

TEXTE

117/2020

Aktualisierung der Modelle TREMOD/TREMOD-MM für die Emissionsberichterstatt ung 2020 (Berichtsperiode 1990- 2018)

Berichtsteil „TREMOD-MM“

TEXTE 117/2020

Projektnummer 123 135

FB000365/ANH

**Aktualisierung der Modelle
TREMOD/TREMOD-MM für die
Emissionsberichterstattung
2020 (Berichtsperiode
1990-2018)**

Berichtsteil „TREMOD-MM“

von

Christoph Heidt, Hinrich Helms, Claudia Kämper, Jan
Kräck

Institut für Energie und Umweltforschung (ifeu), Heidelberg

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](http://www.umweltbundesamt.de)

📄 [/umweltbundesamt](http://www.umweltbundesamt.de)

Durchführung der Studie:

ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
Wilckensstr. 3
69120 Heidelberg

Abschlussdatum:

März 2020

Redaktion:

Fachgebiet I 2.2 Schadstoffminderung und Energieeinsparung im Verkehr
Gunnar Gohlisch

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Juni 2020

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

Kurzbeschreibung: Aktualisierung der Modelle TREMOD/TREMOD-MM für die Emissionsberichterstattung 2020 (Berichtsperiode 1990-2018)

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 heute daher relevant zur Emissions- und Immissionsbelastung in Deutschland bei. Da die europäischen Luftqualitätsgrenzwerte nach wie vor an einigen städtischen Messstellen überschritten werden, wurden auch mobile Maschinen zunehmend in die Luftreinhalteplanung einbezogen, z.B. durch die Luftqualitätsverordnung Baumaschinen des Landes Baden-Württemberg, .

Zur Luftreinhalteplanung gehört auch die nationale Emissionsberichterstattung durch das Umweltbundesamt, welche für den Bereich der mobilen Maschinen und Geräte auf Grundlage des seit 2004 entwickelten Modell TREMOD-MM durchgeführt wird. Der vorliegende Bericht dokumentiert die für TREMOD-MM, Version 5.1 zugrundeliegenden Methoden, Daten und Ergebnisse.

Im Jahr 2019 wurden die Bestandsdaten einzelner Sektoren, soweit möglich, fortgeschrieben, die Emissionsfaktoren auf Grundlage der aktuellen Emissionsgrenzwerte und neuerer Messergebnisse aktualisiert sowie der Gesamtenergieverbrauch

Ein weiterer Schwerpunkt dieses Berichts ist die vollständige Dokumentation aller verwendeten Daten in einer Veröffentlichung, welche zuletzt im Jahr 2004 vorlag. Daher werden auch Arbeiten aus vorigen Aktualisierungen und internen Berichten beschrieben, sofern keine neueren Arbeiten vorgenommen worden sind.

Abstract

Non-road mobile machinery is an important source of engine emissions, but its emissions were regulated much later than those of road vehicles. Particulate and nitrogen oxide emissions from non-road mobile machinery and equipment therefore make a relevant contribution to the emission and immission burden in Germany today. As the European air quality limits are still being exceeded at some urban measuring points, mobile machinery has also been increasingly included in clean air planning.

This also includes the national emission reporting by the Federal Environment Agency, which is carried out for mobile machinery based on the TREMOD-MM model developed since 2004. This report documents the methods, data and results underlying TREMOD-MM, Version 5.1.

In 2019, the inventory data of individual sectors were updated as far as possible, the emission factors were updated on the basis of the current emission limits and more recent measurement results, and the total energy consumption of agriculture was plausibility checked.

A further focus of this report is the complete documentation of all data used in a publication, which was last available in 2004. Therefore, work from previous updates and internal reports is also described, unless more recent work has been carried out.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	8
Tabellenverzeichnis.....	9
Abkürzungsverzeichnis.....	11
Zusammenfassung.....	13
Summary.....	22
1 Einleitung.....	31
2 Methodischer Ansatz von TREMOD-MM.....	32
3 Aktuelle Emissionsgrenzwerte für mobile Maschinen.....	38
3.1 Selbstzündungsmotoren.....	38
3.2 Fremdzündungsmotoren.....	39
3.3 Motoren für Sportboote.....	41
4 Emissionsfaktoren.....	43
4.1 Methodik.....	43
4.2 Basis-Emissionsfaktoren Diesel-Motoren.....	46
4.3 Basis-Emissionsfaktoren Otto-Motoren.....	50
4.3.1 Viertaktmotoren.....	50
4.3.2 Zweitaktmotoren.....	52
4.3.3 Emissionsfaktoren für Freizeitboote.....	53
4.3.4 Emissionsfaktoren für Gabelstapler (Flüssiggasmotoren).....	54
4.3.5 Betankungs- und Verdunstungsverluste.....	54
4.4 Verschlechterungsfaktoren.....	56
4.5 Anpassung an transiente Zyklen („in-use adjustment“).....	59
4.6 Emissionsfaktoren für N ₂ O, NH ₃ , CH ₄ , CO ₂ , SO ₂ , BC, und PN.....	60
4.6.1 CH ₄ , NH ₃ und N ₂ O.....	60
4.6.2 CO ₂ und SO ₂	61
4.6.3 Black Carbon (BC).....	61
4.6.4 Partikelanzahl (PN).....	62
5 Bestands- und Aktivitätsdaten.....	64
5.1 Landwirtschaft.....	64
5.1.1 Bestandsdaten.....	64
5.1.2 Aktivitätsdaten.....	67
5.2 Bauwirtschaft.....	68
5.2.1 Bestandsdaten.....	69

