

TEXTE

53/2023

Abchlussbericht

Fortentwicklung der Verordnung (EU) Nr. 2016/1628 für Mobile Maschinen und Geräte - NRMM (Non Road Mobile Machinery)

von:

Christoph Heidt, Hinrich Helms, Jan Kräck, Finn Münch
Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Heidelberg

Konstantin Weller, Stefan Hausberger
Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik mbH, Graz

Volker Diegmann, Heike Wursthorn, Christian Latt
IVU Umwelt GmbH Freiburg

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 53/2023

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums
für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit
und Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3719 51 103 0

FB001017

Abschlussbericht

Fortentwicklung der Verordnung (EU) Nr. 2016/1628 für Mobile Maschinen und Geräte - NRMM (Non Road Mobile Machinery)

von

Christoph Heidt, Hinrich Helms, Jan Kräck, Finn Münch
Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg,
Heidelberg

Konstantin Weller, Stefan Hausberger
Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen
und Thermodynamik mbH, Graz

Volker Diegmann, Heike Wursthorn, Christian Latt
IVU Umwelt GmbH Freiburg

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 [/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

 [/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu)
Wilckensstraße 3
69120 Heidelberg

Abschlussdatum:

Januar 2023

Redaktion:

Fachgebiet I 2.2 „Schadstoffminderung und Energieeinsparung im Verkehr“
Helge Jahn

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, April 2023

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Fortentwicklung der Verordnung (EU) Nr. 2016/1628 für Mobile Maschinen und Geräte - NRMM (Non Road Mobile Machinery)

Non Road Mobile Machinery (NRMM), wie z.B. Baumaschinen, Traktoren oder Rasenmäher, sind eine der wesentlichen mobilen Quellen für Schadstoffemissionen. Sie emittieren deutschlandweit jährlich fast die gleiche Menge an Abgaspartikeln und ca. 15 % der Stickoxid-Emissionen verglichen mit Straßenfahrzeugen, wie z.B. Autos oder Lkw. Neue NRMM-Motoren müssen aktuell die Abgasstufe V nach der EU-Verordnung 2016/1628 erfüllen. Die strengen Grenzwerte entsprechen in etwa denen der Euro VI für LKW. Die vorliegende Studie untersucht, ob NRMM auch im Realbetrieb geringe Emissionen aufweisen. Stufe V-Motoren der Kategorie 56 bis 560 Kilowatt Nennleistung, welche einen Großteil aller NRMM ausmachen, halten diese Grenzwerte unter normalen Arbeitsbedingungen ein. Leerlaufphasen und Kaltstarts, welche über 50 % der Gesamtemissionen ausmachen können, fließen jedoch in der aktuellen Verordnung nicht ausreichend mit ein. Eine zukünftige In-Service-Conformity-Gesetzgebung sollte dies berücksichtigen. Die Partikel- und Stickoxidgrenzwerte für Dieselmotoren bis 19 kW (bei Binnenschiffen bis 300 kW) entsprechen noch etwa dem Stand von Euro-IV-Lkw oder älter. Die Grenzwerte für kleinere Benzingeräte liegen weit hinter den aktuellen Anforderungen für Pkw oder Mopeds zurück. Eine Fortentwicklung der Gesetzgebung wird daher empfohlen. Diese sollte auch den Umstieg auf Nullemissionsantriebe, z.B. Elektrogeräte, zum Ziel haben und dieses, beispielsweise durch ambitionierte Emissionsgrenzwerte und eine Roadmap, unterstützen. Die Erkenntnisse der Studie stützen sich auf ein umfangreiches Daten-Set basierend auf Literatur, Telematiksystemen und eigenen Messungen mit portablen Emissionsmessgeräten (PEMS). Weiteren Forschungsbedarf sehen die Autoren insbesondere bei der Frage, ob die Motoren auch über eine lange Lebenszeit sauber sind und welche Rolle Defekte oder Manipulationen spielen.

Abstract: Further development of Regulation (EU) No. 2016/1628 for mobile machinery and equipment - NRMM (Non Road Mobile Machinery).

Non Road Mobile Machinery (NRMM), such as construction equipment, tractors or lawn mowers, are one of the main mobile sources of pollutant emissions. They emit almost the same amount of exhaust particles and about 15% of nitrogen oxide emissions annually throughout Germany compared to road vehicles, such as cars or trucks. New NRMM engines currently have to comply with exhaust stage V under EU Regulation 2016/1628. The strict limits are roughly equivalent to those of Euro VI for trucks. This study investigates whether NRMM also have low emissions in real-world operation. Stage V engines between 56 and 560 kilowatt rated power, which make up a majority of all NRMMs, comply with these limits under normal working conditions. However, idling phases and cold starts, which can account for over 50% of total emissions, are not adequately included in the current regulation. Future in-service conformity legislation should take this into account. Particulate and nitrogen oxide limits for diesel engines up to 19 kW (up to 300 kW for inland vessels) are still roughly equivalent to Euro IV trucks or older. The limits for smaller petrol engines are far behind the current requirements for passenger cars or mopeds. Further development of the legislation is therefore recommended. This should also target the transformation to zero-emission drives, e.g. electric appliances, and support this, for example through ambitious emission limit values and a roadmap. The study's findings are based on a comprehensive data set based on literature, telematics systems and the authors' own measurements with portable emission measurement systems (PEMS). The authors see a need for further research, particularly on the question of whether the engines are also clean over a long service life and what role defects or manipulations play.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	9
Tabellenverzeichnis	11
Abkürzungsverzeichnis.....	12
Zusammenfassung.....	14
Summary	21
1 Hintergrund der Studie.....	28
2 Realemissionen mobiler Maschinen und Geräte	30
2.1 Emissionen mobiler Maschinen und Geräte deutschlandweit	30
2.2 Emissionsgesetzgebung Stufe V.....	32
2.3 Realemissionsverhalten	35
2.3.1 Datengrundlage	35
2.3.1.1 Daten aus Literaturquellen	35
2.3.1.2 Messung der Realemissionen	40
2.3.2 Ableitung von repräsentativen Emissionsfaktoren.....	63
2.3.2.1 Datengrundlage	64
2.3.2.2 Phaseneinteilung	64
2.3.2.3 Methoden zur Erstellung repräsentativer Emissionsfaktoren.....	66
2.3.2.4 Erstellung der Emissionsfaktoren	69
2.3.2.5 Vergleich mit Literaturwerten	75
2.3.2.6 Zusätzliche Einflussfaktoren auf das Emissionsverhalten	76
2.4 Einsatzprofil.....	79
2.4.1 Methodische Grundlagen und bestehende Lastzyklen	79
2.4.2 Auswertung von Telematikdaten.....	81
2.4.2.1 Einführung	81
2.4.2.2 Verwendete Telematikdaten	82
2.4.2.3 Datenqualität und Unsicherheiten	83
2.4.3 Ableitung typischer Lastprofile pro Maschinenkategorie.....	84
2.4.3.1 Ermittlung der Arbeitsphasen.....	84
2.4.3.2 Ermittlung der Leerlaufphasen	85
2.4.3.3 Ermittlung der Anzahl Starts.....	86
2.4.3.4 Durchschnittliches Lastprofil pro Maschinenkategorie.....	86
2.5 Durchschnittliche Emissionsfaktoren im Realbetrieb	87

2.5.1	Durchschnittliche NO _x -Emissionen nach Betriebszustand für verschiedene Maschinenkategorien	88
2.5.2	Sensitivitätsanalyse für die mittleren NO _x -Emissionen von Stufe V-Baggern aufgrund des Lastprofils.....	89
2.5.3	Emissionsfaktoren für NO _x , PM, CO und HC für Stufe I bis V	92
2.6	Auswirkungen auf die Immissionsbelastung.....	96
2.6.1	Definition des Untersuchungsgebietes und der Fallbeispiele	96
2.6.2	Auswirkungen auf die Luftbelastung	98
3	Stand und Weiterentwicklung der NRMM-Verordnung	102
3.1	Übersicht der existierenden Regelwerke und zuständigen Behörden	102
3.1.1	Übersicht über die Regelwerke.....	102
3.1.2	Verfahren und Behörden im Gesetzgebungsprozess und der Umsetzung.....	103
3.1.3	Erfahrungen mit dem Gesetzgebungsprozess und der Umsetzung	105
3.2	Beschreibung der aktuellen Messverfahren	106
3.2.1	Tests am Motorenprüfstand - NRSC und NRTC	106
3.2.2	Allgemeine Anforderungen an die Überwachung im Betrieb.....	107
3.2.3	Gültige Prüfbedingungen bei ISM-Tests	107
3.2.4	Datenerfassungsverfahren.....	107
3.2.5	Prüfung der Datenkonsistenz.....	108
3.2.5.1	Konformität des ECU-Drehmomentsignals.....	108
3.2.5.2	Daten der Gasanalysatoren und der Massenstrommesseinrichtung.....	108
3.2.6	Prüfverfahren.....	108
3.2.7	Auswertung der Messdaten.....	110
3.2.8	Wiederholbarkeit von ISM-Tests	110
3.3	Vorschläge für eine Weiterentwicklung der NRMM-Verordnung	111
3.3.1	Sicherstellung und weitere Reduktion der Emissionen im Realbetrieb	112
3.3.1.1	Emissionsgrenzwerte weiter absenken	112
3.3.1.2	Einführung von Tests im Realbetrieb für Leistungsklassen < 56 kW	112
3.3.1.3	Weiterentwicklung der ISM Prüf- und Messvorschriften	115
3.3.1.4	Weiterentwicklung vom ISM zum ISC.....	118
3.3.1.5	Überwachung der Emissionen über die gesamte Lebensdauer	119
3.3.1.6	Zukünftige Rolle von Prüfstands- und On-Board Messungen	121
3.3.1.7	Überprüfung Genauigkeit Messgeräte	125
3.3.2	Minderung der Treibhausgasemissionen vordenken	125
3.3.2.1	Roadmap zur Defossilisierung von NRMM entwickeln.....	125

3.3.2.2	Berücksichtigung alternativer Kraftstoffe in der NRMM-Verordnung	126
3.3.3	Sonstige Weiterentwicklungen	127
3.3.3.1	Datensammlung und Transparenz verbessern	127
3.3.3.2	Sonstige Schadstoffe	128
3.3.3.3	Stakeholderbeteiligung	129
4	Quellenverzeichnis	130
A	Anhang	134
A.1	Emissionen von Binnenschiffen	134
A.1.1	Gesetzgebung und Typprüfverfahren	134
A.1.2	Emissionsverhalten im Realbetrieb	134

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einfluss der Leerlaufphase auf die mittleren NO _x -Emissionen bei einem Stufe-V-Raupenbagger mit Dieselmotor und 100 kW Nennleistung	15
Abbildung 2: Einfluss der Anlaufphase auf die mittleren NO _x -Emissionen bei einem Stufe-V-Raupenbagger mit Dieselmotor und 100 kW Nennleistung	16
Abbildung 3: Mittlere NO _x -Emissionsfaktoren nach Abgasstufe für einen Raupenbagger mit Dieselmotor und 100 kW Nennleistung im Jahr 2020	17
Abbildung 4: Übersicht Emissionsgrenzwerte der Stufe-V-NRMM-Kategorien im Vergleich zu Straßenfahrzeugen.....	18
Abbildung 5: Verhältnis von NRMM zum Straßenverkehr an den Abgasemissionen in Deutschland 2019	30
Abbildung 6: Anteil der einzelnen Emissionsstufen an den Betriebsstunden und den Abgasemissionen aller mobilen Maschinen in Deutschland 2019	31
Abbildung 7: Übersicht der NO _x +HC-Grenzwerte für Dieselmotoren bei NRMM und Lkw	33
Abbildung 8: Übersicht der PM-Grenzwerte Dieselmotoren bei NRMM und Lkw	34
Abbildung 9: Übersicht der NO _x +HC-Grenzwerte für Benzinmotoren bei NRMM, Pkw und Mopeds	34
Abbildung 10: Übersicht der CO-Grenzwerte für Benzinmotoren bei NRMM, Pkw und Mopeds.....	35
Abbildung 11: Emissionsfaktoren Literaturwerte, CO und NO _x	38
Abbildung 12: Emissionsfaktoren Literaturwerte, THC und PM	39
Abbildung 13: Testmaschine 1 mit PEMS.....	43
Abbildung 14: Testmaschine 2 mit PEMS.....	45
Abbildung 15: Testmaschine 3 mit PEMS.....	46
Abbildung 16: Messdaten CO ₂ – Testmaschine 1 (Emissionsstufe IV)	49
Abbildung 17: Messdaten CO ₂ – Testmaschine 2 und 3 (Emissionsstufe V)	50
Abbildung 18: Messdaten CO – Testmaschine 1 (Emissionsstufe IV)	51
Abbildung 19: Messdaten CO – Testmaschine 2 und 3 (Emissionsstufe V)	52
Abbildung 20: Messdaten HC – Testmaschine 1 (Emissionsstufe IV).....	53
Abbildung 21: Messdaten NO _x – Testmaschine 1 (Emissionsstufe IV).....	54
Abbildung 22: Messdaten NO _x – Testmaschine 2 und 3 (Emissionsstufe V).....	55
Abbildung 23: Messdaten PN – Testmaschine 1 (Emissionsstufe IV).....	56
Abbildung 24: Messdaten PN – Testmaschine 3 (Emissionsstufe V).....	57
Abbildung 25: Vergleich verschiedener Auswertemethoden – NO _x -Emissionen....	60
Abbildung 26: Vergleich verschiedener Perzentile, EMROAD-Auswertung, NO _x	61
Abbildung 27: Vergleich verschiedener Auswertemethoden – CO-Emissionen	63
Abbildung 28: Inputdaten Emissionsmodell – mittelschwere Arbeit, Stufe IV	71

Abbildung 29: Inputdaten Emissionsmodell – mittelschwere Arbeit, Stufe V	72
Abbildung 30: Inputdaten Emissionsmodell – Kaltstart, Stufe V	73
Abbildung 31: Übersicht einiger wichtiger Standardzyklen für mobile Maschinen	81
Abbildung 32: Formel zur Berechnung der durchschnittlichen Realemissionen in g/h	88
Abbildung 33: NO _x -Emissionsfaktor für Stufe IV und V anteilig pro Betriebsphase und in Abhängigkeit des durchschnittlichen Lastprofils pro Maschinenkategorie	89
Abbildung 34: Einfluss der Arbeitsphase auf die mittleren NO _x -Emissionen bei einem Stufe V-Raupenbagger mit 100 kW	90
Abbildung 35: Einfluss der Leerlaufphase auf die mittleren NO _x -Emissionen bei einem Stufe V-Raupenbagger mit 100 kW	91
Abbildung 36: Einfluss der Anlaufphase auf die mittleren NO _x -Emissionen bei einem Stufe V-Raupenbagger mit 100 kW	92
Abbildung 37: Mittlere NO _x -Emissionsfaktoren nach Abgasstufe für einen Raupenbagger mit Dieselmotor und 100 kW Nennleistung im Jahr 2020	93
Abbildung 38: Mittlere PM-Emissionsfaktoren nach Abgasstufe für einen Raupenbagger mit Dieselmotor und 100 kW Nennleistung im Jahr 2020	94
Abbildung 39: Mittlere CO-Emissionsfaktoren nach Abgasstufe für einen Raupenbagger mit Dieselmotor und 100 kW Nennleistung im Jahr 2020	95
Abbildung 40: Mittlere HC-Emissionsfaktoren nach Abgasstufe für einen Raupenbagger mit Dieselmotor und 100 kW Nennleistung im Jahr 2020	96
Abbildung 41: Untersuchungsgebiet für das Fallbeispiel Baustelle „Mariendorfer Damm“	97
Abbildung 42: NO _x /NO ₂ -Konzentration in µg/m ³ an der fiktiven Baustelle Mariendorfer Damm (Stufe V mit Konformitätsfaktor 1)	99
Abbildung 43: PM-Konzentration in µg/m ³ an der fiktiven Baustelle Mariendorfer Damm (Stufe V mit Konformitätsfaktor 1)	100
Abbildung 44: Übersicht Emissionsgrenzwerte der Stufe V NRMM-Kategorien im Vergleich zu Straßenfahrzeugen.....	111
Abbildung 45: Mittlere Emissionsfaktoren von Binnenschiffsmotoren nach Lastfaktor und Baujahr im Prüfzyklus NRSC	136
Abbildung 46: Korrekturfaktoren für die NO _x -Emissionen von Binnenschiffen in Abhängigkeit vom Lastfaktor und der Abgasstufe gemäß (Ligterink et al. 2019).....	137

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Emissionsgrenzwerte Maschinenkategorie NRE [Regulation (EU) 2016/1628]	32
Tabelle 2: Übersicht Anzahl Messdaten aus Literaturquellen.....	36
Tabelle 3: Zusammenfassung Messprogramm	41
Tabelle 4: Übersicht Anzahl Messdaten aus On-board Messungen	42
Tabelle 5: Technische Daten Testmaschine 1	42
Tabelle 6: Technische Daten Testmaschine 2	44
Tabelle 7: Technische Daten Testmaschine 2	45
Tabelle 8: Daten für die Erstellung von Emissionsfaktoren in speziellen Arbeitssituationen	64
Tabelle 9: Daten für Kalibrierung von Emissionsfaktoren (Messdaten + Literaturwerte)	64
Tabelle 10: Schema Emissionsmodell basierend auf Messdaten.....	69
Tabelle 11: Emissionsfaktoren basierend auf Messdaten für spezielle Arbeitssituationen – Stufe IV (nicht auf Flottendurchschnitt kalibriert)	70
Tabelle 12: Emissionsfaktoren basierend auf Messdaten für spezielle Arbeitssituationen – Stufe V (nicht auf Flottendurchschnitt kalibriert)	71
Tabelle 13: Kalibrierfaktoren für die Darstellung der Flottenemissionen.....	74
Tabelle 14: Datensatz für das kalibrierte Flottenemissionsmodell – Stufe IV.....	74
Tabelle 15: Datensatz für das kalibrierte Flottenemissionsmodell – Stufe V	74
Tabelle 16: NO _x -Leerlaufemissionen Emissionsstufe IV	75
Tabelle 17: NO _x -Leerlaufemissionen Emissionsstufe V	76
Tabelle 18: Überblick zur Art der verwendeten Telematikdaten.....	83
Tabelle 19: Einteilung in Leerlauf und Arbeitsphasen nach durchschnittlichem Lastfaktor	85
Tabelle 20: Angaben/Bandbreiten zur durchschnittlichen Aufteilung der Leerlaufphasen in ≤5 min und >5 min mittels Telematikdaten	85
Tabelle 21: Eckwerte für durchschnittliche Einsatzprofile verschiedener Maschinenkategorien.....	87
Tabelle 22: Maschinenpark und durchschnittliche tägliche Abgasemissionen der Beispielbaustelle „Mariendorfer Damm“ für das Jahr 2019	97
Tabelle 23: Unterschiede zwischen Verordnung und Richtlinie	102
Tabelle 24: Übersicht über die bisherige NRMM-Emissionsgesetzgebung.....	103
Tabelle 25: Beispiele für mittlere Lastfaktoren von Binnenschiffen	135

Abkürzungsverzeichnis

AGR	Abgasrückführung
ATS	All-terrain Vehicles with side-by-side Sitting
ATV	All-terrain Vehicle
AVL	Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List
BEV	Battery Electric Vehicle
CAN	Controller Area Network
CO	Kohlenmonoxid
Destatis	Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
DOC	Dieseloxidationskatalysator
DPF	Dieselpartikelfilter
ECU	Motorsteuergerät (engl.: Engine Control Unit)
EFM	Exhaust Flow Meter
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
FID	Flammenionisationsdetektor
FTIR	Fourier-transformierte Infrarotspektroskopie
GPS	Global Positioning System
HC/THC	Kohlenwasserstoff
ISC	In-Service Conformity
ISM	In-Service Monitoring
IWA	Inland water vessels, auxiliary
JRC	Joint Research Centre
LKW	Lastkraftwagen
LNF	Leichtes Nutzfahrzeug
MAW	Moving Average Window
NO_x	Stickoxid
NRE	Non-road Engine
NRG	Generator sets
NRS	Spark Ignition Engines < 56 kW
NRSC	Non-Road Stationary Cycle
NRSh	Spark Ignition Engines < 19 kW specifically designed for hand-held equipment
NRTC	Non-Road Transient Cycle
OBD	On-Board Diagnose
P	Motorleistung
PEMS	Portable Emissionsmesstechnik (engl.: Portable Emission Measurement System)
PET	Portable Emission accuracy Testbench
PKW	Personenkraftwagen
PM	Partikelmasse
PN	Partikelanzahl
RLL	Railway locomotives
RLR	Railcars

AGR	Abgasrückführung
SbS	Side-by-side vehicle
SCR	Selektive katalytische Reduktion
SEMS	Smart Emission Measurement System
SMB	Snowmobiles
SNF	Schweres Nutzfahrzeug
TFZ	Technologie- und Förderzentrum
TU Graz	Technische Universität Graz
TÜV	Technischer Überwachungsverein
UBA	Umweltbundesamt, Dessau
UVV	Unfallverhütungsvorschriften

Zusammenfassung

Hintergrund

Non Road Mobile Machinery (NRMM), wie z.B. Baumaschinen, Traktoren oder Rasenmäher, sind eine der wesentlichen mobilen Quellen für Schadstoffemissionen. Die Partikel- und Stickoxidemissionen der mobilen Maschinen und Geräte tragen relevant zur Emissions- und Immissionsbelastung in Deutschland bei. Neben den zum Teil hohen jährlichen Betriebsstunden liegt dies vor allem in der gegenüber Straßenfahrzeugen später einsetzenden und weniger strengen Emissionsgesetzgebung für mobile Maschinen begründet.

Die Emissionsgrenzwerte für neu in den Markt gebrachte Motoren für NRMM in Deutschland werden auf europäischer Ebene festgelegt. Die aktuell gültige Stufe V wird mit der EU-Verordnung 2016/1628 rechtskräftig und stellt die bisher ambitionierteste und umfassendste Regulierung dar. Gegenstand ist ein breites Spektrum an Maschinen und Geräten, das von kleinen Gartengeräten bis zu großen Baumaschinen und Binnenschiffen reicht. Dabei wurden bei Dieselmotoren u. a. erstmals auch Grenzwerte für Motoren mit weniger als 19 kW Leistung eingeführt und für Motoren über 19 kW ein Grenzwert für die Partikelanzahl. Die Grenzwerte für größere Dieselmotoren orientieren sich mit wenigen Ausnahmen am Abgasstandard der schweren Nutzfahrzeuge der Stufe Euro VI. Zudem müssen Emissionen von Maschinen im Realbetrieb im Rahmen von In-Service Monitoring-Messungen an die EU-Kommission berichtet werden.

Das Projekt „Fortentwicklung der Verordnung (EU) Nr. 2016/1628 für Mobile Maschinen und Geräte“ analysiert die Auswirkungen der NRMM-Verordnung mit Fokus auf zwei Aspekte:

- Die Untersuchung der Realemissionen neuer mobiler Maschinen und Geräte und ihrer Auswirkungen auf die Immissionsbelastung.
- Die Analyse der aktuellen „Regulierungspraxis“ hinsichtlich der Regelwerke und der Messverfahren und darauf aufbauend die Ableitung von Vorschlägen für eine mögliche Weiterentwicklung der NRMM-Verordnung.

Bezüglich der Realemissionen wurden zahlreiche Studien, Telematikdaten verschiedener Maschinenbetreiber sowie eigene Messungen mit Portable Emission Measurement Systems (PEMS) gesammelt und analysiert. Der Fokus lag auf Land- und Baumaschinen mit Dieselmotoren zwischen 56 und 560 kW Nennleistung. Im Rahmen der eigens durchgeführten Messungen wurde auch bewertet, bei welchen mobilen Maschinen und Geräten Messungen im Realbetrieb ohne Einschränkung der Arbeitsprozesse möglich sind und bei welchen Maschinentypen bzw. -größen dies nicht funktioniert. Zur Erfassung der Regulierungspraxis wurden Interviews mit Wissenschaftlern sowie Behörden- und Industrievertretern geführt. Zusätzlich wurden die Zwischenergebnisse im Rahmen von zwei Stakeholderworkshops mit Vertretern von Politik, Industrie und Wissenschaft diskutiert und Rückmeldungen kontinuierlich eingearbeitet.

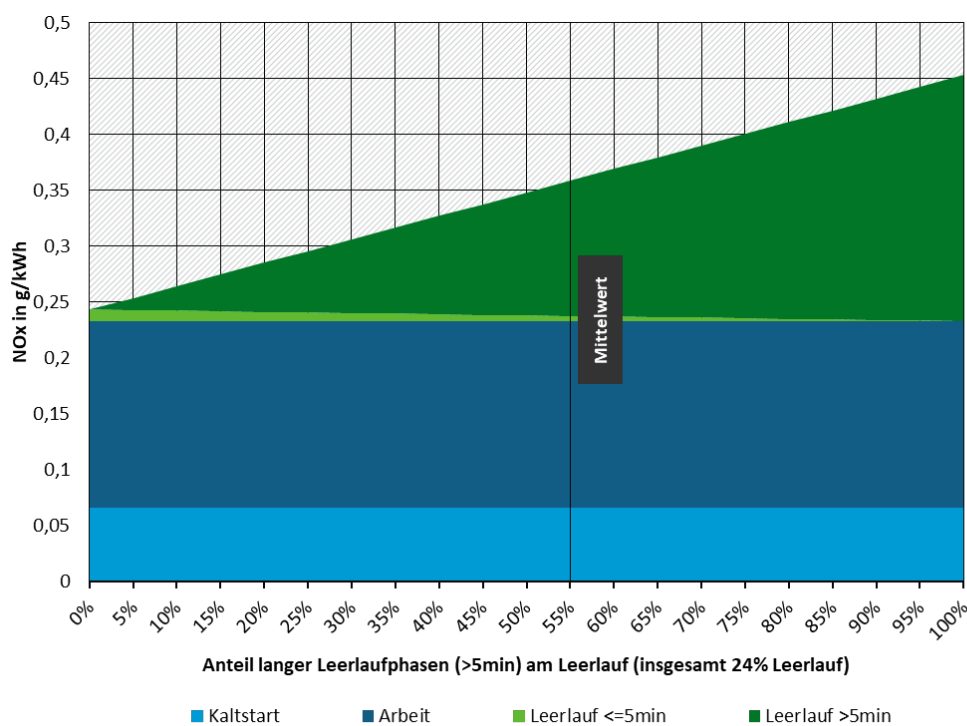
Erkenntnisse zu den Emissionen neuer Maschinen im Realbetrieb

Zur Analyse der Realemissionen wurden Messdaten von 20 Maschinen der Stufe IV und sieben Maschinen der Stufe V ausgewertet. Bei betriebswarmem Motor, d.h. während der „normalen“ Arbeitsphase, sind die Emissionen meist unterhalb der Grenzwerte, während die Effektivität der Abgasnachbehandlung bei kaltem Motor drastisch sinkt. Um diese Einflussfaktoren möglichst repräsentativ abzubilden, wurden folgende Schritte durchgeführt:

- Analyse und Definition relevanter Betriebszustände, z.B. Kaltstart, Leerlauf > 5 min, leichte/ mittelschwere/ schwere Arbeit, etc.
- Bestimmung spezifischer Emissionsfaktoren für diese Zustände aus PEMS-Messungen
- Bestimmung des Anteils der Betriebszustände für verschiedene Maschinenkategorien aus Telematikdaten

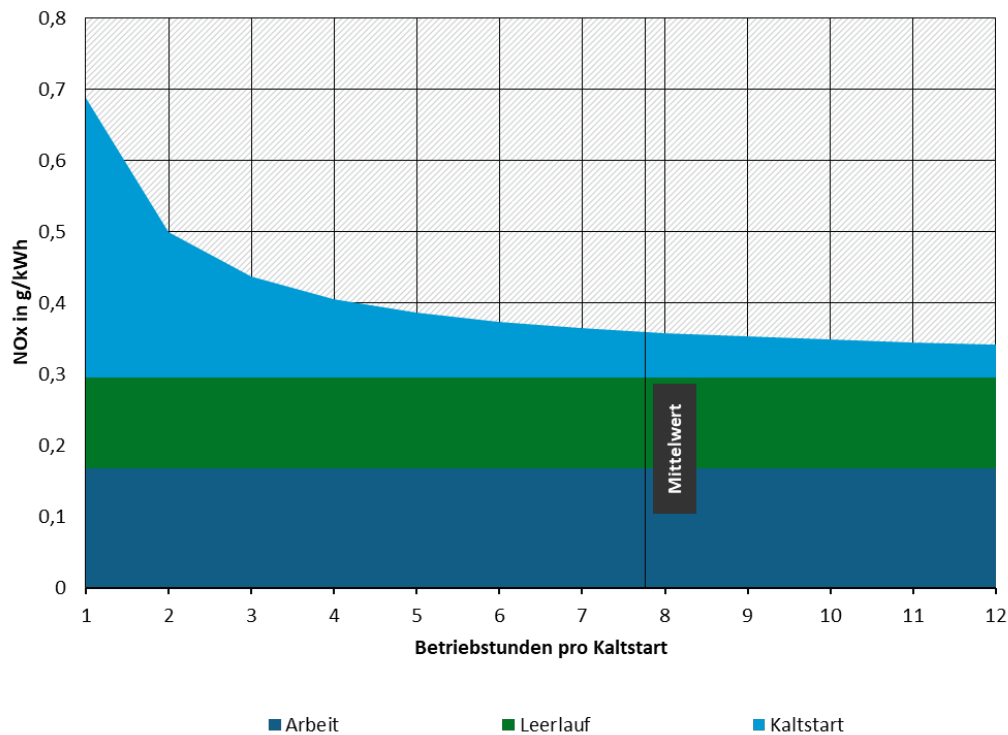
Abbildung 1 und Abbildung 2 stellen beispielhaft die durchschnittlichen NO_x-Emissionen eines Raupenbaggers anteilig nach Betriebszustand dar und zeigen dabei den Einfluss der Leerlaufdauer und der Kaltstartphase. Im Durchschnitt hat der Raupenbagger einen Leerlaufanteil von insgesamt 24 %, davon 13 % länger als 5 min, und i.d.R. einen Kaltstart pro Arbeitstag, d.h. ca. alle acht Betriebsstunden. Diese im Rahmen des ISM ausgeschlossenen Nicht-Betriebsereignisse machen bei Stufe IV somit zusammen etwa die Hälfte der ermittelten NO_x-Realemissionen aus, wobei je nach Lastprofil und Maschinenkategorie niedrigere oder höhere Anteile möglich sind. Dies bedeutet, dass die im Rahmen des ISM gültigen Ergebnisse die durchschnittlichen Realemissionen deutlich zu niedrig einordnen.

Abbildung 1: Einfluss der Leerlaufphase auf die mittleren NO_x-Emissionen bei einem Stufe-V-Raupenbagger mit Dieselmotor und 100 kW Nennleistung



Quelle: ifeu Graphik.

Abbildung 2: Einfluss der Anlaufphase auf die mittleren NO_x-Emissionen bei einem Stufe-V-Raupenbagger mit Dieselmotor und 100 kW Nennleistung

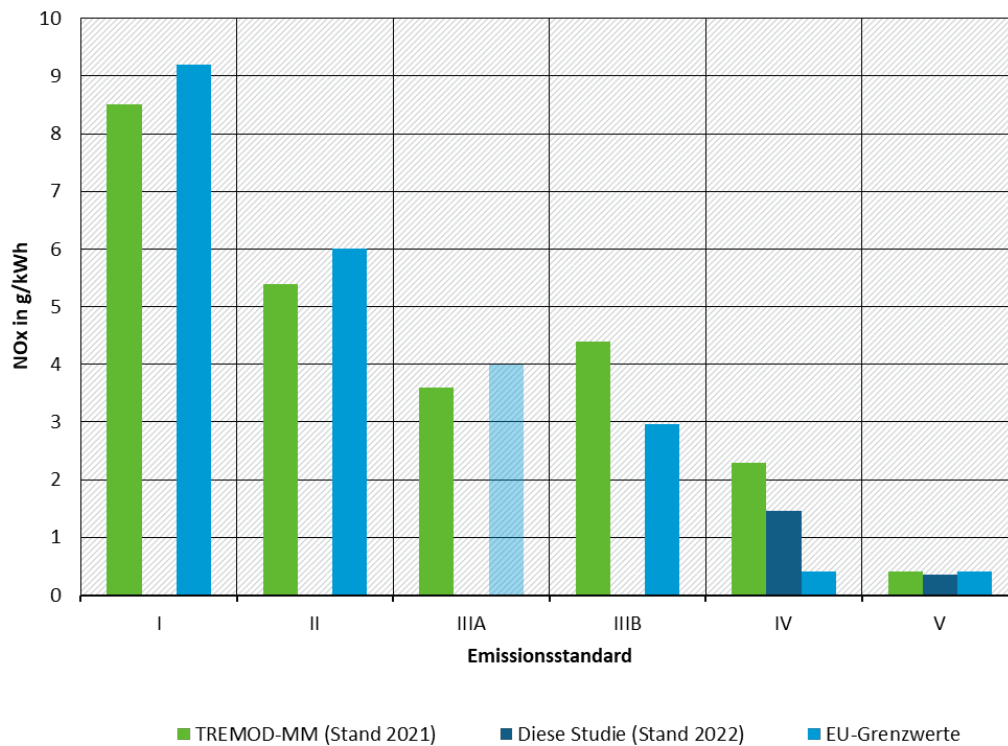


Quelle: ifeu Graphik.

Die durchschnittlichen NO_x-Emissionen für Stufe-V-Motoren sind damit etwa auf Höhe des Grenzwertes; im Gegensatz zu Stufe-IV-Motoren kommen Überschreitungen nur unter extremen und untypischen Betriebsbedingungen vor (siehe **Abbildung 3**). Auch bei den sonstigen regulierten Schadstoffen sind Realemissionsfaktoren durch die vorgegebenen Grenzwerte der Stufe V in den Abgasstufen stark gesunken: Die PM-Emissionen liegen mit weniger als 0,04 g/kWh im Realbetrieb teilweise noch leicht über dem Grenzwert von 0,025 g/kWh, aber dennoch auf einem sehr geringen Niveau gegenüber älteren Abgasstufen. Auch bei den anderen regulierten Schadstoffen zeigen die Ergebnisse dieser Studie einen deutlichen Rückgang der Emissionen durch die Einführung der Stufen IV und V. Die Realemissionen von CO liegen demnach mit weniger als 0,25 g/kWh und bei HC mit weniger als 0,025 g/kWh um ein Vielfaches unterhalb der gültigen Grenzwerte (CO: 5 g/kWh, HC: 0,19 g/kWh). Die Einführung der Stufe V ist anhand der bisher verfügbaren Daten demnach ein erfolgreicher Schritt zur Reduktion der Realemissionen.

Die in **Abbildung 3** dargestellten Emissionsfaktoren für ältere Abgasstufen stammen aus dem Emissionsmodell TREMOD-MM (Transport Emission Model – Mobile Machinery), welches die jährlichen deutschlandweiten Emissionen der mobilen Maschinen berechnet. Da in dieser Studie aktuellere und detailliertere Daten vorlagen, sollten die neu abgeleiteten Emissionsfaktoren für Stufe IV und V zur Aktualisierung des Modells TREMOD-MM genutzt werden. Der aktuelle Bestand der mobilen Maschinen umfasst jedoch viele weitere Geräte mit Stufe IIIB oder älter. Diese Emissionsfaktoren sollten daher in zukünftigen Forschungsprojekten ebenfalls überprüft werden, da sich zwischen den PEMS-Messungen der ausgewerteten Literatur und TREMOD-MM teils deutliche Abweichungen zeigen.

Abbildung 3: Mittlere NO_x-Emissionsfaktoren nach Abgasstufe für einen Raupenbagger mit Dieselmotor und 100 kW Nennleistung im Jahr 2020



Quelle: ifeu Graphik. Anmerkung: Für Stufe IIIA gilt ein Summengrenzwert (HC+NO_x) von 4,0 g/kWh.

Aktuelle Messdaten zum Thema Alterung und einer damit möglichen Emissionserhöhung lagen zum Zeitpunkt der Studie nicht vor. Daten zu schweren Nutzfahrzeugen im Handbuch Emissionsfaktoren Straßenverkehr (HBEFA) zufolge kann Alterung zu einer Erhöhung der NO_x-Emissionen um das bis zu knapp Fünffache im Lauf der gesamten Betriebsdauer führen. Zudem fehlen Messdaten zur Häufigkeit von Partikelfilterregenerationen bzw. zu möglichen Defekten oder Manipulationen der Abgasnachbehandlung und zu deren Auswirkung auf die Gesamtemissionen. Diese Aspekte sollten in zukünftigen Forschungsvorhaben betrachtet werden. Auch sollte die Verteilung und Länge der Leerlaufphasen weiter untersucht werden, da nur ein Teil der verwendeten Telematikauswertungen diese eindeutig wiedergab.

Mögliche Auswirkungen auf die Immissionsbelastung

Um den möglichen Einfluss der Realemissionen neuer Baumaschinen auf die lokale Schadstoffbelastung zu illustrieren, wurden Ausbreitungsberechnungen für einen realen Straßenabschnitt in Berlin, dem Mariendorfer Damm, durchgeführt. Dabei wurden die Schadstoffe NO_x, NO₂, PM₁₀ und PM_{2.5} mit MISKAM (Mikroskaliges Klima- und Ausbreitungsmodell) modelliert. Ergebnis ist ein Vergleich der lokalen Schadstoffbelastung jeweils mit und ohne eine hypothetische Baustelle.

Bei der NO_x-Konzentration führt der Einsatz von Maschinen der Stufe V immerhin zu einer relevanten Reduktion der potenziellen Zusatzbelastung durch Baustellen gegenüber den älteren Abgasstufen. Diese Reduktion kann im Einzelfall entscheidend für die Einhaltung der europäischen Grenzwerte sein kann, da diese teilweise noch über- bzw. nur knapp unterschritten werden. Leichte Abweichungen im Emissionsverhalten der Stufe-V-Maschinen im Realbetrieb werden hier keine wesentliche Verschlechterung der Konzentration verursachen.

Umgekehrt ist von einer weiteren Verschärfung der Emissionsgrenzwerte kein relevanter zusätzlicher Reduktionsbeitrag zu erwarten.

Insbesondere bei der Partikelmassekonzentration zeigt sich heute nur noch ein sehr geringer Einfluss der Abgasemissionen. Weitergehende abgasseitige Maßnahmen werden daher kaum nennenswert zur Reduktion lokaler Gesamtbelastungen beitragen können. Insbesondere die Vorbelastung sowie die lokalen Abrieb- und Aufwirbelungsemissionen sollten daher weiter untersucht werden und im Mittelpunkt weiterer Maßnahmen stehen. Die aktuell geltenden europäischen Grenzwerte werden hier jedoch weitgehend eingehalten.

Zentrale Empfehlungen zur Weiterentwicklung der NRMM-Verordnung

Die Stufe V ist in vielen Aspekten bereits sehr erfolgreich. Sie setzt sehr hohe Standards im internationalen Vergleich und führt zu einer deutlichen Reduktion der Schadstoffemissionen mobiler Maschinen im Realbetrieb. Der Entstehungsprozess der NRMM-Verordnung wurde von den interviewten Stakeholdern überwiegend positiv bewertet.

Die Grenzwerte und die einzuhaltenden Prüfbedingungen sind jedoch nicht für alle Maschinenkategorien gleichermaßen ambitioniert. Während Motoren der Leistungsklasse von 56 bis 560 kW ähnlich ambitionierte Grenzwerte wie Euro-VI-LKW erfüllen, erfordert die Stufe V bei Motoren unterhalb 56 kW kaum eine Reduktion der NO_x-Emissionen gegenüber den Stufen III/IV und ist mit Euro-IV-Lkw oder älteren Standards vergleichbar. Dieselmotoren für mobile Maschinen < 19 kW und für Binnenschiffe < 300 kW haben zusätzlich erhöhte PM-Grenzwerte und keinen PN-Grenzwert. Die Grenzwerte für Benzinmotoren entsprechen insgesamt weitgehend noch denen Stufe II (auch für CO und HC) und liegen damit weit hinter den Anforderungen moderner Pkw oder motorisierter Zweiräder zurück (vgl. Abbildung 4).

Abbildung 4: Übersicht Emissionsgrenzwerte der Stufe-V-NRMM-Kategorien im Vergleich zu Straßenfahrzeugen

		Dieselmotoren		Benzinmotoren	
Partikel	PM 0,025 – 0,4 g/kWh kein PN-Limit	Erhöhte Partikel-Grenzwerte  Generatoren (NRG) >560 kW ≈ PM Euro IV Lkw	Erhöhte Partikel- und NO_x-Grenzwerte  Maschinen (NRE) < 19 kW ≈ Euro II Lkw  Maschinen (NRE) >560 kW ≈ Euro IV Lkw  Binnenschiffe (IWP/ IWA) 19 - 300 kW ≈ Euro III Lkw  Lokomotiven (RLL) ≈ Euro IV Lkw	Erhöhte CO- und HC+NO_x-Grenzwerte:  Kleingeräte (NRSh) ≈ Euro 2 Mopeds*  Geräte bis 30 kW (NRS) ≈ Euro 1 Pkw*	CO 603-805 g/kWh Kohlenmonoxid
	PM ≤ 0,015 g/kWh PN ≤ 1x10 ¹² #/kWh	Niedrige Grenzwerte:  Maschinen 56-560 kW (NRE) ≈ Euro VI Lkw	Erhöhte NO_x-Grenzwerte:  Maschinen 19-56 kW (NRE) ≈ NO _x Euro IV Lkw  Binnenschiffe > 300 kW (IWP/IWA) ≈ NO _x Euro V Lkw  Triebwagen (RLR) ≈ NO _x Euro V Lkw	Erhöhte NO_x+HC-Grenzwerte:  Geräte 30-56 kW (NRS) ≈ Euro 2 Pkw*	CO 4,4 g/kWh Kohlenwasserstoffe
		NO _x +HC <1 g/kWh	NO _x +HC 1,8-7,5 g/kWh	NO _x +HC 2,7-72 g/kWh	
Stickoxide + Kohlenwasserstoffe					

Quelle: eigene Graphik. Anmerkungen: Dargestellte Piktogramme dienen als Beispiele und erheben keinen Anspruch auf Repräsentativität für alle Kategorien. *Der Vergleich bei Benzinmotoren bezieht sich auf NO_x+HC, die CO-Grenzwerte bei NRMM sind zum Teil deutlich höher als bei Pkw und Mopeds

Zudem schließt die aktuelle Gesetzgebung relevante Betriebssituationen aus der Bewertung des realen Emissionsverhaltens aus. Aus Sicht der Autoren sind daher folgende Ansätze zur Sicherstellung der Reduktion der Emissionen im gesamten realen Betrieb von herausgehobener Bedeutung:

- ▶ **Weitere Reduktion der Grenzwerte sowie Überwachung der Realemissionen für die Leistungsklassen kleiner 56 kW und größer 560 kW:** Aufgrund der weniger strengen Grenzwerte wird zukünftig insbesondere der Beitrag von Motoren unter 56 kW an den Schadstoffemissionen überproportional zunehmen. Eine Verschärfung der Grenzwerte bei Motoren < 56 kW und > 560 kW sollte daher geprüft werden. Damit einhergehend ist auch eine Ausweitung der ISM-Tests auf diese Motorengruppen sinnvoll. Inzwischen gibt es dazu bereits einen Regelungsentwurf, der nach derzeitigem Stand ISM-Tests für praktisch alle Maschinenkategorien und Leistungsgruppen vorschreiben würde (EU 2022). Eine Ausweitung von ISM-Tests auf weitere Motorenklassen wird daher aller Voraussicht nach, unabhängig von zukünftigen Bemühungen einzelner Mitgliedstaaten, auf EU-Ebene umgesetzt. Der Entwurf enthält derzeit jedoch noch keine Vorschläge für den Umgang mit Maschinen, an denen aufgrund ihrer Größe oder ihres Designs kein PEMS montiert werden kann, ohne den Realbetrieb einzuschränken. Hier sollte die EU-Kommission Lösungen mithilfe von eigenen Experten (JRC) oder technischen Beratern entwickeln. Im Rahmen dieser Entwicklung ist eine Kooperation mit den Herstellern zu empfehlen.
- ▶ **Überführung der ISM- in eine ISC-Gesetzgebung und Ausweitung auf Nichtbetriebsereignisse:** Zur Absicherung der Grenzwerte für neue Motortypen wird empfohlen, die In-Service Monitoring (ISM)- in eine In-Service Conformity (ISC)-Gesetzgebung zu überführen. Bei ISC-Tests dienen die Grenzwerte nicht mehr nur zum Vergleich, sondern müssen tatsächlich eingehalten werden. Das bedeutet, dass ab der Einführung von ISC-Tests alle neuen Maschinen auch im Realbetrieb unter den entsprechenden Grenzwerten liegen müssen. Da auch Nichtbetriebsereignisse für das gesamte Emissionsverhalten relevant sind, sollte eine stufenweise Ausweitung der Testbedingungen wie bei schweren Nutzfahrzeugen (SNF) erfolgen. Moderne SNF zeigen, dass die Emissionskontrolle auch in Betriebsphasen wie Kaltstart- oder Niederlast möglich ist. Dazu sind aber spezielle Maßnahmen bzw. Betriebsstrategien nötig, die die Temperatur des Abgases und somit auch die der Abgasnachbehandlung anheben, um die Katalysatoren, speziell die Katalysatoren mit selektiver katalytischer Reduktion (SCR), in ihr optimales Betriebsfenster zu bringen. Die gängigsten Maßnahmen sind eine späte und somit nicht wirkungsgradoptimale Verbrennung, Kraftstoffnacheinspritzung, Kraftstoffeinspritzung direkt vor dem Dieseloxydationskatalysator (DOC) oder eine Drosselung des Abgasstroms. Diese Maßnahmen erhöhen meist aber auch den Kraftstoffverbrauch und somit die CO₂-Emissionen. Der Zielkonflikt zwischen effektiver Verringerung der Schadstoffemissionen in allen Betriebsbereichen und die damit verbundene Erhöhung der CO₂-Emissionen sollte hinsichtlich der Auswirkung auf Luftqualität und Klima in die Überlegungen mit einfließen. Eine stufenweise Ausweitung der Testbedingungen auf Nichtbetriebsereignisse würde Herstellern in Anlehnung an die Gesetzgebung für SNF genügend Vorlaufzeit für möglicherweise notwendige Entwicklungsarbeit zur Einhaltung der Grenzwerte gewähren.

- **Überwachung der Emissionen über die gesamte Lebensdauer:** Mobile Maschinen und Geräte sind teilweise mehrere Jahrzehnte im Einsatz. Daher ist es wichtig, das Emissionsverhalten von mobilen Maschinen und Geräten bis zu ihrem Lebensende zu überwachen und bei Manipulation oder Fehlfunktionen einzelner Komponenten, die merkliche Emissionserhöhungen mit sich bringen, einzugreifen, um die Emissionen auch nach vielen Jahren Einsatzzeit noch auf geringem Niveau halten zu können. Die derzeitige Gesetzgebung ist dafür unzureichend. Um ein geringes Emissionsniveau über die gesamte Lebensdauer abzusichern, ist hier wieder die Überführung der ISM- in eine ISC-Gesetzgebung (siehe voriger Punkt) zu nennen. Zusätzlich sollten unabhängige Tests von Drittparteien an Maschinen aus einer Flotte auch Gültigkeit hinsichtlich der Prüfung der Einhaltung der Emissionsvorschriften im Realbetrieb haben. Zudem sollte die Selbstüberwachung der Maschinen, welche derzeit nur eine Überprüfung der Funktion der NO_x- und Partikelreduktionssysteme beinhaltet, in eine On-Board-Diagnose (OBD)-Gesetzgebung, ähnlich wie bei schweren Nutzfahrzeugen, überführt werden.
- **Minderung der Treibhausgasemissionen:** Auch im Bereich der NRMM wird die Minderung der Treibhausgasemissionen notwendig werden. Gute Beispiele sind hier Null-Emissionsantriebe, z.B. batteriebetriebene elektrische Fahrzeuge (Battery Electric Vehicle; BEV) oder Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug (Fuel Cell Electric Vehicle; FCEV). Der Königsweg ist die direkte Elektrifizierung, da sie deutlich energieeffizienter als der Einsatz von Wasserstoff oder synthetischem Kraftstoff ist. Vor allem Kleingeräte werden seit Jahren zunehmend batterieelektrisch verkauft. Aufgrund der geringeren Energiedichte von Batterien im Vergleich zu flüssigen Kraftstoffen, Kühlungsmöglichkeiten oder maximalem Leistungsbedarf können jedoch nicht alle Maschinentypen problemlos elektrifiziert werden. Daher wird auch die Verwendung von nachhaltigen Bio- und synthetischen Kraftstoffen in NRMM-Verbrennungskraftmaschinen mittelfristig notwendig. Hinsichtlich der verschiedenen Defossilisierungsansätze bei NRMM sind daher weitere Untersuchungen unter Einbindung von Experten und Stakeholdern sinnvoll, um Klarheit und Handlungssicherheit für alle beteiligten Akteure zu schaffen. Dabei sollten in Anlehnung an die Weiterentwicklung der SNF-Gesetzgebung nicht nur die CO₂-Emissionen, sondern auch andere klimawirksame Treibhausgase, insbesondere N₂O, mit einbezogen werden.

Summary

Background

Non Road Mobile Machinery (NRMM), such as construction machinery, tractors or lawn mowers, are one of the main mobile sources of pollutant emissions. Particulate matter and nitrogen oxide emissions from mobile machinery and equipment make a relevant contribution to emissions and immission levels in Germany. In addition to the sometimes high annual operating hours, this is mainly due to the later and less stringent emission legislation for mobile machinery compared to road vehicles.

The emission limits for newly marketed engines for NRMM in Germany are set at the European level. The currently valid Stage V becomes legally binding with EU Regulation 2016/1628 and represents the most ambitious and comprehensive regulation to date. The subject matter covers a broad spectrum of machinery and equipment, ranging from small gardening tools to large construction machinery and inland waterway vessels. Among other things, for the first time, limits were introduced for diesel engines with a power output of less than 19 kW, and a limit value for the number of particulates was introduced for engines with a power output of more than 19 kW. With a few exceptions, the limits for larger diesel engines are based on the Euro VI emissions standard for heavy-duty commercial vehicles. In addition, engines must report their emissions in real-world operation to the EU Commission as part of in-service monitoring measurements.

The project "Further development of Regulation (EU) No. 2016/1628 for non-road mobile machinery" analyzes the effects of the NRMM Regulation with a focus on two aspects:

- The investigation of real emissions of new mobile machinery and equipment and their impact on ambient air pollution.
- The analysis of the current "regulatory practice" with regard to the regulatory framework and the measurement methods and, based on this, the derivation of proposals for a possible further development of the NRMM Ordinance.

With regard to real emissions, numerous studies, telematics data from various machine operators, and our own measurements with Portable Emission Measurement Systems (PEMS) were collected and analyzed. The focus was on agricultural and construction machinery with diesel engines between 56 and 560 kW nominal power. As part of the measurements carried out in-house, it was also evaluated for which mobile machines and equipment measurements are possible in real operation without restricting the work processes and for which machine types or sizes this does not work. Interviews were conducted with scientists and representatives of authorities and industry to record "regulatory practice". In addition, the interim results were discussed in two stakeholder workshops with representatives from politics, industry and science, and feedback was continuously incorporated.

Findings on the emissions of new machines in real operation

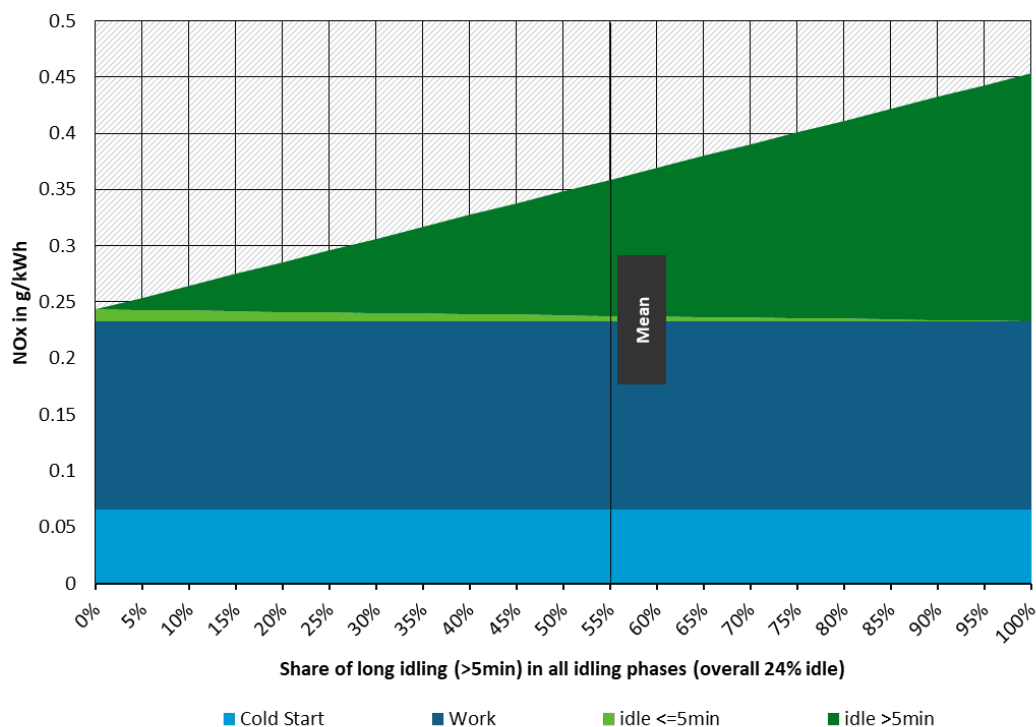
For the analysis of real emissions, measurement data from 20 Stage IV and 7 Stage V engines were evaluated. When the engine is at warm temperature, i.e. during the "normal" operating phase, emissions are mostly below the limit values, whereas the effectiveness of exhaust gas aftertreatment drops drastically when the engine is cold. In order to map these influencing factors as representatively as possible, the following steps were performed:

- Analysis and definition of relevant operating conditions, e.g., cold start, idling >5 min, light/medium/heavy work, etc.

- Determination of specific emission factors for these states from PEMS measurements.
- Determination of the proportion of operating states for different machine categories from telematics data.

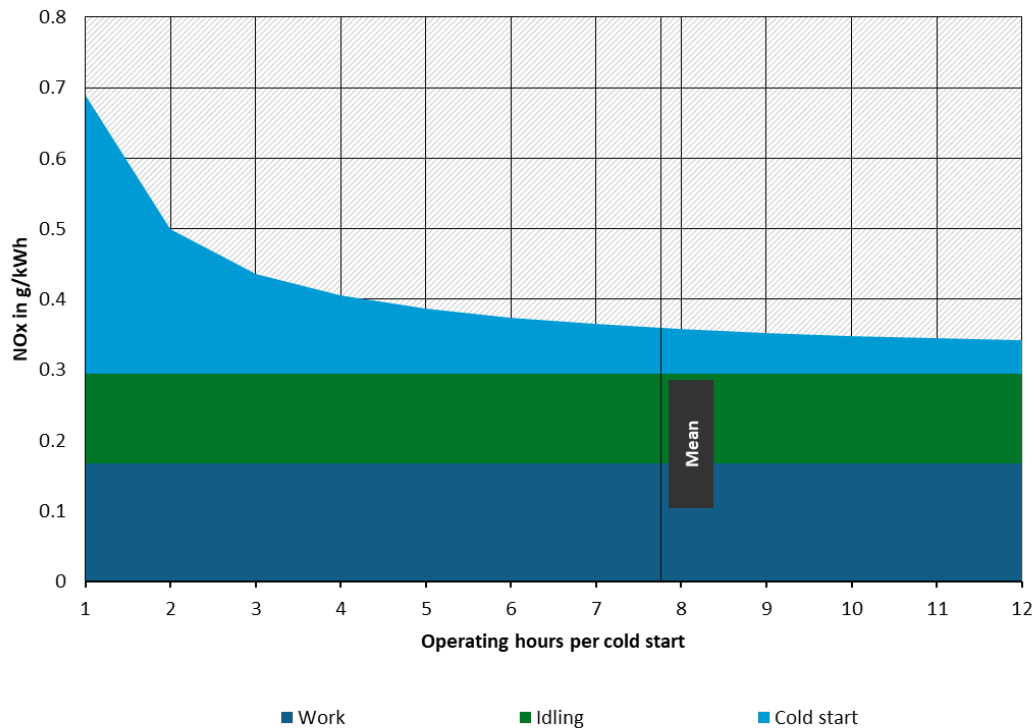
Figure 1 and Figure 2 present examples of the average NO_x emissions of a crawler excavator proportionally by operating state, showing the influence of the idling period and the cold start phase. On average, the crawler excavator has an idling proportion of 24% in total, 13% of which is longer than 5 min, and one cold start per approx. working day, i.e. approx. every 8 operating hours. These non-operating events excluded under the ISM thus together account for about half of the determined real NO_x emissions at Stage IV, with lower or higher proportions possible depending on the load profile and machine category. This means that the results valid under the ISM can significantly underestimate the average real emissions.

Figure 1: Effect of the idling phase to the mean NO_x emissions for a crawler excavator with a stage V diesel engine and 100 kW rated power.



Source: figure by ifeu

Figure 2: Effect of the start-up phase on the mean NO_x emissions for a crawler excavator with a stage V diesel engine and 100 kW rated power.

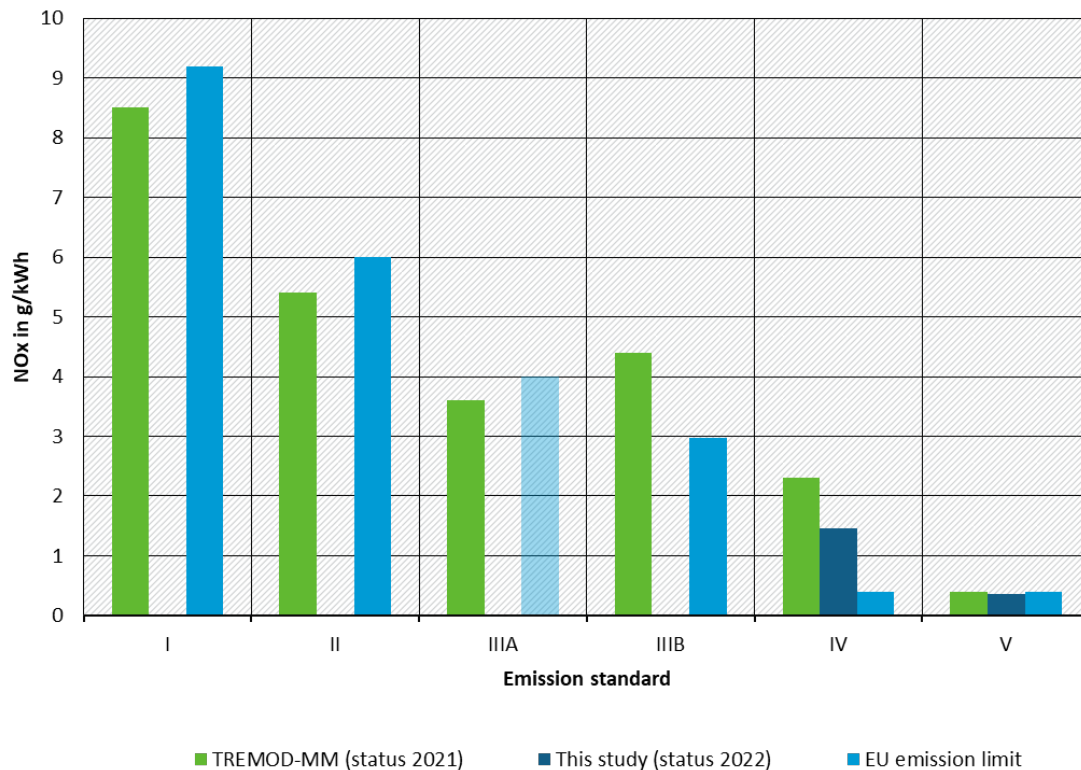


Source: figure by ifeu

The average NO_x emissions for Stage V engines are thus roughly at the level of the limit value and, in contrast to Stage IV engines, exceedances only occur under extreme and atypical operating conditions (see Figure 3). Real emission factors for the other regulated pollutants have also fallen sharply as a result of the Stage V exhaust gas stages: PM emissions of less than 0.04 g/kWh in real operation are still slightly above the limit value of 0.025 g/kWh in some cases, but still at a very low level compared with older exhaust gas stages. The results of this study also show a significant reduction in emissions of the other regulated pollutants as a result of the introduction of stages IV and V. Real emissions of CO, at less than 0.25 g/kWh, and HC, at less than 0.025 g/kWh, are thus many times below the applicable limits (CO: 5 g/kWh, HC: 0.19 g/kWh). Based on the data available to date, the introduction of Stage V is therefore a successful step toward reducing real emissions.

The emission factors for older exhaust stages shown in data Figure 3 are taken from the TREMOD-MM (Transport Emission Model - Mobile Machinery) emission model, which calculates the annual Germany-wide emissions of mobile machinery. Since more recent and detailed data were available in this study, the newly derived emission factors for Stage IV and V should be used to update model TREMOD-MM. However, the current inventory of mobile machinery still includes many units with Stage IIIB or older. These emission factors should therefore also be reviewed in future research projects, as there are sometimes significant discrepancies between the PEMS measurements in the literature evaluated and TREMOD-MM.

Figure 3: Average NO_x emission factors by exhaust gas stage for a crawler excavator with 100 kW diesel engine in 2020



Source: figure by ifeu. Note: Stage IIIA has a sum limit (HC+NO_x) of 4,0 g/kWh.

Current measurement data on the subject of aging and a possible increase in emissions were not available at the time of the study. According to data on heavy-duty vehicles in the Handbook of Emission Factors for Road Traffic (HBEFA), this can lead to an increase in NO_x emissions of up to almost five times over the entire operating life. In addition, there is a lack of measurement data on the frequency of particulate filter regenerations or on possible defects/manipulations in exhaust gas aftertreatment and their effect on overall emissions. These aspects should be considered in future research projects. The distribution and length of idling phases should also be investigated further, as only some of the telematics evaluations used clearly reflected these.

Possible effects on the local air pollution

To illustrate the possible influence of real emissions from new construction machinery on local pollution levels, dispersion calculations were carried out for a real road section in Berlin, the Mariendorfer Damm. The pollutants NO_x, NO₂, PM₁₀ and PM_{2.5} were modeled with MISKAM (Micro-scale Climate and Dispersion Model). The result is a comparison of the local pollutant load in each case with and without a hypothetical construction site.

In the case of NO_x concentrations, at least the use of Stage V machines still leads to a relevant reduction in the potential additional pollution from construction sites compared with the older exhaust gas stages, which in individual cases can also be decisive for compliance with the European limit values, since these are sometimes still exceeded or only just undercut. Slight deviations in the emission behavior of Stage V machines in real operation will not cause any significant deterioration in the concentration here. Conversely, no relevant additional reduction contribution is to be expected from a further tightening of the emission limits.

