der Furche, ist eine plötzliche Richtungsänderung innerhalb einer Sekunde selbst bei einem nicht geraden Feldstück unplausibel. Demzufolge wird für die Arbeitsverrichtungszeit eine Änderung des Kurswinkels $|d\omega_i|$ von weniger als 25° s^{-1} angenommen. Wenn das Motordrehmoment M_{CAN} größer als 40 % beträgt und die Kurswinkeländerungen $d\omega$ zwischen -25° s^{-1} und 25° s^{-1} liegt, ist die Variable $b_i = 1$,

Bei den Entscheidungen bzgl. der Variablen c, d, e und f wird geprüft, ob einer unregelmäßigen Reihung der Wert 1 und 0 in den Variablen a und b zu einem Segment der Arbeitsverrichtungszeit (t_A) zusammengefasst werden können:

- In den Segmenten der Wende- oder Restzeit (t_W oder t_R) wird angenommen, dass die Motordrehzahl mehrfach in den Niedrigdrehzahlbereich zwischen dem Leerlauf und 950 min^{-1} ($n_L = n_{LD} \cdot 1,2$) absinkt. Umgekehrt wird davon ausgegangen, dass die Motordrehzahl in der Arbeitsverrichtungszeit (t_A) in vier von fünf Sekunden oberhalb dieses Drehzahlniveaus bleibt. Liegt der Wert 1 in den zwei Datenpunkten vor (a_{i-2} , a_{i-1}) und nach (a_{i+2} , a_{i+1}) dem gegenwärtigen Datenpunkt i vor, dann ist $c_i = 1$, ansonsten ist

$c_i = 0$. Das Resultat $c_i = 0$ tritt daher beim Wechsel zwischen Vorwärts- und Rückwärtsfahrt im Vorgewende oder bei sonstigen längeren Unterbrechungen ein.

- Wenn die Bedingung $b_i = 1$ (hohes Motordrehmoment sowie geringfügige Kurswinkeländerung) für mindestens neun vorherige und neun ($t_b = 9$) nachfolgende Datenpunkte gilt, dann ist die Variable $d_i = 1$, ansonsten ist $d_i = 0$.
- Fährt der Traktor dauerhaft bei hoher Motordrehzahl ($c_i = 1$), bei hohem Drehmoment und geringen Kurswinkeländerungen ($d_i = 1$), bekommt die Variable e_i den Wert 1 zugewiesen. Ist dieser Zustand ($e_i = 1$) auch für sieben aufeinanderfolgende Datenpunkte ($t_e = 7$) vor (e_{i-7}, e_{i-6}, \dots) oder nach (e_{i+7}, e_{i+6}, \dots) dem Datenpunkt $i = 1$ gegeben, dann ist $f_i = 1$, ansonsten ist $f_i = 0$.

Wenn der letzte Datenpunkt erreicht ist ($i = i_{\max}$), wird das nächste Unterprogramm gestartet, ansonsten wird der Algorithmus mit dem nächsten Datenpunkt ($i = i + 1$) fortgesetzt. Die Reihung der Datenpunkte mit $f_i = 0$ werden der Wende- (t_w) oder Restzeit (t_R) zugeordnet. Es wird angenommen, dass ein Wendevorgang innerhalb von 60 s abgeschlossen ist. Diese Annahme stützt sich auf Angaben aus der Literatur, laut der ein Wendemanöver zwischen 24 und 36 s [81] bzw. zwischen 18 und 42 s [153] sowie 58 s [82] dauern. Wenn also die Anzahl der aufeinanderfolgenden Datenpunkte von $f_i = 0$ über 60 s beträgt, wird das Segment als Restzeit (t_R) gewertet. Ansonsten liegt eine Wendezeit vor.

(2) Straßentransport und Mähen

Der Motordrehzahl- und Motordrehmomentverlauf beim Transport und beim Mähen unterscheidet sich deutlich von der Bodenbearbeitung oder dem Säen. Der Algorithmus aus Abbildung 19 untergliedert die Gesamtzeit (t_G) aus diesem Grund nicht zuverlässig in die Arbeitsverrichtungs- (t_A), Wende- (t_w) und Restzeit (t_R). So ist beim Mähen die Motordrehzahl am Vorgewende beispielsweise im Gegensatz zur Bodenbearbeitung deutlich höher. Diese Fahrstrategie der dauerhaft hohen Motordrehzahl wird vom Fahrer gewählt, damit die Schwungmasse des Mähwerks nicht nach jedem Wendevorgang neu beschleunigt werden muss.

Daher wird die Gesamtzeit (t_G) in Anlehnung an die MAW-Methode [57] (siehe Kapitel 2.3.2) in sekundlich beginnende Segmente unterteilt. Jedes Segment besitzt die Länge von 1238 s, was der Prüfdauer des NRTC [57] entspricht. Das erste Segment erstreckt sich von Messsekunde 1 (i) bis 1238 ($i + 1237$), das zweite Segment von Messsekunde 2 bis 1239, das dritte Segment von Messsekunde 3 bis 1240 und fortfolgend. Die Auswertung endet beim Erreichen der letzten Messsekunde ($i + 1237 = i_{\max}$).

(3) Auswahl charakteristischer Segmente

Für jedes Segment und jede Teilzeit einer Traktorarbeit wird die Häufigkeitsverteilung der Motordrehzahl n_{CAN} von 750 min^{-1} bis 2250 min^{-1} in Schritten von 150 min^{-1} und des

Motordrehmoments M_{CAN} von 0 % bis 105 % in Schritten von 5 %-Punkten berechnet. Aus den Betriebsgrößen n_{CAN} und M_{CAN} werden die Änderungsraten dn_{CAN} und dM_{CAN} ermittelt. Die Berechnung von dn_{CAN} (4.3) und dM_{CAN} (4.4) erfolgt mit Hilfe der Nenn- (n_{ND}) und Leerlaufdrehzahl (n_{LD}) in Anlehnung an LINDGREN (2014) [105]. Die Häufigkeitsverteilung von dn_{CAN} und dM_{CAN} wird in Intervallen von $0,05 \text{ \% s}^{-1}$ zwischen $-1,0 \text{ \% s}^{-1}$ und $1,0 \text{ \% s}^{-1}$ unterteilt.

$$dn_{CAN} = \frac{n_{CAN, i} - n_{CAN, i-1}}{n_{ND} - n_{LD}} \cdot \frac{100}{t_i - t_{i-1}} \quad (4.3)$$

$$dM_{CAN} = \frac{M_{CAN, i} - M_{CAN, i-1}}{t_i - t_{i-1}} \quad (4.4)$$

Anschließend werden die Häufigkeitsverteilungen jedes einzelnen Segments mit einer linearen Regressionsanalyse mit der Verteilung der gesamten Teilzeit (t_A , t_W , t_R) verglichen. So wird beispielsweise beim Pflügen die Häufigkeitsverteilungen von n_{CAN} , M_{CAN} , dn_{CAN} und dM_{CAN} jedes einzelnen der insgesamt 1441 Wendevorgänge mit den Häufigkeitsverteilungen dieser Parameter über die Summe aller Wendezeiten (15,4 Bh) verglichen. Die Segmente mit dem höchsten mittleren Bestimmtheitsmaß (R^2) aus der linearen Regressionsanalyse aller Betriebsgrößen n_{CAN} , M_{CAN} , dn_{CAN} und dM_{CAN} werden als repräsentativ eingestuft und für die Zykluserstellung verwendet.

Nach Möglichkeit werden die Teilzeiten t_A (z. B. Fahrt in der Furche) und t_W (z. B. Wenden im Vorgewende) im Fahrzyklus, wie in der Praxis, im Wechsel angeordnet. Zudem sollte der Fahrzyklus (in Anlehnung an den Aufbau des NRTC) mit einem Restzeitsegment t_R beginnen und enden. Der prozentuale Anteil an Arbeitsverrichtungs-, Wende- und Restzeitsegmente in den erzeugten Fahrzyklus sollte um weniger als zwei Prozentpunkte im Vergleich zur Verteilung der Teilzeiten in den Ausgangsdaten aus dem Feldtest abweichen.

4.4.3 Verarbeitung der Drehzahl- und Drehmomentdaten

Die erstellten Fahrzyklen bestehen aus einer Abfolge von den Signalen der Motordrehzahl (n_{CAN}) und des Motordrehmoments (M_{CAN}) welche während der Arbeiten im Feld von der Motorsteuerung (ECU) über den CAN-Bus ausgegeben werden.

Am Traktorenprüfstand werden die Betriebsgrößen der Gaspedalstellung sowie die Drehmoment der Zapfwellenbremse so gewählt, dass der Traktor möglichst identische Motordrehzahl und -drehmomentsignale (n_{CAN} , M_{CAN}) im Vergleich zum Feldbetrieb ausgeben soll. Dazu muss der Zusammenhang zwischen der Gaspedalstellung bzw. der Drehmomentvorgabe an der Zapfwellenbremse und ECU-Signale des Traktors bekannt sein. Daher werden die ECU-Signale n_{CAN} und M_{CAN} in 75 (Traktor IIIB) bzw. 129 (Traktor IV-c) Betriebspunkten verteilt im Motorkennfeld am Traktorenprüfstand erfasst. Die Betriebspunkte ergeben sich durch Variation der Stromstärke I_{pedal} zur Steuerung des Gaspedalstellers und dem Drehmoment an der Zapfwelle M_{PTO} .

Mit der Gaspedalposition soll das Drehzahlsignal n_{CAN} des Motors eingestellt werden. Abbildung 20 zeigt die hierzu ermittelte lineare Regression der Motordrehzahl (n_{CAN}) in Abhängigkeit der Stromstärke I_{pedal} . Für die Traktoren IIIB und IV-c liegt das Bestimmtheitsmaß der Regression zwischen der Motordrehzahl (n_{CAN}) und der Stromstärke am Gaspedalsteller (I_{pedal}) in beiden Fällen bei über 99 %.

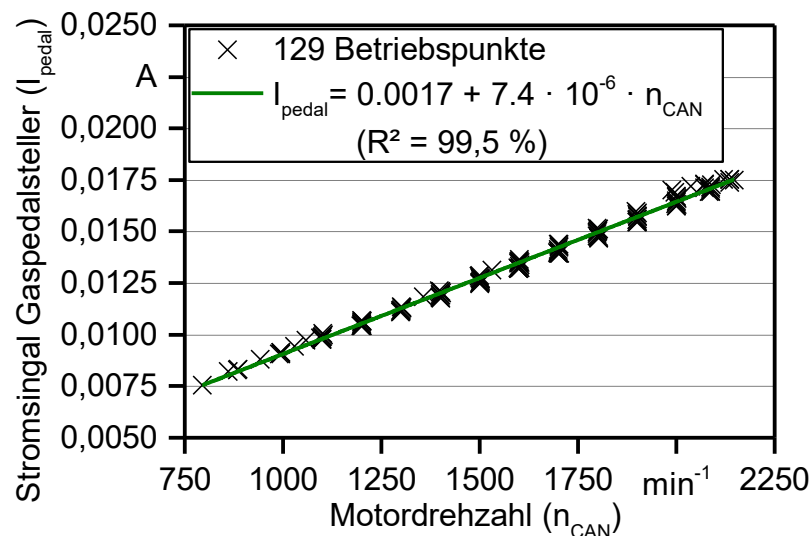


Abbildung 20: Lineare Abhängigkeit zwischen Motordrehzahl n_{CAN} und Stromsignal I_{pedal} zur Steuerung des Gaspedals des Traktors IIIB

Zusätzlich zur Motordrehzahlvorgabe erfordert die Anwendung von Prüfzyklen die Steuerung des Drehmoments an der Zapfwellenbremse (M_{PTO}). Abbildung 21 zeigt die nichtlineare Funktion Poly2D (4.5), mit welcher das Drehmoment an der Zapfwelle (M_{PTO}) in Nm in Abhängigkeit der ECU-Signale M_{CAN} und der n_{CAN} errechnet wird. Die Berechnungen werden mit der Software OriginPro 2015G[®] (OriginLab Corporation) ausgeführt und die Werte der Koeffizienten m_1 bis m_6 sind in Anhang 2 aufgelistet.

$$M_{PTO} = m_1 + m_2 \cdot n_{CAN} + m_3 \cdot M_{CAN} + m_4 \cdot n_{CAN}^2 + m_5 \cdot M_{CAN}^2 + m_6 \cdot n_{CAN} \cdot M_{CAN} \quad (4.5)$$

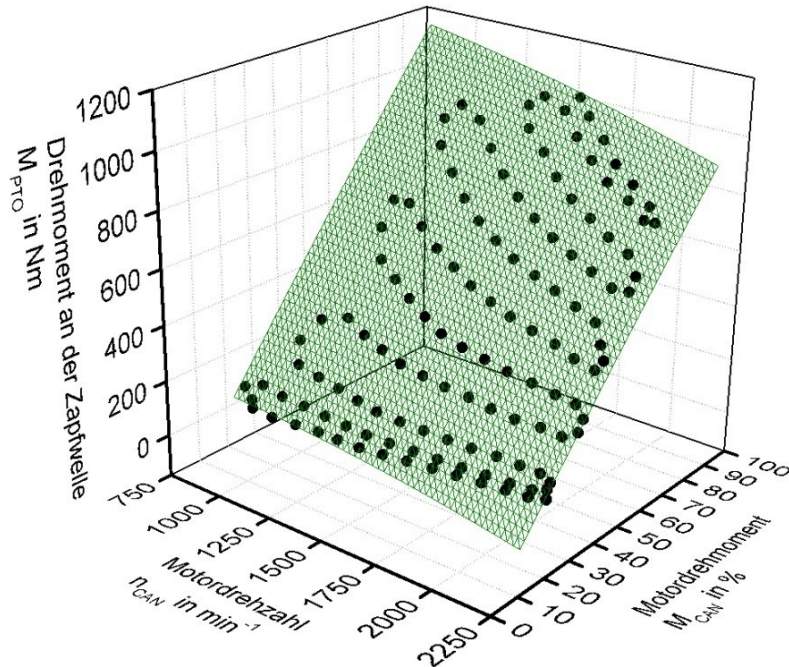


Abbildung 21: Korrelation zwischen dem Drehmoment an der Zapfwelle (M_{PTO}) und den beiden CAN-Signale Motordrehzahl (n_{CAN}) und Motordrehmoment (M_{CAN}) aus 129 Betriebspunkten des Traktors IIIB

Für die Traktoren IIIB und IV-c liefert die Funktion (4.5) ein Bestimmtheitsmaß der Messwerte von $R^2 = 99,5\%$. Die gute Eignung vergleichbarer Regressionsmodelle zeigte sich auch bei anderen Fragestellungen. Beispiele hierfür sind Untersuchungen zur Modellierung von Traktoremissionen von RINALDI und STADLER (2002) [147], zur Berechnung der Traktorzugleistung von ČUPERA et al. (2013) [23] oder Berechnung der Traktorleistung an der Zapfwelle von ČUPERA und SEDLÁK (2011) [21].

Die Regressionsmodelle aus Abbildung 21 und Abbildung 22 werden zur Ansteuerung des Gaspedals und der Zapfwellenbremse (I_{pedal} , M_{PTO}) bei der Nachbildung der ECU-Signalbasierten Fahrzyklen (n_{CAN} , M_{CAN}) am Traktorenprüfstand angewandt.

4.4.4 Anwendung und Auswertung

Der Traktor wird vor der Anwendung der Fahrzyklen vorkonditioniert. Das Vorgehen ist an die Vorbereitung zur Erstellung einer Motorabbildungskurve für die Messung am Motorenprüfstand angelehnt [54]: Am Traktorenprüfstand wird der Traktor bei Nenndrehzahl und -last betrieben, bis eine konstante Motorkühlmittel- und Motoröltemperatur erreicht ist.

Aufgrund der Messung am Gesamtfahrzeug wird zusätzlich auf das Erreichen einer konstanten Getriebeöltemperatur vor der Zyklusanwendung geachtet.

Anschließend werden die Fahrzyklen jeder Traktorarbeit viermal in Folge wiederholt. Die erste Wiederholung wird zunächst ohne Emissionsmessung durchgeführt, um das Traktorsystem auf die mittlere Motorbetriebstemperatur der jeweiligen Arbeit zu konditionieren. Während der darauffolgenden drei Wiederholungen des Fahrzyklus finden die Emissionsmessungen statt. Für Wartungsarbeiten werden Pausen von jeweils fünf Minuten zwischen den vier Prüfläufen im Leerlaufbetrieb festgelegt, um z. B. die Filterplättchen für die Partikelmassebestimmung zu wechseln oder den Kraftstoff- oder Harnstoffversuchstank aufzufüllen.

Zur Überprüfung der Testläufe wird eine Regressionsanalyse in Anlehnung an die Validierungsstatistik gemäß der EU-Verordnung 2016/1628 [30] und 2017/654 [67] (aus Kapitel 4.3.1) durchgeführt. Der Vergleich erfolgt zwischen den Soll-Werten von Motordrehzahl (n_{CAN}) und dem Drehmoment (M_{CAN}) aus dem erstellten Fahrzyklus (x) und den Messwerten nach Anwendung des Fahrzyklus (y). Ein Ausschluss von Messwerten wie bei der Bewertung des NRTC (siehe Kapitel 4.3.1) wird nicht durchgeführt.

Zudem wird das Emissionsverhalten in den Fahrzyklen zur Einschätzung der Plausibilität und Wiederholbarkeit ausgewertet. Zu der Bestimmung der Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs über die Gesamtarbeit (in g/kWh) werden die Fahrzyklusergebnisse (in g/kWh) jeder Traktorarbeit nach der im Feld eingesetzten Betriebszeit (in Bh) gewichtet. Die Resultate werden mit dem Emissionsfaktor f_u dargestellt, welcher die spezifischen Emissionen für jede Abgasemissionskomponente (in g/kWh) der Fahrzyklen im Verhältnis zu den Emissionen (in g/kWh) des 10sNRTC im Dieselmotorbetrieb beschreibt.

Zusätzlich werden Lastfaktoren der Fahrzyklen ermittelt, welche die Auslastung des Motors bei den absolvierten Fahrzyklen kennzeichnet. Der Lastfaktor (LF) [158] ist definiert als das Verhältnis zwischen der mittleren Motorleistung innerhalb einer bestimmten Betriebsdauer und der maximalen Leistung bei Nenndrehzahl (2100 min^{-1} für die Traktoren IIIB und IV-c).

4.4.5 Validierung

Am Traktor IV-c wird geprüft, ob durch die Übertragung der ECU-Signale Motordrehzahl (n_{CAN}) und Motordrehmoment (M_{CAN}) vom Feld auf den Prüfstand, auch dasselbe Emissionsverhalten resultiert.

Die Messungen im Feld erfolgen am Traktor IV-c mit einem Fünfscharpflug Pöttinger Servo 45 Plus bei ca. 380 Bh Laufzeit des Traktors. Die gesamte Messdauer von 8,5 h (PF-G) untergliedert sich in drei Messfahrten über 2,9 h (PF-I), 3,2 h (PF-II) und 2,4 h (PF-III). Der Traktor wird vor jeder Wiederholung mit Rapsölkraftstoff vollgetankt, mit Rapsölkraftstoff gestartet und das Zwei-Tank-System auf den permanenten Rapsölbetrieb eingestellt. Die Umschaltung auf den Dieselmotorbetrieb für die Messfahrten wurde deaktiviert.

Die Signalverläufe von n_{CAN} und M_{CAN} der drei PEMS-Messungen im Feld (PF-I, PF-II, PF-III) werden über die vollständige Messdauer (PF-G) am Traktorenprüfstand ohne Anpassung (1:1) reproduziert. Auch die Kühlmitteltemperatur bei Messbeginn ($T_{CW-start}$) am Traktorenprüfstand sollte mit der im Feld vergleichbar sein. Zudem wird mit der Steuerung der Zu- und Ablüftung im eingehausten Traktorenprüfstand die gleiche Umgebungstemperatur wie bei den Feldmessungen im Freien angestrebt. Abbildung 22 zeigt den Versuchsaufbau im Feld und am Traktorenprüfstand.



Abbildung 22: Emissionsmessung im Feld und am Traktorenprüfstand

Ob sich die mittlere NO_x -, HC-, CO- und PM-Konzentration im Abgas sowie der mittlere Abgasmassenstrom zwischen den Messungen im Feld mit PEMS ($n = 3$) und am Traktorenprüfstand mit PEMS bzw. GA-B ($n = 3$) unterscheiden, wird mit Hilfe des t-Tests bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ überprüft [59][121].

Zusätzlich soll das Emissionsergebnis der drei PEMS-Messungen im Feld über eine Messdauer von 8,5 h (PF-G) als praxisnahe Traktor-Fahrzyklen (wie in Kapitel 4.4 beschrieben) mit verkürzter Messzeit (PTFZ) am Traktorenprüfstand reproduziert werden. Ergänzend zur Validierung werden wesentlichen Einflussgrößen bei der Durchführung des PTFZ auf das Emissionsverhalten am Beispiel der Umgebungstemperatur in den Abstufungen 8 °C, 15 °C, 25 °C und 36 °C sowie der Kraftstoffvarianten RK und DK variiert. Die Variation soll die Robustheit der Methode bei abweichenden Bedingungen am Prüfstand im Vergleich zur RDE-Messung aufzeigen.

5 Ergebnisse und Diskussion

Zunächst wird gezeigt, wie gut die Drehzahl- und Drehmomentvorgaben transienter Prüfzyklen auf Basis der Gesetzgebung für den Motorenprüfstand am Traktorenprüfstand realisiert werden können. Als nächstes werden Fahrzyklen für verschiedene Traktorarbeiten am Traktorenprüfstand angewandt, die auf der Aufzeichnung von Feldtestdaten basieren. Mit Emissionsmessungen im tatsächlichen Fahrbetrieb im Feld wird überprüft, wie gut das Emissionsverhalten im realen Feldeinsatz mit Fahrzyklen am Traktorenprüfstand reproduziert werden kann.

5.1 Transiente Prüfzyklen am Traktorenprüfstand

Der Güte des Motordrehzahl- und -drehmomentverlaufs im Non-Road Transient Cycle (NRTC) bei der Anwendung am Traktorenprüfstand wird anhand der Validierungsstatistik aus der NRMM-Gesetzgebung [57][54] überprüft.

Der NRTC wird am Traktorenprüfstand in zwei Varianten angewandt. Im 1sNRTC werden die Soll-Vorgaben für Drehzahl und Drehmoment, welche in der Gesetzgebung [57][54] definiert sind, ohne Abänderung am Traktorenprüfstand durchlaufen. Im 10sNRTC, welcher von LANDIS (2012) [95] vorgeschlagen wurde, werden Soll-Vorgaben für Drehzahl und Drehmoment in Intervallen von 10 s gemittelt (siehe Kapitel 4.3.1). Abbildung 23 zeigt exemplarisch den Soll-Ist-Vergleich von Drehzahl und Drehmoment des 10sNRTC und 1sNRTC am Traktorenprüfstand mit dem Traktor IIIA über die Messdauer der Prüfzyklen.

Die Höhe der Abweichungen von Drehzahl und Drehmoment im Soll-Ist-Vergleich hängt primär vom Zyklusabschnitt ab. Mit Verkürzung des Mittelungsintervalls steigen die Abweichungen vor allem im Bereich zwischen 235 und 600 s Messzeit an. Dieser Zyklusabschnitt repräsentiert hochtransiente Radlader- und Planieraupenarbeiten, wodurch der Motor im Traktor dem vorgegebenen Drehzahl- und Drehmomentverlauf nur bei langsamerem Wechsel folgen kann. Beim 1sNRTC ist die Regelung des Traktors in Phasen mit sehr hoher Dynamik am Limit. Im Bereich ab ca. 600 s ist die Drehzahl im Mittel höher und ändert sich weniger stark. Hier ist die Erfüllung der Validierungsstatistik auch ohne Mittelung der NRTC-Vorgaben möglich. Dies betrifft insbesondere den Zyklusabschnitt zwischen 628 und 777 s, welcher im NRTC speziell das Betriebsprofil von Traktormotoren widerspiegelt.

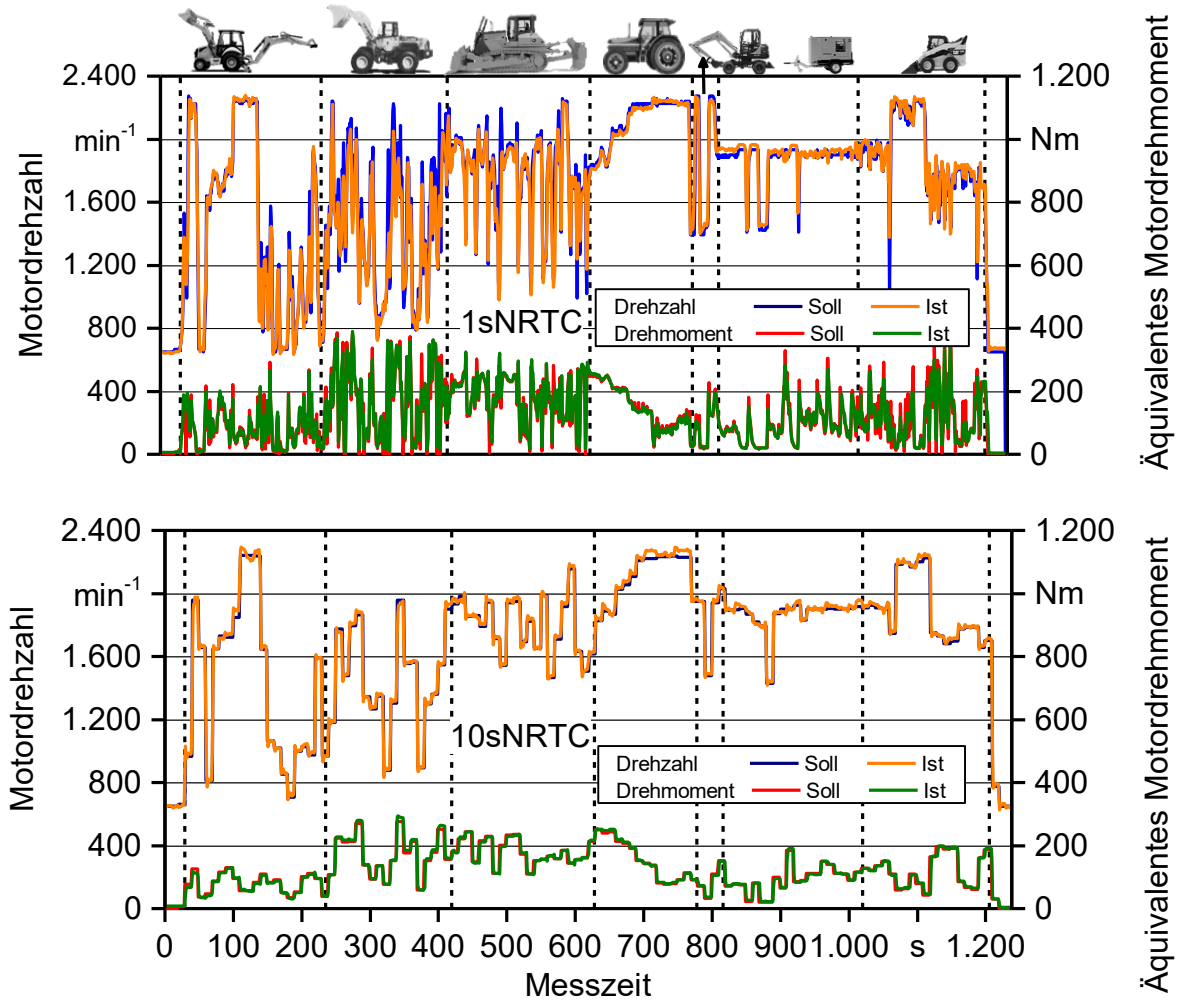


Abbildung 23: Soll- und Istwerte von Motordrehzahl (n_{Soll} , n_{Ist}) und äquivalentem Motordrehmoment (M_{Soll} , M_{Ist}) des Traktors IIIA bei den NRTC-Varianten mit unterschiedlich langen Mittelungsintervallen

Die Güte der Testläufe wird mit der Validierungsstatistik nach EU-Verordnung 2016/1628 [57] anhand einer linearen Regressionsanalyse zwischen den Sollwerten und den gemessenen Istwerten für die äquivalente Motordrehzahl und das Motordrehmoment sowie für die Leistung an der Zapfwelle ermittelt. Abbildung 24 zeigt die Bewertungskriterien für die Regressionsgerade sowie die Messwerte aus den NRTC-Messungen der Traktoren IIIA, IIIB, IV-a und IV-b mit Rapsöl- (RK) und Dieselkraftstoff (DK). Weitere Parameter der Regressionsanalyse für die Messdaten der Leistung an der Zapfwelle und der Traktoren II und IV-c sind im Anhang 3 zu finden.