5.2.2	Aktivitätsdaten.....	74
5.3	Industrie/Sonstige.....	77
5.3.1	Bestandsdaten	77
5.3.2	Aktivitätsdaten.....	80
5.4	Forstwirtschaft.....	81
5.4.1	Bestandsdaten	81
5.4.2	Aktivitätsdaten.....	84
5.5	Haushalt und Garten (Grünpflege)	85
5.5.1	Bestandsdaten	85
5.5.2	Aktivitätsdaten.....	87
5.6	Fahrgastschiffahrt und Sportboote.....	89
5.6.1	Bestandsdaten	90
5.6.2	Aktivitätsdaten.....	93
6	Ergebnisse aus TREMOD 5.1.....	94
6.1	Emissionen im Jahr 2018 nach Sektoren und Energieart.....	94
6.2	Zeitliche Entwicklung der Gesamtemissionen und Änderungen zu Vorversionen.....	96
6.3	Plausibilisierung des Energieverbrauchs.....	100
6.3.1	Vergleich mit AG Energiebilanzen.....	100
6.3.2	Vergleich mit der Gasölrückerstattung für den Sektor Landwirtschaft:.....	101
6.3.3	Plausibilisierung für den Sektor Bauwirtschaft.....	103
7	Weiterer Aktualisierungs- und Forschungsbedarf	105
7.1	Emissionsfaktoren.....	105
7.2	Bestands- und Aktivitätsdaten.....	105
8	Quellenverzeichnis	107

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schema zur Differenzierung der Daten in TREMOD-MM	15
Abbildung 2: Anteil der Schadstoffemissionen mobiler Maschinen in Deutschland 2018 nach Sektoren	19
Abbildung 3: Anteile der Schadstoffemissionen mobiler Maschinen in Deutschland 2018 nach Motortypen und Energiearten	20
Abbildung 4: Schematic differentiation of data in TREMOD-MM.....	24
Abbildung 5: Results for pollutant emissions of non-road mobile machinery in Germany in 2018 by sectors	28
Abbildung 6: Results for pollutant emissions of non-road mobile machinery in Germany in 2018 by engine and fuel type	29
Abbildung 7: Schema zur Differenzierung der Daten in TREMOD-MM	33
Abbildung 8: Schema zur Differenzierung der Aktivitätsdaten und Emissionsfaktoren nach Maschinenalter	35
Abbildung 9: Bestandsverteilung nach Maschinenalter.....	36
Abbildung 10: Jährliche Betriebsstunden nach Maschinenalter.....	36
Abbildung 11: Entwicklung des Bestandes in der Landwirtschaft nach Leistungsklasse* 1980 bis 2018.....	66
Abbildung 12: Entwicklung des Bestandes in der Bauwirtschaft nach Leistungsklasse* 1980 bis 2018.....	72
Abbildung 13: Entwicklung des Bestandes in der Industrie/Sonstiges nach Leistungsklasse* 1980 bis 2018.....	79
Abbildung 14: Entwicklung des Bestandes in der Forstwirtschaft nach Leistungsklasse* 1980 bis 2018.....	83
Abbildung 15: Entwicklung des Bestandes in der Grünpflege nach Leistungsklasse 1980 bis 2018	86
Abbildung 16: Entwicklung des Bestandes an Motoren in Sportbooten und Fahrgastschiffen nach Leistungsklassen 1980-2018.....	92
Abbildung 17: Anteil der Schadstoffemissionen mobiler Maschinen in Deutschland 2018 nach Sektoren	94
Abbildung 18: Anteil der Schadstoffemissionen mobiler Maschinen in Deutschland 2018 nach Motortypen und Energiearten.....	95
Abbildung 19: Vergleich der CO ₂ -Emissionen in TREMOD-MM 3.11, 4.4 und 5.1 zwischen 1980 und 2050	97
Abbildung 20: Vergleich der HC-Emissionen in TREMOD-MM 3.11, 4.4 und 5.1 zwischen 1980 und 2050	98
Abbildung 21: Vergleich der CO-Emissionen in TREMOD-MM 3.11, 4.4 und 5.1 zwischen 1980 und 2050	98
Abbildung 22: Vergleich der NO _x -Emissionen in TREMOD-MM 3.11, 4.4 und 5.1 zwischen 1980 und 2050	99
Abbildung 23: Vergleich der PM-Emissionen in TREMOD-MM 3.11, 4.4 und 5.1 zwischen 1980 und 2050	99