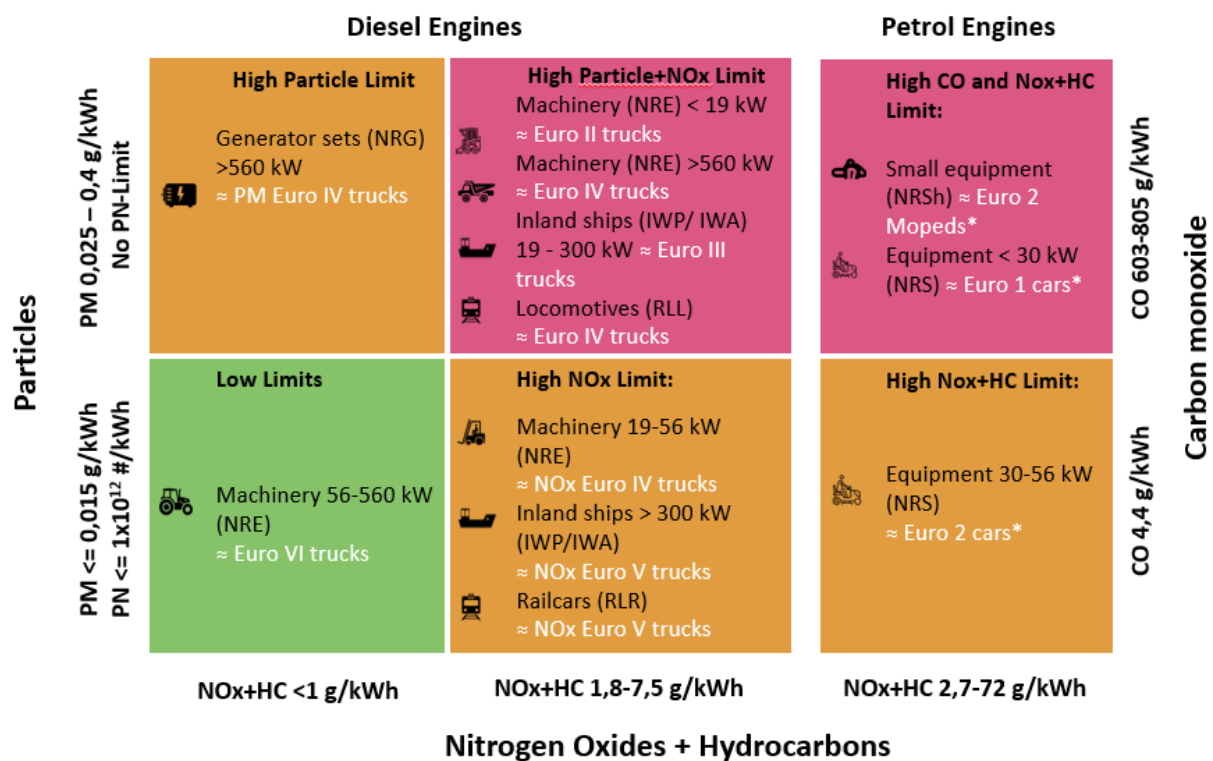
Particularly for particulate matter concentrations, only a very small influence of exhaust emissions is evident today. Further exhaust-side measures will therefore hardly be able to make a significant contribution to reducing overall local pollution. In particular, pre-pollution and local abrasion and swirl emissions should therefore be investigated further and be the focus of further measures. However, the currently applicable European limit values are largely complied with here.

Key recommendations for the further development of the NRMM regulation

Stage V is already very successful in many aspects. It sets very high standards in an international comparison and leads to a significant reduction in pollutant emissions from mobile machinery in real-world operation. The development process of the NRMM regulation was predominantly evaluated positively by the interviewed stakeholders.

However, the limit values and the test conditions to be met are not equally ambitious for all machine categories. While engines in the 56 to 560 kW power class meet similarly ambitious limits as Euro VI trucks, Stage V requires hardly any reduction in NO_x emissions for engines below 56 kW compared to Stages III/IV and is comparable to Euro IV trucks or older standards. Diesel engines for mobile machinery < 19 kW and for inland waterway vessels < 300 kW have additionally increased PM limits and no PN limit. Overall, the limit values for gasoline engines still largely correspond to Stage II (also for CO and HC) and are thus far behind the requirements of modern passenger cars or motorized two-wheelers ().

Figure 4: Overview of emission limits for Stage V NRMM categories compared with road vehicles



Source: Own figure. Notes: Pictograms shown serve as examples and do not claim to be representative for all categories.

*The comparison for gasoline engines refers to NO_x+HC, the CO limits for NRMM are in some cases significantly higher than for passenger cars and mopeds.

In addition, current legislation excludes relevant operating situations from the evaluation of real emissions behavior. From the authors' point of view, the following approaches to ensure the reduction of emissions throughout real operation are therefore of outstanding importance:

- ▶ **Further reduction of the limit values as well as monitoring of real emissions for the power classes smaller than 56 kW and larger than 560 kW:** Due to the less stringent limit values, the contribution of engines below 56 kW in particular to pollutant emissions will increase disproportionately in the future. A tightening of the limits for engines < 56 kW and > 560 kW should therefore be examined. This should be accompanied by an extension of the ISM tests to these engine groups. In the meantime, there is already a draft regulation in this regard which, according to the current status, would prescribe ISM tests for practically all machine categories and power groups (EU 2022). An extension of ISM tests to further engine classes will therefore in all likelihood be implemented at EU level, irrespective of future efforts by individual member states. However, the draft does not currently contain any proposals for dealing with machines on which, due to their size or design, no PEMS can be fitted without restricting real-world operation. Here, the EU Commission should develop solutions with the help of its own experts (JRC) or technical consultants. Cooperation with manufacturers is recommended as part of this development. From the point of view of the authors, the following approaches to ensuring the reduction of emissions throughout real operation are therefore of outstanding importance:
- ▶ **Conversion of ISM legislation into ISC legislation and extension to non-operating events:** To safeguard the limit values for new engine types, it is recommended that the In-Service Monitoring (ISM) legislation be transferred to In-Service Conformity (ISC) legislation. With ISC tests, the limit values are no longer just for comparison, but must actually be complied with. This means that from the introduction of ISC tests, all new machines must also be below the corresponding limit values in real operation. Since non-operating events are also relevant for the overall emission behavior, a gradual extension of the test conditions should take place as for heavy-duty vehicles (SNF). Modern SNF show that emission control is also possible in operating phases such as cold start or low load. However, this requires special measures or operating strategies that raise the temperature of the exhaust gas, and thus that of the exhaust aftertreatment, to bring the catalysts, especially those with selective catalytic reduction (SCR), into their optimal operating window. The most common measures are late and thus not efficiency-optimized combustion, fuel post-injection, fuel injection directly upstream of the diesel oxidation catalyst (DOC) or throttling of the exhaust gas flow. However, these measures usually also increase fuel consumption and thus CO₂ emissions. The trade-off between effective reduction of pollutant emissions in all operating ranges and the associated increase in CO₂ emissions should be taken into account in terms of the impact on air quality and climate. A gradual extension of test conditions to non-operating events would give manufacturers sufficient lead time, following SNF legislation, for any development work that may be necessary to meet the limits.
- ▶ **Monitoring of emissions over the entire service life:** Mobile machines and equipment are sometimes in use for several decades. It is therefore important to monitor the emission behavior of mobile machinery and equipment until the end of its life and to intervene in the event of manipulation or malfunction of individual components that result in noticeable increases in emissions, in order to be able to keep emissions at a low level even after many

years of use. Current legislation is inadequate for this purpose. In order to ensure a low level of emissions over the entire service life, the transfer of ISM legislation to ISC legislation (see previous point) should again be mentioned here. In addition, independent third party testing of machines from a fleet should also be valid in terms of testing compliance with emission regulations in real-world operation. Furthermore, the self-monitoring of machines, which currently only involves checking the function of the NO_x and particulate reduction systems, should be transferred to on-board diagnostics (OBD) legislation, similar to that for heavy-duty vehicles.

- **Mitigation of greenhouse gas emissions:** Mitigation of greenhouse gas emissions will also become necessary in the NRMM sector. Good examples here are zero-emission powertrains, e.g., battery electric vehicles (BEV) or fuel cell electric vehicles (FCEV). The silver bullet is direct electrification, as it is significantly more energy efficient than using hydrogen or synthetic fuel. Small appliances in particular have been increasingly sold battery-electric for years. However, not all machine types can be easily electrified due to the lower energy density of batteries compared to liquid fuels, cooling options or maximum power requirements. Therefore, the use of sustainable biofuels and synthetic fuels in NRMM internal combustion engines will also become necessary in the medium term. With regard to the various defossilization approaches in NRMM, further investigations involving experts and stakeholders are therefore advisable in order to create clarity and certainty of action for all players involved. In line with the further development of SNF legislation, this should include not only CO₂ emissions but also other climate-impacting greenhouse gases, in particular N₂O.

1 Hintergrund der Studie

Mobile Maschinen und Geräte stellen eine wichtige Quelle motorischer Emissionen dar, deren Emissionsregulierung jedoch gegenüber Straßenfahrzeugen erst deutlich später erfolgte. Die Partikel- und Stickoxidemissionen der mobilen Maschinen und Geräte tragen daher relevant zur Emissions- und Immissionsbelastung in Deutschland bei. Gemäß der Emissionsberichtserstattung des UBA (NFR-Tabellen 2016, siehe (UBA 2019)) verursachten mobile Maschinen in Haushalten, Land- und Bauwirtschaft, Industrie sowie der Binnenschifffahrt im Jahr 2016 ca. 90 kt NO_x (9 % national total), 7 kt PM_{2,5} (7 % national total) und 30 kt NMVOC (4% national total). Immissionsseitig haben Modellrechnungen in (Helms und Heidt 2014) für eine mittelgroße Baustelle in Berlin am Mariendorfer Damm gezeigt, dass Abgase von Baumaschinen im Jahresmittel lokale Zusatzbelastungen in Höhe von bis zu 7 µg PM_{2,5}/m³ und bis zu 10 µg NO₂/m³ verursachen können, was in beiden Fällen etwa 20% der Belastung ohne Baustelle entspricht.

Verglichen mit dem Straßenverkehr sind es im Bereich der NRMM in Deutschland vergleichsweise wenige Maschinen, insbesondere die knapp über 1 Mio. landwirtschaftlichen Zugmaschinen, etwa 250.000 - 400.000 Baumaschinen mit mehr als 19 kW (Helms und Heidt 2014) sowie eine Flotte von über 4.000 Binnenschiffen (über 18.000 europaweit) (IVR 2017), welche maßgeblich für die hohen Partikel- und NO_x-Emissionen verantwortlich sind. Neben den zum Teil hohen jährlichen Betriebsstunden ist dies vor allem in der späteren und weniger strengen Emissionsgesetzgebung mobiler Maschinen begründet (siehe (Helms und Heidt 2014)).

Die Emissionsgrenzwerte für neu in den Markt gebrachte Motoren für NRMM in Deutschland werden auf europäischer Ebene festgelegt. Die Einführung von Emissionsgrenzwerten für NRMM erfolgte mit der EU-Richtlinie 97/68/EC und der sogenannten Stufe I ab dem Jahr 1999. Die Grenzwerte werden dabei nach Motorenkategorien und Leistungsklassen differenziert. Binnenschiffsmotoren wurden zunächst ab dem Jahr 2003 im Rahmen der Rheinschiffsuntersuchungsordnung (RheinSchUO) durch die Zentralkommission für die Rheinschiff-fahrt (ZKR) reguliert und später mit der Stufe IIIA in die EU-Regulierung aufgenommen. Weitere Richtlinien haben die Emissionsgrenzwerte seither ergänzt und ersetzt.

Die aktuell gültige Stufe V (festgeschrieben in der EU-Verordnung 2016/1628) stellt die bisher ambitionierteste und umfassendste Regulierung dar. Gegenstand ist ein breites Spektrum an Maschinen und Geräten, das von kleinen Gartengeräten bis zu großen Baumaschinen und Binnenschiffen reicht. Dabei wurden bei Selbstzündern u.a. erstmals auch kleinere Leistungsklassen < 19 kW einbezogen sowie ein Grenzwert für die Partikelanzahl eingeführt. Die Grenzwerte für Dieselmotoren orientieren sich dabei (mit wenigen Ausnahmen) am Niveau der schweren Nutzfahrzeuge der Stufe Euro VI.

Das Projekt „Fortentwicklung der Verordnung (EU) Nr. 2016/1628 für Mobile Maschinen und Geräte“ hat nun zwei Schwerpunkte mit Bezug auf die derzeitige Regulierung, die der vorliegende Abschlussbericht zum aktuellen Stand dokumentiert:

- Die Untersuchung der Realemissionen neuer mobiler Maschinen und Geräte und ihrer Auswirkungen auf die Immissionsbelastung (Abschnitt 2).
- Die Analyse des aktuellen „Regulierungspraxis“ (Abschnitt 3) hinsichtlich der Regelwerke und der Messverfahren und darauf aufbauend die Ableitung von Vorschlägen für eine mögliche Weiterentwicklung der NRMM-Verordnung.

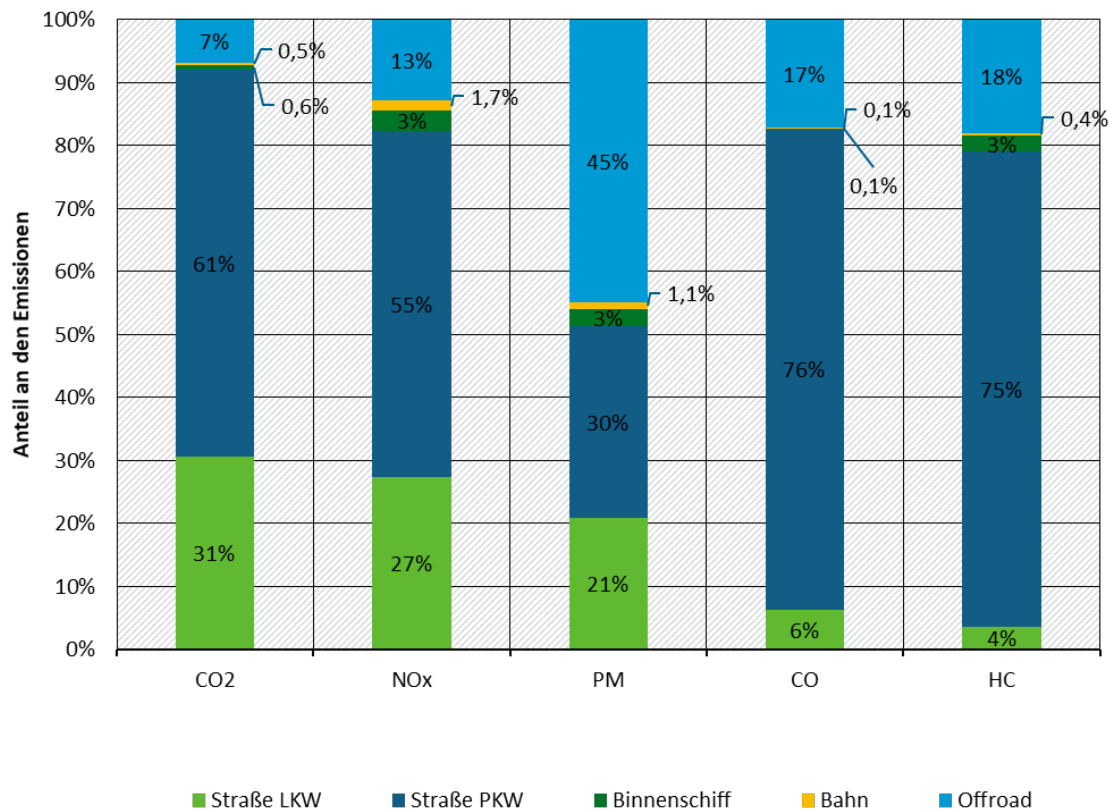
Bezüglich der Realemissionen wurden umfangreiche Emissionsdaten und Nutzungsprofile gesammelt und analysiert. Ergänzt wurden die Literatur- und Betreiberdaten durch Messungen mit Portable Emission Measurement Systems (PEMS). Zur Erfassung der „Regulierungspraxis“ wurden zahlreiche Interviews mit Wissenschaftlern sowie Behörden- und Industrievertretern geführt. Zusätzlich wurden die Zwischenergebnisse im Rahmen von zwei Stakeholderworkshops mit Vertretern von Politik, Industrie und Wissenschaft diskutiert und Rückmeldungen kontinuierlich eingearbeitet.

2 Realemissionen mobiler Maschinen und Geräte

2.1 Emissionen mobiler Maschinen und Geräte deutschlandweit

Der Anteil mobiler Maschinen an den Abgasemissionen in Deutschland lässt sich anhand aktueller Schätzungen von ifeu mittels der Modelle TREMOD und TREMOD-MM wiedergeben (Heidt et al. 2020; Knörr et al. 2020). An den mobilen Quellen, d.h. Straßenverkehr, Bahn, und Binnenschifffahrt) verursacht der Offroad-Sektor¹ beispielsweise ca. 7% der CO₂-Emissionen, 13% der NO_x und 45% der PM-Emissionen (siehe Abbildung 5). Die Bahn und Binnenschifffahrt, deren Motoren ebenfalls unter die Abgasgesetzgebung der mobilen Maschinen fällt, haben nur einen sehr geringen Anteil an den Gesamtemissionen. Auffällig ist jedoch, dass der Anteil der Luftschadstoffemissionen mobiler Maschinen überproportional hoch ist im Vergleich zum Anteil der CO₂-Emissionen. Dies betrifft im Grunde alle Arten von mobilen Maschinen und lässt sich unter anderem auf eine verzögerte Einführung der europäischen Emissionsgrenzwerte gegenüber Pkw und Lkw erklären.

Abbildung 5: Verhältnis von NRMM zum Straßenverkehr an den Abgasemissionen in Deutschland 2019



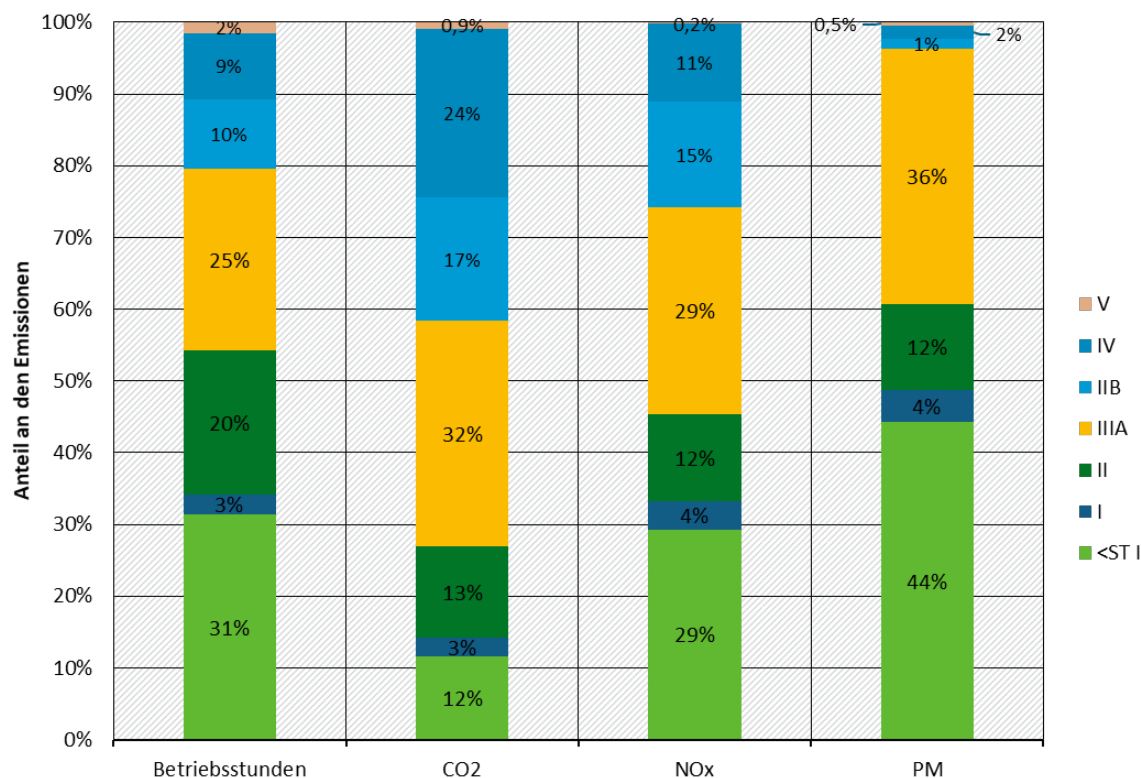
Quelle: Straße, Binnenschiff, Bahn nach TREMOD 6.22, Offroad nach TREMOD-MM 5.31.

Innerhalb des Offroad-Sektors sind es vor allem die dieselbetriebenen Maschinen aus der Land- und Bauwirtschaft, die zu den CO₂, Nox und PM-Emissionen beitragen, während benzinbetriebene Kleingeräte wie z.B. Motorsägen oder Rasenmäher stärker zu den CO und HC-Emissionen beitragen. Anhand der in TREMOD-MM verwendeten Eingangsdaten zeigt sich, dass

¹ Mit Offroad gemeint sind mobile Maschinen und Geräte in den Bereichen, Land- und Forst-, Bauwirtschaft, Industrie, Garten und Hobby sowie Sportboote und Freizeitschiffe

ein Großteil des Bestands mobiler Maschinen noch aus älteren Geräten besteht. Zwar werden diese mit zunehmendem Alter in der Regel kaum noch genutzt, aber dennoch machen Geräte die noch keinen Grenzwert erfüllen 31% der jährlichen Betriebsstunden aus (siehe Abbildung 6). Dabei handelt es sich nicht nur um ältere Geräte, sondern auch um Geräte mit einer Nennleistung <19 kW, für welche erst seit dem Jahr 2019 mit der Stufe V erstmalig Emissionsgrenzwerte eingeführt worden sind. Nur ca 10% der Betriebsstunden stammt von Geräten, die die Anforderungen der Stufe IV oder V erfüllen. Dieselben Geräte haben jedoch mit ca. 25% einen deutlich höheren Anteil an den CO₂-Emissionen, da es sich um größere Leistungsklassen mit entsprechend höherem CO₂-Ausstoß pro Betriebsstunde handelt. Bei den NO_x und PM-Emissionen sinkt der Anteil je neuer die Geräte und je höher die Abgasstufe und steigt umgekehrt je älter die Geräte sind. Daher waren im Jahr 2019 die älteren Maschinen auch diejenigen, die am meisten zu Emissionen beitrugen, z.B. verursachten Maschinen mit Stufe IIIB oder älter 89% der NO_x-Emissionen und Stufe IIIA oder älter sogar 96% der Partikelmasse.

Abbildung 6: Anteil der einzelnen Emissionsstufen an den Betriebsstunden und den Abgasemissionen aller mobilen Maschinen in Deutschland 2019



Quelle: TREMOD-MM 5.31.

Die zugrunde gelegten Emissionsfaktoren dieser Ergebnisse stammen aus dem Modell TREMOD-MM 5.31 (vgl. auch Kapitel 2.5.3) und berücksichtigen noch nicht die neusten Erkenntnisse zu den Realemissionen, die in der vorliegenden Studie gesammelt wurden und in den folgenden Kapiteln erläutert werden. Die Grundaussagen dieses Kapitels dürften nach dem aktuellen Stand auch in Anbetracht der neuen Erkenntnisse weitgehend übereinstimmen. Wie zum Ende des Berichts angemerkt wird, wäre eine zukünftige Aktualisierung der Emissionsfaktoren in TREMOD-MM dennoch sinnvoll, vor allem um zukünftige Jahre mit steigendem Anteil an Stufe IV und V Maschinen zuverlässig abzubilden.

2.2 Emissionsgesetzgebung Stufe V

Seit 2019 gilt die Emissionsstufe V für mobile Maschinen und Geräte. Diese wird in [Regulation (EU) 2016/1628] (EU 2016a) beschrieben und durch die [Regulation (EU) 2017/654] (EU 2016b) und [Regulation (EU) 2017/655] (EU 2017) ergänzt. Darin wird unter anderem festgelegt, welche Grenzwerte für welche Maschinengruppen gelten.

Die Struktur der Grenzwerte für die einzelnen Motorenklassen sind am Beispiel der Kategorie „NRE“ in Tabelle 1 dargestellt. Die Klasse NRE (Non-Road Engines) umfasst Motoren für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte, die dazu bestimmt und dafür geeignet sind, sich – auf der Straße oder auf andere Weise – zu bewegen oder bewegt zu werden, z.B. Bagger oder Radlader. Die Grenzwertstrukturen für die weiteren Kategorien NRG (Bezugsleistung > 560 kW, ausschließlich Einsatz in Generatorsätzen), NRSh (Bezugsleistung < 19 kW, handgehaltene Fremdzündungsmotoren), NRS (Bezugsleistung < 56 kW, Fremdzündungsmotoren außerhalb der Klasse NRSh), IWA (Bezugsleistung > 19 kW, Hilfsmotoren für Binnenschiffe), RLL (Antrieb von Lokomotiven), RLR (Antrieb von Triebwagen und anstelle von Stufe V-Motoren der Klasse RLL), SMB (Fremdzündungsmotoren für den Einsatz in Motorschlitten), ATS (Fremdzündungsmotoren für ATV und SbS) sind ähnlich gestaltet. [Regulation (EU) 2016/1628]

Tabelle 1: Emissionsgrenzwerte Maschinenkategorie NRE [Regulation (EU) 2016/1628]

Emissionsstufe	Motorenunterklasse	Leistungsbereich [kW]	Art der Zündung	CO [g/kWh]	HC [g/kWh]	NOx [g/kWh]	PM [g/kWh]	PN [# / kWh]
Stufe V	NRE-v-1, NRE-c-1	0 < P < 8	CI	8,00	HC + NOx ≤ 7,50		0,40	-
Stufe V	NRE-v-2, NRE-c-2	8 ≤ P < 19	CI	6,60	HC + NOx ≤ 7,50		0,40	-
Stufe V	NRE-v-3, NRE-c-3	19 ≤ P < 37	CI	5,00	HC + NOx ≤ 4,70		0,015	1x10 ¹²
Stufe V	NRE-v-4, NRE-c-4	37 ≤ P < 56	CI	5,00	HC + NOx ≤ 4,70		0,015	1x10 ¹²
Stufe V	NRE-v-5, NRE-c-5	56 ≤ P < 130	Alle	5,00	0,19	0,40	0,015	1x10 ¹²
Stufe V	NRE-v-6, NRE-c-6	130 ≤ P ≤ 560	Alle	3,50	0,19	0,40	0,015	1x10 ¹²
Stufe V	NRE-v-7, NRE-c-7	P > 560	Alle	3,50	0,19	3,50	0,045	-

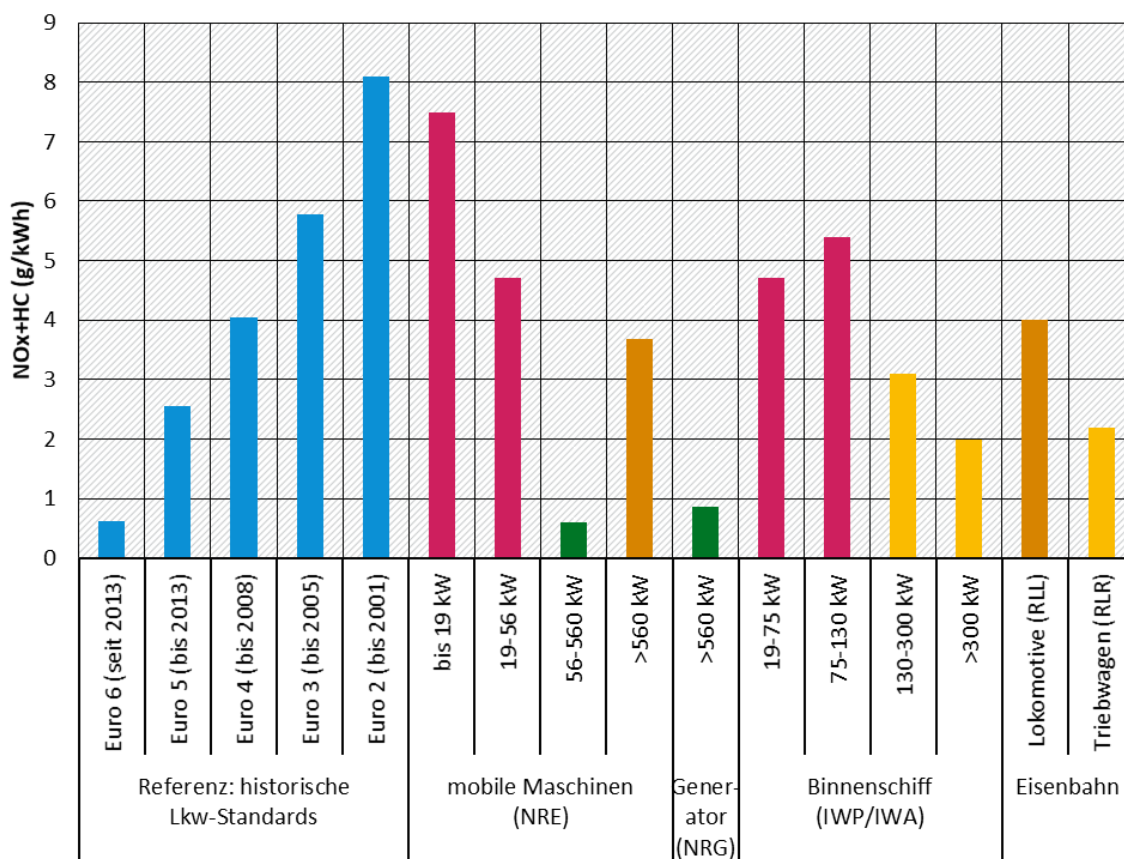
NRE-v steht dabei für Motoren für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte mit variabler Drehzahl. Die NRE-c Kategorien deckt Motoren der gleichen Kategorie mit konstanter Drehzahl ab. Die Motorenklassen NRE-v-5 und NRE-v-6 müssen zusätzlich zu den für alle gültigen Motorprüfstandtests ihr Realemissionsverhalten anhand von ISM-Tests an den Gesetzgeber berichten. [Regulation (EU) 2017/655] (EU 2017)

Die Grenzwerte der Kategorien NRE-v-5 und NRE-v-6 liegen auf ähnlichem Niveau wie die Grenzwerte für schwere Nutzfahrzeuge. Dies ist aufgrund der ähnlichen Motoren- und Abgasnachbehandlungstechnologie von mobilen Maschinen und schweren Nutzfahrzeugen auch sinnvoll. Bei detaillierter Betrachtung fällt aber auf, dass der NO_x-Grenzwert von mobilen Maschinen etwas geringer (SNF: 0,46 g/kWh) und der PN-Grenzwert etwas höher (SNF: 1x10¹¹) ist. Um diese zu erreichen setzen Stufe V mobile Maschinen und Geräte gleich wie SNF auf eine innermotorische NO_x-Reduktion durch Abgasrückführung und auf eine Abgasnachbehandlung mit DOC, DPF und SCR.

Mobile Maschinen und Geräte der Klassen v-1/c-1, v-2/c-2, v-3/c-3 und v-4/c-4 unterliegen weniger strengen Grenzwerten. Dies ist vor allem bei NO_x und PN zu erkennen, wo es teilweise sogar keinen Grenzwert gibt. Diese Grenzwerte können auch durch motorische Maßnahmen ohne aufwändige Abgasnachbehandlung erreicht werden. Bei diesen Klassen wäre eine Installation einer Abgasnachbehandlung aus Bauraumgründen teilweise auch sehr anspruchsvoll.

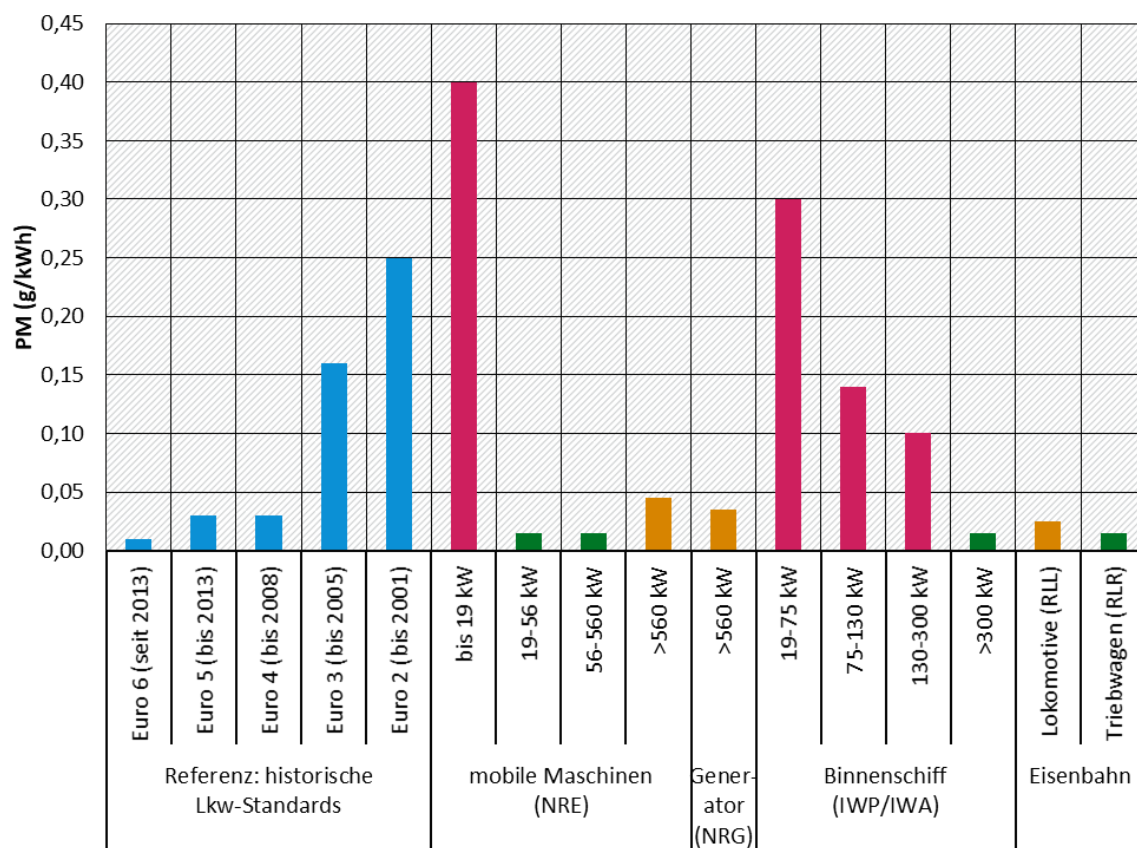
Auch für die sonstigen Motorenkategorien, d.h. für Binnenschiffe (IWA/IWP), Lokomotiven (RLL, RLR), Generatoren (NRG) und insbesondere Benzinmotoren für Kleingeräte (NRE) sind die Grenzwerte deutlich weniger streng als für vergleichbare Straßenfahrzeuge wie die folgenden Darstellungen (Abbildung 7 bis Abbildung 10) verdeutlichen. Hervorzuheben ist auch noch, dass Benzinmotoren für NRMM im Gegensatz zu modernen Pkw oder Mopeds keine Partikelmasse- bzw. im Gegensatz zu Pkw ab Euro 6 keine Partikelanzahlgrenzwerte haben.

Abbildung 7: Übersicht der NO_x+HC-Grenzwerte für Dieselmotoren bei NRMM und Lkw



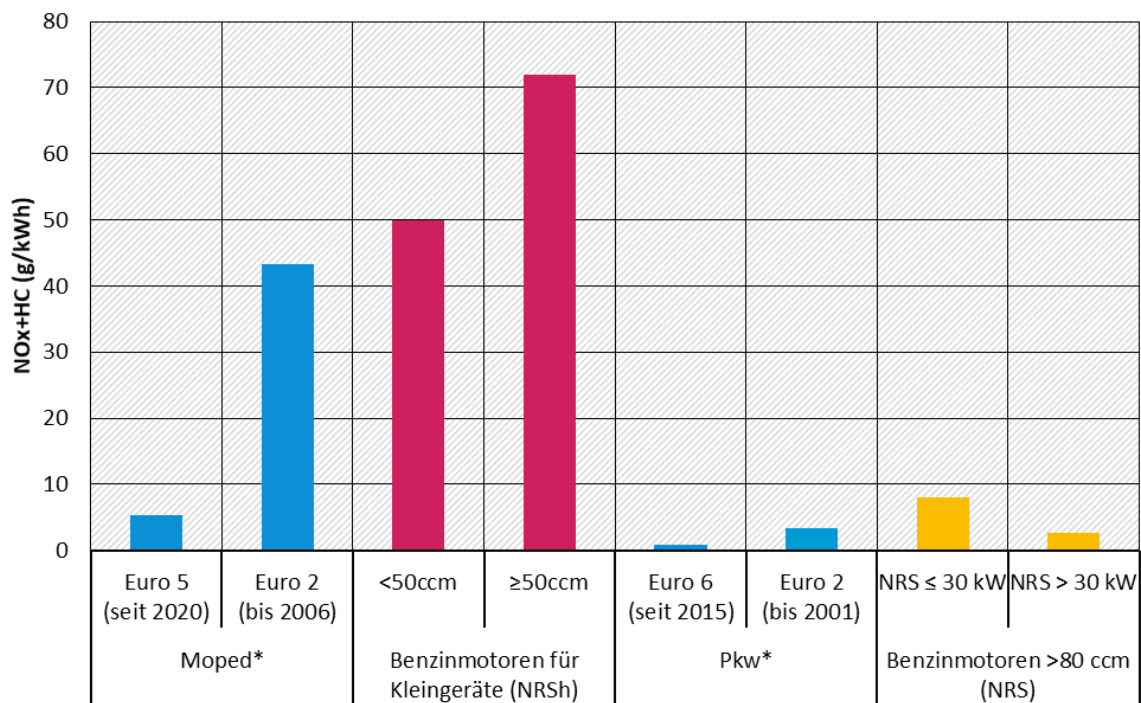
Quelle: Eigene Graphik

Abbildung 8: Übersicht der PM-Grenzwerte Dieselmotoren bei NRMM und Lkw



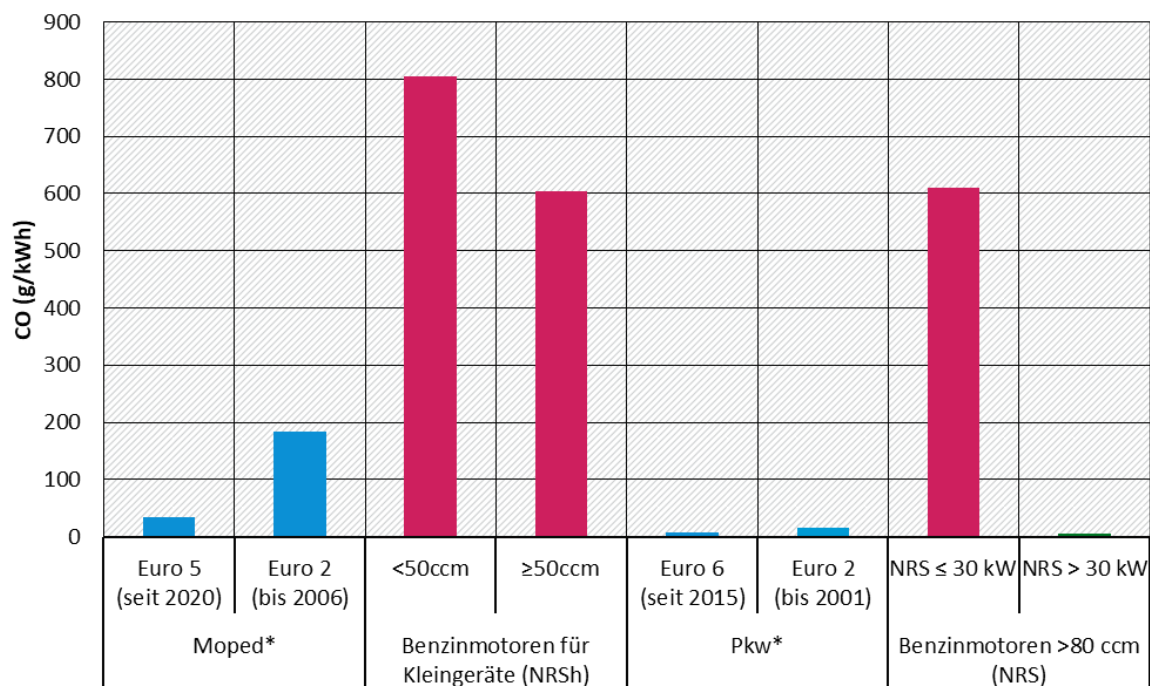
Quelle: Eigene Graphik

Abbildung 9: Übersicht der NOx+HC-Grenzwerte für Benzinmotoren bei NRMM, Pkw und Mopeds



Quelle: Eigene Graphik. * Annahmen: Grenzwerte für Pkw und Motorräder/Mopeds sind in g/km definiert. Die Umrechnung in g/kWh erfolgt unter Annahme eines Antriebsenergiebedarfs von 15kWh/100 km bei Pkw und 3 kWh/100km bei Mopeds.

Abbildung 10: Übersicht der CO-Grenzwerte für Benzinmotoren bei NRMM, Pkw und Mopeds



Quelle: Eigene Graphik. * Annahmen: Grenzwerte für Pkw und Motorräder/Mopeds sind in g/km definiert. Die Umrechnung in g/kWh erfolgt unter Annahme eines Antriebsenergiebedarfs von 15kWh/100 km bei Pkw und 3 kWh/100km bei Mopeds.

2.3 Realemissionsverhalten

Dieses Kapitel gibt eine Übersicht über die verfügbaren Daten zum realen Emissionsverhalten mobiler Maschinen. Zudem werden die im Rahmen dieses Projekts durchgeführten Messungen und deren Ergebnisse dargestellt. Der letzte Teil des Abschnitts beschäftigt sich dann mit der Erarbeitung repräsentativer Emissionsfaktoren auf Basis dieser Daten.

2.3.1 Datengrundlage

Um eine möglichst gute Datengrundlage für die Bewertung des Emissionsverhaltens mobiler Maschinen und Geräte zu schaffen, wurden zuerst bereits bestehenden Daten aus der Literatur, von anderen Forschungseinrichtungen und Stakeholdern gesammelt. Für die Schließung daraufhin noch bestehender Datenlücken wurden im Rahmen des Projekts Messungen im Realbetrieb an drei mobilen Maschinen durchgeführt.

2.3.1.1 Daten aus Literaturquellen

Zum Thema Realemissionen mobiler Maschinen und Geräte sind mehrere Datenquellen verfügbar. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die vorhandenen Messdaten aufgeteilt nach Maschinenkategorie und Emissionsstufe. Hier werden nur die Maschinen gelistet, deren Datensätze sich zur Erstellung von repräsentativen Emissionsfaktoren eignen, die also im Realbetrieb mittels portabler Emissionsmesstechnik (engl.: Portable Emission Measurement System, PEMS) gemessen wurden. Das bedeutet, dass die Datensätze Emissionen im Kaltstart, im Leerlauf sowie im normalen Arbeitsbetrieb in betriebswarmem Zustand beinhalten. Da die Literaturdaten teilweise aber nicht detailliert in einzelne Betriebssituationen unterteilt sind, sind diese Daten nicht geeignet um das Emissionsverhalten der verschiedenen Maschinenkategorien in den jeweiligen repräsentativen Lastprofilen (vgl. Kapitel 2.4.3.4) zu erarbeiten. Daher wurde für eine vereinfachte Darstellung und den prinzipiellen Vergleich des

Emissionsverhaltens der verschiedenen Maschinen der Kaltstart- bzw. Niederlastteil mit 30 % und der Arbeitsteil mit 70 % gewichtet².

Die recherchierten Daten umfassen Messungen an verschiedenen Maschinentypen. Die Kategorie Baumaschinen umfasst Radlader, Bagger, Walzenzüge und Planiertrauen. Zur Kategorie Land- und Forstmaschinen gehören mehrere Traktoren und eine Holzerntemaschine. Zudem gibt es noch Daten zu Pumpen, Bohranlagen und Generatoren. Die meisten Maschinen bewegen sich zwar im Leistungsbereich von 56 bis 560 kW Nennleistung, trotzdem gibt es auch Messdaten von kleineren Maschinen, wie z.B. Minibaggern.

Insgesamt wurden aus der Literatur Messdaten zum Realemissionsverhalten von 49 Maschinen zusammengestellt. Es ist ersichtlich, dass Maschinen der Emissionsstufen I, II und III A nur in geringer Anzahl vertreten sind. Diese haben zwar aktuell noch einen hohen Anteil an den Betriebsstunden und Gesamtemissionen (vgl. Kap. 2.1), werden jedoch in Zukunft zunehmend durch Maschinen der Stufe V ersetzt werden. Die vorhandenen Messdaten liefern eine gute Grundlage für die Bewertung des Emissionsverhaltens von Maschinen der Emissionsstufen III B und IV. Es sind aber bisher nur wenig Daten zur Emissionsstufe V, die seit 2019 bis auf wenige Ausnahmen für die Zulassung neuer Maschinen und Geräte verpflichtend ist, verfügbar. Zudem ist eine Stufe V Baumaschine, ein Minibagger, der Gruppe v-2 zuzuordnen für welche andere Grenzwerte als für die Maschinen der Gruppe v-5 und v-6, zu der alle anderen Stufe V Maschinen aus der Literatur gehören, gelten³. Eine größere Datenanzahl würde die Unsicherheit in der Bewertung des Emissionsverhalten von Stufe V Maschinen signifikant senken.

Tabelle 2: Übersicht Anzahl Messdaten aus Literaturquellen

Emissionsstufe	Baumaschinen	Land- und Forstmaschinen	Pumpen, Bohranlagen und Generatoren	Gesamt
Stufe I	2	0	0	2
Stufe II	5	0	0	5
Stufe III A	4	1	0	5
Stufe III B	10	2	0	12
Stufe IV	13	3	3	19
Stufe V (v-5, v-6)	1	3	1	5
Stufe V (v-2)	1	0	0	1
Gesamt	36	9	4	49

Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigen das Emissionsverhalten mobiler Maschinen und Geräte auf Basis der Literaturwerte für Kohlenmonoxid (CO), Stickoxide (NO_x), Kohlenwasserstoffe (THC) und die Partikelmasse (PM). Der Minibagger der Kategorie v-2 Emissionsstufe V konnte aufgrund der geringen Maschinengröße nicht mit einem PEMS, sondern nur mit einem SEMS,

² Diese Gewichtung basiert auf den Messdaten von vier mobilen Maschinen, bei denen im realen Betrieb der Leerlaufanteil aufgezeichnet wurde (Ligterink et al. 2018). Zudem fließt das Verhältnis von Leerlauf zu Kaltstartemissionen, welches anhand der Messdaten in diesem Projekt erarbeitet wurde (vgl. Kapitel 2.3.1.2.4), in diese Gewichtung mit ein.

³ Der NO_x-Emissionsgrenzwert für die Stufe V v-2 (Nennleistung zwischen 8 und 19 kW) ist 7,5 g/kWh und für v-5 (56 – 130 kW) und v-6 (130 – 560 kW) 0,4 g/kWh. [Regulation (EU) 2016/1628]

das ausschließlich über einen NO_x-Sensor verfügt, vermessen werden. Daher gibt es für diese Maschine nur Messwerte für NO_x. Die Herausforderungen hinsichtlich der Messung der Realemissionen bei kleineren Maschinen und mögliche Lösungsvorschläge sind in Kapitel 3.3.1.2 genauer beschrieben. Die dargestellten Emissionen stellen jeweils den Mittelwert über alle vermessenen Maschinen dar, welcher anhand der bereits gezeigten Gewichtung für alle Maschinenkategorien auf gleiche Weise ermittelt wurde. Die Ergebnisse erlauben somit einen Vergleich der verschiedenen Emissionsstufen unter Beachtung von Kaltstart-, Niederlast- und Hochlastemissionen untereinander und werden in weiterer Folge für die Flottenkalibrierung der repräsentativen Emissionsfaktoren verwendet (siehe Kapitel 2.3.2).

Die NO_x-Emissionen reduzieren sich mit der Einführung modernerer Emissionsstufen kontinuierlich. Die Reduzierung der NO_x-Emissionen von Stufe IV zu V ist trotz des gleichbleibenden Grenzwerts von 0,4 g/kWh klar ersichtlich. Die Emissionen im Realbetrieb bei Stufe V Maschinen der Kategorie v-5 und v-6 liegen mit 0,413 g/kWh im Bereich des Grenzwerts, während dieser bei Stufe IV Maschinen deutlich überschritten wird (1,586 g/kWh). Alle Stufe V Maschinen verfügen aufgrund der strengen Grenzwerte und der Berichtspflicht der Realemissionen durch das sog. In-Service-Monitorings (ISM) über eine komplexe Abgasnachbehandlung mit DOC, DPF und SCR. Mit diesem System können die Realemissionen offensichtlich effektiv reduziert werden. Da bei Stufe IV ausschließlich Prüfstandtests, bei denen die gleichen Prüfzyklen wie bei Stufe V getestet werden und die Grenzwerte ähnlich zu denen von Stufe V sind⁴, vorgeschrieben sind und es keine Berichtspflicht durch ISM-Tests gibt, sind solch komplexe Abgasnachbehandlungssysteme noch nicht zwingend nötig. Diese werden also nicht bei allen Maschinen eingesetzt, was sich merklich auf das Realemissionsverhalten auswirkt, wie die Ergebnisse zeigen.

Hingegen liegen die NO_x-Emissionen der Stufe V v-2 Maschine, dem Minibagger, nicht nur deutlich über den Emissionen der v-5 und v-6 Maschinen, sondern auch über ihrem spezifischen Grenzwert von 7,5 g/kWh (HC + NO_x). Dies kann dadurch begründet werden, dass die weniger strengen Grenzwerte für diese Motorenkategorie (siehe Tabelle 1) bei Prüfstandtests ausschließlich mit innermotorischen Maßnahmen eingehalten werden können. Der Minibagger verfügt somit über keine Abgasnachbehandlung wie die Maschinen der Kategorien v-5/c-5 und v-6/c-6. Dieses Beispiel zeigt also, dass auch bei bestimmten Kategorien von Stufe V Maschinen noch erhöhte Realemissionen auftreten können, da manche nicht so strengen Grenzwerten unterliegen und ihre Realemissionen nicht an den Gesetzgeber berichten müssen. Um eine generelle Aussage über das reale Emissionsverhalten von Maschinen der Kategorien v-1/c-1, v-2/c-2, v-3/c-3 und v-4/c-4 treffen zu können, müssen weitere Maschinen dieser Kategorien getestet werden. Aufgrund der bestehenden Grenzwerte ist aber prinzipiell von merklich höheren Realemissionen als für Maschinen der Stufen v-5/c-5 und v-6/c-6 zu rechnen.

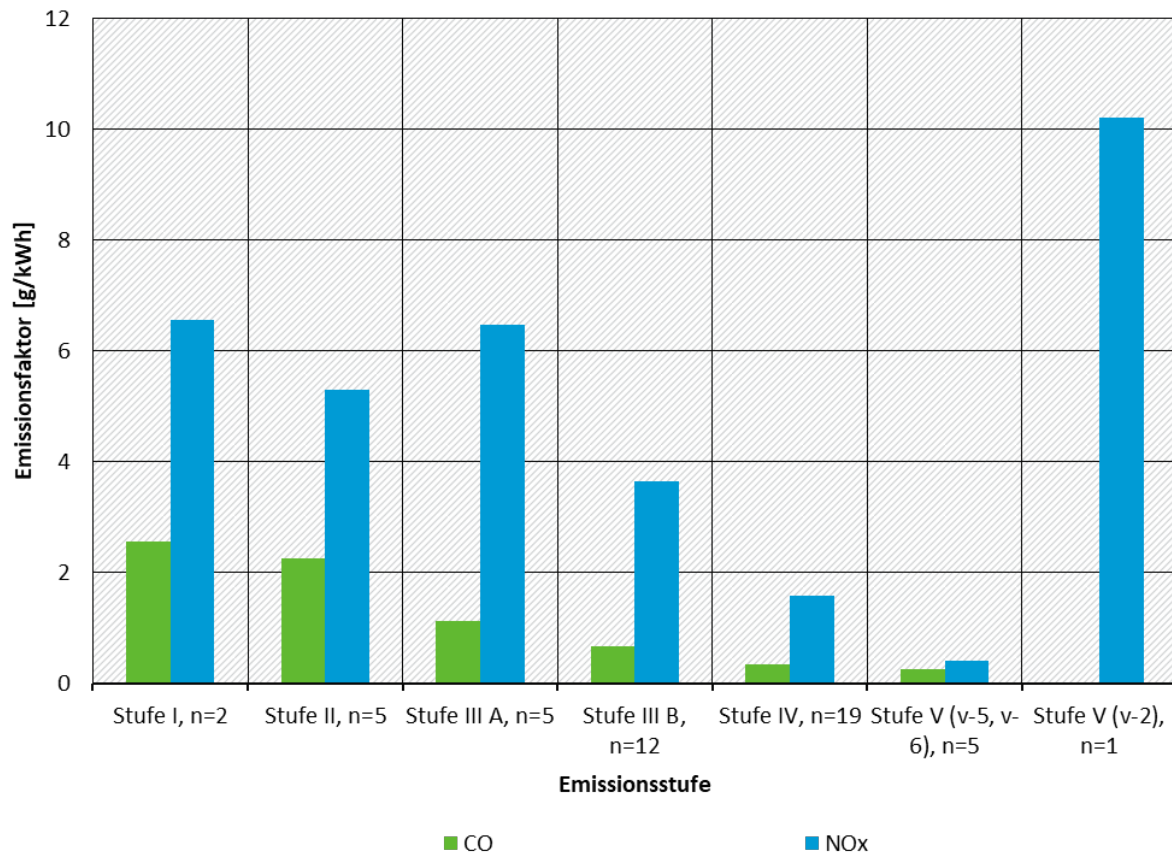
Die CO-Emissionen reduzieren sich ebenfalls erkennbar von Stufe I zu Stufe V. Bei Stufe V liegen die Emissionen bei 0,249 g/kWh und somit deutlich unter dem Grenzwert von 5 g/kWh (v-5) bzw. 3,5 (v-6) g/kWh.

Die Kohlenwasserstoffemissionen werden mit der Weiterentwicklung der Emissionsstufen ebenso deutlich geringer. Diese sind bereits seit der Einführung von Stufe III B auf sehr geringem Niveau. Bei Stufe V liegen die Emissionen bei 0,026 g/kWh und somit klar unter dem Grenzwert von 0,19 g/kWh.

⁴ Maschinen mit einer Leistung zwischen 130 und 560 kW (vergleichbar mit NRE-v/c-6) unterliegen den gleichen Grenzwerten für CO, HC und NO_x. Bei PM ist der Grenzwert mit 0,025 g/kWh etwas höher und für PN existiert noch kein Grenzwert.

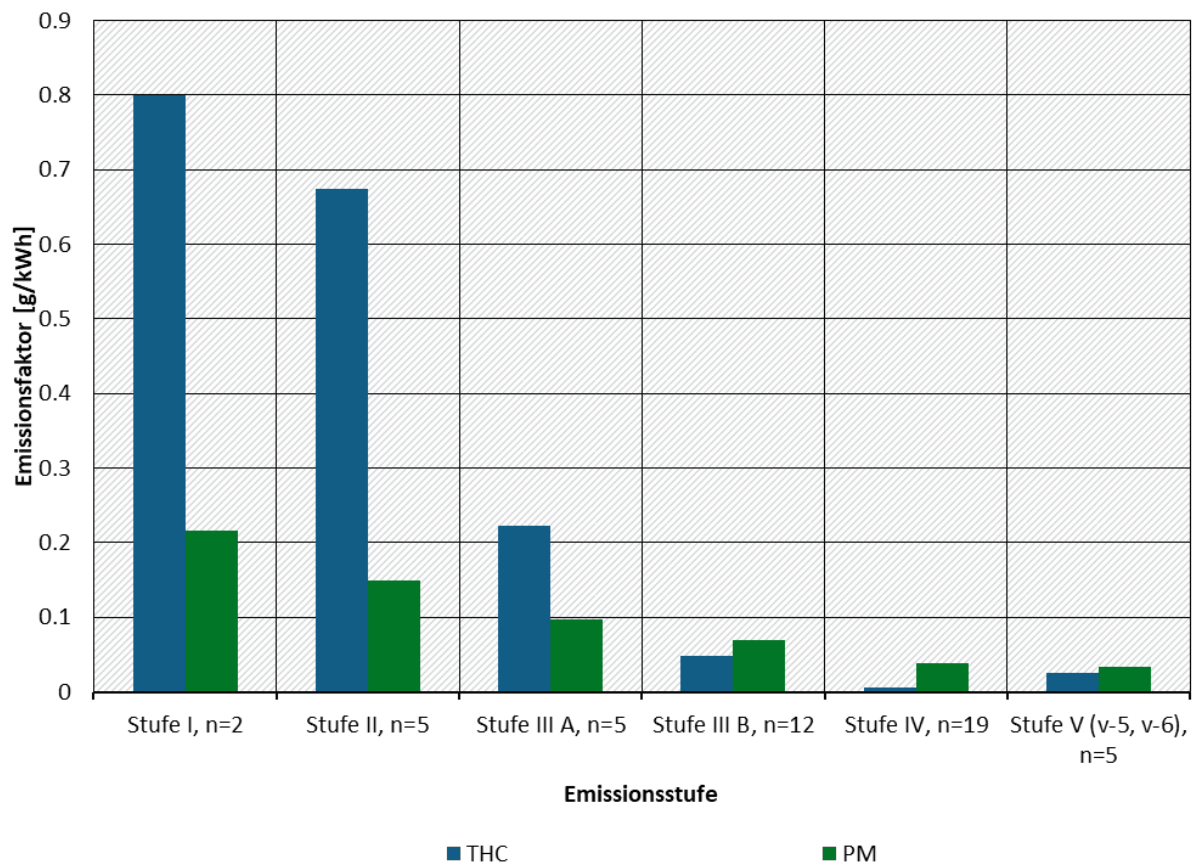
Bei Stufe IV verfügen auch bereits die meisten Maschinen über einen Partikelfilter, flächendeckend wird dieser aber erst seit Stufe V eingesetzt. Die Partikelmassemissionen reduzieren sich dadurch auf 0,033 g/kWh bei Stufe V. Diese liegen aber über dem Grenzwert von 0,015 g/kWh.

Abbildung 11: Emissionsfaktoren Literaturwerte, CO und NO_x



Quelle: eigene Graphik (TU Graz). Anmerkung: „n“ = Anzahl Messungen. Bei den Stufen I bis IV handelt sich um mittlere Emissionsfaktoren über verschiedene Leistungsklassen. Die gemeinsame Abbildung von CO und NO_x erfolgte aus Platzgründen.

Abbildung 12: Emissionsfaktoren Literaturwerte, THC und PM



Quelle: eigene Graphik (TU Graz). Anmerkung: „n“ = Anzahl Messungen. Bei den Stufen I bis IV handelt sich um mittlere Emissionsfaktoren über verschiedene Leistungsklassen. Für Stufe V (c-2) lagen keine Daten zu THC und PM vor. Die gemeinsame Abbildung von THC und PM erfolgte aus Platzgründen.

Alle Daten in diesem Kapitel stammen aus folgenden Quellen:

- ▶ [J. Blassnegger: Onboard Emissionsmessung an Baumaschinen unterschiedlicher Emissionsstufen im realen Betrieb, Technische Universität Graz, Graz, 2016]
- ▶ [N. Ligterink, R. Louman, E. Buskermolen, R. Verbeek: Use of construction machines and the associated NO_x and CO₂ emissions, Sponsor: Connekt and Netherlands Pollutant Release and Transfer Register, 2018]
- ▶ [D. Engelmann, R. Stirnimann, Y. Zimmerli, M. Muhr, Ph. Wili, M. Clenin: Market Surveillance Concept for Non-Road Mobile Machinery, Fachhochschule Bern, Bern, 2020]
- ▶ [D. Engelmann, R. Stirnimann, Y. Zimmerli, M. Muhr, Ph. Wili, M. Clenin: Validation of Procedures for Market Screening of Non-Road Machines, Fachhochschule Bern, Bern, 2019]
- ▶ [J. Vermeulen, N. Ligterink, P.J. van der Mark: Real-world emissions of non-road mobile machinery, 2021]

- [C. Sandstroem Dahl, K. Willner: Test report - On-board Emission Measurement on Wheel loader in different test cycles, Test report OMT 5005, Sweden]
- [C.D. Desouza, D.J. Marsh, S.D. Beevers, N. Molden, D.C. Green: Real-world emissions from non-road mobile machinery in London, Atmospheric Environment 223 (2020) 117301, 2020]

Dabei sind (Huber et al. 2019) und (Emberger et al. 2021) speziell hervorzuheben, da die Kollegen des TFZ Bayerns sogar die sekundlichen Messdaten für weitere Auswertungen im Rahmen des Projekts zur Verfügung gestellt haben.

Neben den verwendeten Quellen wurde auch noch bei Herstellern angefragt, ob die Typprüfdaten (NRSC, NRTC und ISM Messdaten) der in Europa zugelassenen mobilen Maschinen verfügbar sind und in diesem Projekt genutzt werden können. Zwar beinhalten diese Daten nicht alle relevanten Betriebssituationen, wie z.B. eine Anlaufphase nach einer längeren Leerlaufphase, dennoch würden sie die Datengrundlage aufgrund der kompletten Abdeckung der Stufe V Flotte deutlich verbessern. Die Anfrage wurde über Euromot, die europäische Vereinigung von Herstellern von Verbrennungskraftmaschinen, durchgeführt. Euromot hat daraufhin eine zusammenfassende Präsentation mit Ergebnissen von ISM-Tests⁵ bereitgestellt. Die sekundlichen Messdaten der einzelnen Tests, welche für die Erstellung von Emissionsmodellen sehr hilfreich sind, wurden für dieses Projekt aber nicht zur Verfügung gestellt.

2.3.1.2 Messung der Realemissionen

Wie Tabelle 2 zeigt sind fünf Maschinen der Emissionsstufe V in der gängigsten Leistungskategorie v-5 (56 – 130 kW) und v-6 (130 – 560 kW) vorhanden. Deshalb wurden im Rahmen des Projekts weitere zwei Maschinen dieser Kategorie vermessen. Dabei handelte es sich um Baumaschinen, nämlich einen Radbagger und eine Planierdraupe. Zusätzlich wurde noch ein Stufe IV Raupenbagger vermessen. Ziel der Messungen war es, die relevantesten Luftschadstoffe CO, HC, NO_x und Partikelemissionen⁶ zu erfassen. Zudem wurde der Kraftstoffverbrauch und die CO₂-Emissionen gemessen.

Der folgende Abschnitt zeigt das Messprogramm, stellt die drei Testmaschinen vor und zeigt abschließend die Ergebnisse der Messungen.

2.3.1.2.1 Messprogramm

Alle drei Maschinen wurden im Realbetrieb mittels portabler Emissionsmesstechnik vermessen. Zusätzlich wurden noch die verfügbaren Signale der Motorsteuerung, wie z.B. die Motorleistung und die Drehzahl, ausgelesen. Aufgrund der schwierigen Verfügbarkeit von Baumaschinen waren alle Maschinen nur für einen Messtag verfügbar. Der Aufbau konnte jeweils am Nachmittag vor dem Messtag durchgeführt werden.

Es konnte ein Messprogramm entwickelt werden, dass die Messung aller relevanten Betriebssituationen an einem Tag ermöglicht. Tabelle 3 zeigt eine Zusammenfassung der umgesetzten Messprogramme der einzelnen Maschinen, das als Basis für alle drei Testmaschinen genutzt wurde.

⁵ Dabei handelt es sich um die finalen Testergebnisse, also einen Wert je Test und Emissionskomponente.

⁶ Ursprünglich sollte nur die Partikelmasse (PM) gemessen werden. Im Laufe des Projekts wurde jedoch entschieden, dass die Messung der Partikelanzahl (PN) mit PEMS zielführender ist und dass die PM-Emissionen nachträglich aus PN abgeschätzt werden kann.

Jeder Messtag begann mit einem Kaltstart⁷ am Morgen gefolgt von realer Arbeitstätigkeit⁸. Dabei konnte festgestellt werden, wie hoch die Emissionen im Kaltstart sind und wie lange die Maschine braucht, um den betriebswarmen Zustand zu erreichen. Als nächstes folgte eine Mischung aus verschiedenen langen Leerlaufzeiten und realer Arbeitstätigkeit. Dabei wurde geprüft, welche Auswirkung längere Leerlaufzeiten auf das Emissionsverhalten haben. Speziell interessant sind dabei das Abkühlen bzw. das Aufheizen des SCR-Katalysators und die daraus folgenden Auswirkungen auf die NO_x-Emissionen⁹. Zudem geben diese Tests Auskunft über das Emissionsverhalten im normalen Arbeitsbetrieb bei betriebswarmer Abgasnachbehandlung. In weiterer Folge wurde noch die Auswirkung auf die Emissionen einer Standzeit von ca. einer Stunde bei ausgeschaltetem Motor betrachtet. Zusätzlich wurde das Emissionsverhalten im Arbeitsbetrieb bei unterschiedlichen Motorlasten getestet. Falls die Maschinen über einen speziellen ECO-Modus verfügen, wurde dieser ebenfalls eingesetzt.