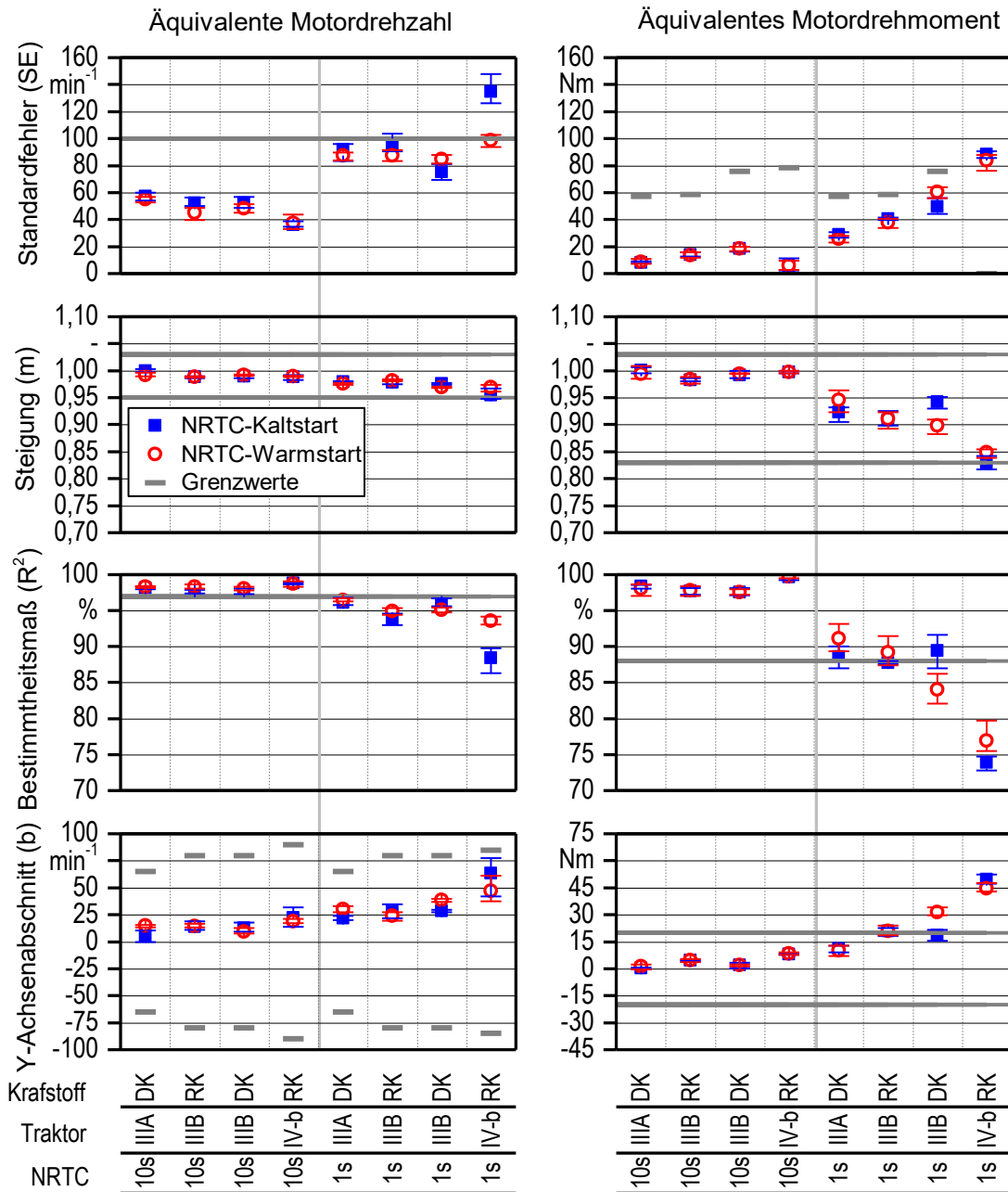


Abbildung 24: Mittelwert und Spannweite von Parametern der Regressionsanalyse zwischen Soll- und Istwerten von Drehzahl und Drehmoment bei NRTC-Varianten 1sNRTC und 10sNRTC mit verschiedenen Traktoren und Kraftstoffen im Kalt- und Warmstart (je n = 3)

Alle hier betrachteten NRTC-Varianten können am Traktorenprüfstand störungsfrei angewandt werden. Die Regelung der Motordrehzahl und des Motordrehmoments mit Gaspedalsteller und Wirbelstrombremse führt auch in transienten Phasen zu keinem Ausfall (z.B. durch das "Abwürgen" des Motors). Die Parameter der Regressionsgeraden $y = m \cdot x + b_{as}$ zwischen den Ist- (x) und Sollwerten (y) unterscheiden sich zwischen den Messungen im 10sNRTC und 1sNRTC:

Im 10sNRTC wird in allen Durchläufen der sechs Traktoren die Kriterien der Validierungsstatistik gemäß EU-Verordnung 2016/1628 [57] erfüllt. Einzig Traktor II mit mechanischem Pumpe-Leitung-Düse Einspritzsystem hält im Kaltstart aufgrund des trägen Ansprechens der Motordrehzahlverstellung die Grenzwerte der Validierung für die Drehzahl nur knapp ein (siehe Anhang 3). Bei den Traktoren mit Common-Rail-Kraftstoffeinspritzung wird beim Soll-Ist-Vergleich im 10sNRTC ein Bestimmtheitsmaß (R^2) bis über 99 % für Drehzahl, Drehmoment und Leistung erreicht. Somit können die Ergebnisse aus den Untersuchungen von LANDIS 2012 [95] und LANDIS 2014 [96] zur Anwendung des 10sNRTC anhand des Vergleichs mit der gesetzlichen Validierungsstatistik an weiteren Traktoren und an einem anderen Traktorenprüfstand bestätigt werden.

Beim 1sNRTC, also bei gleicher Dynamik der Drehzahl-Drehmoment-Änderung wie beim gesetzmäßigen NRTC für den Motorenprüfstand, werden die Anforderungen der Validierungsstatistik überwiegend erfüllt, jedoch liegt keine Messung durchgängig innerhalb der Grenzwerte. Eine größere Abweichung ist bei der Messung des Traktors IV-b zu beobachten. Dabei ist die Übereinstimmung der Soll- und Ist-Drehzahlen im Kaltstart mit Rapsölkraftstoff geringer als bei den anderen Messungen im 1sNRTC. Die Abweichungen treten insbesondere bei den Änderungen an Drehzahl- und Drehmoment innerhalb der ersten Minute im Zyklus nach dem Motorstart auf. Zu diesem Zeitpunkt ist die Rapsölkraftstofftemperatur im Niederdruckkraftstoffsystem mit 25 bis 30 °C unterhalb der optimalen Betriebstemperatur von ca. 60 bis 80 °C. Die folglich höhere Viskosität des Rapsöls im Kaltstart kann zur Durchflussminderung bei der Einspritzung im Vergleich zum Warmstart führen [92] und damit den Drehzahl- und Drehmomentanstieg verlangsamen. Zu Zyklusbeginn wirken im Kaltstart zudem die erhöhten Verluste des kalten Motors (z. B. Wandwärmeverluste) und des Zapfwellengetriebes (z. B. Reibungsverluste) einer höheren Dynamik beim Betriebspunktwechsel entgegen. Im 1sNRTC streuen die Parameter der Regressionsanalyse (vgl. Abbildung 24) zwischen den Traktoren stärker als im 10sNRTC. Mit zunehmender Dynamik (ohne Mittelung der NRTC-Sollwerte) sinken tendenziell die Steigung (m) und das Bestimmtheitsmaß (R^2) bei zunehmendem Standardfehler (SE) und Y-Achsenabschnitt (b_{as}). Die Regressionsgerade wird somit flacher, da die hohen Drehzahl- und Drehmomentspitzen des NRTC in transienten Phasen nicht immer erreicht werden.

Bei den meisten Messreihen unterscheiden sich Drehzahl- und Drehmomentmesswerte zwischen dem Kalt- und Warmstart kaum. Zudem zeigt sich am Traktor IIIB, welcher mit Rapsöl- als auch mit Dieselmotorkraftstoff gemessen wurde, kein unmittelbarer Einfluss der Kraftstoffart auf die Dynamik des Motors.

Der Unterschied zwischen der gemessenen Zyklusarbeit W_{Ist} zur theoretischen Bezugszyklusarbeit W_{Soll} ist ein weiteres Kriterium für die Güte der Messung. Dieser liegt bei allen Testläufen innerhalb des gültigen Bereichs von -15 % bis +5 % [54]. Die Abweichung von W_{Ist} zu W_{Soll} beträgt im Mittel -0,2 % bei einer Schwankungsbreite von $\pm 1,8\%$. Bei 75 % der Kalt- und Warmstarttests befindet sich W_{Ist} innerhalb von $\pm 1\%$ von W_{Soll} . Steigende Drehzahl- und Drehmomentabweichungen bei zunehmender Dynamik beeinflussen den Wert der mittleren Zyklusarbeit nicht.

Abbildung 25 zeigt exemplarisch die NO_x -Emissionen vor und nach der Abgasnachbehandlung (des Traktors IIIB mit SCR-Katalysator) im 1sNRTC und 10sNRTC über die Messdauer.

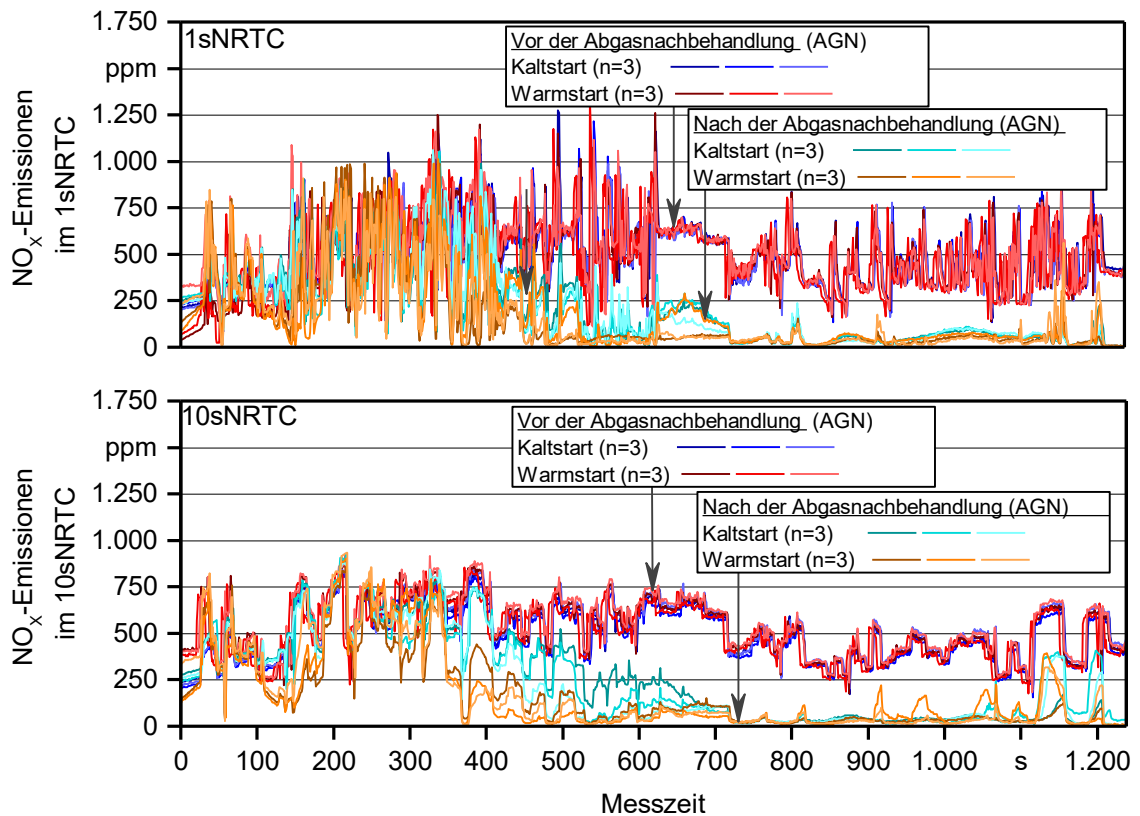


Abbildung 25: Stickstoffoxid-Emissionen (NO_x) vor und nach der Abgasnachbehandlung im Kalt- und Warmstart (mit je drei Wiederholungen) im 1sNRTC und 10sNRTC für den Traktor IIIB mit Rapsölkraftstoff

Im ersten Drittel beider Zyklen sind höhere NO_x -Emissionen zu verzeichnen als im weiteren Verlauf. Grund dafür sind die zu Zyklusbeginn geringeren Betriebstemperaturen und damit Umsetzraten des SCR-Katalysators. Nach ca. 700 s Messdauer sind kaum noch Unterschiede zwischen Kalt- und Warmstartemissionen zu erkennen. Beim Vergleich der NO_x -Emissionen zwischen dem 1sNRTC und dem 10sNRTC zeigen sich in transienten Segmenten des 1sNRTC vermehrt NO_x -Emissionsspitzen im Rohabgas. Grund dafür ist die beim 1sNRTC erhöhte Drehzahl- und Drehmomentdynamik, die die Regelung emissionsrelevanter Motorkomponenten beeinträchtigt. Dies betrifft z. B. den Turbolader, das AGR-Ventil sowie das SCR-System. Insgesamt ist das Emissionsverhalten der Traktoren bei den NRTC-Messungen trotz vieler Einflussfaktoren am Traktorenprüfstand gut reproduzierbar. Die Ergebnisse der Wiederholungsmessungen stimmen übereinstimmen. Die Emissionswerte der weiteren Traktoren werden im NRTC in Anhang 4 dargestellt.

Fazit

Auf dem NRTC (Non-Road Transient Cycle) basierte Prüfzyklen ermöglichen Abgasemissionsmessungen am Traktorenprüfstand mit transienten Motordrehzahl und -drehmomentverlauf in Anlehnung an die EU-Verordnungen 2016/1628 [57] und 2017/654 [54]. Die wiederkehrende Erhebung des dynamischen Emissions- und Betriebsverhaltens von Traktoren unter Einbeziehung des Kaltstarts ist z. B. bei Langzeit-Feldtests und für Folgeabschätzungen von Interesse. Der aufwendige Aus- und Wiedereinbau des Motors für transiente Messungen am Motorenprüfstand lässt sich dabei umgehen. Zudem werden für die Auswertung der Emissionen im tatsächlichen Fahrbetrieb mit portabler Emissionsmesstechnik die CO₂-Emissionen bzw. die Zyklusarbeit aus dem NRTC benötigt [34].

Die gesetzlichen Emissionsgrenzwerte [57] beziehen sich auf die Kurbelwellenarbeit (in kWh) und sind deshalb nicht direkt mit den Emissionswerten bezogen auf die Arbeit an der Zapfwelle vergleichbar. Durch die Leistungsabnahme an der Zapfwelle werden am Traktorenprüfstand traktorspezifische Nebenaggregate und Getriebekomponenten geprüft, welche auch im realen Betrieb eingesetzt werden. Die Zyklusarbeit an der Zapfwelle ist dadurch höher als an der Kurbelwelle und entspricht dem realen Traktorbetrieb besser. Allerdings erhöhen diese zusätzlichen Bauteile die Trägheitsmomente und reduzieren die Dynamik bei Drehzahl- und Drehmomentsprüngen. Für wiederholbare Messungen am Traktorenprüfstand ist daher eine Mittelung der originalen NRTC Drehzahl- und Drehmomentsollwerte erforderlich. Die Eignung der vom NRTC abgeleiteten Varianten mit Mittelungsintervall von 10 s und ohne Mittelung (1 s) kann in Abhängigkeit von der Zielstellung der Messaufgabe variieren.

Der 10sNRTC nach LANDIS (2012) [95] lässt sich auch an einem Traktorenprüfstand mit abweichender Prüftechnik reproduzierbar anwenden und ist an mehreren Traktorenmodellen verschiedener Motorengenerationen erprobt worden. Die Drehzahl-, Drehmoment- und Leistungsvorgaben sind am Traktorenprüfstand unter Einhaltung der Zyklusvalidierung durchführbar. Durch geringe Abweichungen im Soll-Ist-Vergleich mit reproduzierbarer Motorbelastung eignet sich der 10sNRTC besonders bei Vergleichsmessungen unterschiedlicher Traktoren. Kürzere Mittelungsintervalle als 10 s sind für ältere Traktoren (unter der Abgasstufe IIIA), durch das trägere Ansprechen des Motors, weniger gut geeignet.

Der Annäherung an den gesetzlichen NRTC (1sNRTC) sind am Traktorenprüfstand jedoch Grenzen gesetzt. Die Dynamik des 1sNRTC kann über Phasen des Zyklus nur mit höheren Drehzahl- und Drehmomentabweichungen im Soll-Ist-Vergleich abgebildet werden. So überschreiten einzelne Bewertungskriterien die zulässigen Grenzwerte der Zyklusvalidierung. Die Anwendung des 1sNRTC bedingt zwar höhere Abweichungen im Soll-Ist-Vergleich, lässt jedoch als Worst-Case-Test bessere Aussagen über das Emissionsverhalten in sehr dynamischem Motorbetrieb zu. Da einige Segmente selbst im 1sNRTC auch ohne Mittelung am Traktorenprüfstand durchführbar sind, kann das Mittelungsintervall auch in Abhängigkeit des Zyklusabschnitts bemessen werden.

Insgesamt erweitern die NRTC-Varianten die Prüfmöglichkeit am Traktorenprüfstand und demonstrieren die Eignung. Trotz systembedingter höherer Trägheit in der Drehzahl- und

Drehmomentregelung im Vergleich zum Motorenprüfstand ist der Traktorenprüfstand für die Anwendung transienter Fahrzyklen grundsätzlich geeignet. Das Belastungsprofil der untersuchten NRTC-Varianten basiert jedoch nur zu geringen Teilen auf den tatsächlichen Fahrbetrieb von Traktoren. Daher ist von Interesse, ob auch Fahrzyklen auf Basis landwirtschaftlicher Traktorarbeiten anwendbar sind.

5.2 Anwendung der Praxisnahen Traktor-Fahrzyklen (PTFZ)

Dieses Kapitel umfasst die Anwendung von sechs entwickelten der Praxisnahen Traktor-Fahrzyklen (PTFZ) des Traktors IIB. Nach einer Plausibilitätsprüfung erfolgt eine Bewertung des Betriebs- und Emissionsverhaltens in den Fahrzyklen am Traktorenprüfstand.

5.2.1 Plausibilität

Es wurden 206 Bh an Felddaten ausgewertet und daraus charakteristische Prüfzyklen für sechs verschiedene Traktorarbeiten erstellt. Im aufgezeichneten Feldtestjahr gab es keine Störung im Motor- und Kraftstoffsystem. Der größte Anteil der Einsatzzeit entfällt auf schwere Bodenbearbeitung. So arbeitete der Traktor 83 Bh beim Pflügen (PF), 40 Bh mit der Säkombination (SK), 25 Bh mit dem Grubber (GR) und 22 Bh mit der Kreiselegge (KE). Transportarbeiten (TR) auf Straßen mit 21 Bh und Mähen (MW) mit 15 h wurden weniger häufig durchgeführt.

Die aufgezeichneten Traktorarbeiten PF, KE, GR und SK werden durch den Algorithmus aus Kapitel 4.4 weiter verarbeiten. Der Algorithmus teilt dabei die Daten des Betriebstagebuchs (BTB), der Motorsteuerung (ECU) nach SAE J1939 und der GPS Positionsdaten in Teilzeiten auf. Abbildung 26 zeigt exemplarisch die Traktorposition während der Gesamtzeit t_G im linken Bild beim Arbeiten mit der Säkombination (SK). Daneben sind die Traktorpositionen während der Teilzeiten, also der Arbeitsverrichtungs-, Wende- und Restzeitsegmente dargestellt. In der Grafik darunter ist beispielhaft die Motordrehzahl über eine Messdauer von 4000 s aufgetragen und den Teilzeiten farblich zugeordnet.

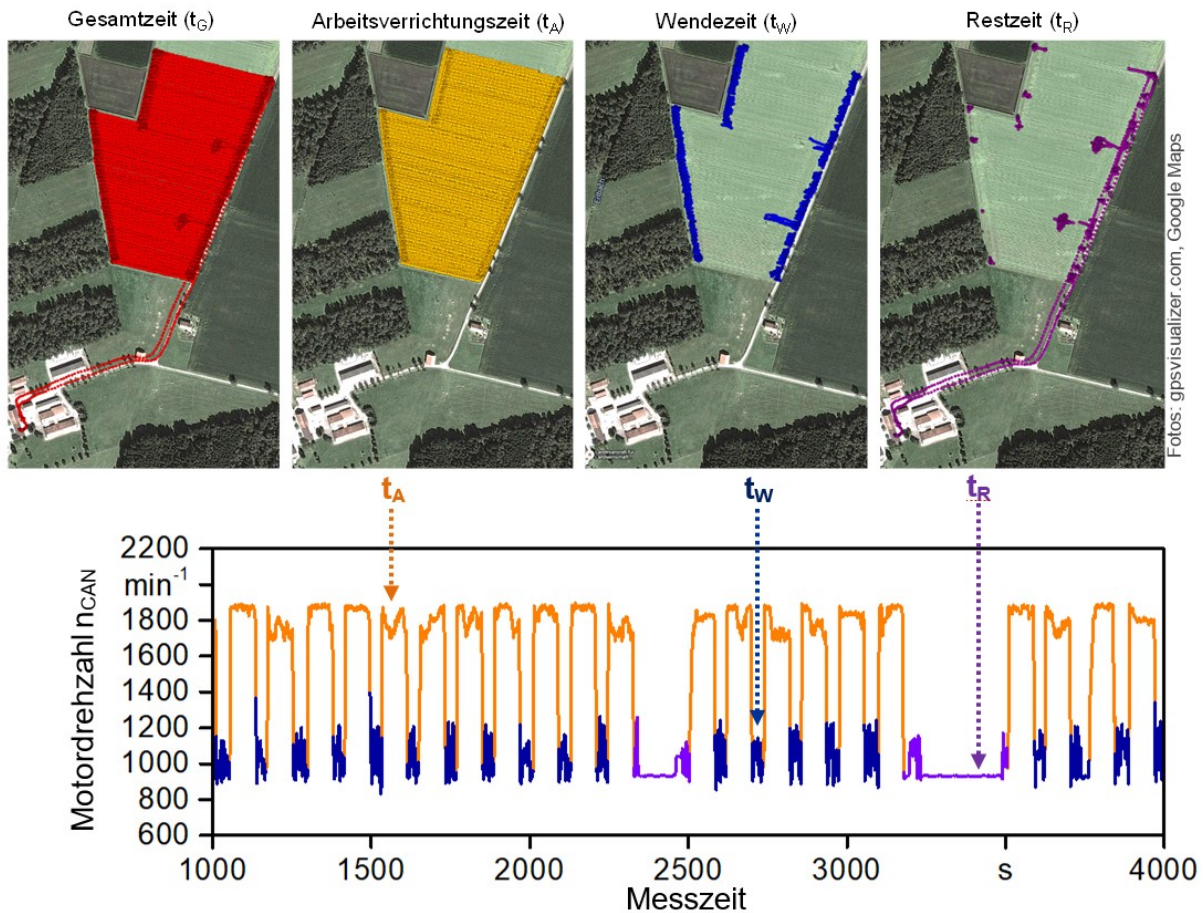


Abbildung 26: Positions- und Motordrehzahl-Daten über die Messzeit (4000 s) während der Arbeit mit der Säkombination (SK) und Gliederung in Teilzeiten

Bei der Arbeitsverrichtungszeit verlaufen die Datenpunkte in parallel verlaufenden Bahnen über das Feld. Die Datenpunkte der Wendezeiten (t_W) häufen sich wie erwartet am Vorgehende. Die Datenpunkte der Restzeit t_R treten an den Feldrändern, in der Nähe von zwei Strommasten in der Mitte des Feldes und auf der Strecke zwischen dem Hof und dem Feld auf. Der Algorithmus teilt die Daten der Gesamtzeit t_G somit plausibel in die vorher definierten Teilzeiten auf.

Aus den über das Feldtestjahr aufgezeichneten Teilzeiten jeder individuellen Arbeit werden praxisnahe Traktor-Fahrzyklen (PTFZ) erstellt (siehe Kapitel 4.4). Dazu werden primär die aus den standardisierten Signalen der Motorsteuerung (ECU) stammenden Daten über einen Algorithmus zu Drehzahl- und Drehmomentsequenzen zusammengefügt, die für die Traktorarbeiten (wie z. B. Pflügen, Grubbern, Straßentransport) repräsentativ sind. Diese Sequenzen werden dann entsprechend der Häufigkeit ihres Auftretens zu praxisnahen Traktor-Fahrzyklen (PTFZ) kombiniert und auf den Traktorenprüfstand übertragen.

Abbildung 27 zeigt die Verteilung der Arbeitsverrichtungs-, Wende- und Restzeit über alle Traktorarbeiten im Vergleich zu den erstellten Fahrzyklen mit verkürzter Messzeit. Der prozentuale Verteilung der Teilzeiten in den erstellten Fahrzyklen weicht um maximal $\pm 1,4$ %-Punkte von der Verteilung der Traktorarbeiten im Feld ab.

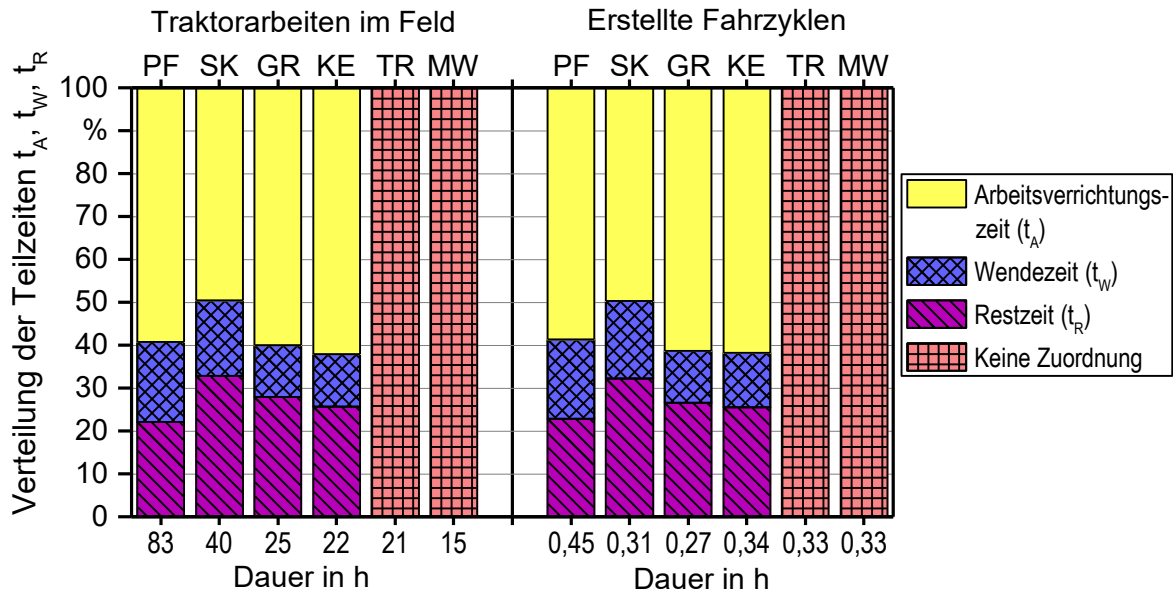

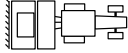
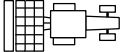
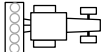

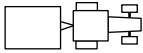


Abbildung 27: Verteilung der Arbeitsverrichtungs-, Wende- und Restzeitsegmente jeder im Feld aufgezeichneten Traktorarbeit und der daraus erstellten Fahrzyklen für den Traktorenprüfstand.