Tabelle 3: Zusammenfassung Messprogramm

Test	Tätigkeit	Startbedingungen	Dauer
1	Kaltstart (vorgegebenes Aufwärmprogramm) + reale Arbeitstätigkeit	Kaltstart	Ca. 45 min
2	5 – 10 Minuten Leerlauf + reale Arbeitstätigkeit + ca. 15 Minuten Leerlauf + reale Arbeitstätigkeit	Betriebswarmes System	Ca. 1 h
3	5 – 10 Minuten Leerlauf + Niederlast	Betriebswarmes System	Ca. 30 min
4	Ca. 1 Stunde Motor aus + reale Arbeitstätigkeit	Semi-betriebswarmes System	Ca. 30 min
5	5 – 10 Minuten Leerlauf + Hochlast	Betriebswarmes System	Ca. 30 min

Das Messprogramm erlaubt eine Beurteilung des Emissionsverhaltens der einzelnen Maschinen in allen relevanten Betriebssituationen und eignet sich für die Erstellung von repräsentativen Emissionsfaktoren. Die Unterteilung des Messtags in mehrere Einzelmessungen erlaubt eine ständige Überprüfung der Funktion der Messgeräte¹⁰ und regelmäßige Kalibrierungen. Dadurch liegen die Messdaten zu allen relevanten Betriebssituationen in der geforderten Datenqualität vor.

Wenn man alle durchgeführten Messungen zu einer langen Messung zusammenfasst, entspricht der entstandene Test keiner ISM konformen Messung. Es wurde zwar darauf geachtet, dass die Prüfdauer aller Betriebszyklen gemeinsam unter Einbeziehung von ausschließlich gültigen Daten lang genug ist, um fünf bis sieben Mal die während des NRTC geleistete Arbeit zu

⁷ Alle Maschinen verfügen über ein vordefiniertes Kaltstartprogramm, das ca. 15 Minuten dauert und währenddessen keine Arbeitstätigkeiten durchgeführt werden können.

⁸ Die reale Arbeitstätigkeit entsprach dabei immer der normalen Tätigkeit der Maschine auf der jeweiligen Baustelle.

⁹ Moderne SCR-Katalysatorsysteme können in ihrem optimalen Betriebsbereich NO_x-Konvertierungsraten von mehr als 99 % erreichen. Dieser optimale Betriebsbereich liegt zwischen ca. 200 und 400°C. Außerhalb dieses Bereichs reduziert sich die Konvertierung merklich. (Weller 2020)

¹⁰ Messungen an off-road Maschinen führen zu sehr hohen Belastungen des PEMS. Starke Vibrationen und Bewegungen des Messgeräts können zum Lösen von Steckverbindungen, zu Undichtigkeiten und sogar zum kompletten Ausfall führen. In diesen Fällen können die Messdaten nicht mehr genutzt werden. Zudem kann eine starke Staubbelastung vorherrschen, welche ebenso sehr ungünstig für das Messgerät ist. Regelmäßige Überprüfungen ermöglichen eine schnelle Fehlererkennung und Behebung.

vollbringen, aber die Anzahl an Einzelmessungen übersteigt die maximal erlaubte Anzahl von drei Einzelmessungen. Trotzdem entsteht durch die Verkettung der Einzelmessungen ein langer Test, der anhand der ISM Vorgaben ausgewertet werden kann. Die Ergebnisse erlauben einen indikativen Vergleich mit den Grenzwerten (EU 2017).

2.3.1.2.2 Testmaschinen

Tabelle 4 gibt einen Überblick über alle im Rahmen dieses Projekts vermessenen mobilen Maschinen.

Tabelle 4: Übersicht Anzahl Messdaten aus On-board Messungen

Emissionsstufe	Raupenbagger	Radbagger	Planierraupe	Gesamt
Stufe IV	1	0	0	1
Stufe V	0	1	1	2

Im Folgenden werden die technischen Details der einzelnen Maschinen genauer erklärt.

2.3.1.2.2.1 Testmaschine 1: Raupenbagger, Kategorie R (56-130 kW), Emissionsstufe IV

Die erste getestete Maschine war ein Raupenbagger von Kobelco. Der Bagger erfüllt die Emissionsstufe IV. Die Maschine verfügt über eine Abgasnachbehandlung mit Dieseloxydationskatalysator (DOC), Dieselpartikelfilter (DPF) und einem Katalysator für selektive katalytische Reduktion (SCR)¹¹. Die Abgasnachbehandlung entspricht somit dem Standard modernster Maschinen (Stufe V). Die technischen Daten der Maschine sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Technische Daten Testmaschine 1

Technische Daten Kobelco SK210	
Maschinenkategorie	Raupenbagger
Einsatzgewicht	21.700 kg
Emissionsstufe	Stufe IV
Nennleistung	124 kW (Leistungsklasse R)
Nenndrehzahl	2.000 U/min
Hubraum	5,123 l (4 Zylinder)
Motorkonzept	Dieselmotor mit Turbolader und Abgasrückführung
Antriebskonzept	Hydrauliksystem
Abgasnachbehandlung	DOC, DPF, SCR

¹¹ Die Datenblätter dieser und auch der folgenden Maschinen geben keine Information, ob die Maschinen auch über einen NH₃-Schlupfkatalysator verfügen.

Abbildung 13 zeigt den Raupenbagger im Messbetrieb. Bei dieser Messung wurde das AVL MOVE PEMS inkl. PN PEMS verwendet. Das PEMS inkl. aller benötigten Zusatzgeräte wurde in eine Gitterbox, die an den Ösen für das Gegengewicht hinter dem Bagger aufgehängt wurde, geladen. Obwohl das Messgerät in der Box starken Vibrationen ausgesetzt war, konnte das Emissionsverhalten des Baggers mit diesem Aufbau ohne Einschränkungen des realen Arbeitsbetriebs ermittelt werden. Diese Boxlösung ist aber nur bei Maschinen mit verhältnismäßig hohem Einsatzgewicht möglich.

Abbildung 13: Testmaschine 1 mit PEMS



Quelle: Foto TUG

Die Messungen an dieser Maschine zeigen, dass die Prüfung der Realemissionen mobiler Maschinen im normalen Betrieb prinzipiell möglich ist. Zudem liefern die Ergebnisse wichtige Informationen zum Emissionsverhalten von Stufe IV Maschinen und ergänzen die bisher zur Verfügung stehenden Daten. Hier ist speziell hervorzuheben, dass durch die Messung im Realbetrieb mit PEMS alle relevanten Betriebssituationen abgedeckt werden¹² konnten und Ergebnisse für die Partikelanzahl ermittelt wurden. Die Messdaten decken zudem zwei Partikelfilterregenerationen ab.

Zudem muss hier angemerkt werden, dass die Messungen im Winter bei geringer Umgebungstemperatur durchgeführt wurden.

2.3.1.2.2 Testmaschine 2: Radbagger, Kategorie v-5 (56-130 kW), Emissionsstufe V

Die zweite Testmaschine war ein Radbagger der Firma Takeuchi mit der Emissionsstufe V. Die Maschine verfügt über einen DOC, einen DPF und einen SCR. Dies ist die Standardabgasnachbehandlung von Stufe V Maschinen dieser Leistungsklasse. Zudem nutzt der Motor Abgasrückführung zur innermotorischen Stickoxidreduktion. Tabelle 6 gibt einen Überblick über die technischen Daten von Testmaschine 2.

¹² Die Literaturdaten geben meist nur einen Wert für ein Betriebsereignis an. Die sekundlichen Daten stehen in der Regel nicht zur Verfügung. Zudem werden meist nicht alle für Emissionsfaktoren relevante Betriebszustände abgedeckt.

Tabelle 6: Technische Daten Testmaschine 2

Technische Daten Takeuchi TB295W	
Maschinenkategorie	Radbagger
Einsatzgewicht	10.584 kg
Emissionsstufe	Stufe V
Nennleistung	85 kW (Leistungsklasse v-5)
Nenndrehzahl	2.000 U/min
Hubraum	3,621 l (4 Zylinder)
Motorkonzept	Dieselmotor mit Turbolader und Abgasrückführung
Antriebskonzept	Hydrauliksystem
Abgasnachbehandlung	DOC, DPF, SCR

Der Radbagger wird in Abbildung 14 im Betrieb während der Messung dargestellt. Bei diesem Bagger wurde das PEMS von AIP (früher MAHA) verwendet, da es kleiner ist und sich bei dieser kleineren Maschine somit besser als das PEMS von AVL eignet. Das Gerät konnte seitlich neben der Fahrerkabine installiert werden. Die verwendete Ausführung des AIP PEMS hat aber keinen Flammenionisationsdetektor (FID) zur Messung von THC, obwohl dies laut Gesetzgeber vorgeschrieben ist. Da die HC-Emissionen bei modernen Dieselmotoren aber auf sehr geringem Niveau liegen (Weller et al. 2021a), wurde in Abstimmung mit dem Auftraggeber trotzdem dieses Messgerät aufgrund der Vorteile durch die geringe Größe verwendet. Da auch Testmaschine 1 die geringen HC-Emissionen bei modernen Baumaschinenmotoren bestätigt, wird auch bei Testmaschine 2 von geringen HC-Emissionen ausgegangen.

Abbildung 14: Testmaschine 2 mit PEMS



Quelle: Foto TUG

Die Messdaten geben einen Einblick in das Emissionsverhalten von Stufe V Maschinen im Realbetrieb und decken alle relevanten Betriebssituationen ab. Bei den Auswertungen ist aufgefallen, dass die PN-Messung nicht funktioniert hat. Die Partikelanzahlergebnisse dieser Maschine sind somit nicht brauchbar. Zur Kompensation dieses Ausfalls wurde eine weitere Maschine gemessen (siehe Kapitel 2.3.1.2.2.3).

Diese Messungen wurden ebenso im Winter bei geringer Umgebungstemperatur durchgeführt.

2.3.1.2.2.3 Testmaschine 3: Planierraupe, Kategorie v-5 (56-130 kW), Emissionsstufe V

Der Auftraggeber hat zwar nur die Messung von zwei Maschinen abgerufen, aber aufgrund der fehlenden PN-Werte von Maschine 2 wurde noch eine dritte Maschine gemessen.

Testmaschine 3 ist eine Komatsu Planierraupe der Emissionsstufe V. Diese Maschine verfügt ebenso über die Standard Stufe V Abgasnachbehandlung und nutzt AGR zur NO_x-Reduzierung. Die technischen Daten dieser Maschine sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Technische Daten Testmaschine 2

Technische Daten Komatsu D61PXi-24	
Maschinenkategorie	Planierraupe
Einsatzgewicht	19.580 kg
Emissionsstufe	Stufe V
Nennleistung	126 kW (Leistungsklasse v-5)
Nenndrehzahl	2.200 U/min

Hubraum	6,69 l (6 Zylinder)
Motorkonzept	Dieselmotor mit Turbolader und Abgasrückführung
Antriebskonzept	Hydrauliksystem
Abgasnachbehandlung	KDPF (Komatsu DPF + DOC), SCR

Abbildung 15 zeigt die Planiererraupe im Einsatz. Das PEMS, in diesem Fall wieder das „kleine“ Messgerät von MAHA, wurde am Dach der Maschine montiert. Der Koffer, in dem die Analysatoren untergebracht sind, musste aufgrund der Funktionsfähigkeit des CPCs in einem speziellen Winkel nahezu aufrecht und somit relativ freistehend angebracht werden. Dies führte zu starken Vibrationen des PEMS. Für die Zuleitung des Abgases vom Auspuff zum PEMS musste bei dieser Maschine eine spezielle Entnahme gefertigt werden.

Durch den Einsatz des MAHA Systems konnte auch bei dieser Maschine kein HC gemessen werden.

Abbildung 15: Testmaschine 3 mit PEMS



Quelle: Foto TUG

Die Messergebnisse dienen zur Bewertung des Emissionsverhaltens einer weiteren Stufe V Maschine. Durch die Auswahl einer Planiererraupe wurden Messwerte eines anderen Maschinentyps zur Erweiterung der Datenbasis erhoben.

Durch die starken Vibrationen löste sich nach dem Kaltstart und bei der folgenden Messung eine Steckverbindung. Dadurch wurde kein Gas mehr zu den Analysatoren transportiert und die Messungen sind nicht brauchbar. Durch die Aufteilung in kürzere Messungen konnte dies aber anhand der sehr niedrigen CO₂ Messwerte detektiert und gleich behoben werden. Somit liegen genügend Messdaten für die weiteren Auswertungen vor.

Die Messungen an dieser Maschine wurden im Sommer bei höheren Umgebungstemperaturen durchgeführt. Zudem ist zu erwähnen, dass sich der Sommer aufgrund der größeren Menge an

Tageslichtstunden für Messungen an Baumaschinen besser eignet. Dies ist speziell der Fall bei der in diesem Fall nur kurzen, zur Verfügung stehenden Messzeit von einem Tag.

2.3.1.2.3 Messergebnisse – Durchführung von PEMS-Messungen an mobilen Maschinen

Ein grundlegendes Ergebnis der Messungen ist, dass das Überprüfen der Emissionen von mobilen Maschinen im Realbetrieb mithilfe von portablen Emissionsmessgeräten ohne nennenswerte Einschränkung¹³ des normalen Arbeitsbetriebs prinzipiell möglich ist. Trotzdem zeigen die Ergebnisse, dass nicht alle PEMS für jede Maschine aufgrund von Maschinengröße und Maschinenaufbau geeignet sind. Kleinere Messgeräte sind zwar für den Aufbau besser geeignet, aber hinsichtlich der messbaren Komponenten eingeschränkt. Es ist festzuhalten, dass der PEMS-Aufbau an mobilen Maschinen aufgrund der sehr großen Maschinenvariabilität gut vorbereitet werden muss und somit aufwändiger als bei anderen Anwendungen, wie z.B. PKW, ist.

Die Belastung der Messgeräte ist eine große Herausforderung. Die Systeme sind starken Vibrationen ausgesetzt. Dies führte teilweise zu Ausfällen der Messtechnik. Die Unterteilung eines Messtags in mehrere Einzelmessungen macht zur ständigen Überprüfung der Funktion der Messtechnik deshalb Sinn. Die hohe Staubbelastung kann auf lange Sicht ebenso zu Problemen bei der verwendeten Messtechnik führen.

Die getesteten Maschinen verfügen alle über einen Hydraulikantrieb. Dadurch werden die Motoren jeweils bei konstanten Drehzahlen betrieben. Bei allen drei Maschinen lag die Betriebsdrehzahl im Bereich der höchsten Drehzahl, bei der die Nennleistung noch verfügbar ist¹⁴. Dieser Betriebspunkt ist nicht wirkungsgradoptimal und führt somit zu erhöhtem Kraftstoffverbrauch. Der große Vorteil dieses Betriebspunktes ist aber, dass bei einem Rückgang der Drehzahl durch einen plötzlichen Anstieg der geforderten Leistung das Drehmoment erhöht wird und somit ein Absterben des Motors verhindert wird. Eine plötzlich erhöhte Leistungsanforderung kommt beim Betrieb von Baumaschinen nicht selten vor¹⁵. Dies zeigt, dass die Hauptanforderung an Baumaschinen problemlose Funktion und Robustheit sind. Der Kraftstoffverbrauch ist nicht der wichtigste Punkt.

2.3.1.2.4 Messergebnisse – Emissionsfaktoren

Die folgenden Diagramme zeigen die Messergebnisse der drei Testmaschinen. Die Daten werden dabei nach Emissionsstufen und Emissionskomponenten aufgeteilt. Zudem wird nach Emissionen in Anlauf- und Arbeitsphasen unterschieden. In Anlaufphasen, wie z.B. dem Kaltstart oder längeren Leerlaufphasen, ist die Abgasnachbehandlung aufgrund einer zu geringen Betriebstemperatur nicht in ihrem optimalen Betriebsfenster, was das Emissionsverhalten der Maschine beeinflusst. Bei Arbeitsphasen, welche in die verschiedenen Arbeitstätigkeiten aufgeteilt werden, ist die Abgasnachbehandlung komplett betriebswarm und wird in ihrem besten Arbeitsbereich betrieben. Die Einteilung in Anlauf- und Arbeitsphasen wurde maschinen- bzw. sogar testspezifisch durchgeführt und basiert hauptsächlich auf der mittels PEMS gemessenen Abgastemperatur. Unter 250°C spricht man von Anlaufphasen und bei Phasen mit höheren Abgastemperaturen von Arbeitsphasen gesprochen. Daraus kann man dann Emissionsfaktoren für die einzelnen Betriebsphasen entnehmen und bekommt somit einen

¹³ Beim Fahren zum Arbeitsort wurden die Fahrer teilweise zu etwas langsamer Fahrt angehalten, damit die Vibrationen am Messgerät nicht zu hoch wurden.

¹⁴ Die Volllastkurven aller drei Maschinen verfügen über ein Nennleistungsplateau. Der Betriebspunkt ist jeweils im höchsten Drehzahlbereich dieses Plateaus. (Deutz 2022) zeigt dies für den Radbagger.

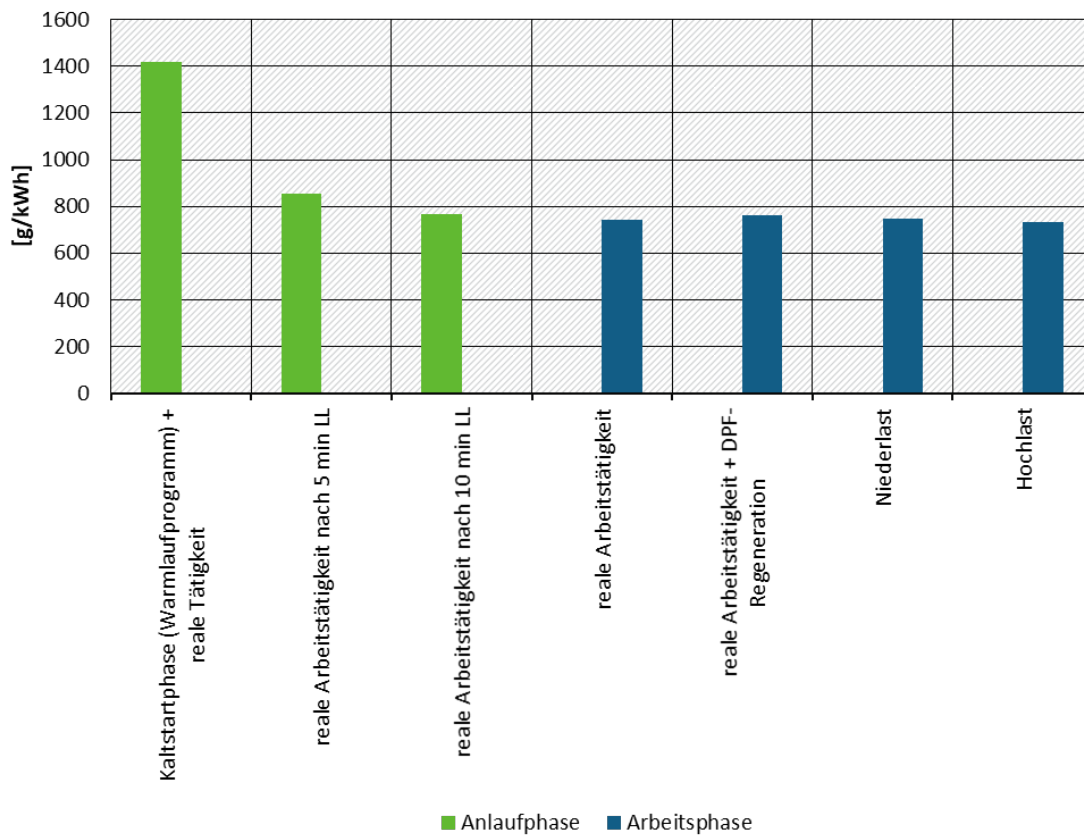
¹⁵ Ein Beispiel ist der Betrieb einer Planierdraupe. Diese schiebt einen Materialhaufen vor sich her und plötzlich gräbt sich das Schild etwas tiefer ein. Dies erhöht den Widerstand und somit die aufzubringende Leistung schlagartig.

guten Einblick in das Realemissionsverhalten der jeweiligen Maschinen. Zum Vergleich der Emissionsfaktoren der verschiedenen Maschinen werden die Emissionsmassen auf die geleistete Arbeit bezogen. Die geleistete Arbeit wird von der Motorsteuerung anhand der eingespritzten Kraftstoffmenge ermittelt, wobei der Teil, der nur für die Überwindung der innermotorischen Reibung verantwortlich ist, abgezogen wird. Die finale Motorarbeit umfasst somit die Antriebsarbeit und die Arbeit der Nebenaggregate, wodurch im Leerlauf auch ein positives Ergebnis zustande kommt. Die Genauigkeit dieser Methode wird in 3.2.5.1 diskutiert. Die so ermittelte Motorarbeit wird dann über eine CAN-Bus Verbindung ausgelesen. Die Einheit ist somit g/kWh.

Abbildung 16 stellt die CO₂-Emissionen der Stufe IV Testmaschine dar. In hellgrün sind die Ergebnisse für die verschiedenen Anlaufphasen und in dunkelblau für die Arbeitsphasen (betriebswarme Abgasnachbehandlung) zu sehen. Es fällt auf, dass die CO₂-Emissionen im Kaltstart deutlich höher sind als bei betriebswarmem Motor. Dies ist auf die erhöhte Motorreibung und die schlechtere Verbrennung während des Kaltstarts zurückzuführen. Zudem wird zusätzliche Energie für die Erwärmung der Abgasnachbehandlung benötigt. Die CO₂-Emissionen sind während der DPF-Regeneration höher als im normalen Arbeitsbetrieb. Im hochlastigen Betrieb sind die CO₂-Emissionen und somit der Kraftstoffverbrauch¹⁶ aufgrund des optimalen Motorwirkungsgrads am geringsten.

¹⁶ Bei der optimalen Verbrennung entsteht aus dem Kraftstoff nur CO₂ und H₂O. In Realität wird aber durch die nicht vollständige Verbrennung ein sehr kleiner Teil des Kraftstoffs nicht in CO₂ umgesetzt. Zudem entsteht bei der Umwandlung von AdBlue zu Ammoniak zusätzliches CO₂, welches nicht aus dem Kraftstoff stammt. Trotzdem bleibt der direkte Zusammenhang von CO₂ und Kraftstoffverbrauch bei der realen Verbrennung bestehen.

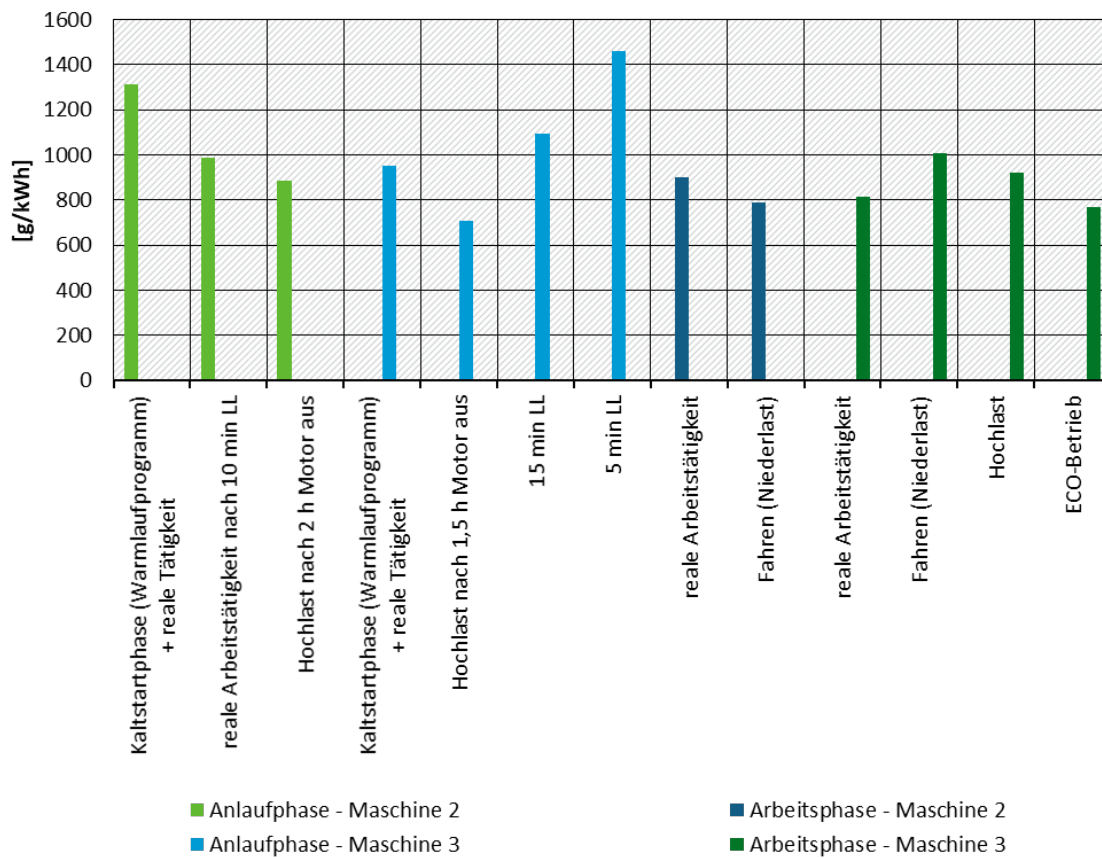
Abbildung 16: Messdaten CO₂ – Testmaschine 1 (Emissionsstufe IV)



Quelle: eigene Graphik (TUG)

Bei den beiden Stufe V Maschinen (siehe Abbildung 17) wird ebenso in die Emissionen während der Anlaufphase (Testmaschine 2: hellgrün, Testmaschine 3: hellblau) und während der Arbeitsphasen (Testmaschine 2: dunkelblau, Testmaschine 3: dunkelgrün) unterschieden. Bei Stufe V sind ebenso erhöhte Kaltstartemissionen erkennbar. Zudem sieht man aber auch, dass die CO₂-Emissionen im Leerlauf höher liegen. Die betriebswarmen Emissionen zeigen, dass der Eco-Modus von Testmaschine 3 offensichtlich gut funktioniert und zu geringeren CO₂-Emissionen als bei der Hochlast oder realen Arbeitstätigkeit führt. Der spezifische Kraftstoffverbrauch ist in dieser Phase somit auch geringer. Bei Testmaschine 2 hat die Niederlast geringere CO₂-Emissionen als die reale Arbeitstätigkeit.

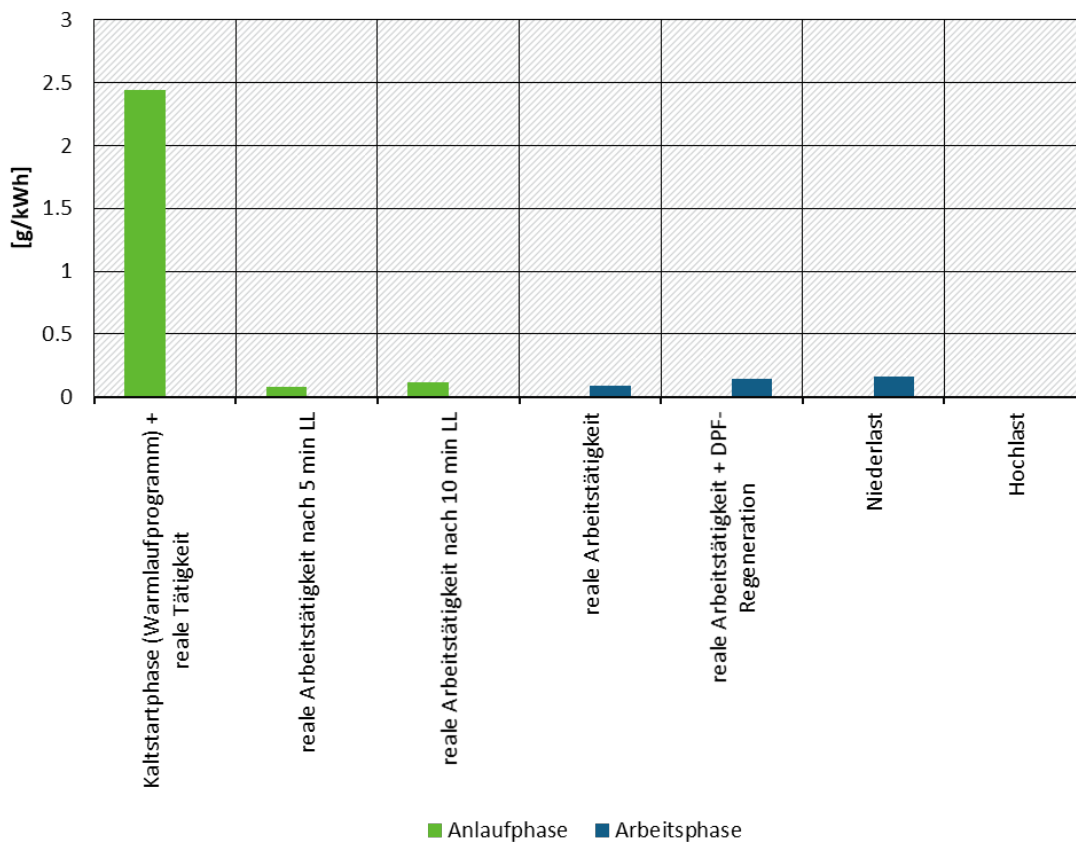
Abbildung 17: Messdaten CO₂ – Testmaschine 2 und 3 (Emissionsstufe V)



Quelle: eigene Graphik (TUG)

Die CO-Emissionen der Stufe IV Maschine (siehe Abbildung 18) sind vor allem im Kaltstart auffällig, liegen aber auch dort noch unter dem Grenzwert (5 g/kWh). In allen anderen Betriebsphasen sind diese auf sehr geringem Niveau.

Abbildung 18: Messdaten CO – Testmaschine 1 (Emissionsstufe IV)

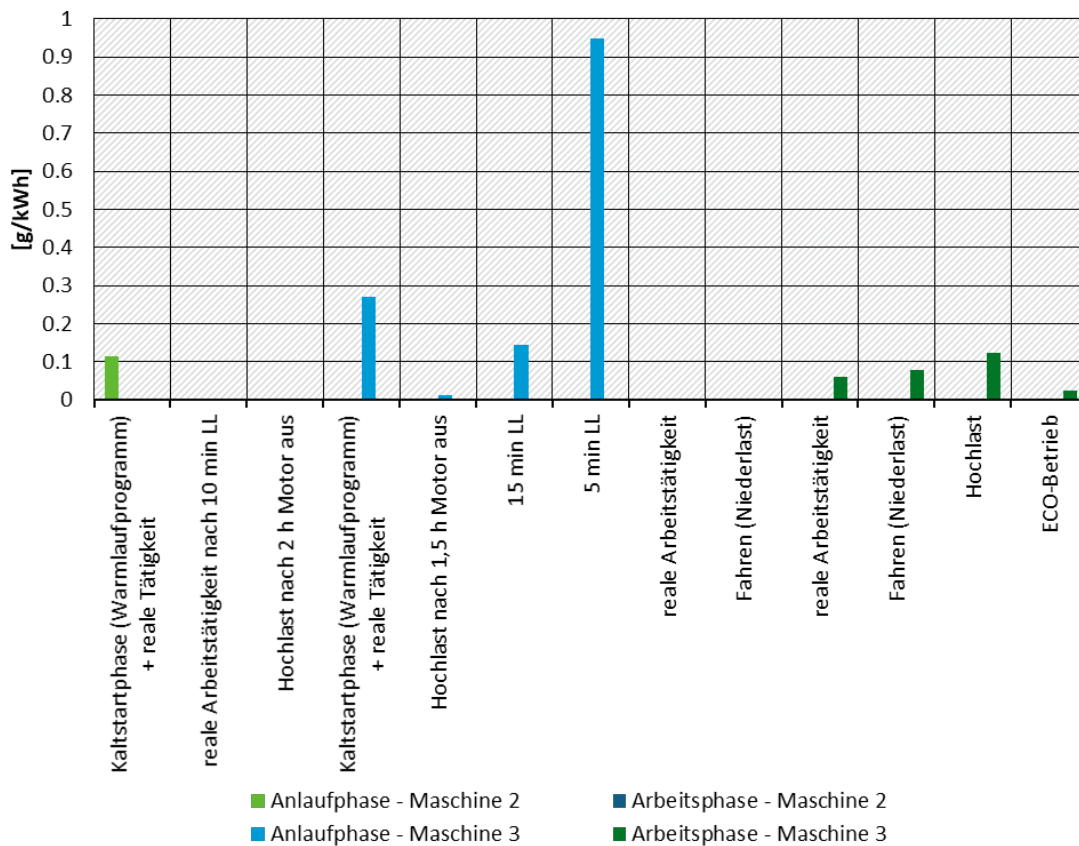


Quelle: eigene Graphik (TUG)

Bei Betrachtung der CO-Emissionen der Stufe V Maschinen fällt auf, dass die Kaltstartemissionen zwar auch höher als die Betriebsemissionen liegen, dass diese aber deutlich geringer als bei Stufe IV Maschine sind. Zudem sind die CO-Emissionen im Leerlauf im Vergleich zu den anderen Betriebsphasen deutlich erhöht, aber immer noch unter dem Grenzwert¹⁷. Sie liegen aber über den Kaltstartemissionen. In den Arbeitsphasen hat Testmaschine 2 praktisch keine CO-Emissionen vorzuweisen, während Testmaschine 3 auf geringem Niveau ist.

¹⁷ Der Grenzwert für Emissionsstufe V liegt bei der Leistungsstufe c/v-5, in die beide Testmaschinen fallen, bei 5 g/kWh.

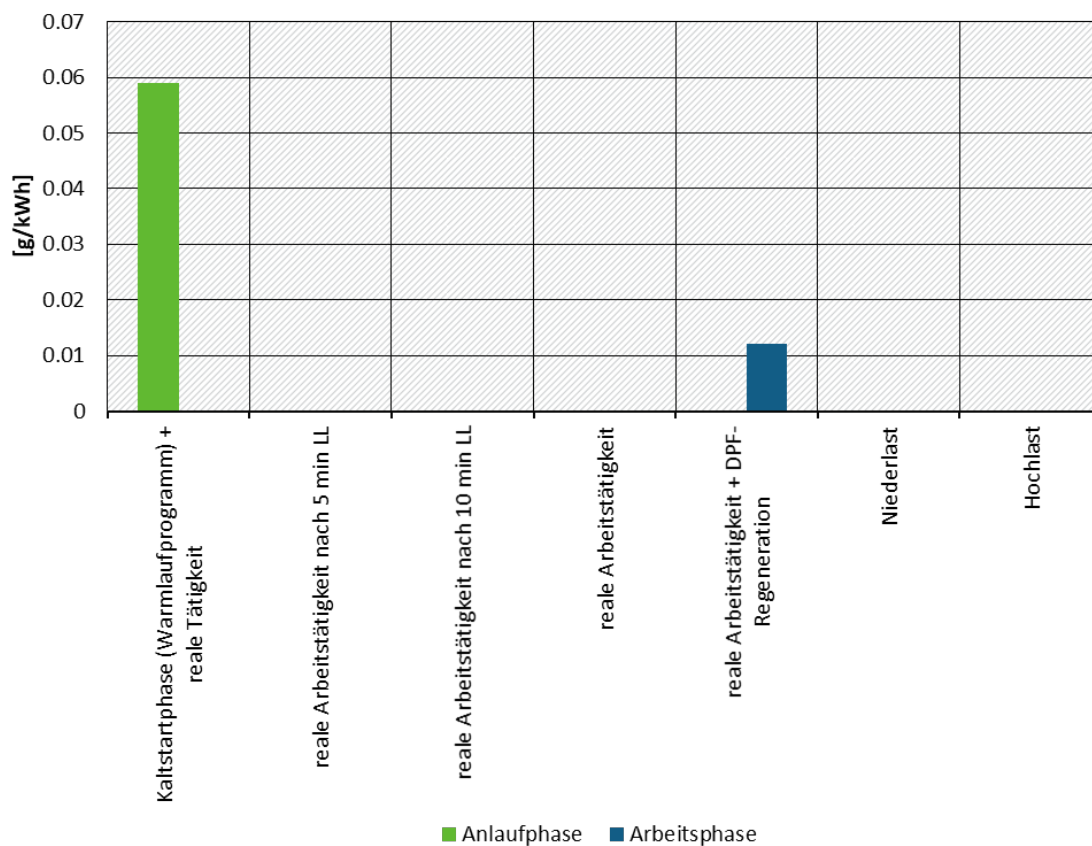
Abbildung 19: Messdaten CO – Testmaschine 2 und 3 (Emissionsstufe V)



Quelle: eigene Graphik (TUG)

In Abbildung 20 werden die HC-Emissionen der Stufe IV Testmaschine dargestellt. Man kann erkennen, dass HC-Emissionen nur im Kaltstart und während der DPF-Regeneration auftreten. Diese liegen aber deutlich unter dem Grenzwert von 0,19 g/kWh. In allen anderen Phasen liegen die Emissionen unter der Nachweisgrenze des verwendeten Messgeräts.

Abbildung 20: Messdaten HC – Testmaschine 1 (Emissionsstufe IV)



Quelle: eigene Graphik (TUG)

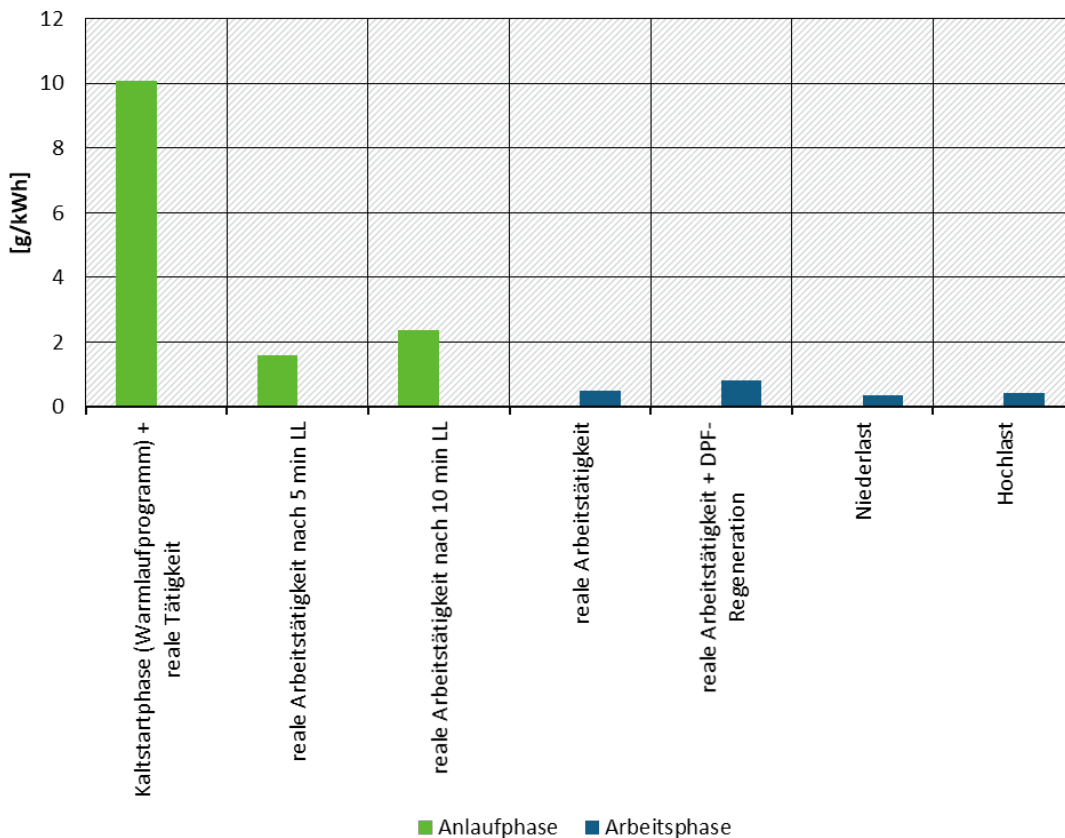
Wie bereits erwähnt wurde bei den beiden Stufe V Maschinen aufgrund der Größe des PEMS von AIP in einer Ausführung ohne FID für die Messung der HC-Emissionen eingesetzt. Somit gibt es keine Messergebnisse für HC-Emissionen von Stufe V Maschinen. Durch die geringen Werte bei der Stufe IV Maschine und dem prinzipiell sehr niedrigen HC-Emissionsniveau bei modernen Dieselmotoren (Weller et al. 2021a) kann aber auch bei mobilen Maschinen der Stufe V von einem sehr geringen HC-Niveau ausgegangen werden.

Bei den NO_x-Emissionen der Stufe IV Maschine (siehe Abbildung 21) sind die hohen Kaltstartemissionen auffällig. Bei kalter Abgasnachbehandlung wird praktisch kein NO_x konvertiert und somit kommen diese hohen Emissionen zustande. Der Einsatz von Abgasrückführung (AGR), welcher im Kaltstart möglich ist, führt nur zu einer geringen Emissionsreduktion im Vergleich zu einem betriebswarmen SCR¹⁸. Hier muss auch auf den Messzeitpunkt Winter hingewiesen werden. Die geringe Umgebungstemperatur führt zu sehr geringen Bauteiltemperaturen und somit zu einer verhältnismäßig langen Aufheizphase. Die Messdaten zeigen auch, dass die Emissionen nach längeren Leerlaufphasen deutlich über den Emissionen im Arbeitsbetrieb liegen. Im Leerlauf kühlt die Abgasnachbehandlung offensichtlich schnell aus. Die Emissionen im Arbeitsbetrieb mit betriebswarmer Abgasnachbehandlung liegen

¹⁸ Messungen an schweren Nutzfahrzeugen der Emissionsstufe Euro VI, die über ähnliche Motorentechnologien wie mobile Maschinen der Stufe IV und V verfügen, zeigen, dass AGR die NO_x-Emissionen vor SCR-Katalysator von ca. 9 g/kWh auf etwa 3 bis 6 g/kWh, also um ca. 50 % reduziert. Ein betriebswarmer SCR kann bis in den optimalen Betriebsbereich sogar mehr als 99 % der NO_x konvertieren (Weller 2020).

im Bereich des Grenzwerts von 0,4 g/kWh. Nur während der DPF-Regeneration liegen diese mit 0,805 g/kWh über dem Grenzwert.

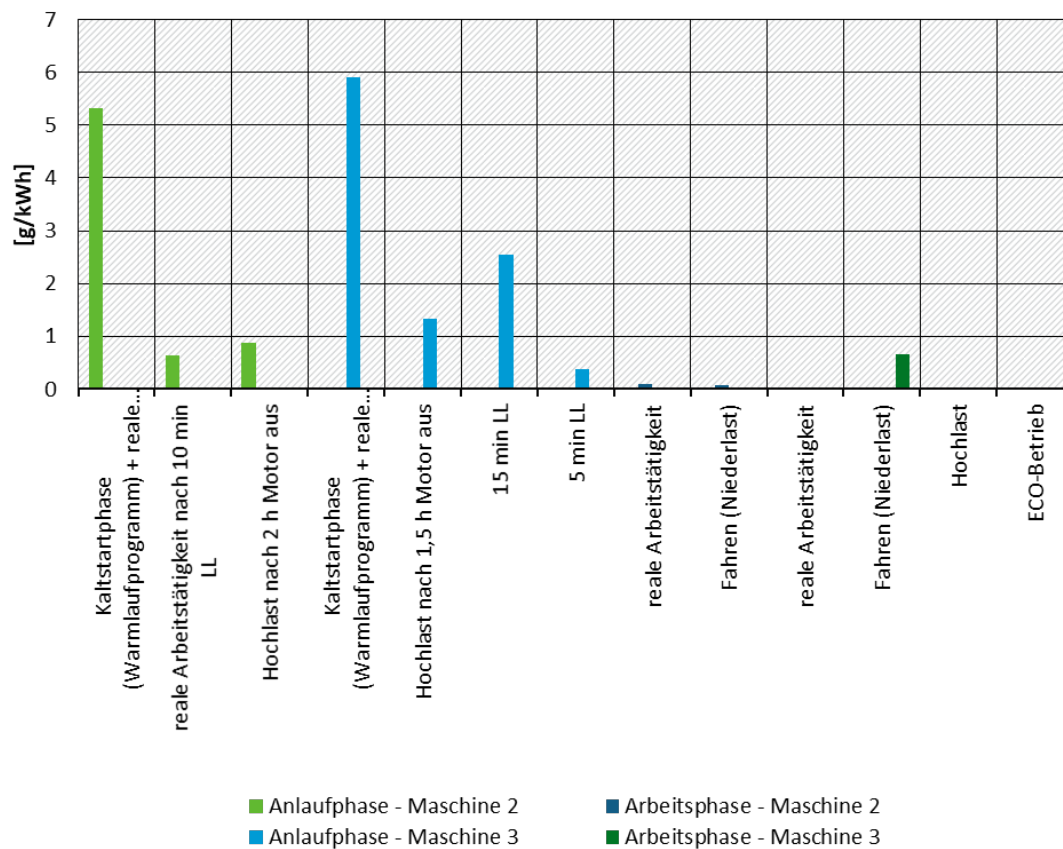
Abbildung 21: Messdaten NO_x – Testmaschine 1 (Emissionsstufe IV)



Quelle: eigene Graphik (TUG)

Die NO_x-Emissionen der beiden Stufe V Maschinen zeigen ein ähnliches Bild (siehe Abbildung 22). Die Emissionen sind in den Kaltstartphasen im Vergleich zu den Arbeitsphasen deutlich erhöht, aber auf einem geringeren Niveau als bei Stufe IV. Interessanterweise sind die Kaltstartemissionen von Testmaschine 3 höher als die von Testmaschine 2, obwohl diese im Sommer und somit bei höheren Umgebungstemperaturen vermessen wurde. Offensichtlich hat Testmaschine 2 ein effektiveres Kaltstartprogramm. Die Emissionen im bzw. nach dem Leerlauf liegen auch bei beiden Stufe V Maschinen über den betriebswarmen Arbeitsemissionen. Im Arbeitsbetrieb liegen diese dann unabhängig von der Last oder dem Betriebsmodus auf sehr geringem Niveau. Nur Testmaschine 3 zeigte beim Fahren, was für diese Planierdraupe eine geringe Last darstellt, NO_x-Emissionen über dem Grenzwert.

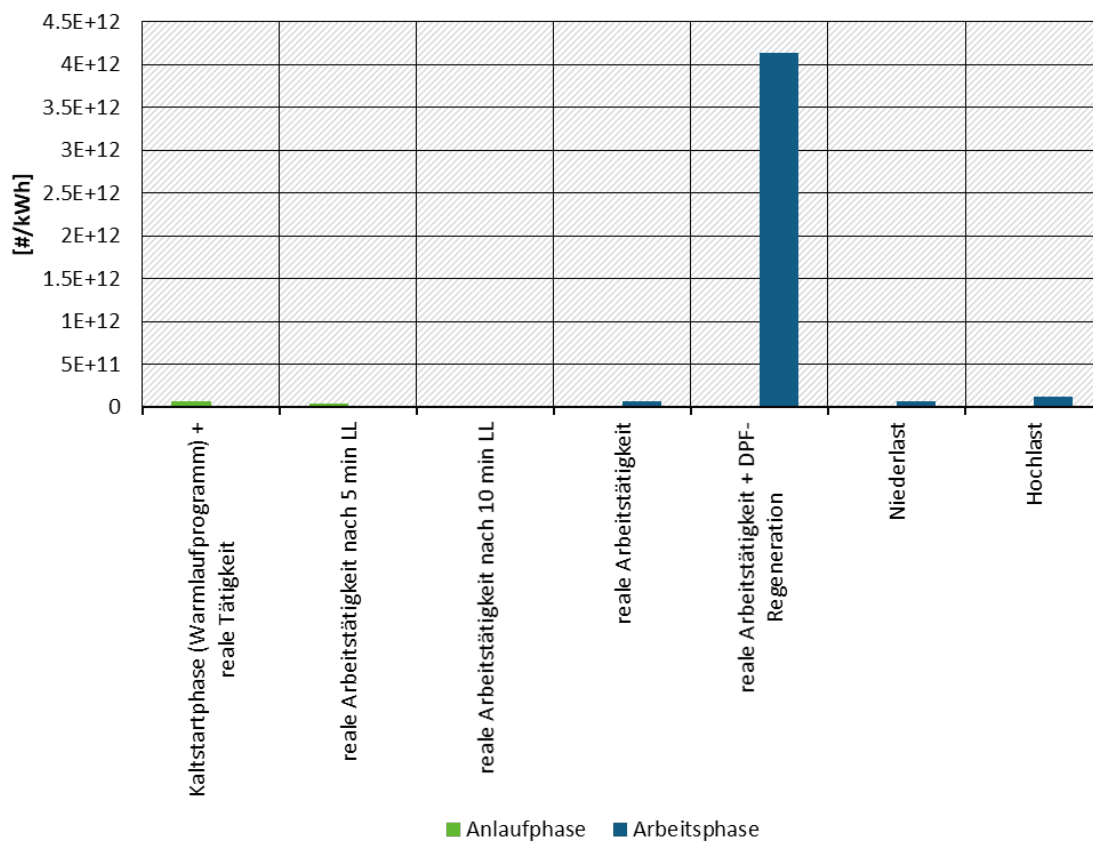
Abbildung 22: Messdaten NO_x – Testmaschine 2 und 3 (Emissionsstufe V)



Quelle: eigene Graphik (TUG)

Für Stufe IV Maschinen gibt es keinen Partikelanzahlgrenzwert, jedoch liegen die PN-Emissionen bei der gemessenen Stufe IV Maschine (siehe Abbildung 23) beim Test in dem eine Partikelfilterregeneration stattfand über dem Grenzwert von Stufe V (1E12 #/kWh). Offensichtlich kann der gespeicherte Ruß nicht komplett oxidiert werden. Zudem führt der leere Partikelfilter während bzw. direkt im Anschluss an die Regeneration zu höheren PN-Emissionen. In allen anderen Phasen, auch im Kaltstart, sind die Partikelemissionen auf geringem Niveau (1E10 bis 1E11 #/kWh).

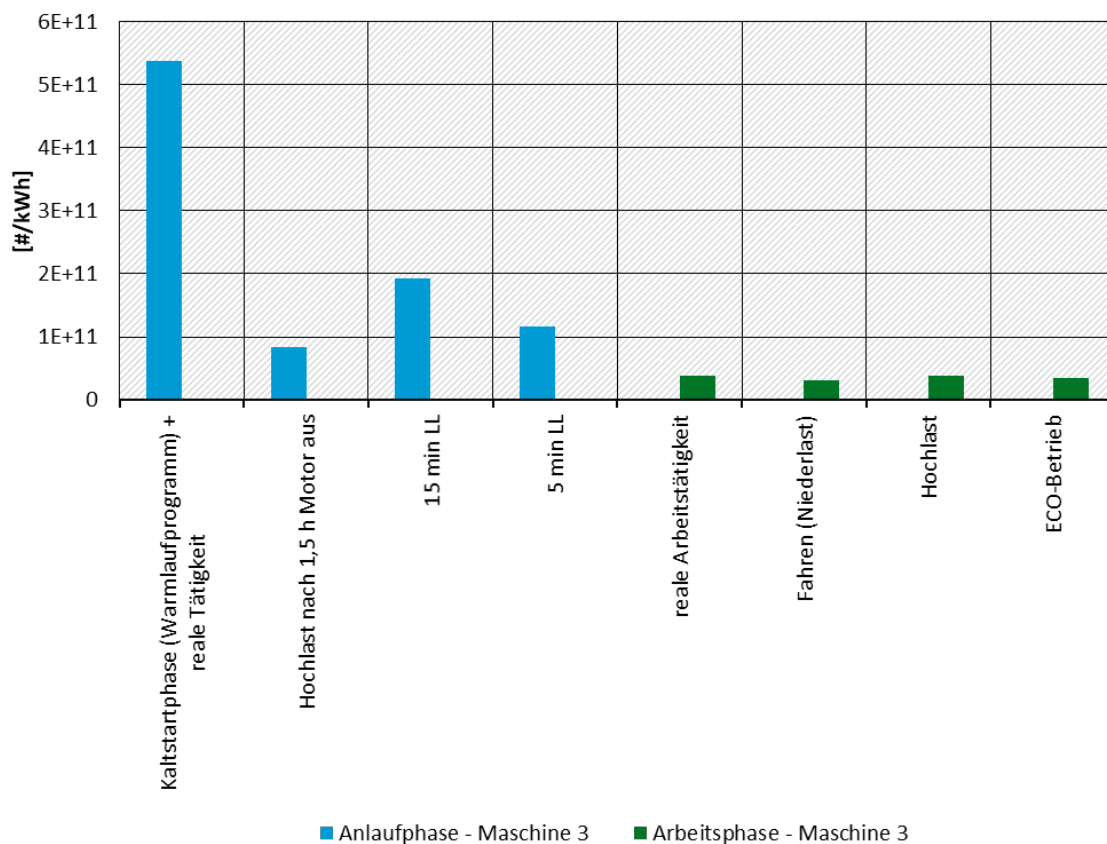
Abbildung 23: Messdaten PN – Testmaschine 1 (Emissionsstufe IV)



Quelle: eigene Graphik (TUG)

Abbildung 24 zeigt die Partikelemissionen von Testmaschine 3 (Stufe V). Wie bereits erwähnt funktionierte die Messung der Partikelanzahl bei Testmaschine 2 nicht, deshalb gibt es dazu keine Messdaten. Die Stufe V Maschine ist auf einem geringen Emissionsniveau im Vergleich zum Grenzwert. Dies ist sogar im Kaltstart der Fall, obwohl dort die PN-Emissionen im Vergleich zu den anderen Zyklen deutlich am höchsten sind. In den anderen Phasen liegen die Emissionen im Bereich von 3×10^{10} bis 2×10^{11} #/kWh. Bei der Stufe V Maschine trat keine Partikelfilterregeneration auf und somit kann zum Emissionsverhalten während einer solchen keine Aussage getroffen werden.

Abbildung 24: Messdaten PN – Testmaschine 3 (Emissionsstufe V)



Quelle: eigene Graphik (TUG)

Die Messergebnisse zeigen, dass die Realemissionen in den Arbeitsphasen, welche bei Typprüfungen abgedeckt werden, im Bereich des Grenzwerts oder darunterliegen. Die Stufe V Maschinen liegen im Vergleich zu Stufe IV auf einem geringeren Emissionsniveau (speziell bei NO_x). Dies zeigt, dass moderne Abgasnachbehandlungen mit DOC, DPF und SCR im betriebswarmen und normalen Arbeitsbetrieb sehr effektiv funktionieren. Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass die Realemissionen in speziellen Phasen (z.B. Kaltstart, Leerlauf oder Partikelfilterregeneration) noch höher liegen. In diesen Bereichen liegt noch Verbesserungspotential, z.B. durch effektive Heizstrategien oder durch Optimierung der Einsatzprofile, z.B. Verringerung des Leerlaufanteils durch Start-Stopp-Automatik.

Ob Kaltstart- oder andere Anlaufphasen mit verhältnismäßig hohen Emissionen aufgrund ihres Anteils an einem normalen Arbeitstag großen Einfluss auf die Gesamtemissionen haben, kann anhand der Messdaten alleine nicht geklärt werden. Das Messprogramm wurde zwar so gestaltet, dass alle möglichen Betriebssituation, die an einem normalen Arbeitstag auftreten, abgedeckt sind, was aber nicht bedeutet, dass die Anteile der einzelnen Phasen auch in einem realen Verhältnis zueinanderstehen. Diese Daten dienen in weiterer Folge aber als Grundlage für die Erstellung von Emissionsfaktoren für die verschiedenen Betriebszustände (siehe 2.3.2). Durch die Gewichtung der Emissionsfaktoren mit den Anteilen der einzelnen Betriebszustände kann dann erarbeitet werden, in welchen Bereichen Reduktionen der Emissionen hinsichtlich der gesamten Emissionsmasse sinnvoll sind.

2.3.1.2.5 Messergebnisse – Auswertung nach Verordnung 2017/655

Der Gesetzgeber verlangt neben den Tests am Motorprüfstand, wo ein stationärer (NRSC) und ein transients Testzyklus (NRTC) gemessen werden, seit der Einführung von Emissionsstufe V

zusätzlich noch Erfassung des Emissionsverhaltens im Realbetrieb mit sogenannten In-Service Monitoring (ISM) Messungen. Zur Messung werden portable Emissionsmessgeräte, sogenannte PEMS, eingesetzt. Solche Messungen im Realbetrieb wurden, wie bereits in 2.3.1.2 beschrieben, im Rahmen des Projekts an drei verschiedenen mobilen Maschinen durchgeführt.

2.3.1.2.5.1 ISM Randbedingungen

Der Gesetzgeber gibt gewisse Randbedingung vor, damit ein Test als gültiger ISM Test betrachtet wird und somit die Ergebnisse mit den Grenzwerten verglichen werden können. Im Folgenden werden diese Voraussetzungen genauer beschrieben. Zudem werden die finalen Ergebnisse der Tests unter diesen Kriterien gezeigt. Die Details zur Gesetzgebung sind in [Commission delegated regulation (EU) 2017/655] (EU 2017) beschrieben.

Die in der Regulierung beschriebene Methode basiert auf dem Prinzip von Betriebs- und Nichtbetriebsereignissen. Einzelne Testphasen werden nach folgenden Regeln eingeteilt:

- ▶ Prinzipiell sind Nichtbetriebsereignisse Phasen, in denen die Motorlast geringer als zehn Prozent der maximalen Nutzlast ist.
- ▶ Zudem wird die Kaltstartphase als Nichtbetriebsereignis gewertet.
- ▶ Ob DPF-Regenerationen als Betriebs- oder Nichtbetriebsereignis einzuordnen sind, ist nicht beschrieben. In der LKW-Gesetzgebung [Commission regulation (EU) 582/2011] (EU 2011), auf welcher die Gesetzgebung für mobile Maschinen prinzipiell aufgebaut ist, sind DPF-Regenerationen als Nichtbetriebsereignisse zu werten. Deshalb wurde bei den Arbeiten im Rahmen dieses Projekts davon ausgegangen, dass die DPF-Regeneration auch bei mobilen Maschinen als Nichtbetriebsereignis zu werten ist.
- ▶ Wenn ein Nichtbetriebsereignis kürzer als zwei Minuten andauert, wird es mit den umgebenden Betriebsereignissen zusammengeführt.
- ▶ Wenn ein Nichtbetriebsereignis länger als zehn Minuten anhält, wird die folgende Anlaufphase, in der die Motorleistung schon wieder über zehn Prozent ist, solange als Nichtbetriebsereignis angesehen, bis die Abgastemperatur (gemessen am PEMS) 250°C übersteigt oder aber maximal vier Minuten.
- ▶ Zudem werden die ersten zwei Minuten eines Nichtbetriebsereignisses als Betriebsereignis betrachtet.

Für die Berechnung der finalen Emissionen sind nur Betriebsereignisse heranzuziehen. Die Emissionen während der Nichtbetriebsereignisse werden bei der Auswertung nicht weiter berücksichtigt.

Die grundlegende Einteilung in Betriebs- und Nichtbetriebsphasen ist somit mit der Einordnung in Anlauf- und Arbeitsphasen, welche für die Aufteilung der Messdaten in Emissionsfaktoren (beschrieben in 2.3.1.2.4) verwendet wurde, vergleichbar.

Ein weiteres Kriterium ist die Anzahl an Einzelmessungen und die Testdauer. Ein gültiger ISM Test darf maximal aus drei Einzelmessungen bestehen und die Betriebsereignisse müssen fünf bis sieben Mal die Arbeit des NRTC der Maschine erfüllen.¹⁹

Die Daten werden mit dem Tool EMROAD ausgewertet, welches vom Gesetzgeber zur Verfügung gestellt wird (EU 2020). Dieses führt die Einteilung in Betriebs- und Nichtbetriebsereignisse automatisch durch und bildet aus den Daten der Betriebsereignisse „Moving Average Windows“ (MAW)²⁰. Ein MAW ist gültig, wenn die durchschnittliche Leistung innerhalb eines Fensters mindestens 20 % der Nennleistung beträgt. Als nächstes werden alle gültigen MAWs der Emissionsmasse nach ansteigend geordnet. Für einen gültigen Test müssen mindestens 50 % der Fenster gültig sein. Das finale Ergebnis, welches mit dem Grenzwert verglichen werden kann, ist das 90. Perzentil aller gültigen und geordneten MAWs.

Beim Vergleich der automatischen Zuordnung von Betriebsereignissen mit EMROAD und der manuellen Zuordnung anhand der oben beschriebenen Regeln ergeben sich kleine Abweichungen. Teilweise ist die Dauer der Anlaufphase um wenige Sekunden unterschiedlich. Der Grund dafür konnte nicht gefunden werden. Dies beeinflusst das finale Ergebnis aber nur minimal und ändert an den prinzipiellen Aussagen nichts. Für die weiteren Arbeiten in diesem Projekt wurden die Ergebnisse mit manueller Zuordnung der Betriebs- und Nichtbetriebsereignisse verwendet.

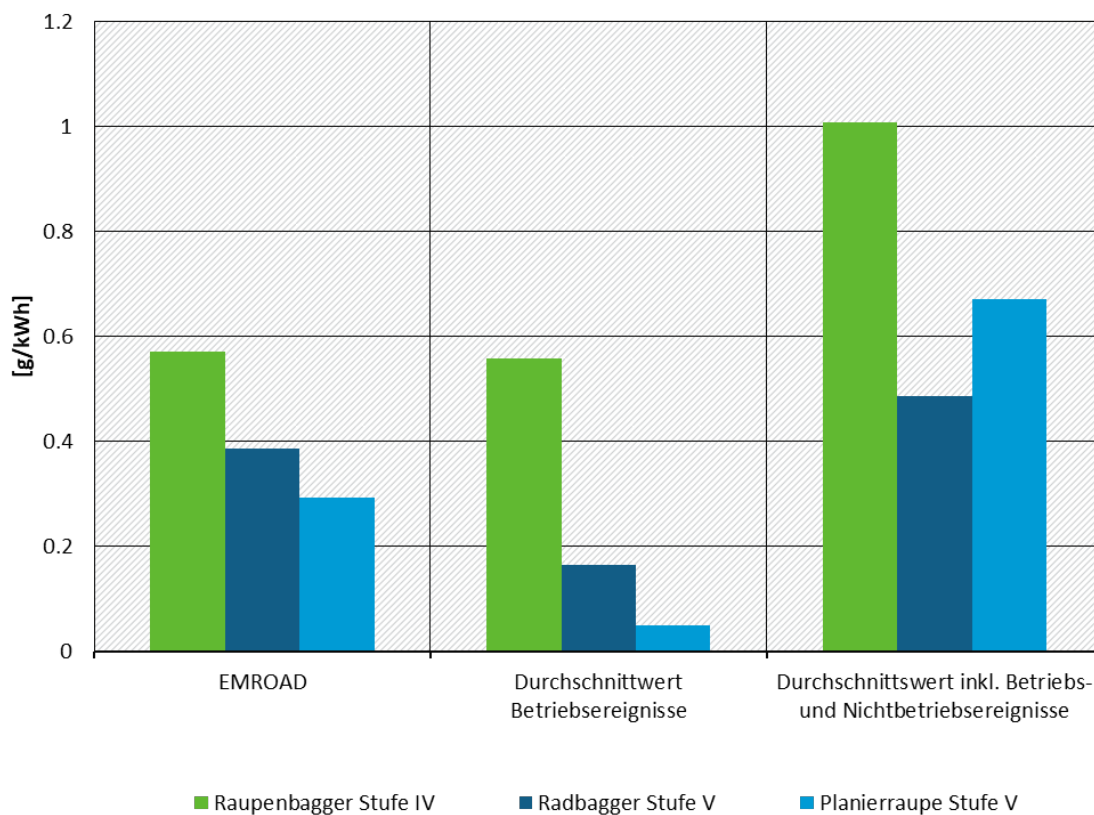
2.3.1.2.5.2 Messergebnisse laut Verordnung 2017/655

Die prinzipielle Idee der EMROAD Methode mit Auswertung des 90. Perzentils soll garantieren, dass ein großer Teil eines Emissionstests bei der Bewertung des Emissionsverhaltens berücksichtigt wird. Testmaschinen, die in speziellen Arbeitssituationen kurzzeitig höhere Emissionen produzieren, sollen aber nicht durchfallen, wenn sie sonst auf geringem Emissionsniveau liegen. Durch das Nichtberücksichtigen der obersten zehn Perzentil wird aber ein Teil der gesamten Emissionen nicht in die Auswertung miteinbezogen. Abbildung 25 zeigt die NO_x-Ergebnisse für alle drei Testmaschinen. Die EMROAD Ergebnisse (linke Balkengruppe) von Testmaschine 1 (hellgrün) liegen über dem Grenzwert von 0,4 g/kWh. Dazu muss aber erwähnt werden, dass es sich bei Testmaschine 1 um eine Stufe IV Maschine handelt und für diese Gruppe keine Erfassung der Realemissionen anhand von ISM Tests vorgeschrieben ist. Testmaschine 2 (dunkelblau) und 3 (hellblau), welche Emissionsstufe V erfüllen, liegen unter ihrem Grenzwert von 0,4 g/kWh. Die Ergebnisse zeigen also, dass beide Stufe V Maschinen in den Betriebsereignissen, welche für das Ergebnis in der EMROAD Auswertung verantwortlich sind, hinsichtlich ihrer Emissionen die unter Laborbedingungen einzuhaltenden Vorgaben des Gesetzgebers auch im realen Betrieb einhalten.

¹⁹ Die in diesem Projekt durchgeführten Messungen bestehen aus mehr als drei Einzelmessungen. Trotzdem können diese Daten mittels EMROAD ausgewertet werden und liefern repräsentative Ergebnisse, welche für die hier durchgeführte Evaluierung der Gesetzgebung zielführend sind. Alle anderen Kriterien des Gesetzgebers werden erfüllt.

²⁰ Zu jeder Sekunde eines Tests wird ein neues Arbeitsfenster, also ein MAW, gestartet. Jedes Arbeitsfenster dauert so lange bis genau einmal die Arbeit des NRTC verrichtet wurde. Mit dieser Methode entstehen mehrere Tausende Fenster pro Test und es werden alle Bereiche des Tests bei der Auswertung mitberücksichtigt.

Abbildung 25: Vergleich verschiedener Auswertemethoden – NO_x-Emissionen



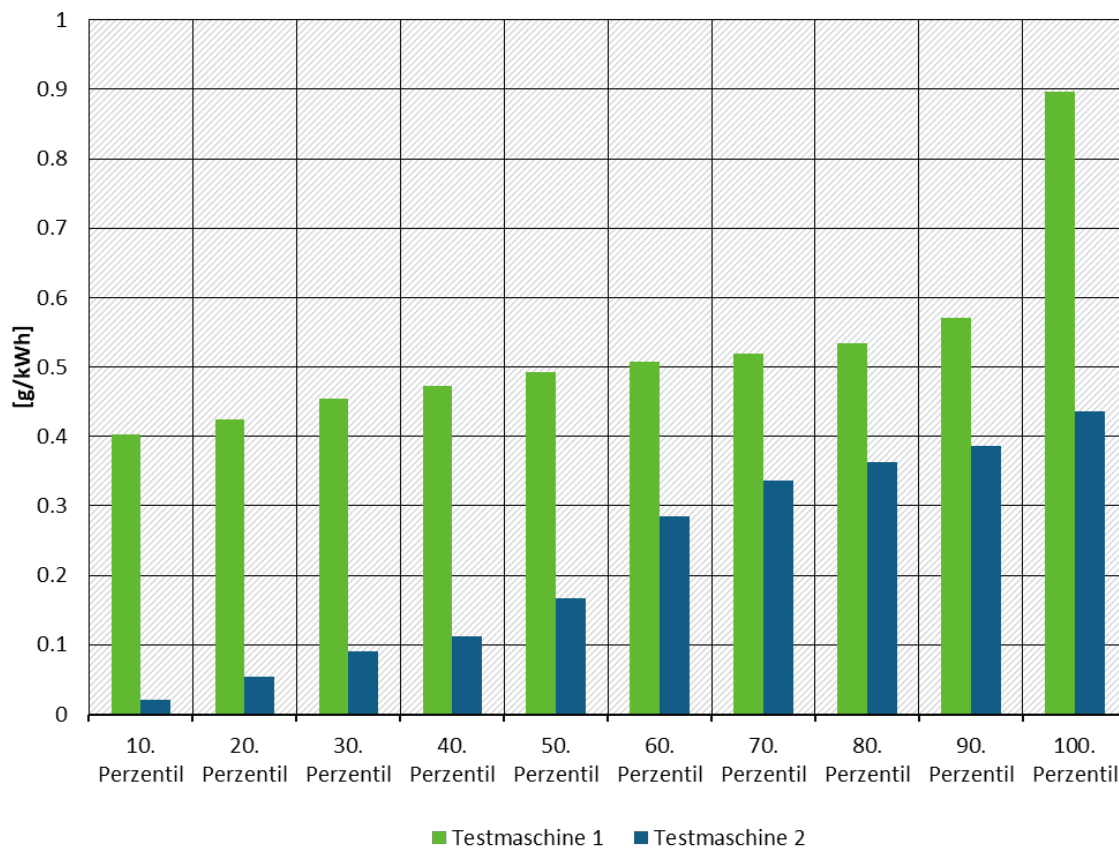
Quelle: eigene Graphik (TUG)

Für die Interpretation der EMROAD Ergebnisse werden diese mit den Mittelwerten über die Betriebsereignisse (mittlere Balkengruppe) verglichen. Die Berechnung der Mittelwerte ist leicht nachvollziehbar und berücksichtigt die gesamten Emissionen während der Betriebsereignisse. Der Durchschnittswert für die Betriebsereignisse ist bei Testmaschine 1 ähnlich wie das EMROAD Ergebnis. Bei Testmaschine 2 und 3 liegen diese Durchschnittswerte aber deutlich unter den 90. Perzentilen der EMROAD Auswertungen.

Für einen genaueren Vergleich der EMROAD Methode und der einfachen Mittelwertbildung zeigt Abbildung 26 die Perzentile der MAWs der Betriebsereignisse aufsteigend für NO_x von Testmaschine 1 und 2. Bei Betrachtung der Ergebnisse von Testmaschine 1 (hellgrün) ist eine Schwäche der EMROAD Auswertung erkennbar. Durch den Ausschluss der obersten zehn Prozent wird ein großer Teil der gesamten Emissionen nicht berücksichtigt. Bei den MAWs vom 10. bis zum 90. Perzentil ist hingegen nur ein leichter Emissionsanstieg zu erkennen. Somit sind das 90. Perzentil und der Mittelwert bei diesem Test auf einem ähnlichen Niveau.

Wenn man aber die verschiedenen Perzentile von Testmaschine 2 (dunkelblau) genauer betrachtet, dann ist klar zu erkennen, dass der Durchschnittswert für die Betriebsereignisse niedriger als das 90. Perzentil liegt. Dies kann durch den fast konstanten Emissionsanstieg über alle Perzentile begründet werden.

Abbildung 26: Vergleich verschiedener Perzentile, EMROAD-Auswertung, NO_x



Quelle: eigene Graphik (TUG)

Der Vergleich der EMROAD Ergebnisse und der Mittelwerte über die Betriebsereignisse zeigt somit, dass die auf Statistik beruhenden EMROAD Ergebnisse nur schwer interpretierbar sind, da sie nicht mit den durchschnittlichen Emissionswerten korrelieren. Zudem ist der Ausschluss der oberen zehn Prozent und somit eines Teils der Emissionsmasse für Konformitätstests nicht ideal, da in diesem Bereich auch sehr hohe Emissionsereignisse liegen können. Wenn schon die Methode mit MAWs und 90 Perzentil Grenzwerten beibehalten werden muss, könnte auch ein 100 Perzentil Grenzwert eingeführt werden (z.B. 2x der Grenzwert) oder der Grenzwert auch für den Mittelwert eingezogen werden. Dadurch würden alle Betriebsereignisse in die Bewertung des Realemissionsverhaltens auf Basis der ISM-Tests einfließen und würden somit an den Gesetzgeber übermittelt. Dies würde die Emissionskontrolle in allen Betriebsphasen absichern.

Es werden aber nicht erst bei der Betrachtung des 90. Perzentils Emissionen vernachlässigt, sondern bereits beim Ausschluss der Nichtbetriebsereignisse. Wenn man die Emissionen während der Nichtbetriebsereignisse zusätzlich in die Mittelwertbildung einbezieht, dann erhöhen sich die NO_x-Emissionen bei allen drei Testmaschinen merklich. Dies wird durch die rechte Balkengruppe gezeigt. Dies kann durch die hohen Emissionen in den Kaltstart- und Anlaufphasen (siehe Kapitel 2.3.1.2.4) erklärt werden. In diesen Phasen erreicht der SCR-Katalysator seine optimale Betriebstemperatur nicht und reduziert die NO_x somit weniger effektiv. Die hier dargestellten Ergebnisse zeigen den Einfluss der Emissionen der Nichtbetriebsereignisse an den Messtagen im Rahmen dieses Projekts. Diese Messtage folgen aber einem speziellen Messprogramm und repräsentieren nicht unbedingt einen normalen Arbeitstag der jeweiligen Maschinen. Somit kann anhand dieser Ergebnisse nicht genau beurteilt werden, wie viel Einfluss solche Nichtbetriebsereignisse auf die gesamten Emissionsmassen

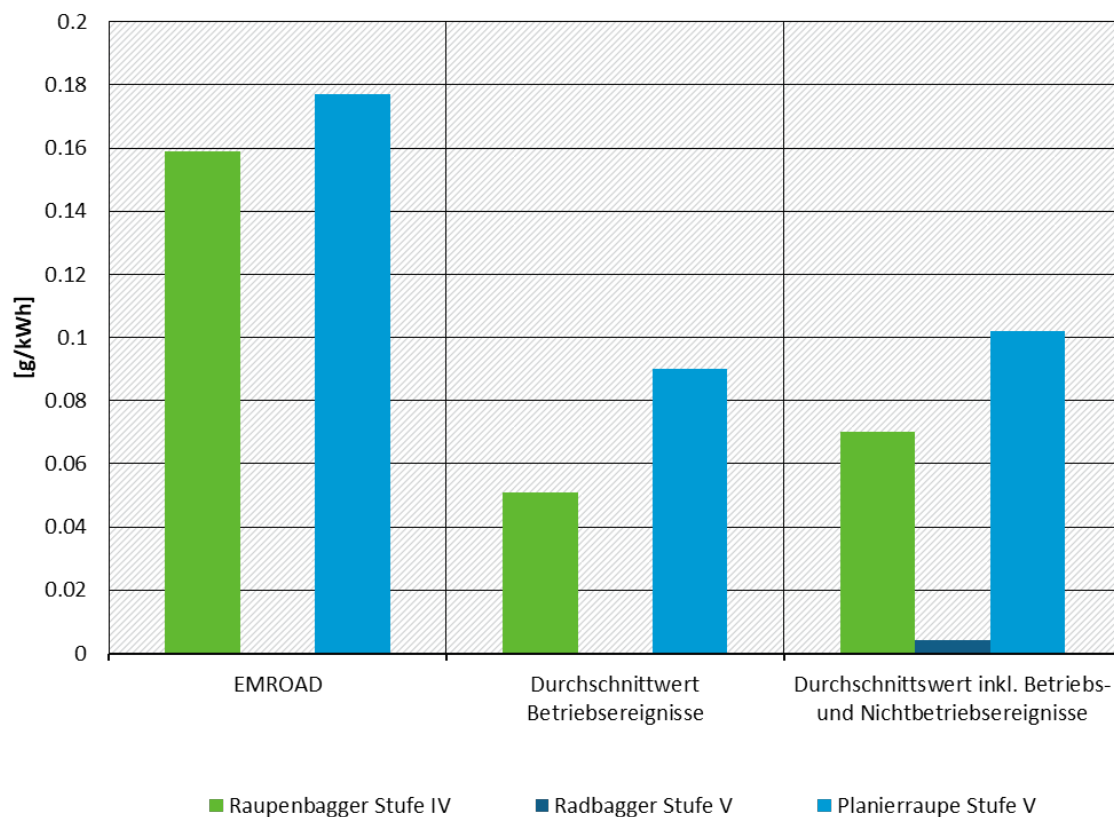
eines normalen Arbeitstags haben. Da Nichtbetriebsereignisse, wie z.B. der Kaltstart, aber definitiv auftreten, sollten diese nicht komplett von der Bewertung des Emissionsverhaltens ausgeschlossen werden, wie es in der EMROAD Methode der Fall ist. In Abschnitt 2.5 wird auf die Anteile der einzelnen Betriebsphasen an einem Arbeitstag genauer eingegangen. Dabei wird gezeigt, wie die einzelnen Nichtbetriebsereignisse bzw. Anlaufphasen im Vergleich zu den Betriebsereignissen für die Darstellung eines durchschnittlichen Arbeitstags von mobilen Maschinen gewichtet werden sollten, um ein repräsentatives Ergebnis zu erhalten.

Die ISM Testmethode wurde offensichtlich so entwickelt, dass sie die Konformität mit dem NRTC zeigen soll (Länge der MAWs und Ausschluss niederlastiger Phasen). Damit könnten auch die Kaltstartphasen wie beim NRTC gewichtet²¹ in ein Durchschnitts-Ergebnis einfließen, das dann auch mit den geltenden Grenzwerten verglichen werden könnte. Mit einer solchen Änderung der Auswertung würde natürlich auch der Anspruch an die Abgaskontrolle deutlich erhöht. Wegen der nötigen Vorlaufzeit für Hersteller wäre so eine Änderung rechtzeitig anzubahnen, um sie dann z.B. als Stufe V-B in Zukunft einführen zu können.

Abbildung 27 zeigt die CO-Ergebnisse der EMROAD Auswertung. Es ist zu erkennen, dass die EMROAD Ergebnisse bei allen drei Testmaschinen deutlich unter dem CO-Grenzwert von 5 g/kWh liegen. Die Durchschnittswerte der Betriebsereignisse und der Gesamttests inkl. Nichtbetriebsereignisse sind bei Testmaschine 1 und 3 niedriger (teilweise nur halb so hoch) als die EMROAD Ergebnisse. Offensichtlich haben die CO-Emissionen in den Nichtbetriebsereignissen keinen großen Einfluss auf die gesamte Emissionsmasse. Das CO-Emissionsniveau von Testmaschine 2 ist unabhängig von der Auswertemethode im Vergleich zum Grenzwert sehr gering.

²¹ Der NRTC wird zweimal durchfahren. Erst kaltgestartet und dann nach einer 20-minütigen Standzeit mit abgestelltem Motor noch einmal. Der kaltgestartete Teil wird mit 10 % und der warmgestartete mit 90 % gewichtet. [COMMISSION DIRECTIVE 2010/26/EU] (EU 2010)

Abbildung 27: Vergleich verschiedener Auswertemethoden – CO-Emissionen



Quelle: eigene Graphik (TUG)

Neben den Messergebnissen aus diesem Projekt, wurden auch noch weitere ISM-Testergebnisse analysiert. Euromot hat dazu Daten von ISM Tests zur Verfügung gestellt. Die Daten beinhalten 63 Tests von elf verschiedenen Maschinenherstellern bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen. Knapp 90 % der Ergebnisse liegen bei NO_x unter dem Grenzwert, wobei zwei Maschinen mehr als die dreifachen Emissionen des Grenzwerts haben. Bei HC liegen nur zwei Maschinen über dem Grenzwert. Eine davon hat im Vergleich zum Grenzwert mehr als dreimal so hohe HC-Emissionen. Bei CO liegen alle Testergebnisse unter der Hälfte des Grenzwerts.

Diese Ergebnisse bestätigen die bereits im Detail gezeigten Ergebnisse der Stufe V Maschinen. Offensichtlich liegen die Emissionen bei den meisten Maschinen der Flotte im geprüften Arbeitsbetrieb unter den jeweiligen Grenzwerten.

2.3.2 Ableitung von repräsentativen Emissionsfaktoren

Das folgende Kapitel beschreibt die Ableitung repräsentativer Emissionsfaktoren von mobilen Maschinen für die Emissionsstufe IV und V basierend auf den bereits beschriebenen Messdaten. Dabei werden die Datengrundlage, die Einteilung in verschiedene Betriebsphasen, die zur Verfügung stehenden Methoden zur Erstellung von Emissionsfaktoren, die Erstellung der Emissionsfaktoren selbst, der Vergleich der generierten Emissionsfaktoren mit Literaturwerten und zusätzliche Einflussfaktoren auf das Emissionsverhalten, welche in diesem Projekt aufgrund zu geringer Datenlage nicht berücksichtigt wurden, genauer betrachtet.

2.3.2.1 Datengrundlage

Tabelle 8 gibt einen Überblick über alle Maschinen, für die Messdaten in speziellen Arbeitssituationen zur Verfügung stehen. Diese detaillierten Messdatensätze können für die Erstellung von situationsspezifischen Emissionsfaktoren bzw. dafür geeigneten Simulationsmodellen verwendet werden. Die Tabelle zeigt, dass mit den Daten mehrere unterschiedliche Maschinenkategorien abgedeckt werden. Dadurch werden sowohl Maschinen mit direktem als auch Hydraulikantrieb abgedeckt. Jedoch kann man auch erkennen, dass die einzelnen Kategorien jeweils nur durch eine bzw. zwei Maschinen abgedeckt sind. Eine größere Anzahl an Maschinen pro Kategorie würde das Bilden von Emissionsfaktoren bzw. das Erstellen von geeigneten Simulationsmodellen erleichtern. Durch die Abdeckung verschiedener Antriebssysteme und Motoren-bzw. Abgasnachbehandlungstechnologien kann die Flotte besser abgebildet werden. Dies reduziert die Unsicherheit der Ergebnisse.

Tabelle 8: Daten für die Erstellung von Emissionsfaktoren in speziellen Arbeitssituationen

Emissions-stufe	Bagger	Radlader	Traktor	Holzvoll-ernter	Planierraup e	Gesamt
Stufe IV	1	0	0	1	0	2
Stufe V	1	0	2	0	1	4
gesamt	2	0	2	1	1	6

Tabelle 9 zeigt die Anzahl aller Maschinen für die Daten zum Emissionsverhalten im normalen Arbeitsbetrieb zur Verfügung stehen, deren Daten aber keine Auflösung nach speziellen Betriebszuständen zulassen, inklusive der Maschinen aus Tabelle 8. Alle Daten werden für die finale Kalibrierung der Emissionsfaktoren bzw. des Simulationsmodells genutzt. Dadurch repräsentieren die finalen Emissionsfaktoren im Durchschnitt eine größere Maschinenanzahl und kommen einem Flottenmodell näher.

Der Minibagger mit Emissionsstufe V und Leistungskategorie v-2, welcher bei den Messdaten in Kapitel 2.3.1.1 dargestellt ist, wird aufgrund der verschiedenen Grenzwerte und dem damit verbundenen unterschiedlichen Emissionsverhalten nicht berücksichtigt. Die Stufe V Messdaten und daraus abgeleiteten Emissionsfaktoren repräsentieren hier also nur mobile Maschinen und Geräte der Kategorie v-5 und v-6.

Tabelle 9: Daten für Kalibrierung von Emissionsfaktoren (Messdaten + Literaturwerte)

Emissions-stufe	Bagger	Radlader	Traktor	Sonstige	Gesamt
Stufe IV	9	4	2	5	20
Stufe V	1	1	3	2	7
gesamt	10	5	5	7	27

2.3.2.2 Phaseneinteilung

Um das Emissionsverhalten von mobilen Maschinen und Geräten richtig einordnen und aus den Messdaten repräsentative Emissionsfaktoren generieren zu können, müssen die Messwerte in

die für den Betrieb mobiler Maschinen relevante Phasen unterteilt werden. Der Gesetzgeber gibt in der Regulierung 2017/655 (EU 2017) Regeln für die Unterteilung in Betriebs- und Nichtbetriebsereignisse vor (siehe 2.3.1.2.5), welche bei der Phaseneinteilung für die Erstellung von Emissionsfaktoren als Grundlage dienen. Da die Aufteilung in Betriebs- und Nichtbetriebsereignisse für die Erstellung von detaillierten Emissionsfaktoren aber nicht ausreichend ist, sondern eine weitere Unterteilung in verschiedene Subphasen²² fordert, wurde die Phaseneinteilung entsprechend erweitert. Zudem wurde darauf geachtet, dass Emissionsfaktoren genau die durch sie beschriebene Testphase abbilden²³, auch wenn dies zu Abweichungen von der vom Gesetzgeber gegebenen Methode führt.

Die finale Phaseneinteilung wurde somit maschinen- bzw. sogar testspezifisch durchgeführt. Folgend sind die einzelnen Phasen genauer beschrieben:

- ▶ Kaltstartphase: Diese kommt im Normalfall nur einmal pro Arbeitstag vor, da kürzere Betriebspausen für ein vollständiges Auskühlen des Motors nicht ausreichen. Das Emissionsverhalten ist durch die komplett kalte Abgasnachbehandlungsanlage zu Beginn dieser Phase und das spezielle Aufwärmprogramm von mobilen Maschinen²⁴ nicht mit den anderen Phasen vergleichbar. Diese Phase beginnt bei Motorstart und endet nach Erreichen der Betriebstemperatur der Abgasnachbehandlung (Abgastemperatur = 250°C). Die Kaltstartphase dauert in etwa 20 Minuten.
- ▶ Semikaltstartphase (bzw. Warmstartphase): Diese Phase spiegelt den Start des Motors nach einer Abstelldauer zwischen 1 – 8 Stunden wider. In dieser Phase ist die Abgasnachbehandlung zwar bereits abgekühlt, aber noch wärmer als bei einem kompletten Kaltstart. Dadurch entstehen Zusatzemissionen, die geringer als beim kompletten Kaltstart sind.
- ▶ Leerlaufphase: Wenn eine Leerlaufphase auf eine längere Arbeitsphase folgt, ist die Abgasnachbehandlung am Anfang noch im optimalen Betriebsfenster und die Emissionen bleiben ähnlich wie im Arbeitsbetrieb. Nach mehreren Minuten im Leerlauf kühlt die Abgasnachbehandlung aufgrund der geringen Abgastemperatur aus und die Emissionen (speziell NO_x) steigen an. Die Messdaten der drei Testmaschinen zeigen, dass im Durchschnitt nach etwa fünf Minuten ein merklicher Anstieg der NO_x-Emissionen auftritt. Die Emissionsfaktoren für Leerlaufemissionen werden deshalb in Phasen kleiner und größer fünf Minuten aufgeteilt. Eine größere Datenbasis würde eine Evaluierung dieser Grenze von fünf Minuten erlauben und zeigen, ob diese auch für die gesamte Flotte gilt.
- ▶ Anlaufphase: Wenn nach einer Leerlaufphase größer als fünf Minuten wieder eine Arbeitsphase folgt, muss die Abgasnachbehandlung wieder auf Betriebstemperatur gebracht werden. In der kurzen Phase, in der die Abgasnachbehandlung aber noch nicht optimal

²² Betriebsereignisse müssen z.B. noch in Arbeit bei niedriger Last, Arbeit bei hoher Last, etc. unterteilt werden. Dies wird bereits in Kapitel 2.3.1.2.4 gezeigt.

²³ Beispiel Aufheizphasen: Die Länge der Aufheizphasen wird nicht von den vorgegebenen Längen des Gesetzgebers für Anlaufphasen bestimmt, sondern durch die tatsächliche Dauer bis die Abgastemperatur 250°C erreicht hat.

²⁴ Alle drei getesteten mobilen Maschinen haben ein spezielles Aufwärmprogramm im Kaltstart. Während dieses Programms kann mit der Maschine nicht gearbeitet werden. Das Programm dauert ca. 10 – 15 Minuten.

funktioniert, sind die Emissionen höher als im Arbeitsbetrieb bei betriebswarmer Abgasnachbehandlung. Deshalb werden für diese Anlaufphase Emissionsfaktoren in Form von Aufschlägen bestimmt.

- Betriebs- bzw. Arbeitsphase: Je nach Arbeitstätigkeit ist die Leistungsanforderung an mobile Maschinen unterschiedlich. Dies beeinflusst auch die Emissionen. Zur vereinfachten Darstellung werden für die Betriebs- bzw. Arbeitsphasen verschiedene Emissionsfaktoren für Arbeit bei niedriger, mittlerer und hoher Last erstellt.

2.3.2.3 Methoden zur Erstellung repräsentativer Emissionsfaktoren

Der folgende Abschnitt erklärt die möglichen Ansätze die Realemissionen mobiler Maschinen darstellen zu können. Dabei handelt es sich um einen simulationsbasierten Ansatz und ein Modell, das die Emissionsfaktoren direkt aus den Messdaten bildet, also einen messdatenbasierten Ansatz.

Unabhängig vom verwendeten Modell muss gleich zu Beginn dieses Abschnitts auf einen Schwachpunkt hinsichtlich der Messdaten für die Verwendung für die Erstellung eines Emissionsmodells hingewiesen werden. Das Leistungssignal wurde bei allen Messdaten über die Motorsteuerung ausgelesen. Diskussionen beim Workshop im Oktober 2021 in Heidelberg mit dem TFZ Bayern und den Industriepartnern zeigten, dass dieses teilweise deutlich von der tatsächlich geleisteten Arbeit abweicht (siehe Kapitel 3.2.5.1). Im Projekt liegen dazu aber keine genauen Daten vor und es konnten auch keine Publikationen zu diesem Thema gefunden werden. Eine andere Möglichkeit zur Leistungsberechnung wäre die im HBEFA verwendete CO₂-Leistungsinterpolation (Matzer et al. 2019). Da für mobile Maschinen und Geräte aber keine Referenz-Motorkennfelder vorliegen, konnte diese Methode nicht verwendet werden. Es wurde somit aus Mangel an Alternativen auf die Leistung aus der Motorsteuerung zurückgegriffen.

2.3.2.3.1 Kennfeldbasiertes Simulationsmodell

Um Emissionsfaktoren mithilfe eines Modells erstellen zu können, braucht man ein Simulationsmodell, das die Realemissionen von mobilen Maschinen und Geräten in allen relevanten Betriebssituationen repräsentativ darstellt. Der große Vorteil dieser Methode ist, dass mit einem solchen Modell Emissionsfaktoren für alle möglichen Arbeitssituationen detailliert simuliert werden können. Dabei ist für die Qualität der Emissionsfaktoren neben der Simulationsmethode selbst auch die Testdatenbasis entscheidend. Diese Abhängigkeit von einer breiten und detaillierten Testdatenbasis ist der Nachteil dieser Methode.

Im Handbuch Emissionsfaktoren für den Straßenverkehr (HBEFA) wird für die Erstellung von Emissionsfaktoren für den Straßenverkehr seit vielen Jahren ein simulationsbasierter Ansatz genutzt und liefert sehr gute Ergebnisse. Durch die Arbeiten für das HBEFA bietet das Simulationstool PHEM, welches an der Technischen Universität Graz entwickelt wurde und ständig weiterentwickelt wird, bereits die Möglichkeit modernste Abgasnachbehandlungstechnologien mithilfe von physikalischen Modellen abzubilden und somit repräsentative Realemissionen für verschiedenste Betriebssituationen zu erzeugen (Weller 2020). Diese Modelle können für die Simulation mobiler Maschinen ebenso verwendet werden (Notter et al. 2022).

Da die Abgasnachbehandlungstechnologien von Euro VI schweren Nutzfahrzeugen (SNF) und mobilen Maschinen der Emissionsstufen IV und V, für die repräsentative Emissionsfaktoren erarbeitet werden, ähnlich sind, können die bereits bestehenden SNF PHEM Modelle als Basis genutzt werden. Diese müssen aber mithilfe von Messdaten für alle möglichen Betriebssituationen von mobilen Maschinen abgestimmt werden. Messdaten eignen sich dafür

aber nur, wenn diese auch alle relevanten Betriebsphasen abdecken (siehe 0). Um die detaillierte Simulation des realen Emissionsverhaltens in all diesen verschiedenen Situationen gewährleisten zu können, müssen aus dem bereits bestehenden PHEM Simulationsbaukasten die Modelle für die Abgasnachbehandlungen mobiler Maschinen zusammengebaut werden. Dazu sind genaue Daten über den Aufbau der Abgasnachbehandlung und einzelne Komponenten, wie z.B. Abmessungen von Katalysatoren, notwendig. Da die Temperatur der einzelnen Abgasnachbehandlungskomponenten einen großen Einfluss auf die Konvertierungsraten hat, beinhaltet PHEM auch ein physikalisches Temperaturmodell, welches ebenso parametrisiert werden muss. Dazu sollten neben der Abgastemperatur am Auspuffende zumindest von drei Maschinen genaue Temperaturmessdaten im Abgasstrang, z.B. Temperatur vor DOC, nach DPF oder vor SCR vorliegen. Diese werden zur Bedatung des Modells²⁵ gebraucht und geben Aufschluss über mögliche Heizstrategien, welche im Modell natürlich auch beachtet werden müssen. Zudem sind Emissionsmessdaten bei Motorauslass, also vor Abgasnachbehandlung für die Erstellung der Konvertierungsmodelle der Katalysatoren hilfreich (Weller 2020).

Mobile Maschinen können neben den beiden relevanten Emissionsstufen zusätzlich in verschiedene Abgasnachbehandlungstechnologien²⁶, Maschinenkategorien²⁷ und Antriebssysteme²⁸ aufgeteilt werden. Wenn Messdaten zu mehreren dieser verschiedenen Möglichkeiten vorhanden wären, könnte beurteilt werden, wie viele einzelnen Modelle erstellt werden müssen bzw. welche Varianten zu Durchschnittsmodellen zusammengefasst werden können, um repräsentative Emissionsfaktoren für die gesamte Flotte von mobilen Maschinen erstellen zu können. Gegebenenfalls reicht sogar ein Modell, das alle Varianten abdeckt.

Insgesamt stehen aber nur Datensätze von zwei Stufe IV und vier Stufe V Maschinen zur Verfügung, die alle relevanten Betriebssituationen abdecken. Genaue Messungen der Temperaturen oder der Emissionen vor Abgasnachbehandlung liegen aber bei keiner dieser Testmaschinen vor²⁹. Die vorhandenen Messdaten reichen für die Erstellung von detaillierten PHEM Simulationsmodellen somit nicht aus. Diese Methode wird in diesem Projekt deshalb nicht als geeignete Methode betrachtet.

Zum Vergleich: Bei den Arbeiten für das HBEFA standen für die Erstellung eines Euro VI Simulationsmodells³⁰ insgesamt Messdaten von 9 unterschiedlichen Fahrzeugen für die

²⁵ Mit diesen Daten können z.B. Koeffizienten für die Wärmekapazität oder den Wärmeverlust parametrisiert werden.

²⁶ Es gibt verschiedene Kombinationen aus AGR, DOC, DPF und SCR. Bei Stufe V sind alle Maschinen ähnlich aufgebaut, aber gerade bei Stufe IV gibt es viele verschiedene Aufbauten der Abgasnachbehandlung.

²⁷ Es gibt viele verschiedene Kategorien, wie z.B. Radbagger, Raupenbagger, Planieraupe, Walze, Kran, Teleskoplader, Radlader, Bohranlage, Holzernemaschine, Traktor, Mähdrescher, etc.

²⁸ Bei manchen Maschinen versorgt der Verbrennungsmotor ein Hydrauliksystem und arbeitet dafür bei konstanter Drehzahl (z.B. bei Baggern). Bei anderen mobilen Maschinen wird die Motorleistung direkt zum Antrieb der Maschine genutzt (z.B. bei Traktoren). Dies hat natürlich Einfluss auf das Emissionsverhalten mobiler Maschinen und Geräte.

²⁹ Um diese Daten erfassen zu können, sind ausführliche Messkampagnen inkl. Einbau von Temperatursensoren im Abgasstrang nötig. Dies erfordert neben dem zeitlichen Aufwand teilweise auch das Ersetzen einzelner Komponenten nach der Messung und somit auch einen höheren finanziellen Aufwand.

³⁰ Da alle Euro VI LKW ähnlich aufgebaut sind, ist keine Unterscheidung zwischen verschiedenen Technologien notwendig. Es reicht ein Emissionsmodell für die Erstellung aller Euro VI Emissionsfaktoren aus.

Erstellung des Modells³¹ und weitere 18 für die finale Kalibrierung zur Verfügung (Matzer et al. 2019).

2.3.2.3.2 Messdatenbasiertes Emissionsmodell

Eine andere Methode ist die Erstellung eines Emissionsmodells direkt basierend auf Messdaten von Realemissionen. Dabei werden die Realemissionen von verschiedenen Maschinen je Emissionsstufe und ggf. Abgasnachbehandlungstechnologie für einzelne Arbeitsphasen als durchschnittliche Emissionsfaktoren zusammengefasst. Damit die Emissionsdaten von den unterschiedlichen Maschinen vergleichbar sind, werden die Daten mittels Division durch die Nennleistung oder die geleistete Arbeit normiert. Somit können aus diesen durchschnittlichen Emissionsfaktoren die Realemissionen in Abhängigkeit der Maschinendaten der betrachteten Maschine und des Testzyklus berechnet werden.

Der große Vorteil dieser Methode ist, dass zwar ebenso Messdaten von allen relevanten Betriebssituationen benötigt werden, Emissionsmessdaten aber ausreichen. Es werden keine genauen Details über den Aufbau der Abgasnachbehandlung oder der Abgastemperaturen benötigt. Diese sind implizit in den Emissionsmessdaten enthalten. Der Nachteil dieser Methode ist, dass im Vergleich zum Simulationsmodell, mit dem Emissionsfaktoren für alle möglichen Betriebssituationen erstellt werden können, bei dieser Methode Emissionsfaktoren nur für auch tatsächlich gemessene Betriebssituationen verfügbar sind. D.h., eine sinnvolle und auf klaren Richtlinien basierende Einteilung in die verschiedenen Betriebsphasen (siehe Kapitel 2.3.1.2.5.1) ist essentiell für die Qualität der Emissionsfaktoren mithilfe dieser messdatenbasierten Methode. Die Messprogramme an den Maschinen müssen dann diese Einteilung auch unterstützen.

Natürlich verbessert auch bei dieser Methode eine möglichst große Anzahl an gemessenen Maschinen, die im besten Fall auch alle verschiedenen Abgasnachbehandlungssysteme (speziell bei Stufe IV), Antriebstechnologien und Maschinenkategorien abdeckt, die Qualität des Emissionsmodells. Damit könnte entschieden werden, ob ein Emissionsmodell, dies betrifft speziell wieder Maschinen der Emissionsstufe IV, ausreicht oder ob man für die verschiedenen Technologien unterschiedliche Emissionsmodelle braucht. Mit den im Rahmen dieses Projekts zur Verfügung stehenden Daten kann diese Unterscheidung nicht durchgeführt werden. Es wurde somit nur jeweils ein Modell für Stufe IV und für Stufe V erstellt.

Für die begrenzte Anzahl an Messdaten in diesem Projekt eignet sich diese Methode am besten und wurde deshalb in weiterer Folge auch für die Erstellung von repräsentativen Emissionsfaktoren mobiler Maschinen verwendet.

Tabelle 10 zeigt das prinzipielle Schema der Emissionsfaktoren in das die Messdaten eingeordnet werden. Neben den verschiedenen Betriebszuständen zeigt die rechte Spalte die jeweiligen Einheiten. Aus diesen ist die Normierung auf die Nennleistung (P_{Nenn}) bzw. auf die geleistete Arbeit in kWh und somit die Bildung eines Durchschnittsmodells ersichtlich. Die Messdaten wurden den der Tabelle dargestellten Betriebszuständen zugeordnet. Zum einen wurde darauf geachtet, welche Tätigkeiten an einem Arbeitstag oft vorkommen und zum anderen wurde geprüft, ob diese emissionsrelevant sind oder nicht.

³¹ Diese Daten beinhalten die Messung von Emissionen vor Abgasnachbehandlung und alle beschriebenen relevanten Temperaturen.

Eine interessante Betriebssituation, die derzeit nicht beachtet wird, ist die Regeneration des DPFs. Um diese aber sinnvoll berücksichtigen zu können, reicht die Datengrundlage nicht aus³².

Tabelle 10: Schema Emissionsmodell basierend auf Messdaten

Betriebszustand	Einheit Emissionsfaktoren
Leerlauf ≤ 5 min	$g/(h \cdot P_{Nenn})^*$
Leerlauf > 5 min	$g/(h \cdot P_{Nenn})$
Leichte Arbeit	g/kWh^{**}
Mittelschwere Arbeit	g/kWh
Schwere Arbeit	g/kWh
Zusatzemissionen nach 1 h Motor aus	g/P_{Nenn}^{***}
Zusatzemissionen nach 8 h Motor aus	g/P_{Nenn}
Zusatzemissionen bei Arbeitsbeginn nach einer Leerlaufphase > 5min	g/P_{Nenn}

* Da die Leistungsmessung im Leerlaufbereich ungenau ist und die geleistete Arbeit in diesem Bereich sehr gering ist, werden die Leerlaufemissionen auf die Zeit bezogen. Durch die Normierung mit der Nennleistung können verschiedene Maschinen miteinander verglichen und zusammengefasst werden.

** Für Emissionen im Arbeitsbetrieb ist die Angabe in g/kWh üblich. Diese Einheit wird auch bei der gesetzlichen Auswertung, bei der hauptsächlich Emissionen im Arbeitsbetrieb bewertet werden, verwendet. Durch diese Normierung können verschiedene Maschinen zusammengefasst werden.

*** Zusatzemissionen werden als nicht zeitabhängiger Aufschlag dargestellt und können somit sinnvoll mit der Nennleistung für die verschiedenen Maschinengrößen normiert werden.

Tabelle 9 zeigt, dass es neben den sechs Maschinen, die für die Erstellung des Emissionsmodells verwendet wurden, noch weitere Messdaten mobiler Maschinen vorhanden sind. Diese Messdaten stammen zum einen aus Onboard-Messungen, bei denen aber nur der Standardbetrieb gemessen wurde, und zum anderen aus Literaturquellen, die ebenso nur Emissionsfaktoren für den Standardbetrieb beinhalten. Die speziellen Betriebssituationen, die für die Bedatung des messdatenbasierten Emissionsmodells nötig sind, sind in diesen Daten nicht enthalten oder nicht explizit ausgewiesen. Da mithilfe dieser Daten die Datengrundlage aber erweitert wird, wurden diese Daten für die Kalibrierung des messdatenbasierten Emissionsmodells genutzt. Dazu wird auf Basis der Emissionsfaktoren für den Standardbetrieb das Verhältnis des Durchschnitts aller gemessenen Maschinen zum Durchschnitt nur der Maschinen, die für die Erstellung des messdatenbasierten Emissionsmodells verwendet wurden, erarbeitet. Die Emissionsfaktoren für die speziellen Arbeitszustände werden dann mit diesem Faktor kalibriert. Durch die Erhöhung der Anzahl an verschiedenen Maschinen und Maschinenkategorien erhöht sich die Repräsentativität des Modells hinsichtlich der gesamten Flotte mobiler Maschinen. Die Verhältnisse der Emissionsniveaus zwischen den in Tabelle 10 gezeigten Betriebszuständen stammen allerdings nur aus den im Detail gemessenen Maschinen, die Kalibrierung passt nur die Niveaus über den durchschnittlichen Betrieb an.

2.3.2.4 Erstellung der Emissionsfaktoren

Das messdatenbasierte Emissionsmodell wurde anhand der Daten für die Erstellung von Emissionsfaktoren in speziellen Arbeitssituationen aus Tabelle 8 generiert. Dazu wurden alle

³² Nur bei Testmaschine 1 konnte eine DPF-Regeneration aufgezeichnet werden. Dadurch wird aber nicht ersichtlich, wie oft so eine DPF-Regeneration auftritt. Zudem sind die Messdaten einer Maschine zu wenig für ein Durchschnittsmodell.

Messwerte der sechs vermessenen Maschinen nach Emissionsstufe getrennt in die verschiedenen Arbeitsphasen und Emissionsstufen eingeteilt.

Tabelle 11 zeigt die Eingangsdaten für das Emissionsmodell basierend auf Messdaten für spezielle Arbeitssituationen von Stufe IV Maschinen. Die Ergebnisse sind ein Durchschnittswert der beiden vermessenen Stufe IV Maschinen.

Die hier gezeigte Partikelmasse wurde nicht gemessen, sondern auf Basis der Partikelanzahl berechnet. Dazu wurde der Messwert der Partikelanzahl mit einer durchschnittlichen Masse je Partikel multipliziert. Der Wert für die durchschnittliche Masse je Partikel stammt aus dem HBEFA (Version 4.1) für Euro VI schwere Nutzfahrzeuge (Matzer et al. 2019). Aufgrund der sehr ähnlichen Motoren und Abgasnachbehandlungen³³ kann dieser Wert (2,24E-13 g/Partikel) auch für mobile Maschinen als repräsentativ angesehen werden.

Tabelle 11: Emissionsfaktoren basierend auf Messdaten für spezielle Arbeitssituationen – Stufe IV (nicht auf Flottendurchschnitt kalibriert)

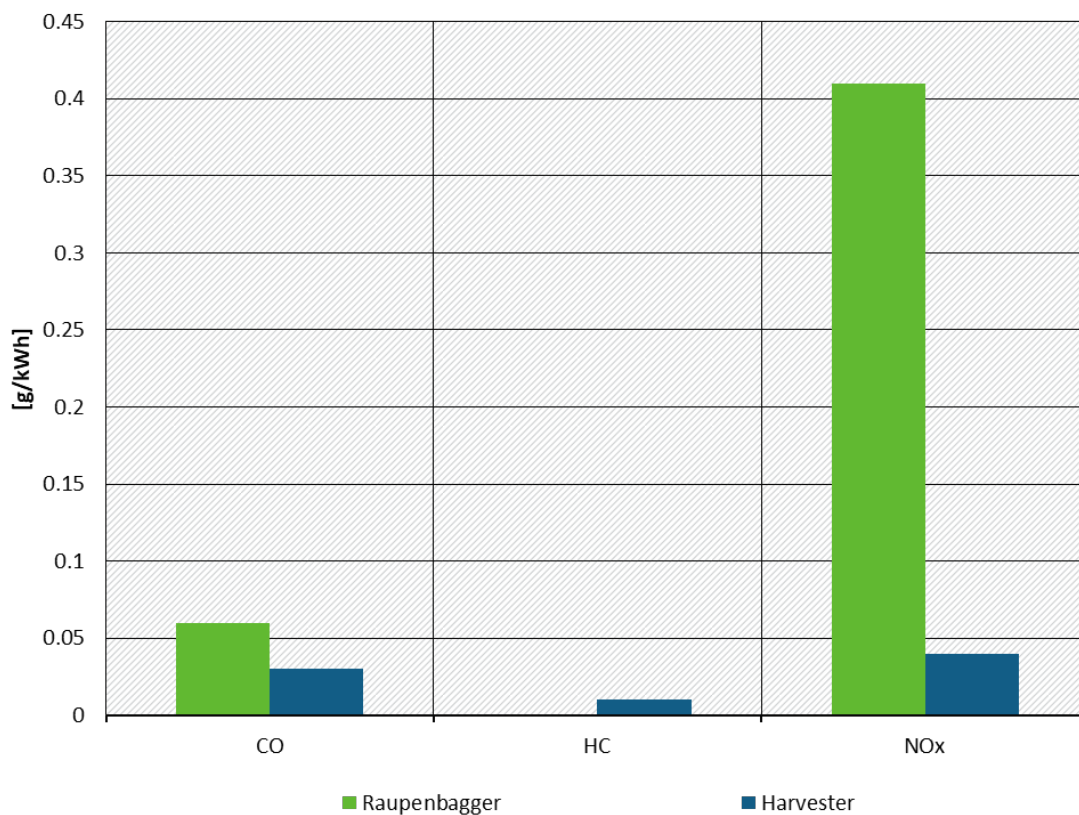
Betriebszustand	CO	HC	NO _x	PM
Leerlauf ≤ 5 min [g/(h*P _{Nenn})]	0,032	0,001	0,025	0,003
Leerlauf > 5 min [g/(h*P _{Nenn})]	0,037	0,001	0,181	0,002
Leichte Arbeit [g/kWh]	0,086	0,010	0,259	0,032
Mittelschwere Arbeit [g/kWh]	0,045	0,005	0,225	0,022
Schwere Arbeit [g/kWh]	0,035	0,003	0,283	0,037
Zusatzemissionen nach 1 h Motor aus [g/P _{Nenn}]	0,000	0,000	0,042	n.a.*
Zusatzemissionen nach 8 h Motor aus [g/P _{Nenn}]	0,032	0,001	0,166	0,000
Zusatzemissionen bei Arbeitsbeginn nach einer Leerlaufphase > 5min [g/P _{Nenn}]	0,000	0,000	0,048	0,000

*Für diese Betriebssituation sind keine Messdaten vorhanden

In Abbildung 28 werden die Eingangsdaten der beiden Stufe IV Maschinen für das Emissionsmodell genauer dargestellt. Als Beispiel wird die Betriebssituation mittelschwere Arbeit verwendet. Diese ist im Fall dieser beiden Testmaschinen repräsentativ für das Verhältnis in allen anderen Betriebssituationen der beiden Maschinen zueinander. Der Raupenbagger hat zwar ca. doppelt so hohe CO-Emissionen wie die Holzerntemaschine, trotzdem liegen beide Testmaschinen auf geringem Niveau. Der Holzerntemaschine hat im Vergleich zum Grenzwert niedrige HC-Emissionen, während der Raupenbagger praktisch keine HC-Emissionen aufweist. Bei NO_x liegen die Emissionen des Raupenbaggers, die sich im betriebswarmen Zustand im Bereich des Grenzwerts bewegen, ca. zehnmal so hoch wie des Holzerntemaschine. Diese Ergebnisse zeigen, dass das Emissionsverhalten der unterschiedlichen Maschinen doch sehr variieren kann, und verdeutlichen, dass die Anzahl an gemessenen Maschinen großen Einfluss auf die Qualität von Emissionsmodellen hat. Anhand von zwei gemessenen Maschinen kann man nicht feststellen, ob der Durchschnitt der beiden doch sehr unterschiedlich emittierenden Maschinen (speziell bei NO_x) repräsentativ für die Flotte ist.

³³ Da alle SNF Euro VI einen DPF haben, gilt dies nur für mobile Maschinen und Geräte mit DPF. Bei Stufe IV haben nicht alle Maschinen eine DPF.

Abbildung 28: Inputdaten Emissionsmodell – mittelschwere Arbeit, Stufe IV



Quelle: eigene Graphik (TUG)

Tabelle 12 zeigt die Eingabedaten für das messdatenbasierte Emissionsmodell basierend auf vier Maschinen mit der Emissionsstufe V. Aus diesen wurde wiederum der Durchschnitt gebildet. Die PM-Daten beruhen zum einen gleich wie bei Stufe IV auf gemessenen PN und der Masse pro Partikel aus HBEFA, aber zusätzlich sind hier auch direkte PM-Messdaten hinterlegt³⁴.

Tabelle 12: Emissionsfaktoren basierend auf Messdaten für spezielle Arbeitssituationen – Stufe V (nicht auf Flottendurchschnitt kalibriert)

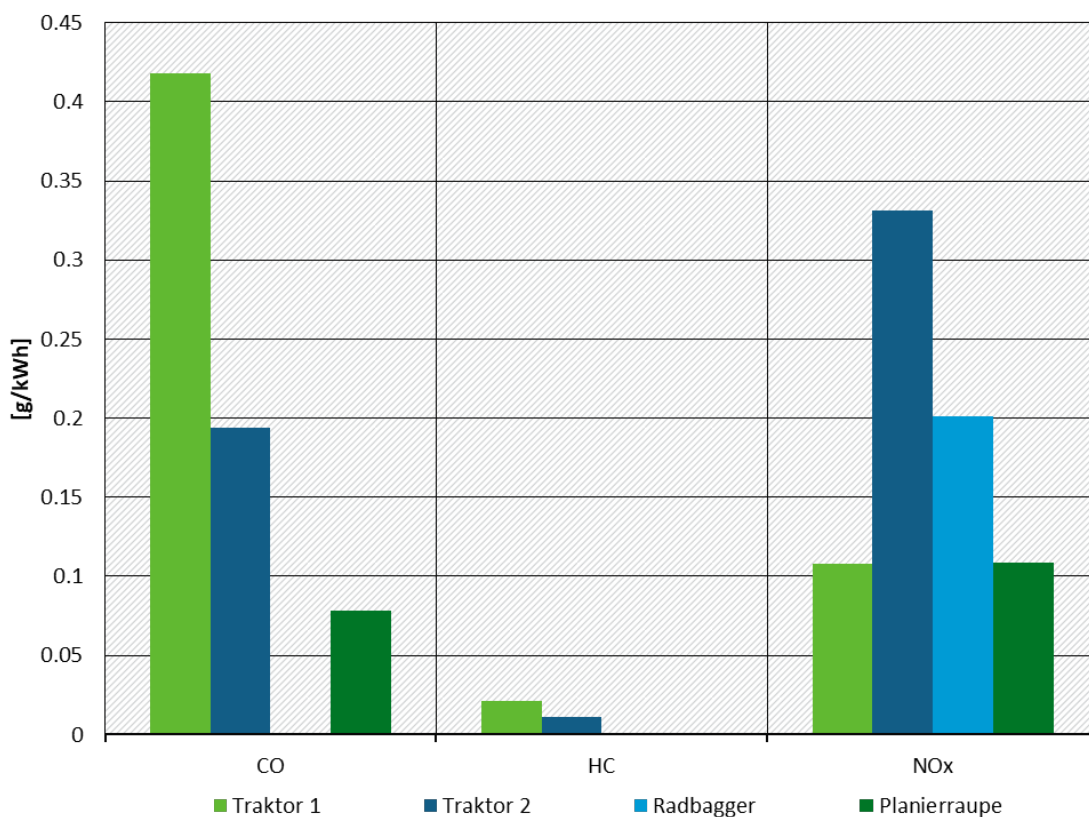
Betriebszustand	CO	HC	NO _x	PM
Leerlauf ≤ 5 min [g/(h*P _{Nenn})]	0,062	0,004	0,021	0,004
Leerlauf > 5 min [g/(h*P _{Nenn})]	0,038	0,004	0,221	0,004
Leichte Arbeit [g/kWh]	0,281	0,022	0,275	0,030
Mittelschwere Arbeit [g/kWh]	0,172	0,016	0,187	0,021
Schwere Arbeit [g/kWh]	0,097	0,013	0,177	0,018
Zusatzemissionen nach 1 h Motor aus [g/P _{Nenn}]	0,000	0,000	0,046	0,001

³⁴ Die PM-Ergebnisse berechnet aus PN und Partikelmasse pro Partikel liegen für die beiden Maschinen bei 0,026 bzw. 0,035 g/kWh. Der direkte PM-Messwert im Standardbetrieb ist 0,041 g/kWh. Die Werte sind somit in einer ähnlichen Größenordnung.

Zusatzemissionen nach 8 h Motor aus [g/P _{Nenn}]	0,019	0,004	0,183	0,006
Zusatzemissionen bei Arbeitsbeginn nach einer Leerlaufphase > 5min [g/P _{Nenn}]	0,001	0,000	0,058	0,000

Abbildung 29 zeigt die Eingabedaten für die mittelschwere Arbeit der vier verschiedenen Stufe IV Maschinen. Bei den CO-Emissionen liegt eine sehr große Streuung vor. Während der Radbagger bei null Emissionen liegt, sind diese bei Traktor 1 bei mehr als 0,4 g/kWh. Traktor 2 und die Planierraupe liegen in der Mitte, wobei Traktor 2 auch mehr als doppelt so hohe Emissionen wie die Planierraupe hat. Die HC-Emissionen sind bei den beiden Traktoren auf geringem Niveau. Für die Planierraupe und den Radbagger liegen keine HC-Messdaten vor. Bei NO_x ist der maximale Wert (Traktor 2) ca. dreimal so hoch wie die geringsten Werte (Traktor 1 und Planierraupe). Die NO_x-Emissionen des Radbaggers liegen in etwa in der Mitte.

Abbildung 29: Inputdaten Emissionsmodell – mittelschwere Arbeit, Stufe V

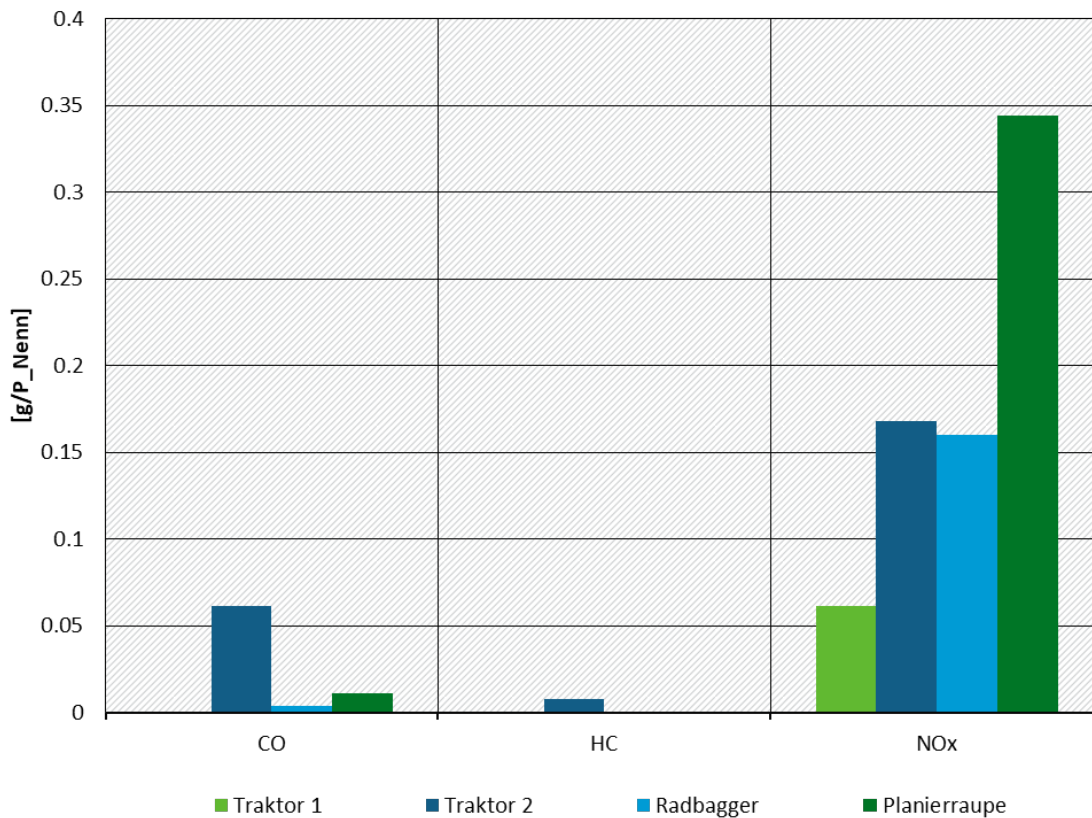


Quelle: eigene Graphik (TUG)

Wenn man sich im Vergleich zu den betriebswarmen Emissionen die Kaltstartemissionen anschaut (siehe Abbildung 30), dann fällt auf, dass Traktor 1, der bei der betriebswarmen mittelschweren Arbeit noch die höchsten CO-Emissionen aufgewiesen hat, im Kaltstart keine CO-Emissionen hat. Bei NO_x ist das Bild auch anders als bei den betriebswarmen Emissionen. Die Planierraupe hat im Warmlauf die höchsten Emissionen, obwohl sie im betriebswarmen Zustand noch die niedrigsten NO_x-Emissionen aufgewiesen hat. Bei Stufe V Maschinen können die Verhältnisse der Emissionen in den verschiedenen Betriebszuständen somit nicht anhand einer Situation festgemacht werden, sondern es ergeben sich je Betriebszustand Unterschiede. Somit

würde auch hier eine größere Anzahl an gemessenen Maschinen die Qualität des Emissionsmodells erhöhen.

Abbildung 30: Inputdaten Emissionsmodell – Kaltstart, Stufe V



Quelle: eigene Graphik (TUG)

Wie bereits bei der Erklärung der Methode gezeigt, werden die erarbeiteten Emissionsmodelle, die nur auf den Maschinen mit detaillierten Messdaten basieren, noch anhand aller Messdaten inkl. der Daten aus der Literatur (siehe Tabelle 9) kalibriert. Die finalen Modelle spiegeln somit die Flotte³⁵ wider. Tabelle 13 zeigt die Kalibrierfaktoren für die verschiedenen Emissionskomponenten und Emissionsstufen. Diese Kalibrierfaktoren wurden anhand des Emissionsverhaltens, das anhand einer einfachen Gewichtung von Kaltstart-, Leerlauf- und Arbeitsemissionen für alle Literatur- und Messwerte erarbeitet wurde (siehe Kapitel 2.3.1.1), erstellt. Diese Kalibrierfaktoren werden für alle speziellen Betriebssituationen gleichermaßen verwendet, obwohl diese nur für einen vereinfachten Realbetrieb aus Kaltstart-, Leerlauf- und Arbeitsphasen gelten. Für die anderen Situationen liegen keine Daten zur Kalibrierung vor. Die Stufe IV Faktoren zeigen, dass die Flotte höhere CO- und NO_x-Emissionen als das ursprüngliche Modell hat. Hier muss aber auch erwähnt werden, dass das Stufe IV Basismodell auf nur zwei Maschinen beruht, die Flotte aber insgesamt 20 Maschinen umfasst. Bei Betrachtung der NO_x-Emissionen ist zu erkennen, dass die Ergebnisse der Flotte doch merklich streuen. Die Maschine mit den geringsten NO_x-Emissionen liegt bei 0,190 g/kWh, während die mit den höchsten bei 5,630 g/kWh liegt. Die Standardabweichung für die NO_x-Emissionen der Stufe IV Flotte liegt bei

³⁵ Es wird angenommen, dass durch die Verwendung aller verfügbaren Datensätze (27 verschiedene Maschinen) die gesamte Flotte mobiler Maschinen repräsentiert wird. Natürlich wäre dies nur gegeben, wenn eine noch deutlich größere Anzahl an gemessenen Maschinen vorliegen würde. Im Rahmen des Projekts konnte die Flotte auf diese Weise aber bestmöglich dargestellt werden.

1,603 g/kWh.

Bei Stufe V passen die Werte der Flotte und des Basismodells bereits gut zusammen. Dabei kommen zu den vier Maschinen, die bereits für das Basismodell genutzt wurden, nur noch drei Maschinen dazu. Die Stufe V Flotte umfasst also nur sieben mobile Maschinen. Bei NO_x liegt die Maschine mit den geringsten Emissionen bei 0,163 g/kWh und die mit den höchsten bei 0,708 g/kWh. Die Standardabweichung ist 0,186 g/kWh. Es ist somit gut zu erkennen, dass weitere Messdaten die Darstellung der Flotte besser absichern würden.

Tabelle 13: Kalibrierfaktoren für die Darstellung der Flottenemissionen

Emissionsstufe	CO	HC	NO _x	PM
Stufe IV	3,31	0,80	3,32	1,16
Stufe V	1,04	1,37	0,90	0,97

Tabelle 14 und Tabelle 15 stellen die Eingabedaten für die finalen Emissionsmodelle von Stufe IV und Stufe V dar. Die CO-Emissionen von Stufe IV und V sind bei der Arbeit im betriebswarmen Zustand auf ähnlichem Niveau, in den anderen Situationen bei Stufe V aber geringer. Die HC-Emissionen sind sowohl bei Stufe IV als auch bei Stufe V auf sehr geringem Niveau. Bei NO_x sieht man, dass die Stufe V Emissionen deutlich unter den Stufe IV Emissionen liegen. Zudem ist erkennbar, dass die Stufe V Realemissionen bei der betriebswarmen Arbeit³⁶ unter dem NO_x-Grenzwert von 0,4 g/kWh liegen. Die Partikelmasse bewegt sich bei den beiden betrachteten Emissionsstufen auf ähnlichem Niveau.

Tabelle 14: Datensatz für das kalibrierte Flottenemissionsmodell – Stufe IV

Betriebszustand	CO	HC	NO _x	PM
Leerlauf ≤ 5 min [g/(h*P _{Nenn})]	0,106	0,001	0,081	0,004
Leerlauf > 5 min [g/(h*P _{Nenn})]	0,121	0,001	0,600	0,002
Leichte Arbeit [g/kWh]	0,284	0,008	0,859	0,037
Mittelschwere Arbeit [g/kWh]	0,148	0,004	0,746	0,025
Schwere Arbeit [g/kWh]	0,115	0,003	0,940	0,043
Zusatzemissionen nach 1 h Motor aus [g/P _{Nenn}]	0,000	0,000	0,140	n.a.
Zusatzemissionen nach 8 h Motor aus [g/P _{Nenn}]	0,106	0,001	0,552	0,000
Zusatzemissionen bei Arbeitsbeginn nach einer Leerlaufphase > 5min [g/P _{Nenn}]	0,000	0,000	0,160	0,000

*Für diese Betriebssituation sind keine Messdaten vorhanden

Tabelle 15: Datensatz für das kalibrierte Flottenemissionsmodell – Stufe V

Betriebszustand	CO	HC	NO _x	PM
-----------------	----	----	-----------------	----

³⁶ Die Werte für leichte, mittelschwere und schwere Arbeit können aufgrund des Ausschlusses des Kaltstarts, des niederlastigen Betriebs und der Anlaufphasen bei der Auswertung eines ISM-Tests indikativ mit dem Grenzwert verglichen werden.

Leerlauf ≤ 5 min $[g/(h \cdot P_{Nenn})]$	0,064	0,005	0,019	0,004
Leerlauf > 5 min $[g/(h \cdot P_{Nenn})]$	0,039	0,005	0,198	0,004
Leichte Arbeit $[g/kWh]$	0,291	0,031	0,247	0,029
Mittelschwere Arbeit $[g/kWh]$	0,179	0,022	0,168	0,021
Schwere Arbeit $[g/kWh]$	0,101	0,017	0,159	0,017
Zusatzemissionen nach 1 h Motor aus $[g/P_{Nenn}]$	0,000	0,000	0,042	0,001
Zusatzemissionen nach 8 h Motor aus $[g/P_{Nenn}]$	0,019	0,006	0,164	0,006
Zusatzemissionen bei Arbeitsbeginn nach einer Leerlaufphase > 5 min $[g/P_{Nenn}]$	0,001	0,000	0,052	0,000

2.3.2.5 Vergleich mit Literaturwerten

Zur Absicherung der Flottenemissionsmodelle bieten einige Literaturwerte noch die Möglichkeit zur Validierung bestimmter Arbeitszustände.

2.3.2.5.1 Leerlaufemissionen Emissionsstufe IV

Die Leerlaufemissionen des finalen Emissionsmodells von Stufe IV und den dazu passenden Literaturwerten sind in Tabelle 16 dargestellt.

Tabelle 16: NO_x-Leerlaufemissionen Emissionsstufe IV

Betriebszustand	Flotten-emissionsmodell	Maschinen Desouza ³⁷	Radlader TNO ³⁸
Leerlauf ≤ 5 min $[g/(h \cdot P_{Nenn})]$	0,081	0,319	0,45
Leerlauf > 5 min $[g/(h \cdot P_{Nenn})]$	0,600		

Der Mittelwert aus den sieben Stufe IV Maschinen, die Desouza analysiert hat, liegt zwischen den NO_x-Emissionen des kalibrierten Emissionsmodells für weniger bzw. mehr als fünf Minuten Leerlauf. Da die Leerlaufdauer bei Desouza nicht genau angegeben ist, kann aus dem Vergleich zumindest keine Diskrepanz abgeleitet werden.

Bei den TNO Daten für einen Stufe IV Radlader mit einer Nennleistung von 127 kW ist die Leerlaufdauer ebenso nicht bekannt. Mit 0,45 g/(h·P_{Nenn}) liegt aber auch dieser Wert zwischen kurzem und langem Leerlauf des kalibrierten Emissionsmodells. Die Validierung liefert somit auch hier ein positives Ergebnis.