Beim Transport (TR) und Mähen (MW) wird keine Unterscheidung in die Teilzeiten t_A , t_W , t_R vorgenommen (siehe Abschnitt 4.4). Die gesamte aufgezeichnete Betriebszeit für die verschiedenen Traktorarbeitsarten variiert zwischen 15 h und 83 h, die daraus erstellten Fahrzyklen zwischen 0,33 h und 0,45 h. Bei der Bodenbearbeitung (PF, KE, GR) und beim Säen (SK) beträgt der Anteil der Arbeitsverrichtungszeit (t_A) etwa 58 % \pm 6 % (Mittelwert \pm Standardabweichung) an der Gesamtbetriebszeit (t_G) des Prüftraktors.

In der Arbeitsverrichtungszeit t_A arbeitet der Traktormotor im Bereich von der Zwischen-drehzahl (1400 min^{-1}) bis zur Nenndrehzahl (2100 min^{-1}). Je nach Arbeit variiert die durchschnittliche Motordrehzahl n_{CAN} zwischen 1654 min^{-1} (SK) und 1831 min^{-1} (KE) und der durchschnittliche Drehmomentwert M_{CAN} zwischen 79,9 % (KE) und 88,9 % (GR), wie in Tabelle 15 deutlich wird.

Tabelle 15: Arithmetisches Mittel der im Feld über 206 h Betriebszeit aufgezeichneten ECU-Signale n_{CAN} , M_{CAN} , B_{CAN} , T_{CW-CAN} , T_{a-CAN} und V_{CAN} des Traktors IIIB

Arbeiten Teilzeit	Dauer in h	Anteil in %	n_{CAN} in min^{-1}	M_{CAN} in %	B_{CAN} in l/h	T_{CW-CAN} in °C	T_{a-CAN} in °C	V_{CAN} in km/h
Pflug (PF) 								
t_G	82,6	100	1504	66,9	22,5	83	17,1	8,0
t_A	49,0	59	1788	88,6	32,3	84	16,9	9,7
t_W	15,4	19	1176	41,6	10,2	84	18,3	4,8
t_R	18,2	22	1018	30,1	6,8	78	16,5	6,0
Säkombination (SK) 								
t_G	39,4	100	1334	57,5	17,5	81	21,7	5,9
t_A	19,7	50	1654	84,9	28,7	84	21,6	8,7
t_W	7,0	18	1123	40,0	9,2	84	22,0	3,8
t_R	12,7	32	965	25,4	5,1	76	21,8	2,7
Grubber (GR) 								
t_G	22,0	100	1399	66,5	21,1	83	23,8	8,1
t_A	13,8	63	1669	88,9	30,3	85	23,7	11,3
t_W	2,7	12	1110	41,5	9,6	85	23,9	4,8
t_R	5,5	25	883	24,4	4,5	78	23,9	2,1
Kreiselegge (KE) 								
t_G	25,6	100	1546	60,8	21,2	82	20,5	8,0
t_A	15,1	59	1831	79,9	30,0	84	20,1	10,7
t_W	3,0	12	1360	42,5	11,9	84	20,6	6,1
t_R	6,9	27	1017	27,6	6,1	75	21,6	3,2
Mähwerk (MW) 								
t_G	25,1	100	1718	57,5	21,6	81	22,8	7,1
Straßentransport (TR) 								
t_G	21,1	100	1236	43,7	12,6	81	22,1	19,0

Die Wendezeit (t_W) am Vorgewende macht zwischen 12 % der gesamten Betriebszeit (t_G) beim Grubbern (GR) und 19 % beim Pflügen (PF) aus. In Wendezeitsegmenten arbeitet der Motor mit einem durchschnittlichen Drehmoment von $M_{CAN} = 41,8 \% \pm 0,5 \%$ und einer durchschnittlichen Motordrehzahl von $n_{CAN} = 1206 \text{ min}^{-1} \pm 108 \text{ min}^{-1}$. Die Restzeit hat einen

Anteil von 25 % \pm 4 %. Auch in der Literatur wird für den Schwachlastbereich bei niedriger Drehzahl ein durchschnittlicher Zeitanteil zwischen 20 % und 30 % der Traktorbetriebszeit angegeben [84][123].

Der Motor läuft während der Restzeit häufig im Leerlauf ($n_{CAN} = 792 \text{ min}^{-1}$, $M_{CAN} = 17 \%$). Daher rühren die niedrigen Werte für das mittlere Drehmoment von $M_{CAN} = 28,1 \%$ \pm 2,7 % und für die mittlere Drehzahl von $n_{CAN} = 984 \text{ min}^{-1} \pm 67 \text{ min}^{-1}$. Beim Säen (SK) ist der Restzeitanteil mit 32 % höher als bei den anderen Arbeiten. Dieses Ergebnis ist auf die zusätzlichen Aktivitäten wie das Nachfüllen des Saatguttanks oder das Anlegen von Fahrgassen zurückzuführen.

Wenn die Restzeit nicht berücksichtigt wird ($t_G - t_R$ oder $t_A + t_W$), hat die Arbeitsverrichtungszeit t_A einen Anteil von 69 % beim PF, 65 % bei der SK, 80 % beim GR und 80 % bei der KE. Somit verbringt der Traktor in dieser Studie geringfügig weniger Zeit bei der Arbeitsverrichtung und mehr für das Wenden im Vergleich zu den Werten von 75 % (PF) und 82 % für (SK) aus der Literatur [85][84]. Das geringere Verhältnis der Arbeitsverrichtungs- zur Wendezeit kann auf die kleinere Schlaggröße in Bayern im Vergleich zu anderen Anbauregionen zurückgeführt werden. Erwartungsgemäß variieren die Motorbetriebsparameter für n_{CAN} und M_{CAN} zwischen den Zeitsegmentkategorien stärker als zwischen den Traktorarbeitsarten.

Über die gesamte Aufzeichnungsdauer (t_G) der Bodenbearbeitung und beim Säen (PF, SK, GR, KE) liegt die Motordrehzahl (n_{CAN}) zwischen 1334 und 1546 min^{-1} und das Motordrehmoment (M_{CAN}) zwischen 57 % und 67 %. Beim Transport (TR) liegen die Durchschnittswerte mit $n_{CAN} = 1236 \text{ min}^{-1}$ und $M_{CAN} = 44 \%$ deutlich niedriger. Beim Mähen (MW) ist die mittlere Motordrehzahl mit 1718 min^{-1} durch die abweichende Fahrstrategie mit gesteigerten Drehzahlen am Vorgewende am höchsten.

Das ECU-Signal für den Kraftstoffverbrauch (B_{CAN}) entspricht bei der Arbeitsverrichtung (t_A) zwischen 28,7 und 32,3 l/h und beim Wenden zwischen 9,2 und 11,9 l/h. Während der Restzeit ist der Kraftstoffverbrauch mit maximal 6,8 l/h am geringsten. Die deutlichen Unterschiede der Verbrauchsdaten unter den Teilzeiten deutet auf eine plausible Aufteilung der Daten durch den Algorithmus hin.

Plausibel ist ferner, dass bei der Feldarbeit bei den aufeinanderfolgenden Teilzeiten t_A und t_W eine vergleichbar hohe Kühlmitteltemperatur (T_{CW-CAN}) von über 84 °C herrscht. In der Restzeit t_R fällt T_{CW-CAN} mit Werten zwischen 75 und 78 °C hingegen niedriger aus, da der Motor im Kaltstart- und Schwachlastbetrieb läuft.

Die mittlere Umgebungstemperatur (T_{a-CAN}) liegt zwischen 16,9 °C (PF) und 23,3 °C (GR). Die Temperaturunterschiede ergeben sich, da der Grubber im Sommer zur Stoppelbearbeitung und der Pflug zur Frühjahrsbestellung bzw. zur Herbstfurche eingesetzt wurde. Die mittlere Umgebungstemperatur bewegt sich im Toleranzbereich von 16 °C bis 30 °C für die Leistungsmessung an der Zapfwelle nach OECD Standard Code 2 [120].

Die mittlere Fahrgeschwindigkeit (v_{CAN}) während der Arbeitsverrichtungszeit t_A von 9,7 km/h für PF bis 11,3 km/h für GR ist plausibel und entspricht dem in der Literatur

angegebenen üblichen Fahrgeschwindigkeitsbereich von 4 km/h bis 12 km/h nach ASAE (2003) [4] bzw. RENIUS (1987) [142]. Die Durchschnittsgeschwindigkeit v_{GPS} (abgeleitet aus den Positionsdaten) war bei den Arbeiten KE um 8,0 %, GR um 10 %, SK um 11% und PF um 13 % niedriger als die Fahrgeschwindigkeit v_{CAN} des Traktors, welche aus der Drehzahl und dem Umfang der Räder berechnet wird. Diese Abweichungen sind bei Feldarbeiten aufgrund des Radschlupfs plausibel. Auf überwiegend festem Untergrund beim Straßentransport weichen die Werte von v_{CAN} und v_{GPS} nur 1,6 % voneinander ab. Im Durchschnitt über die gesamte Betriebszeit war die Fahrgeschwindigkeit beim Transport (TR) mit $v_{CAN} = 19$ km/h am höchsten und beim Mähen (MW) mit $v_{CAN} = 7,1$ km/h am niedrigsten.

Die prozentuale Abweichung (AW) der Mittelwerte von n_{CAN} , M_{CAN} und B_{CAN} zwischen den im Feld aufgezeichneten Daten und den für den Prüfstand konzipierten Praxisnahen Traktor-Fahrzyklen (PTFZ) variiert innerhalb von ± 5 % und liegt im Durchschnitt unter ± 2 %, wie in Tabelle 16 deutlich wird.

Tabelle 16: *Arithmetisches Mittel der ECU-Signale n_{CAN} , M_{CAN} und B_{CAN} über 206 h Betriebszeit im Feld und über den Fahrzyklus (PTFZ) sowie die prozentuale Abweichung (AW) für jede Traktorarbeit*

Traktorarbeit	Drehzahl n_{CAN}			Drehmoment M_{CAN}			Kraftstoffverbrauch B_{CAN}		
	Feld	PTFZ	AW	Feld	PTFZ	AW	Feld	PTFZ	AW
	in min^{-1}	in min^{-1}	%	in %	in %	in %	in l/h	in l/h	in %
PF	1504	1452	-3,6	66,9	66,8	-0,3	22,5	22,4	-0,7
SK	1334	1314	-1,5	57,4	58,2	1,3	17,5	18,4	4,5
GR	1546	1500	-3,1	60,7	61,5	1,2	2,2	21,3	0,4
KE	1399	1387	-0,8	66,5	67,1	0,8	21,1	21,4	1,5
TR	1236	1223	-1,1	43,6	44,3	1,4	12,6	13,0	2,4
MW	1716	1790	4,1	57,4	57,0	-0,8	21,6	21,6	0,04
Gesamt	1454	1426	-1,9	61,2	61,5	0,4	20,2	20,3	0,8

Bei jedem der sechs erstellten Fahrzyklen unterscheiden sich die Istwerte der Motordrehzahl (n_{CAN}) und des Motordrehmoments (M_{CAN}) nur geringfügig von den Sollwerten bei drei Wiederholungen am Traktorenprüfstand. Tabelle 17 zeigt die Ergebnisse der Regressionsanalyse gemäß den Sollwerten des erstellten Fahrzyklus (x) und den auf dem Prüfstand gemessenen Zykluswerten (y) für n_{CAN} und M_{CAN} .

Tabelle 17: Regressionsgeradensteigung (m), y -Achsenabschnitt (b_{as}) und Bestimmtheitsmaß (R^2) zwischen Soll- und Istwerten am Prüfstand bei drei Wiederholungen ($n=3$)

Fahrzyklus	n	Motordrehzahl (n_{CAN})			Motordrehmoment (M_{CAN})		
		m	b_{as}	R^2 in %	m	b_{as}	R^2 in %
Grenzwert [56]		0,95 - 1,03	± 50	> 97	0,83 - 1,03	< 20	> 88
PF	1	1,00	1,2	99,2	0,92	5,4	90,7
PF	2	1,00	-1,8	99,2	0,91	5,3	90,2
PF	3	1,00	1,6	99,2	0,92	5,1	89,7
SK	1	1,00	0,5	99,4	0,92	4,1	93,0
SK	2	1,00	0,1	99,4	0,91	5,1	93,8
SK	3	1,00	0,4	99,5	0,91	4,7	93,5
GR	1	1,00	0,1	99,4	0,91	5,9	92,6
GR	2	0,99	9,0	99,2	0,89	7,2	93,2
GR	3	0,98	24,4	98,5	0,90	6,5	92,9
KE	1	0,99	8,0	98,6	0,91	4,3	93,4
KE	2	0,99	9,6	98,6	0,91	4,8	92,4
KE	3	0,99	18,3	98,3	0,91	4,3	91,6
TR	1	0,98	19,3	98,5	0,88	8,6	93,0
TR	2	0,98	25,0	98,2	0,88	8,3	92,9
TR	3	0,99	15,8	98,8	0,88	8,1	93,4
MW	1	0,99	14,9	99,1	0,89	7,1	93,7
MW	2	0,99	16,7	99,3	0,89	7,3	93,3
MW	3	0,99	9,8	99,3	0,89	6,6	94,4

Die Parameter der Regressionsgeraden m und R^2 liegen für n_{CAN} und M_{CAN} innerhalb der Grenzwerte in Anlehnung an die Zyklusvalidierung für NRTC-Messungen am Motorenprüfstand. Bei der Durchführung des NRTC wird bei der Motordrehzahl ein R^2 von größer 97 %, eine Steigung von 0,95 bis 1,03 und ein y -Achsenabschnitt innerhalb von $\pm 50 \text{ min}^{-1}$ [56] bzw. innerhalb von 10 % der Leerlaufdrehzahl [57] vorgeschrieben. Beim Motordrehmoment wird ein R^2 von größer als 88 % und eine Steigung von 0,83 bis 1,03 gefordert. Da M_{CAN} als Relativwert von der ECU ausgegeben wird, kann der geforderte Grenzwert des y -Achsenabschnitts (b_{as}) für das Motordrehmoment von $\pm 20 \text{ Nm}$ nicht überprüft werden.

Das R^2 zwischen den im Feld aufgezeichneten und am Prüfstand gemessenen ECU-Signale beträgt bei der Drehzahl über 98 % und beim Drehmoment mehr als 90 %. Die

Steigung m liegt zwischen 0,98 und 1,00 und der y -Achsenabschnitt liegt bei n_{CAN} innerhalb von $\pm 20 \text{ min}^{-1}$.

Die Korrelation ist bei M_{CAN} geringer. Die Steigung variiert dabei von 0,88 bis 0,92 und der y -Achsenabschnitt (b_{as}) von 4,11 bis 8,60. Die Abweichungen treten vor allem in transienten Phasen auf, z. B. bei Transportarbeiten während des Schubbetriebs, wie z. B. bei Bergabfahrten oder Abbremsen des Fahrzeugs. Aufgrund der wegen des Energieeintrags resultierenden negativen Drehmomentwerte, welche mit $M_{CAN} = 0\%$ von der ECU wiedergegeben werden, können diese mit einer Wirbelstrombremse nicht simuliert werden. Aufgrund der höheren Trägheit des Traktorsystems am Traktorenprüfstand können nicht alle in der Praxis aufgenommenen ECU-Drehmoment-Spitzen reproduziert werden. Darüber hinaus bedingt die anzutreibende Masse der Wirbelstrombremse und des Zapfwellengetriebes im Leerlauf ein zusätzliches Drehmoment gegenüber dem Feld. So steigt der Durchschnittswert von M_{CAN} im Leerlauf von 17 % im Feld auf 22 % am Prüfstand. Obwohl einzelne Werte in hochtransienten Phasen nicht deckungsgleich reproduziert werden können, lässt sich zusammenfassend sagen, dass die entwickelten Fahrzyklen auf dem Traktorenprüfstand sehr gut reproduzierbar sind.

Die Anwendbarkeit der Fahrzyklen (PTFZ) wird anhand der Wiederholbarkeit ($n = 3$) des Betriebs- und Emissionsverhaltens beurteilt. In Abbildung 28 sind die relevanten Kenngrößen Motordrehzahl (n_{CAN}) und Motordrehmoment (M_{CAN}) sowie die NO_x -, HC-, CO-, CO_2 -, PN-, NH_3 -Emissionen vor und nach der Abgasnachbehandlung (AGN) mit Rapsölkraftstoff am Beispiel des Grubber-Fahrzyklus (GR) dargestellt.

Die NO_x -Emissionen vor und nach dem Abgasnachbehandlungssystem (AGN) liegen in den ersten 180 s der Restzeit auf dem gleichen Niveau. Im ersten Abschnitt der Arbeitsverrichtungszeit t_A steigt die Abgastemperatur von ca. 175 °C auf 300 °C. Das SCR-System wird bei ca. 200 °C aktiv. Später im Fahrzyklus erreicht das SCR-System bei Abgastemperaturen über 250 °C eine NO_x -Reduktionsrate von über 98 %. Zu Beginn des Zyklus entstehen zudem bei niedrigen Abgastemperaturen und geringer Minderungsrate des AGN ohne Harnstoffdosierung, die höchsten HC-, CO- und PN-Emissionen, aber keine NH_3 -Emissionen. Ferner werden bei niedriger Motorauslastung die unvollständige Verbrennung und damit die Bildung von HC-, CO- und Partikelrohmissionen begünstigt, wie auch in den Untersuchungen von EMBERGER et al. (2015) [34] sowie PICKEL und DIERINGER (2009) [125] festgestellt wird. Im weiteren Verlauf des Zyklus reduziert der Dieseloxydationskatalysator (DOC) die Menge an HC und CO deutlich unter 10 ppm und die Partikelzahl wird unter $1E^{+07}$ pro cm^3 Abgas gesenkt. Etwa 400 s nach Beginn des Fahrzyklus erfolgt die erste Harnstoffdosierung. Dies führt zu einem deutlichen Anstieg von NH_3 (Ammoniak schlupf). Anschließend reduziert der Ammoniak schlupf-Katalysator (ASC) die NH_3 -Emissionen konstant auf weniger als 20 ppm.

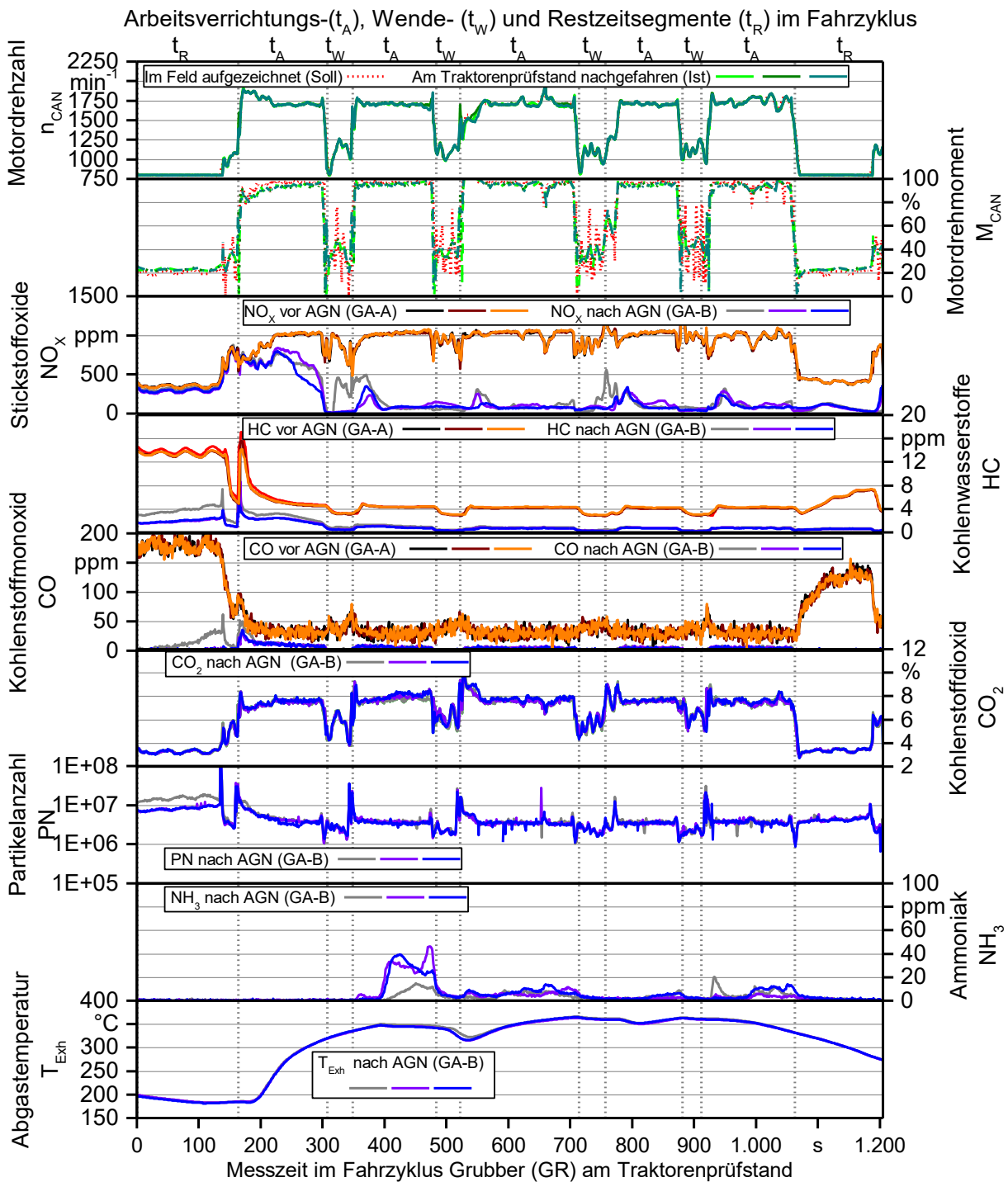


Abbildung 28: Im Feld aufgezeichnete und am Traktorenprüfstand in drei Wiederholungen nachgefahrte Motordrehzahlen (n_{CAN}) und Motordrehmomente (M_{CAN}) sowie die NO_x -, HC-, CO-, CO_2 -, PN-, NH_3 -Emissionen und Abgas-temperatur vor und nach der Abgasnachbehandlung (AGN) mit Rapsölkraftstoff

Die CO_2 -, PN- und NO_x -Emissionen erreichen ihre höchsten Werte kurz nach den Wendezeitsegmenten. Der Beschleunigungsprozess führt zudem zu einem kurzfristig höheren Kraftstoffverbrauch und einem Anstieg der CO_2 -Emissionen um bis zu 10,5 % gegenüber

den Segmenten der Restzeit t_R . Beim Wechsel von Wende- auf Arbeitsverrichtungszeitsegmenten steigen auch die PN-Emissionen deutlich an auf über $1E^{+07}$ Partikel pro cm^3 Abgas. Eine für transiente Phasen typische Erhöhung der CO- oder HC-Rohmissionen, wie sie aus früheren Untersuchungen mit Dieselkraftstoff bekannt ist [183][105][105], kann nicht beobachtet werden. Der sauerstoffhaltige Kraftstoff und moderne Motorentechnik durch hohe Einspritzdrücke, Mehrfacheinspritzungen, zielgerichtete Aufladung etc. wirken einer unvollständigen Verbrennung in transienten Phasen entgegen, wie auch in Untersuchungen mit anderen alternativen Kraftstoffen festgestellt wird [136][184]. Es wird in der Literatur [154] zudem darauf hingewiesen, dass beim Einsatz eines Kraftstoffs mit geringerer Energiedichte als Dieselkraftstoff und bei dieseloptimierten Motoreinstellungen das Verbrennungsluftverhältnis zunimmt. Das zusätzliche Sauerstoffangebot im Brennraum kann die vollständige Verbrennung fördern.

Die hohe Übereinstimmung der Messwerte aus den drei Wiederholungen vor und nach dem AGN-System verdeutlicht, dass das Emissionsverhalten des Traktors am Traktorenprüfstand gut reproduzierbar ist. Einzig im Anfangsdrittel des Fahrzyklus in der ersten Wiederholung (in Abbildung 28 als graue Linie dargestellt) unterscheiden sich die Emissionen nach dem AGN-System geringfügig von den beiden anderen Wiederholungen. Über den gesamten GR-Fahrzyklus variiert die durchschnittliche Abgastemperatur zwischen der ersten und dritten Wiederholung jedoch um weniger als 5 K. Unter Umständen könnte eine längere Konditionierung des Traktors vor der Durchführung der Messungen die Wiederholbarkeit verbessern.

5.2.2 Spezifische Abgasemissionen

Die aus der Praxis abgeleiteten Fahrzyklen werden mit Rapsöl- (RK) und Dieseldieselkraftstoff (DK) durchgeführt. Die Resultate werden in Abbildung 8 mit dem Emissionsfaktor f_u dargestellt, welcher die spezifischen Emissionen (in g/kWh) der Fahrzyklen für jede Abgasemissionskomponente e , im Verhältnis zu den Emissionen (in g/kWh) des 10sNRTC im Dieseldieselkraftstoffbetrieb beschreibt.

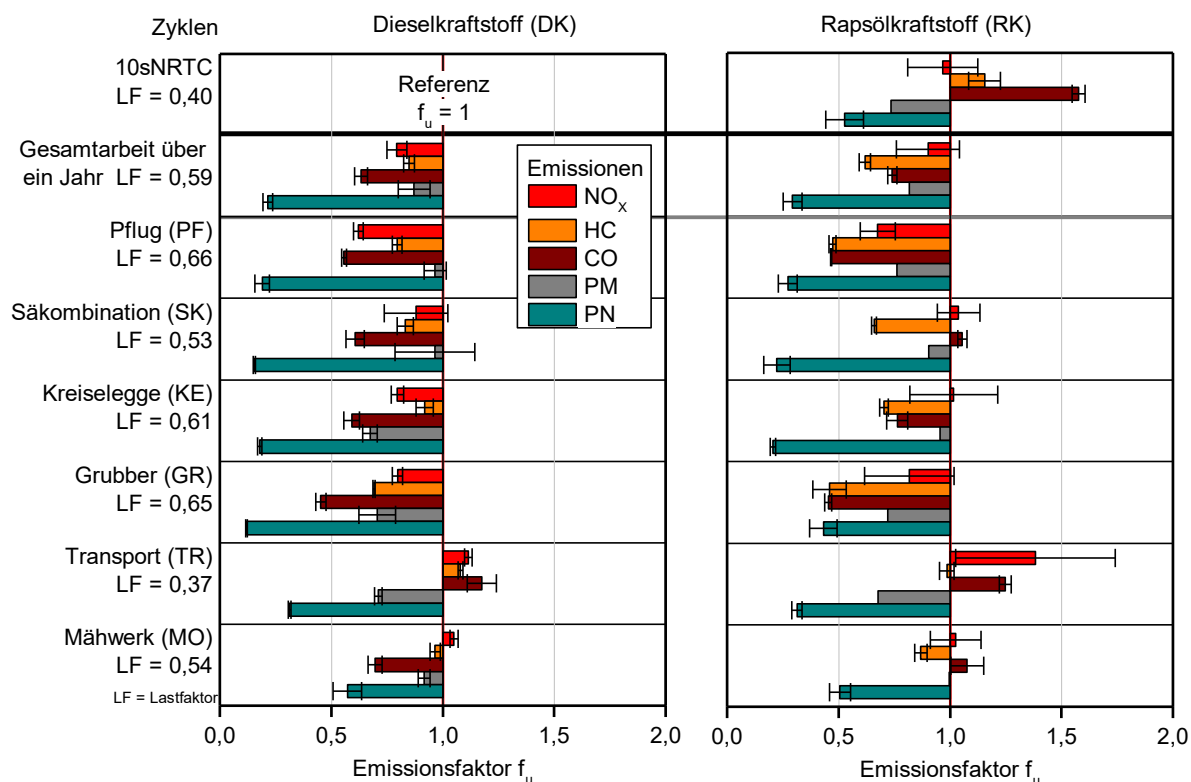


Abbildung 29: Abgasemissionen während praxisnaher Fahrzyklen für Traktorarbeiten (PTFZ) mit Rapsölkraftstoff und Dieseldieselkraftstoff in Bezug auf den Fahrzyklus 10sNRTC mit Diesel ($n = 3$)

In den Fahrzyklen, welche auf landwirtschaftlichen Traktorarbeiten basieren, fallen die Emissionen mit RK und DK mehrheitlich geringer aus als im 10sNRTC mit Diesel (spezifischer Faktor $f_u < 1,0$). Ein Grund für dieses Ergebnis sind die ungleichen Leistungsanforderungen an den Motor, welche durch den Lastfaktor ausgedrückt werden können. Der mittlere Lastfaktor (LF), gewichtet nach der Einsatzzeit je Traktorarbeit, ist bei der Feldarbeit mit 0,59 deutlich höher als im NRTC ($LF = 0,40$). Unter den Traktorarbeiten beträgt der LF 0,66 für PF, 0,65 für GR, 0,61 für KE, 0,53 für SK und 0,54 für MW. Einzig die Transportarbeit (TR) war durch einen sehr niedrigen Lastfaktor ($LF = 0,37$) gekennzeichnet. Dies führt zu höheren NO_x-Emissionen im Vergleich zum 10sNRTC, da durch die geringe Motorauslastung zeitweise die Betriebstemperatur des SCR-Systems nicht erreicht wird. Die PN-Emissionen während aller Arbeiten sind im Vergleich zu den 10sNRTC-

Messungen durchgängig geringer. Stark transiente Drehzahl- und Drehmomentverläufe innerhalb des NRTC können zu lokalem Sauerstoffmangel während der Verbrennung führen, was die Partikelbildung begünstigt. Dies gilt insbesondere für die Kaltstartphasen. Der Anteil an transienten Drehzahl- und Drehmomentwechseln ist bei den Traktorarbeiten geringer und die Betriebstemperatur höher. Beides sind Faktoren, welche eine vollständige Verbrennung und eine effiziente Funktion der Abgasnachbehandlung befördern und somit die Ursachen für die fast ausnahmslos geringeren Emissionen bei den praxisnahen Fahrzyklen im Vergleich zum NRTC.