³⁷ (Desouza et al. 2020); Dabei handelt es sich um drei Bagger (Nennleistung: 78 kW, 129 kW, 129 kW), einen Teleskoplader (93 kW), einen Radlader (136 kW), eine Pumpe (375 kW) und eine Bohranlage (328 kW).

³⁸ (Vermeulen et al. 2021)

2.3.2.5.2 Leerlaufemissionen Emissionsstufe V

Tabelle 17 zeigt die Leerlaufemissionen des finalen Emissionsmodells und der Literaturwerte für Emissionsstufe V.

Tabelle 17: NO_x-Leerlaufemissionen Emissionsstufe V

Betriebszustand	Flotten-emissionsmodell	Bagger TNO ³⁹	Radlader TNO
Leerlauf ≤ 5 min [g/(h·P _{Nenn})]	0,019	0,55	0,31
Leerlauf > 5 min [g/(h·P _{Nenn})]	0,198		

Der Emissionsfaktor des Baggers von TNO (Nennleistung 159 kW) liegt über den Werten des finalen Flottenemissionsmodells. Im Bericht ist für diese Maschine aber ein erhöhter Kaltstarteinfluss angemerkt, da die Maschine nur an drei von 38 Messtagen betrieben wurde und dann immer nur kurz im Leerlauf. Zur Vergleichbarkeit müsste der Kaltstart des Baggers aus TNO herausgerechnet werden, was aufgrund der Angaben der Studie aber nicht möglich ist. Der Wert des Flottenmodells würde durch den Aufschlag des Kaltstarts auch über den Werten aus Tabelle 17 liegen. Der Vergleich zeigt also keine auffallende Diskrepanz.

Der Wert des TNO Radladers (Nennleistung 171 kW) liegt ebenso über dem Wert des finalen Emissionsmodells für Leerlauf größer fünf Minuten. Da aber (i) die Dauer der Leerlaufphasen nicht genau bekannt ist, (ii) man aus den Angaben nicht feststellen kann, ob die Maschine über eine Abgasrückführung verfügt oder nicht⁴⁰, und (iii) der Wert von 0,31 g/(h·P_{Nenn}) unter dem höchsten Einzelmesswert (Planierdrape: 0,445 g/(h·P_{Nenn})) der Maschinen, die für die Erstellung des finalen Emissionsmodells genutzt wurden, liegt, ist der Wert innerhalb der zu erwartenden Streuung einzelner Maschinen.

Die NO_x-Emissionen des von TNO gemessenen Minibaggers liegen sowohl im Arbeitsbetrieb als auch im Leerlauf deutlich über den Emissionen für langen Leerlauf des finalen Emissionsmodells. Wie bereits beschrieben, gehört diese Maschine aber zur Leistungskategorie v-2 und unterliegt somit einem anderen NO_x-Grenzwert. Hier ist somit kein Vergleich möglich. Der Wert ist deshalb auch nicht in der Tabelle dargestellt.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die in dieser Studie abgeleiteten Emissionsfaktoren zwar plausibel sind, aber es dennoch erhebliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Daten gibt. Diese könnten auf unterschiedliche Leerlaufdauern oder Kaltstartanteile zurückzuführen sein, was mittels der Literaturdaten nicht nachvollziehbar war, aber auch die individuellen Maschinen oder sonstige Faktoren (siehe nächster Abschnitt). Um die daraus möglichen Unsicherheiten einzugrenzen, müssten weitere Messdaten in sekundlicher Auflösung erhoben werden.

2.3.2.6 Zusätzliche Einflussfaktoren auf das Emissionsverhalten

Das Emissionsverhalten mobiler Maschinen ist nicht nur von den verschiedenen Betriebssituationen abhängig, sondern wird auch durch andere Einflussfaktoren bestimmt. Die wichtigsten, nämlich Umgebungstemperatur, Alterung der Abgasnachbehandlung, Manipulation

³⁹ (Vermeulen et al. 2021); der Radlader und der Minibagger von TNO sind derselben Quelle entnommen.

⁴⁰ Abgasrückführung kann für die Reduktion der NO_x-Emissionen im Leerlauf, wenn der SCR nicht optimal funktioniert, genutzt werden. Dadurch können die NO_x-Emissionen ca. halbiert werden. Die von der TU Graz gemessenen Stufe V Maschinen verfügen beide über eine Abgasrückführung. (Weller 2020)

oder Defekte einzelner Abgasnachbehandlungskomponenten und DPF-Regenerationen, werden folgend erläutert.

Aufgrund von fehlenden Messdaten wurden diese Einflussfaktoren bei der Erstellung der Emissionsfaktoren nicht berücksichtigt. Da diese jedoch große Auswirkungen haben, sollte in Zukunft erwogen werden, diese messtechnisch zu erfassen und darauf basierend in die Ableitung repräsentativer Emissionsfaktoren miteinfließen lassen.

2.3.2.6.1 Umgebungstemperatur

Das Emissionsverhalten mobiler Maschinen wird durch die vorherrschende Umgebungstemperatur beeinflusst. Aufgrund des Zusammenhangs von Aufheizdauer und Temperatur der Komponenten der Abgasnachbehandlung ist dies speziell in der Kaltstartphase der Fall. Tiefere Starttemperaturen führen zu längeren Aufheizdauern bis zum Erreichen der optimalen Betriebstemperatur der Abgasnachbehandlung und somit zu höheren Gesamtemissionen. In Niederlastphasen (z.B. Leerlauf) kühlt die Abgasnachbehandlung bei geringeren Umgebungstemperaturen ebenso schneller aus. Niedrigere Umgebungstemperaturen sorgen somit in der Regel für höhere Emissionen. Dies betrifft bei Motoren mit SCR, also vor allem für Stufe IV und V, speziell NO_x .

Um den Einfluss verschiedener Umgebungstemperaturen auf das Emissionsverhalten zu quantifizieren und darauf basierend in die Emissionsfaktoren integrieren zu können, bräuchte man Messdaten mehrerer Maschinen bei jeweils unterschiedlichen Umgebungstemperaturen. Passende Messdaten sind derzeit aber in der Literatur nicht zu finden. Die benötigten Daten können aus den Messungen im Rahmen dieses Projekts auch nicht gewonnen werden. Dafür sind umfangreichere Messkampagnen notwendig.

Um die Größenordnung des Einflusses der Umgebungstemperatur auf die NO_x -Emissionen einschätzen zu können, werden Daten von Euro VI LKW herangezogen. Da Motoren und Abgasnachbehandlungen von Euro VI LKW prinzipiell gleich aufgebaut sind wie die von mobilen Maschinen der Emissionsstufe V, können diese Ergebnisse für die Abschätzung der Auswirkungen verwendet werden. Bei durchschnittlichen Euro VI LKW liegen die Kaltstartextraemissionen bei -7°C um 86 % höher als bei 20°C . Der Einfluss kann somit als vermutlich nicht vernachlässigbar eingestuft werden. (Weller et al. 2021b)

2.3.2.6.2 Alterung der Abgasnachbehandlung

Durch thermische und chemische Alterungsprozesse verschlechtert sich die Effizienz von Katalysatoren über ihre Lebenszeit. Der Alterungsprozess wird durch die Betriebsstunden und der vorherrschenden Last während des Betriebs, die Anzahl an Kaltstarts (Abkühl- und Aufheizvorgänge) und DPF-Regenerationen (sehr hohe Bauteiltemperaturen) und die verwendete Kraftstoffqualität beeinflusst. Diese vielen verschiedenen Einflussfaktoren zeigen, dass eine Bewertung des Einflusses der Alterung auf das Emissionsverhalten eine komplexe Aufgabe ist. (Dippold et al. 2021).

Die wichtigste Voraussetzung für die Analyse von Alterungseffekten ist eine gute Messdatenbasis. Im besten Fall sollten verschiedene Maschinen über ihre Lebensdauer mehreren Emissionsmessungen unterzogen werden. Wenn aber keine Messdaten der gleichen Maschinen im „neuen“ und im „alten“ Zustand zur Verfügung stehen, ist es auch möglich nur „alte“ Maschinen zu messen und diese zum Durchschnitt aller gemessenen „neuen“ Maschinen, welche durch die Messungen im Rahmen dieses Projekts schon vorhanden sind, zu vergleichen. Auf Basis solcher Daten kann dann der Einfluss von Betriebsdauer und Nutzungsprofil auf das Emissionsverhalten bewertet werden (Mörth 2019).

Bei einer Literaturrecherche konnten keine passenden Daten gefunden werden. Die im Rahmen dieses Projekts erhobenen Messdaten beinhalten ebenso keine Daten von mobilen Maschinen mit erhöhter Betriebsdauer. TFZ hat beim Workshop im Rahmen dieses Projekts im Oktober 2021 aber Messwerte für den gleichen Holzvollernter (Emissionsstufe IV) mit 1300 h und 3250 h⁴¹ Betriebszeit gezeigt. Die Emissionswerte liegen sowohl bei der ersten als auch bei der zweiten Messung auf geringem Niveau. Bei dieser Maschine ist somit durch diese Laufzeit noch kein Einfluss auf das Emissionsverhalten zu erkennen.

Für die Erfassung einer großen Datenmenge an verschiedenen Maschinen wäre auch hier eine ausführliche Messkampagne nötig. Die Messung von Maschinen der Emissionsstufe V mit erhöhter Betriebsstundenanzahl ist zum jetzigen Zeitpunkt aufgrund der erst vor kurzem erfolgten Einführung dieser Emissionsstufe aber schwierig. Die meisten Stufe V Maschinen sind noch verhältnismäßig neu und müssen erst mehrere Tausend Stunden betrieben werden, um das Emissionsverhalten gealterter Maschinen untersuchen zu können.

Für eine erste Abschätzung der Auswirkung der Alterung auf das Emissionsverhalten von mobilen Maschinen können wieder auf das Beispiel Euro VI schwere Nutzfahrzeuge zurückgegriffen werden. Das HBEFA zeigt, dass die NO_x-Emissionen von neuen Verteiler-LKW nach einer Laufleistung von 700 000 km im Stadtverkehr um den Faktor 2,6 erhöht sind. Beim Betrieb auf der Autobahn ist der Alterungsfaktor von 2,6 bei Verteiler-LKW bereits nach 300 000 km erreicht (Notter et al. 2022). Auf Basis dieser Daten kann man davor ausgehen, dass mehrere Tausend Betriebsstunden einen vergleichbaren Einfluss auf das Emissionsverhalten von mobilen Maschinen haben.

2.3.2.6.3 Manipulation/Defekte

Um Kosten für Betriebsmittel und Reparaturen zu senken werden Abgasnachbehandlungen teilweise manipuliert. Dies wird durch die gezielte Deaktivierung (z.B. Wegschalten der AdBlue-Dosierung) oder den Ausbau (z.B. DPF) einzelner Komponenten der Abgasnachbehandlung erreicht. Auch kann es im Betrieb aufgrund unsachgemäßer Behandlung oder Bauteilfehlern zu Defekten der Komponenten kommen, welche zwar die Abgasnachbehandlung einschränken, aber trotzdem noch den Betrieb ermöglichen. Dies hat natürlich Einfluss auf das Emissionsverhalten mobiler Maschinen.

Hierfür stehen auch keine Messdaten zur Verfügung. Für die Erfassung der Auswirkungen von manipulierten oder defekten mobilen Abgasnachbehandlungssystemen auf die Gesamtemissionen müsste der Einfluss solcher Manipulationen auf das Emissionsverhalten einzelner Maschinen anhand von PEMS Messungen erarbeitet werden. Zusätzlich müsste dann noch der Anteil von manipulierten mobilen Maschinen erfasst werden. Die Literatur liefert dafür bisher ebenso keine Daten.

Wenn man das Beispiel NO_x-Emissionen Euro VI LKW heranzieht, dann sieht man, dass auf der Inntalautobahn in Österreich, eine der meistbefahrenen Autobahnen Europas, ca. 2 % der Euro VI LKW manipuliert sind. Zudem zeigen die Daten, dass weitere 4 % durch Defekte höhere Emissionen aufweisen. Insgesamt haben also 6 % der Euro VI Flotte erhöhte Emissionen. Die Emissionen dieser „high emitter“ liegen im Durchschnitt mit 4580 mg/kWh NO_x mehr als zehnmal so hoch wie die Emissionen von neuen nicht manipulierten Euro VI LKW. (Dippold et al. 2021).

Zu ähnlichen Untersuchungen kamen auch stichprobenartige Plume-Chasing-Messungen der Firma Airyx, wonach nach auf Autobahnen in Deutschland ca. 16% und in der Schweiz 25% der

⁴¹ Bis zur ersten Messung bei 1300 h wurde die Maschine mit Diesel und danach mit Rapsöl betrieben. (Emberger et al. 2021)

Euro VI SNF den NO_x-Grenzwert überschritten. Inspektionen der Fahrzeuge zeigten, dass es sich in den meisten Fällen um Defekte oder Fehler handelte, aber teils auch Manipulationen die Ursachen waren (Pöhler 2021). Im Rahmen eine 2-tägigen Feldversuchs der Firma Airix und ifeu konnte gezeigt werden, dass Plume-Chasing Messungen bei Baumaschinen prinzipiell auch zu solchen Analysen nutzbar wären. Hierzu wären aber noch weitere Forschungen und insbesondere Messungen an neueren Abgasstufen notwendig.

2.3.2.6.4 DPF-Regenerationen

Während DPF-Regenerationen erhöhen sich nicht nur die Partikelemissionen, sondern teilweise auch andere Komponenten, wie z.B. NO_x. Da diese Phasen aus der Typprüfung ausgeschlossen sind, ist anzunehmen, dass manche Hersteller die AdBlue-Dosierung während der Regeneration über das nötige Maß hinaus reduzieren und somit das Emissionsverhalten im Vergleich zum Normalbetrieb stark verändern.

Für die Integration von DPF-Regenerationen in die Emissionsfaktoren ist neben der Auswirkung dieser Betriebsphase auf die Emissionen einzelner Maschinen auch die Häufigkeit solcher Regenerationen entscheidend. Bei den Messungen von Testmaschine 1 konnten zwar Daten zum Emissionsverhalten während DPF-Regenerationen erfasst werden, aber für repräsentative Werte wären Daten von mehreren verschiedenen Maschinen sinnvoll. Die Testmaschine 1 emittiert während der DPF-Regeneration ca. doppelt so viel NO_x wie im normalen Arbeitsbetrieb und ca. 60-mal so viele Partikel. Zudem gibt es keine Daten hinsichtlich der Häufigkeit der Regeneration bei Stufe V Maschinen. Für die Bewertung der Auswirkungen von DPF-Regenerationen auf die Gesamtemissionen wäre also eine ausführliche Messkampagne notwendig.

2.4 Einsatzprofil

2.4.1 Methodische Grundlagen und bestehende Lastzyklen

Wie zuvor gezeigt wurde, hängt das Emissionsverhalten nicht nur vom eingesetzten Motor und dessen Abgasminderungstechnik, sondern auch von dessen Lastprofil, d.h. Motorlast, Drehzahl sowie Dauer und Häufigkeit von Leerlaufphasen und Kaltstarts, ab. Im Realbetrieb können diverse Faktoren einen Einfluss auf die Lastprofile mobiler Maschinen haben (siehe z.B. (Ays 2019; Fecke 2018; Sturm 2015)), darunter:

- ▶ Art der Maschine (z.B. Bagger, Traktor)
- ▶ Art des Antriebs (mechanisch, hydraulisch bzw. reiner Verbrenner, Hybrid)
- ▶ Betreiber (z.B. Garten- u. Landschaftsbau, Straßenbau, Tiefbau, Abriss, Bergbau)
- ▶ Konkrete Tätigkeit (z.B. Fahren, Graben, Laden)
- ▶ Individuelles Fahrverhalten (z.B. aggressiv, Eco/Power-Modus)
- ▶ Untergrund/Material (z.B. Sand, Lehm)
- ▶ Witterungsbedingungen (z.B. Außentemperatur -> Heizung/AC, Feuchtigkeit)
- ▶ Anbaugeräte (z.B. Schaufel, Meißel)

Somit können sich im Realbetrieb große Bandbreiten ergeben, weshalb repräsentative Lastprofile unmöglich alle denkbaren Einzelfälle abbilden, sondern sich bestenfalls maschinen- und anwendungsübergreifenden Durchschnittswerten annähern.

Der Versuch einer Definition von repräsentativen Leistungs- und Emissionswerten ist bereits in verschiedenen Prüfzyklen und Standardwerken angelegt. In der europäischen Abgasgesetzgebung sind dies derzeit der NRSC und NRTC, welche vorgegebene Lastprofile haben, um miteinander vergleichbare Ergebnisse zu den Schadstoffemissionen zu erzeugen. Beide Tests werden am Motorprüfstand gemessen. Die Zyklen unterscheiden grob zwischen bestimmten NRMM-Anwendungen (z.B. der C1-Zyklus mit 8 Messpunkten für Dieselmotoren in landgebundenen Maschinen mit variabler Drehzahl). Weitere Differenzierungen, z.B. nach der zu verrichtenden Tätigkeit oder den Umgebungsbedingungen, existieren nicht. Allerdings sind zum Zeitpunkt der Typgenehmigung für die meisten NRMM-Motoren die Maschinen auch nicht bekannt in die die Motoren letztendlich eingebaut werden.

Das zusätzlich für bestimmte Motoren anzuwendende In-Service-Monitoring ermöglicht hingegen die Emissionsmessung für eine größere Bandbreite von tatsächlichen Einsatzbedingungen ohne ein vorgegebenes Lastprofil.

Damit zeigt sich bereits die Problematik zwischen der Vergleichbarkeit von Messdaten und der Abbildung der Diversität unterschiedlicher Anwendungen im Realbetrieb. Weitere Standardzyklen sind zum Beispiel für Landmaschinen der DLG Powermix, sowie für Baumaschinen der Liebherr Normtest oder JCMAS H. Diesen Zyklen ist gemein, dass sie im Gegensatz zur Abgasgesetzgebung konkrete Maschinentypen und Arbeitsschritte repräsentieren sollen. Hier werden jedoch keine Schadstoffemissionen gemessen, sondern nur der spezifische Kraftstoffverbrauch oder andere Parameter wie z.B. die Motorleistung. Auch liegt der Fokus dieser Zyklen auf der Arbeitsphase, während Nicht-Betriebsphasen, ähnlich wie bei ISM-Tests, wenig bis gar nicht erfasst werden.

Abbildung 31: Übersicht einiger wichtiger Standardzyklen für mobile Maschinen

Zyklusname	Prüfgegenstand/Ort	Zweck	Maschinentyp	Zyklusdefinition	vorgegebene Parameter	Zyklusdauer [s]	Lastfaktor [-]	Leerlauf	Kaltstarts
Non-Road Transient Cycle (NRTC)	Motor/ Prüfstand	EU-Typ- genehmigung Emissionen	maschinen- übergreifend	1 Motorlastprofil	Zeit, Drehzahl, Drehmoment	1238 [s]	0,34	ja	ja
ISO 8178 (u.a. Non-Road Static Cycle (NRSC))			tlw. maschinen- übergreifend	13 Motorlastprofile (z.B: C1, C2 für Offroad Diesel)	Drehzahl, Drehmoment gewichtet für Prüfphasen	n.a.	0,48 - 0,56	ja	n.a.
In-Service Monitoring	Maschine/ Realer Einsatz	Bericht zur Überwachung der Emissionen im Betrieb	maschinen- übergreifend (NRE-v-5 and NRE-v-6)	"Repräsentativer Einsatz" nach Maschinentyp sowie gewisse Randbedingungen	Anzahl Tests, Testdauer, min Leistung	Erreichen von 5- 7 x NRTC- Arbeit/NRTC- CO2-Masse	>=0,2	nein	nein
DLG PowerMix	Maschine/ Prüfgelände	Vergleich Motorleistung & Kraftstoff- verbrauch	Traktor	14 verschiedene reale Tätigkeiten	Zeit, Hydraulikraft, Zapfwellen- und Zugleistung	320 oder 570 [s]. Alle Zyklen 4340 [s]	Transport: 0,13 - 0,5 Feldarbeit: 0,36 - 0,83	ja	nein
Liebherr Normtest		Vergleich Kraftstoff- verbrauch	Radlader	Mix von Tätigkeiten: z.B: "kleines Ladespiel"	Zeit, Transportdistanz, Ladehöhe Aufladen	525 bis 1680 [s]*	0,26 - 0,34	nein	n.a.
JCMAS H 020 : 2007			Hydraulik- bagger	Mix von Tätigkeiten, z.B. Graben & Laden, Planieren, Fahren, Leerlauf	Zeit, Vollgas (Drehmoment), Maximalgeschwindig- keit (Drehzahl), Minimummotordreh- zahl (für Leerlauf), Ladehöhe, Grabbtiefe, Planierlänge, Streckendistanz,	n.a.	n.a.	ja	nein
JCMAS H 021 : 2007			Planierdraupe	Mix von Tätigkeiten, z.B. Zugbewegung, Leerlauf	Zeit, Zugkraftbelastung, Streckendistanz, Drehmoment, Drehzahl	n.a.	n.a.	ja	nein
JCMAS H 022 : 2007			Radlader	Mix von Tätigkeiten, z.B. Laden, Fahren, Leerlauf	Zeit, Ladeeimergewicht, Ladehöhe, Winkel, Streckendistanz, Fahrbahnkondition	n.a.	n.a.	ja	nein

Im Rahmen wissenschaftlicher Arbeiten wurden weitere Lastprofile erarbeitet. In (Fecke 2018) wurden auf Basis von Betreiber- und Telematikdaten Lastzyklen für Baumaschinen abgeleitet. Diese umfassen Bagger (Raupebagger, Mobilbagger) mit den Tätigkeiten Laden, Planieren, Fahren und Leerlauf sowie Radlader (Großlader, Kleinslader) mit den Tätigkeiten Heben, großes und kleines Ladespiel, Fahren und Leerlauf. In der Dissertation wurden beispielhaft auch die spezifischen Kraftstoffverbräuche für einige Maschinen in den definierten Zyklen erhoben, jedoch keine Schadstoffemissionen.

In der Dissertation von (Ettl 2021) wurden für Traktoren die sog. Praxisnahen Traktor-Fahrzyklen (PTFZ) entwickelt, welche zur Emissionsmessung für typische Traktorarbeiten, z.B. Pflug, Säkombination, Grubber, Kreiselegge, Transport und Mähwerk angewendet werden können. In diesen Tätigkeiten ist anteilig die Arbeitsphase, Wendemanöver und restliche Betriebszeiten (z.B. Start und Fahrt vom Hof zum Feld und zurück) enthalten.

2.4.2 Auswertung von Telematikdaten

2.4.2.1 Einführung

Telematik oder Telemetrie bezeichnet das Senden von Messdaten eines Sensors an eine räumlich getrennte Stelle. Sensorisch erfasst werden dabei beispielsweise Signale der Motorsteuerung (ECU), GPS-Geräten oder weiteren Messgeräten (z.B. Verbrauchsdurchflussmesser). Diese Daten werden dann per W-Lan oder Mobilfunk an Server geschickt, wo sie gespeichert und weiterverarbeitet werden. Seit einigen Jahren existiert auch die Norm ISO 15143-3 zur Datenstandardisierung.

Im NRMM-Sektor werden heute vor allem Land- und Baumaschinen mit Telematiksystemen ausgestattet (siehe Liste verschiedener Hersteller im Anhang). Die Schaffung der nötigen Schnittstellen zur Motorsteuereinheit war bisher in der Regel nur für größere Maschinen möglich. Seit der Abgasstufe V sind laut Aussagen eines Maschinenherstellers Schnittstellen für Maschinen ab 19 kW oder mehr Leistung verfügbar. Entsprechende Hard- und Softwarelösungen existieren schon seit mehreren Jahren. Während anfangs Telematiksysteme vor allem nach Kundenbedarf eingesetzt wurden, werden diese heutzutage bei vielen Maschinen nahezu immer verbaut. Maschinenhersteller nutzten diese u.a. zur Produktentwicklung oder zur Unterstützung des Kundendienstes, während für Maschinenbetreiber beispielsweise Diebstahlschutz, Wartungsplanung, sowie Bestimmung der Position, Maschineneinsatzdauer, Flottenverbräuchen von Interesse sind.

Mithilfe von Telematik lassen sich eine Vielzahl von Informationen über das Betriebsverhalten allgemein als auch über das Lastprofil mobiler Maschinen erfassen. Gängigen Daten für Maschinenbetreiber umfassen die Betriebsstunden und den Kraftstoffverbrauch, in vielen Fällen auch die Leerlaufzeiten. Es gibt jedoch auch maschinen- und anwenderspezifisch deutlich differenziertere Auswertungen, so zum Beispiel bei Erntemaschinen zur Ertragsmenge, Feuchtigkeitsgehalt oder bearbeiteter Fläche, um die Produktivität des Ernteprozesses genauer bewerten zu können.

Zudem gibt es Sensoren für weitere Daten, z.B. Motorleistung/-Last, Drehzahl und Hydraulikdruck. Solche Informationen können beispielsweise den Maschinenherstellern zur Auslegung neuer Modelle dienen, während diese in den Flottenmanagementanwendungen der Betreiber in der Regel nicht vorliegen. Umfang und Detailgrad der Daten sind meist wegen der möglichen Übertragungs- und Speicherungsraten, Datenschutzbestimmungen, Leistungsfähigkeit der verwendeten Software, o.ä. eingeschränkt (siehe Abschnitt 2.4.2.3 zu Unsicherheiten).

Viele der befragten NRMM-Hersteller erwarten, dass die Nutzung und die Möglichkeiten von Telematiksystemen weiter zunehmen. Einige Hersteller gaben an, weitere hard- und softwareseitige Entwicklungen vornehmen zu wollen um die Datenqualität zu verbessern oder Themen wie Data-Mining“ und „Predictive Maintenance“ zu vertiefen. Auch seien bereits vor weitere Aktivitäten in Richtung Standardisierung und der Schaffung herstellerübergreifender Anwendungen in Gange.

2.4.2.2 Verwendete Telematikdaten

Für die Auswertung der Einsatzprofile wurden Daten aus verschiedenen Quellen zusammengestellt, darunter öffentlich zugängliche Daten in Internetportalen bzw. aus der Literatur, sowie auf Anfrage von Flottenbetreibern und Maschinenherstellern bereitgestellte Daten (siehe Tabelle 18). Diese wurden unterschieden in Langzeitauswertungen und in – ausschließlich auf von Hersteller bereitgestellten Sonderauswertungen basierenden – Detailauswertungen. Bei den Langzeitauswertungen handelte es sich um Daten, welche meist in aggregierter Form vorlagen und über einen längeren Zeitraum kumuliert erfasst worden sind. Diese Daten wurden zur Validierung aggregierter Kenngrößen, z.B. mittlere Last, mittlerer Leerlaufanteil, der Lastprofile verwendet. Die Detailauswertungen lagen in deutlich differenzierterer Form vor und waren in Zeitintervalle von wenigen Minuten unterteilt.

Tabelle 18: Überblick zur Art der verwendeten Telematikdaten

Merkmale	Detailauswertungen	Langzeitauswertungen
Quellen	Interne Daten von Maschinenherstellern	Literatur/Internet, Interne Daten von Flottenbetreibern/Maschinenherstellern
Zeitintervall der erfassten Daten	i.d.R. wenige Minuten, unterschiedlich je Hersteller	Jahreswerte bzw. kumuliert seit Inbetriebnahme
Umfang Betriebsstunden Stichprobe	Mehr als 1 Mio. h	Mehr als 50 Mio. h
Anteil Leerlauf	Vorhanden	Vorhanden
Unterscheidung Leerlaufdauer $</\geq 5$ min	Teilweise vorhanden	Nicht vorhanden
Mittlerer Verbrauch/Lastfaktor	Vorhanden	Vorhanden
Häufigkeit Kalt-/Semikaltstarts	Vorhanden	Nicht vorhanden
Häufigkeit Leerlaufphasen	Vorhanden	Nicht vorhanden
Verwendung im Projekt	Ableitung Lastprofile von NRMM	Vergleich und Validierung der Detailauswertungen

Die zeitliche Auflösung war damit zwar immer noch deutlich geringer als bei den PEMS-Messungen, umfasste jedoch mit 1262 Maschinen und über einer Million Betriebsstunden eine erheblich größere Stichprobe. Diese Daten konnten daher zur Abschätzung der Länge und Häufigkeit von Stopp- oder Leerlaufphasen verwendet werden. Allerdings decken diese nicht alle Geräte ab, die einen relevanten Anteil an den Gesamtemissionen der NRMM in Deutschland haben. Insbesondere fehlen Daten für Traktoren und Bagger mit weniger 56 kW, deren Flotte aktuell weitgehend noch über Stufe IIIB oder älter verfügt und einen hohen Anteil an den Betriebsstunden mobiler Maschinen hat (vgl. Kapitel 2.1).

2.4.2.3 Datenqualität und Unsicherheiten

Grundsätzlich gibt es bei der Datenqualität von Telematik zwei limitierende Faktoren, 1) die Genauigkeit der Sensoren an der Maschine und 2) die Genauigkeit bei der Datenübermittlung und Weiterverarbeitung. Die Datenerfassung an der Maschine wurde von den Herstellern meist als genau bewertet. Bei der Erfassung des Kraftstoffverbrauchs gibt es allerdings unterschiedliche Methoden. Einige Hersteller arbeiten mit Durchflussmessern, deren Genauigkeit als sehr hoch eingestuft wurde. Andere Hersteller leiten den Kraftstoffverbrauch aus Motorsignalen wie Leistung und Drehzahl ab, dies kann zu höheren Ungenauigkeiten führen. Bei sehr kurzen Zeitintervallen und in Niedriglastphasen ist die Genauigkeit geringer als bei längeren Phasen mit höherer Last, was auch auf dem Fachgespräch am 5.10.2021 von verschiedenen Experten bestätigt wurde.

Zu größeren Ungenauigkeiten kann es hingegen je nach Hersteller und Software bei der Datenübermittlung und Weiterverarbeitung kommen. Der **spezifische Kraftstoffverbrauch** in l/h wird teilweise aus dem kumulierten Kraftstoffverbrauch und kumulierten Betriebsstunden rückgerechnet. In wenigen Fällen kann es dazu kommen, dass die Zeitstempel sich leicht unterscheiden, wodurch in einigen Zeitintervallen unplausible Werte (z.B. negative Werte) entstehen können.

Die Telematiksysteme geben in den meisten Fällen einen **Betriebsstatus** und dessen zeitliche Dauer an. Im einfachsten Fall handelt sich um die Information, ob Zündung bzw. Motor an oder aus waren. Alle betrachteten Systeme erfassen auch den Leerlauf als Status, allerdings nicht immer mit denselben und auch nicht mit für den Nutzer transparenten Kriterien. Je nach Hersteller ist damit der sog. untere Leerlauf mit geringer Drehzahl, der oberer Leerlauf mit höherer Drehzahl oder aber auch Stillstand der Maschine (d.h. keine Bewegung des Fahrwerks) gemeint. Die Festlegung des Status erfolgt über verschiedene Signale der Maschine oder des Motors, z.B. Leistung, Drehzahl. Bei der Übertragung der Daten kann es zu Fehlern kommen, indem zum Beispiel das Senden des aktuellen Status unterbleibt und der letzte Status fortgeschrieben wird. Derartige Fehler wurden jedoch von den Herstellern soweit möglich vor der Datenlieferung überprüft und die Daten entsprechend bereinigt. In der Arbeit von (Fecke 2018) wurden weitere tätigkeitsfeine Statusangaben einiger Hersteller untersucht, z.B. Fahren, Graben, Planieren, o.ä.. Es wurde allerdings festgestellt, dass diese Angaben aufgrund der begrenzten Möglichkeiten der Algorithmen nicht immer nachvollziehbar sind, vgl. (Fecke 2018). Für die Auswertung des Einsatzprofils zur Emissionsberechnung wurden solche Angaben u.a. wegen der begrenzten Anwendbarkeit, da abhängig vom Hersteller und Maschinenkategorie, als nicht zielführend betrachtet und nicht von den Herstellern abgefragt.

Die begrenzte **zeitliche Auflösung der Daten** stellt eine weitere Herausforderung dar. Die zeitlichen Intervalle, mit welchen die Daten übermittelt wurden unterscheiden sich stark. Einige Hersteller haben feste Intervalle, z.B. 10 oder 30 Minuten oder kürzer wenn der Motor stoppt; andere Hersteller geben je ein Intervall pro Änderung des Betriebsstatus an. Allerdings werden auch hier die Intervalle zusammengefasst und nur der häufigste Status angegeben, falls der Status zu häufig gewechselt wurde. Grund für das Aggregieren der Zeitintervalle ist die Reduktion des Datentransfers. Für die Auswertung führte dies allerdings zu der Unsicherheit, dass häufig Mischintervalle vorlagen, bei denen die Aufteilung und zeitliche Abfolge bestimmter Betriebsstatus nicht oder nur teilweise bekannt war. Die verschiedenen Unsicherheiten wurden in Gesprächen mit den Herstellern umfangreich diskutiert, wobei diverse Möglichkeiten der Auswertung und Plausibilisierung geprüft wurden. Laut VDMA ist die hier angesetzte pauschale Unterteilung in Leerlaufphasen < 5 min und > 5 min problematisch, da diese Unterteilung mittels der gelieferten Telematikdaten nicht sauber festlegbar sei. Detailliertere Daten waren jedoch nicht vorhanden, so dass ein solches Vorgehen als unumgänglich angesehen wurde.

2.4.3 Ableitung typischer Lastprofile pro Maschinenkategorie

2.4.3.1 Ermittlung der Arbeitsphasen

Der Anteil der Arbeitsphasen an den Betriebsstunden wird aus einer Kombination des mittleren Lastfaktors und - soweit vorhanden - des Betriebsstatus bestimmt. Je nach Datenverfügbarkeit bei den verschiedenen Maschinentypen/Herstellern wurde dabei wie folgt vorgegangen:

- Falls die Leerlaufzeit aus Daten zum Betriebsstatus bekannt ist, dann gilt:
$$\text{Arbeitszeit} = \text{Betriebszeit insgesamt} - \text{Leerlaufzeit}$$
- Falls die Leerlaufzeit nicht aus Statusdaten bekannt, dann gilt:
$$\text{Betriebszeit} = \text{Arbeitszeit, wenn mittlerer Lastfaktor} \geq 10\%$$

Hier muss angemerkt werden, dass der Hersteller, welcher mit je 30 min das längste Zeitintervall bereitstellte, die Leerlaufdauer explizit mit angegeben hatte, so dass der zweite Ansatz eher bei kurzen Intervallen angewendet wurde. Dies ist insofern von Vorteil für die Genauigkeit, als dass der mittlere Lastfaktor bereits durch kurze Arbeitsphasen leicht über 10% steigen kann und die Methode daher bei langen Mischintervallen sehr ungenau wird.

Die so als Arbeitszeit abgeleiteten Zeitintervalle wurden abhängig vom mittleren Lastfaktor dann weiter in leichte, mittlere und schwere Arbeit unterteilt. (siehe Tabelle 19)

Tabelle 19: Einteilung in Leerlauf und Arbeitsphasen nach durchschnittlichem Lastfaktor

Definitionen	LF $\geq$	LF <
Leerlauf*		10%
Leichte Arbeit	10%	30%
Mittelschwere Arbeit	30%	55%
Schwere Arbeit	55%	

2.4.3.2 Ermittlung der Leerlaufphasen

Die Bestimmung der Leerlaufphasen erfolgte analog zu den Arbeitsphasen. Wurde der Motorzustand „Leerlauf“ bereits in der Telematik-Software der OEM angegeben, so wurde die Leerlaufzeit übernommen. War dies nicht der Fall, so erfolgte die Abschätzung über den mittleren Lastfaktor eines Intervalls. Die resultierenden Leerlaufanteile aus den Summen der Zeitintervalle wurden mit kumulierten Daten des jeweiligen Herstellers bzw. aus weiteren Quellen abgeglichen. Wenn es dabei zu größeren Abweichungen kam, wurden die Parameter zur Einteilung in Arbeits- und Leerlaufphasen entsprechen kalibriert.

Die Unterteilung der Leerlaufzeiten in kürzer bzw. länger als 5 min ließ sich aus den Telematikdaten bestenfalls näherungsweise ableiten (siehe Abschnitt „Datenqualität“). Problematisch waren hierbei die sog. „Mischintervalle“, bei welchen zwar der Anteil an Leerlauf, jedoch nicht die zeitliche Abfolge bekannt war. In diesen Fällen kann nur der Mindestanteil an kurzem Leerlauf (<5 min) anhand des Anteils von Intervallen, deren Leerlaufdauer insgesamt kürzer als 5 min war, bestimmt werden. Für die Erdbewegungsmaschinen konnte aufgrund des verwendeten Telematiksystems und zum Zeitpunkt der Auswertung nicht ermittelt werden, ob es sich um reine Leerlaufintervalle oder Mischintervalle handelt. Damit ergibt sich eine sehr große theoretische Bandbreite (siehe Tabelle 20). Bei Traktoren machten die reinen Leerlaufintervalle immerhin ca. 7% der Leerlaufzeiten insgesamt aus. Daher konnte hier die Bandbreite immerhin insofern eingegrenzt werden, dass mindestens 4% des Leerlaufs länger als 5 lang sein muss. Das Telematiksystem des Herstellers für Walzen bot hingegen eine zusätzliche Auswertung mit Unterscheidung in die Leerlaufstunden insgesamt und langen Leerlauf an, welcher laut dem Hersteller Leerlaufphasen von ca. 10 min oder länger enthält.

Zusätzliche Informationen für Radlader und Mobilbagger konnten aus Analysen von (Fecke 2018) verwendet werden. Hier wurden aufgrund von Flottenberichten mittels Telematikdaten von über 7000 Maschinen weitere Unterscheidungen nach Länge der Leerlaufphase gesammelt. Insgesamt wird deutlich, dass die Genauigkeit der Telematikdaten zur Leerlaufdauer zwar begrenzt ist, wo die Erfassung dies zulässt, scheint die Verteilung zwischen kurzem und langen Leerlauf jedoch eher ausgewogen.

Tabelle 20: Angaben/Bandbreiten zur durchschnittlichen Aufteilung der Leerlaufphasen in ≤ 5 min und >5 min mittels Telematikdaten

Art der Telematikdaten	Kurzer Leerlauf (≤ 5 min)	Langer Leerlauf (>5 min)
Ifeu-Auswertung einzelner Zeitintervalle* mit Angaben zum	Traktoren: 20% bis 96% Radlader: 14% bis 100%	Traktoren 4% bis 80% Radlader: 0% bis 86%

Betriebsstatus und/oder zum Kraftstoffverbrauch	Mobilbagger: 19% bis 100% Raupenbagger: 9% bis 100%	Mobilbagger: 0% bis 81% Raupenbagger: 0 % bis 91%
Eigene Auswertung des Herstellers mit Unterscheidung in idle/long idle	Walzen: max. 39%*	Walzen: min. 61%*
Analyse von Flottenberichten	Radlader: 33% Mobilbagger 55%	Radlader: 67% Mobilbagger 45%

*berücksichtigt wurden Zeitintervalle, deren Status vom Hersteller als Leerlauf angegeben oder aufgrund des Lastfaktors als solcher eingestuft worden sind. Da nur die Mindestanteile an kurzem oder langem Leerlauf bekannt waren, kommt es zu Überlappungen bei den jeweiligen Bandbreiten.

2.4.3.3 Ermittlung der Anzahl Starts

Die Anzahl der Warm und Kaltstarts lässt sich aus einem Wechsel des Zustands „aus“ in Arbeit oder Leerlauf ableiten. Über die Dauer des Stopps wird wiederum bestimmt, ob es sich um einen Warmstart (60 min – 8 h) oder einen Kaltstart (> 8 h) handelt⁴². Stopps <1 h werden nicht berücksichtigt, da die Auskühlung i.d.R. vernachlässigbar ist.

Die Anzahl an Leerlaufphasen > 5 Minuten konnte aus den zuvor genannten Gründen in den meisten Fällen nicht direkt aus den Telematikdaten ermittelt werden. Daher wurde diese aus der Annahme abgeleitet, dass eine lange Leerlaufphase im Durchschnitt 15 Minuten dauert und über deren Zeitanteil die Häufigkeit langer Leerlaufphasen pro Betriebsstunde berechnet.

2.4.3.4 Durchschnittliches Lastprofil pro Maschinenkategorie

Die Ergebnisse der Auswertung für die untersuchten Maschinenkategorien sind in der folgenden Tabelle dargestellt. Zwar zeigen sich hierbei gewisse Unterschiede zwischen den mittleren Lastprofilen pro Maschinenkategorie hinsichtlich des mittleren Lastfaktors, des Leerlaufanteils und der Anzahl Starts. Eine gewisse Mischung aus Leerlauf, leichter, mittlerer und schwerer Arbeit kommt anscheinend dennoch bei allen Maschinenkategorien vor, weswegen sich die Unterschiede in Grenzen halten. Dies kann sowohl auf die Vielfalt möglicher Arbeitsschritte, Untergrund, Material als auch auf den menschlichen Faktor, vor allem Leerlauf zwecks Heizung/Klimaanlage, zurückzuführen sein. Eine optimierte Auslegung der Nennleistung zeichnet sich noch am ehesten bei Mähdreschern und Raupenbaggern ab, welche vergleichsweise hohe Lastfaktoren in der Arbeitsphase aufweisen. Übrige Maschinen arbeiten eher mit mittlerer Last. In Gesprächen mit Herstellern wurde allerdings darauf hingewiesen, dass bestimmte Leistungsreserven für kurze temporäre Einsätze, z.B. Einschalten der Vibration bei Walzen, nötig sind und daher die durchschnittlichen Leistungen deutlich unterhalb der Nennleistung liegen. Der Hersteller John Deere bietet für neuere Traktoren zum Beispiel ein sogenanntes Intelligent Power Management (IPM) Modul, mit welchem kurzzeitig deutlich höhere Leistungen als die nach ECE anzugebende Nennleistung erreicht werden können. Es wurde im Rahmen dieser Studie allerdings noch nicht untersucht, welche Auswirkung diese Strategie auf die Lastprofile von Traktoren hat.

Die Leerlaufanteile liegen im Durchschnitt meist im Bereich von 20-30%. Leichte Unterschiede könnten hier vor allem system- bzw. produktionsbedingt auftreten, vgl. (Fecke 2018), während der vom Fahrer verursachte Leerlauf, beispielsweise durch Anlassen des Motors bei Pausen, bei allen Maschinenkategorien zum Tragen kommen dürfte.

Die Häufigkeit von Kaltstarts unterscheidet sich deutlich zwischen den Maschinen. So zeigen die Daten, dass die Arbeitszeiten bei Raupenbaggern und Traktoren vergleichsweise lang sind, und

⁴² Näherungsweise, da die Ausgangstemperatur und die Außentemperatur auch entscheidend sind, was jedoch nicht berücksichtigt wurde

daher ein Kaltstart nur ca. alle 8 Betriebsstunden auftritt. Bei den übrigen Maschinenkategorien liegt das Verhältnis bei ca. 4 - 5 Betriebsstunden pro Kaltstart. Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, dass diese Maschinen weniger Betriebsstunden pro Tag arbeiten. Die niedrigeren täglichen Betriebsstunden bei Mähdreschern im Vergleich zu Traktoren scheinen auf den ersten Blick nicht plausibel. Möglicherweise werden die Betriebsstunden unterschätzt, da nur Daten für das Dreschen von Weizen ausgewertet werden konnten, und die Mähdrescher eventuell auch weitere Arbeitsschritte während desselben Zeitraums ausgeführt haben, welche jedoch nicht erfasst wurden. Dies müsste mit weiteren Daten untersucht werden.

Tabelle 21: Eckwerte für durchschnittliche Einsatzprofile verschiedener Maschinenkategorien

Parameter Lastprofil	Mobil-bagger	Rad-lader	Raupen-bagger	Walzen	Traktor	Mäh-drescher
Leerlaufanteil (% Zeit)	31%	27%	24%	22%	25%	10%
Davon Leerlauf >5min (%Zeit)	45%	67%	56%	59%	55%	50%
Lastfaktor Gesamt (% Leistung)	27%	27%	43%	36%	35%	55%
Lastfaktor Arbeitsphase (% Leistung)	37%	36%	56%	45%	45%	60%
Betriebszeit pro Kaltstart (h)	5,4	4,1	7,5	4,2	8,1	4,0
Betriebszeit pro Semikaltstart (h)	7,9	3,9	8,7	4,9	7,3	0 (n.a.)
Durchschnittliche Stoppzeit vor einem Semikaltstart (h)	2,1	2,2	2,0	2,2	2,1	2,1
Betriebszeit pro Leerlaufphase >5 min (h)	1,8	1,4	1,9	1,9	1,8	5,0

Quelle: ifeu Annahmen aus Basis von Telematikdatenauswertungen verschiedener Hersteller. Erläuterung: Die Angabe „Betriebszeit pro...“ gibt die durchschnittliche Häufigkeit an, z.B. beim Mobilbagger erfolgt ein Kaltstart alle 5,4 Betriebsstunden.

2.5 Durchschnittliche Emissionsfaktoren im Realbetrieb

Die Emissionsfaktoren für den Realbetrieb werden ermittelt, indem jeweils die Emissionen für den Start, den Leerlaufbetrieb und die Arbeitsphase addiert werden, wie die Formel in Abbildung 32 es verdeutlicht:

Abbildung 32: Formel zur Berechnung der durchschnittlichen Realemissionen in g/h

$$EF_{total} = f_{work} \times EF_{work} \times P_{work} + P_{nenn} \times (f_{idle} \times EF_{idle} + f_{offset} \times EF_{offset})$$

Kürzel	Bedeutung	Einheit
EF_{total}	Masse Emissionen gesamt pro Betriebsstunde	g/h
f_{work}	Anteil Arbeit an den Betriebsstunden	h/h
Ef_{work}	Masse Emission pro kWh Motorleistung in Arbeit	g/(kW x h)
P_{work}	Mittlere Motorleistung in Arbeit	kW
P_{nenn}	Nennleistung des Motors	kW _{nenn}
f_{idle}	Anteil Leerlauf an den Betriebsstunden	h/h
EF_{idle}	Masse Emission pro kW Nennleistung und Betriebsstunde im Leerlauf	g/(kW _{nenn} x h)
EF_{offset}	Masse Emission pro kW Nennleistung und pro Start (nach Aus oder Leerlauf)	g/(# x kW _{nenn})
f_{offset}	Anteil Starts pro Betriebsstunde	#/h

Anmerkung: Die Formel stellt die Berechnung vereinfacht dar. Die Arbeitsphase wird zusätzlich nach Lastfaktor in leichte, mittlere und schwere Arbeit unterschieden, die Leerlaufphasen in ≤ 5 min und > 5min und die Starts in Kaltstart (nach >8 h Stopp), Warmstart (nach 1-8 h Stopp) und Wechsel von einer Leerlaufphase > 5min in Arbeitsphasen.

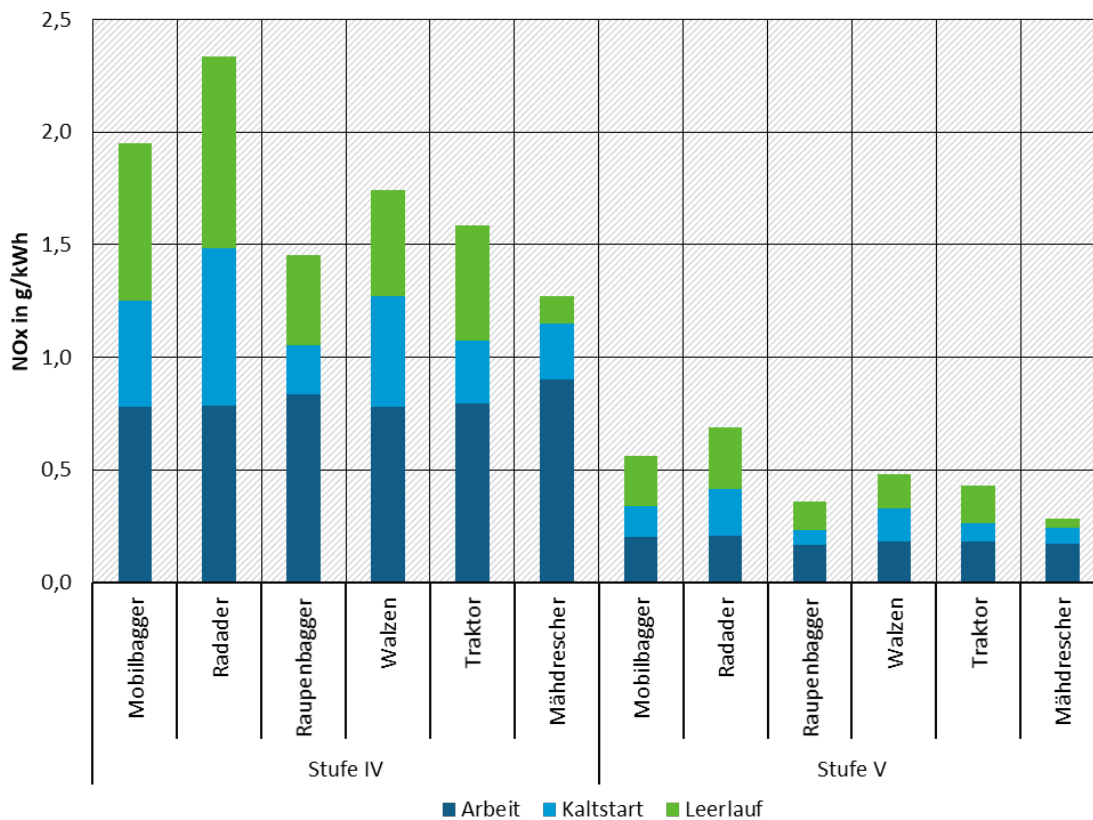
Die jeweiligen Emissionsfaktoren „EF“ wurden aus den eigenen Messreihen und Literaturdaten abgeleitet (vgl. Kapitel „Emissionsverhalten“), während die Zeitanteile der Arbeits- und Leerlaufphasen und die Anzahl Starts pro Betriebsstunde mithilfe der zuvor beschriebenen Telematikdaten abgeleitet wurden.

2.5.1 Durchschnittliche NO_x-Emissionen nach Betriebszustand für verschiedene Maschinenkategorien

Folgende Abbildung stellt die auf Basis des repräsentativen Emissionsverhaltens (Abschnitt 2.1) und der repräsentativen Lastprofile abgeleiteten mittleren NO_x Emissionsfaktoren sowie die Konformitätsfaktoren pro Maschinenkategorie und jeweils für die Abgasstufe IV und V dar. Es zeigt sich, dass die Emissionen bei den Stufe IV Maschinen deutlich höher sind als bei den Stufe V Maschinen. Beide Abgasstufen haben im NRTC jedoch denselben Grenzwert von 0,4 Gramm pro Kilowattstunde. Entsprechend liegt der Konformitätsfaktor bei Stufe IV bei circa zwischen 3 und 5, während er bei Stufe V bei nahe 1 liegt. Das bedeutet, dass die Stufe V Geräte den NO_x-Grenzwert im Durchschnitt auch im realen Betrieb nahezu einhalten.

Es zeigt sich auch, dass die im Rahmen des ISM ausgeschlossenen Nicht-Betriebsereignisse, also Starts und Leerlauf, bei Stufe IV zusammen etwa die Hälfte der Emissionen ausmachen, wobei je nach Lastprofil niedrigere oder höhere Anteile möglich sind. Bei den Stufe V Maschinen nimmt der Anteil der Nicht-Betriebsphasen an den Gesamtemissionen tendenziell zu, obwohl die Emissionen sowohl in den Betriebs- als auch den Nicht-Betriebsereignissen gegenüber den Stufe IV Maschinen gesunken sind. Dies bedeutet, dass die im Rahmen des ISM gültigen Ergebnisse die durchschnittlichen Realemissionen deutlich unterschätzen können.

Abbildung 33: NO_x-Emissionsfaktor für Stufe IV und V anteilig pro Betriebsphase und in Abhängigkeit des durchschnittlichen Lastprofils pro Maschinenkategorie



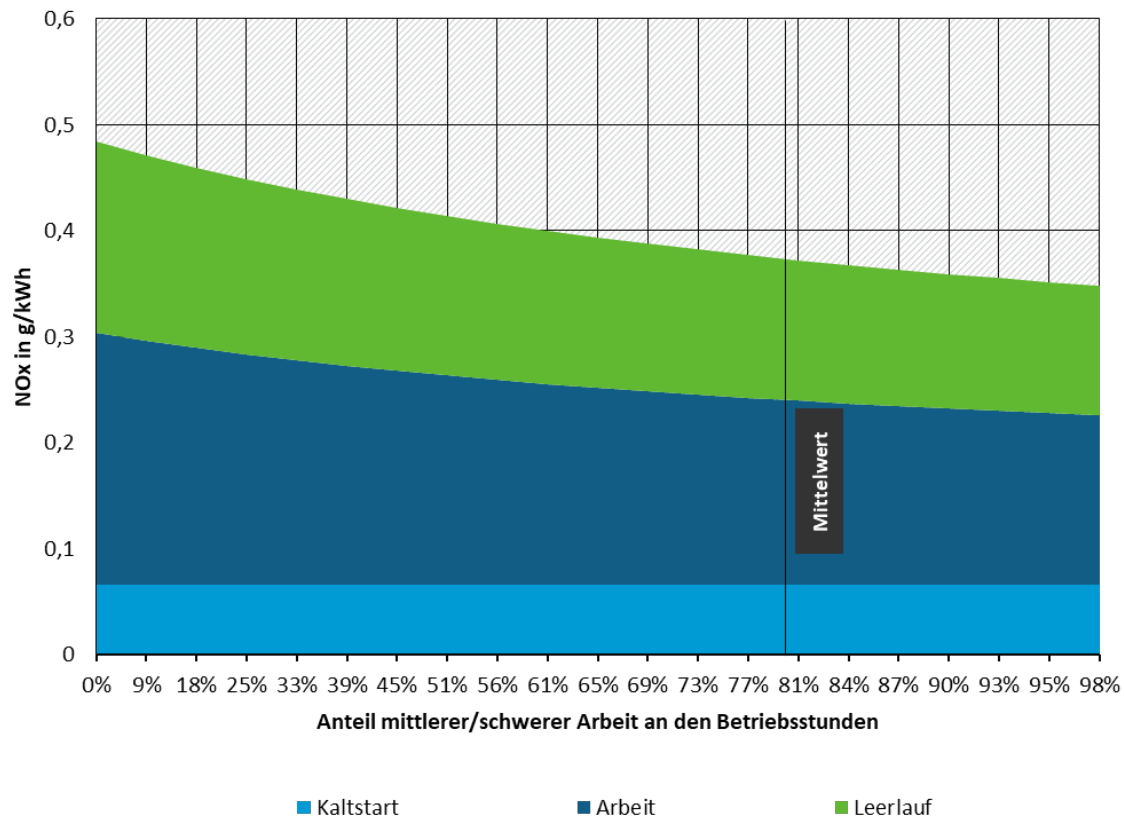
Quelle: ifeu-Graphik.

2.5.2 Sensitivitätsanalyse für die mittleren NO_x-Emissionen von Stufe V-Baggern aufgrund des Lastprofils

Im Folgenden wird untersucht, wie sich Änderungen bei den Lastprofilen auf die durchschnittlichen NO_x-Emissionen auswirken. Die Analyse erfolgt am Beispiel der Maschinenkategorie Raupenbagger mit einer Nennleistung von 100 kW und Stufe V.

Die Arbeitsphase macht bei Raupenbaggern den Hauptteil an den Betriebsstunden aus, wobei tendenziell eher mittlere und schwere Arbeiten ausgeführt werden. Die spezifischen NO_x-Emissionen in g/kWh in der Arbeitsphase sind bei leichter Arbeit etwa 50% höher als bei schwerer Arbeit. Auch sinkt der Anteil der Emissionen aus dem Leerlauf mit Anstieg der Last in der Arbeitsphase, da mehr proportional Leistung für Arbeit benötigt wird. Für die Gesamtemissionen unter Berücksichtigung des Kaltstart- und Leerlaufanteils liegt die Differenz bezogen auf g/kWh damit bei ca. 40%. Die mittlere Last während der Arbeitsphase hat damit einen gewissen Einfluss auf den mittleren Emissionsfaktor (Abbildung 34).

Abbildung 34: Einfluss der Arbeitsphase auf die mittleren NO_x-Emissionen bei einem Stufe V-Raupenbagger mit 100 kW



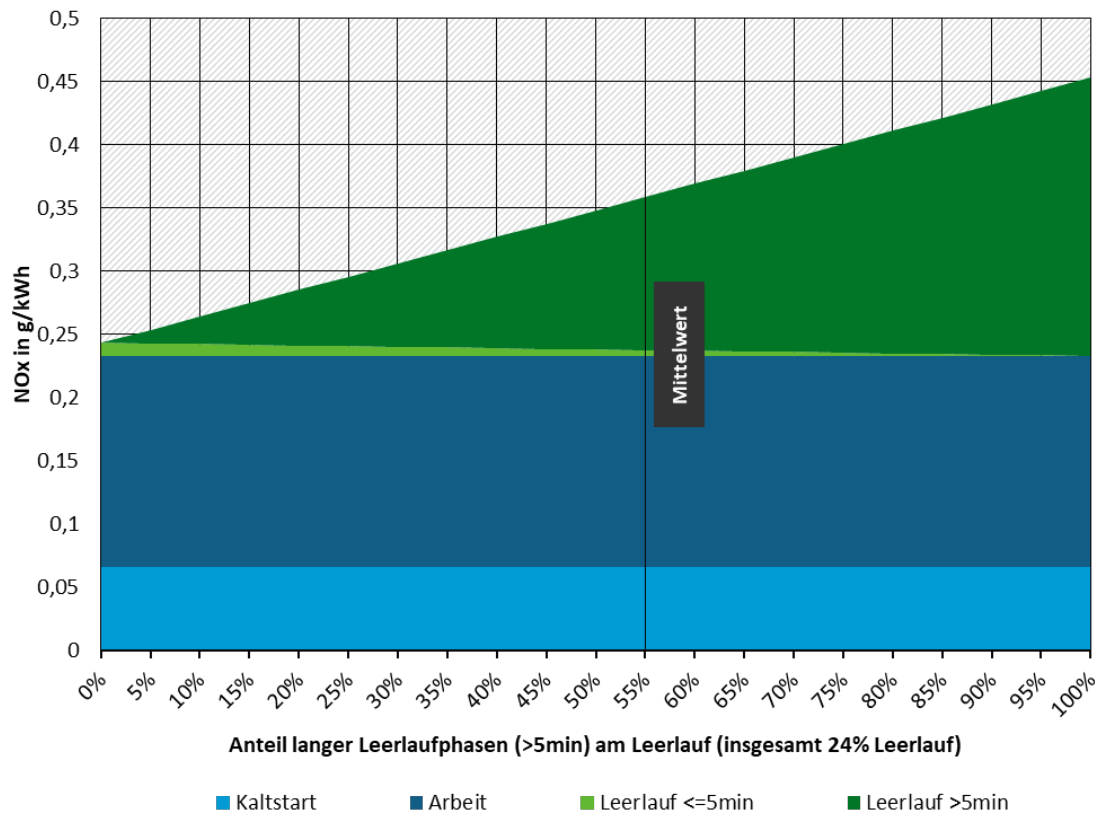
Bezogen auf die Emissionen pro Betriebsstunde, also die gesamt ausgestoßenen Emissionen, kehrt sich der Effekt um⁴³, da bei schwerer Arbeit deutlich mehr Leistung benötigt wird als bei leichter Arbeit. Bei Stufe IV-Motoren sind die Emissionsfaktoren in der Arbeitsphase insgesamt und besonders bei schwerer Arbeit hingegen deutlich höher als für Stufe V.

Die Leerlaufdauer hat potenziell einen großen Einfluss. Die NO_x-Emissionen in g/h und g/kW von Stufe V sind im langen Leerlauf durch das Auskühlen der Abgasnachbehandlung ca. 10-mal höher als im kurzen Leerlauf. Zusätzlich entstehen auch in der Arbeitspause nach dem Leerlauf höhere Emissionen bis die Abgasminderung wieder die nötige Temperatur zur effektiven NO_x-Minderung erreicht hat. Bei einem Leerlaufanteil von insgesamt 24 % wie bei Raupenbaggern angenommen, wären die NO_x-Emissionen in g/kWh somit bei ausschließlich langem Leerlauf fast doppelt so hoch wie bei ausschließlich kurzem Leerlauf (siehe Abbildung 35). Bei insgesamt höherem Leerlaufanteil würde sich der NO_x-Emissionsfaktor in g/kWh zwar stärker erhöhen (z.B. bei 50% Leerlauf um bis zu Faktor 3,2). Bezogen auf die NO_x-Emissionen in g/h ist der Effekt allerdings geringer, da im Leerlauf kaum Leistung erbracht wird⁴⁴. Leider liegen zum Anteil langer und kurzer Leerlaufphasen nur begrenzt valide Informationen vor, so dass die Relevanz für die Emissionen im Realbetrieb nicht abschließend beurteilt werden kann.

⁴³ Im Durchschnitt liegen die NO_x-Emissionen bei 15,7 g/h, bei ausschließlich leichter Arbeit in der Arbeitsphase sind es 14 g/h, bei ausschließlich schwerer Arbeit 17,5 g/h.

⁴⁴ Bei einem Leerlaufanteil von 50% und allen Leerlaufphasen kürzer als 5 min sind es 11,3 g/h, bei ausschließlich Leerlauf > 5 min 20,7 g/h., d.h. ca. 80% bzw. Faktor 1,8 höher.

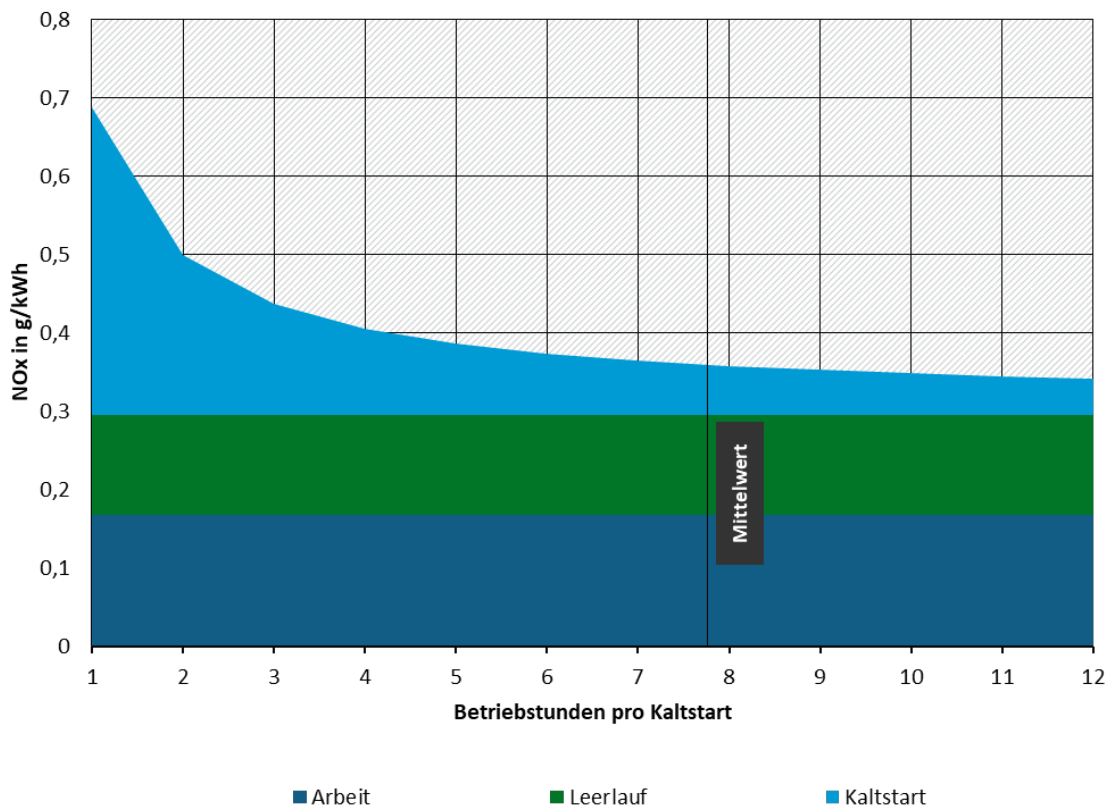
Abbildung 35: Einfluss der Leerlaufphase auf die mittleren NO_x-Emissionen bei einem Stufe V-Raupenbagger mit 100 kW



Eine potenziell hohe Sensitivität auf den NO_x -Emissionsfaktor bei Stufe V ergibt sich beim Kaltstartzuschlag. Da dieser als einmaliger Wert in Gramm eingeht (Offset), sinkt der Anteil an den Gesamtemissionen in g/kWh oder g/h mit zunehmender Dauer und Leistung der Betriebsphase. Bei einer Betriebsphase von einer Stunde ist der Kaltstartanteil an den NO_x-Emissionen beispielsweise ca. 8mal höher und der Emissionsfaktor insgesamt in g/kWh etwas mehr als doppelt so hoch als bei einer Dauer von 12 Stunden. Der Effekt verläuft jedoch nicht linear und schwächt sich mit zunehmender Dauer ab (Abbildung 38). Bei der Stufe IV (nicht in der Abbildung dargestellt) hat der Kaltstartanteil im Beispiel Raupenbagger eine ähnliche Sensitivität: die NO_x-Emissionen insgesamt sind bei einem Kaltstart pro h pro Kaltstart mit 2,6 g NO_x/kWh ca. 85% höher als einem Kaltstart alle 12 h mit 1,4 g NO_x/kWh.

Anhand der vorliegenden Telematikdaten zeigt sich, dass die Betriebsdauer bei Raupenbaggern nach einem Kaltstart in den meisten Fällen zwischen ca. 5 Stunden (25. Perzentil) und ca. 8 Stunden (75. Perzentil) lagen. In diesem Bereich unterscheidet sich der NO_x-Emissionsfaktor insgesamt um weniger als 10%. Bei Traktoren traten mit ca. 5 (25. Perzentil) bis 9 (75. Perzentil) Stunden ähnliche Verteilungen auf, d.h. heißt zumindest bei diesen beiden häufig vorkommenden Maschinenkategorien scheint der Kaltstarteinfluss begrenzt und auch die Sensitivität eher gering zu sein.

Abbildung 36: Einfluss der Anlaufphase auf die mittleren NO_x-Emissionen bei einem Stufe V-Raupenbagger mit 100 kW



Zusammenfassend zeigt sich durch die Sensitivitätsanalyse, dass die hergeleiteten NO_x-Emissionsfaktoren bei Stufe V mittels der verwendeten Methodik relativ robust auf Variation zentraler Annahmen reagieren. Aus den einzelnen Betriebsphasen und den gewählten Bereichen können sich im Fall der Raupenbagger und Stufe V mittlere NO_x-Emissionsfaktoren zwischen ca. 0,25 g/kWh (CF=0,6) und 0,7 g/kWh (CF=1,7) ergeben. Kombinationen mehrerer „ungünstiger“ Bedingungen, z.B. Kaltstart mit anschließender langer Leerlaufphase, können zu deutlich höheren Emissionen führen, kommen jedoch nach den bisherigen Erkenntnissen selten vor. Die gezeigten Sensitivitäten beziehen sich jedoch auf eine Durchschnittsflotte und können für Einzelmaschinen bzw. bestimmte Modell höhere Extreme aufweisen, siehe Kap. 2.1.

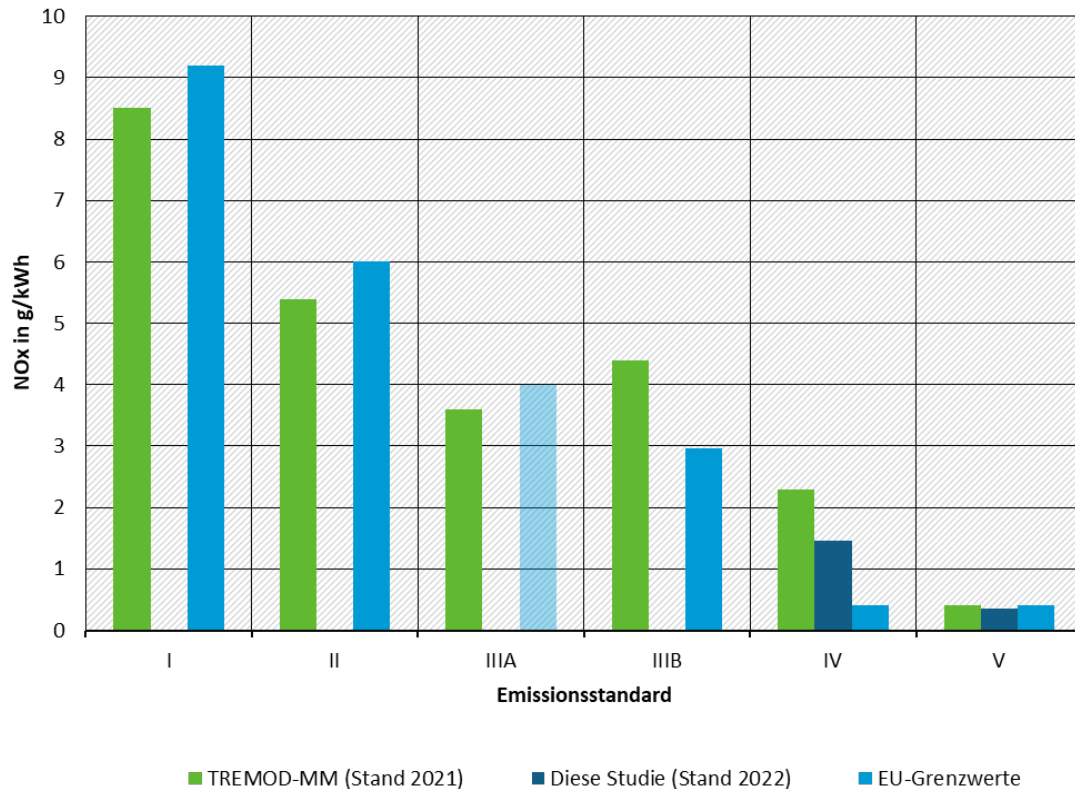
2.5.3 Emissionsfaktoren für NO_x, PM, CO und HC für Stufe I bis V

Im Folgenden wird die Entwicklung Emissionsfaktoren nach Abgasstufen, beispielhaft an den Raupenbaggern mit 100 kW, dargestellt und den jeweiligen Emissionsgrenzwerten für Neumaschinen gegenübergestellt. Da in dieser Studie nur Emissionsfaktoren für Stufe IV und Stufe V ermittelt wurden, werden auch die Emissionsfaktoren aus dem Modell-TREMOM-MM für die Stufen I bis V gegenübergestellt. Diese basieren für Stufe I und IIIA weitgehend auf Prüfstands Messungen und für Stufe IIIB und IV auf vereinzelt PEMS-Messungen, siehe (Schwingshackl et al. 2017). Auch wurde der Einfluss des Lastprofils gegenüber der Methode in dieser Studie weniger detailliert erfasst. Daraus können Unterschiede resultieren, die sich vor allem bei Stufe IV zeigen, für welche mit beiden Methoden abgeleitete Werte dargestellt sind.

Abbildung 37 zeigt, dass die NO_x-Emissionsfaktoren, mit Ausnahme der Stufe IIIB, für die neueren Abgasstufen geringer sind als bei den älteren Geräten. Für die Stufe IIIB und IV liegen die durchschnittlichen Realemissionen deutlich über den Emissionsgrenzwerten. Die Emissionen für Stufe IV sind nach dieser Studie niedriger als in TREMOD-MM. Bei Stufe V sind

die Emissionen auch im Realbetrieb etwa auf dem Niveau des Grenzwertes von 0,4 g NO_x/kWh. Das entspricht ca. einer Reduktion um 95% gegenüber Stufe I.

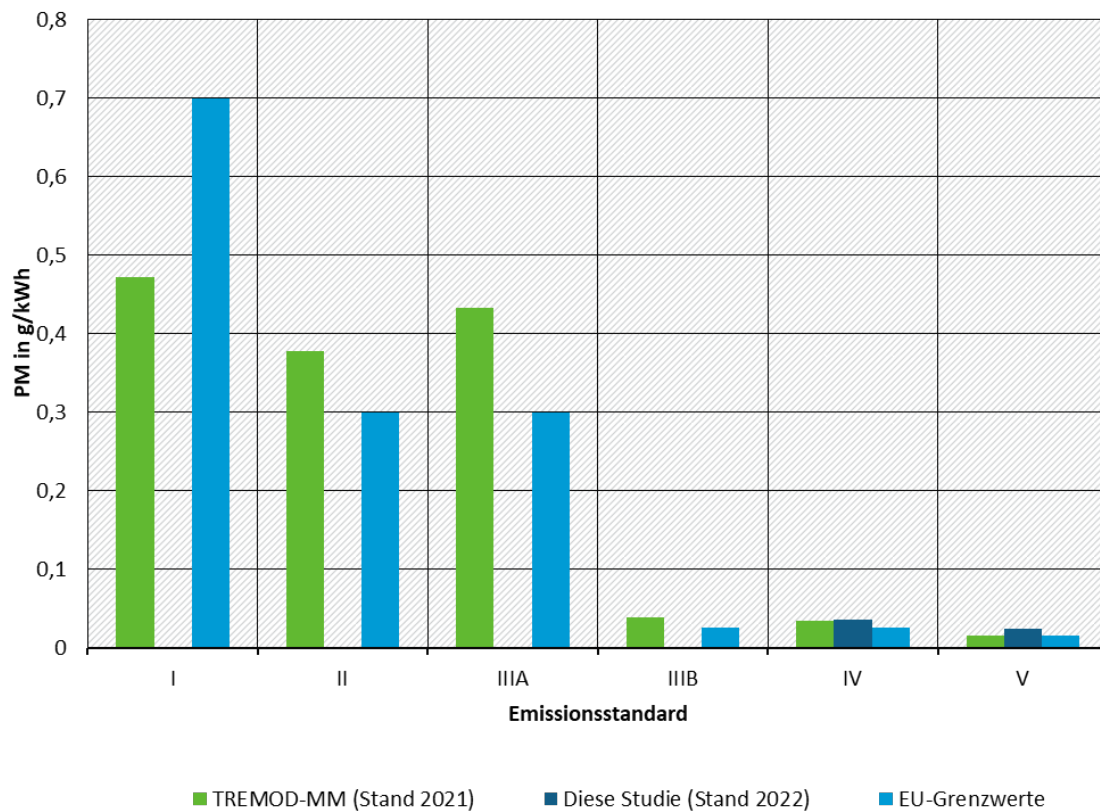
Abbildung 37: Mittlere NO_x-Emissionsfaktoren nach Abgasstufe für einen Raupenbagger mit Dieselmotor und 100 kW Nennleistung im Jahr 2020



Quelle: ifeu Graphik. Anmerkung: Für Stufe IIIA gilt ein Summengrenzwert (HC+NO_x) von 4,0 g/kWh

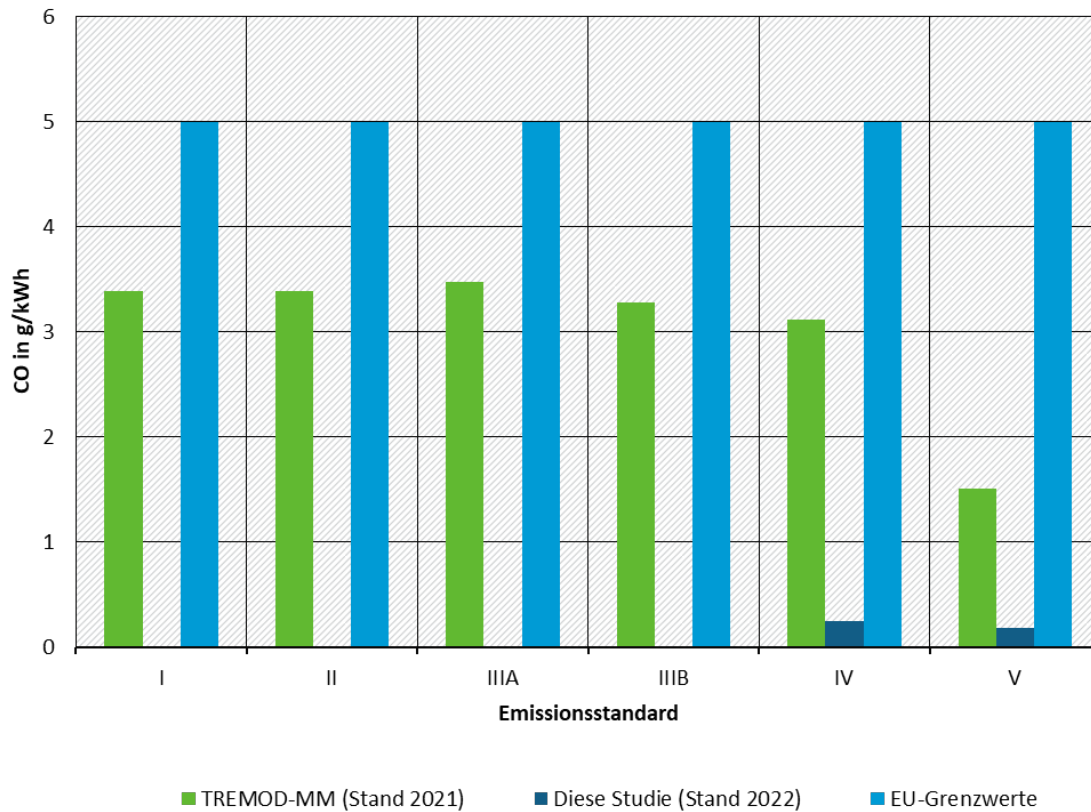
Die PM-Emissionsfaktoren in TREMOD-MM haben sich bis Stufe IIIA gegenüber Stufe I kaum geändert, sondern sind erst ab Stufe IIIB deutlich gesunken (Abbildung 38). Sie liegen damit ab Stufe IIIB nur geringfügig über den geltenden Emissionsgrenzwerten von 0,025 g/kWh für IIIB und IV bzw. 0,015 g/kWh für Stufe V. Mit der neuen Methode ergeben sich hierbei ähnliche Werte wie mit den Annahmen in TREMOD-MM. Die Emissionen für Stufe V liegen um ca. 95% niedriger als für Stufe I.

Abbildung 38: Mittlere PM-Emissionsfaktoren nach Abgasstufe für einen Raupenbagger mit Dieselmotor und 100 kW Nennleistung im Jahr 2020



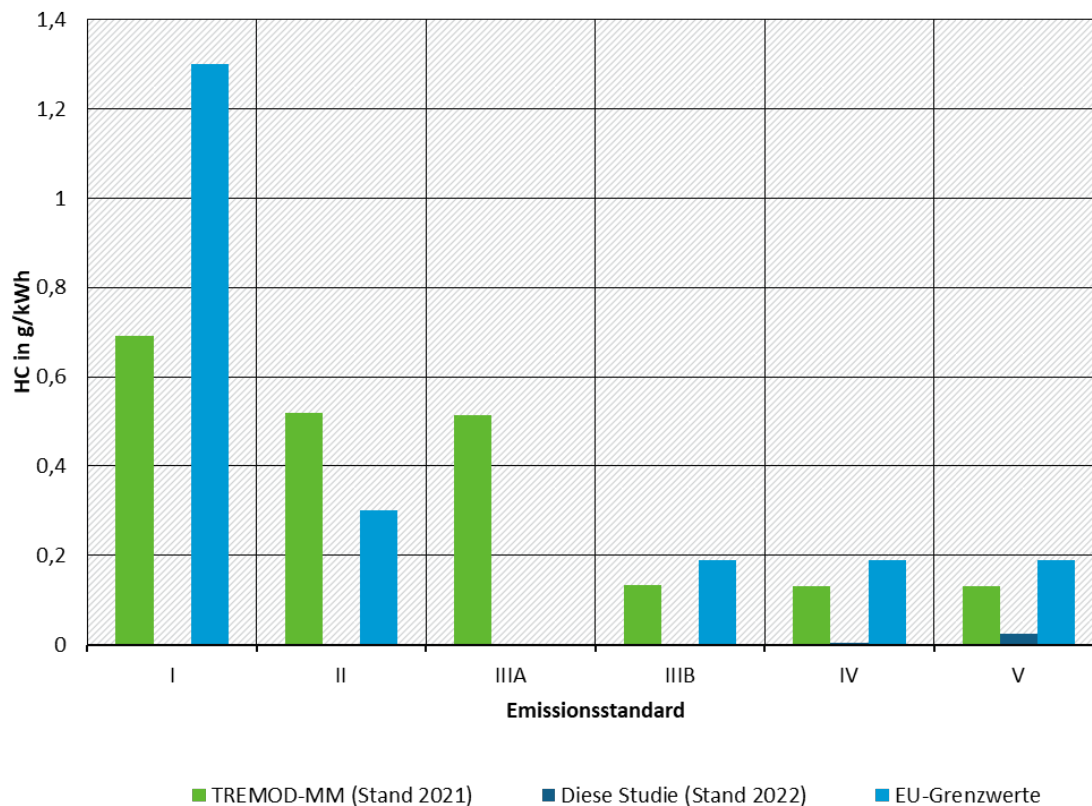
Der Emissionsgrenzwert für CO liegt seit Stufe I bis Stufe V unverändert bei 5 g/kWh. Die Realemissionen wurden dabei durchgehend niedriger angenommen (siehe Abbildung 39). Die CO-Emissionsfaktoren in TREMOD-MM wurden mangels aktuellerer Messdaten jedoch von Stufe IIIA bis Stufe V anhand der Grenzwerte und Daten für Stufe II fortgeschrieben und liegen damit deutlich höher als die mit der neuen Methode ermittelten Werte. Die neuen Ergebnisse legen nahe, dass für TREMOD-MM eine Anpassung der Emissionsfaktoren ab Stufe IV und eine Überprüfung für ältere Stufen notwendig ist.

Abbildung 39: Mittlere CO-Emissionsfaktoren nach Abgasstufe für einen Raupenbagger mit Dieselmotor und 100 kW Nennleistung im Jahr 2020



Die HC-Emissionen sind seit Stufe I ebenfalls deutlich gesunken und liegen nur bei Stufe II über dem Grenzwert. Die in dieser Studie ermittelten HC-Emissionsfaktoren für Stufe IV und V liegen auf einem sehr niedrigen Niveau bzw. waren kaum noch messbar. Wie bei CO liegen die Werte für TREMOD-MM ab Stufe IV deutlich höher, so dass auch hier eine Aktualisierung und Überprüfung für ältere Stufen sinnvoll wäre.

Abbildung 40: Mittlere HC-Emissionsfaktoren nach Abgasstufe für einen Raupenbagger mit Dieselmotor und 100 kW Nennleistung im Jahr 2020



Quelle: ifeu Graphik. Anmerkung: Für Stufe IIIA gilt ein Summengrenzwert (HC+NO_x) von 4,0 g/kWh. Dieser wird in der Graphik nicht dargestellt, da der NO_x-Anteil bei den Emissionsfaktoren gegenüber HC deutlich überwiegt.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die mittleren Emissionsfaktoren für alle regulierten Schadstoffe durch die Einführung neuer Abgasstufen gesunken sind. Höhere Emissionen im Realbetrieb gegenüber den Grenzwerten sind nur noch vereinzelt festzustellen, u.a. für NO_x bei Stufe IV. Die Einführung der Stufe V scheint anhand der verfügbaren Daten ein erfolgreicher Schritt zur Reduktion der Realemissionen gewesen zu sein.

Die neuen Messdaten und Emissionsfaktoren für Stufe IV und V bilden eine gute Grundlage, um auch das Modell TREMOD-MM zu aktualisieren. Da der Bestand der mobilen Maschinen jedoch auch noch viele Geräte mit Stufe IIIB oder älter umfasst, müssten diese Emissionsfaktoren bestenfalls auch auf Plausibilität geprüfte und ggf. aktualisiert werden, da sich zwischen den PEMS-Messungen der ausgewerteten Literatur (vgl. Kapitel 2.3.1.1) und TREMOD-MM teils deutliche Abweichungen zeigen.

2.6 Auswirkungen auf die Immissionsbelastung

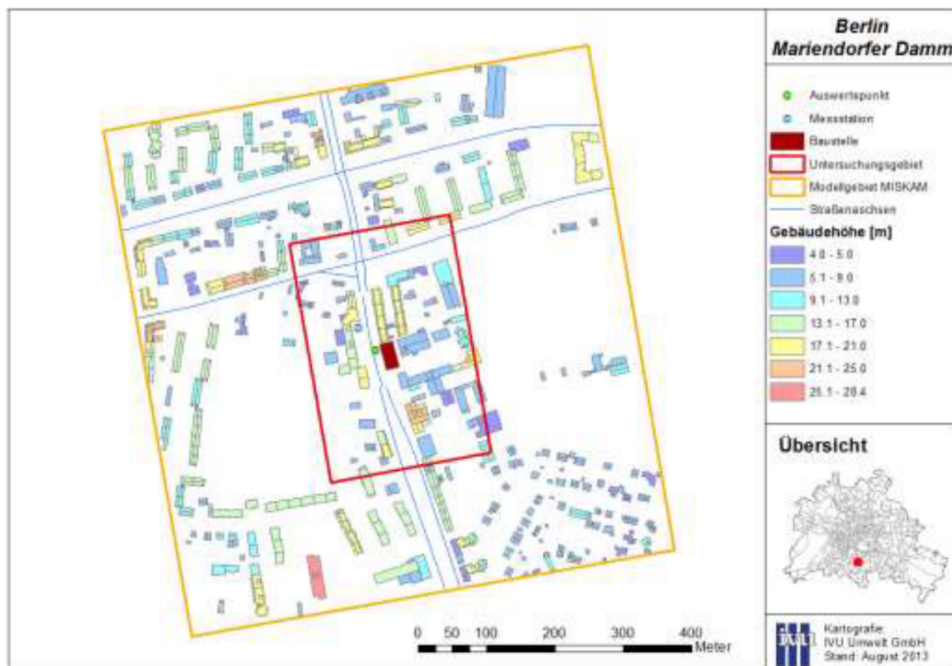
2.6.1 Definition des Untersuchungsgebietes und der Fallbeispiele

Um den möglichen Einfluss der Emissionen von Baumaschinen auf die lokale Schadstoffbelastung zu illustrieren wurden bisher erste Ausbreitungsberechnungen für einen realen Straßenabschnitt in Berlin, dem Mariendorfer Damm, durchgeführt. Dabei wurden die Schadstoffe NO_x, NO₂, PM₁₀ und PM_{2,5} mit MISKAM (Mikroskaliges Klima- und

Ausbreitungsmodell) modelliert⁴⁵. Ergebnis ist ein Vergleich der lokalen Schadstoffbelastung jeweils mit und ohne eine virtuelle Baustelle. Die Auswertung erfolgt mittels Rasterkarten der Verteilung der Luftschadstoffkonzentration im Einflussbereich der Baustelle sowie mit statistischen Auswertungen an einem definierten „Aufpunkt“ im Straßenraum sowie direkt in der Baustelle.

Da das Jahr 2020 aufgrund der starken Auswirkungen der Covid-Pandemie nicht als repräsentativ angesehen wird, beziehen sich die Rahmendaten der Berechnungen (Kfz-Emissionen, meteorologische Eingangsdaten und der Vorbelastung) auf das Jahr 2019.

Abbildung 41: Untersuchungsgebiet für das Fallbeispiel Baustelle „Mariendorfer Damm“



Die betrachtete Baustelle hat eine Fläche von 25x50 m. Es wurden insgesamt fünf Maschinen angenommen, welche im „Nullfall“ (2019), der näherungsweise der heute durchschnittlichen Flotte entspricht, je nach Leistungsklasse die Abgasstufe III bis IV haben. Der angenommene Maschinenpark entspricht dem früherer Ausbreitungsrechnungen in (Helms und Heidt 2014), so dass die Ergebnisse direkt vergleichbar sein sollten.

Tabelle 22: Maschinenpark und durchschnittliche tägliche Abgasemissionen der Beispielbaustelle „Mariendorfer Damm“ für das Jahr 2019

Maschinen-kategorie	Anzahl	Nenn-leistung in (kW)	Betriebs-stunden (h/d)	Last-faktor (-)	Emissions-standard	PM10/PM2,5 (g/d)	NOx (g/d)	davon NO2 (g/d)
Mobilbagger	1	90	4	0,35	IV	5	285	71
Raupenbagger	1	110	6	0,4	IV	11	598	149
Radlader	1	60	2	0,3	IV	1	81	20
Minibagger	1	25	2	0,4	IIIA	21	85	6

⁴⁵ Weitere Schadstoffe, z.B. CO und HC wurden bei der Immissionsbelastung nicht berücksichtigt.

Kompressor	1	50	2	0,5	IIIB	2	294	21
Alle	5	335	16			41	1.343	268

Als zweites Szenario wurde angenommen, dass der gleiche Maschinenpark nur aus Stufe V Maschinen besteht, welche die Grenzwerte im Realbetrieb genau einhalten (Konformitätsfaktor 1⁴⁶). Zwar gibt Die Partikel und Stickoxid Emissionen sinken damit um circa 80% gegenüber dem Nullfall. Umgekehrt müsste der mittlere Konformitätsfaktor für NO_x bei 5 liegen, damit die Emissionen der Stufe V Flotte denen des Nullfalls entsprechen. Angesichts der bisherigen Ergebnisse wäre ein solches Szenario nur. für einzelne Maschinen/Modelle oder extreme Lastprofile mit weniger effektiver NO_x-Abgasminderung möglich. Jedoch könnten auch Faktoren wie die Alterung oder Defekte der Abgasnachbehandlungen zu deutlichen Erhöhungen der Emissionsfaktoren führen als bisher angenommen (vgl. Kapitel 2.3.2.6). Mit den beiden untersuchten Szenarien dürften damit die Bandbreite zwischen einem konservativen und einem optimistischen Szenario weitgehend abgebildet werden. Es besteht jedoch weiterer Forschungsbedarf, um vor allem Szenarien mit deutlich höheren Emissionen für die Baustelle wirklich ausschließen zu können.

Zusätzlich wurden auch Nichtmotorische Partikelemissionen aus Abrieb und Aufwirbelung berücksichtigt. Hierbei wurden die Daten aus (Helms und Heidt 2014) übernommen. Mit 863 Gramm PM₁₀ und 86 Gramm PM_{2,5} liegen diese deutlich höher als die Abgasemissionen durch die Baumaschinen.

Eine sekundäre Aerosolbildung von PM₁₀ und PM_{2,5} im lokalen Straßenraum wird im Modellierungsgebiet von wenigen Quadratkilometer als vernachlässigbar angesehen und daher nicht modelliert. Die Ermittlung der Gesamtbelastung des photochemisch aktiven Stoffes NO₂ erfolgt hinsichtlich des Jahresmittelwerts der NO₂-Gesamtbelastung mit dem Romberg Ansatz (Romberg et al. 1996) mit den Parametern A=28.17, B=31.28 und C=0.21 (Schlamberger 2020).

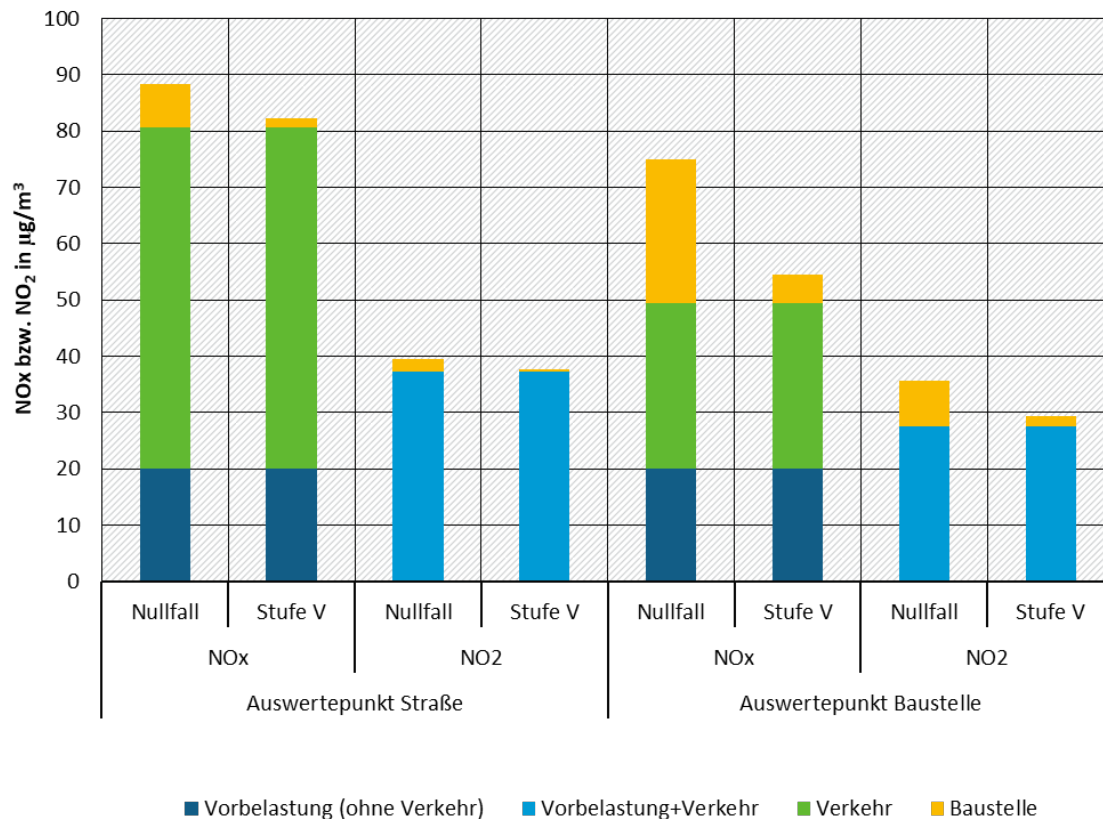
2.6.2 Auswirkungen auf die Luftbelastung

Für den Auswertepunkt am Mariendorfer Damm liegen die NO₂-Konzentrationen im Nullfall auch mit Baustelle noch knapp unter dem europäischen Grenzwert von 40 µg/m³ (39,4 µg/m³). Aufgrund der nur knappen Unterschreitung könnte ein größerer Maschinenpark hier ggf. zu einer Überschreitung des Jahresmittelwertes führen. Würden ausschließlich Maschinen der Stufe V eingesetzt, läge die Konzentration mit 37,7 µg/m³ etwa 4 % niedriger. Aufgrund des insgesamt bereits sehr geringen Emissionsniveaus ist auch bei Konformitätsfaktoren > 1 (siehe Abschnitt 2.5) von nur geringfügig höheren Konzentrationen auszugehen. Die NO₂-Konzentration liegt jedoch deutlich über der von der WHO vorgeschlagenen Jahresmittelwerten von 10 µg/m³. Die Baustellen alleine sind hier jedoch kaum für die hohe Überschreitung verantwortlich, ihr Zusatzbeitrag beträgt am Auswertepunkt an der Straße gerade mal 2,2 µg/m³ im Nullfall und 0,5 µg/m³ mit Stufe V. Im Auswertepunkt in der Baustelle liegt ihr Beitrag mit 8 µg/m³ im Nullfall und 1,8 µg/m³ mit Stufe V deutlich höher, die Zusatzbelastung durch die Straße geht jedoch etwas zurück. Die Gesamtbelastung fällt dadurch in der Baustelle sogar etwas niedriger aus.

⁴⁶ Im Kapitel 2.5.1 wurde zwar gezeigt, dass bei den durchschnittlichen Lastprofilen ausgewählter Maschinenkategorien die Konformitätsfaktoren für NO_x zwischen 0,9 (Raupenbagger) und 1,7 (Radlader) liegen. Je nach Maschine kann es jedoch erhebliche Unterschiede geben. Der hier angenommene Fall von CF=1 dient demnach zur vereinfachten Darstellung und ist eher als optimistisch-realistisch zu werten.

Bei der differenzierteren Betrachtung der NO_x-Konzentration zeigt sich im Auswertepunkt am Mariendorfer Damm im Nullfall eine Belastung von knapp 90 µg/m³ die im Wesentlichen auf den Straßenverkehr (69 %) zurückgeht. Der Beitrag der Baustelle beträgt nur knapp 8 µg/m³ (9 %) und sinkt bei Nutzung von ausschließlich Maschinen der Stufe V mit Konformitätsfaktor 1 auf 1,6 µg/m³ (2 % der Gesamtbelastung). Die Gesamtbelastung geht damit um 7 % zurück. Deutlicher ist der Rückgang am Auswertepunkt in der Baustelle. Hier geht die NO_x-Zusatzbelastung von 25,5 µg/m³ auf 5,2 µg/m³ zurück. Auch hier ist die Gesamtbelastung jedoch deutlich niedriger, da der Zusatzbeitrag des Verkehrs geringer ist.

Abbildung 42: NO_x /NO₂-Konzentration in µg/m³ an der fiktiven Baustelle Mariendorfer Damm (Stufe V mit Konformitätsfaktor 1)



Bei der PM₁₀/PM_{2,5}-Konzentration ist der Anteil der Vorbelastung im Auswertepunkt am Mariendorfer Damm mit 56 % (PM₁₀) und 75 % (PM_{2,5}) deutlich höher als bei NO_x. Zudem zeigt sich, dass sowohl aus dem Verkehr als auch seitens der Baumaschinen vor allem Abrieb und Aufwirbelung zur Zusatzbelastung beiträgt. Die Beiträge der Abgasemissionen zur Gesamtkonzentration sind dagegen minimal. Der Einsatz von Baumaschinen der Stufe V reduziert daher die Gesamtbelastung auch nur um 0,5 % bei PM₁₀ bzw. 1 % PM_{2,5}.

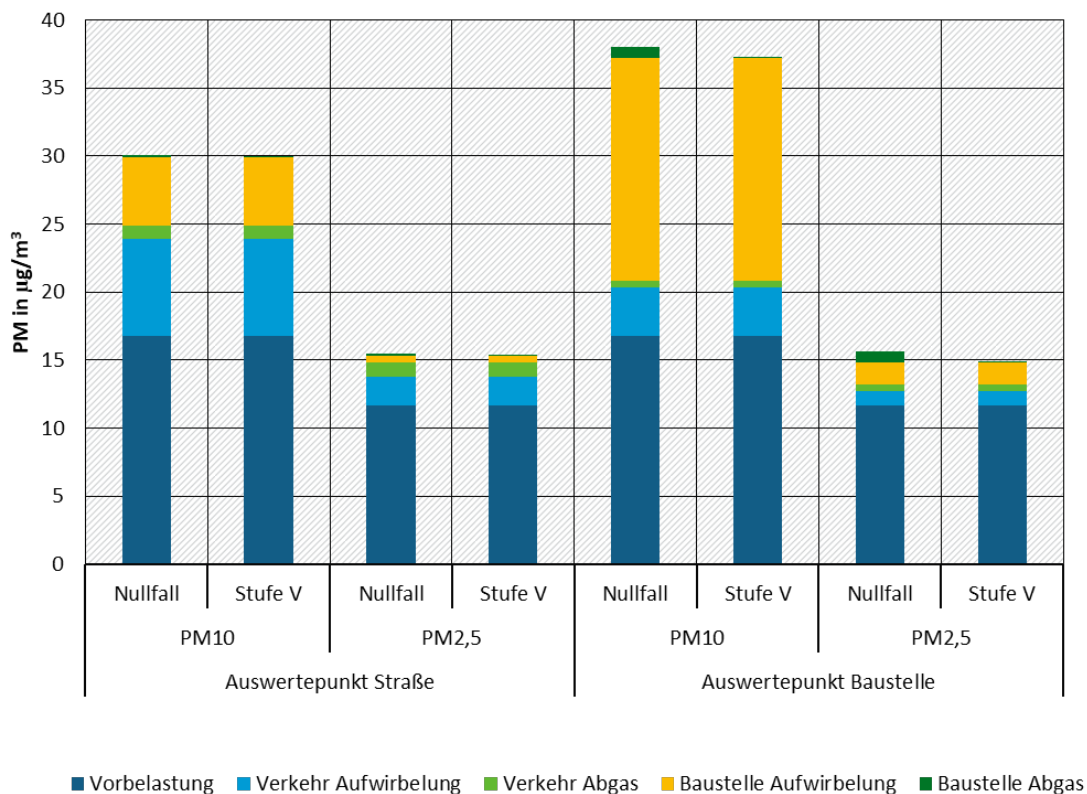
Im Auswertepunkt in der Baustelle liegt die Gesamtbelastung insbesondere bei PM₁₀ deutlich höher. Da hier vor allem seitens der Baustelle deutlich mehr Abrieb und Aufwirbelung entsteht. Bei PM_{2,5} ist der Unterschied dagegen eher gering. Insgesamt spielen auch hier die lokalen motorischen Emissionen gegenüber der Vorbelastung nur eine untergeordnete Rolle.

Die Gesamtbelastung im Jahresmittelwert liegt mit etwa 30 µg/m³ bei PM₁₀ am Mariendorfer Damm deutlich unter dem aktuellen EU-Grenzwert von 40 µg/m³. Am Auswertepunkt in der Baustelle wird der Grenzwert jedoch mit 38 µg/m³ im Nullfall nur noch geringfügig

unterschritten. Bei Einsatz von Maschinen der Stufe V liegt der Wert nur geringfügig darunter. Bei einer größeren Baustelle sind damit Grenzwertüberschreitungen im Jahresmittelwert direkt in der Baustelle durchaus vorstellbar, die aber eher auf die Aufwirbelung zurückgehen.

Der von der WHO vorgeschlagene Grenzwert von $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bei PM_{10} wird im Jahresmittelwert in allen Fällen deutlich überschritten, allein die Vorbelastung liegt schon geringfügig darüber. Die $\text{PM}_{2,5}$ Konzentration liegt bei etwa $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und damit etwa dreimal so hoch wie von der WHO vorgeschlagen ($5 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Auch hier wäre die Baustelle jedoch für die Überschreitung nicht maßgeblich, allein die Vorbelastung ist mehr als doppelt so hoch.

Abbildung 43: PM-Konzentration in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ an der fiktiven Baustelle Mariendorfer Damm (Stufe V mit Konformitätsfaktor 1)



Insbesondere für die Partikelmassekonzentrationen zeigt sich heute nur noch ein sehr geringer Einfluss der Abgasemissionen. Weitergehende abgasseitige Maßnahmen werden hier kaum nennenswert zur Reduktion lokaler Gesamtbelastungen beitragen können. Insbesondere die Vorbelastung sowie die lokalen Abrieb- und Aufwirbelungsemissionen sollten daher weiter untersucht werden und im Mittelpunkt weiterer Maßnahmen stehen. Die aktuell geltenden europäischen Grenzwerte werden hier jedoch weitgehend eingehalten.

Bei der NO_x -Konzentration führt zumindest der Einsatz von Maschinen der Stufe V noch zu einer relevanten Reduktion der potenziellen Zusatzbelastung durch Baustellen, der im Einzelfall auch entscheidend für die Einhaltung der europäischen Grenzwerte sein kann, da diese tlws. noch über- bzw. noch knapp unterschritten werden. Leichte Abweichungen im Emissionsverhalten der Stufe V Maschinen im Realbetrieb werden hier keine wesentliche Verschlechterung der Konzentration verursachen. Umgekehrt ist auch von einer weiteren Verschärfung der Emissionsgrenzwerte kein relevanter zusätzlicher Reduktionsbeitrag zu erwarten.

Das hier untersuchte Fallbeispiel stellt dabei jedoch nur eine kleine Baustelle mit nur wenigen Maschinen dar. Inwieweit eine Großbaustelle hier größeren Einfluss auf die lokale Konzentration haben kann, könnte in einem weiteren Fallbeispiel untersucht werden.

3 Stand und Weiterentwicklung der NRMM-Verordnung

3.1 Übersicht der existierenden Regelwerke und zuständigen Behörden

3.1.1 Übersicht über die Regelwerke

Die Emissionsregulierung für mobile Maschinen erfolgt primär auf europäischer Ebene in Form von Richtlinien und Verordnungen (siehe Tabelle 23). Die Einführung von Emissionsgrenzwerten für NRMM erfolgte erstmalig mit der EU-Richtlinie 97/68 und der sogenannten Stufe I ab dem Jahr 1999. Die Grenzwerte wurden dabei nach Motorenkategorien und Leistungsklassen (zunächst zwischen 37 kW und 560 kW) differenziert, wobei Maschinen mit niedrigerer Motorleistung in der Regel weniger strenge Emissionsanforderungen erfüllen mussten. Kurz darauf erfolgte ab 2002 mit der Stufe II eine Verschärfung insbesondere in Hinblick auf die NO_x- und Partikelmissionen und Erweiterung auf kleinere Leistungsklassen zwischen 18 kW und 37 kW. Reguliert wurden dabei CO, HC, NO_x und PM.

Tabelle 23: Unterschiede zwischen Verordnung und Richtlinie

Verordnung	Richtlinie
Eine Verordnung ist ein verbindlicher Rechtsakt, der direkt in allen Mitgliedsstaaten zur Geltung kommt.	Eine Richtlinie ist ein Rechtsakt, in dem ein von allen EU-Ländern zu erreichendes Ziel festgelegt wird. Es ist jedoch Sache der einzelnen Länder, eigene nationale Rechtsvorschriften zur Verwirklichung dieses Ziels zu erlassen.

Für Fremdzündungsmotoren unter 19 kW wurden ab Ende 2004 Grenzwerte für CO, HC und NO_x auf Basis der Richtlinie 2002/88 eingeführt, wobei zwischen handgehaltenen und nicht handgehaltenen Geräten unterschieden wurde. Des Weiteren erfolgt eine Differenzierung nach Hubraumklassen. Mit der Stufe II für Fremdzündungsmotoren wurde dann ein Summenwert für HC und NO_x eingeführt und dieser gleichzeitig gegenüber der Stufe I verschärft.

In der Richtlinie 2004/26 wurden dann ausschließlich für Selbstzündungsmotoren die Stufen III und IV spezifiziert. Die Stufe IIIA (ab 2006) führt dabei auch für Selbstzünder einen verschärften Summenwert für HC und NO_x ein. Die Stufe IIIB löst diesen ab 2011 dann wieder auf und verschärft zusätzlich insbesondere den Grenzwert für den Partikelaußstoß für Maschinen ab 37 kW. Ab Stufe IV ab 2014 wurde mit dem NRTC ein zusätzlicher Prüfzyklus eingeführt und der NO_x-Grenzwert für Maschinen von 56 bis 560 kW deutlich verschärft. Parallel wurden in der Richtlinie 2005/13 die Emissionsgrenzwerte für Zugmaschinen („Traktoren“) separiert und in den Richtlinien 2010/26 und 2010/22 die technischen Details der Anwendung spezifiziert.

Binnenschiffsmotoren wurden zunächst ab dem Jahr 2003 im Rahmen der Rheinschiffsuntersuchungsordnung (RheinSchUO) durch die Zentralkommission für die Rheinschiffahrt (ZKR) reguliert und später mit der Stufe IIIA in die EU-Regulierung aufgenommen. Weitere Richtlinien ergänzten und ersetzten die Emissionsgrenzwerte seither. Die aktuell gültige Stufe V ((EU) Nr. 2016/1628) stellt die bisher ambitionierteste und umfassendste Regulierung dar. Sie reguliert die Motoren für alle wesentlichen Gerätetypen, darunter Baumaschinen und Generatoren (Kategorie NRE), Binnenschiffe (Kategorie IWP/IWA) etc. Die Grenzwerte für Dieselmotoren orientieren sich dabei mit einigen Ausnahmen am Niveau der schweren Nutzfahrzeuge der Stufe Euro VI.

Tabelle 24: Übersicht über die bisherige NRMM-Emissionsgesetzgebung

EU Rechtsakt	Typ	Grenzwert	Bezug
97/68	Richtlinie	Stufe I und II	Alle Dieselmotoren
2002/88	Richtlinie	Stufe I und II	Ottomotoren und Motoren mit konstanter Drehzahl
2004/26	Richtlinie	Stufe III und IV	Alle Dieselmotoren außer Zugmaschinen
2005/13	Richtlinie	Stufe III und IV	Zugmaschinen
2016/1628	Verordnung	Stufe V	Alle Diesel-, Benzin- und Gasmotoren mit konstanter oder variabler Drehzahl

Die Stufen I bis IV wurden dabei in einer EU-Richtlinie festgelegt und mussten dann jeweils anschließend in nationales Recht überführt werden. Die Umsetzung in nationales Recht obliegt dabei den einzelnen EU-Ländern. In Deutschland erfolgte die Umsetzung im Rahmen 28. Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (28. BImSchV).

Die Stufe V wurde dagegen erstmalig mit der Verordnung 2016/1628 eingeführt, die direkt in allen EU-Ländern gilt und damit die Richtlinie 97/68 aufhebt. Mit der Stufe V werden für Selbstzündungsmotoren zur Typzulassung ab 2018 und zur Inverkehrbringung ab 2019 erstmals auch kleinere Leistungen unter 19 kW sowie Generatoren mit größeren Leistungen über 560 kW abdeckt. Es erfolgt also eine Gleichbehandlung von Motoren mit variabler und konstanter Drehzahl. Zusätzlich wird erstmalig eine Grenzwerteinhaltung für die Partikelanzahl (PN) verpflichtend. Zudem werden Anforderungen für leistungstärkere und mit größerem Hubraum ausgestatteten Otto-Motoren eingeführt. Die Emissionsgrenzwerte gelten dabei auch für Gasmotoren in allen Leistungsklassen. In TREMOD-MM betrifft dies vor allem die LPG-Stapler im Sektor Industrie/Sonstige.

Artikel 19 der Verordnung 2016/1628 legt auch erstmalig eine „Überwachung von Emissionen von Motoren im Betrieb“ fest, das so genannte In Service Monitoring (ISM). Die genauen Bedingungen für die Auswahl von Motoren, die Prüfverfahren und die Ergebnisberichterstattung werden in der delegierten Verordnung 2017/655 festgelegt. Ziel ist eine repräsentative Überprüfung von in Maschinen installierten Motoren anhand betriebsüblicher Lastzyklen. Geprüft werden alle Motoren zwischen 56 und 560 kW mit variabler Drehzahl hinsichtlich ihrer gasförmigen Schadstoffe (keine Partikel).

3.1.2 Verfahren und Behörden im Gesetzgebungsprozess und der Umsetzung

In der EU-Kommission ist die DG Wachstum (GROW) für die Emissionsgesetzgebung von NRMM zuständig. Wie im EU-Recht üblich, bedürfen gesetzliche Änderungen der Zustimmung von Rat und Parlament. Das untergesetzliche Regelwerk (delegierte Rechtsakte und Durchführungsrechtsakte) wird weitgehend durch die Kommission unter Einbindung von Mitgliedsstaaten und Stakeholdern erlassen. Beim Komitologieausschuss des Technical Committee Motor vehicles (TCMV) ist für den Erlass der Durchführungsbestimmungen von EU-Rechtsakten die explizite Zustimmung der Mitgliedsstaaten notwendig. Stakeholder, vor allem Mitgliedsstaaten und relevante Akteure aus der Industrie, z.B. Euromot oder AECC, werden im Wesentlichen über die „EU Expert Group on Emissions from Non-Road Mobile Machinery“ (GEME Gruppe) beteiligt. Die Aufgabe der Gruppe ist der Ausbau der Zusammenarbeit zwischen den Mitgliedstaaten und der Europäischen Kommission rund um Motoremissionen für mobile

Maschinen und Geräte. Neben den genannten international/europäischen Industrieverbänden ist für die deutsche Industrie dort auch der Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA) Mitglied. Für die Bundesregierung nimmt das federführende Bundesumweltministerium sowie das Umweltbundesamt regelmäßig teil.

Die Verordnung 2016/1628 legt dabei im Artikel 20 fest, dass die nationalen Behörden Daten und Informationen zur Typgenehmigungen (Erteilung, Erweiterung, Entzug, Ablehnung) mittels des Binnenmarkt-Informationssystems „Internal Market Information System, IMI“ gemäß Verordnung 1024/2012 austauschen. Dazu soll ein Modul des IMI erstellt werden, das speziell auf mobile Maschinen und Geräte zugeschnitten ist. Auch Hersteller und technische Dienste sollen das IMI für den Austausch von Daten und Informationen über Motoren in nicht für den Straßenverkehr bestimmten mobilen Maschinen und Geräten nutzen können.

Typgenehmigung

Während Binnenschiffsmotoren durch die Zentralstelle Schiffsuntersuchungskommission/Schiffseichamt zertifiziert werden, erfolgt die Typgenehmigung von Motoren für landbetriebene mobile Maschinen in Deutschland durch das Kraftfahrtbundesamt (KBA). Der Motorenhersteller beauftragt für Messungen zur Typprüfung eines von den durch die EU-Kommission nach Artikel 50 der Verordnung benannten technischen Dienste, wie z.B. den TÜV (Nord, Süd, Rheinland) oder die DEKRA (EC, 2018). Bei diesen technischen Diensten muss es sich um einen unabhängigen Dritten handeln, der mit dem Prozess der Konstruktion, Herstellung, Lieferung oder Wartung der Motoren nicht im Zusammenhang steht.

Das Kraftfahrt-Bundesamt überwacht dabei die ordnungsgemäße Erfüllung der den Technischen Diensten übertragenen Aufgaben und hat den nach Landesrecht zuständigen Behörden die für die Marktüberwachung erforderlichen Informationen auf Anfrage zu übermitteln (28. BImSchV §3). Ein wichtiges Kriterium ist dabei die Unabhängigkeit und Ausstattung der Institutionen. Der Antrag auf Typgenehmigung erfolgt dann seitens des Herstellers an das KBA. Dabei ist eine Beschreibungsmappe nach Artikel 21 sowie der Prüfbericht der technischen Dienste nach Artikel 24 und 25 vorzulegen. Seitens des KBA wird dann lediglich geprüft ob die Grenzwerte nach Prüfbericht eingehalten werden. Alle relevanten Informationen sollen abschließend zentral im IMI gespeichert werden; die Motorenhersteller sind dafür verantwortlich, die Konformität der Serienherstellung sicherzustellen.

In Service Monitoring (ISM)

Die technischen Randbedingungen des In Service Monitoring wurden bereits in Kapitel 2.3.1 ausführlich beschrieben. Regulativer Ausgangspunkt für die Entwicklung des ISM mobiler Maschinen war die In Service Conformity Regelung für schwere Nutzfahrzeuge, welche für NRMM angepasst werden sollte. Die Verantwortung für die Prüfung liegt beim Motorenhersteller der nach 2.6 der delegierten Verordnung 2017/655 zwischen zwei Prüfschemata wählen kann (für Kleinserien gibt es dabei abweichende Ausnahmen):

- ▶ Das Prüfschema auf der Grundlage der **Emissions-Dauerhaltbarkeitsperiode** (EDP) sieht für jeden Motorentyp bzw. jede Motorenfamilie die Prüfung von 9 Motoren mit einer Laufleistung unter 30% der EDP bis Ende 2022 und 9 Motoren mit einer Laufleistung von über 70% der EDP bis Ende 2024 vor. Die EDP liegt in der Größenklasse zwischen 56 und 560 kW bei 8.000 Stunden.
- ▶ Das Prüfschema auf der Grundlage eines Vierjahreszeitraums sieht die Prüfung von 9 Motoren pro Jahr für 4 aufeinanderfolgende Jahre vor. Der Startzeitpunkt der Prüfung ist

spätestens 18 Monate nach Produktionsstart des Motors. Nach Rückmeldung der Hersteller ist dies das bevorzugte Prüfschema.

Die Details des „Prüfbericht für die Überwachung im Betrieb“ werden in Anlage 8 der Verordnung 2017/655 detailliert spezifiziert. Dabei sind die Übereinstimmungsfaktoren einmal unter Berücksichtigung von Working Events und Non Working Events zu berichten (Nr. 9) und einmal ohne Einschränkungen (Nr. 10), was den Rohdaten entsprechen sollte. Im Rahmen des ISM sollte also auch eine Validierung des Algorithmus (Working Events, Non Working Events) möglich sein.

Während die Messungen zur Typprüfung allein durch die technischen Dienste erfolgen darf, können Messungen zum In-Service Monitoring direkt durch den Motorenhersteller veranlasst und auch direkt, also ohne Einbindung der technischen Dienste, an das KBA berichtet werden. Den Motorenherstellern obliegt die Aufgabe, die in Betrieb befindlichen Maschinen für die Prüfung zu beschaffen. Das Kraftfahrtbundesamt erstellt aus diesen einen Prüfbericht der Überwachung im Betrieb.

3.1.3 Erfahrungen mit dem Gesetzgebungsprozess und der Umsetzung

Im Rahmen von Interviews mit verschiedenen Stakeholdern wurde sich nach den Erfahrungen mit dem Gesetzgebungsprozess und der Umsetzung der Gesetzgebung erkundigt. Neben Industrievertretern (BMTI Baumaschinen, Leonhard Weiss und VDMA) wurden vor allem Prüf- und Messinstitutionen befragt (TÜV Nord, JRC, TNO, DLG, KBA und KIT). Themen der Interviews waren die Entwicklung der Verordnung 2016/1628, die Zuständigkeiten der Akteure, Erfahrungen mit der Umsetzung sowie offene Fragen/ Herausforderungen.

Insgesamt wurde die Entwicklung der Verordnung 2016/1628 als ein langer Prozess beschrieben, der umfangreiche Pilotstudien, z.B. von JRC einschloss. Die Stakeholder-Einbindung im Rahmen GEME Gruppe wurde überwiegend als positiv erlebt. Das Ergebnis sind nun anspruchsvolle umsetzbare Grenzwerte, die weltweit als Maßstab angesehen werden. Im Bereich unter 56 kW werden derzeit jedoch noch geringere Anforderungen gestellt, obwohl auch hier relevante Segmente vorliegen, wie z.B. Kühlaggregate, Generatoren, Pumpen. Die Umsetzung als Verordnung ist eine Vereinfachung gegenüber vorherigen Richtlinien, da es sich um europaweit einheitliche festverbindliche Regelungen handelt, statt Mindeststandards. Zusätzlich wurden die bisherigen Flexibilitätsregelungen durch eine Übergangsperiode von 24 Monaten - abgesehen von wenigen Ausnahmen - für alle Kategorien ersetzt.

Nichtsdestotrotz berichteten verschiedene Stakeholder über Schwierigkeiten mit der Umsetzung der Stufe V. Maschinenbetreiber meldeten Fälle, in denen es während der aktiven DPF-Regeneration bei Niedriglast zur Kraftstoffüberdosierung und dadurch Mischung von Kraftstoff und Schmieröl kam oder in denen Reste von Ad-Blue in den Systemleitungen verblieben, nach dem die Pumpe vorzeitig abgeschaltet wurde. Zudem ist die Relevanz von technischen Manipulationen von AGN bisher kaum erforscht. Für Hersteller von Binnenschiffsmotoren ergeben sich aufgrund der geringen Stückzahlen hohe Kosten für Entwicklung und Messungen.

Zum In Service Monitoring lagen den Stakeholdern insgesamt noch keine umfassenden Erfahrungen vor. Einige Hersteller berichteten, dass bereits Prüfungen durchgeführt und Ergebnisse ausgewertet wurden. Dem KBA lagen zum Zeitpunkt der letzten Anfrage im August 2020 allerdings noch keine Ergebnisse und damit auch keine Erfahrungen zur Umsetzung vor. Die geplante Überführung der ISM-Ergebnisse in die IMI-Datenbank wurde als wenig

nutzerfreundlich empfunden. Typgenehmigungsdokumente sind nicht direkt hochladbar, da z.B. händisches Eintragen, Splitten von pdf-Dateien nötig ist.

Bei den Motorenherstellern wird generell ein hoher Durchführungsaufwand konstatiert, der bei bestimmten Maschinen (bspw. Triebwagen) besonders hoch ist. Die Nutzung der Maschinen für das ISM wird zwar in der Regel im Kaufvertrag geregelt, können aber dennoch zu Beeinträchtigungen des Betriebs, z.B. in der Erntesaison bei Mähdreschern, führen. Eine Herausforderung ist auch die Gewährleistung der Repräsentativität, also die Abdeckung möglichst vieler Anwendungen in möglichst kurzer Zeit. Das breite Anwendungsspektrum mobiler Maschinen ist hier eine besondere Herausforderung für das In Service Monitoring. Zusätzlich ist auch die Wiederholbarkeit von Tests unter Realbedingungen eingeschränkt. Motorenhersteller führten auch an, dass eine bessere Kooperation mit den Maschinenhersteller beim ISM wünschenswert wäre, ohne allerdings auf konkrete Details einzugehen. Zukünftig werden die größten Herausforderungen seitens der Maschinen- und Motorenhersteller in einer Harmonisierung der Märkte weltweit sowie der Defossilisierung gesehen.

3.2 Beschreibung der aktuellen Messverfahren

Mobile Maschinen und Geräte der Emissionsstufe müssen am Motorprüfstand im NRTC, einem transienten Testzyklus, und dem NRSC, einem stationären Testzyklus, geprüft werden und bei diesen Tests Emissionen unter den jeweiligen Grenzwerten, welche für verschiedene Leistungsklassen und Anwendungsbereiche unterschiedlich sind, nachweisen. Zusätzlich muss bei gemäß EU-VO 2016/1628 das Emissionsverhalten im Rahmen eines In-Service-Monitorings (ISM) bei Tests im Realbetrieb aufgezeichnet werden. Als erstes wird auf die Prüfzyklen am Motorenprüfstand, den NRSC und NRTC, eingegangen. Diese beiden Zyklen sind bereits von früheren Emissionsstufen (NRSC ab Stufe I, NRTC ab Stufe III B) bekannt⁴⁷. Der Fokus des folgenden Kapitels liegt aber auf dem Messverfahren bei Messungen im Realbetrieb, sogenannten ISM-Tests. Die folgenden Details zum Messverfahren für NRE-Motoren mit 56 – 560 kW Nennleistung sind in [del. Verordnung (EU) 2017/655] beschrieben.

3.2.1 Tests am Motorenprüfstand - NRSC und NRTC

Die beiden Testzyklen NRSC und NRTC, die am Motorenprüfstand getestet werden, werden zur Prüfung des Emissionsverhaltens von Motoren für mobile Maschinen und Geräte genutzt. Der NRSC prüft das stationäre und der NRTC das transiente Emissionsverhalten.

Beim NRSC werden verschiedene Betriebspunkte, also Drehzahl- und Belastungsphasen, mit warmgelaufenem Motor geprüft, wobei die einzelnen Ergebnisse auch noch einen Gewichtungsfaktor bekommen. Jeder Punkt wird dabei zwischen 2 und 4 Minuten gehalten, damit sich stationäre Bedingungen einstellen. Die Betriebspunkte und die Gewichtungsfaktoren werden je nach Motorenkategorie spezifisch gewählt. Dadurch wird der typische Betriebsbereich der betreffenden Motorenklasse abgedeckt.

Der NRTC wurde aus typischen Betriebsbedingungen von allen relevanten Kategorien mobiler Maschinen und Geräte erstellt und spiegelt somit den durchschnittlichen Betrieb von NRMM wider. Der NRTC wird zuerst als Kaltstart gemessen, dann folgt eine 20-minütige Motorabstellphase und daraufhin wird der Test nochmal als Warmstart gefahren. Das finale Ergebnis ergibt sich aus einer Gewichtung von 10 % für den Kaltstartteil und 90 % für den Warmstartteil.

⁴⁷ Bei Stufe V wurde zusätzlich zu den Emissionskomponenten, die bereits bei Stufe III und IV getestet wurden, noch die Partikelanzahl für mobile Maschinen und Geräte der Leistungskategorien v-3, v-4, v-5 und v-6 reglementiert.

3.2.2 Allgemeine Anforderungen an die Überwachung im Betrieb

Bevor eine Maschine getestet wird, muss überprüft werden, ob die zu testende Maschine „über ein Wartungsheft verfügt, aus dem hervorgeht, dass der Motor ordnungsmäßig und nach den Herstellerempfehlungen gewartet wurde“. Zudem darf der Motor „keine Zeichen missbräuchlicher Nutzung (z. B. Überlastung oder Betrieb mit ungeeignetem Kraftstoff) oder anderer Veränderungen (z. B. unbefugte Eingriffe) aufweisen, durch die das Emissionsverhalten in Bezug auf gasförmige Schadstoffe beeinflusst werden könnte“. Ein weiterer Punkt ist die Verbindung zum Motorsteuergerät (ECU). Diese muss gewährleistet sein. Die Überprüfung des Wartungshefts und die Verbindung zur ECU sind leicht zu prüfen, aber zum derzeitigen Zeitpunkt ist nicht klar, wie kontrolliert werden kann, ob eine missbräuchliche Nutzung in der Vergangenheit vorlag. Es gibt zwar Sensoren für die Feststellung der Kraftstoffqualität und somit der Kontrolle einer Falschbetankung, aber ob und in welchem Umfang diese in modernen Baumaschinen verbaut sind, ist nicht bekannt.

3.2.3 Gültige Prüfbedingungen bei ISM-Tests

Der Betrieb von Maschinen muss von fachkundigem Personal durchgeführt werden. Das Bedienpersonal muss aber nicht identisch mit dem üblichen professionellen Bedienpersonal sein.

Die Prüfung muss während des gesamten (oder teilweisen) tatsächlichen Arbeitsbetriebs durchgeführt werden. „Der repräsentative Prüfarbeitszyklus wird vom Hersteller im Einvernehmen mit der Genehmigungsbehörde festgelegt“. Dieser Prüfzyklus muss den „tatsächlichen Arbeitsbetrieb der Mehrheit in Betrieb befindlicher Motoren der gewählten Kategorie(n)“ abdecken, wobei „keine übermäßigen Leerlaufzeiten eingeschlossen werden“ dürfen. Die Last muss so gewählt werden, dass die Mindestprüfdauer von fünfmal NRTC-Arbeit geleistet wird.

Die Umgebungsbedingungen müssen ebenso gewissen Richtlinien entsprechen. Der atmosphärische Druck muss mindesten 82,5 kPa betragen, während die Temperatur mindestens -7°C sein muss. Die Maximaltemperatur wird mit der Formel

$$T [K] = -0,4514 * (101,3 - pb) + 311$$

Wobei pb der atmosphärische Druck ist. Bei einem Luftdruck von 101,3 kPa (Normzustand) resultiert dies in einer Maximaltemperatur von 311 K bzw. ca. 38°C.

Alle Betriebsmittel, wie z.B. Kraftstoff, Schmieröl oder Reagen müssen den Spezifikationen des Herstellers bzw. im Fall von Kraftstoff der Verordnung (EU) 2017/654 entsprechen.

Alle dargestellten Prüfbedingungen sollten zu erfüllen sein. Bei der Testplanung sollte beachtet werden, dass extreme Winter- oder Sommerbedingungen zu ungünstigen Tests führen können.

3.2.4 Datenerfassungsverfahren

Durch einen „ein- oder mehrmaligen vorübergehenden Signalverlust darf das Datenaufkommen von maximal drei Minuten ausgeschlossen werden“.

Ein Test darf im Rahmen der kombinierten Datenerfassung aus maximal drei Einzeltests zusammengefasst werden, wobei jeder Testzyklus mindestens die Arbeit eines NRTC enthalten muss. Die einzelnen Zyklen werden dann chronologisch zu einem Test zusammengeführt. Zudem dürfen zwischen dem ersten und dem letzten Prüfzyklus maximal 72 Stunden liegen.

In (Emberger et al. 2021) wird gezeigt, dass eine ISM-Messung ohne Unterbrechung möglich ist. Die Messungen, die im Rahmen dieses Projekts durchgeführt wurden, zeigen aber, dass eine

Aufteilung in mehrere kürzere Tests aufgrund von möglichen Ausfällen der Messtechnik wegen der starken Belastung während des Betriebs mobiler Maschinen und Geräte im Realbetrieb ebenso sinnvoll ist. Somit kann schneller reagiert werden, wenn ein Ausfall vorliegt. Da diese Möglichkeit mit einer maximalen Anzahl von drei Einzelmessungen in der Verordnung enthalten ist, steht diesem Vorgehen somit nichts im Wege.