Im 10sNRTC sind mit DK und RK in etwa gleich hohe NO_x -Emissionen nach der AGN gegeben, was auf einen ähnlichen SCR-Wirkungsgrad hinweist. Der sauerstoffhaltige RK ist der Grund für die reduzierten PM- und PN-Emissionen im Vergleich zu den DK-Messungen [34][125]. Durch die geringere Energiedichte von RK im Vergleich zu DK stellt sich den dieselloptimierten Motoreinstellungen ein höheres Verbrennungsluftverhältnis ein [154], was die vollständige Verbrennung fördert. Höhere HC- und CO-Emissionen im Vergleich zur Referenz mit Diesel treten im Schwachlastbetrieb mit RK auf, bevor der DOC die Betriebstemperatur erreicht. Die Unterschiede im Emissionsverhalten in den Fahrzyklen zwischen dem Betrieb mit Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff sind insgesamt gering. Die Betriebsbedingungen in den Fahrzyklen haben einen größeren Einfluss auf die Ergebnisse als die Art des verwendeten Kraftstoffs.

5.3 Validierung der PTFZ

Die Validierung der PTFZ erfolgt anhand der Abgasemissionen im tatsächlichen Fahrbetrieb, die im Feld mit portabler Emissionsmesstechnik (PEMS) gemessen und anschließend am Prüfstand reproduziert werden. Das Betriebs- und Emissionsverhalten des Traktors IV-c wird dabei mit portabler Emissionsmesstechnik (PEMS) beim Pflügen erfasst und nach geltender EU-Gesetzgebung ausgewertet. Die Drehzahl- und Drehmomentensignale aus den RDE-Messungen werden unverändert über die gesamte Messzeit (PF-G) und mit dem Algorithmus in verkürzter Form (PTFZ, der Methode aus Kapitel 4.4) am Prüfstand nachgestellt. Dabei wird die Übereinstimmung der Abgasemissionen am Prüfstand mit den RDE aus dem Feld begutachtet. Die Variation der Umgebungstemperatur und der Kraftstoffart im PTFZ am Prüfstand soll den Einfluss abweichender Bedingungen auf die Anwendung der Methode und das Emissionsergebnis im Vergleich zur RDE-Messung untersuchen.

5.3.1 Abgasemissionen im tatsächlichen Fahrbetrieb

Die Auswertung der Emissionsmessungen beim Pflügen erfolgt nach der Moving Averaging Window (MAW) Methode der EU-Verordnungen 2016/1628 [57] und 2017/655 [55]. Für die Messfahrt herrschten gültige Bedingungen nach [55] für eine Auswertung vor. So lag der Umgebungsluftdruck bei 1004 hPa. Auch die Umgebungstemperaturen waren mit 6,8 °C (PF-I), 9,2 °C (PF-II) und 13,8 °C (PF-III) im zulässigen Bereich, der von -7 °C bis 37 °C definiert ist. Mit der Auswertung wurde, wie in der Gesetzgebung gefordert, nach

dem Erreichen einer Kühlmitteltemperatur von 70 °C begonnen. Da die maximale Prüfdauer (PD) auf das Fünf- bis Siebenfache der CO₂-Masse der NRTC-Messung begrenzt ist, ergibt sich eine Messdauer von rund 1,78 h (PF-I), 1,49 h (PF-II) und 1,48 h (PF-III), die in die Auswertung einfließt. Abbildung 30 zeigt die NO_x-, HC-, CO- und PM-Emissionen der drei Messungen beim Pflügen mit Rapsölkraftstoff auf dem Feld. Zum Vergleich werden für die NO_x-Emissionen die Zykluswerte des 10sNRTC und NRSC als Referenzlinien dargestellt, die am Traktorenprüfstand mit Rapsölkraftstoff ermittelt wurden sowie der korrespondierende Grenzwert des Motorenprüfstands.

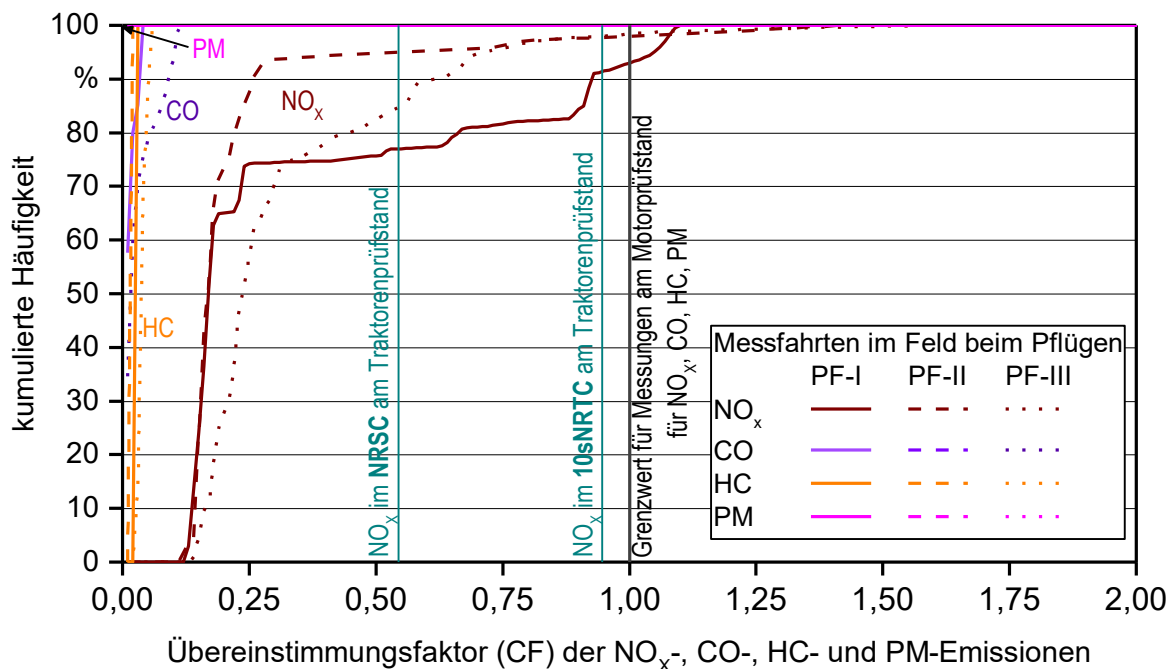


Abbildung 30: Kumulierte Häufigkeit der NO_x-, HC-, CO- und PM-Emissionen bei Messungen mit Rapsölkraftstoff beim Pflügen am Traktor IV-c (Auswertung gemäß MAW-Methode [55]) und der Grenzwert für Messungen am Motorenprüfstand [57] sowie Vergleichswerte für NO_x aus den Zyklen NRSC und 10sNRTC am Traktorenprüfstand

Der Grenzwert für Messungen am Motorenprüfstand (NRMM-Grenzwert [57] bei CF=1) wird bei allen limitierten Emissionskomponenten für weit mehr als die geforderten 90 % der Einzelmittelwerte (Messfenster) deutlich unterschritten. Die CO- und HC-Emissionen liegen in allen Messfenstern auch deutlich unterhalb der NRMM-Grenzwerte (CF=1). Die Übereinstimmungsfaktoren für HC und CO liegen sogar unterhalb von CF₉₀ = 0,03 und belegen die hohe Wirksamkeit der katalytischen Abgasnachbehandlung (AGN). Auch bei den PEMS-Messungen von GIETZELT et al. (2012) [64] sind die HC- und CO-Emission deutlich unterhalb von CF = 1. Wegen des vorhandenen Partikelfilters (DPF) liegt die Partikelmasse (PM) mit CF < 0,001 nahe der Nachweisgrenze. Aufgrund der geringen CO-, HC- und PM-Emissionen im Feld und am Traktorenprüfstand werden nachfolgend nur noch die NO_x-Emissionen exemplarisch betrachtet.

Auch die NO_x -Emissionen in den Prüfzyklen am Traktorenprüfstand liegen im Mittel unter diesen Grenzwerten ($\text{CF} = 1,0$). In 50 % der Fenster sind die NO_x -Emissionen im Feld weniger als halb so hoch ($\text{CF} < 0,5$) als der für den Motorenprüfstand gültige Grenzwert aus der NRMM-Gesetzgebung. Die NO_x -Emissionen sind im Feld, gemessen mit einem PEMS, bei der vorliegenden Untersuchung mit Rapsölkraftstoff mehrheitlich geringer als im NRSC und im 10sNRTC am Traktorenprüfstand. Ein Grund sind bessere Umsatzraten der AGN durch die hohen Abgastemperaturen beim leistungsintensiven Pflügen. Bereits am Traktor IIIB wurden überwiegend geringere limitierte Emissionen bei der Anwendung von Drehzahl- und Drehmomentverläufen aus Traktorarbeiten im Vergleich zum 10sNRTC festgestellt (siehe Kapitel 5.2).

5.3.2 Vergleich der Messungen im Feld und am Prüfstand

Zunächst werden die Drehzahl- und Drehmomentverläufe der kompletten Messfahrten (1:1) beim Pflügen (PF-I, PF-II, PF-III) des Traktors IV-c mit allen aufgezeichneten Segmenten am Traktorenprüfstand nachgefahren und dabei die Emissionen gleichzeitig mit dem PEMS und stationären Gasanalysatoren (GA-A bzw. GA-B) erfasst. Danach werden aus dem Datensatz von 8,5 h Pflügen mit dem PEMS im Feld ein Praxisnaher Traktor-Fahrzyklus (PTFZ) mit verkürzter Messzeit erstellt (Kapitel 4.4) und dieser in dreifacher Wiederholung bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen und mit verschiedenen Kraftstoffen durchgeführt. Damit soll der Einfluss dieser Faktoren (Umgebungstemperatur, Kraftstoffart) auf die Ergebnisse im PTFZ geprüft werden.

Lastprofil der kompletten Messfahrten (PF-G)

Beim Vergleich der Emissionsergebnisse zwischen Feld und Prüfstand ist ein Einfluss der Auswertemethode zu vermeiden. Daher werden im Gegensatz zur Auswertung in Anlehnung an die RDE-Gesetzgebung [57][55] keine Mittelungsfenster (MAW) erstellt sondern ein Mittelwert über die gesamte Einsatzzeit gebildet. Alle aufgezeichneten Messwerte werden für die Auswertung herangezogen. Die Umgebungsparameter und die Kühlmitteltemperatur zu Beginn der Emissionsmessung ($T_{\text{CW-Start}}$) der Messungen im Feld und am Prüfstand sind in Tabelle 18 aufgelistet.

Tabelle 18: Mittelwert der Umgebungslufttemperatur und des -drucks sowie Kühlmitteltemperatur bei Messbeginn bei drei Messungen im Feld und am Prüfstand

Messung	Umgebungstemperatur in °C		Umgebungs-luftdruck in hPa		Kühlmitteltemperatur bei Messbeginn in °C	
	Feld	Prüfstand	Feld	Prüfstand	Feld	Prüfstand
PF-I	6,8	14,5	1004	1005	42	43
PF-II	9,2	15,9	1002	1001	66	67
PF-III	13,8	18,0	1005	1014	66	65

Im Prüfstand sind die Umgebungstemperatur von 4,2 °K (PF-III) bis 7,7 °K (PF-I) höher als im Feld. Das Lufttemperaturniveau am Prüfstand wird durch die thermische Verlustleistung des Traktors und die Einstellung der Lüftungsanlage bestimmt. Die Unterschiede resultieren aus der zu hohen Frischlufttemperatur, wodurch der Prüfstand nicht dauerhaft auf das Temperaturlevel der Messfahrten im Feld gekühlt werden konnte. Der Umgebungsdruck unterscheidet sich nur geringfügig zwischen Prüfstand und Feld. Gleiches gilt für die Kühlmitteltemperatur zu Beginn der Messung, die um maximal ± 1 K voneinander abweicht.

Unter den gegebenen Umgebungsbedingungen (aus Tabelle 18) wird das Emissionsverhalten in Abhängigkeit der Prüfumgebungen (Feld oder Prüfstand) und des Abgasanalyzesystems (PEMS oder GA-B am Prüfstand) betrachtet. Dabei stellen vor allem die NO_x -Emissionen bei modernen Motoren die wichtigste Kenngröße dar, wie aus Abbildung 30) in Kapitel 5.3.1 sowie aus der Literatur [64][177] hervorgeht. Für die Ermittlung der emittierten NO_x -Masse sind neben der Konzentration an NO_x und an CO_2 auch der Abgasmassenstrom (Q_m) wesentlich. Der Box-Plot in Abbildung 31 zeigt die Verteilung dieser Messwerte während der Messungen im Feld und am Prüfstand. Die Box beinhaltet den Median sowie das obere und untere Quartil der von den Abgasanalysesystemen PEMS und GA-B erfassten Messwerte.

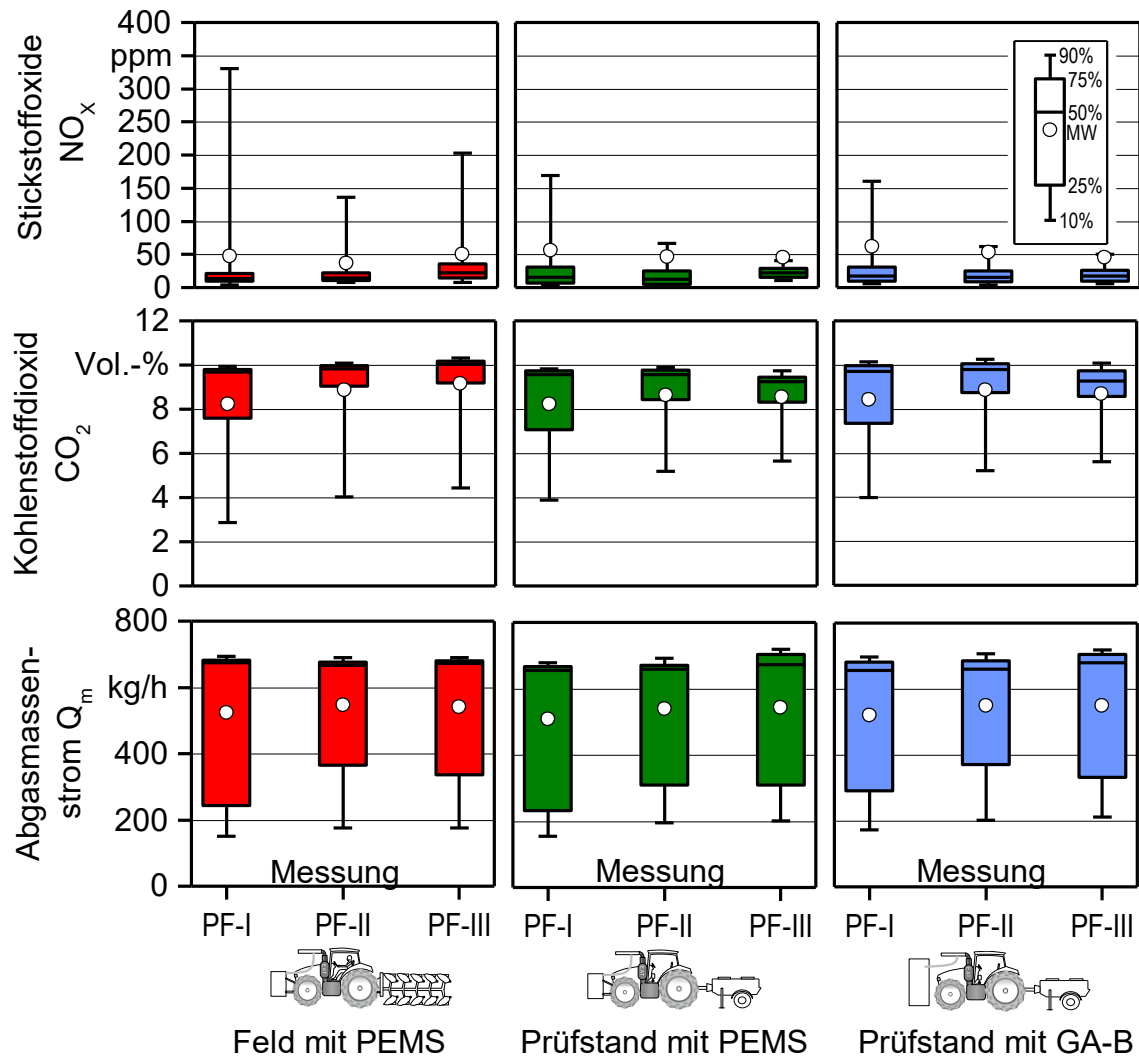


Abbildung 31: Verteilung der NO_x - und CO_2 -Abgaskonzentrationen und des Abgasmassenstroms bei drei Einzelmessungen im Feld mit PEMS und am Traktorenprüfstand mit PEMS sowie mit stationären Gasanalysatoren (GA-B) mit Rapsölkraftstoff

Insgesamt unterscheiden sich Mittelwert (MW) und Median zwischen den drei Einsatzfahrten im Feld und die Messungen am Prüfstand nur geringfügig. Mit PEMS weichen die NO_x -Emissionen im Feld von $-9,7$ ppm (PF-II) bis $+4,6$ ppm (PF-III) und beim Abgasmassenstrom zwischen $+15,7$ (PF-I) und $-1,8$ kg/h (PF-III) im Vergleich zur Prüfstandmessung ab. Die mittlere CO_2 -Konzentration war im Feld um $0,02$ Vol.-% CO_2 (PF-I), $0,24$ Vol.-% CO_2 (PF-II) und $0,63$ Vol.-% CO_2 (PF-III) nur geringfügig höher als am Prüfstand.

Im Vergleich der Messwerte des portablen (PEMS) mit dem stationären Gasanalyzesystem (GA-B) ergaben sich Abweichung von max. -16 ppm NO_x , $+0,48$ Vol.-% CO_2 und $-8,4$ kg/h Abgasmasse. Trotz unterschiedlicher Messprinzipien und Genauigkeiten der Analysatoren sind also die Ergebnisse mit portablen (PEMS) und stationären Gasanalysatoren (GA-B) gut vergleichbar.

Sowohl die Abweichungen der Messwerte zwischen den Prüfumgebungen (Feld und Prüfstand) als auch zwischen den Abgasanalyse-Systemen (PEMS und Stationäre Abgasanalytoren) sind statistisch nicht signifikant. Der Mittelwertvergleich mit dem t-Test ergab bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ keinen signifikanten Unterschied für NO_x , CO_2 und Q_M zwischen Messwerten aus PF-I, PF-II und PF-III mit PEMS im Feld ($n=3$) im Vergleich zum PEMS am Prüfstand ($n=3$) und dem stationären Abgasanalyse-System GA-B ($n=3$) am Prüfstand.

Auch wenn die Betrachtung der mittleren Messwerte von NO_x , CO_2 und Abgasmassenstrom (Abbildung 31) über den gesamten Fahrzyklus eine gute Übereinstimmung zwischen Feld, Prüfstand und den verschiedenen Messsystemen zeigen, sind in bestimmten Phasen des Fahrzyklus auch Unterschiede bei verschiedenen Betriebsparametern erkennbar. Dies wird vor allem zu Beginn der Messung und bei den Betriebsparametern Motordrehzahl- und Motordrehmoment, Abgasmassenstrom, Abgastemperatur und Kühlmitteltemperatur sowie bei den Emissionskomponenten NO_x und CO_2 ersichtlich. So zeigt Abbildung 32 am Beispiel der Messfahrt PF-II, dass sich zu Beginn der Messung die Motordrehzahl (n_{CAN}) und das Motordrehmoment (M_{CAN}) im Feld- und Prüfstandsbetrieb unterscheiden können. Bei der Nachbildung der realen Fahrsituation am Prüfstand zeigt sich vereinzelt ein trägeres Ansprechverhalten des kalten Motors (z. B. bei 4 und 14 min Messzeit, während der Zeit in welcher der Pflug in den Boden eingesetzt wird und Anstieg von n_{CAN} und M_{CAN} erfolgt). Bei betriebswarmem Motor stimmen n_{CAN} und M_{CAN} am Prüfstand und im Feld besser überein. Im Wesentlichen entspricht die Güte der Drehzahl- und Drehmomentregelung den Ergebnissen aus den Abschnitten 5.1 und 5.2.

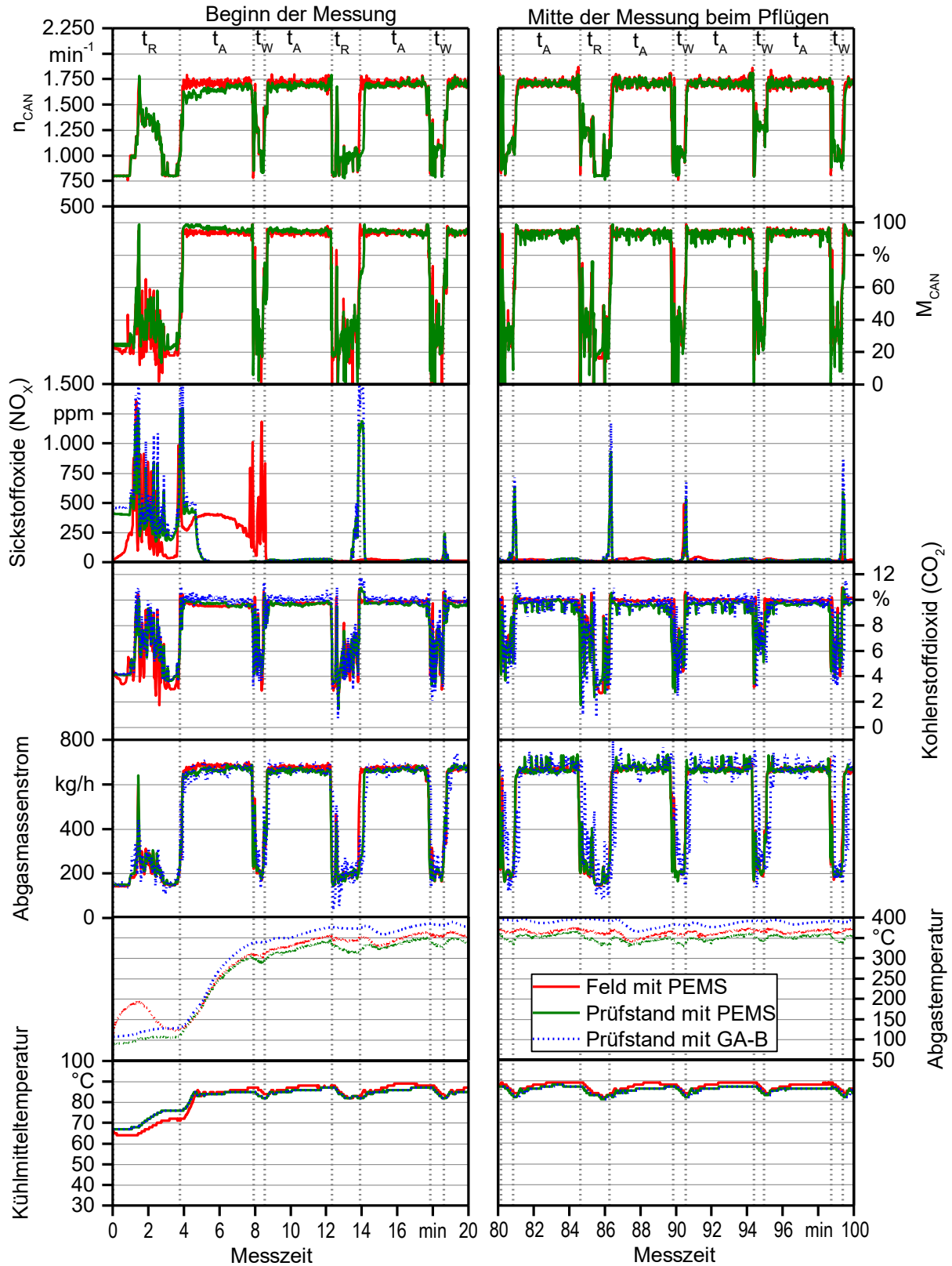


Abbildung 32: Motordrehzahl (n_{CAN}) und -drehmoment (M_{CAN}), NO_x- und CO₂-Emissionen, Abgasmassenstrom sowie Betriebstemperaturen beim Pflügen (PF-II) im Feld und am Traktorenprüfstand

Trotz verschiedener Messmethoden unterscheiden sich die **CO₂-Emissionen** und der **Abgasmassenstrom** und somit der Kraftstoffverbrauch nur geringfügig. Auftretende Abweichungen der Messwerte zwischen Feld und Prüfstand werden vorrangig durch die Drehzahl- und Drehmomentunterschiede verursacht, z. B. beim Einsetzen des Pflugs in den Boden, welche sich unmittelbar auf die CO₂ Emissionen und den Abgasmassenstrom auswirken.

Trotz vergleichbarer **Kühlmitteltemperatur** (66 bzw. 67 °C) zu Messbeginn, steigen die Messwerte im Feld langsamer an als am Prüfstand. Dieser Effekt wird auf die abweichende Konditionierung des Traktormotors vor Messbeginn zurückgeführt. Im Feld kühlt der Motorblock vor Messbeginn auf unter 9 °C Umgebungstemperatur des Fahrzeugs stärker ab als am Prüfstand, wo nur ca. 16 °C erreicht wurden. Ab etwa fünf Minuten Messzeit beträgt die Kühlmitteltemperatur über 80 °C, wobei sie am Prüfstand bis zu 3 K niedriger liegt als im Feld. Der Betrieb mit geöffneter Motorhaube kann am Prüfstand zu einer besseren Kühlleistung führen als im Feld, wodurch die Kühlmitteltemperatur unter hoher Last etwas geringer ist. Die **Abgastemperatur** (nach der AGN) steigt im Feld zu Beginn der Messung (t_R) kurzzeitig auf 200 °C an und ist damit knapp doppelt so hoch als am Prüfstand. Im Kaltstart werden solche Temperatursprünge gezielt durch Kraftstoffnacheinspritzungen in den Brennraum herbeigeführt, um die Abgasnachbehandlung (AGN) auf Betriebstemperatur zu bringen. Die Aufheizphase der AGN wird am Prüfstand aufgrund des höheren Kühlmitteltemperaturniveaus im Vergleich zur Feldmessung nicht aktiviert. Im weiteren Messverlauf beeinflusst insbesondere die Platzierung der Messstellen das gemessene Temperaturniveau, das bei GA-B im Mittel 376 °C, beim PEMS auf dem Feld 352 °C und beim PEMS am Prüfstand 338 °C beträgt. Durch Installation von GA-B unmittelbar nach der AGN war die Messstelle des PEMS am Prüfstand weiter von der Abgasaustrittsstelle entfernt als im Feld. Allerdings wirkt sich die Platzierung der Messstellen nicht auf den Motorbetrieb oder die Emissionen aus.