3.2.5 Prüfung der Datenkonsistenz

3.2.5.1 Konformität des ECU-Drehmomentsignals

Die Prüfung der Konformität des ECU-Drehmomentsignals wird mittels der Methode des maximalen Drehmoments durchgeführt. Bei dieser Methode muss bestätigt werden, dass ein Punkt auf der Bezugskurve des maximalen Drehmoments als Funktion der Motordrehzahl während der Überwachungsprüfung im Betrieb erreicht wird. Diese Prüfung soll vermutlich sicherstellen, dass das Drehmomentsignal, das von der Motorsteuerung übermittelt und für die Auswertung benötigt wird, korrekt ist.

Wenn dies nicht gelingt, hat der Hersteller die Möglichkeit diese Prüfung nach der Überwachungsprüfung noch einmal durchzuführen. Wenn eine Unmöglichkeit Prüfung des ECU-Drehmomentsignals während der Überwachungsprüfung nachgewiesen wird, dann wird die bereits erfolgte Prüfung während der EU-Typgenehmigung akzeptiert.

Die Berechnung der Motorarbeit erfolgt bei ISM-Tests auf Basis der ECU Leistung. Somit ist das Emissionsergebnis eines ISM Tests, das in g/kWh berechnet wird, und die darauf basierende Bewertung des Emissionsverhaltens von mobilen Maschinen und Geräten von der Genauigkeit des ECU Signals abhängig. Diskussionen mit TFZ und VDMA beim Workshop im Oktober 2021 zeigten, dass die oben beschriebene Methode zur Leistungsermittlung über die ECU bei NRMM nicht so präzise wie die Methode für schwere Nutzfahrzeuge Euro VI beschrieben ist. Bei schweren Nutzfahrzeugen muss das Leistungssignal innerhalb bestimmter Toleranzgrenzen liegen [Verordnung EU 582/2011]. Dies ist auch in (Huber et al. 2019) genauer beschrieben. Darin wird auch auf die Problematik beim Einsatz von alternativen Kraftstoffen, wie z.B. Biodiesel, hingewiesen.

3.2.5.2 Daten der Gasanalysatoren und der Massenstrommesseinrichtung

Dabei soll der Zusammenhang des aus der ECU ausgelesenen und des berechneten Kraftstoffmassendurchsatzes⁴⁸ mit einer linearen Regression verglichen werden. Die Steigung der Regressionsgeraden soll zwischen 0,9 und 1,1 liegen. Der Bestimmungskoeffizient R^2 soll mindestens 0,90 sein.

3.2.6 Prüfverfahren

Die Prüfung ist mittels PEMS durchzuführen. Das PEMS muss den Anforderungen für die Kalibrierungs- und Leistungsprüfung gemäß Anhang VI Abschnitt 8.1 der Delegierten Verordnung (EU) 2017/654 entsprechen. Mit dem PEMS müssen die Emissionskomponenten CO, HC und NO_x gemessen werden. Zudem ist CO₂ aufzuzeichnen um die MAW-Berechnung basierend auf der CO₂-Masse zu ermöglichen. Weitere aufzuzeichnende Messgrößen sind der

⁴⁸ Dies wird anhand des gemessenen Abgasmassenstroms und der Gaskonzentrationen nach dem Verfahren in Anhang VII Nummer 2.1.6.4 der Delegierten Verordnung (EU) 2017/654 über technische und allgemeine Anforderungen durchgeführt.

Abgasmassendurchsatz, die Abgastemperatur⁴⁹, Umgebungstemperatur, Umgebungsdruck, relative Luftfeuchte, Motordrehmoment, Motordrehzahl, Kraftstoffdurchsatz des Motors, Kühlmitteltemperatur, Ansauglufttemperatur, Breiten- und Längengrad des Maschinenstandorts. Die Signale können mittels Nutzung von Gas-Analysatoren, Massenstrommessgerät, GPS, der ECU oder Sensoren aufgezeichnet werden.

Die größte Herausforderung bei diesen Messungen mit PEMS ist die Montage der Gas- und der Massenstrommesseinrichtung an der Maschine. Zudem muss eine externe Stromversorgung⁵⁰, also Batterien oder in den meisten Fällen ein Stromgenerator, installiert werden. Der normale Betrieb der Maschine darf durch die Installation der Messeinrichtung nicht beeinflusst werden. Zudem darf sich der Abgasgegendruck durch die Montage der Abgasmassenstrommesseinrichtung direkt am Auspuff nicht über den vom Hersteller vorgegebenen Wert erhöhen. Sowohl vor als auch hinter der Messstelle für den Abgasmassenstrom müssen gerade Rohrabschnitte mit einer Mindestlänge von zwei Mal der Länge des Durchmessers angebracht werden.

Die Messungen im Rahmen dieses Projekts haben gezeigt, dass das Anbringen der Messeinrichtungen bei kleineren Maschinen nicht einfach bzw. ohne größere Vorbereitung oder Einschränkungen nicht möglich ist (siehe Kapitel 2.3.1.2.2.2 und 2.3.1.2.2.3). D.h. die zu messende Maschine muss in Vorfeld begutachtet werden und ggf. müssen spezielle Halterungen oder ähnliches für die Messgeräte gefertigt werden, damit diese auch sicher angebracht werden können. Da derzeit die Überwachungsprüfung nur an Maschinen der Leistungskategorie v-5 und v-6 durchgeführt werden müssen, sollte eine Messung bei den meisten Maschinen möglich sein. Falls in Zukunft aber auch Maschinen kleinerer Leistungskategorien getestet werden sollten, dann kann der Aufbau der Messeinrichtung an der Maschine sehr herausfordernd bzw. teilweise nicht möglich sein.

Beim Anbringen der Messeinrichtung ist darauf zu achten, dass diese keine zu starken Vibrationen ausgesetzt ist. Messungen an der TU Graz mit einem PET (Portable Emission accuracy Testbench) haben gezeigt, dass die Messergebnisse mancher PEMS durch Vibrationen vom Sollwert abweichen (Landl et al. 2018). Bei den Messungen im Rahmen dieses Projekts war ersichtlich, dass die Messeinrichtung teilweise starken Vibrationen ausgesetzt war. Manche PEMS Hersteller bieten deshalb spezielle Dämpfungs- bzw. Schutzvorrichtungen an, durch die das PEMS von den Schwingungen der Maschine entkoppelt wird (horiba o.J.). Wenn solche Dämpfungs- bzw. Schutzvorrichtungen gut abgestimmt sind, dann tragen diese vermutlich zu einer besseren Messqualität bei, jedenfalls leidet die Lebensdauer der Messgeräte mit einer Dämpfung weniger. In weiterer Folge sollte überlegt werden, welche Anforderungen durch den Einsatz im Bereich der mobilen Maschinen und Geräte genau an ein PEMS gestellt werden und wie die Eignung dafür geprüft werden kann⁵¹. Dazu wurden im Rahmen dieses Projekts die Beschleunigungen am PEMS bei Testmaschine 3 gemessen. Mit diesen Daten besteht die Möglichkeit ein repräsentatives Schwingungsprofil für mobile Maschinen zu erarbeiten und anhand dieses Profils die Messgeräte der verschiedenen Hersteller hinsichtlich ihrer Sensibilität auf Vibrationen mit einem PET zu prüfen. Dabei können Tests mit und ohne Dämpfungs- bzw. Schutzvorrichtung durchgeführt werden. Auf Basis dieser Forschungsergebnisse kann dann überlegt werden, ob

⁴⁹ Die Abgastemperatur, die zur Bestimmung der Dauer von Anlaufphasen nach längeren Nichtbetriebsereignissen genutzt wird, soll in einem Abstand von 30 cm vom Ausgang der Abgasnachbehandlung zur NO_x-Reduzierung gemessen werden.

⁵⁰ Falls der Leistungsbedarf der Messeinrichtung kleiner als 1 % der Motorhöchstleistung ist, darf die Leistung auch direkt von der Maschine bezogen werden.

⁵¹ Mit (DIN EN 17507 2020) gibt es bereits eine Norm für die Prüfung von PEMS für Straßenfahrzeuge, bei der die Systeme auch gerüttelt werden. Hier wäre zu prüfen, ob sich das Beschleunigungsprofil, mit dem PEMS dabei gerüttelt werden, mit den üblichen Beschleunigungen bei mobilen Maschinen decken.

eine spezielle Zertifizierung von PEMS Geräten hinsichtlich Vibrationsempfindlichkeit nötig ist und wie diese genau aussehen könnte. Dabei könnte z.B. eine maximale Schwingung spezifisch für die verschiedenen Messgeräte festgelegt werden und wenn diese während einer Prüfung überschritten wird⁵², dann ist die Messung ungültig.

Die Messeinrichtungen müssen vor der Messung bis zu den Sollwerten aufgeheizt und dann stabilisiert werden. Die Übertragungsleitung muss auf 190°C (+/- 10°C) aufgeheizt werden, um eine Verunreinigung der Probe durch kondensierte HC zu vermeiden. Zudem müssen die Nullpunkte der Gasanalysatoren sowie deren Linearität geprüft werden. Im Betrieb muss die Nulleinstellung der Gas-Analysatoren mindestens alle zwei Stunden geprüft werden. Spätestens 30 Minuten nach dem Test muss auch ein Nullabgleich und ein Test des Kalibriergasansprechens gemacht werden, um die Drift der Analysatoren zu überprüfen. Wenn im Betrieb kein Nullpunktgleich vorgenommen wurde, dann kann auf Basis dieser Ergebnisse eine Driftkorrektur der Messergebnisse durchgeführt werden. Wenn die Drift der gemessenen Konzentrationen aber höher als zwei Prozent ist, dann ist der Test ungültig. Nach Durchführen einer Driftkorrektur darf die Differenz zwischen dem korrigierten und nicht korrigierten bremspezifischen Emissionswert nicht höher als +/- 6 % sein. Die Durchführung der Vorbereitungen, der Tests und einer möglichen Driftkorrektur ist bei ausreichend geschultem Bedienpersonal problemlos möglich.

Wenn Fehlfunktionen des Motors durch eine klare visuelle Fehlermeldung über das On-Board-Diagnosesystem angezeigt werden, ist die Prüfung ungültig.

3.2.7 Auswertung der Messdaten

Die Auswertung der Daten und die Bedingungen für die Einordnung der Daten in Betriebs- und Nichtbetriebsereignisse sind bereits in Abschnitt 2.3.1.2.5 beschrieben.

Zusätzlich wird hier aber noch auf den Zeitabgleich hingewiesen. Es muss darauf geachtet werden, dass die verschiedenen Datenquellen (PEMS, Abgasmassenstrommesseinrichtung, ECU) zueinander zeitlich synchronisiert sind. „Der Zeitabgleich jeder Kategorie mit den anderen beiden Kategorien wird geprüft, indem der höchste Korrelationskoeffizient zwischen zwei Prüfparameterserien ermittelt wird. Alle Prüfparameter in einer Kategorie müssen verschoben werden, um den Korrelationsfaktor zu maximieren“. Dabei werden die CO₂-Konzentration (PEMS), der Abgasmassenstrom (Abgasmassenstrommesseinrichtung) und der Kraftstoffdurchsatz (ECU) als Prüfparameter verwendet.

3.2.8 Wiederholbarkeit von ISM-Tests

Falls Probleme oder Gründe für die Ungültigkeit von On-Board-Messungen erst nach der Prüfung erkannt werden, können die Tests wiederholt werden. Natürlich kann dabei nicht genau das gleiche Profil nachgefahren werden, da dieses bei Realemissionsmessungen jedes Mal anders ist. Trotzdem kann durch die gleiche Tätigkeit ein ähnliches Lastprofil dargestellt werden. Zudem sollte darauf geachtet werden, dass die Umgebungsbedingungen vergleichbar sind. Die Messung des Realbetriebs von mobile Maschinen und Geräte ist unter diesen Bedingungen somit prinzipiell wiederholbar und das Emissionsverhalten auch mit vorigen Tests vergleichbar.

Eine andere Möglichkeit wäre die Wiederholung von ISM-Tests auf dem Rollen- bzw. Zapfwellenprüfstand. Dabei könnten exakt die gleichen Lastprofile unter Laborbedingungen nachgefahren werden. Dabei kann man zusätzliche Messtechnik verwenden, die bei On-Board

⁵² Messung mittels Beschleunigungssensor am PEMS

Tests nicht installiert werden konnte.

Zudem ergibt sich daraus die Möglichkeit, dass auch mobile Maschinen und Geräte, bei denen aufgrund fehlender Optionen zur Montage des PEMS an der Maschine keine Tests im Realbetrieb möglich sind, gemessen werden können. Um dies zu realisieren braucht man Einsatzprofile von verschiedenen Maschinentypen und kann diese dann entsprechend der Testmaschine verwenden. Dabei ist aber der Nachteil, dass man bei der Verwendung von standardisierten Lastprofilen für die einzelnen Maschinenkategorien aber wieder das Problem hat, dass die Lastprofile bekannt sein werden und somit kein zufälliges Lastprofil zum Einsatz kommt.

3.3 Vorschläge für eine Weiterentwicklung der NRMM-Verordnung

Die Stufe V ist in vielen Aspekten bereits sehr erfolgreich. Sie setzt sehr hohe Standards im internationalen Vergleich und führt zu einer deutlichen Reduktion der Schadstoffemissionen mobiler Maschinen im Realbetrieb. Der Entstehungsprozess wurde von den interviewten Stakeholdern überwiegend positiv empfunden.

Die Grenzwerte und die einzuhaltenden Prüfbedingungen sind jedoch nicht für alle Maschinenkategorien gleichermaßen ambitioniert. Während Motoren der Leistungsklasse ab 56 bis 560 kW ähnlich ambitionierte Grenzwerte wie Euro VI LKW erfüllen, erfordert die Stufe V bei Motoren unterhalb 56 kW kaum eine Reduktion der NO_x-Emissionen gegenüber den Stufen III/IV und ist daher eher mit Euro IV-Lkw oder älteren vergleichbar. Dieselmotoren für mobile Maschinen <19 kW und für Binnenschiffe <300 kW haben zusätzlich erhöhte PM-Grenzwerte und keinen PN-Grenzwert. Die Grenzwerte für Benzinmotoren entsprechen insgesamt weitgehend noch denen Stufe II (auch für CO und HC) und liegen damit weit hinter den Anforderungen moderner Pkw oder motorisierter Zweiräder zurück (vgl. Abbildung 44). Zudem schließt die aktuelle Gesetzgebung relevante Betriebssituationen aus der Bewertung des realen Emissionsverhaltens.

Abbildung 44: Übersicht Emissionsgrenzwerte der Stufe V NRMM-Kategorien im Vergleich zu Straßenfahrzeugen

Dieselmotoren			Benzinmotoren		
Partikel	PM 0,025 – 0,4 g/kWh kein PN-Limit	Erhöhte Partikel-Grenzwerte	Erhöhte Partikel- und NO _x -Grenzwerte	Erhöhte CO- und HC+NO _x -Grenzwerte:	CO 603-805 g/kWh Kohlenmonoxid
	PM ≤ 0,015 g/kWh PN ≤ 1x10 ¹² #/kWh	Niedrige Grenzwerte:	Erhöhte NO _x -Grenzwerte:	Erhöhte NO _x +HC-Grenzwerte:	CO 4,4 g/kWh
		Generatoren (NRG) >560 kW ≈ PM Euro IV Lkw	Maschinen (NRE) < 19 kW ≈ Euro II Lkw Maschinen (NRE) >560 kW ≈ Euro IV Lkw Binnenschiffe (IWP/ IWA) 19 - 300 kW ≈ Euro III Lkw Lokomotiven (RLL) ≈ Euro IV Lkw	Kleingeräte (NRSh) ≈ Euro 2 Mopeds* Geräte bis 30 kW (NRS) ≈ Euro 1 Pkw*	
		Maschinen 56-560 kW (NRE) ≈ Euro VI Lkw	Maschinen 19-56 kW (NRE) ≈ NO _x Euro IV Lkw Binnenschiffe > 300 kW (IWP/IWA) ≈ NO _x Euro V Lkw Triebwagen (RLR) ≈ NO _x Euro V Lkw	Geräte 30-56 kW (NRS) ≈ Euro 2 Pkw*	
		NO _x +HC <1 g/kWh	NO _x +HC 1,8-7,5 g/kWh	NO _x +HC 2,7-72 g/kWh	
Stickoxide + Kohlenwasserstoffe					

Quelle: eigene Graphik. Anmerkungen: Dargestellte Piktogramme dienen als Beispiele und erheben keinen Anspruch auf Repräsentativität für alle Kategorien. *Der Vergleich bei Benzinmotoren bezieht sich auf NO_x+HC, die CO-Grenzwerte bei NRMM sind zum Teil deutlich höher als bei Pkw und Mopeds

Deshalb werden im folgenden Kapitel verschiedene Vorschläge diskutiert, wie die NRMM Gesetzgebung sinnvoll weiterentwickelt werden kann, um die Realemissionen von mobilen Maschinen und Geräten in Richtung eines niedrigen Niveaus zu bringen. Die Vorschläge zielen daher vor allem darauf ab, die Reduktion der Emissionen auch im Realbetrieb sicherzustellen (Abschnitt 3.3.1). Zusätzlich werden auch noch andere Weiterentwicklungsmöglichkeiten, u.a. bezüglich schärferer Grenzwerte, weiterer Komponenten und der allgemeinen Rahmenbedingungen aufgezeigt (Abschnitt 3.3.2).

3.3.1 Sicherstellung und weitere Reduktion der Emissionen im Realbetrieb

Die vorliegende Studie zeigt, dass die Realemissionen von modernen mobilen Maschinen und Geräten im Arbeitsbetrieb auf geringem Niveau liegen. Es wird aber auch gezeigt, dass die Emissionen in manchen Betriebssituationen, die durch die gesetzlichen Tests nur unzureichend geprüft werden, (erlaubterweise) über den gültigen Stufe V Grenzwerten liegen. Dieses Kapitel beschäftigt sich daher mit Vorschlägen zur Sicherstellung der Reduktion der Emissionen im gesamten realen Betrieb.

3.3.1.1 Emissionsgrenzwerte weiter absenken

Stufe-V Motoren mit weniger als 56 kW und > 560 kW dürfen aktuell im NRSC noch ein Vielfaches der NO_x Emissionen (in g/kWh) ausstoßen als größere Motoren, Motoren < 19 kW und > 560 kW haben zudem noch keinen PN-Grenzwert. Zusätzlich haben sich die Grenzwerte für CO und HC bei Otto-Motoren auch durch Stufe V kaum reduziert. In der Vergangenheit schien dies gerechtfertigt, da vor allem die Geräte im Bereich mit 56-560 kW zu den NO_x – und PM-Emissionen der gesamten mobilen Maschinen beigetragen haben. Punktuell und für bestimmte Anwender (Stichwort Arbeitsschutz) können jedoch dadurch trotzdem durch diese Leistungsklassen besonders hohe Konzentrationen und damit überproportionale Gesundheitsschädigungen auftreten. Auch wird vor allem der Beitrag kleinerer Motoren an den Schadstoffemissionen durch die starke Minderung bei größeren Klassen zukünftig proportional zunehmen. Nach den gegenwärtigen Berechnungen in TREMOD-MM werden Motoren <56 kW im Jahr 2030 mehr als 50 % der PM- und NO_x-Emissionen über 80 % der CO- und HC-Emissionen aller mobilen Maschinen verursachen, aber nur etwa ein Viertel der CO₂-Emissionen. Im Zuge sich verschärfender Luftqualitätsanforderungen (siehe WHO-Empfehlungen in 2.6.2) könnten daher auch strengere Emissionsgrenzwerte bei kleineren mobilen Maschinen nötig sein, sofern diese dann auch technisch eingehalten werden können.

Bei einer Anpassung der Grenzwerte sollten nicht nur die Potenziale zur Emissionsreduktion bei Verbrennungsmotoren, sondern auch alternative Antriebe berücksichtigt werden. Dafür bedarf es allerdings noch weiterer Forschung insbesondere zur Machbarkeit und den Kosten sog. „Null-Emissions-Antriebe“ im NRMM-Bereich.

Beim Fachworkshop innerhalb des Projekt am 11. Oktober 2023 wurde vom Schweizer Bundesamt für Umwelt (BAFU) angemerkt, dass bei Motoren >560 kW insbesondere Generatoren ein PN-Grenzwert sinnvoll wäre.

3.3.1.2 Einführung von Tests im Realbetrieb für Leistungsklassen < 56 kW

Aus Sicht der Überwachung des Realemissionsverhaltens ist eine Ausweitung der ISM-Tests auf kleinere Motoren sinnvoll. Ein erster noch unveröffentlichter Gesetzesentwurf sieht nach derzeitigem Stand ISM-Tests daher auch bereits für praktisch alle Maschinenkategorien und

Leistungsgruppen vor. Herausforderungen gibt es aber bei der messtechnischen Umsetzbarkeit von ISM Tests an solch kleinen Maschinen.

Überwachung des Realemissionsverhaltens für Leistungsklassen < 56 kW

Die Zertifizierung von Motoren für den Einsatz in mobilen Maschinen und Geräten der Emissionsstufe V erfordert Emissionstests am Motorenprüfstand. Dabei muss mindestens ein Motor je Motorenfamilie getestet werden. Diese Tests am Motorenprüfstand sind für alle Motorenklassen und Leistungsgruppen vorgeschrieben. Es gelten teilweise aber unterschiedliche Grenzwerte für die verschiedenen Kategorien, wie bereits in Kapitel 2.2 dargestellt.

Zusätzlich müssen für Motoren zwischen 56 und 560 kW (also die Klassen NRE⁵³-v-5⁵⁴ und NRE-v-6⁵⁵) die Emissionen im Realbetrieb mit sogenannten In-Service Monitoring (ISM) Tests an den Gesetzgeber berichtet werden.

Bei allen NRE Motoren größerer oder geringerer Leistung und auch allen anderen Motorenklassen⁵⁶ sind nach derzeitigem Stand der Stufe V Regulierung nur die Tests am Motorenprüfstand erforderlich. Details dazu sind wiederum in Kapitel 2.2 zu finden. Das bedeutet, dass diese Maschinen nur auf bekannten Testzyklen geprüft werden und keine ISM-Tests mit der damit einhergehenden breiten Abdeckung von möglichen Betriebspunkten durchgeführt werden. Dies ermöglicht eine gezielte Abstimmung des Emissionsverhaltens des Motors auf die zu testenden Betriebspunkte am Motorenprüfstand. Falls diese Betriebspunkte sehr unterschiedlich zu denen im realen Betrieb einer speziellen Maschinenkategorie sind, kann eine Zyklusoptimierung der Betriebsstrategien zu ggü. den Messungen am Prüfstand höheren Realemissionen führen. Da der NRTC einen sehr großen Kennfeldbereich abdeckt, sind die Möglichkeiten für das sogenannte „Cycle-beating“ jedoch begrenzt.

Zudem ist es möglich, dass der Motor bei den Tests am Motorenprüfstand eine andere Betriebsstrategie bzw. -software als im realen Einsatz verwendet. Es wäre möglich, dass am Motorenprüfstand eine emissionsoptimale Betriebsstrategie zur Einhaltung der Emissionsgrenzwerte verwendet wird, welche aber zu einem höheren Kraftstoffverbrauch oder Nachteilen hinsichtlich der Dauerhaltbarkeit führen kann. Um diese Nachteile nicht an den Nutzer weiterzugeben, könnte bei den final in die Maschinen eingebauten Motoren softwaregesteuert eine andere Betriebsstrategie zum Einsatz kommen, die dann zu höheren Realemissionen führt. Ein derartiges Vorgehen ist jedoch nicht zulässig und sollte daher verhindert werden. Dazu kann mithilfe von ISM-Tests geprüft werden, ob das Emissionsverhalten am Prüfstand dem im Realbetrieb entspricht. Dabei werden ausgewählte Maschinen, die sich im realen Einsatz befinden, getestet. Somit hat der Hersteller dabei keine Möglichkeit, spezielle Softwaremaßnahmen zur Umstellung des realen Emissionsverhaltens vorzunehmen.

⁵³ Die Klasse NRE (Non-Road Engines) umfasst Motoren für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte, die dazu bestimmt und dafür geeignet sind, sich – auf der Straße oder auf andere Weise – zu bewegen oder bewegt zu werden, z.B. Bagger oder Radlader. [Regulation (EU) 2016/1628]

⁵⁴ Die Gruppe v-5 umfasst Maschinen mit einer Leistung zwischen 56 und 130 kW.

⁵⁵ Die Gruppe v-6 umfasst Maschinen mit einer Leistung zwischen 130 und 560 kW.

⁵⁶ NRG (Bezugsleistung > 560 kW, ausschließlich Einsatz in Generatorsätzen), NRSh (Bezugsleistung < 19 kW, handgehaltene Fremdzündungsmotoren), NRS (Bezugsleistung < 56 kW, Fremdzündungsmotoren außerhalb der Klasse NRSh), IWA (Bezugsleistung > 19 kW, Hilfsmotoren für Binnenschiffe), RLL (Antrieb von Lokomotiven), RLR (Antrieb von Triebwagen und anstelle von Stufe V-Motoren der Klasse RLL), SMB (Fremdzündungsmotoren für den Einsatz in Motorschlitten), ATS (Fremdzündungsmotoren für ATV und SbS)

Aus Sicht der Überwachung des Realemissionsverhaltens kann also eine Ausweitung der ISM-Tests auf weitere Motorengruppen empfohlen werden. Der Entwurf für die Einführung von ISM-Tests für alle Maschinenkategorien sollte daher unterstützt und kritisch begleitet werden. Bei tiefgreifenden Änderungen des Entwurfs sollte eine aktive Diskussion mit der EU-Kommission gesucht werden.

Messtechnische Umsetzbarkeit von Realtests an kleinen Maschinen

Die vorliegende Studie zeigt, dass die Messung der Realemissionen von mobilen Maschinen und Geräten mittels PEMS teilweise sehr herausfordernd ist. Mobile Maschinen und Geräte sind oftmals unterschiedlich aufgebaut. Da sie verschiedene Einsatzzwecke abdecken, bietet sich somit nicht die Möglichkeit eines ähnlich standardisierten PEMS Aufbaus, wie z.B. beim PKW mit der Montage auf der Anhängerkupplung oder im Kofferraum. Gerade sehr kleine Maschinen, z.B. Minibagger mit einer Leistung von weniger als 19 kW, stellen kaum Raum für die Montage der Messtechnik zur Verfügung (Vermeulen et al. 2021). In so einem Fall ist die Montage eines PEMS laut Verordnung 2017/655 ohne Einschränkung des realen Betriebs teilweise nicht möglich.

Die Emissionen müssen jedoch nicht für jeden Motor, sondern nur bei einer bestimmten Anzahl an Motoren einer Motorenfamilie berichtet werden, unabhängig davon in welcher Maschine diese verbaut sind. Daher kann bei der Maschinenauswahl die Möglichkeit zur Montage der Messeinrichtung berücksichtigt werden. Es ist aber nicht ausgeschlossen, dass eine Motorenfamilie nur in einem Maschinentyp verbaut ist an dem eine PEMS-Messung nicht oder nur eingeschränkt möglich ist. In diesem Fall gibt es keine Ausweichmöglichkeit und es muss klar festgelegt werden, wie der Hersteller diesen Ausnahmefall zu belegen hat. Eine mögliche Lösung wäre, dann einen zusätzlichen maschinenspezifischen Test am Motorenprüfstand durchzuführen. Dazu müsste für die verschiedenen Maschinenkategorien jeweils ein standardisierter Test auf Basis des typischen Einsatzprofils der jeweiligen Maschine erarbeitet werden. Dadurch ist die zufällige Betriebspunktwahl jedoch nicht mehr gegeben.

Ein weiterer Ansatzpunkt ist die Fortentwicklung der Messtechnik. Fortschritte bei der Reduzierung des Bauraums von PEMS würde die Installation der Messeinrichtung speziell auf kleineren Maschinen erleichtern und Messungen an einer größeren Anzahl von verschiedenen Maschinentypen und -größen ermöglichen. Derzeit stehen für kleine Maschinen sogenannte SEMS (Smart Emission Measurement System) zur Verfügung. Der große Vorteil von SEMS ist der geringe Bauraum. SEMS nutzen aber keine Analysatoren wie PEMS, sondern Sensoren, wodurch die Messgenauigkeit im Vergleich zu einem PEMS eingeschränkt ist. Dazu muss hier auch erwähnt werden, dass es zwar Sensoren zur Messung von NO_x oder NH₃ gibt, die auch zur Standardmesstechnik in Maschinen gehören und zur Regelung des Systems Abgasnachbehandlung genutzt werden, aber dass Sensoren für andere Komponenten, wie z.B. Partikelanzahl, derzeit erst entwickelt werden. Zudem haben SEMS auch kein EFM (Exhaust Flow Meter) zur Messung des Abgasmassenstroms. Dieser wird über eine CAN-Bus Verbindung mit der Motorsteuerung ausgelesen. Da das Massenstromsignal somit nicht unabhängig gemessen wird, sollte die Genauigkeit dieses Signals bei den Messungen am Motorenprüfstand validiert werden⁵⁷. Die höhere Messunsicherheit von SEMS könnte durch einen Aufschlag auf die zulässigen Test-Limits berücksichtigt werden.

Der Entwurf für die Ausweitung der ISM Tests auf weitere Motorengruppen beinhaltet derzeit noch keine Vorschläge für das Vorgehen, wenn an gewissen Maschinen, z.B. bei kleinen Maschinen durch beschränkten Bauraum, kein PEMS ohne Einschränkung des Realbetriebs montiert werden kann. Somit ist nicht klar, wie die Erfassung der Realemissionen mittels ISM-Tests für alle Maschinenkategorien aus messtechnischer Sicht umgesetzt werden soll. Deshalb

⁵⁷ Details zu einem solchen System unter <http://www.ecm-co.com/product.asp?mpems>

sollten die dargestellten Schwierigkeiten hinsichtlich der Emissionsmessung an kleinen mobilen Maschinen sowie die gezeigten Lösungsvorschläge der EU Kommission mitgeteilt werden. Die Methode des zusätzlichen Zyklusses am Motorenprüfstand ist dabei deutlich einfacher durchzuführen und daher der Messung mittels SEMS vorzuziehen. Die Aufnahme von SEMS zu den zugelassenen Messsystemen erfordert erst weitere Forschungsarbeiten zur Feststellung der Messgenauigkeit. Für die Erarbeitung der anwendungsspezifischen Testzyklen müssen hingegen nur reale Arbeitsprofile aufgezeichnet und analysiert werden. Aus diesen könnten zufällige Testzykluskombinationen für Motortests kombiniert werden.

3.3.1.3 Weiterentwicklung der ISM Prüf- und Messvorschriften

Kapitel 2 der vorliegenden Studie zeigt, dass die derzeitigen ISM Vorschriften für eine gute Überwachung des Emissionsverhaltens im Arbeitsbetrieb bei betriebswarmer Abgasnachbehandlung sorgen. Es wird aber auch dargestellt, dass die ISM Testrandbedingungen sogenannte Nichtbetriebsereignisse, wie z.B. längere Leerlaufphasen oder Kaltstarts, aus der Auswertung ausschließen. Diese Nichtbetriebsereignisse führen aufgrund kühlerer Abgasnachbehandlung zu merklich höheren Realemissionen als die Betriebsereignisse. Wenn diese Ereignisse von ISM Tests ausgeschlossen bleiben, fehlt die Motivation, die Emissionen in diesen Betriebszuständen weiter zu senken oder Betriebsstrategien zur Vermeidung dieser Ergebnisse, z.B. Start-Stopp-Automatik, zu implementieren. Kapitel 2.5.1 zeigt, dass die Nichtbetriebsereignisse für etwa die Hälfte der gesamten Realemissionen von Stufe V Maschinen verantwortlich sind. Deshalb wird im Folgenden dargelegt, wie die aktuelle Stufe V Gesetzgebung ausgeweitet werden könnte, damit die Realemissionen in diesen Nichtbetriebsereignissen ebenso effektiv wie bei Betriebsereignissen reduziert werden. Zudem werden Möglichkeiten betrachtet, wie die Durchführung von Tests vereinfacht werden könnte und wie mit DPF-Regenerationen während der Tests umgegangen werden soll.

Ausweitung des ISM auf Nichtbetriebsereignisse

Die Emissionsgesetzgebung für mobile Maschinen und Geräte (Stufe V) ist an die von schweren Nutzfahrzeugen (Euro VI) angelehnt. Es wurden z.B. sowohl bei Stufe V für NRMM als auch bei Euro VI für SNF Tests im Realbetrieb eingeführt. Bei schweren Nutzfahrzeugen waren die Randbedingungen für gültige Tests der Realemissionen anfangs noch sehr eingeschränkt. Bei Einführung von Euro VI (Stufe A) wurde eine Beladung zwischen 50 und 60 % verlangt, gültige Mittelungsfenster mussten eine Durchschnittsleistung von mindestens 20 % der Nennleistung haben und Kaltstartphasen wurden bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Obwohl mit Euro VI auch niedrigere Grenzwerte und neue Testzyklen eingeführt wurden, stellten die Tests im realen Betrieb aufgrund der zufällig gewählten Betriebspunkte trotz dieser Einschränkungen eine sehr große Herausforderung bei der Fahrzeug- und Motorenentwicklung dar und sorgten somit für ein besseres Emissionsniveau in den relevantesten Betriebssituationen. Daraufhin folgte eine stufenweise Ausweitung der möglichen Betriebsbedingungen mit Euro VI C. Dabei wurde die mögliche Beladung auf 10 bis 100 % erweitert. Um den Herstellern genügend Entwicklungszeit für diese neue Herausforderung durch die größere Bandbreite an möglichen Betriebspunkte zu geben, wurde Euro VI C drei Jahre nach Euro VI A eingeführt. In ähnlichem zeitlichen Abstand folgten Euro VI D, wobei die Mindestleistung für gültige Mittelungsfenster auf 10 % herabgesetzt wurde, und die aktuelle Stufe Euro VI E, welche in die Auswertung der Realtests nun auch die Kaltstartphase und die Partikelemissionen integrierte.

Die Tests im realen Betrieb bei mobilen Maschinen und Geräten haben ebenso gewisse Einschränkungen. Gültige ISM-Tests beschränken sich auf die Kontrolle der Emissionen im

Arbeitsbetrieb unter Last. Die sogenannten Nichtbetriebsereignisse⁵⁸ werden also nicht berücksichtigt. Dies ermöglicht erhöhte Emissionen während dieser Phasen. Da diese Nichtbetriebsereignisse für das gesamte Emissionsverhalten relevant sind, ist bei NRMM die gleiche eine stufenweise Ausweitung der Testbedingungen wie bei SNF empfehlenswert. Dieses Vorgehen würde Herstellern in Anlehnung an die Gesetzgebung für schwere Nutzfahrzeuge genügend Vorlaufzeit für die Entwicklungsarbeit gewähren. Mögliche Schritte sind:

- ▶ die Herabsetzung der Mindestleistung für Mittelungsfenster,
- ▶ die Kürzung der Anlaufphasen nach längeren Nichtbetriebsereignissen,
- ▶ die Aufnahme der Kaltstartemissionen,
- ▶ die Begrenzung der Emissionen in längeren Leerlaufphasen und
- ▶ das Messen von Partikelemissionen im Realbetrieb⁵⁹.

Für einen konkreten Vorschlag zur Umsetzung der verschiedenen Möglichkeiten muss aber erst weitere Forschungsarbeit geleistet werden. Dabei sollten auch die Auswirkungen auf die Realemissionen betrachtet und geeignete Maßnahmen inklusive einer Abfolge der verschiedenen Einführungszeiträume im Detail ausgearbeitet werden. Im Rahmen dieses Prozesses sollte Kontakt mit den Herstellern aufgenommen werden, um sowohl die technischen Möglichkeiten als auch die benötigten Entwicklungszeiten beachten zu können. Neben den Vorteilen sollte bei dieser Entwicklung auch beachtet werden, dass Verbesserungen im Schadstoffemissionsverhalten oftmals mit zusätzlichem Kraftstoffverbrauch, z.B. für das Heizen von Katalysatoren, und somit höheren CO₂-Emissionen einhergehen. Dies sollte in die Überlegungen natürlich miteinfließen.

Verkürzung der Tests

Die derzeitige Verordnung schreibt vor, dass die Prüfdauer unter Einbeziehung von ausschließlich gültigen Daten lang genug sein muss, dass die vollbrachte Arbeit zwischen fünf- und siebenmal der NRTC-Arbeit liegt. Wenn man die durchschnittliche Leistung des NRTC, der das reale Betriebsverhalten widerspiegelt, zugrunde legt, bedeutet das, dass nur die Betriebsereignisse eines Tests in etwa zwei Stunden lang sein werden. Inkl. der Nichtbetriebsereignisse kann es somit in manchen Fällen zu einer gesamten Testdauer von mehr als drei Stunden kommen. Um den zeitlichen Aufwand für solche Tests zu reduzieren und andere Probleme, wie z.B. Drift von Analysatoren oder der Energieversorgung der Messgeräte⁶⁰, zu umgehen, sollte untersucht werden, welchen Einfluss die Testdauer auf das Emissionsergebnis hat. Bei den Messungen, die im Rahmen dieser Studie erfasst wurden, ist das Emissionsverhalten innerhalb der Betriebsereignisse nur von der Last, nicht aber von der Testdauer bei betriebswarmem Motor abhängig. Diese ersten Ergebnisse deuten also darauf hin, dass auch

⁵⁸ Nichtbetriebsereignisse sind Kaltstartphasen, Mittelungsfenster mit einer Durchschnittsleistung von weniger als 20 % und längere Leerlaufphasen.

⁵⁹ Die Messung von Partikelemissionen ist inzwischen für PKW, leichte und schwere Nutzfahrzeuge Vorschrift und wird somit auch bereits messtechnisch umgesetzt. Bei den Messungen im Rahmen dieser Studie wurden die Partikelemissionen im Realbetrieb auch mitgemessen. Die PN-Messung im Realbetrieb ist also möglich, zumindest bei größeren Maschinen. Da ein PEMS mit PN-Messsystem größer ist, ist die messtechnische Umsetzung bei kleineren Maschinen aber herausfordernder.

⁶⁰ Wenn die Energieversorgung über ein Stromaggregat geregelt wird, dann ist dieser Punkt irrelevant. Wenn aber Batterien genutzt werden, dann ist dies sehr wohl ein wichtiges Thema.

kürzere Testdauern für die Bewertung des realen Emissionsverhaltens geeignet sind. Dies sollte aber noch durch eine größere Anzahl an Messdaten bestätigt werden.

Die Testdauer wurde im Entwurf für die Erweiterung der ISM Richtlinien für weitere Maschinengruppen zumindest für kleine Maschinen bereits angepasst. Ein gültiger Test muss zwischen drei- und fünfmal die NRTC-Arbeit enthalten. Bei den größeren Maschinen bleibt die Testdauer aber bei fünf- bis siebenmal NRTC-Arbeit. Für einen konkreten Vorschlag einer sinnvollen Testdauer sind jedoch weitere Daten notwendig. Zum jetzigen Stand kann aber bereits festgestellt werden, dass die Testdauer mindestens zweimal die Arbeit des NRTC erfüllen sollte. Dies kann durch den Auswertealgorithmus des EMROAD Tools mit Bildung von Mittelungsfenstern mit der Mindestarbeit von einmal NRTC erklärt werden. Ab dieser Testdauer werden genügend Fenster gebildet, damit dieser Ansatz sinnvoll funktioniert. Bei kürzeren Testdauern werden nur wenige Mittelungsfenster gebildet und das reduziert die Aussagekraft der EMROAD Auswertung. Zudem ist eine Begrenzung der maximalen Testdauer aufgrund der zeitlichen Unabhängigkeit der Emissionen nicht zwingend nötig.

Berücksichtigung von Regenerationsphasen des DPF

Moderne Dieselmotoren nutzen zur Reduktion von Partikelemissionen Dieselpartikelfilter. Diese funktionieren zwar sehr effektiv, müssen aber ab einer gewissen Filterbeladung aufgrund eines zu hohen Gegendrucks für die einwandfreie Funktion des Motors regeneriert werden. Solche Regenerationsphasen führen meist zu höheren Partikelemissionen, können aber auch die gasförmigen Schadstoffemissionen signifikant erhöhen (siehe Kapitel 2.3.1.2.4, Maschine 1). In der derzeitigen Fassung der ISM-Gesetzgebung sind Partikelfilterregenerationen nicht explizit erwähnt und solche Regenerationsevents müssen daher als Teil von gültigen Betriebsbedingungen angesehen werden. Das bedeutet, dass auch unter solchen Bedingungen die Emissionsgrenzwerte eingehalten werden müssen. Da die Tests von den Herstellern durchgeführt werden, kann davon ausgegangen werden, dass keine Messungen bei abzusehender DPF-Regeneration gemacht werden.

Für die Bewertung der Emissionsergebnisse bei Tests am Motorenprüfstand gibt es hingegen Anpassungsfaktoren für die Berücksichtigung der Häufigkeit und der Auswirkungen von DPF-Regenerationsevents. Laut Verordnung 2017/654 wird das finale Testergebnis in Abhängigkeit der Häufigkeit solcher Regenerationsevents und der damit verbundenen Emissionserhöhung bei Messungen ohne Regeneration erhöht und beim Auftreten eines Regenerationsevents entsprechend gesenkt, um den Durchschnitt abzubilden. Bei Motoren mit kontinuierlicher Regenerierung wird das Testergebnis nicht verändert. Welche Form der Regeneration der zu testende Motor verwendet, ist vom Hersteller anzugeben.

Da im Rahmen dieser Studie nicht genügend Messdaten⁶¹ für eine ähnliche Erfassung der Auswirkungen von Regenerationsevents auf die Realemissionen während ISM-Tests zur Verfügung stehen, könnten die Faktoren vom Motorenprüfstand auch bei ISM-Tests im Fall eines Regenerationsevents für die Anpassung der Emissionen verwendet werden. Bei der SNF-Gesetzgebung, an welche die NRMM-Gesetzgebung angelehnt ist, führen solche DPF-Regenerationen jedoch zu ungültigen Tests im Realbetrieb. Ein vergleichbares Verfahren ist bei einer möglichen Überführung der ISM- in eine ISC-Gesetzgebung wahrscheinlich vorzuziehen.

⁶¹ Bei der Stufe IV Maschine (Maschine 1) konnten zwei DPF-Regenerationen aufgezeichnet werden. Für Stufe V Maschinen sind keine Messdaten während eines Regenerationsevents vorhanden, aber Informationen zur Häufigkeit von Regenerationsevents vorhanden. Laut Maschinenführer von Maschine 2 kommt eine Regeneration in etwa alle 250 Betriebsstunden vor. Die Literaturrecherche erbrachte auch keine weiteren Daten zu DPF-Regenerationsevents von mobilen Maschinen und Geräten. Die vorhandenen Daten reichen somit nicht aus, um ein Flottenmodell zu bedaten.

Definition des Prüfarbeitszyklus

In Kapitel 3.2.3 ist beschrieben, dass der repräsentative Prüfarbeitszyklus vom Hersteller im Einvernehmen mit der Genehmigungsbehörde festgelegt wird. Dieser Prüfzyklus muss den „tatsächlichen Arbeitsbetrieb der Mehrheit in Betrieb befindlicher Motoren der gewählten Kategorie(n)“ abdecken, wobei „keine übermäßigen Leerlaufzeiten eingeschlossen werden.“ Die Gesetzgebung beschreibt nicht genau, wie festgestellt wird, ob der Prüfzyklus tatsächlich die Mehrheit in Betrieb befindlicher Motoren darstellt. Dafür sollten klare Regeln mit Bezug auf die Verkaufszahlen der Maschinen mit dem entsprechenden Motor festgelegt werden, damit final auch wirklich repräsentative Maschinen ausgewählt werden. Eine noch genauere Methode würde zusätzlich zu den Stückzahlen noch die typischen Betriebsstunden pro Jahr miteinbeziehen, weil somit die Auswirkung auf die Gesamtemissionen berücksichtigt wird. Die Betriebsstunden könnten im besten Fall über Telematikdaten erfasst werden, was aber zusätzlichen Aufwand mit sich bringen würde.

3.3.1.4 Weiterentwicklung vom ISM zum ISC

Derzeit müssen die Emissionen von mobilen Maschinen und Geräten, die bei sogenannten in-service monitoring Test erfasst werden, an die Kommission berichtet werden. Dadurch kann der Gesetzgeber prüfen, wie sich die Emissionen von mobilen Maschinen und Geräten innerhalb der Randbedingungen solcher ISM-Tests verhalten und diese mit den gültigen Grenzwerten vergleichen. Auf Basis dieser Werte kann beurteilt werden, wie sich die entsprechende Regulierung auf die Realemissionen unter ISM-Bedingungen auswirkt und ob weitere Maßnahmen zur Emissionsreduktion ergriffen werden müssen.

Bei ISM kann es aber natürlich sein, dass die Realemissionen höher als die Grenzwerte oder die erwarteten Realemissionen liegen. In diesem Fall können natürlich Reduktionsmaßnahmen gesetzt werden, die aber erst nach einer gewissen Einführungszeit für neue Maschinen greifen. Eine naheliegende Maßnahme wäre die Überführung der in-service monitoring in eine in-service conformity Gesetzgebung. Bei ISC-Tests dienen die Grenzwerte nicht mehr nur zum Vergleich, sondern müssen tatsächlich eingehalten werden. Das bedeutet, ab der Einführung von ISC-Tests müssen alle neuen Maschinen auch im Realbetrieb unter den entsprechenden Grenzwerten liegen.

Diese Maßnahmen haben aber keinen Einfluss auf die Emissionen von bereits im Betrieb befindlichen Maschinen. Diese sind bereits zugelassen und die zutreffenden Regulierungen können im Nachhinein nicht mehr geändert werden. D.h. deren Emissionsverhalten wird durch eine nachträgliche Einführung einer ISC-Regulierung nicht mehr beeinflusst. Zur Absicherung der Grenzwerte für neue Motorentypen wird empfohlen, die ISM- in eine ISC-Gesetzgebung zu überführen, sobald ausreichend Erfahrung mit ISM besteht. Das sollte in naher Zukunft der Fall sein, da ja die Hersteller die On-Bord Tests vorerst selber durchführen bzw. beauftragen und damit kritische Testsituationen kennen dürften.

Da die PEMS Messgeräte nicht die gleichen Genauigkeitsanforderungen wie die Prüfstandsmesstechnik erfüllen können, werden die Grenzwerte bei ISC-Tests zumindest bei PKW und SNF mit einem Konformitätsfaktor (mindestens 1) multipliziert. Die daraus folgende Erhöhung der Grenzwerte deckt den Worst case Fall für den Maschinenhersteller ab. Für die Bestimmung solcher Konformitätsfaktoren für die jeweiligen Emissionskomponenten sollte weitere Forschungsarbeit zum Thema Messgenauigkeit von PEMS mit Fokus auf NRMM-Anwendungen durchgeführt werden. Eine einfachere Methode wäre die Übernahme der Konformitätsfaktoren von PKW und SNF. Dazu sollten aber zumindest die auftretenden Belastungen, z.B. Vibrationen am Messgerät, verglichen werden, damit diese Methode abgesichert ist.

3.3.1.5 Überwachung der Emissionen über die gesamte Lebensdauer

Mobile Maschinen und Geräte sind teilweise mehrere Jahrzehnte im Einsatz bis diese durch neue ersetzt werden. Solch lange Einsatzzeiten können die Funktionalität von Motoren und vor allem von Komponenten der Abgasnachbehandlung beeinflussen. Wie bereits in Kapitel 2.3.2.6.2 beschrieben können chemische, thermische und mechanische Alterungseffekte zu einer verringerten Effizienz der Abgasnachbehandlung und somit zu erhöhten Emissionen führen. Aber auch andere Komponenten, wie z.B. der Ölabscheider zur Reduktion der Kurbelgehäuseentlüftungsemissionen, können ebenso von Alterungseffekten betroffen sein. Aus diesem Grund ist es wichtig, das Emissionsverhalten von mobilen Maschinen und Geräten bis zu ihrem Lebensende zu überwachen und im Falle von Fehlfunktionen einzelner Komponenten, die merkliche Emissionserhöhungen mit sich bringen, einzugreifen, um die Emissionen auch nach vielen Jahren Einsatzzeit noch auf geringem Niveau halten zu können. Nicht zuletzt muss auch möglichen Manipulationen der Abgasminderungstechnik vorgebeugt werden, welche bei SNF bereits beobachtet wurden (vgl. Kap. 2.3.2.6.3) und bei NRMM daher auch zu erwarten sind. Dies wurde auch von verschiedenen Teilnehmern des Fachgesprächs im Rahmen der Studie als dringender Handlungsbedarf hervorgehoben.

In Verordnung 2017/654 ist beschrieben, dass mobile Maschinen und Geräte der Kategorien NRE und NRG mit einem Diagnosesystem für die Erkennung von Funktionsstörungen des NO_x-Emissionsminderungssystems und des Partikelnachbehandlungssystems ausgestattet sein müssen.

Im Falle von NO_x müssen die Systeme die Reagensqualität, den Reagensfüllstand, die Reagenszufuhr und die Funktionalität von AGR-Ventil und dem Diagnosesystem selbst überwachen. Alternativ können die Hersteller mithilfe von NO_x-Sonden die NO_x-Emissionen direkt überwachen. Der NO_x-Wert darf dabei den geltenden NO_x-Grenzwert multipliziert mit 2,25 oder den geltenden NO_x-Grenzwert plus 1,5 g/kWh nicht überschreiten, je nachdem welcher niedriger ist.

Bei Partikelemissionen muss erkannt werden, ob das Partikelnachbehandlungssystem entfernt wurde oder nicht mehr richtig funktioniert. Zudem muss auch hier die Funktion des Überwachungssystems selbst geprüft werden.

Im Falle einer Fehlfunktion bei einem der Systeme wird der Maschinenführer auf den Fehler hingewiesen. Falls dieser innerhalb von 36 Betriebsstunden nicht behoben wird, folgt eine schwache Aufforderung mit einer Drehmomentreduktion um 25 %. Wenn nach insgesamt 100 Betriebsstunden nach erstmaliger Mitteilung immer noch keine Reparatur vorgenommen wurde, reduziert sich das Drehmoment um 50 %.

Der Referenzzyklus zur Überprüfung, ob alle Systeme richtig funktionieren, ist der NRTC.

In Anlehnung an die SNF Gesetzgebung Euro VI wäre es im Fall von mobilen Maschinen und Geräten sinnvoll, eine Art OBD-Limit einzuführen. Bisher ist zwar vorgegeben, dass die einzelnen Systeme hinsichtlich ihrer Funktion überwacht werden müssen, aber die Emissionen selbst werden nur im Fall der Montage eines speziellen NO_x-Sensors überwacht. Bei der Systemüberwachung ist nicht genau festgelegt, was passiert, wenn einzelne Systeme nur noch bedingt funktionsfähig sind, dies aber bereits Einfluss auf das Emissionsverhalten hat. Im besten Fall sollte eine Emissionsgrenze festgelegt werden, ab der der Betreiber auf die erhöhten Emissionen hingewiesen wird. Dieses Limit sollte ein Threshold-Wert sein, der im betriebswarmem Zustand im normalen Arbeitsbetrieb über einen längeren Zeitraum, z.B. 20 Minuten (gleich wie beim NRTC) um eine ausreichend lange Zeit für die Erstellung eines repräsentativen Durchschnittswerts zu gewährleisten, nicht überschritten werden darf. Dieser Wert sollte im Vergleich zum Grenzwert höher liegen, da im Realbetrieb Unsicherheiten hinsichtlich der tatsächlichen Betriebssituation und z.B. Sensorungenauigkeiten miteinbezogen

werden müssen⁶². Dies sollte, unabhängig von Fehlern einzelner Komponenten, nur anhand des Emissionsverhaltens der gesamten Maschine erfolgen. Der Betreiber muss dann den oder die Fehler beheben, damit die Emissionen wieder unter dem Limit sind, um die Maschine wieder einwandfrei betreiben zu können. Für die genaue Ausarbeitung einer solchen Regulierung und dem Erzielen einer sinnvollen Lösung sollte mit den Herstellern zusammengearbeitet werden. Dabei sollten auch speziell die Möglichkeiten von Kleinserienherstellern berücksichtigt werden. Darüber hinaus ist es auch wichtig, dass die Systeme zur Erfassung erhöhter Emissionen regelmäßig auf ihre Funktionalität geprüft werden. Dies könnte im Rahmen der für Deutschland gültigen Prüfung der Unfallverhütungsvorschriften (UVV), die in regelmäßigen Abständen durchgeführt werden muss, erfolgen. Für die Erarbeitung einer genauen Methode zur Prüfung der Funktion der Überwachungseinrichtungen, ist weitere Forschungsarbeit zu diesem Thema erforderlich.

Zudem müssen laut Regulierung 2016/1628 Motoren der Kategorie NRE mit variabler Drehzahl, diese umfasst Bau- und Landmaschinen, bei einer Nennleistung von weniger als 19 kW eine Dauerhaltbarkeit von 3000 h, bei einer Nennleistung zwischen 19 und 37 kW eine Dauerhaltbarkeit von 5000 h und bei einer größeren Nennleistung eine Dauerhaltbarkeit von 8000 h aufweisen. Für die jeweiligen Dauerhaltbarkeitsperioden werden Verschlechterungsfaktoren⁶³ am Motorenprüfstand gemessen und diese werden auf die Testergebnisse der Motoren im Neuzustand⁶⁴ aufgeschlagen. Für eine erfolgreiche Zertifizierung des Motors müssen die finalen Ergebnisse dann immer noch unter den entsprechenden Grenzwerten liegen. Diese Methode ist in Verordnung 2017/654 genau beschrieben. Eine Dauerhaltbarkeitsperiode von 8000 h entspricht bei einem beispielhaften Einsatz von 250 Arbeitstagen zu je 8 h im Jahr einer Dauer von 4 Jahren. Anhand der bestehenden Flotte sollte untersucht werden, wie lange mobile Maschinen und Geräte derzeit im Betrieb sind und wie viele Betriebsstunden diese im Alter im Vergleich zum Neuzustand noch leisten. Daraus kann dann abgeleitet werden, ob die festgelegten Dauerhaltbarkeitsperioden hinsichtlich der gesamten Flottenemissionen ausreichend lang sind oder ob diesbezüglich eine Ausweitung gefordert werden sollte.

Zusätzlich zu diesen Prüfungen muss das Emissionsverhalten noch bei den ISM-Tests nachgewiesen werden. Bei diesen müssen mehrere Motoren einer Motorenfamilie sowohl mit weniger als 30 % als mit mehr als 70 % der gesamten Dauerhaltbarkeitsperiode getestet werden. Damit wird das Emissionsverhalten im Realbetrieb über die gesamte Lebensdauer innerhalb der Dauerhaltbarkeitsperiode an den Gesetzgeber übermittelt. Um ein geringes Emissionsniveau über die gesamte Dauerhaltbarkeitsperiode sicherzustellen, wäre es sinnvoll, die ISM-Gesetzgebung in weiterer Folge in eine ISC-Gesetzgebung zu überführen. Falls bei ISM-Prüfungen herauskommt, dass die Überwachungsmechanismen nicht funktionieren und die in Betrieb befindliche Maschine mit erhöhten Betriebsstunden im

⁶² In der Euro VI Gesetzgebung für schwere Nutzfahrzeuge liegt der NO_x-Wert bei 1,5 g/kWh (erste Generation Euro VI Fahrzeuge) bzw. 1,2 g/kWh (neueste Euro VI Fahrzeuge) im Vergleich zum Grenzwert von 0,46 g/kWh.

⁶³ Diese Verschlechterungsfaktoren werden auf Basis von neuen Maschinen und Maschinen, die mindestens 25 % der vorgeschriebenen Lebensdauer erreicht haben, ermittelt. Die Verschlechterungsfunktion wird in diesem Fall bis zum Ende der Lebensdauer extrapoliert. Hinsichtlich einer Aussage zur Größe der Unsicherheit bei der Ermittlung der Emissionen am Ende der Dauerhaltbarkeit mit dieser Methode ist weitere Forschungsarbeit notwendig. Die Messung eines gealterten Motors am Ende der Dauerhaltbarkeitsperiode würde jedenfalls zu sicheren Ergebnissen führen.

⁶⁴ Neuzustand bedeutet im Fall der Zertifizierung von Motoren für mobile Maschinen und Geräte, dass die Motoren mit 60 bis 125 Betriebsstunden eingefahren sind. Die genaue Einfahrdauer kann der Hersteller im angegebenen Rahmen selbst bestimmen.

Realbetrieb erhöhte Emissionen aufweist, kann das festgestellt aber bei den bereits im Betrieb befindlichen Maschinen nichts mehr geändert werden. Im Fall von erhöhten Emissionen bei ISC-Tests würde dies auch für die bereits im Betrieb befindlichen Maschinen direkte Folgen haben. Bei Grenzwertüberschreitungen können dann z.B. für betroffene Typen Nachbesserungen an allen Maschinen verlangt werden.

Derzeit wird nur die Funktion der Einrichtungen für die Reduktion von NO_x- und Partikelemissionen geprüft. Die Möglichkeit einer Erweiterung auf alle reglementierten Komponenten sollte geprüft werden. Im Rahmen weiterer Forschungsarbeiten können die Relevanz und auch mögliche Lösungsvorschläge für andere Emissionskomponenten erarbeitet werden.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Verantwortlichkeit im Fall von erhöhten Emissionen während in-service Tests. Da die derzeitige Regulierung nur die Berichterstattung über die Prüfergebnisse vorschreibt und daraus keine direkten Konsequenzen für die getestete Maschine bzw. den Motor abgeleitet werden, ist dieses Thema derzeit noch nicht relevant. Falls die ISM-Regulierung aber in eine ISC-Regulierung überführt wird, dann hat eine Überschreitung der vorgegebenen Grenzwerte Folgen.

In diesem Fall muss eindeutig geklärt werden, wer für die erhöhten Emissionen verantwortlich ist. Wenn die Maschine laut den Vorgaben des Herstellers gewartet wurde, ist der Hersteller bei Schäden im Rahmen eventueller Garantieansprüche sowie bei grundsätzlich zu hohen Emissionsniveaus selbst verantwortlich. Wenn aber ein Missbrauch vorlag, also eine unzureichende Wartung oder z.B. die Verwendung eines unreinen Kraftstoffs, dann ist dafür der Betreiber verantwortlich. Natürlich müssen klare Regeln festgelegt werden, wie ein Missbrauch der Maschine nachgewiesen werden kann. Dazu kann man sich an die bestehenden Regulierungen von schweren Nutzfahrzeugen halten. Diese werden derzeit im Rahmen der Arbeiten zur neuen Emissionsnorm Euro VI noch weiterentwickelt und werden dann ein umfassendes Regelwerk für die verschiedenen Situationen darstellen.

Derzeit werden die Messungen an den in Betrieb befindlichen Maschinen von den Herstellern selbst durchgeführt und von den zuständigen technischen Prüfdiensten, wie z.B. dem TÜV, überwacht. Dies ermöglicht bei der Maschinenauswahl eine Selektion von gut gewarteten Testmaschinen anstatt einer zufälligen Auswahl.

Daher wäre es sinnvoll unabhängigen Drittparteien ebenso die Möglichkeit zur Durchführung von ISM- bzw. ISC-Tests zu geben. Wenn die Tests alle geforderten Randbedingungen einhalten, sollten diese als gültige Tests vor dem Gesetzgeber gelten. Ein Überschreiten der Limits in diesen Tests wäre somit nicht mehr folgenlos. Dies würde die Überwachung der in Betrieb befindlichen Maschinenflotte deutlich verbessern. Natürlich müssen die durchführenden Labore hinsichtlich ihrer Qualifikation für die einwandfreie Durchführung solcher Messungen akkreditiert sein. Es wird erwartet, dass dadurch eine bessere Abdeckung der Flotte und somit Überwachung des realen Emissionsverhaltens zustande kommt.

3.3.1.6 Zukünftige Rolle von Prüfstands- und On-Board Messungen

Forschungsergebnisse der letzten Jahre haben gezeigt, dass Weiterentwicklungen einer rein prüfstands-basierten Emissionsregulierung zwar am Prüfstand in den gesetzlich vorgegebenen Testzyklen zu einem verbesserten Emissionsverhalten führen, teilweise aber kaum positiven Einfluss auf die Emissionen im Realbetrieb haben. Dies ist speziell bei NO_x-Emissionen von Diesel-PKW im Rahmen des sogenannten „Dieselgates“ zu Tage getreten (Matzer und Weller 2020). Daher wurden bei NRMM neben den Messungen am Motorenprüfstand mit Stufe V zusätzlich Tests an in Betrieb befindlichen Maschinen eingeführt, die ISM-Tests. Diese Messungen im Realbetrieb zeigen das Emissionsverhalten in realen Arbeitssituationen. Der

große Vorteil von ISM-Tests ist, dass es keine Möglichkeit gibt das Emissionsverhalten des Motors bzw. der Abgasnachbehandlung auf spezielle Zyklen oder Testsituationen zu optimieren, sondern dass der gesamte Betriebsbereich abgedeckt werden muss. Messungen am Prüfstand bzw. im Labor bringen aber auch Vorteile mit sich. Diese sind hauptsächlich die einsetzbare Messtechnik oder die Vergleichbarkeit von verschiedenen Maschinen auf standardisierten Zyklen. Es stellt sich somit die Frage, in welche Richtung sich die Emissionsgesetzgebung für mobilen Maschinen und Geräte am sinnvollsten entwickeln sollte. Entscheidend ist dabei, ob in Zukunft nur noch Tests im Realbetrieb durchgeführt werden oder ob Tests am Prüfstand nach wie vor unverzichtbar sind? Obwohl weltweit die meisten neuen Regulierungen Messungen im realen Betrieb mit PEMS immer mehr in den Fokus rücken, gibt es derzeit noch keine Regulierung, die komplett auf Prüfstandtests verzichtet. Die Euro VI Regulierung für den Straßenverkehr wird nach derzeitigem Stand ebenfalls noch Prüfstandtests inkludieren. Das bedeutet, dass man sich mit einer Gesetzgebung, die nur Messungen im realen Betrieb fordert, auf Neuland begibt und somit natürlich auch gewisse Unsicherheiten in Kauf nimmt. Es wird daher empfohlen, dass Tests im realen Betrieb mehr in den Vordergrund stellt, aber sich bei der Abschaffung von Prüfstandtests an der Gesetzgebung für schwere Nutzfahrzeuge, speziell Euro VI, orientiert.

Verwendung von gleichen Motoren in verschiedenen Maschinen

Der Vorteil von Motortests am Prüfstand ist bei NRMM, dass verschiedenste Maschinenhersteller die Motoren zukaufen und damit auch schon vor Serienfertigung der später mit den Motoren ausgerüsteten Maschinen sicher sein sollten, dass die Motoren auch das geforderte Emissionsniveau aufweisen.

Möglichkeit zur Durchführung an On-Board Tests an verschiedenen Maschinen

Die vorliegende Studie beschreibt auch, dass On-Board Messungen nicht einfach an jeder Maschine durchgeführt werden können, sondern dass es gerade aus messtechnischer Sicht hinsichtlich der Maschinengrößen gewisse Einschränkungen gibt. Bevor man also komplett auf Prüfstandtests verzichtet, sollte geprüft werden, ob mit der vorhandenen Messtechnik Messungen im Realbetrieb an allen mobilen Maschinen und Geräten möglich sind.

Selbstkontrolle der korrekten Funktion der Emissionsreduktionssysteme

Neben Messungen zur Zertifizierung von Motoren und den ISM-Tests an in Betrieb befindlichen mobilen Maschinen und Geräten ist die kontinuierliche Selbstkontrolle der korrekten Funktion der Emissionsreduktionssysteme von großer Wichtigkeit. Derzeit wird deren korrekte Funktion bei Messungen am Prüfstand getestet. Dabei wird ein Teil des Systems absichtlich funktionsuntauglich gemacht und es wird geprüft, ob die Maschine dies erkennt. Dazu können z.B. Sensoren abgesteckt oder aus dem Abgasrohr ausgebaut werden. Zudem ist es möglich den AdBlue-Tank mit z.B. Wasser zu füllen oder einen wesentlich defekten DPF anstatt des funktionierenden einzubauen. Solche Funktionstests könnte man prinzipiell auch bei Realtests machen, was die OBD-Funktion besser absichern würde als die Prüfstandtests. Hier ist also die Möglichkeit zur Umstellung gegeben.