Ferner beeinflussen die Drehzahl-, Drehmoment- und Temperaturunterschiede im Feld-Prüfstand-Vergleich die **NO_x-Emissionen**. In den ersten vier Minuten der Messzeit bei der Straßenfahrt vom Hof zum Feld (t_R) erfasst das PEMS im Feld mit 248 ppm eine geringere mittlere NO_x-Konzentration als in der entsprechenden Phase des Fahrzyklus am Prüfstand mit 443 ppm. Es ist davon auszugehen, dass die NO_x-Emission im Feld durch eine höhere Abgasrückführungsrate (AGR) stärker reduziert wird als am Prüfstand. Beim Pflügen zwischen ca. vier und acht Minuten Messzeit (t_A) fallen die Emissionen am Prüfstand mit 85 ppm deutlich geringer aus als im Feld mit 354 ppm. Die Abweichungen werden hauptsächlich durch den unterschiedlichen Aktivierungszeitpunkt des SCR-Systems hervorgerufen. So erreicht das SCR-System am Prüfstand früher (ab ca. fünf Minuten Messzeit) eine effektive Reduzierung der NO_x auf unter 50 ppm als im Feld (ab ca. neun Minuten Messzeit). Die NO_x-Reduktion beginnt am Prüfstand bei 220 °C bei einer deutlich geringeren Abgastemperatur als im Feld bei 320 °C. Die Dosierung der Harnstofflösung im SCR-System erfordert neben dem Erreichen der Betriebstemperatur von deutlich über 200 °C eine Vorbereitungszeit im Dosiersystem. Dabei werden beginnend ab dem Motorstart die Vorlaufleitungen vollständig entlüftet und der Förderpumpendruck aufgebaut. Am Prüfstand erfolgt der Motorstart vier Minuten früher als im Feld, um die Messgeräte

vorzubereiten und die Zapfwelle einzukuppeln. Das SCR-System kann somit am Prüfstand früher mit der Vorbereitungsprozedur beginnen und dosiert dadurch früher als im Feld. Trotz vergleichbarer Kühlmitteltemperatur (66 bzw. 67 °C) zu Messbeginn ist davon auszugehen, dass durch einen zeitlich synchronen Motorstart im Feld und Prüfstand die Abweichungen in den NO_x -Emissionen weiter reduziert werden können. Bei aktiviertem SCR-System treten am Prüfstand für wenige Sekunden höhere NO_x -Emissionen auf als im Feld. Diese sind in Zusammenhang mit den Abweichungen von n_{CAN} und M_{CAN} am Prüfstand beim Einsetzen des Pflugs in den Boden (z. B. bei 14 min Messzeit) zu sehen.

Fahrzyklus (PTFZ) aus repräsentativen Segmenten mit verkürzter Messzeit

Aus dem vereinten Messdatensatz der drei Messfahrten PF-I, PF-II, PF-III des Traktors IV-c beim Pflügen über in Summe 8,5 Bh wird aus repräsentativen Segmenten der Fahrzyklus (PTFZ) mit einer Dauer von 0,55 Bh gebildet. Dabei wird die identische Methode aus Kapitel 4.4 für die Erstellung der PTFZ verwendet. Die Umgebungstemperatur im PTFZ am Traktorenprüfstand wurde (wie bei PF-G, siehe Tabelle 18) auf 15 °C eingestellt. Abbildung 33 zeigt den Mittelwert und die Spannweite der Abgaskomponenten NO_x , CO und HC im Fahrzyklus mit verkürzter Messzeit (PTFZ) im Vergleich zu den Messungen PF-I, PF-II, PF-III mit gesamter Dauer (PF-G) im Feld und am Prüfstand.

Am Traktorenprüfstand unterscheiden sich die mittleren NO_x -Emissionen im PTFZ weniger als 0,01 g/kWh zur Variante PF-G mit voller Messdauer bei gleicher Abgasmesstechnik. Im Feld fallen die mittleren NO_x -Emissionen um 0,08 g/kWh geringer aus als im PTFZ (jeweils gemessen mit dem PEMS). Bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ unterscheiden sich die Mittelwerte der NO_x -Emissionen im verkürzten Zyklus am Prüfstand (PTFZ) nicht signifikant zu den Ergebnissen im Feld und am Prüfstand (PF-G), wie auch die Abbildung 33 zeigt. Die mittleren NO_x -Emissionen lagen bei allen Varianten im Feld und am Prüfstand unterhalb des Grenzwerts von 0,4 g/kWh, welcher für die Messungen mit dem NRSC und NRTC am Motorenprüfstand gilt (Abbildung 35, links).

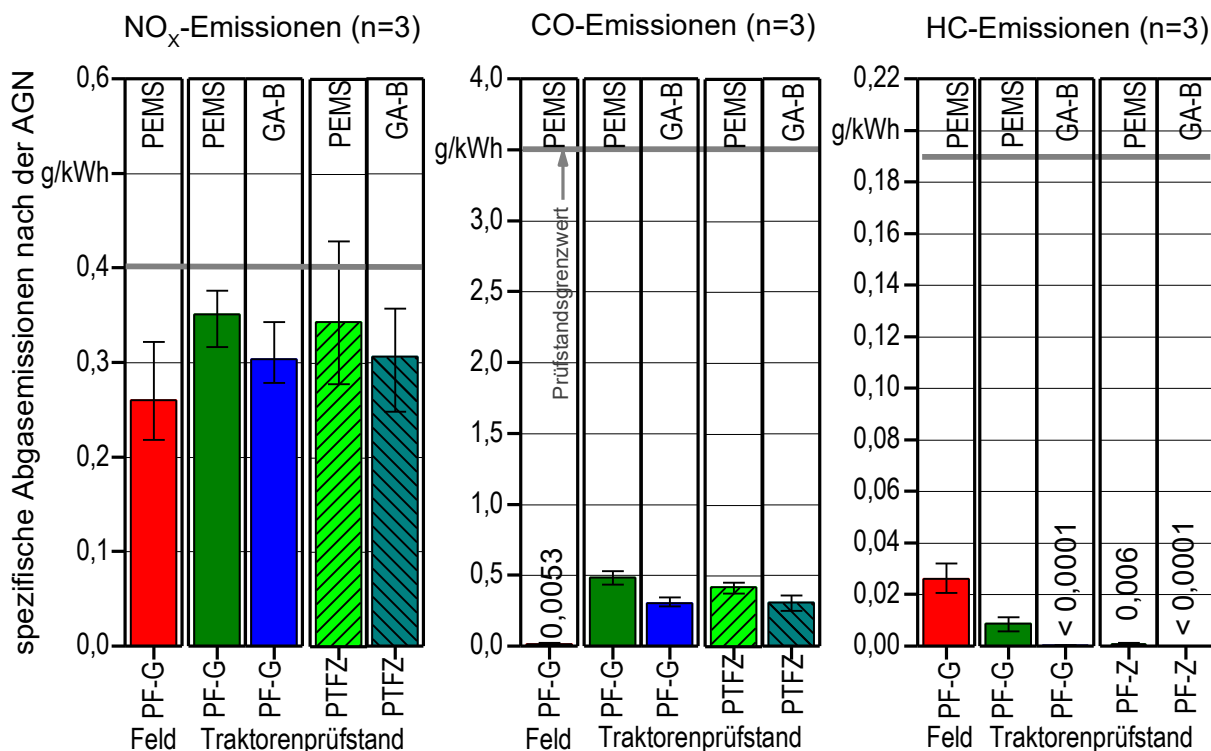


Abbildung 33: Mittelwert und Spannweite der NO_x-, CO- und HC-Emissionen im Feld und am Prüfstand über die gesamte (PF-G) und verkürzte Messdauer (PTFZ) gemessen mit PEMS und GA-B im Rapsölkraftstoffbetrieb

Am Traktorenprüfstand zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der Messwerte zwischen den Varianten mit voller Messzeit von 8,5 Bh (PF-G) und Fahrzyklus mit der verkürzten Messzeit von 0,55 Bh (PTFZ). Die Messgenauigkeit des CO-Analysators, der Bestandteil des PEMS ist, siehe Tabelle 10 auf Seite 73, ist mit 0,3 % bezogen auf den Messbereichsendwert von 8 Vol.-% deutlich höher als der Unterschied zwischen den Feld- und Prüfstandsmessungen. Unter Berücksichtigung der Messgenauigkeit des Analysators kann unterhalb von 1,3 g/kWh CO (bei $Q_m = 530$ kg/h und $P_{ZW} = 90$ kW) nicht mehr zwischen Messergebnissen unterschieden werden. Die gesamten CO-Messergebnisse liegen unter 0,5 g/kWh und sind damit deutlich unterhalb des Prüfstandsgrenzwerts von 3,5 g/kWh.

Im Gegensatz dazu waren die HC-Emissionen bei allen Messfahrten im Feld um bis zu 0,025 g/kWh signifikant höher als am Prüfstand. Aufgrund der durchgängig vorhandenen Abweichung kann ein einmaliges Ereignis mit erhöhten HC-Emissionen, wie z. B. eine Kraftstoffnacheinspritzung zur Regeneration des Partikelfilters, ausgeschlossen werden. Auch sind Unterschiede in der Wirksamkeit der katalytischen Beschichtung der Abgasnachbehandlung (AGN) unwahrscheinlich. Die ermittelten HC-Konzentrationen bewegen sich im unteren Messbereich des FID auf einem sehr niedrigen Niveau unterhalb von 10 ppm. Laut Herstellerangaben reicht die Messgenauigkeit des Gasanalysators sowohl im PEMS (0,3 ppm, siehe Tabelle 10 auf Seite 73) aus, um Unterschiede in dieser Größenordnung zu detektieren. Dennoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass hier die

Unterschiede zwischen den Feld- und Prüfstands Aufbau durch das Messgerät z. B. durch Position der Messstelle, Kalibriergasabweichungen, Drift des Analysators oder Vibrationen verursacht worden sind.

Die PM-Emissionen waren bei allen Varianten unterhalb von 0,007 g/kWh. Aufgrund des geringen Niveaus unter der Nachweisgrenze kann von einer vergleichbaren Funktion des DPF ausgegangen werden.

Einfluss der Umgebungstemperatur und Kraftstoffeigenschaften im PTFZ

Als nächsten wird geprüft, wie stark das Emissionsverhalten auf die Veränderungen der Umgebungstemperatur sowie der Kraftstoffeigenschaften bei der Fahrzyklusanwendung (PTFZ) am Traktorenprüfstand reagiert. Abbildung 34 zeigt die NO_x -, CO- und HC-Emissionen vor (GA-A) und nach der AGN (GA-B) im PTFZ in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur mit Rapsöl- und Dieseldieselkraftstoff. Die getesteten Umgebungstemperaturen von 8 °C, 15 °C, 25 °C und 36 °C sind innerhalb des zulässigen Bereichs von - 7 °C bis 37 °C (bei 1004 hPa) für RDE-Messungen von NRMM.

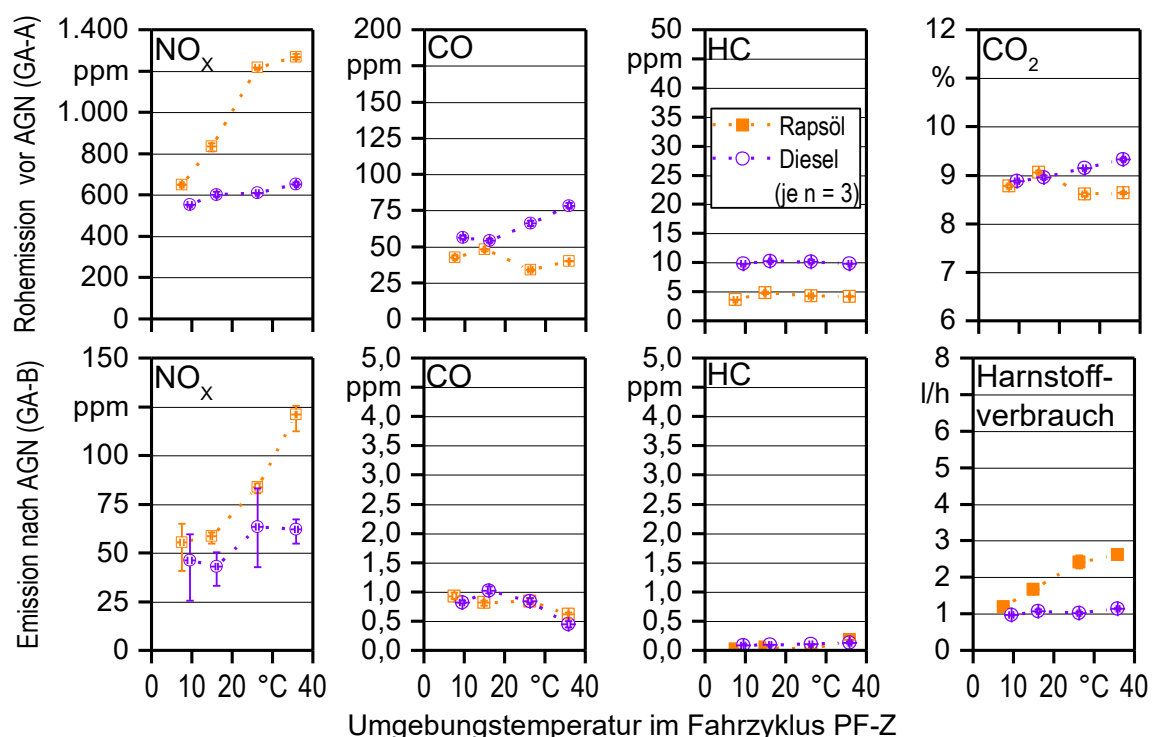


Abbildung 34: NO_x -, CO-, HC- und CO_2 -Emissionen vor (GA-A) bzw. nach der AGN (GA-B) sowie Harnstoffverbrauch im PTFZ in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur mit Rapsöl- und Dieseldieselkraftstoff

Mit zunehmender Umgebungstemperatur steigen die mittleren NO_x -Emissionen vor der AGN im Rapsölbetrieb stärker an als beim Betrieb mit Dieseldieselkraftstoff. Wird die

Umgebungstemperatur von 15 auf 25 °C angehoben, nehmen auch nach der AGN die NO_x-Emissionen im Rapsölbetrieb um 99 % zu.

Der Einsatz von Rapsölkraftstoff bei unveränderten Motoreinstellungen im Vergleich zum Dieselloskraftstoffbetrieb kann zu einem steigenden Verbrennungsluftverhältnis im Brennraum und damit zu einem zunehmenden NO_x-Entstehungspotential führen. Auch der Sauerstoffanteil im Rapsölkraftstoff kann den NO_x-Ausstoß begünstigen und reduziert die HC- und CO-Emissionen im Brennraum im Vergleich zum Diesel [33], wie bereits in Kapitel 5.2 festgestellt wurde. Auch zunehmende Verbrennungslufttemperaturen können die NO_x-Entstehung im Brennraum befördern. Der NO_x-Anstieg und die CO₂-Minderung im Rapsölbetrieb bei 25 °C bzw. 36 °C Umgebungstemperatur ist jedoch hauptsächlich auf eine verminderte AGR-Rate im Vergleich zum Diesellobetrieb zurückzuführen. Ausschließlich während dieser beiden Messreihen ist die AGR-Klappe geschlossen. Die Diskussion der Ergebnisse mit dem Motorenhersteller ergibt, dass die kraftstoffspezifischen Abweichungen auf die diesellokraftstoffoptimierten Einstellungen der Motorsteuerung zurückgeführt werden kann. Durch die veränderten Kraftstoffeigenschaften im Rapsölbetrieb (geringerer Heizwert, höhere Dichte, höhere Viskosität ...) funktionieren die diesellokraftstoffkalibrierten Berechnungsmodelle (z. B. zur Berechnung der Luftmassen oder Abgasmassen) nicht ordnungsgemäß. In diesen für das Motorsteuergerät undefinierten Betriebszuständen wird unter anderem die Regelung der AGR beeinträchtigt. Jedoch unterscheiden sich die NO_x-Emissionen nach der AGN bei 8 °C, 15 °C und 25 °C Umgebungstemperatur im Diesello- und Rapsölbetrieb nur geringfügig. Grund dafür ist die bei Rapsölbetrieb höhere Dosiermenge an Harnstofflösung im SCR-System. Auch die HC- und CO-Emissionen nach der AGN werden durch den Oxidationskatalysator auf ein sehr geringes Niveau unter 1 ppm reduziert.

Die Ergebnisse im PTFZ am Traktors IV-c am Prüfstand zeigen, dass bei vergleichbaren Umgebungsbedingungen und Kraftstoffeigenschaften das Emissionsverhalten aus dem Feld reproduziert werden kann. Weichen jedoch relevante Einflussgrößen, wie Umgebungstemperatur oder die Kraftstoffart ab, ergeben sich unterschiedliche Emissionsergebnisse. Die alleinige Berücksichtigung der Temperaturgrenzen (von 7 °C bis 37 °C) für RDE-Messungen reicht bei dieser Versuchsanordnung nicht aus, um geringe Abweichungen zwischen Feld- und Prüfstandsmessung zu erhalten. Bei der Anwendung von Zyklus ist daher erforderlich, das Temperaturniveau aus dem Feld am Prüfstand möglichst exakt nachzustellen. Wie bereits Kapitel 5.2 festgestellt, bestätigt das Resultat der Messungen in den PTFZ den Einfluss der Kraftstoffeigenschaften auf das Emissionsverhalten beeinflusst. Gerade im Hinblick auf die zunehmende Kraftstoffvielfalt ist auf eine überstimmende Kraftstoffzusammensetzung im Feld-Prüfstands-Vergleich sicherzustellen. Es gilt daher eine klar definierte Kraftstoffqualität einzusetzen, z. B. durch die Verwendung genormter Kraftstoffe oder spezieller Prüfkraftstoffe und die Kraftstoffzusammensetzung im Prüfbericht zu dokumentieren.

6 Einordnung

Die Einordnung der Ergebnisse erfolgt zunächst für die Anwendung transienter Prüfzyklen am Traktorenprüfstand und anschließend für die Entwicklung praxisnaher Traktor-Fahrzyklen (PTFZ).

Transiente Prüfzyklen am Traktorenprüfstand

Zusätzlich zur gesetzlichen Abgasemissionsprüfung an ausgebauten Land- und Baumaschinenmotoren am Motorenprüfstand [57][54] mit zunächst ausschließlich stationären Prüfzyklen (NRSC) haben sich vor allem in der Forschung Emissionsmessungen am Gesamtfahrzeug Traktor auf dem Traktorenprüfstand [47][35][131][117][160][159] etabliert. Dort entfällt der aufwendige Aus- und Wiedereinbau des Motors bei wiederkehrenden Messungen. Darüber hinaus ermöglicht der Traktorenprüfstand eine Emissionsbewertung von Motor und Abgasnachbehandlung in Gesamtfahrzeugen, die den realen Bedingungen nahe kommt. Jedoch ist so die Einhaltung von gesetzlichen Abgasanforderungen nahe den Grenzwerten nur bedingt überprüfbar. Mit der Einführung eines transienten Prüfzyklus (NRTC) für die Abgasprüfung ab Abgasstufe IIIB am Motorenprüfstand gibt es Vorschläge auch diesen auf den Traktorenprüfstand zu übertragen. Um die schnellen Drehzahl- und Lastwechsel des NRTC abbilden zu können untersuchte LANDIS (2012) [95] eine Methode bei der er den Zyklus in 10s Intervalle unterteilte und für jedes Intervall einen gemittelten Drehzahl-/Lastwert vorgibt (10sNRTC).

Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit wurde zunächst überprüft, ob der 10sNRTC am zur Verfügung stehenden Traktorenprüfstand grundsätzlich anwendbar ist und wie gut die Wiederholbarkeit ist. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen klar, dass unterschiedliche Traktoren einen in 10 Sekunden Intervalle gemittelten NRTC am Traktorenprüfstand problemlos absolvieren können und dass die Ergebnisse gut reproduzierbar sind.

Weil die 10 s Intervallbildung dem teilweise sekundlich wechselnden Drehzahl-/Lastprofil des NRTC einen Teil der Dynamik nimmt und somit die dabei gemessenen Emissionswerte beeinflussen kann, wurde zusätzlich versucht den NRTC mit sekundlich wechselnden Lastprofilen am Traktorenprüfstand anzuwenden. Um diese hohe Dynamik zu realisieren, war es notwendig einen geregelten Gaspedalsteller und eine Regelung für die Wirbelstrombremse zu entwickeln. Damit konnten die Lastwechsel präzise in der vorgegebenen Geschwindigkeit ausgeführt werden. Die Validierungsprüfung [54] für die Drehzahl- und Drehmomentabweichungen entsprechend der Gesetzgebung konnte im 10sNRTC in allen und im 1sNRTC in den überwiegenden Bewertungskriterien erfüllt werden. Die Abweichungen von den Vorgaben der Validierungsprüfung könnten durch eine Optimierung der Regelung (z. B. Erhöhung der Steuerfrequenz) reduziert werden. Dennoch bleibt die Regelbarkeit systembedingt aufgrund der Trägheitsmomente am Traktorenprüfstand im Vergleich zum Motorenprüfstand stärker limitiert. Die Messungen fanden an sechs Traktoren mit drei Wiederholungen statt. Die Ergebnisse der Untersuchungen im NRTC beziehen sich auf die getesteten Traktoren am Traktorenprüfstand des TFZ. Es sind daher noch weitere Messungen mit anderen Traktoren und auf weiteren Prüfständen anzustreben.

Die NRTC-Messungen am Traktorenprüfstand sollen keinen Ersatz für die Typgenehmigungsprüfung am Motorenprüfstand [57][54] darstellen. Allein schon deshalb, weil die Emissionswerte (in g/kWh) am Traktorenprüfstand auf die Zapfwellenarbeit bezogen werden und daher höher ausfallen als die Emissionswerte am Motorenprüfstand, die auf die Kurbelwellenarbeit bezogen werden. Die Vergleichbarkeit mit den Emissionsgrenzwerten aus der Gesetzgebung [57] ist daher eingeschränkt. Vergleichsmessungen zwischen Motor- und Traktorenprüfstand könnten hier weitere Erkenntnisse über die Höhe der Abweichungen beider Prüfverfahren liefern. In der Literatur werden Richtwerte für die Abweichung zwischen 10 % und 20 % [155][4][170] angegeben.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass am Traktorenprüfstand, trotz höherer Trägheitsmomente im Antrieb des Gesamtfahrzeugs im Vergleich zum ausgebauten Motor, hochtransiente Drehzahl- und Drehmomentprofile realisierbar sind. Auch wenn der Traktorenprüfstand zur Überprüfung der Einhaltung gesetzlicher Grenzwerte weniger Aussagekraft besitzt, so kann damit das Emissionsverhalten realitätsnah im transienten Betrieb ermittelt werden. Und dies umso genauer, je besser Fahrzyklen mit dem Lastprofil aus dem praktischen Einsatz am Traktorenprüfstand realisiert werden können.

Praxisnahe Traktor-Fahrzyklen (PTFZ)

Die in der Arbeit vorgestellte Methode der Praxisnahen Traktor-Fahrzyklen (PTFZ) basiert auf der Übertragung von Drehzahl- und Drehmomentsignalen aus der Motorsteuerung (ECU) bei landwirtschaftlichen Traktorarbeiten auf den Traktorenprüfstand, um Realemis-sionen zu ermitteln. Im Gegensatz zu anderen Untersuchungen, wie z. B. von JANULEVIČIUS et al. (2013-2018) [84][85][87][83][82], HANSSON et al. (2001) [68] oder RINALDI und STADLER (2002) [147]), die teils am Motorenprüfstand und ausschließlich im stationären Betrieb stattfanden, werden die Abgasmessungen nach dieser Methode am Gesamtsystem Traktor bei transienten Motordrehzahl- und Drehmomentverläufen durchgeführt.

Im Vergleich zur recht aufwändigen portablen Emissionsmessung am Feld mit PEMS können mit dieser Methode nach einem Algorithmus verkürzte, auch für längere Einsatzzeiträume repräsentative Fahrzyklen für den Traktorenprüfstand erstellt werden. Dort herrschen gut einstellbare Umgebungsbedingungen, die auch Wiederholungs- und Vergleichsmessungen ermöglichen. Am Prüfstand können im Gegensatz zur portablen Messung zusätzliche Messstellen (z. B. vor der Abgasmachbehandlung) installiert werden. Zudem sind die Messungen am Prüfstand nicht an die Witterung sowie an den üblichen Ausführungszeitraum landwirtschaftlicher Arbeiten (z. B. Säen im Frühjahr/Herbst oder Stoppelbearbeitung nach Getreideernte) gebunden, wodurch die Anzahl möglicher Untersuchungsvarianten gesteigert werden kann.

Der entwickelte Algorithmus teilt die jährliche Traktorbetriebszeit in Arbeitsarten und Teilzeiten, wie z. B. die Arbeitsverrichtungs- oder Wendezeit, in Anlehnung gängiger landwirtschaftliche Zeitgliederungen [180] [28] auf und setzt repräsentative Segmente zu einem Fahrzyklus zusammen. Dennoch bleibt zu prüfen, ob der bisher an zwei Traktoren angewandte Algorithmus auch bei weiteren Traktortypen und für weitere Traktorarbeiten oder

Feldgeometrien verwendet werden kann. Gegebenenfalls sind individuelle Anpassungen erforderlich. Für die Aufteilung der Daten können auch weitere Parameter, z. B. die Position der Front- und Heckkraftheber, verwendet werden. Es ist zu erwarten, dass im Zuge der Digitalisierung die notwendige Datenerhebung auch ohne zusätzliche Datenlogger oder Betriebstagebücher automatisiert erfolgen kann. Auch werden hochpräzise Positionserkennungssysteme, z. B. durch das RTK-Verfahren, in Traktoren weitere Verbreitung finden. Weitere Chancen könnten sich durch den Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI) ergeben, da durch maschinelles Lernen die Unterscheidung der Arbeitsarten oder Teilzeiten verbessert werden kann.

Die Drehmomentsignale aus der Motorsteuerung (ECU) während der Feldfahrten konnten mit dem verwendeten nichtlinearen Regressionsmodell, welches RINALDI und STADLER (2002) [147], ČUPERA et al. (2013) [23] sowie ČUPERA und SEDLÁK (2011) [21] für andere Fragestellungen nutzten, mit geringen Abweichungen am Traktorenprüfstand reproduziert werden. Für die Datenaufzeichnung im Feld konnte so bei den getesteten Traktoren (IIB, IV-c) auf zusätzliche Motordrehzahl-, Motordrehmoment- und Kraftstoffverbrauchsmesstechnik früherer Untersuchungen [146][147][68][103][165][173][98][99] verzichtet werden. Da in der Literatur noch auf Unsicherheiten bezüglich der Qualität der ECU-Signale hingewiesen wird [3][148][128][24], sind Vergleichsmessungen, z. B. am Traktorenprüfstand, zwischen den ECU-Signalen und den Ergebnissen mit präziser Drehmoment- und Kraftstoffmesstechnik mit weiteren Traktormodellen anzuraten.

Nachteilig hinsichtlich der Reproduzierbarkeit von Messungen ist, dass die schwankende Leistungsaufnahme der Nebenaggregate des Traktors, wie Lüfter, Generator oder Kompressor nicht in die Sollvorgaben des Fahrzyklus einfließen können. Dagegen ist zu erwarten, dass am Motorenprüfstand die ECU-Signale in hochtransienten Phasen präziser nachgestellt werden können, da dort geringere Massenträgheiten herrschen und bereits Drehzahl- und Drehmomentsteuerungssysteme für transiente Messungen etabliert sind [122]. Mit der Wirbelstrombremse am Traktorenprüfstand konnten kurze Abschnitte im Schubbetrieb bei Transportarbeiten nicht realisiert werden, wie z. B. bei Bergabfahrten oder Abbremsen des Fahrzeugs. Ähnlich wie am Motorenprüfstand wäre hier der Einsatz von aktiven Belastungssystemen denkbar, wie z. B. Gleichstrom- oder Asynchronmaschinen, welche das den Verbrennungsmotor nicht nur bremsen, sondern auch antreiben können. Ungeachtet davon ist auch noch zu prüfen, ob durch verbesserte Einstellungen der PID-Regler und eine Erhöhung der Steuerfrequenz (z. B. von 1 Hz auf 10 Hz) die Genauigkeit am Traktorenprüfstand weiter verbessert werden kann.

Die erstellten Fahrzyklen repräsentieren die Arbeiten der ausgewählten Traktoren während des Betrachtungszeitraums. Für die Entwicklung von feldarbeitsspezifischen Fahrzyklen oder um Emissionsfaktoren für Flotten abzuleiten, sind weitere Daten mehrerer Traktoren und Einsatzfahrten zu erheben. Die Ergebnisse der Validierung ergaben keine signifikanten Unterschiede zwischen den tatsächlichen Emissionen beim Pflügen im Feld und den Emissionen am Traktorenprüfstand in den erstellten Fahrzyklen.

Mit der Lüftungssteuerung am Traktorenprüfstand konnte in den Fahrzyklen das Umgebungstemperaturniveau von 8 °C bis 15 °C aus der PEMS-Messung eingestellt werden.

Die Umgebungstemperaturen wurden zudem am Traktorenprüfstand gezielt auf 25 °C bzw. 36 °K erhöht. Dabei stiegen die NO_x-Emissionen nach der AGN im Rapsölbetrieb um über 99 % und um bis zu 24 % im Dieselmotortreibstoffbetrieb im Vergleich den RDE an. Diese kraftstoffspezifische Abweichung bei hohen Umgebungstemperaturen ist auf die Abgasrückführungseinstellung der dieselmotortreibstoffoptimierten Motorsteuerung des Traktors zurückzuführen. Für ein realitätsnahes Ergebnis gilt es daher, relevante Einflussgrößen am Prüfstand mit möglichst geringen Abweichungen nachzubilden. Die Umgebungsbedingungen könnten z. B. durch eine Ansaugluftkonditionierung sowie Klimatisierung des Prüfstands weiter optimiert werden. Aufgrund der zunehmenden Kraftstoffvielfalt und im Hinblick auf den Einsatz von „Multi-Fuel“ Fahrzeugen scheint es ferner sinnvoll den Einfluss abweichender Kraftstoffeigenschaften auf das Messergebnis zwischen Feld- und Prüfstandsmessung weiter zu prüfen.

Weitere Abweichungen zwischen Traktorfeldarbeit und Prüfstand können sich zum Beispiel durch unterschiedliche Verschleiß- und Wartungszustand des Motors (z. B. Ablagerungen am Kraftstoffinjektor) oder der Abgasnachbehandlung (z. B. Katalysatoralterung oder Abgasgegendruck) ergeben. Es bleibt zudem ungewiss, ob nicht-repräsentative Segmente (z. B. bei Kaltstart oder Regeneration des Partikelfilters), welche nicht in den PTFZ einfließen, einen überproportionalen Einfluss auf das Gesamtergebnis haben können. Es sind daher weitere Untersuchungen über einen längeren Zeitraum notwendig, um Emissionsergebnisse auch nicht repräsentativer Segmente, welche emissionskritisch wirken, zu erheben.

Die Methode könnte zusätzlich zur Messungen nicht limitierter Abgasemissionskomponenten, wie z. B. polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), zum Einsatz kommen, welche derzeit mit PEMS nicht erhoben werden. Darüber hinaus ist es denkbar, die Methode zur Untersuchung weitere Kenngrößen (Temperaturen, Drücke, Verschleiß ...) auf Traktorteilsysteme (z. B. im Schmier-, Kraftstoff- oder Kühlsystem) im Rahmen von Optimierungsschritten zwischen Feld- und Prüfstandsbetrieb zu nutzen. Die Anwendung der Methode an Rollen-, Naben- oder Bremswagenprüfständen für Traktoren z. B. von RÜCKERT et al. (2015) [149], ENGELMANN et al. (2019) [41] sowie von AI und TAUBER (2015) [2] ist vorstellbar. Dabei gilt es zu evaluieren, ob die zusätzlichen Möglichkeiten (z. B. steuerbare Hydraulik- und Zugleistung) weitere Vorteile bei der Durchführung der vorgestellten Methode bringen. Die alleinige Leistungsabnahme über die Zapfwelle ist im Vergleich zu alternativen Prüfständen mit einem geringen Aufwand verbunden. Ferner hat sich der Traktorenprüfstand in der Forschung zur Abgasemissionsmessung etabliert [35][96][117][82][82]. Auch für andere Non-Road-Fahrzeuge ohne Zapfwelle könnte die Prüfmethode prinzipiell angewandt werden, aber auch hier ist die Implementierung der Leistungsregelung (z. B. mit einer Hydraulikbremse) technisch komplex.

Die gezeigten Praxisnahen Traktor-Fahrzyklen (PTFZ) können in der Forschung und Industrie für die Bestimmung der Abgasemissionen landwirtschaftlicher Arbeiten und zur Entwicklungsbegleitung (für die Applikation von Motoreinstellungen, des Kraftstoffsystems, von Katalysatoren ...) verwendet werden. Ferner können noch nicht vorhandene Daten zur Bewertung der THG- und gesetzlich limitierter Abgasemissionen (z. B. zur

Flottenbewertung landwirtschaftlicher Fahrzeuge) für mehrere Kraftstoffe und spezifische landwirtschaftliche Arbeiten gewonnen werden.

7 Zusammenfassung

Es herrscht ein breiter gesellschaftlicher Konsens, dass der Ausstoß lokaler Schadstoffe zum Erhalt sauberer Atemluft und die Treibhausgasemissionen (THG) für den Schutz des Klimas reduziert werden müssen. Daher werden die Abgasemissionen von Fahrzeugen sowie von mobilen Maschinen und Geräten (engl. Non-Road Mobile Machinery, kurz NRMM) zunehmend strenger reglementiert.

Angesichts steigender Anforderungen an die Luftreinhaltung gilt es also, die Abgasemissionen von Traktoren sowohl bei den standardisierten Prüfzyklen am Prüfstand als auch im realen Betrieb zu minimieren. Gleichzeitig müssen die THG-Emissionen durch Effizienzsteigerung und durch die Nutzung erneuerbarer Kraftstoffe reduziert werden. Für die Entwicklung schadstoff- und treibhausgasarmer Antriebe sind Messmethoden notwendig, mit denen sich die Emissionen von Traktoren im tatsächlichen Arbeitseinsatz repräsentativ ermitteln lassen und eine gezielte Untersuchung von Einflussfaktoren (wie z. B. der Kraftstoffart) ermöglicht wird.

Die gesetzlich vorgeschriebenen Prüfzyklen [54][57] decken die in der landwirtschaftlichen Praxis vorkommenden Drehzahl- und Drehmomentwechsel nur unzureichend ab. Auch werden diese nicht am Gesamtsystem Traktor sondern am ausgebauten Motor angewandt. Darüber hinaus lassen sich die anhand von bestehenden Prüfzyklen ermittelten Abgasemissionen nicht einzelnen landwirtschaftlichen Arbeiten zuordnen. Kenntnisse zu den spezifischen Abgasemissionen des Gesamtsystems Traktor mit Anbaugerät sind jedoch erforderlich, um die Umweltwirkungen landwirtschaftlicher Prozesse bewerten und Optimierungen zielgerichtet vornehmen zu können.

Mit portablen Emissionsmesssystemen (PEMS) kann das tatsächliche Emissionsverhalten (RDE) von Traktoren unter natürlich schwankenden Umgebungs- und Betriebsbedingungen über einen begrenzten Zeitraum erfasst werden. Die Aufzeichnung der RDE mit PEMS ist seit dem Jahr 2019 vom Gesetzgeber auch für Traktoren vorgeschrieben [55][57]. Dies erfordert jedoch einen erheblichen Geräte- und Zeitaufwand. Die große Variabilität der Einsatzbedingungen im Feld führt dazu, dass Einzelmessungen meist wenig repräsentativ sind und die Wirkung von Einflussfaktoren auf die Messergebnisse nur eingeschränkt beurteilt werden kann.

In der Forschung und Entwicklung haben sich zudem die Emissions- und Kraftstoffverbrauchsmessungen unter wiederholbaren Bedingungen am Traktorenprüfstand international bewährt [35][95][49][160][117][159]. Am Traktorenprüfstand kann der im Traktor eingebaute Motor über den Zapfwellenausgang mit einer Bremse belastet werden. Es besteht jedoch die Unsicherheit, ob die transiente Motorbelastung aus der landwirtschaftlichen Praxis am Gesamtfahrzeug Traktor ausreichend genau reproduziert werden kann. Eine Methode zur systematischen Erfassung der tatsächlichen Emissionen am Gesamtfahrzeug Traktor aus mehreren landwirtschaftlichen Traktorarbeiten unter kontrollierbaren Umgebungsbedingungen wird in der Literatur nicht beschrieben.

Ziel dieser Untersuchung ist es deshalb, eine Methode zu entwickeln, mit der die Stickstoffoxid- (NO_x), Kohlenwasserstoff- (HC), Kohlenstoffmonoxid- (CO), Kohlenstoffdioxid- (CO_2) und Partikelmasseemissionen (PM) von Traktoren bei verschiedenen landwirtschaftlichen Arbeiten mit möglichst geringen Messgeräteaufwand repräsentativ bestimmt werden können. Die Methode soll unabhängig von äußeren Umwelteinflüssen (Witterung, Untergrund, Fahrer ...) durchführbar sein und eine gute Wiederholbarkeit aufweisen, um damit auch unterschiedliche Einflussgrößen, wie z. B. die Kraftstoffart untersuchen zu können.

Zunächst wird am Traktorenprüfstand die Anwendung von transienten Drehzahl- und Drehmomentverläufen mithilfe einer Wirbelstrombremse und eines Gaspedalstellers an sechs Traktoren der Abgasstufe II bis IV geprüft. Die Abgasemissionen werden dabei mit stationären Gasanalysatoren (FTIR, NDUV, FID, NDIR) vor und nach der Abgasnachbehandlung erfasst. Die Messung des Verbrauchs an Rapsölkraftstoff (DIN 51605), Dieseldieselkraftstoff (CEC RF 06 03) und Harnstofflösung (DIN 70070) erfolgt gravimetrisch. Als transientes Belastungsprofil dient der Non-Road Transient Cycle (NRTC), welcher für die Typgenehmigung am Motorenprüfstand konzipiert ist. Die Sollvorgaben des NRTC für Drehzahl und Drehmoment werden sowohl unverändert (1sNRTC) als auch in 10 s Intervallen gemittelt (10sNRTC [95]) auf den Traktorenprüfstand übertragen. Der Grad an Übereinstimmung der Messwerte im Soll-Ist-Vergleich soll zur Beurteilung der Eignung des Traktorenprüfstands für die Anwendung transientser Fahrzyklen aus der Praxis dienen.

Die Ergebnisse **transienter Prüfzyklen auf Basis des NRTC** gemessen an sechs Traktoren der Abgasstufen II bis IV zeigen, dass dynamische Drehzahl- und Drehmomentprofile am Traktorenprüfstand, trotz höherer Trägheitsmomente des Gesamtfahrzeugs im Vergleich zum ausgebauten Motor, realisierbar sind. Die Validierungsprüfung hinsichtlich der Gültigkeit der Drehzahl- und Drehmomentabweichungen konnte im 10sNRTC in allen und im 1sNRTC in den überwiegenden Bewertungskriterien entsprechend der Gesetzgebung erfüllt werden. Dennoch bleibt am Traktorenprüfstand die Regelbarkeit im Vergleich zum Motorenprüfstand systembedingt stärker limitiert. Da die in der landwirtschaftlichen Praxis auftretenden Drehzahl- und Lastwechsel geringer ausfallen als im 1sNRTC, wird erwartet, dass transiente Fahrprofile landwirtschaftlicher Arbeiten am Traktorenprüfstand realisierbar sind.

Nach erfolgreicher Prüfung, dass transiente Prüfzyklen auf den Traktorenprüfstand übertragen werden können, werden individuelle **praxisnahe Traktor-Fahrzyklen (PTFZ)** aus insgesamt 206 Betriebsstunden an Felddaten eines Traktors der Abgasstufe IIIB entwickelt. Der Traktor arbeitete während dieser Zeit mit dem Pflug, dem Grubber, der Kreiselegge, der Säkombination, dem Mähwerk sowie im Straßentransport. Die dabei erfassten Daten der Motorsteuerung (ECU), die Protokolle des Betriebstagebuchs und die Traktorpositionssignale (GPS) werden verwendet, um die Traktorarbeiten mithilfe eines entwickelten Algorithmus in die Teilzeiten Arbeitsverrichtungszeit, Wendezeit und Restzeit aufzuteilen. Aus repräsentativen Zeitsegmenten werden für jede Arbeit typische Fahrzyklen erstellt. Die prozentuale Verteilung der Teilzeiten in diesen verkürzten Fahrzyklen weicht um maximal $\pm 1,4$ %-Punkte von der Verteilung der aufgezeichneten Ausgangsdaten ab.

Aus den ECU-Signalen des Feldbetriebs erfolgte mit Regressionsmodellen die Berechnung der Sollvorgaben für den Gaspedalsteller und die Wirbelstrombremse am Prüfstand. Mittels automatisierter Prüfstandssteuerung werden die Sollvorgaben der Fahrzyklen durchlaufen. Einzelne Motordrehzahl- und Motordrehmomentwerte (z. B. im Schubbetrieb) aus dem Feld können am Prüfstand nicht deckungsgleich nachgefahren werden. Dennoch sind die ECU-Signale der Fahrzyklen insgesamt mit einer mittleren Abweichung von max. $\pm 2\%$ am Traktorenprüfstand sehr gut reproduzierbar. Auch die Emissionsmesswerte, die parallel vor und nach dem AGN-System des Traktors erfasst werden, zeigen am Traktorenprüfstand bei drei Wiederholungen eine hohe Übereinstimmung.

Zur **Validierung der Methode** wurden Messungen mit einem portablen Emissionsmesssystem an einem Traktor der Abgasstufe IV beim Pflügen im Rapsölkraftstoffbetrieb durchgeführt und mit den Ergebnissen am Traktorprüfstand verglichen. Am Prüfstand werden hierzu die Drehzahl- und Drehmomentsignale der PEMS-Messungen über die vollständige Messdauer von 8,5 Bh (PF-G) und als praxisnahe Traktor-Fahrzyklen (PTFZ) mit verkürzter Messdauer von 0,55 Bh nachgestellt. Sowohl die Abweichungen der Messwerte für NO_x , CO_2 und dem Abgasmassenstrom zwischen den Prüfumgebungen (Feld/Prüfstand) als auch zwischen den Abgasanalysesystemen (PEMS/Stationäre Abgasanalysatoren) sind statistisch nicht signifikant. Aufgrund des niedrigen Niveaus der HC-, CO- und PM-Emissionen nahe der Nachweisgrenze treten geringe absolute Abweichungen zwischen Feld- und Prüfstandsmessung auf, die auf die Messgenauigkeit der Analysatoren zurückzuführen sind.

Um den Einfluss wechselnder Bedingungen auf die Messergebnisse zu prüfen wird der praxisnahe Traktor-Fahrzyklen (PTFZ) am Prüfstand bei verschiedenen Umgebungstemperaturen im Bereich von $8\text{ }^\circ\text{C}$ bis $36\text{ }^\circ\text{C}$ sowie mit Diesel- und Rapsölkraftstoffbetrieb untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass am Traktorenprüfstand das Emissionsverhalten aus dem tatsächlichen Fahrbetrieb mit Rapsölkraftstoff reproduziert werden kann. Dabei müssen jedoch die Umgebungstemperaturen am Traktorenprüfstand vergleichbar zu den PEMS-Messungen im Feld liegen. Bei höheren Umgebungstemperaturabweichungen unterscheiden sich die Ergebnisse zwischen Feld und Prüfstand deutlicher. Steigen die Umgebungstemperaturen z. B. auf über $25\text{ }^\circ\text{C}$ an, nehmen die mittleren NO_x -Emissionen im Rapsölbetrieb (+ 99 %) stärker zu als mit Dieselmotorkraftstoff (+ 24 %). Ursächlich dafür ist in diesem Fall die geringere Abgasrückführtrate im Rapsölbetrieb, welche aufgrund abweichender Kraftstoffeigenschaften (geringerer Heizwert, höhere Viskosität ...) von der dieselmotorkraftstoffoptimierten Motorsteuerung herabgesetzt wird. Für ein realitätsnahes Ergebnis gilt es daher, relevante Einflussgrößen, wie die Umgebungstemperatur und Kraftstoffart, am Prüfstand möglichst beizubehalten. Andererseits bietet sich die Möglichkeit, dass mit dieser Methode der Einfluss einer großen Bandbreite an Kraftstoffen und Umgebungsbedingungen wiederholbar am Gesamtfahrzeug an einem Standort getestet werden können. Insbesondere bei der Entwicklung neuer Applikationen kann z. B. unter Worst-Case-Bedingungen die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte beurteilt werden.

Trotz der grundsätzlich guten Übereinstimmung zwischen den Messungen aus dem tatsächlichen Fahrbetrieb im Feld und am Traktorenprüfstand gilt es die entwickelte Methode an weiteren Traktoren, Arbeiten und bei wechselnden Umgebungsbedingungen zu

erproben. Sollen mit der Methode typische Werte spezifischer Traktorarbeiten für ganze Flotten ermittelt werden, ist ein höherer Stichprobenumfang notwendig. Es gilt ferner zu beachten, dass der Zustand des Traktors (bzgl. Verschleiß, Alterung ...) zwischen Feld- und Prüfstandsmessung möglichst gut übereinstimmt, um repräsentative Ergebnisse zu erhalten. Es sind daher weitere Untersuchungen über einen längeren Zeitraum notwendig, um auch nicht-repräsentative Segmente (z. B. Regeneration des Partikelfilters), die einen überproportionalen Einfluss auf das Emissionsverhalten ausüben könnten, bewerten zu können.

Insgesamt ermöglichen die Praxisnahen Traktor-Fahrzyklen (PTFZ) am Traktorenprüfstand eine effiziente Erfassung der Abgasemissionen aus dem tatsächlichen Fahrbetrieb von Traktoren. Die Messungen am Gesamtsystem Traktor erfolgt unter wiederholbaren Bedingungen unabhängig von der Witterung sowie der natürlichen Vegetationsperiode landwirtschaftlicher Kulturen. Die vorliegende Methode kann in der Forschung und Industrie für die Bestimmung der Abgasemissionen landwirtschaftlicher Arbeiten und zur Entwicklungsbegleitung schadstoff- und treibhausgasarmer Antriebe für die Applikation von Motoreinstellungen, des Kraftstoffsystems und von Katalysatoren verwendet werden. Zudem können noch nicht vorhandene Daten zur Bewertung der Treibhausgasemissionen und gesetzlich limitierter Abgasemissionen, z. B. für die Flottenbewertung von landwirtschaftlichen Fahrzeugen, für spezifische landwirtschaftliche Arbeiten gewonnen werden.

8 Quellen

- [1] ACHILLES, W.; ECKEL, H.; EURICH-MENDEN, B.; FRISCH, J.; FRITZSCHE, S.; FRÖBA, N., FUNK, M.; GAIO, C., GREBE, S.; GRIMM, E.; GRUBE, J.; HARTMANN, W.; HORLACHER, D.; KLOEPFER, F.; MEYER, B.; MEYER-HAMME, S.; SAUER, N.; SCHROERS, J. O.; SCHULTHEISS, U.; WULF, S. (2018): Betriebsplanung Landwirtschaft 2018/19. 26. Aufl. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL) (Hrsg.). Darmstadt. KTBL-Datensammlung, 776 Seiten
- [2] AI, A.; TAUBER, H.-J. (2015): DLG PowerMix Chassis Dynamometer - The field on a test bench - Concept phase and Implementation. IN: Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI); Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik (MEG) (Hrsg.): LAND.TECHNIK AgEng 2015. Hannover, 6. und 7. November. VDI-Berichte, Nr. 2251. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 1–12, ISBN 978-3-18-092251-5
- [3] AL-AANI, F. S.; DARR, M. J.; COVINGTON, B. R.; POWELL, L. J. (2016): The performance of farm tractors as reported by CAN-Bus messages. Paper Number: 162461746. IN: American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE) (Hrsg.): 2016 ASABE Annual International Meeting. Orlando, Florida, Juli 17-20. St. Joseph, Minnesota, S. 1–18
- [4] AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS (ASAE) (2003): ASAE D497.4 FEB03: Agricultural Machinery Management Data. St. Joseph, MI, USA: AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS (ASAE), 7 Seiten (373-380)
- [5] APFELBECK, R. (1989): Raps als Energiepflanze. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft (MEG), Nr. 156. Dissertation. Freising: TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN, Bayerische Landesanstalt für Landtechnik, Freising-Weihenstephan, 171 Seiten
- [6] APFELBECK, R.; GESSNER, B. H. (1992): Verwendung von Rapsöl zu Motorentreibstoff und als Heizölersatz in technischer und umweltbezogener Hinsicht -Teil II: Untersuchung der Abgaszusammensetzung von Dieselmotoren beim Betrieb mit Rapsöl und Rapsölmethylester sowie deren Mischungen mit Dieselmotortreibstoff. Freising: Technische Universität München, Bayerische Landesanstalt für Landtechnik, Freising-Weihenstephan, 315 Seiten
- [7] APPEL, D.; WAGNER, U.; KOCH, T. (2019): Untersuchungen zum Gesamtfehler bei Emissionsmessungen auf der Straße. MTZ Motortechnische Zeitschrift, Jg. 80, Nr. 5, S. 66–71
- [8] AUERHAMMER, H.; BAUER, R.; BOXBERGER, J.; DEMMEL, M.; ESTLER, M.; GRONAUER, A.; HAIDN, B.; MEYER, J.; PIRKELMANN, H.; SCHÖN, H.; STREHLER, A.; WIDMANN, B. (1998): Landtechnik Bauwesen Verfahrenstechnik - Arbeit - Gebäude - Umwelt. 9. Aufl, Nr. 3. München, Münster-Hiltrup: BLV Verlagsgesellschaft München, Landwirtschaftsverlag Münster-Hiltrup, 576 Seiten
- [9] BACK, P.; HODEL, B.; PIRRO, P.; STARK, W. (2011): Replication of the DLG PowerMix Tractor Fuel Consumption Test in a Laboratory Environment. IN: Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI); Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik (MEG) (Hrsg.): LAND.TECHNIK AgEng 2011. Tagungsband mit CD-ROM. Hannover, November 11-12. VDI-Berichte, Nr. 2124. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 209–215, ISBN 978-3-18-092124-2
- [10] BALDINO, C; TIETGE, U.; MUNCRIEF, R.; YOANN, B.; MOCK, P. (2017): Road tested: Comparative overview of real-world versus type-approval NOX and CO2 emissions from diesel cars in Europe. September 2017. Berlin: INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION EUROPE (ICCT). White Paper, 29 Seiten

-
- [11] BANE, B. R. (2002): A Comparison of Steady State and Transient Emissions from a Heavy-Duty Diesel Engine. A Thesis, submitted to THE College of Engineering and Mineral Resources at West Virginia University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering. Morgantown, WV, USA: WEST VIRGINIA UNIVERSITY, 173 Seiten
- [12] BASSHUYSEN, R. V.; SCHÄFER, F. (2015): Handbuch Verbrennungsmotor. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven. 7., vollst. überarb. u. erw. Aufl. Wiesbaden: Springer, 1232 Seiten, ISBN 978-3-658-04677-4
- [13] BERNHARDT, HEINZ (2002): Schüttguttransport in landwirtschaftlichen Betrieben Deutschlands. Göttingen: Cuvillier Verlag, 185 Seiten, ISBN 3736904290
- [14] BONNEL, P.; KUBELT, J.; PROVENZA, A. (2011): Heavy-Duty Engines Conformity Testing Based on PEMS. Lessons Learned from the European Pilot Program. Joint Research Centre Institute for Energy (Hrsg.). Luxembourg: EUROPÄISCHE UNION. JRC Scientific and Technical Reports, 59 Seiten
- [15] 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.). 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
- [16] BRANCHENPLATTFORM BIOKRAFTSTOFFE IN DER LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT (2016): Broschüre "10 Gründe für Biokraftstoffe in Land- und Forstwirtschaft". Bundesverband BioEnergie e. V. (BBE) (Hrsg.). URL: www.biokraftstoffe-tanken.de. 24.10.2019
- [17] BREU, W.; PICHLMAIER, B. (2017): Electrified Utility Tractor. In: Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI); Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik (MEG); European Society of Agricultural Engineering (EurAgEng) (Hrsg.): LAND.TECHNIK AgEng 2017. Hannover, 10.-11. November. VDI-Berichte, Nr. 2300. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 9–14, ISBN 978-3-18-092300-0
- [18] BURGUN, C.; LACOUR, S.; DELACROIX, A.; DESCOMBES, G., DOYEN, V. (2013): Computing time and fuel requirements to assess efficiency of a field work from conventional laboratory tests : application to a plowing operation. *Agricultural Food and Food Science*, Jg. 22, S. 247–261
- [19] CAO, T.; DURBIN, T. D.; COCKER, D. R.; WANKER, R.; SCHIMPL, T.; POINTNER, V.; OBERGUGGENBERGER, K.; JOHNSON, K. C. (2016): A Comprehensive Evaluation of a Gaseous Portable Emissions Measurement System with a Mobile Reference Laboratory. *Emission Control Science and Technology*, Jg. 2, Nr. 3, S. 173–180
- [20] COMMITTEE FOR EUROPEAN CONSTRUCTION EQUIPMENT (CECE); EUROPEAN AGRICULTURAL MACHINERY (CEMA) (2011): CECE and CEMA. Optimising our industry 2 reduce emissions. Brussels, 31 Seiten
- [21] ČUPERA, J.; SEDLÁK, P. (2011): Design and verification of engine power calculation model using the data of a digital bus built into an agricultural tractor. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendeliane Brunensis*, Jg. 59, Nr. 6, S. 111–120
- [22] ČUPERA, J.; SEDLÁK, P. (2011): The use of CAN-Bus messages of an agricultural tractor for monitoring its operation. *Research in agricultural engineering*, Jg. 57, Nr. 4, S. 117–127
- [23] ČUPERA, J.; SEDLÁK, P.; BAUER, F.; FAJMAN, M. (2013): Tractor Pulling Tests Supported by Ecu Data Reading. *Journal of Middle European Construction and Design of Cars (MECCA)*, Jg. 11, Nr. 1, S. 28–33
- [24] ČUPERA, J.; ŠMERDA, T. (2010): The usage of CAN-Bus messages for engine power determination. *Research in agricultural engineering*, Jg. 56, Nr. 4, S. 138–146