Überprüfung der Kurbelgehäuseemissionen

Ein weiterer wichtiger Punkt, der in diesem Kontext beachtet werden muss, ist die Erfassung der Kurbelgehäuseemissionen. Derzeit müssen alle Motoren so gestaltet sein, dass die Kurbelgehäuseemissionen, die eigentlich in die Umgebung ausgestoßen werden, vor der Abgasnachbehandlung in den Abgasstrang geleitet werden können. Somit werden bei einer Messung am Auspuff die gesamten Emissionen festgehalten. Dies ist derzeit bei den Messungen am Motorenprüfstand Vorschrift. Bei diesen Messungen ist der Motor nicht in eine Maschine

eingebaut und deshalb ist der Umbau der Abgasverrohrung möglich. Bei den Messungen im Realbetrieb ist der Umbau der Abgasleitungen für die Rückführung der Kurbelgehäuseemissionen aufgrund des Einbaus des Motors in einer funktionsfähigen Maschine deutlich herausfordernder und wird zum jetzigen Zeitpunkt nicht gefordert. Da die Kurbelgehäuseemissionen, welche vorwiegend Öltröpfchen sind, hauptsächlich die Partikelemissionen beeinflussen und diese bei On-Board Tests nicht erfasst werden müssen, ist das Vorgehen, die Kurbelgehäuseemissionen ausschließlich am Motorenprüfstand zu messen derzeit so nachvollziehbar.

Da sich die Kurbelgehäuseemissionen mit zunehmendem Verschleiß des Ölabscheiders deutlich erhöhen können, sollten Maschinen mit erhöhten Betriebsstunden auch diesbezüglich geprüft werden. Das bedeutet, dass eine Prüfung der Kurbelgehäuseemissionen im Rahmen von ISM- bzw. ISC-Tests in Zukunft anzustreben ist, da bei diesen auch Maschinen mit hoher Betriebsstundenanzahl getestet werden. Für einen Vorschlag zur genauen technischen Umsetzung ist weitere Forschungsarbeit notwendig.

Überprüfung der Dauerhaltbarkeit

Die Prüfung der Dauerhaltbarkeit der NRMM Motoren wird derzeit mit Messungen am Motorenprüfstand durchgeführt. Hier wäre denkbar, dass die Prüfung der Dauerhaltbarkeit anhand von On-Board Messungen durchgeführt wird. Derzeit werden anhand von Messungen am Motorenprüfstand Regressionsgeraden für die Verschlechterung des Emissionsverhaltens bis zum Ende der Dauerhaltbarkeitsperiode ermittelt. Für diese Geraden ist es ausreichend, wenn die zu testenden Motoren mindestens ein Viertel der gesamten Dauerhaltbarkeitsperiode erfüllen. Auf Basis dieser Daten erfolgt eine Extrapolation bis zum Ende der Dauerhaltbarkeitsperiode. Das Ergebnis der Zertifizierungsmessungen am neuen Motor wird dann diesem Verschlechterungsfaktor multipliziert und das Endergebnis muss unter dem entsprechenden Grenzwert liegen.

Die Überprüfung des Emissionsverhaltens bei hohen Betriebsstunden könnte aber auch mit Realmessungen durchgeführt werden. Der Hersteller muss dazu garantieren, dass die Emissionen auch nach z.B. 8000 Betriebsstunden noch unter dem Grenzwert liegen. Verschlechterungsfaktoren müssten somit nicht direkt am Motorenprüfstand berechnet werden, sondern würden sich aus den Realemissionen der Maschinen am Feld ergeben. Für die Überprüfung eignen sich die Ergebnisse von ISM- bzw. ggf. in weiterer Folge ISC-Tests sehr gut. ISC-Tests müssten dafür bis an das Ende einer definierten Maschinenlebensdauer erlaubt bzw. vorgeschrieben sein. Für ein (zusätzliches) Beibehalten der derzeitigen Verschlechterungsfaktoren spricht wiederum, dass sich Maschinenhersteller dann schon bei der Motorauswahl auf einigermaßen abgesicherte Dauerhaltbarkeiten verlassen können.

Überprüfung von derzeit nichtlimitierten Emissionskomponenten

Die Forschungsarbeiten zur Weiterentwicklung der Euro 7 Gesetzgebung für SNF zeigen, dass neben den bereits reglementierten Komponenten weitere Emissionskomponenten, z.B. N_2O oder PN_{10} , in ihrer vorkommenden Konzentration Einfluss auf das Klima bzw. die Luftgüte haben und somit reglementiert werden sollten. Da NRMM mit sehr ähnlichen Dieselmotoren wie SNF betrieben werden, sollten für NRMM auch Untersuchungen bezüglich dieser Komponenten unternommen werden. Derzeit scheint die FTIR-Technologie (Fourier transformierte Infrarotspektroskopie⁶⁵) am besten für die Messung dieser Komponenten geeignet zu sein. FTIR-

⁶⁵ Bei der FTIR-Technologie wird die Absorption von Strahlen verschiedener Wellenlängen gemessen. Das dadurch entstehende Interferogramm wird dann über eine Fourier-Transformation in ein Spektrum umgewandelt. Somit ist die gleichzeitige Messung von ca. 30 verschiedenen gasförmigen Komponenten im Abgas möglich.

Anwendungen für den Laboreinsatz haben sich bereits als praktikabel und gut einsetzbar gezeigt. Die vorhandenen mobilen Anwendungen zeigen bisher ebenso sehr gute Ergebnisse. Trotzdem ist das Gesamtpaket mobiles FTIR inkl. Stromversorgung und extra Partikelmesseinrichtung, da diese im mobilen FTIR nicht inkludiert ist, zum derzeitigen Stand der Technik im Vergleich zu einem PEMS größer und somit unhandlicher. Das bedeutet, dass die Möglichkeiten zum Aufbau einer On-Board Messeinrichtung an mobilen Maschinen und Geräten noch weiter eingeschränkt würde. Deshalb wäre es sinnvoll, weitere Emissionskomponenten zuerst nur am Prüfstand zu messen und erst On-Board Messungen verpflichten einführen, wenn sich die Messgeräte weiterentwickelt haben.

Ein weiterer interessanter Punkt hinsichtlich derzeit nichtreglementierter Komponenten ist die Partikelmessung bei ISM-Tests. Nach jetzigem Stand müssen die PN-Emissionen nur am Prüfstand nachgewiesen und nicht bei ISM-Tests berichtet werden. Dies ist aufgrund der anspruchsvollen Messtechnik und dem damit verbundenen größeren Bauraum der Messgeräte verständlich. Bei den schweren Nutzfahrzeugen wurde die PN-Messung auch erst mit Euro VI E, also mit Beginn von 2022 und somit acht Jahre nach Einführung von Euro VI und den damit verbundenen ISC-Tests, bei den Messungen im realen Straßenverkehr verpflichtend. Dies zeigt aber, dass sich die mobile Partikelmesstechnik weiterentwickelt hat und dieser Schritt somit auch für die Kategorie der mobilen Maschinen und Geräte in Betracht gezogen werden sollte.

Überprüfung des ECU Leistungssignals

Emissionen von mobilen Maschinen und Geräten werden in g/kWh, also auf die geleistete Motorarbeit bezogen, reglementiert. Bei On-Board Messungen wird das Leistungssignal dafür aus der ECU via CAN Bus aufgezeichnet. Daher ist die Überprüfung der Genauigkeit dieses Signals wichtig. Diese Überprüfung wird während der On-Board Tests mittels der Methode des maximalen Drehmoments durchgeführt. Eine andere Methode wäre die Überprüfung der geleisteten Arbeit während des NRTC Tests am Motorenprüfstand. Bei SNF wird diese zweite Methode mithilfe des WHTCs durchgeführt. Um zu beurteilen, ob die Methode des maximalen Drehmoments die nötige Genauigkeit aufweist, ist weitere Forschungsarbeit notwendig. Wenn dies der Fall ist, dann könnte hinsichtlich der Evaluierung des ECU Drehmomentsignals auf Tests am Motorenprüfstand verzichtet werden.

Regulierung der CO₂-Emissionen

Derzeit gibt es noch keine Regulierung für die CO₂-Emissionen von NRMM. Um die Effizienz von derzeitigen Systemen zu erhöhen und alternative Antriebssysteme zu fördern, sollte die Einführung einer solchen Regulierung in den nächsten Jahren diskutiert werden. Für eine standardisierte und vergleichbare Erfassung der CO₂-Emissionen sind gleiche Betriebsbedingungen und Testzyklen essentiell. Zudem sollte eine sehr hohe Genauigkeit der Messgeräte gegeben sein. Deshalb sollten solche Messungen unter Laborbedingungen am Motorenprüfstand durchgeführt werden. On-Board Messungen eignen sich für den Vergleich verschiedener Motoren bzw. Gesamtmaschinen nur bedingt. Da für die Effizienz der Maschinen nicht nur der Motor, sondern auch Hydraulik, Getriebe etc. relevant sind, stellt eine wiederholbare und gesamthafte Bewertung der Maschineneffizienz eine noch größere Herausforderung dar, als die von LKW und Bussen.

Zusammenfassung

Die verschiedenen dargestellten Punkte zeigen, dass viele Tests durchaus sinnvoll im Realbetrieb durchgeführt werden können, aber dass nachzeitigem Stand nicht auf Messungen unter Laborbedingungen am Motorenprüfstand verzichtet werden kann. Die Überprüfung der Schadstoffemissionen und deren On-Board Diagnose sollte, soweit möglich, im realen Betrieb erfolgen.

3.3.1.7 Überprüfung Genauigkeit Messgeräte

Forschungsarbeiten zur Messgenauigkeit von On-Board Messgeräten haben gezeigt, dass Vibrationen Auswirkungen auf die Messergebnisse haben können (Landl et al. 2019). Im Rahmen dieser Studie wurde festgestellt, dass bei der Messung von NRMM im Realbetrieb teilweise starke Vibrationen auftreten können. Daher sollte geprüft werden, ob das verwendete PEMS während einer On-Board Messung ordnungsmäßig funktioniert hat, bevor man die Emissionsergebnisse bewertet.

Um die Genauigkeit der Messgeräte zu validieren, sollte daher als erstes jeder PEMS Hersteller auf Basis einer standardisierten Prüfung die maximalen Beschleunigungen, bis zu denen ein ordnungsmäßiger Betrieb garantiert werden kann, festlegen. Der dafür benötigte standardisierte Test kann auf speziellen Rüttelprüfständen durchgeführt werden (Landl et al. 2019). Ein geeigneter Testzyklus kann anhand von realen Beschleunigungsprofilen aus mehreren Tests von unterschiedlichen Maschinen erarbeitet werden.

Während der On-Board Messung können dann die Vibrationen am Messgerät mit einem Beschleunigungssensor aufgezeichnet werden. Wenn die dabei auftretenden maximalen Beschleunigungen unter den maximal zulässigen Beschleunigungen für das jeweilige Messgerät liegen, ist der Test gültig, andernfalls muss der Test wiederholt werden.

3.3.2 Minderung der Treibhausgasemissionen vordenken

Mobile Maschinen haben aktuell einen vergleichsweise geringen Anteil an den nationalen Treibhausgasemissionen. Je nach Schätzung liegen diese zwischen im Jahr 2021 ca. 9 Mt (Top-Down Berechnung im UBA-ZSE) und ca. 14 Mt CO₂-Äquivalent (Bottom-Up-Berechnung TREMOD-MM, V. 5.31). Die Emissionen des Straßenverkehrs im Jahr 2021 lagen hingegen bei 148 Mt CO₂-Äquivalenten und die Gesamtemissionen aller Sektoren in Deutschland bei 762 Mt CO₂-Äquivalenten. Bis zum Jahr 2030 sollen die Gesamtemissionen laut novelliertem Klimaschutzgesetz jedoch auf 438 Mt CO₂-Äqu sinken und damit nahezu halbiert werden, im Jahr 2045 soll Deutschland dann vollständig THG-neutral sein (UBA 2022). Damit ist klar, dass mittelfristig auch die energiebedingten THG-Emissionen von NRMM sinken und der NRMM-Bereich defossilisiert werden müssen. Zusätzlich ist zu beachten, dass Verbesserungen im Schadstoffemissionsverhalten oftmals mit zusätzlichem Kraftstoffverbrauch, z.B. für das Heizen von Katalysatoren, und somit höheren CO₂-Emissionen einhergehen.

3.3.2.1 Roadmap zur Defossilisierung von NRMM entwickeln

Im Bereich des Personenverkehrs sind mit Elektroautos und –Bussen bereits Lösungen zur Defossilisierung am Markt verfügbar und erleben derzeit einen starken Markthochlauf. Auch im Straßengüterverkehr sind bereits erste elektrifizierte Modelle verfügbar und es gibt eine breite Diskussion um sinnvolle Lösungen und die dafür notwendige Infrastruktur (Schnelllader, Oberleitungen, Wasserstofftankstellen). Im Bereich der mobilen Maschinen sind bisher jedoch nur wenige vergleichbare Lösungen entwickelt worden. Hier zeigt sich vor allem bei Anwendungen mit Nennleistungen unter 37 kW, z.B. Rasenmähern, Kettensägen oder Gabelstaplern, seit einigen Jahren ein Trend zur Elektrifizierung (Heidt et al. 2020). Aufgrund der Vielfalt an Maschinen und Einsatzzwecken sowie den teilweise infrastrukturell schwachen Einsatzorten (z.B. in der Land- und Forstwirtschaft) sind hier wahrscheinlich neben den Lösungen im Straßenverkehr auch andere Maßnahmen notwendig. Es hat sich gezeigt, dass Biokraftstoffe nur begrenzt verfügbar sind und eine direkte Elektrifizierung deutlich energieeffizienter ist als der Einsatz von Wasserstoff oder synthetischer Kraftstoffe. Dennoch kann es Bereiche geben, in denen eine direkte Elektrifizierung mobiler Maschinen nur schwer

möglich ist. Auf der H2-Leiter (Schill, Wolf-Peter und Kittel, Martin 2021), die eine Priorisierung des Einsatzes erneuerbaren Wasserstoffs vornimmt, finden sich mobile Maschinen daher auch weit oben wieder, deutlich vor dem Straßenverkehr. Neben dem Flugverkehr und einigen Industriezweigen, gibt es daher auch einige Einsatzfelder mobiler Maschinen, bei denen die Verwendung erneuerbaren Kraftstoffe sinnvoll sein kann.

Hier sind weitere Untersuchungen unter Einbindung von Experten und Stakeholdern zweckmäßig, um Klarheit und Handlungssicherheit für alle beteiligten Akteure zu schaffen:

- ▶ Identifizierung der direkten Elektrifizierungspotenziale im Bereich NRMM (technisch, operationell und infrastrukturell) und Benennung von Bereichen in denen voraussichtlich andere Lösungen (z.B. Wasserstoff, Biokraftstoffe oder synthetische Kraftstoffe) zum Einsatz kommen müssen sowie die Quantifizierung des entsprechenden Energiebedarfs.
- ▶ Entwicklung einer technischen und politischen Roadmap zur Defossilisierung des Bereich NRMM in der EU bis 2050 (und in Deutschland schon bis 2045) mit Diskussion geeigneter Politikinstrumente (Grenz- bzw. Flottenzielwerte, Förderung neuer Technologien, Infrastrukturaufbau etc.).

3.3.2.2 Berücksichtigung alternativer Kraftstoffe in der NRMM-Verordnung

Die mittelfristige Defossilisierungsstrategie kann auch Berücksichtigung in einer Ergänzung der aktuellen NRMM-Verordnung finden:

- ▶ Weiterhin ambitioniertere Grenzwerte für Luftschadstoffe (PM, PN, NO_x, CO, HC) definieren. Damit wird der Einsatz von Nullemissionsgeräten, z.B. batterieelektrisch oder kabelgebunden, alternativ zu Verbrennungsmotoren gefördert. Dies könnte kurzfristig insbesondere handgehaltene Kleingeräte betreffen (vgl. obige Abschnitte), mittelfristig aber auch Geräte mit höherer Leistung (z.B. über Brennstoffzellen). Die Anwendbarkeit und Kosten solcher Geräte müssten ggf. in Begleitgutachten erforscht werden (siehe oben). Mittelfristig ist die Einführung von Flottenzielwerten oder Nullemissionsquoten dabei jedoch der transparentere und zielsichere Weg, der aber wahrscheinlich einer längeren Vorbereitung bedarf.
- ▶ Mess – und Prüfverfahren auf weitere alternative Kraftstoffe, z.B. Biokraftstoffe oder synthetische Kraftstoffe aus erneuerbarem Strom (Power-to-X), erweitern, da in einigen Bereichen evtl. auch mittelfristig keine Elektrifizierung sinnvoll ist. Die gültigen Bezugskraftstoffe müssen entsprechend definiert werden, damit der ordnungsgemäße Betrieb mit solchen Kraftstoffen nach Zulassung der Motoren auch gewährleistet ist. Weiterhin sollte auch geregelt werden, ob eine Umrüstung von Maschinen oder Motoren auf einen anderen Kraftstoff eine erneute Zulassung benötigt. Dies könnte Umrüstungen verhindern, wenn dabei die jeweils aktuell geltende, möglicherweise schärfere Grenzwertstufe einzuhalten wäre.
- ▶ Die direkten Emissionen klimawirksamer Schadstoffe soweit wie möglich reduzieren, d.h. Grenzwerte von PM (insbesondere wegen des Anteils von Black Carbon) verschärfen sowie - entsprechend der Diskussion um die Abgasnorm Euro VII bei schweren Nutzfahrzeugen - Grenzwerte für Lachgas (N₂O) und Methan (CH₄) einführen. Am sinnvollsten wäre die

Einführung von Grenz- oder Zielwerten auf Basis von gesamten CO₂-Äquivalenten, da diese dann besser für verschiedene Antriebe und Kraftstoffe anwendbar wären.

- Anpassung des A-Faktors für Gasmotoren (alternativ zur Einführung von CH₄-Grenzwerten). Die HC-Emissionen von Gasmotoren werden gegenwärtig unterschiedlich zu Benzin und Diesel-Motoren reguliert. Hierbei wird ein Aufschlag als Produkt aus dem Faktor 1,5, dem sog. A-Faktor, und dem Gas-Energieverhältnis „GER“ (zwischen 0 und 1) gebildet⁶⁶. Die Kategorien NRE mit bis zu 560 kW haben den A-Faktor 1,1. Motoren der Klasse NRE mit mehr als 560 kW sowie Generatoren, Binnenschiffs- oder Bahnmotoren haben einen A-Faktor von 6. Damit erhöht sich der gültige HC-Grenzwert von 0,19 g/kWh im Extremfall auf bis zu 9,19 g/kWh. Da die HC-Emissionen bei Gasmotoren zum Großteil aus dem klimawirksamen Methangas bestehen, können diese die gesamten Treibhausgasemissionen, also die CO₂-Äquivalent-Emissionen deutlich erhöhen. Mit Erdgas (LNG) betriebene Schiffe können somit in einer Well-to-Wheel Betrachtung sogar höherer THG-Emissionen als Dieselschiffe haben (Wurster et al. 2014). Im Vergleich dazu gilt für Gasmotoren für schwere Nutzfahrzeuge mit Euro VI ein Grenzwert von 0,5 g/kWh. Bei einer Weiterentwicklung sollte daher geprüft werden, ob für mobile Maschinen mit Gasmotor entweder ein CH₄-Grenzwert analog zu dem von schweren Nutzfahrzeuge eingeführt werden kann oder zumindest der A-Faktor für den HC-Grenzwert im Rahmen der technischen Möglichkeiten abgesenkt werden kann.

3.3.3 Sonstige Weiterentwicklungen

3.3.3.1 Datensammlung und Transparenz verbessern

ISM und IMI-Datenbank

Im Rahmen der Typgenehmigung und des In-Service-Monitorings wird eine Vielzahl von Daten zu den Emissionen mobiler Maschinen bzw. deren Motoren gesammelt. Diese Daten könnten von der Forschung prinzipiell verwendet werden, um das Emissionsverhalten mobiler Maschinen zu bewerten. Dies haben auch verschiedene Experten bei Interviews und die Fachgespräche im Rahmen dieser Studie betont. Vorteile gegenüber zusätzlichen Messungen staatlicher Stellen wären z.B. die Möglichkeit zur Berücksichtigung größerer Datenmengen sowie keine öffentlichen Zusatzkosten für die Messung und die Sicherstellung der gesetzlichen Qualitätsanforderungen. Zum Zeitpunkt der Datenerhebung für diese Studie konnten jedoch keine dieser Daten zur Verfügung gestellt werden, da diese noch nicht vorlagen. Auch werden diese Daten in der Regel im Auftrag der Motorenhersteller gemessen und sind damit in voller Differenzierung nicht automatisch frei zugänglich.

Das Modul des Binnenmarkt-Informationssystems IMI (hier als IMI-Datenbank bezeichnet), in dem die ISM-Daten aller europäischen Genehmigungsbehörden für NRMM eigentlich gesammelt und zur Verfügung gestellt werden soll, war zum Zeitpunkt der Studie noch nicht nutzbar. Experten zufolge scheiterte dies bisher an den unterschiedlichen Formaten der Prüfunterlagen und Daten, so dass diese nicht direkt in ein einheitliches und nutzbares Format überführt werden können. Als Beispiel wurde genannt, dass die Prüfbehörden alle Unterlagen von den Herstellern in einem Dokument (pdf) erhalten, während der Upload in die IMI-Datenbank geteilte Unterlagen erfordere. Weitere Bestrebungen seitens der EU-Kommission, die IMI-Datenbank nutzbar zu machen, sind bisher noch ohne Ergebnis geblieben. Ein Hersteller,

⁶⁶ Formel: $HC = 0.19 + (1.5 \times A \times GER)$

welcher seine ISM-Daten der britischen Typgenehmigungsbehörde vorgelegt hatte, äußerte grundsätzliches Interesse daran, dass diese Daten auch international und für Forschungszwecke genutzt werden, sagte jedoch auch, dass die zuständigen Behörden dies aktuell nicht forcieren würden. Derzeit laufen daher über den Verband EUROMOT Aktivitäten zur herstellerübergreifenden Sammlung und Auswertung von ISM-Daten. Im Rahmen dieser Studie wurden Auszüge der Ergebnisse daraus von EUROMOT geteilt.

Aus Sicht der Autoren wäre eine frei zugängliche und funktionierende IMI-Datenbank grundsätzlich ein richtiger Ansatz. Zwar können aus dieser Studie keine technischen Empfehlungen zur Behebung der bisherigen Schwierigkeiten gegeben werden. Sie zeigt jedoch den Bedarf und eine mögliche Verwendung der Daten auf und sollte damit Anstoß für eventuell nötige Überarbeitungen der IMI-Datenbank bzw. der gültigen Datenformate geben.

Typprüfergebnisse des NRSC und NRTC

Zwar bilden die Messergebnisse aus den Prüfzyklen auf dem Prüfstand die Emissionen weniger realitätsnah ab als das ISM, dennoch wären diese Daten für einige Fragestellungen hilfreich, z.B.:

- Anteil von Maschinen mit Partikelfilter (DPF) bei Stufe IIIB und IV, da Maschinen mit DPF die PM-Grenzwerte i.d.R. deutlich unterschreiten.
- Überprüfung ob bestimmte Grenzwerte, z.B. für HC bei Dieselmotoren, allgemein deutlich unterschritten werden. Die Daten aus diesem Projekt deuten darauf hin.
- Sofern hochaufgelöste Daten vorliegen, Emissionsverhalten in den verschiedenen Lastpunkten des NRSC und NRTC, bzw. im (kurzen) Leerlauf oder nach Kaltstart.

Zum letzten Punkt äußerte das KBA auf Anfrage, dass es von den meisten Herstellern nur die gewichteten Mittelwerte aus dem Typprüfzyklus erhält, und daher aktuell keine genaueren Aussagen getroffen werden können. Bei einer Weiterentwicklung der Verordnung könnte daher auch eine einheitliche und umfangreichere Datenübergabe vorgeschrieben werden.

Letztendlich ist es im Interesse der (Fach-)Öffentlichkeit, dass die vorhandenen Daten auch veröffentlicht werden, wie dies an anderen Stellen geschieht, z.B.:

- Die US EPA veröffentlicht die Typgenehmigungsergebnisse für NRMM-Motoren auf Ihrer Webseite und schreibt die Daten jährlich fort, siehe (US EPA o.J.)
- Das KBA veröffentlicht die jährlichen Typprüfergebnisse für Schadstoffemissionen und CO₂ für Straßenfahrzeuge (KBA o.J.)

Die ohnehin gemessenen Daten für die in Deutschland zugelassenen/eingebauten Motoren für mobile Maschinen und Binnenschiffe könnten analog auch berichtet werden oder analog zu den ISM-Ergebnissen in die IMI-Datenbank integriert werden.

3.3.3.2 Sonstige Schadstoffe

Grundsätzlich kann die Entwicklung bei schweren Nutzfahrzeugen bei der Frage, welche weiteren Schadstoffe reguliert werden müssen, Leitlinien setzen (Euro VI und Euro VII⁶⁷). In der Analyse der Immissionsbelastung durch PM₁₀ und PM_{2,5} hat sich gezeigt, dass heute zumindest massenseitig nur noch ein sehr geringer Anteil auf die Abgasemissionen zurückgeht. Weitergehende abgasseitige Maßnahmen werden daher kaum nennenswert zur Reduktion lokaler Gesamtbelastungen beitragen können. Insbesondere die Vorbelastung sowie die lokalen

⁶⁷ Die Veröffentlichung des Vorschlags für die Euro VII Gesetzgebung für SNF wird im Herbst 2022 erwartet. Dieser gibt dann eine Richtung vor, die sicherlich auch für NRMM vorstellbar sein wird.

Abrieb- und Aufwirbelungsemissionen sollten daher weiter untersucht werden und ggf. im Mittelpunkt weiterer Maßnahmen stehen. Dazu fehlt es jedoch insbesondere noch an belastbaren Erkenntnissen zu den Quellen sowie Höhe und Zusammensetzung von Nicht-Abgasemissionen auf Baustellen (Abrieb und Aufwirbelung). Bei entsprechender gesundheitlicher Relevanz könnten weitere Maßnahmen zu Vermeidung von Aufwirbelungsemissionen sinnvoll sein.

3.3.3.3 Stakeholderbeteiligung

Die Entwicklung der aktuellen Stufe V Verordnung 2016/1628 sowie die Stakeholder-Einbindung im Rahmen der GEME Gruppe, wie sie in der EU standardmäßig praktiziert wird, wurde von den befragten Stakeholdern weitgehend als positiv erlebt. In der Umsetzung zeigen sich jedoch verschiedene Unklarheiten und Herausforderungen. Neben Abstimmungsschwierigkeiten zwischen den verschiedenen Parteien (Motoren- und Maschinenherstellern sowie Maschinenbetreibern) gibt es vor allem offene Fragen bzgl. der langfristigen allgemeinen Stoßrichtung der Regulierung.

Insgesamt ist bei etwaigen Weiterentwicklungen der Verordnung eine fortgesetzte Stakeholdereinbindung wichtig, um die praktischen Abläufe zu verbessern. Da die Grenzwerte als ambitioniert, aber umsetzbar gelten, werden sie nach Stakeholderrückmeldungen auch weltweit als Maßstab angesehen. Entsprechend wird weiterhin eine Vereinheitlichung bzw. Übernahme der EU-Grenzwerte auf UNECE-Ebene bzw. in den USA gewünscht. Unklar ist, wieweit aktuelle politische Entwicklungen, wie der Brexit, Corona, der Krieg in der Ukraine und neue Anträge auf EU Mitgliedschaft sich auf die weitere Regulierung auswirken. Insgesamt würde bzgl. der Weiterentwicklung aber eine klare Kommunikation der allgemeinen Stoßrichtung begrüßt.

4 Quellenverzeichnis

- Aulinger, A. (2022): Bottom-up emissions modeling of inland navigation emissions. Vortrag im Rahmen des Online-Workshops „Schifffahrtsbedingte Luftschadstoffemissionen und deren Modellierung“ am 17./18. Januar 2022 der Bundesanstalt für Gewässerkunde. Helmholtz-Zentrum Hereon, Geesthacht.
- Ays, I. C. (2019): Development of a CO₂ e quantification method and of solutions for reducing the greenhouse gas emissions of construction machines = Entwicklung einer CO₂ e Quantifizierungsmethode und von Lösungen zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen in Baumaschinen. KIT, Karlsruhe.
- Busch, D.; Bergen, A.; Wosnio, W.; Krause, K. (2021): LANUV-Fachbericht 115. Hafenmonitoring: Luftqualität auf dem Rhein und in den Binnenhäfen von Duisburg und Neuss/Düsseldorf. LANUV, Recklinghausen. S. 103.
- Busch, D.; Brandt, A.; Kleinebrahm, M.; Dreger, S. (2020): LANUV Fachbericht 103. Emissionsmessungen auf dem Laborschiff Max Prüss nach Ausrüstung mit einem SCRT System. LANUV, TÜV Nord, Recklinghausen.
- CLINSH (2021): CLINSH | CLean INland SHipping. <https://www.clinsh.eu/>. (10.08.2022).
- Desouza, C. D.; Marsh, D. J.; Beevers, S. D.; Molden, N.; Green, D. C. (2020): Real-world emissions from non-road mobile machinery in London. In: *Atmospheric Environment*. Vol. 223, No. 117301.
- Deutz (2022): Datenblatt Deutz TCD 3.6. https://www.deutz.com/fileadmin/contents/com/engines/baumaschinen/de/Datenblatt_3_6_De_we_b.pdf. (20.04.2022).
- DIN EN 17507 (2020): [DIN EN 17507 Straßenfahrzeuge - Mobile Abgasmesssysteme (PEMS) – Leistungsbewertung].
- Dippold, M.; Tödling, M.; Weller, K.; Hausberger, S. (2021): Berechnung der relativen Anteile an EURO VI D auf der A12 sowie Alterungs- und Manipulationseffekte auf die Abgasemissionen der EURO VI Flotte.
- Eger, P.; Mathes, T.; Zavarsky, A.; Düster, L. (2022): Aus Immissionsmessungen abgeleitete Emissionen von Binnenschiffen am Oberrhein. Workshop „Schifffahrtsbedingte Luftschadstoffemissionen und deren Modellierung“ (17.01.2022). Bundesanstalt für Gewässerkunde. S. 19.
- Emberger, P.; Hinrichs, M.; Huber, G.; Emburger-Klein, A.; Thuncke, K.; Pickel, P.; Remmele, E. (2021): Field tests and real-world exhaust gas emissions of a pure rapeseed oil-fuelled harvester in forestry: Testing a solution for combined water, soil, and climate protection. In: *Journal of Cleaner Production*. Vol. 280, S. 124360.
- Ettl, J. C. (2021): Reales Abgasemissionsverhalten von Traktoren am Prüfstand und im Feldeinsatz. TFZ. S. 151.
- EU (2010): Richtlinie 2010/26/EU der Kommission vom 31. März 2010 zur Änderung der Richtlinie 97/68/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und GeräteText von Bedeutung für den EWR.
- EU (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 RatesText von Bedeutung für den EWR.
- EU (2016a): VERORDNUNG (EU) 2016/ 1628 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES - vom 14. September 2016 - 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. S. 65.
- EU (2016b): 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 technischer und allgemeiner Anforderungen in Bezug auf die Emissionsgrenzwerte und die Typgenehmigung von Verbrennungsmotoren für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/1628/oj>. (14.09.2022).

- EU (2017): COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) 2017/ 655 - of 19 December 2016 - supplementing Regulation (EU) 2016/ 1628 of the European Parliament and of the Council with regard to monitoring of gaseous pollutant emissions from in-service internal combustion engines installed in non-road mobile machinery.
- EU (2020): EMROAD – Users Guide – Version 6.0x. https://circabc.europa.eu/sd/a/c2ef2ab0-1660-42e7-a30b-e94d57743057/EMROAD_User_Guide_6_04.pdf (20.04.2022).
- EU (2022): COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) .../... of 30.8.2022 amending Delegated Regulation (EU) 2017/655 as regards the adaptation of the provisions on monitoring of gaseous pollutant emissions from in-service internal combustion engines installed in non- road mobile machinery to include engines with power of less than 56 kW and more than 560 kW. EU-Kommission. <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-12077-2022-INIT/en/pdf> (04.01.2023).
- Fecke, M. (2018): Bewertung der Energieeffizienz von Baumaschinen mithilfe einer praxisnahen Lastzyklusentwicklung für einen In-Situ-Test. Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal.
- Friedrich, A. (2022): Binnenschiff NOX Messungen Berlin. Excel-Datei von Herr Axel-Friedrich, zugesandt per E-Mail am 2.2.2022.
- Heidt, C.; Helms, H.; Kaemper, C.; Kräck, J. (2020): Aktualisierung der Modelle TREMOD/TREMOD-MM für die Emissionsberichterstattung 2020 (Berichtsperiode 1990-2018) - Berichtsteil TREMOD-MM.
- Helms, H.; Heidt, C. (2014): Erarbeitung eines Konzepts zur Minderung der Umweltbelastung aus NRMM (non road mobile machinery) unter Berücksichtigung aktueller Emissionsfaktoren und Emissionsverminderungsoptionen für den Bestand.
- horiba (o.J.): OBS-ONE RE. Protection Case for Testing Heavy-Duty and Non-Road Mobile Machinery. <https://www.horiba.com/int/automotive/products/detail/action/show/Product/obs-one-re-1999/>. (20.04.2022).
- Huber, G.; Thuneke, K.; Emberger, P.; Remmele, E. (2019): Abgasverhalten von Fahrzeugen im realen Betrieb mit alternativen Kraftstoffen – Bestimmung mit einem portablen Emissionsmesssystem (PEMS). TFZ, Straubing. https://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/biokraftstoffe/dateien/tfz_bericht_62_pems_ges.pdf (20.04.2022).
- IVR (2017): IVR Geschäftsbericht 2017. <https://www.ivr-eu.com/wp-content/uploads/2018/05/IVR-Jaarverslag-2017.pdf>.
- KBA (o.J.): Kraftfahrt-Bundesamt - Verzeichnisse - Kraftstoffverbrauchs- und Emissions-Typprüfwerte. https://www.kba.de/DE/Themen/Typgenehmigung/CoC_Daten_Fahrzeugtypdaten/Veroeffentlichung/en/SV2.html;jsessionid=E64638F4B8490A13D49E871B655C31B8.live11311?nn=3505666. (25.05.2022).
- Knörr, W.; Heidt, C.; Allekotte, M.; Biemann, K.; Colson, M.; Gores, S. (2020): Aktualisierung der Modelle TREMOD/TREMOD-MM für die Emissionsberichterstattung 2020 (Berichtsperiode 1990-2018) - Berichtsteil „TREMOD“. Umweltbundesamt, Dessau -Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/aktualisierung-tremod-2019>.
- Knörr, W.; Heidt, C.; Schmied, M.; Notter, B. (2013): Aktualisierung der Emissionsberechnung für die Binnenschifffahrt und Übertragung der Daten in TREMOD. ifeu und INFRAS. Im Rahmen des Projekts „Aktualisierung und Recherche zu Emissionsfaktoren von Euro 5- und Euro 6-Fahrzeugen und nachgerüsteten Kfz und Übertragung der Daten ins Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA) und in TREMOD“. FKZ 3711 45 105. Im Auftrag des Umweltbundesamtes.
- Krause, K. (2022): Aus Immissionsmessungen abgeleitete Emissionen von Binnenschiffen am Niederrhein. Workshop „Schifffahrtsbedingte Luftschadstoffemissionen und deren Modellierung“ (17.01.2022). Universität Bremen.
- Kurtenbach, R.; Vaupel, K.; Kleffmann, J.; Klenk, U.; Schmidt, E.; Wiesen, P. (2016): Emissions of NO, NO₂, and PM from inland water transportation. In: *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*. S. 1–22.
- Landl, L.; Hausberger, S.; bainschab, M. (2018): DownToTen; Measuring automotive exhaust particles down to 10 nanometres; Horizon 2020 H2020-GV-02-2016 GA No. 724085; DownToTen D4.2; test protocol and robustness checks. Graz.
- Landl, L.; Vuckovic, T.; Hausberger, S. (2019): PEMS accuracies under harsh environmental conditions. 23rd Transport and Air Pollution Conference. Thessaloniki.

- Ligterink, N.; van Gijlswijk, G.; Kadijk, G. (2019): Emissiefactoren wegverkeer - Actualisatie 2019.
- Ligterink, N.; Louman, R.; Buskermolen, E.; Verbeek, R. (2018): Use of construction machines and the associated NOx and CO2 emissions. TNO, Connekt. S. 40.
- Matzer, C.; Weller, K. (2020): Feldüberwachung von Kraftfahrzeugen und Aktualisierung des HBEFA, Abschlussbericht. TU Graz.
- Matzer, C.; Weller, K.; Dippolt, M.; Lipp, S.; Röck, M.; Rexeis, M.; Hausberger, S. (2019): Update of Emission Factors for HBEFA Version 4.1. TU Graz, Graz.
https://www.hbefa.net/d/documents/HBEFA41_Report_TUG_09092019.pdf (20.11.2019).
- van Mensch, P.; Abma, D.; Verbeek, R.; Hekman, W. (2018): PROMINENT Report D5.7 Technical evaluation of procedures for Certification, Monitoring & Enforcement. Technical evaluation of the monitoring results on Rhine, Danube and other vessels. Public report version 2, 2018. TNO.
- Mörth, M. (2019): Analyse lauffleistungsabhängiger Emissionserhöhungen von schweren Nutzfahrzeugen für das HBEFA. *Bachelorarbeit*, TU Graz, Graz.
- Nitzsche, E.; Moldenhauer, A.; Düring, I. (2019): ERMITTLUNG DER SCHIFFFAHRTS- BEDINGTEN LUFTSCHADSTOFF- BELASTUNG AN INNERSTÄDTISCHEN BERLINER WASSERSTRASSEN MIT HAUPTAUGENMERK AUF DIE FAHRGASTSCHIFFFAHRT. Lohmeyer.
file:///C:/Users/Christoph%20Heidt/Downloads/gutachten_luftschadstoffbelastung_2019-09-13.pdf.
- Notter, B.; Hausberger, S.; Allekotte, M.; et al (2022): HBEFA 4.2 Documentation of Updates. Bern.
https://www.hbefa.net/e/documents/HBEFA42_Update_Documentation.pdf (03.02.2022).
- Pöhler, D. (2021): Recent remote emission sensing measurements by means of the plume chase vehicle technique. Airyx. https://ermes-group.eu/sites/default/files/ERMES_Plenary_2021/Day_2/2.6_POEHLER.pdf (20.04.2022).
- PROMINENT (2018): Prominent-IWT – Project website. <https://www.prominent-iwt.eu/>. (10.08.2022).
- Romberg, E.; Böisinger, R.; Lohmeyer, A.; Ruhnke, R.; Röth, E. (1996): NO-NO2-Umwandlung für die Anwendung bei Immissionsprognosen für Kfz-Abgase. In: *Gefahrstoffe, Reinhaltung der Luft*. Vol. 56, No. 6, S. 215.
- Schill, Wolf-Peter; Kittel, Martin (2021): Grüner Wasserstoff in der Energiewende: Fokussierter Einsatz unverzichtbar. DIW Berlin. <https://www.heise.de/hintergrund/Gruener-Wasserstoff-in-der-Energiewende-Fokussierter-Einsatz-unverzichtbar-6193503.html?seite=4>.
- Schlamberger, C. (2020): Methodenverbesserung zur modellbasierten NO2-Bestimmung. Bachelorarbeit zur Erlangung des Grades „Bachelor of Science“ (B.Sc.). Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Professur für Umweltmeteorologie, Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen. 2020.
- Schwingshackl, M.; Rexeis, M.; Hausberger, S. (2017): Emissionsauswirkung von stufenweisen Einsatzbeschränkungen für mobile Maschinen und Geräte in österreichischen PM und NO2-Sanierungsgebieten. TU Graz.
- Sturm, C. (2015): Bewertung der Energieeffizienz von Antriebssystemen Mobiler Arbeitsmaschinen am Beispiel Bagger. KIT.
- UBA (2019): luftschadstoff-emissionen-in-deutschland. In: *Excel-Dati*.
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland>.
- UBA (2022): Treibhausgas-Emissionen in Deutschland. In: *Umweltbundesamt. Text*, Umweltbundesamt.
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland>. (25.05.2022).
- US EPA, O. (o.J.): Annual Certification Data for Vehicles, Engines, and Equipment. *Data and Tools*,
<https://www.epa.gov/compliance-and-fuel-economy-data/annual-certification-data-vehicles-engines-and-equipment>. (25.05.2022).
- Vermeulen, R. J.; Ligterink, N. E.; van der Mark, P. J. (2021): Real-world emissions of non-road mobile machinery. TNO.
- Weller, K. (2020): Emission Models for Heavy Duty Vehicles Based on On-road Measurements. *Dissertation*, TU Graz, Graz. https://www.hbefa.net/e/documents/Phd_Thesis_KonstantinWeller.pdf (20.04.2022).
- Weller, K.; Lipp, S.; Hausberger, S.; Landl, L. (2021a): Rahmenvertrag für die Ermittlung und Dokumentation von Realemissionen aus Fahrzeugen und Maschinen.
- Weller, K.; Tödling, S.; Hausberger, S.; de Ruiter, J.; Indrajana, A.; Ligterink, N. (2021b): Grenzwertefunktion und Limit-Absenkung. Bericht für das Umweltbundesamt Deutschland im Rahmen des Projekts

„Nationale und internationale Abgasgesetzgebung bei Pkw, leichten und schweren Nutzfahrzeugen“, Status 2022: unveröffentlicht. *Unveröffentlicht*, .

WSV (2022): ELWIS - Nachhaltige Modernisierung von Binnenschiffen.

<https://www.elwis.de/DE/Service/Foerderprogramme/Nachhaltige-Modernisierung-von-Binnenschiffen/Nachhaltige-Modernisierung-von-Binnenschiffen-node.html>. (14.09.2022).

Wurster, R.; Weindorf, W.; Zittel, W.; Schmidt, P.; Heidt, C.; Lambrecht, U.; Lischke, A.; Müller, S. (2014): LNG als Alternativkraftstoff für den Antrieb von Schiffen und schweren Nutzfahrzeugen. LBST, ifeu, DLR. <https://www.biogasrat.de/wp-content/uploads/2018/01/mks-kurzstudie-lng.pdf> (13.07.2022).

A Anhang

A.1 Emissionen von Binnenschiffen

Im Folgenden werden die Erkenntnisse zu den Realemissionen von Binnenschiffen zusammengefasst. Diese gehören auch in den Scope der NRMM-Verordnung und waren Teil des Untersuchungsgegenstands. Im Gegensatz zu den Bau- und Landmaschinen beschränkt sich die Untersuchung jedoch auf eine Literaturanalyse, da eigene Datenerhebungen und Messungen nicht möglich waren.

A.1.1 Gesetzgebung und Typprüfverfahren

Die Abgasgesetzgebung für Binnenschiffsmotoren erfolgt analog zu mobilen Maschinen aktuell ebenfalls mit der EU-Verordnung 2016/1628. Dabei wird unterschieden in Motoren zum Propellerbetrieb (IWP), Generatorbetrieb (IWA) und marinisierte LKW-Motoren. Im Gegensatz zu den meisten mobilen Maschinen können Binnenschiffe mit ein bis mehreren Antriebsmotoren ausgestattet sein und über verschiedene zusätzliche Hilfsaggregate verfügen. Auch beträgt die Lebensdauer der Schiffe mehrere Jahrzehnte, so dass es üblich ist, Motoren im Laufe eines Schiffslebens auszutauschen.

Die Typprüfung im NRSC für Antriebsmotoren erfolgt im E3 oder E2 bzw. für Generatoren im C1- oder D2 Zyklus (EU 2016a). Mit dem In-Service-Monitoring der Stufe V werden jedoch auch Messungen im Realbetrieb erfolgen müssen. Die Zulassung von Binnenschiffen und der Einbau von Motoren wird von der Zentralstelle Schiffsuntersuchungskommission (ZSUK) umgesetzt. Eine Übersicht über bereits zugelassene Motoren und Daten zur Zulassung (Abgasstufe, Datum, technischer Dienst, u.a.) bietet die europäische CESNI-Datenbank (<https://listes.cesni.eu/2060-de.html>). Zum Zeitpunkt der Berichtserstellung lagen bereits Typgenehmigungen für über 80 verschiedene Motorentypen für die Stufe V vor.

Rückmeldungen des VDMA zufolge bestehen durch die Stufe V für die Binnenschiffe größere Herausforderungen, u.a. aufgrund kleiner Stückzahlen, wodurch die Entwicklungs- und Prüfkosten schlechter skalierbar sind. Während daher einige Zeit noch unklar war, ob die Motorenhersteller überhaupt eigene Stufe-V Motoren für Binnenschiffe auf den Markt bringen werden, ist dies inzwischen jedoch der Fall (siehe oberer Abschnitt). Zusätzlich verfügen die Betreiber, bei denen es sich oftmals um Kleinstunternehmen bzw. Partikuliere⁶⁸ handelt, über geringe Investitionsmöglichkeiten um neue Motoren anzuschaffen bzw. alte auszutauschen. Die Flottenerneuerung von Binnenschiffsmotoren ist daher deutlich langsamer als beispielsweise von LKW-Motoren. Existierende Förderprogramme in Deutschland, wie das Motorenförderprogramm und das Programm zu nachhaltigen Modernisierung von Binnenschiffen, sollen diesem Umstand entgegenkommen (WSV 2022).

A.1.2 Emissionsverhalten im Realbetrieb

Zu den Emissionen von Binnenschiffen im Realbetrieb existieren verschiedene aktuelle Studien, darunter zum Beispiel im Rahmen der Forschungsprojekte (PROMINENT 2018) und (CLINSH 2021). Allerdings lassen diese nur bedingt auf das Emissionsverhalten neuerer Abgasstufen schließen, da zumindest in diesen Studien keine Binnenschiffsmotoren mit Stufe V vermessen

⁶⁸ selbständige Schiffseigentümer und Schiffsbetreiber mit oft nur einem Schiff.

wurden, und die vorige Stufen IIIA (bzw. ZKR II) im Gegensatz zur Stufe IV, beispielsweise bei Baumaschinen, deutlich weniger strenge Grenzwerte hatten. Zum Teil wurden jedoch Simulationen für neuere Motoren durchgeführt oder mit Abgasnachbehandlungssystemen nachgerüstete Motoren untersucht. Die Erkenntnisse werden im Folgenden kurz zusammengefasst und sollen einen ersten Überblick geben.

Lastprofil

Die Einsatzprofile von Binnenschiffen werden in verschiedenen Quellen beschrieben. Ähnlich wie bei den landgebundenen Maschinen hängt der Leistungsbedarf von Binnenschiffen von verschiedenen Faktoren ab. Im Modell TREMOD werden beispielsweise die durchschnittlichen Lastfaktoren nach Schiffsform, Gewässertyp, Beladung und Fahrtrichtung unterschieden (Knörr et al. 2020). Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit und Fahrgeschwindigkeit gehen hierbei ebenfalls ein.

Tabelle 25: Beispiele für mittlere Lastfaktoren von Binnenschiffen

Schiffsart	Quelle	Gewässerart	Talfahrt	Bergfahrt
Motorfrachtschiffe	TREMOD	freifließend	25 % – 30 %	30 % – 70 %
	PROMINENT	Rhein	11 % – 22 %	32 % – 43 %
Schubverbände	TREMOD	freifließend	10 % – 20 %	45 % – 95 %
	PROMINENT	Donau	23 % – 42 %	36 % – 64 %

Anmerkung: Die Bandbreite bei Prominenz bezieht sich auf unterschiedliche Schiffe, in TREMOD auf die Beladung (leer bzw. voll). Quellen: (Knörr et al. 2013) (van Mensch et al. 2018)

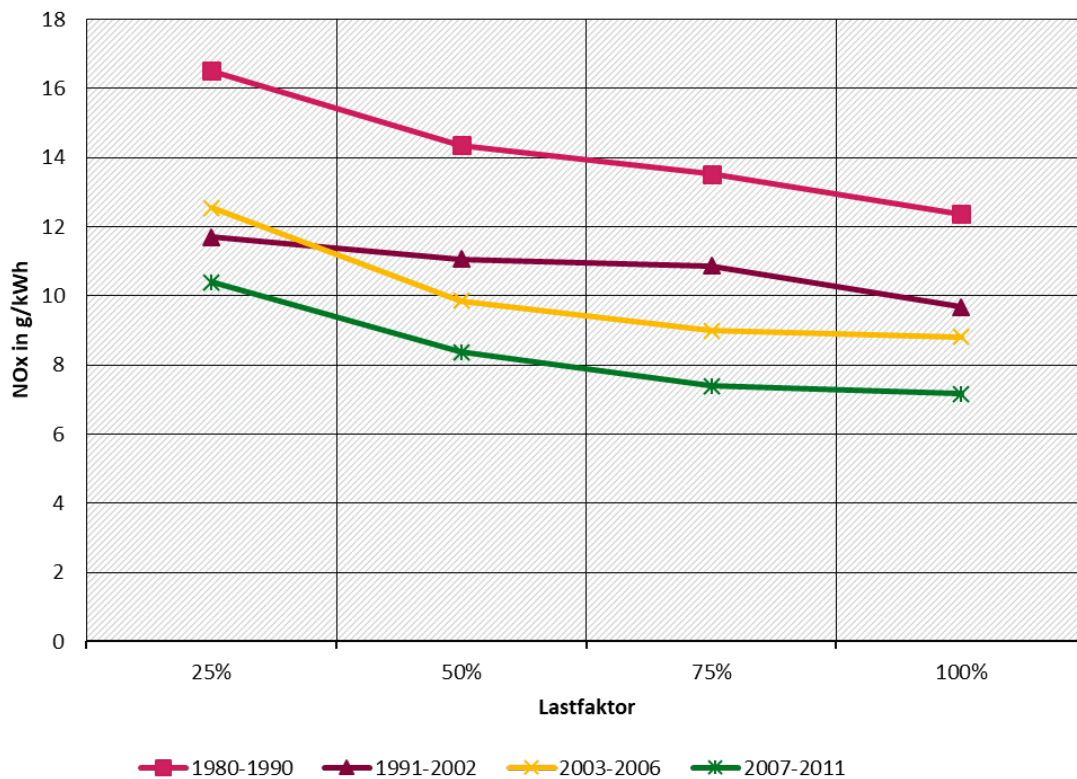
Neben diesen Mittelwerten sind auch die Häufigkeitsverteilungen der Lastfaktoren (siehe (Ligterink et al. 2019)) relevant für das Emissionsverhalten der Motoren. Die Ergebnisse, welche auf den Messungen in PROMINENT von Güterschiffen auf dem Rhein und Schubverbänden auf der Donau beruhen, zeigen, dass die Belastung der Binnenschiffsmotoren derzeit im Durchschnitt relativ gering ist (25 % bis 50 %), aber Lasten unter 10% der Nennleistung (wahrscheinlich Leerlauf) ca. 15-20% der gesamten Betriebsstunden ausmachen.

Detaillierte Kenndaten zum Betrieb, insbesondere zur Häufigkeit von Kaltstarts und dem Anteil bzw. der Länge von Leerlaufphasen konnten nicht gefunden werden.

Emissionsverhalten/Emissionsfaktoren

Im Rahmen der Studie von (Knörr et al. 2013) wurden Typprüfmessungen für Motoren bis zur Stufe IIIA verwendet. Diese bilden zwar das Emissionsverhalten im Realbetrieb nur zum Teil ab, es lagen jedoch davon einige Messungen für die jeweiligen Lastpunkte des D1 und D2 Zyklus vor, womit ein Bezug zu verschiedenen Lastfaktoren/Drehzahlbereichen möglich ist. Die Datenlage umfasst damit Messdaten zu ca. 50 Motoren mit Nennleistungen von 450 kW bis 3880 kW. Nach Abbildung 45 sinken die durchschnittlichen NO_x-Emissionen je kWh tendenziell mit steigendem Lastfaktor. Bei den PM-Emissionen ist dieser Trend nicht eindeutig feststellbar, z.B. haben die neueren Motoren im Durchschnitt eher ein Emissionsminimum im mittleren Lastbereich, wie z.B. in (Desouza et al. 2020) auch für NRMM berichtet wird.

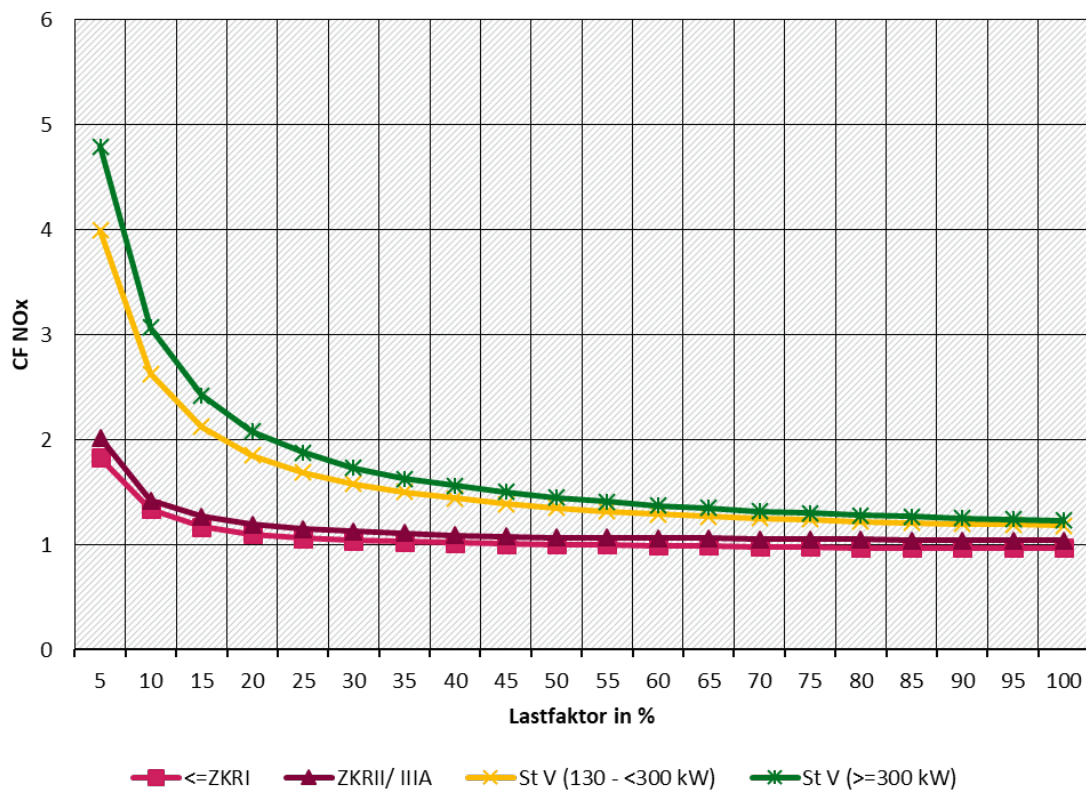
Abbildung 45: Mittlere Emissionsfaktoren von Binnenschiffsmotoren nach Lastfaktor und Baujahr im Prüfzyklus NRSC



Quelle: ifeu-Auswertung aus Basis von Emissionsmessdaten der WTZ, siehe (Knörr et al. 2013)

Zu ähnlichen Erkenntnissen kommen auch (Ligterink et al. 2019), welche für den Lastfaktor in 5 %-Schritten relative Korrekturfaktoren ableiteten. Bei CO, HC und PM ist dies ebenfalls zu beobachten, beim Kraftstoffverbrauch in geringerem Maße. Bei den NOx-Emissionen gehen die Autoren davon aus, dass dieser Trend desto stärker ist, je neuer die Abgasstufe ist. Dabei werden auch Annahmen für Motoren der Stufe V getroffen welche sich teils auf Messdaten bzw. Simulationen des Projekts PROMINENT stützen und u.a. die Last und Abgastemperatur der Motoren berücksichtigen (Abb. 37).

Abbildung 46: Korrekturfaktoren für die NO_x-Emissionen von Binnenschiffen in Abhängigkeit vom Lastfaktor und der Abgasstufe gemäß (Ligterink et al. 2019)



Quelle: ifeu-Darstellung gemäß Angaben von (Ligterink et al. 2019)

Auch Analysen des CLINSH Projekts auf Basis von Onboard-Messungen von ca. 40 Motoren bis zur Stufe ZKR II sowie zusätzlich nachgerüsteten Schiffsmotoren und Euro VI-LKW Motoren kamen für NO_x zu ähnlichen Ergebnissen (Aulinger 2022). Messungen des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (LANUV) Nordrhein-Westfalen im Rahmen des CLINSH-Projekts am Laborschiff Max Prüss zeigen, dass SCR bei ausreichender Last NO_x-Reduktionsraten von 90% und höher erreichen, bei Niedriglast lag die Reduktion jedoch unter 10 %, was zu Emissionsfaktoren von bis zu 14 g/kWh führt. Bei den PM Emissionen war dieser Effekt weniger relevant (Busch et al. 2020).

Zusätzlich zu Emissionsmessungen gibt es verschiedene Messprogramme von Immissionen an Binnenschiffahrtswasserstraßenabschnitten am Rhein, aus welchen auf die mittleren Emissionsfaktoren der jeweiligen Schiffe/Flotten geschlossen wurde, siehe (Kurtenbach et al. 2016; Eger et al. 2022; Krause 2022). Möglich ist dies z.B. über Rückrechnung der Ausbreitung mittels Gaus-Wolken-Modell oder aus dem Schadstoff (z.B. NO_x) zu CO₂-Verhältnis. Mittels letzter Methodik lagen auch Messdaten für Binnenschiffe in Berlin auf der Spree vor, welche größtenteils Fahrgastschiffe umfassen (Friedrich 2022). Der Datenumfang umfasst hier 18 Messungen im Jahr 2021 an 12 verschiedenen Schiffen (davon 1 Frachtschiff). NO_x lag in den meisten Fällen zwischen 6 und 8,4 g/kWh, im Mittel bei 7 g/kWh. Über die Motoren der Schiffe und die Messungen sind jedoch leider keine Details bekannt. Die Werte sind jedoch mit den Emissionsmessdaten für Schiffe bis Stufe IIIA/ZKR II bzw. Flottenmittelwerten aus TREMOD (Güterschiffe) vergleichbar.

Als Zwischenfazit lässt sich somit feststellen, dass die bisherigen Messungen darauf hindeuten, dass moderne, mit SCR ausgerüstete, Binnenschiffsmotoren, genau wie Baumaschinen oder Landmaschinen, im Realbetrieb und unter Schwachlastphasen Emissionen deutlich über den

Grenzwerten ausstoßen. Wie die Daten im vorigen Abschnitt zeigen, kommen Phasen mit Lasten von weniger als 50 % bei Binnenschiffen häufig vor, aber auch Lasten von weniger als 10% sind nicht selten. Die Erkenntnisse für Stufe V-Motoren beruhen jedoch auf Simulationen, Analogieschlüssen zu LKW oder nachgerüsteten älteren Motoren. Es fehlen genauere Informationen zur Länge der Schwachlast- bzw. Leerlaufphasen bei Binnenschiffen, welche sich bei Bau- und Landmaschinen als entscheidend für das Emissionsverhalten herausgestellt haben.

Immissionsbelastung

Umfassende Untersuchungen zum Anteil der Binnenschifffahrt an der Luftbelastung existieren für den Rhein im Raum Duisburg mit Fokus auf Güterschiffe, sowie für die Berliner Spree mit Fokus auf Fahrgastschiffe.

Das LANUV schließt aus Immissionsmessungen am dichtbefahrenen Niederrhein im Jahr 2018, dass je nach Windrichtung der Schiffsverkehr zwischen 1 und 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ am NO_2 -Jahresmittelwert ausmacht (Busch et al. 2021). Schon in 50 m Entfernung von der Fahrrinne lagen die Zusatzbelastungen bei 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Messungen im Hafenbereich zur Gesamtbelastung ergaben NO_2 -Werte, welche niedriger als in Wohngebieten, deutlich niedriger als an Straßenverkehrsmessstellen und unterhalb des EU-Grenzwertes lagen. Diese Ergebnisse legen nahe, dass Güterschiffe zumindest in unmittelbarer Nähe zu bewohnten Gebieten eher wenig zur Luftbelastung beitragen. Laut (Busch et al. 2021) werden diese Emissionen aber auch als zusätzliche Konzentrationserhöhung in der Hintergrundbelastung wirksam, wobei der Anteil an der bodennahen NO_2 -Belastung für den Großraum Duisburg für das Jahr 2016 mit etwa 0,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ beziffert wird, was etwa 3 % der Gesamtkonzentration entspricht. Im Ballungsraum Frankfurt wurde ein Anteil von 0,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ bzw. 1,4 % durch Binnenschiffe ermittelt. Hauptverursacher für NO_2 ist demnach auch hier der Straßenverkehr.

Analysen von (Nitzsche et al. 2019) für Fahrgastschiffe in Berlin kommen ebenfalls zum Ergebnis, dass diese punktuell erhebliche Luftschadstoffbelastungen verursachen, aber gesamtstädtisch einen geringen Anteil an den NO_x - und Feinstaub (PM_{10} und $\text{PM}_{2.5}$)-Emissionen von ca. 1 % haben. Der lokale Anteil wird hierbei jedoch im Gegensatz zu der Rheinschifffahrt als relevanter eingeschätzt, da an Spree-nahen Bereichen von Gebäudefassaden dicht bebauter Hauptverkehrsstraßen z.T. schiffsbedingte NO_x -Zusatzbelastungen ermittelt wurden, die etwa der der Kfz-bedingten Zusatzbelastungen entsprechen. Insbesondere An- und Ablegemanöver und Leerlaufemissionen an Schifffahrtsanlegestellen verursachen nach (Nitzsche et al., 2019) hohe Emissionen. Die NO_2 -Zusatzbelastung durch Schiffe im Jahr 2018 war mit ca. 5-30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ am höchsten im Bereich Mühlendamm (nördlich der Brücke), während jedoch auch der Kfz Verkehr dort im Jahr 2020 mit 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ eine sehr hohe Zusatzbelastung verursachte. Die Zusatzbelastungen für PM_{10} durch Schiffe lagen bei maximal 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ bei einer Hintergrundbelastung von 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Damit haben die abgasseitigen Emissionen von Binnenschiffen ähnlich wie bei den Baumaschinen einen vernachlässigbaren Anteil an der PM_{10} -Belastung.

Die Erkenntnisse zum Immissionsanteil durch Binnenschiffe ähneln damit in gewisser Weise denen für Baumaschinen. Relevante Zusatzbelastungen treten vor allem für NO_2 und lokal begrenzt auf, jedoch in geringerem Ausmaß als beim Straßenverkehr. Im Gegensatz zu Baumaschinen treten die Belastungen jedoch regelmäßig und kontinuierlich an festen Orten auf und sind für die dort betroffene Bevölkerung daher von hoher Relevanz. Die Daten zum Emissionsverhalten legen nahe, dass die Motoren der Abgasstufe V im realen Betrieb deutlich geringere Minderungen erzielen könnten als im Typprüfzyklus. Um Betroffene zu schützen und ggf. über die aktuelle EU-Luftqualitätsrichtlinie hinausgehende Anforderungen begegnen zu können, sollten daher die für Stufe V geforderten Minderungen auch im Realbetrieb eingehalten

werden. Für finale Aussagen sollten aber die Ergebnisse des In-Service Monitorings herangezogen und dann eventuell nötige Schritte eingeleitet werden. Je nach gewähltem Prüfschema der Motorenhersteller dürften erste Ergebnisse bereits ab 2022 vorliegen. Ob und bis wann diese dann veröffentlicht werden, ist jedoch unklar (siehe Kapitel 3.3.3.1)