- [25] DALLMANN, T.; MENON, A. (2016): Technology pathways for diesel engines used in non-road vehicles and equipment. September 2016. Beijing, Berlin, Brussels, San Francisco, Washington, D. C.: THE INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION (ICCT). White Paper, 44 Seiten
- [26] DEGRAEUWE, B.; WEISS, M. (2017): Does the New European Driving Cycle (NEDC) really fail to capture the NOX emissions of diesel cars in Europe? *Environmental Pollution*, Jg. 222, S. 234–241
- [27] DEGRELL, O.; FEUERSTEIN, T. (2005): 'DLG-PowerMix. Ein praxisorientierter Traktoren-test "Testzyklen". IN: Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI); Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik (MEG) (Hrsg.): LAND. TECHNIK AgEng 2005. VDI-Berichte, Nr. 1895. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 65–76, ISBN 3-18-091895-0
- [28] DEUTSCHE DEMOKRATISCHE REPUBLIK (DDR) (1974): Zeitgliederung in der Landwirtschaft -Fachbereichstandard TGL 222289. Berlin (Ost): AMT FÜR STANDARDISIERUNG, 6 Seiten
- [29] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2016): DIN 51605: Kraftstoffe für pflanzenölaugliche Motoren – Rapsölkraftstoff – Anforderungen und Prüfverfahren, Ersatz für DIN 51605:2010-09, Januar 2016. Berlin: BEUTH, 15 Seiten
- [30] DÖNGES, P.; TRAULSEN, H. (2006): Felderprobung Rapsöl pur. Rendsburg: DEULA Schleswig-Holstein GmbH, 51 Seiten
- [31] DÜSSELDORF, C. (2015): Experimentelle Untersuchungen zur inner- und außermotorischen Partikelreduktion an einen Nutzfahrzeugdieselmotor zur Erfüllung der Abgasstufe IV im Betrieb mit biogenen Kraftstoffen. VKM-Schriftenreihe, Nr. 15. Kaiserslautern: UNIVERSITÄT KAISERSLAUTERN, Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen
- [32] EICHHORN, H.; HEYLAND, K. U. (1999): Landtechnik. 7., völlig neu bearb. Aufl. Landwirtschaftliches Lehrbuch. Stuttgart: Ulmer, 688 Seiten, ISBN 3800110865
- [33] EMBERGER, P. (2013): Zünd-, Verbrennungs- und Emissionsverhalten verschiedener Pflanzenöle. Dissertation. Halle-Wittenberg: MARTIN-LUTHER-UNIVERSITÄT HALLE-WITTENBERG, Zentrum für Ingenieurwissenschaften, 158 Seiten, ISBN 978-3-84391105-4
- [34] EMBERGER, P.; HEBECKER, D.; PICKEL, P.; REMMELE, E.; THUNEKE, K. (2015): Ignition and combustion behaviour of vegetable oils after injection in a constant volume combustion chamber. *Biomass and Bioenergy*, Jg. 78, S. 48–61
- [35] EMBERGER, P.; LANDIS, M.; KRAMMER, K.; PRANKL, H.; SCHAUFLER, H.; SCHIESS, I.; THUNEKE, K. (2011): Measurement of emissions of a tractor — round robin test of ART, FJ-BLT and TFZ. *Landtechnik*, Jg. 66, Nr. 1, S. 56–59
- [36] EMBERGER, P.; MAUTNER, S.; HINRICHS, M.; THUNEKE, K.; REMMELE, E. (2019): Rapsölkraftstoff als Energieträger für den Betrieb eines forstwirtschaftlichen Vollernters (Harvester). *Berichte aus dem TFZ*, Nr. 63. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 81 Seiten
- [37] EMBERGER, P.; THUNEKE, K.; REMMELE, E. (2013): Langzeiterfahrungen zum Einsatz von Rapsölkraftstoff in Traktoren der Abgasstufe I und II. Straubing: TECHNOLOGIE- UND FÖRDERZENTRUM IM KOMPETENZZENTRUM FÜR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (TFZ). *Berichte aus dem TFZ*, Nr. 31, 56 Seiten, ISBN 1614-1008
- [38] EMBERGER, P.; THUNEKE, K.; REMMELE, E. (2013): Pflanzenölaugliche Traktoren der Abgasstufe IIIA. Straubing: TECHNOLOGIE- UND FÖRDERZENTRUM IM KOMPETENZZENTRUM FÜR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (TFZ). *Berichte aus dem TFZ*, Nr. 32, 125 Seiten, ISBN 1614-1008
- [39] ENGELJEHRINGER, K. (2016): AVL Emission Testing Handbook - 2016. AVL Emission Test Systems. Graz: AVL LIST GmbH, 78 Seiten

- [40] ENGELMANN, C.; DRESSLER, D.; HAAS, R.; REMMELE, E.; THUNEKE, K. (2016): Klimaschutz durch Rapsölkraftstoff. TFZ-Kompakt, Nr. 13. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 16 Seiten
- [41] ENGELMANN, D.; BECKER, S.; STIRNIMANN, R. (2019): Transferring agricultural machines from field to the laboratory for emission check. IN: Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI); Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik (MEG) (Hrsg.): LAND.TECHNIK AgEng 2019. VDI-Berichte, Nr. 2361. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 479–487
- [42] ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA) (2010): Section 86.007-11 - Emission standards and supplemental requirements for 2007 and later model year diesel heavy-duty engines and vehicles. Code of Federal Regulations (CFR), Title 40 - Protection of Environment, Chapter I - Environmental Protection Agency, Subchapter C - Air Programs, Part 86. Date: July 1, 2010. United States of America (USA), National Archives and Record Administration (NARA) (Hrsg.). Washington, D. C., Buffalo, New York, 4 Seiten
- [43] ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA) (2011): Part 1065 - Engine-Testing Procedures. Code of Federal Regulations (CFR), Title 40 - Protection of Environment, Chapter I - Environmental Protection Agency, Subchapter U - Air Pollution Controls. Date: July 1, 2011. United States of America (USA), National Archives and Record Administration (NARA) (Hrsg.). Washington, D. C., Buffalo, New York, 85 Seiten
- [44] Ettl, J.; BERNHARDT, H.; PICKEL, P.; REMMELE, E.; THUNEKE, K.; EMBERGER, P. (2018): Transfer of agricultural work operation profiles to a tractor test stand for exhaust emission evaluation. Biosystems Engineering, Jg. 176, S. 185–197
- [45] Ettl, J.; BERNHARDT, H.; THUNEKE, K.; EMBERGER, P.; REMMELE, E. (2015): Exhaust emissions and fuel consumption under real driving conditions on a tractor test stand - Results with dynamic test cycles based on real tractor works for exhaust emissions and fuel consumption testing. IN: Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI); Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik (MEG) (Hrsg.): LAND.TECHNIK AgEng 2015. Hannover, 6. und 7. November. VDI-Berichte, Nr. 2251. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 29–38, ISBN 978-3-18-092251-5
- [46] Ettl, J.; BERNHARDT, H.; THUNEKE, K.; EMBERGER, P.; REMMELE, E. (2016): Transient emission and fuel consumption measurements on plant oil tractors. Landtechnik, Jg. 71, Nr. 2, S. 44–54
- [47] Ettl, J.; EMBERGER, P.; THUNEKE, K.; REMMELE, E. (2016): Pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufen I bis IIIB. Berichte aus dem TFZ, Nr. 47. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 179 Seiten
- [48] Ettl, J.; HUBER, G.; BERNHARDT, H.; THUNEKE, K. (2016): Real Emissions of a Plant Oil Compatible Tractor. Measured by PEMS and on the Tractor Test Stand. ATZ off-highway, Jg. 9, Nr. 11, S. 46–51
- [49] Ettl, J.; THUNEKE, K.; EMBERGER, P.; REMMELE, E. (2019): Langzeitmonitoring pflanzenöлтаuglicher Traktoren der Abgasstufen I bis IV. Berichte aus dem TFZ, Nr. 60. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 210 Seiten
- [50] Ettl, J.; THUNEKE, K.; REMMELE, E.; EMBERGER, P.; HUBER, G.; BERNHARDT, H. (2017): Real driving emissions of tractors during field work and on the test stand. IN: Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI); Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik (MEG); European Society of Agricultural Engineering (EurAgEng) (Hrsg.): LAND.TECHNIK AgEng 2017. Hannover, 10.-11. November. VDI-Berichte, Nr. 2300. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 391–398, ISBN 978-3-18-092300-0

- [51] 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, in der Fassung vom 25.6.2011. In: Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 54, Nr. L 167, vom 25.6.2011, S. 1–168
- [52] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2012): Verordnung (EU) Nr. 64/2012 der Kommission vom 23. Januar 2012 zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 582/2011 zur Durchführung und Änderung der Verordnung (EG) Nr. 595/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen (Euro VI), in der Fassung vom 31.1.2012. In: Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 55, Nr. L 28, vom 31.1.2012, S. 1–23
- [53] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2016): Verordnung (EU) 2016/427 vom 10. März 2016 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 6). In: Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 59, Nr. L 82 vom 31.3.2016, S. 1–98
- [54] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2017): Delegierte Verordnung (EU) 2017/654 der Kommission vom 19. Dezember 2016 zur Ergänzung der Verordnung (EU) 2016/1628 des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich technische und allgemeiner Anforderungen in Bezug auf die Emissionsgrenzwerte und die Typgenehmigung von Verbrennungsmotoren für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte. In: Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 60, Nr. L 102 vom 13.4.2017, S. 1–333
- [55] 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 Schadstoffe vor in Betrieb befindlichen Verbrennungsmotoren in nicht für den Straßenverkehr bestimmten mobilen Maschinen und Geräten. In: Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 60, Nr. L 102 vom 13.4.2017, S. 334–363
- [56] EUROPÄISCHE UNION (2009): Richtlinie 97/68/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 1997 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmaschinen für mobile Maschinen und Geräte (ABl. L 59 vom 27. 2. 1997, S. 1), in der Fassung vom 07.08.2009. In: Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, Nr. L 68, S. 1–249
- [57] 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. In: Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 59, Nr. L 252, S. 53–117
- [58] FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V. (FNR) (2018): Basisdaten Bioenergie Deutschland September 2018. Festbrennstoffe Biokraftstoffe Biogas. Nachwachsende-Rohstoffe.de. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 51 Seiten
- [59] FAHRMEIR, LUDWIG; HEUMANN, CHRISTIAN; KÜNSTLER, RITA; PIGEOT, IRIS; TUTZ, GERHARD (2016): Statistik. Der Weg zur Datenanalyse. Springer-Lehrbuch. Berlin: Springer Berlin, 1 Band, ISBN 3662503727

- [60] FECHNER, W.; UEBE, N. (2018): Zeitgliederung als Basis für die Optimierung des Maschineneinsatzes. 21. Arbeitswissenschaftliches Kolloquium, ISBN 978-3-902451-16-3
- [61] GAUS, C.-C.; MINßEN, T.-F.; URSO, L.-M.; WITTE, T. D.; WEGENER, J. (2017): Mit autonomen Landmaschinen zu neuen Pflanzenbausystemen - Schlussbericht. Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei (Hrsg.). Braunschweig: JOHANN-HEINRICH-VON-THÜNEN-INSTITUT; INSTITUT FÜR BETRIEBSWIRTSCHAFT; TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG, INSTITUT FÜR MOBILE MASCHINEN UND NUTZFAHRZEUGE; JULIUS-KÜHN-INSTITUT, BUNDESFORSCHUNGSINSTITUT FÜR KULTURPFLANZEN, INSTITUT FÜR ANWENDUNGSTECHNIK IM PFLANZENSCHUTZ, 136 Seiten
- [62] GEIMER, M.; POHLANDT, C. (2014): Grundlagen mobiler Arbeitsmaschinen. Karlsruher Institut für Technologie (KIT) (Hrsg.). Karlsruhe: KIT SCIENTIFIC PUBLISHING. Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik, Nr. 22, 142 Seiten, ISBN 1869-6058
- [63] GIECHASKIEL, B.; CLAIROTTE, M.; VALVERDE, V.; BONNEL, P. (2018): Real driving emissions: 2017 assessment of Portable Emissions Measurement Systems (PEMS) measurement uncertainty. Luxembourg: EUROPEAN COMMISSION, JOINT RESEARCH CENTRE. JRC Technical Reports, Nr. JRC109481 - EUR 29138 EN, 44 Seiten, ISBN 1831-9424
- [64] GIETZELT, C.; DEGRELL, O.; MATHIES, K. (2012): In-use emission measurements on combustion engines used in mobile machinery. *Landtechnik*, Jg. 67, Nr. 5, S. 366–369
- [65] 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. 7. Internationales Forum. Ludwigsburg, 6. - 7. März. Mainz-Kastel: AVL Deutschland GmbH, S. 70–80, ISBN 978-3-00-032668-4
- [66] HAHN, K. (2011): Einsatzmöglichkeiten elektrischer Antriebe für landwirtschaftliche Maschinenkombinationen. Dissertation. Hohenheim: UNIVERSITÄT HOHENHEIM, Fakultät Agrarwissenschaften, Grundlagen der Agrartechnik, Institut für Agrartechnik, 160 Seiten
- [67] HANKE S.; TRÖSKEN L.; FRERICHS L. (2018): Entwicklung und Parametrierung eines objektorientierten Modells zur Abbildung von landwirtschaftlichen Verfahrensschritten. *Landtechnik*, Nr. 73, S. 22–36
- [68] HANSSON, P.-A.; LINDGREN, M.; NORÉN, O. (2001): A Comparison between Different Methods of calculating Average Engine Emissions for Agricultural Tractors. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Jg. 80, Nr. 1, S. 37–43
- [69] HANSSON, P.-A.; MATTSSON, B. (1999): Influence of Derived Operation-Specific Tractor Emission Data on Results from an LCI on Wheat Production. *International Journal of Life Cycle Assessment*, Jg. 4, Nr. 4, S. 202–206
- [70] HASSEL, E.; WICHMANN, V.; SCHÜMANN, U.; BERNDT, S.; HARKNER, W.; FLÜGGE, E.; SY, G. (2006): Practice Operation of Serial Rape Seed Oil Suitable Engines - Results of the demonstration project. *Landtechnik*, Jg. 61, Nr. 1, S. 14–15
- [71] HEIZINGER, V. J. (2014): Algorithmische Analyse von Prozessketten in der Agrarlogistik. Dissertation. Weihenstephan: TECHNISCHE UNIVERSITÄT, Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, 182 Seiten
- [72] 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. Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.). Dessau-Roßlau. 24/2014, 98 Seiten

- [73] HELMS, H.; KÄMPER, C.; BIEMANN, K.; LAMBRECHT, U.; JÖHRENS, J.; MEYER, K. (2019): Klimabilanz von Elektroautos. Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial. Stand: April 2019. Agora Verkehrswende (Hrsg.). Heidelberg, Berlin: IFEU – INSTITUT FÜR ENERGIE- UND UMWELTFORSCHUNG HEIDELBERG GMBH, 68 Seiten
- [74] HELMS, H.; LAMBRECHT, U.; KNÖRR, W. (2009): Aktualisierung des Modells TREMOD - Mobile Machinery (TREMOM-MM). Endbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes. Heidelberg: INSTITUT FÜR ENERGIE- UND UMWELTFORSCHUNG HEIDELBERG GMBH (IFEU), 42 Seiten
- [75] HÖCK, R.; WIDMANN, B. (1994): Betriebserfahrungen mit pflanzenölbetriebenen Dieselmotoren (Natur- und Biodiesel). IN: Verein Deutscher Ingenieure (VDI), VDI-Gesellschaft Energietechnik (Hrsg.): Pflanzenöle als Kraftstoffe für Fahrzeugmotoren und Blockheizkraftwerke; Tagung, 4. und 5. Juli 1994, Würzburg. VDI-Berichte, Nr. 1126. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 231–238, ISBN 9783180911267
- [76] HOFMANN, U.; REINHARDT, P.; EVTIMOVA, M. (2006): Untersuchungen zum Einsatz eines Partikelfiltersystems beim Betrieb eines Dieselmotors mit Rapsmethylester und Rapsöl. Chemie Ingenieur Technik, Jg. 78, Nr. 6, S. 709–714
- [77] HUBER, G.; SCHOLZ, A.; STÖHR, M.; DÜSSELDORF, C.; FLIERL, R.; THUNEKE, K.; REMMELE, E.; PICKEL, P. (2015): Herstellung und Demonstration der Praxistauglichkeit von Traktoren mit Motoren der Abgasstufe IV im Betrieb mit Pflanzenöl. Berichte aus dem TFZ, Nr. 44. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 86 Seiten
- [78] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) (2007): ISO 11783-1: Tractors and machinery for agriculture and forestry - Serial control and communications data network. Part 1: General standard for mobile data communication. Geneva, Switzerland, 96 Seiten
- [79] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) (2017): ISO 8178-1: Reciprocating internal combustion engines - Exhaust emission measurement - Part 1: Test-bed measurement systems of gaseous and particulate emissions; Third edition 2017-04. Geneva, Switzerland, 151 Seiten
- [80] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) (2017): ISO 8178-4: Reciprocating internal combustion engines - Exhaust emission measurement - Part 4: Steady-state and transient test cycles for different engine applications. Geneva, Switzerland, 238 Seiten
- [81] JAHNS, G.; STEINKAMPF, H. (1982): Einflussgrößen auf Flächenleistung und Energieaufwand beim Schleppereinsatz. Grundlagen der Landtechnik, Jg. 32, Nr. 1, S. 20–27
- [82] JANULEVIČIUS, A.; ČIPLIENĖ, A. (2018): Estimation of engine CO₂ and NO_x emissions and their correlation with the not-to-exceed zone for a tractor ploughing fields of various sizes. Journal of Cleaner Production, Jg. 198, Nr. 10 (October), S. 1583–1592
- [83] JANULEVIČIUS, A.; JUOSTAS, A.; ČIPLIENĖ, A. (2016): Estimation of carbon-oxide emissions of tractors during operation and correlation with the not-to-exceed zone. Biosystems Engineering, Jg. 147, S. 117–129
- [84] JANULEVIČIUS, A.; JUOSTAS, A.; PUPINIS, G. (2013): Engine performance during tractor operational period. Energy Conversion and Management, Jg. 68, S. 11–19
- [85] JANULEVIČIUS, A.; JUOSTAS, A.; PUPINIS, G. (2013): Tractor's engine performance and emission characteristics in the process of ploughing. Energy Conversion and Management, Jg. 75, S. 498–508
- [86] JOHNSON, K. C.; DURBIN, T. D.; COCKER, D. R.; MILLER, W. J.; BISHNU, D. K.; MALDONADO, H.; MOYNAHAN, N.; ENSFIELD, C.; LAROO, C. A. (2009): On-road comparison of a

- portable emission measurement system with a mobile reference laboratory for a heavy-duty diesel vehicle. *Atmospheric Environment*, Jg. 43, Nr. 18, S. 2877–2883
- [87] JUOSTAS, A.; JANULEVIČIUS, A. (2014): Tractor's engine efficiency and exhaust emissions' research in drilling work. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, Jg. 22, Nr. 2, S. 141–150
- [88] KADIJK, G.; SMOKERS, R.; LIGTERINK, N. (2016): Review into the relation between ambient temperature and NOx emissions of a Euro 6 Mercedes C220 Bluetec with a diesel engine. Project name: LD In-use Compliance project, Project number: 2012-2016 060.14432. Dutch Ministry of Infrastructure and the Environment (Hrsg.). Apeldoorn. TNO report - innovation for life, Nr. 2016 R11123 - 2016-TL-RAP-0100299329, 17 Seiten
- [89] KEGEL, V. (2017): Batterieelektrischer Traktor. Dissertation: SHAKER VERLAG GMBH
- [90] KLIMCZAK, M. (2010): Entwicklung und Anwendung einer Technologie zur Untersuchung der chemischen Desaktivierung von SCR-Katalysatoren durch anorganische Gifte. Dissertation. Darmstadt: TECHNISCHE UNIVERSITÄT, Fachbereich Chemie, 182 Seiten
- [91] KNÜSEL, S. (2012): Elektrischer Fährantrieb Rigitrac. IN: BLT Wieselburg Lehr- und Forschungszentrum Francisco Josephinum; Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART (Hrsg.): 20 Jahre Landtechnik im Alpenraum. 11. Tagung Landtechnik im Alpenraum. Kongresszentrum Montforthaus, Feldkirch, 9./10. Mai. Wieselburg: BLT Wieselburg Lehr- und Forschungszentrum Francisco Josephinum, S. 1–11
- [92] KODER, A.; ALTMANN, R.; RABL, H.-P.; MAYER, W. (2014): Injection rate characteristics of a Piezo-Common-Rail-Injector fueled with straight rapeseed oil and its mixtures with orange peel oil. IN: RWTH Aachen University, Institute for Combustion Engine, Fuel Design Center (Hrsg.): Book of Abstracts. Cluster of Excellence "Tailor-Made Fuels from Biomass". 2. International Conference. Eurogress, Aachen, Germany, 16th - 18th. Aachen: RWTH Aachen University, S. 26–27
- [93] KORTENBRUCK, D.; GRIEPENTROG, H. W.; HOLZHAUER, A. (2014): Ermittlung von Einsatzprofilen durch automatisierte Arbeitszeitanalyse an Landmaschinen. IN: Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI); Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik (MEG) (Hrsg.): LAND.TECHNIK AgEng 2014. Berlin, 19. und 20. November. VDI-Berichte, Nr. 2226. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 227–235, ISBN 978-3-18-09222-3
- [94] KWON, S.; PARK, Y.; PARK, J.; KIM, J.; CHOI, K.-H.; CHA, J.-S. (2017): Characteristics of on-road NOx emissions from Euro 6 light-duty diesel vehicles using a portable emissions measurement system. *The Science of the Total Environment*, Jg. 576, S. 70–77
- [95] LANDIS, M. (2012): Dynamischer Messzyklus für Emissionsmessungen an Traktoren. IN: Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI); Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik (MEG) (Hrsg.): LAND.TECHNIK AgEng 2012. Karlsruhe, 6. und 7. November. VDI-Berichte, Nr. 2173. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 81–86, ISBN 978-3-18-092173-0, ISSN 0083-5560
- [96] LANDIS, M. (2014): Results of long-time tractor emission and fuel measurements. IN: Agroscope; Eidgenössische Technische Hochschule Zürich; European Society of Agricultural Engineers (EurAgEng) (Hrsg.): Engineering for improving resource efficiency. Proceedings. AgEng 2014 Zurich - International Conference of Agricultural Engineering. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 6-10 July. Zurich: Agroscope; Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH), S. 1–8
- [97] LANDIS, M.; SCHIESS, I. (2006): Geprüfte Traktoren, Zweiachsmäher und Transporter. Leistungsdiagramm und Leistungsangaben. FAT-Berichte, Nr. 653. Ettenhausen: Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, 12 Seiten

- [98] LEE, D.-H.; CHOI, C.-H.; CHUNG, S.-O.; KIM, Y.-J.; INOUE, E.; OKAYASU, T. (2016): Evaluation of Tractor Fuel Efficiency using Dynamometer and Baler Operation Cycle. *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University*, Jg. 61, Nr. 1, S. 173–182
- [99] LI, Y. X.; MCLAUGHLIN, N. B.; PATTERSON, B. S.; BURTT, S. D. (2006): Fuel efficiency and exhaust emissions for biodiesel blends in an agricultural tractor. *Canadian Biosystems Engineering*, Jg. 48, Nr. 2, S. 15–22
- [100] LIJEWSKI, P.; MERKISZ, J.; FUC, P. (2013): Research of Exhaust Emissions from a Harvester Diesel Engine with the Use of Portable Emission Measurement System. *Croatian Journal of Forest Engineering*, Jg. 34, Nr. 1, S. 113–122
- [101] LIJEWSKI, P.; MERKISZ, J.; FUC, P. (2013): The analysis of the operating conditions of farm machinery engines in regard to exhaust emissions legislation. *Applied Engineering in Agriculture*, Jg. 29, Nr. 4, S. 445–452
- [102] LIJEWSKI, P.; MERKISZ, J.; J.; FUC, P. (2012): SAE Technical Paper 2012-01-1965 The Analysis of the Emission of Particulate Matter from Non-Road Vehicles Under Actual Operating Conditions. Warrendale, PA, USA: SAE INTERNATIONAL, 6 Seiten
- [103] LINDGREN, M. (2004): Engine exhaust gas emissions from non-road mobile machinery. Effects of transient load conditions. Doctoral thesis. Doctoral Thesis. Uppsala: SWEDISH UNIVERSITY OF AGRICULTURAL SCIENCES, DEPARTMENT OF BIOMETRY AND ENGINEERING, 60 Seiten, ISBN Acta Universitatis agriculturae Sueciae. Agraria
- [104] LINDGREN, M. (2007): A methodology for estimating annual fuel consumption and emissions from non-road mobile machinery. Annual emissions from the non-road mobile machinery sector in Sweden for year 2006. Sveriges lantbruksuniversitet - Swedish University of Agricultural Sciences (SLU) (Hrsg.). Uppsala: DEPARTMENT OF BIOMETRY AND ENGINEERING. Rapport - miljö, teknik och lantbruk, Nr. 2007:01, 43 Seiten, ISBN 1652-3237
- [105] LINDGREN, M.; HANSSON, P.-A. (2004): Effects of Transient Conditions on Exhaust Emissions from two Non-road Diesel Engines. *Biosystems Engineering*, Jg. 87, Nr. 1, S. 57–66
- [106] LOVARELLI, D.; FIALA, M.; LARSSON, G. (2018): Fuel consumption and exhaust emissions during on-field tractor activity. A possible improving strategy for the environmental load of agricultural mechanisation. *Computers and Electronics in Agriculture*, Jg. 151, S. 238–248
- [107] MARX, S. E. (2015): Controller Area Network (CAN) Bus J1939 Data Acquisition Methods and Parameter Accuracy Assessment Using Nebraska Tractor Test Laboratory Data. A Thesis Presented to the Faculty of The Graduate College at the University of Nebraska In Partial Fulfillment of Requirements For the Degree of Master of Science Major: Agricultural and Biological Systems Engineering. Dissertation. Lincoln, Nebraska, USA: UNIVERSITY OF NEBRASKA, 78 Seiten
- [108] MAUTNER, S.; EMBERGER, P.; THUNEKE, K.; REMMELE, E. (2017): Emissions- und Betriebsverhalten eines Biomethantraktors mit Zündstrahlmotor. *Berichte aus dem TFZ*, Nr. 51. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 122 Seiten
- [109] MERKER, G. P.; TEICHMANN, R. (2014): Grundlagen Verbrennungsmotoren. Funktionsweise, Simulation, Messtechnik. 7., vollst. überarb. Aufl. ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 1132 Seiten, ISBN 978-3-658-03194-7
- [110] MERKICZ, J.; LIJEWSKI, P.; FUC, P.; SIEDLECKI, M.; WEYMANN, S. (2015): The use of the PEMS equipment for the assessment of farm fieldwork energy consumption. *Applied Engineering in Agriculture*, Jg. 31, Nr. 6, S. 875–879

- [111] MERKISZ, J.; LIJEWSKI, P.; FUC, P.; SIEDLECKI, M.; ZIOLKOWSKI, A. (2016): Development of the methodology of exhaust emissions measurement under RDE (Real Driving Emissions) conditions for non-road mobile machinery (NRMM) vehicles. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Jg. 148, S. 1–11
- [112] 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
- [113] MERKISZ, J.; PIELECHA, J.; JASIŃSKI, R. (2016): The impact of operating parameters of tractor's engine on exhaust emissions. Journal of KONES. Powertrain and Transport, Jg. 23, Nr. 4, S. 339–350
- [114] MINERALÖLWIRTSCHAFTSVERBAND E. V. (2011): Jahresbericht Mineralöl-Zahlen 2010. Stand: Mai 2011. Mineralölwirtschaftsverband e. V. (Hrsg.). Berlin, 80 Seiten
- [115] MOLLENHAUER, K.; TSCHÖKE, H. (2007): Handbuch Dieselmotoren. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 702 Seiten, ISBN 978-3-540-72164-2
- [116] MUELLER, C. J.; BOEHMAN, A. L.; MARTIN, G. C. (2009): SAE Technical Paper 2009-01-1792 An Experimental Investigation of the Origin of Increased NO_x Emissions when Fueling a Heavy-Duty Compression-Ignition Engine with Soy Biodiesel. SAE International (Hrsg.). Warrendale, PA, USA, s. p
- [117] MÜLLEROVÁ, D.; LANDIS, M.; SCHIESS, I.; JABLONICKÝ, J.; PRÍSTAVKA, M. (2011): Operating parameters and emission evaluation of tractors running on diesel oil and biofuel. Research in Agricultural Engineering, Jg. 57, S. 35–42
- [118] MÜLLEROVÁ, D.; LANDIS, M.; SCHIESS, I.; JABLONICKÝ, J.; PRÍSTAVKA, M. (2011): Operating parameters and emission evaluation of tractors running on diesel oil and biofuel. Research in Agricultural Engineering, Jg. 57, S. 35–42
- [119] NAUMANN, K.; SCHRÖDER, J.; MÜLLER-LANGER, F.; OEHMICHEN, K.; REMMELE, E.; THUNEKE, K.; ETZOLD, H.; RAHSHA, T.; SCHMIDT, P. (2019): Monitoring Biokraftstoffsektor. Stand: 29. Juli 2019. 4., überarb. u. erw. Aufl. Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ) (Hrsg.). Leipzig. DBFZ-Report, Nr. 11, 173 Seiten, ISBN 2197-4632
- [120] ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD) (2010): OECD Standard Codes - General Texts, Code 2 - for the official testing of agricultural and forestry tractors. February 2010. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), 110 Seiten
- [121] ORIGINLAB CORPORATION (2019): Origin Help, Hypothesis Testing. One-Sample T-Test. URL: <https://www.originlab.com/doc/Origin-Help/tTest-OneSample>. 28.05.2019
- [122] PAULWEBER, MICHAEL; LEBERT, KLAUS (2014): Mess- und Prüfstandstechnik. Antriebsstrangentwicklung - Hybridisierung - Elektrifizierung. Aufl. 2014. Der Fahrzeugantrieb. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 300 Seiten in 1 Teil, ISBN 3658044527
- [123] PEROZZI, D.; MATTETTI, M.; MOLARI, G.; SERENI, E. (2016): Methodology to analyse farm tractor idling time. Biosystems Engineering, Jg. 148, S. 81–89
- [124] PICKEL, P. (2018): Elektrifizierung in der Landwirtschaft - wo und wofür? IN: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL) (Hrsg.): In Zukunft elektrisch - Energiesysteme im ländlichen Raum. KTBL-Tage. Bayreuth, 7.-8. März 2018. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL), S. 56–74
- [125] PICKEL, P.; DIERINGER, S. (2009): Demonstration of 2nd Generation Vegetable Oil Fuels in Advanced Engines. Workpackage WP2 Engine development Deliverable No

- 2.3. The 2ndVegOil Consortium (Hrsg.). Mannheim. URL: <http://www.2ndvegoil.eu/>. 06.11.2019
- [126] PIRJOLA, L.; PARVIAINEN, H.; HUSSEIN, T.; VALLI, A.; HÄMERI, K.; AAALTO, P.; VIRTANEN, A.; KESKINEN, J.; PAKKANEN, T. A.; MÄKELÄ, T.; HILLAMO, R. E. (2004): Sniffer -a novel tool for chasing vehicles and measuring traffic pollutants. *Atmospheric Environment*, Jg. 38, Nr. 22, S. 3625–3635
- [127] PIRJOLA, L.; RÖNKKÖ, T.; SAUKKO, E.; PARVIAINEN, H.; MALINEN, A.; ALANEN, J.; SAVELJEFF, H. (2017): Exhaust emissions of non-road mobile machine. Real-world and laboratory studies with diesel and HVO fuels. *Fuel*, Jg. 202, S. 154–164
- [128] PITLA, S. K.; LIN, N.; SHEARER, S. A.; LUCK, J. D. (2014): Use of Controller Area Network (CAN) Data To Determine Field Efficiencies of Agricultural Machinery. *Applied Engineering in Agriculture*, Jg. 30, Nr. 6, S. 829–838
- [129] PITLA, S. K.; LUCK, J. D.; WERNER, J.; LIN, N.; SHEARER, S. A. (2016): In-field fuel use and load states of agricultural field machinery. *Computers and Electronics in Agriculture*, Jg. 121, Nr. 2 (February), S. 290–300
- [130] PLANK, M. J. (2018): Die Zündwilligkeit als Charakteristik für die Verwendung von Pflanzenöl als Kraftstoff in Verbrennungsmotoren. Dissertation. München: TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN, Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen (LVK), 126 Seiten
- [131] PRANKL, H.; SCHAUFLE, H. (2006): Motortuning zur Leistungssteigerung an Traktoren, ISBN 978-3-902451-04-0
- [132] 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.): LAND. TECHNIK AgEng 2014. Berlin, 19. und 20. November. VDI-Berichte, Nr. 2226. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 465–474, ISBN 978-3-18-09222-3
- [133] RAKOPOULOS, C. D.; GIAKOUMIS, E. G. (2006): SAE Technical Paper 2006-01-0884 Review of Thermodynamic Diesel Engine Simulations under Transient Operating Conditions. Warrendale, PA, USA: SAE INTERNATIONAL, 38 Seiten
- [134] RAKOPOULOS, CONSTANTINE D.; GIAKOUMIS, EVANGELOS G. (2009): Diesel engine transient operation. Principles of operation and simulation analysis. London: Springer, 390 Seiten, ISBN 9781848823754
- [135] RAKOPOULOS, D. C.; RAKOPOULOS, C. D.; GIAKOUMIS, E. G. (2015): Impact of properties of vegetable oil, bio-diesel, ethanol and n -butanol on the combustion and emissions of turbocharged HDDI diesel engine operating under steady and transient conditions. *Fuel*, Jg. 156, S. 1–19
- [136] RAKOPOULOS, D. C.; RAKOPOULOS, C. D.; GIAKOUMIS, E. G.; PAPAGIANNAKIS, R. G.; KYRITSIS, D. C. (2014): Influence of properties of various common bio-fuels on the combustion and emission characteristics of high-speed DI (direct injection) diesel engine: Vegetable oil, bio-diesel, ethanol, n-butanol, diethyl ether. *Energy*, Jg. 73, Nr. 8, S. 354–366
- [137] RAT DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN (1988): Richtlinie des Rates vom 3. Dezember 1987 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Emission gasförmiger Schadstoffe aus Dieselmotoren zum Antrieb von Fahrzeugen (88/77/EWG), in der Fassung vom 9.2.1988. In: Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, Nr. L 36, vom 9.2. 1988, S. 33–61
- [138] RATHBAUER, J.; KRAMMER, K.; KRIECHBAUM, T.; PRANKL, H.; BREINESBERGER, J. (2008): Rapsöl als Treibstoffalternative in der Landwirtschaft. BMLFUW-LE. 1.3.2/0037-II/1/2006, Forschungsprojekt 1337, Oktober 2003 bis September 2006,

- Projektverlängerung bis September 2008. Anhang Band I. Endbericht. Wieselburg, St. Pölten: HBLFA Francisco Josephinum, BLT Biomass, Logistics, Technology; AGRAR PLUS GesmbH, 499 Seiten
- [139] REIF, K. (2012): Dieselmotor-Management. Systeme, Komponenten, Steuerung und Regelung. 5. Aufl. Bosch Fachinformation Automobil. Wiesbaden: Vieweg & Teubner, 501 Seiten, ISBN 978-3-8348-1715-0
- [140] REMMELE, E. (2002): Standardisierung von Rapsöl als Kraftstoff - Untersuchungen zu Kenngrößen, Prüfverfahren und Grenzwerten. Dissertation. München: TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN, LEHRSTUHL FÜR LANDTECHNIK, DEPARTMENT FÜR BIOGENE ROHSTOFFE UND TECHNOLOGIE DER LANDNUTZUNG, 194 Seiten
- [141] REMMELE, E.; ECKEL, H.; WIDMANN, B. (2014): Regenerative Energieträger und alternative Antriebskonzepte für mobile Arbeitsmaschinen. Landtechnik, Jg. 69, Nr. 5, S. 256–259
- [142] RENIUS, K. T. (1987): Traktoren. Technik u. ihre Anwendung. 2. Auflage. Wissen für die Praxis. München, Frankfurt (Main): BLV-Verl.-Ges., 191 S., ISBN 9783405131463
- [143] RENIUS, K. T. (2020): Fundamentals of Tractor Design. 1st ed. 2020. Cham, Cham: Springer International Publishing; Springer, 1 Online-Ressource (XV, 287, ISBN 303032804X
- [144] RIEDL, H. (2015): Handbuch praktische Traktorentchnik. Grundlagen, Fehlersuche, Selbsthilfe ; 56 Tabellen. 6., vollst. neu bearb. und erw. Aufl. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer, 392 Seiten, ISBN 9783800158881
- [145] RINALDI, M.; ERZINGER, S.; STARK, R. (2005): Treibstoffverbrauch und Emissionen von Traktoren bei landwirtschaftlichen Arbeiten. Ausführliche Darstellung der Methoden, Messungen und Ergebnisse. FAT-Schriftenreihe, Nr. 65. Ettenhausen: Agroscope FAT Tänikon, 92 Seiten, ISBN 3-9523054-6-4
- [146] RINALDI, M.; NÄF, E. (1992): Motorauslastung von Landwirtschaftstraktoren. Strassenfahrzeugtest für Traktoren ungeeignet. FAT-Berichte, Nr. 426, S. 1–5
- [147] RINALDI, M.; STADLER, E. (2002): Trends im Abgasverhalten landwirtschaftlicher Traktoren. Neue Modelle deutlich sauberer. FAT-Berichte, Nr. 577. Tänikon: Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), 8 Seiten
- [148] ROHRER, R. A.; LUCK, J. D.; PITLA, S. K.; HOY, R. (2018): Evaluation of the Accuracy of Machine Reported CAN Data for Engine Torque and Speed. Transactions of the ASABE, Jg. 61, Nr. 5, S. 1547–1557
- [149] RÜCKERT, B.; JEKEL, P.; OTT, M.; SCHLEICH, C.; TSCHINKEL, E. (2015): Advanced test stand for complete vehicle analysis to 'bring the road and the field into the laboratory'. IN: Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI); Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik (MEG) (Hrsg.): LAND.TECHNIK AgEng 2015. Hannover, 6. und 7. November. VDI-Berichte, Nr. 2251. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 13–20, ISBN 978-3-18-092251-5
- [150] SADLOWSKI, T.; WICHMANN, V.; BUCHHOLZ, B.; WINKLER, M. (2018): Betriebsverhalten eines Traktormotors der Abgasstufe EU IV im Biodieselbetrieb. ATZ offhighway, Jg. 11, Nr. 3, S. 52–57
- [151] SAE INTERNATIONAL : SAE J 1939 Serial, Control and Communications Heavy Duty Vehicle Network - Top Level Document, J1939_201808
- [152] SCHÄFFELER, U.; KELLER, M. (2008): Treibstoffverbrauch und Schadstoffemissionen des Offroad-Sektors. Studie für die Jahre 1980-2020. Bundesamt für Umwelt (BAFU) (Hrsg.). Bern: EIDGENÖSSISCHES DEPARTEMENT FÜR UMWELT, VERKEHR, ENERGIE UND KOMMUNIKATION (UVEK). Umwelt Wissen - Luft, Nr. 28/08, 172 Seiten

- [153] SCHREIBER, M. (2006): Kraftstoffverbrauch beim Einsatz von Ackerschleppern im besonderen Hinblick auf CO₂-Emissionen. Hohenheim: UNIVERSITÄT HOHENHEIM, Institut für Agrartechnik, 182 Seiten
- [154] SCHROEDER, A.; HINRICHS, M.; ISERMANN, R.; PICKEL, P. (2019): Modellbasierte Kraftstofferkennung im Dieselmotor. In: Experten-Forum Powertrain: Simulation und Test 2019: Springer Fachmedien Wiesbaden
- [155] SCHULZ, H. (1987): Zum Stand der Zapfwellentechnik. Agrartechnik, Jg. 37, Nr. 7, S. 311–314
- [156] SCHUTTE, B.; HERRMANN, L.; SCHREIBER, M.; KUTZBACH, H. D. (2004): Die Kartierung des Kraftstoffverbrauchs. Zusätzliche Informationsgrundlage für den präzisen Ackerbau. Landtechnik, Jg. 59, Nr. 3, S. 152–153
- [157] SENGHAAS, K. (2018): CNH Industrial - Corporate Presentation. IN: Bundesverband BioEnergie e. V. (BBE); Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e. V. (UFOP); Bundesverband der deutschen Bioethanolwirtschaft e. V. (BDBe); Verband der Deutschen Biokraftstoffindustrie e. V. (VDB); Fachverband Biogas e. V. (Hrsg.): Kraftstoffe der Zukunft 2018. 15. Internationaler Fachkongress für erneuerbare Mobilität. CityCube Berlin, 22-23. Januar. Berlin: Bundesverband BioEnergie e. V. (BBE), S. 1–27
- [158] SHAO, Z. (2016): Non-road emission inventory model methodology. Date: 24 February, 2016. International Council on Clean Transportation Europe (ICCT) (Hrsg.). Washington, D. C., San Francisco, CA, USA, Berlin. Working Paper, Nr. 4, 13 Seiten
- [159] SIEDLECKI, M.; LIJEWSKI, P.; WEYMANN, S. (2017): Analysis of tractor particulate emissions in a modified NRSC test after implementing a particulate filter in the exhaust system. MATEC Web of Conferences 118, 0028. IN: Polish Scientific Society of Combustion Engines (Hrsg.): VII International Congress on Combustion Engines. Poznan, 27-29 June. Poznan, Poland: Board of Polish Scientific Society of Combustion Engines, S. 1–7
- [160] SILVEIRA DE FARIAS, M.; SCHLOSSER, J. F.; ESTRADA, J. S.; PERIN, G. F.; TELLECHEA MARTINI, A. (2019): Emissions of an agricultural engine using blends of diesel and hydrous ethanol. Semina: Ciências Agrárias, Jg. 40, Nr. 1, S. 7–16
- [161] SONNEN, J. (2007): Simulation von Ernteprozessketten für Siliergüter. Dissertation. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft im VDI (VDI-MEG), Nr. 454. Berlin: Humboldt-Univ, 207 Seiten
- [162] SPICHER, U.; LÜFT, M. (2007): Optimierung der Kraftstoffstrahlausbreitung für Pflanzenöl, insbesondere natürliches Rapsöl, bei der Verwendung moderner Diesel-Einspritzsysteme. Forschungsbericht FZKA-BWPLUS. Karlsruhe: Institut für Kolbenmaschinen der Universität Karlsruhe, 58 Seiten
- [163] STARK, W.; PIEKE, C. (2017): Efficiency Optimization by Using "Vehicle in the Loop" Test Methodology. IN: Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI); Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik (MEG); European Society of Agricultural Engineering (EurAgEng) (Hrsg.): LAND.TECHNIK AgEng 2017. Hannover, 10.-11. November. VDI-Berichte, Nr. 2300. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 399–405, ISBN 978-3-18-092300-0
- [164] STARR, M. E. (1997): SAE Technical Paper 972904 Influence on Transient Emissions At Various Injection Timings, Using Cetane Improvers, Bio-Diesel, and Low Aromatic Fuels. SAE International (Hrsg.). Warrendale, PA, USA, 1-9
- [165] STARR, M. E.; BUCKINGHAM, J. P.; JACKSON, C. C. (1999): Development of transient test cycles for selected nonroad diesel engines. IN: BELL, S. R. (Hrsg.): Modeling and Simulation of engine processes and engine emissions. Proceedings of the 1999 Spring Technical Conference of the ASME Internal Combustion Engine Division. Volume 1. Spring Technical Conference. Columbus, Indiana, USA, April 24-28. ICE-

- Volume 32-1. New York, NY, USA: The American Society of Mechanical Engineers (ASME), S. 145–156
- [166] SY, G.; FLÜGGE, E.; WICHMANN, V.; KLAASEN, G. (2009): Dauerhaltbarkeit von Rapsölmotoren im Praxiseinsatz. Abschlussbericht für das Forschungsvorhaben, Aktenzeichen: 22021107 (07NR211), Projektleiter: Prof. Horst Harndorf, Laufzeit: 1. Juni 2008 bis 28. Februar 2009. Rostock: Universität Rostock, Fachbereich Maschinenbau und Schiffstechnik, Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren, 106 Seiten
- [167] THE 2NDVEGOIL CONSORTIUM (2009): Demonstration of 2nd Generation Vegetable Oil Fuels in Advanced Engines. Workpackage WP2 Engine development. The 2ndVegOil Consortium (Hrsg.). München, Mannheim, 300 Seiten
- [168] THUNEKE, K. (2009): Untersuchungen zu Abgasemissionen und zum Einsatz von Partikelfiltersystemen bei rapsölbetriebenen Blockheizkraftwerken. Dissertation. München, Freising-Weihenstephan: TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN, 191 Seiten
- [169] THUNEKE, K.; GASSNER, T.; EMBERGER, P.; REMMELE, E. (2009): Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell. Straubing: TECHNOLOGIE- UND FÖRDERZENTRUM IM KOMPETENZZENTRUM FÜR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (TFZ). Berichte aus dem TFZ, Nr. 17, 177 Seiten, ISBN 1614-1008
- [170] TIMPE, R.; HOENER, G. (2018): Traktormotoren: Alles eine Frage der Leistung. Top agrar, Jg. 47, Nr. 7, S. 92–95
- [171] TREIBER, P. H. H.; SAUERTEIG, J. E. (1991): SAE Technical Paper 911808 Present and Future European Exhaust Emission Regulations for Off-Road Diesel Engines. Reprinted from: Two Stroke Engines, Small Engines and Emissions Reduction (SP-883), International Off-Highway & Powerplant Congress and Exposition, Milwaukee, Wisconsin, September 9-12, 1991. Warrendale, PA, USA: SAE INTERNATIONAL, 9 Seiten (55-64)
- [172] TSCHÖKE, H. (1997): Rapsöl als Kraftstoff für Verbrennungsmotoren - Chance oder Irrweg? IN: BARTZ, W. J. (Hrsg.): Fuels 1997 - 1st International Colloquium, 16-17 January, 1997, Esslingen. Ostfildern: Technische Akademie Esslingen (TAE), S. 405–419, ISBN 3-924813-36-1
- [173] ULLMAN, T. L.; WEBB, C. C.; JACKSON, C. C.; DOORLAG, M. H. (1999): SAE Technical Paper 1999-01-2800 Nonroad Engine Activity Analysis and Transient Cycle Generation. Off-Highway & Powerplant Congress & Exposition, Session New Diesel Engines & Components September 1999 Indianapolis IN USA. SAE International (Hrsg.). Warrendale, PA, USA, 35-45
- [174] UNITED STATES, ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA) (2003): Draft Regulatory Impact Analysis. Control of Emissions from Nonroad Diesel Engines. Environmental Protection Agency Report, Nr. EPA420-R-03-008, 1192 Seiten
- [175] UNITED STATES, ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA) (2010): Exhaust and Crankcase Emission Factors for Nonroad Engine Modeling - Compression-Ignition. NR-009d. July 2010. United States, Environmental Protection Agency (EPA) (Hrsg.). Washington, D. C. Report, Nr. EPA-420-R-10-018 NR-009d, 141 Seiten
- [176] UNIVERSITY OF NEBRASKA (2019): Nebraska Tractor Test Laboratory - Test Reports. Biological Systems Engineering Department (Hrsg.). URL: <https://tractortestlab.unl.edu/testreports>. 29.04.2019
- [177] VARELLA, R. A.; GIECHASKIEL, B. SOUSA, L.; DUARTE, G. (2018): Comparison of Portable Emissions Measurement Systems (PEMS) with Laboratory Grade Equipment. Applied Sciences, Jg. 8, Nr. 9, S. 1633


- [178] VDMA FACHVERBAND LANDTECHNIK (2019): Traktoren-Zulassungen in Deutschland. Gesamtzahl nach Klassen. Datenquelle: Krafftfahrt-Bundesamt.
- [179] WIDMANN, B. A.; APFELBECK, R.; GESSNER, B. H.; PONTIUS, P. (1992): Verwendung von Rapsöl zu Motorentreibstoff und als Heizölersatz in technischer und umweltbezogener Hinsicht. Kurzfassung. Gelbes Heft - Landtechnische Berichte aus Praxis und Forschung, Nr. 40. Freising-Weihenstephan: Bayerische Landesanstalt für Landtechnik, 76 Seiten
- [180] WINKLER, B.; FRISCH, J. (2014): Weiterentwicklung der Zeitgliederung für landwirtschaftliche Arbeiten. IN: Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V. (ATB) (Hrsg.): 19. Arbeitswissenschaftliches Kolloquium des VDI-MEG Arbeitskreises Arbeitswissenschaften im Landbau. Dresden, 11.-12. März. Bornimer Agrartechnische Berichte, Nr. 83. Potsdam-Bornim: Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V. (ATB), S. 14–21
- [181] WINKLER, M.; WITTROCK, M.; KNUTH, H. W. (2013): Dauerhaltbarkeitsuntersuchungen an DEUTZ AGRI POWER-Motoren der Emissionsstufe EU COM III B mit SCR-System zur Freigabe von Biodiesel. Abschlussbericht zum UFOP-Förderprojekt-Nr. 540/103. Köln: DEUTZ AG, FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG, 30 Seiten
- [182] WINTHER, M.; DORE, C.; LAMBRECHT, U.; NORRIS, J.; SAMARAS, Z.; ZIEROCK, K.-H. (2017): Non-road mobile sources and machinery. EMEP/EEA air pollutant emission technology guidebook 2016 - Update May 2017; European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP). Copenhagen: EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA), 82 Seiten
- [183] YUM, K. K.; LEFEBVRE, N.; PEDERSEN, E. (2017): An experimental investigation of the effects of cyclic transient loads on a turbocharged diesel engine. Applied Energy, Jg. 185, S. 472–481
- [184] ZARE, A.; BODISCO, T. A.; NABI, M. N.; HOSSAIN, F. M.; RAHMAN, M. M.; RISTOVSKI, Z. D.; BROWN, R. J. (2017): The influence of oxygenated fuels on transient and steady-state engine emissions. Energy, Jg. 121, S. 841–853
- [185] ZIMMERMANN, WERNER; SCHMIDGALL, RALF (2014): Bussysteme in der Fahrzeugtechnik. Protokolle, Standards und Softwarearchitektur. 5., aktualisierte und erw. Aufl. 2014. ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, Online-Ressource (XVII, 507 Seiten 300 Illustrationen, online resource), ISBN 3658024194

Eigene Veröffentlichungen

Teilergebnisse dieser Arbeit wurden im Laufe der Promotion in den Veröffentlichungen [44][45][46][48][50] publiziert.

9 Anhang

Anhang 1: Betriebstagebuch für den Betreiber des Traktors im Feldtest

 Betriebstagebuch 2016		Traktor:		Ort:							
Vor der Benutzung		Betrieb		Ereignisse und Besonderheiten							
Datum	Betriebsstunden	Ölstand mm über MIN	Arbeitsvorgang (Nr. eintragen)	Startverhalten	Motoröl (Liter) gewechselt	Motoröl (Liter) aufgefüllt	Getankte Menge (Liter)			Fehlercodes / Wartungsarbeiten Reparaturen/ Sonstiges	Fahrer Unterschrift
							Pflanzöl	Diesel	Harnstoff		
01.01 (Fr)	.....h	.....mm	a:..... b:..... c:.....	<input type="checkbox"/> gut <input type="checkbox"/> mittel <input type="checkbox"/> schlecht <input type="checkbox"/> kein Start	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> ja					
02.01 (Sa)	.....h	.....mm	a:..... b:..... c:.....	<input type="checkbox"/> gut <input type="checkbox"/> mittel <input type="checkbox"/> schlecht <input type="checkbox"/> kein Start	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> ja					
03.01 (So)	.....h	.....mm	a:..... b:..... c:.....	<input type="checkbox"/> gut <input type="checkbox"/> mittel <input type="checkbox"/> schlecht <input type="checkbox"/> kein Start	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> ja					
04.01 (Mo)	.....h	.....mm	a:..... b:..... c:.....	<input type="checkbox"/> gut <input type="checkbox"/> mittel <input type="checkbox"/> schlecht <input type="checkbox"/> kein Start	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> ja					
05.01 (Di)	.....h	.....mm	a:..... b:..... c:.....	<input type="checkbox"/> gut <input type="checkbox"/> mittel <input type="checkbox"/> schlecht <input type="checkbox"/> kein Start	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> ja					
06.01 (Mi)	.....h	.....mm	a:..... b:..... c:.....	<input type="checkbox"/> gut <input type="checkbox"/> mittel <input type="checkbox"/> schlecht <input type="checkbox"/> kein Start	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> ja					
07.01 (Do)	.....h	.....mm	a:..... b:..... c:.....	<input type="checkbox"/> gut <input type="checkbox"/> mittel <input type="checkbox"/> schlecht <input type="checkbox"/> kein Start	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> ja					

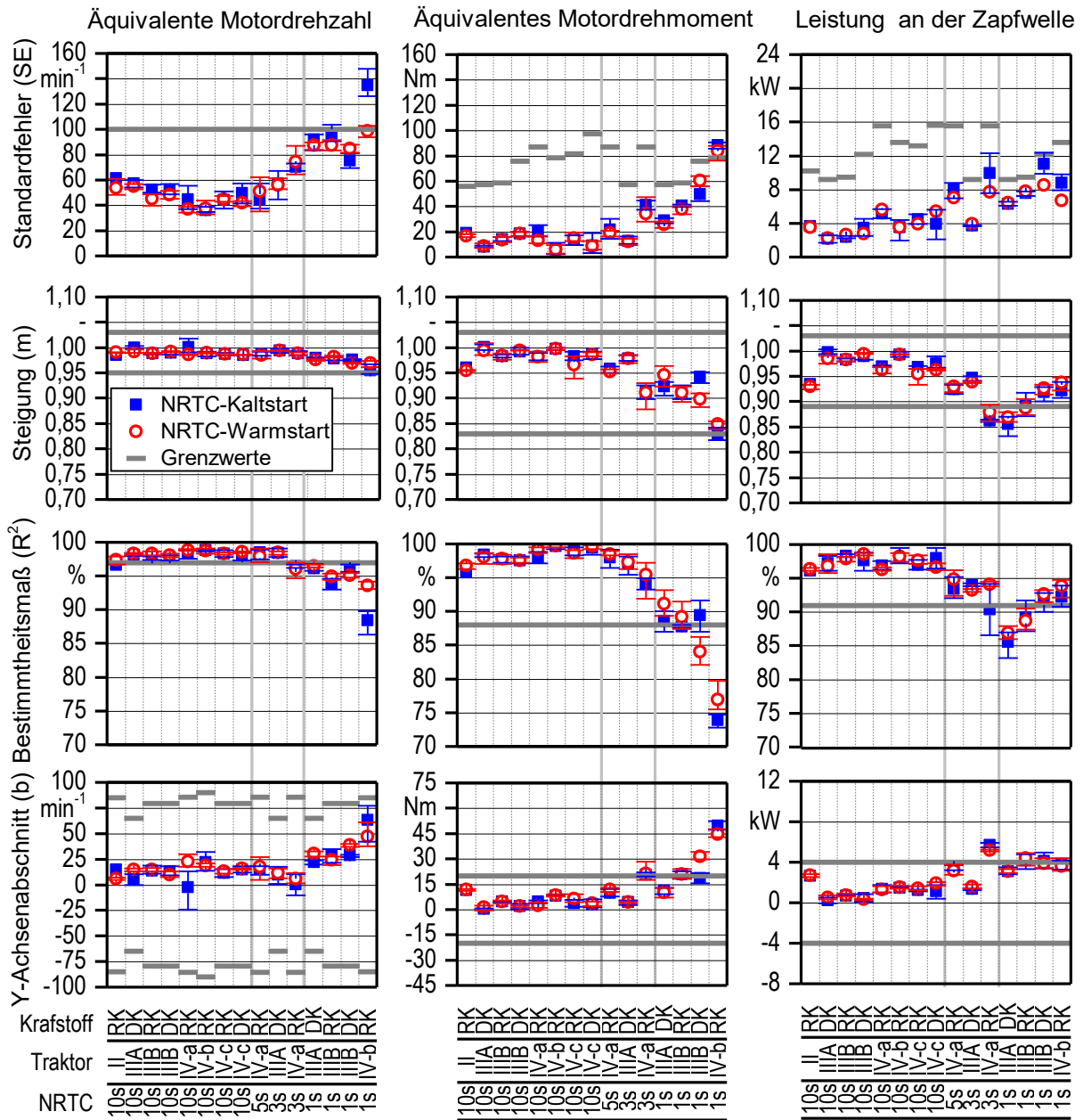
*) Arbeitsvorgänge:

1|Pflug	2|Grubber	3|Scheibenegge	4|Straßentransport	5|Düngerstreuer	6|Feldspritze	7|Kreisellegge	8|Sämaschine
9|Ballenpresse	10|Mähwerk	11|Schwader/Wender	12|Ladewagen	13|Güllewagen	14|Miststreuer	15|Frontlader	16|Sonstiges

Anhang 2: Parameter der Funktion Poly2D zur Berechnung von M_{PTO}

Parameter	Traktor IIIB		Traktor IV-c	
	Wert	Standardfehler	Wert	Standardfehler
Koeffizient m1	-270	20,7	-231	65,9
Koeffizient m2	0,0511	0,0262	-0,088	0,089
Koeffizient m3	16,1	0,316	20,0	1,29
Koeffizient m4	$-4,33 \cdot 10^{-5}$	$8,53 \cdot 10^{-6}$	$-4,03 \cdot 10^{-5}$	$2,87 \cdot 10^{-5}$
Koeffizient m5	-0,00976	0,00234	-0,01787	0,00822
Koeffizient m6	-0,00118	$1,34 \cdot 10^{-4}$	$4,89 \cdot 10^{-4}$	$5,05 \cdot 10^{-4}$
Anzahl der Punkte	129	-	75	-
R ² in %	100	-	99,6	-

Anhang 3: Mittelwert und Spannweite von Parametern der Regressionsanalyse zwischen Soll- und Istwerten von Drehzahl, Drehmoment und Leistung bei NRTC-Varianten 1sNRTC und 10sNRTC im Kalt- und Warmstart ($n = 3$)



Anhang 4: Mittelwert und Spannweite der limitierten Abgasemissionen und des Wirkungsgrads (P_{PTO}/P_B) verschiedener Traktoren bei der Anwendung des

NRSC und verschiedener NRTC-Varianten mit Rapsöl- und Dieseldieselkraftstoff (n=3)