Abbildung 24: Vergleich des Dieserverbrauchs der Landwirtschaft in TREMOD-MM
mit Daten der Gasölrückerstattung.....102

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Off-Road Sektoren nach EMEP/EEA und TREMOD-MM.....13

Tabelle 2: Gegenüberstellung der Emissionen von NRMM und Straßenverkehr in
Deutschland 2018 in Kilotonnen20

Tabelle 3: Non-road sectors according to EMEP/EEA and TREMOD-MM.....22

Tabelle 4: Comparison of emissions from NRMM with road transport emissions in
Germany 2018 in kilotons29

Tabelle 5: Off-Road Sektoren nach EMEP/EEA und TREMOD-MM.....32

Tabelle 6: Emissionsgrenzwerte für mobile Maschinen mit Dieselmotoren in
g/kWh (PN: #/kWh)38

Tabelle 7: Emissionsgrenzwerte für mobile Maschinen mit Otto-Motoren in g/kWh.....40

Tabelle 8: Emissionsgrenzwerte für Sportboote ab 31.12.2005 in g/kWh41

Tabelle 9: Emissionsgrenzwerte für Sportboote mit Selbstzündungsmotoren ab
18.1.2016 in g/kWh41

Tabelle 10: Emissionsgrenzwerte für Sportboote mit Fremdzündungsmotoren ab
18.1.2016 in g/kWh42

Tabelle 11: Kategorisierung der Größenklassen der eingesetzten Motoren44

Tabelle 12: Anzahl von Messungen zur Ableitung von Emissionsfaktoren für
Dieselmotoren46

Tabelle 13: Basisemissionsfaktoren für Diesel-Motoren in g/kWh.....48

Tabelle 14: Emissions- und Verbrauchsfaktoren für Otto 4-Takt-Motoren in g/kWh51

Tabelle 15: Emissions- und Verbrauchsfaktoren für Otto 2-Takt-Motoren in g/kWh52

Tabelle 16: Emissions- und Verbrauchsfaktoren für Bootsmotoren in g/kWh53

Tabelle 17: Emissionsfaktoren für Treibgas-Stapler (19-37 kW) in g/kWh54

Tabelle 18: Emissionsfaktoren für Betankung (Verschüttung und Verdrängung)55

Tabelle 19: Emissionsfaktoren für die Verdunstung in g/Tag56

Tabelle 20: Verschlechterungsfaktoren für handgehaltene Otto-Maschinen57

Tabelle 21: Verschlechterungsfaktoren für nichthandgehaltene Otto-Maschinen58

Tabelle 22: Verschlechterungsfaktoren für Dieselmotoren.....58

Tabelle 23: Transiente Anpassungsfaktoren für Motoren bis Stufe IIIA59

Tabelle 24: Emissionsfaktoren N₂O und NH₃ in g/kWh60

Tabelle 25: Anteil der Methanemissionen an den gesamten HC-Emissionen61

Tabelle 26: CO₂-Emissionsfaktoren für Kraftstoffe und Gase (in kg/TJ).....61

Tabelle 27: Schwefelanteil in den Kraftstoffen für ausgewählte Bezugsjahre in %
(g/g) am Kraftstoffverbrauch.....61

Tabelle 28: Emissionsfaktoren für Black Carbon (Anteile an PM g/g).....62

Tabelle 29: Eingesetzte Maschinen in der Landwirtschaft.....64

Tabelle 30: Bestände nach Maschinenkategorie in der Landwirtschaft für 2018.....66

Tabelle 31: Mittlere jährliche Betriebsstunden in der Landwirtschaft67

Tabelle 32: Lastfaktoren in der Landwirtschaft.....	68
Tabelle 33: Eingesetzte Maschinen in der Bauwirtschaft	69
Tabelle 34: Quellen für Baumaschinenbestände in Deutschland nach Bezugsjahren.....	70
Tabelle 35: Anteile der Maschinenbestände nach Größenklassen 2018.....	70
Tabelle 36: Bestände nach Maschinenkategorie in der Bauwirtschaft für 2018	72
Tabelle 37: Mittlere Lebensdauer der Maschinen in der Bauwirtschaft.....	73
Tabelle 38: Mittlere jährliche Betriebsstunden in der Bauwirtschaft.....	74
Tabelle 39: Lastfaktoren in der Bauwirtschaft	76
Tabelle 40: Eingesetzte Maschinen in der Industrie/Sonstiges.....	77
Tabelle 41: Anteile der Generatoren Bestände an mobilen Quellen.....	78
Tabelle 42: Anpassung der kW-Klassen bei Generatoren von DESTATIS auf TREMOD-MM	78
Tabelle 43: Bestände nach Maschinenkategorie in der Industrie/Sonstige für 2018.....	79
Tabelle 44: Mittlere Lebensdauer der Maschinen in der Industrie/Sonstige	80
Tabelle 45: Mittlere jährliche Betriebsstunden in der Industrie/Sonstige.....	80
Tabelle 46: Lastfaktoren in der Industrie/Sonstiges	80
Tabelle 47: Eingesetzte Maschinen in der Forstwirtschaft	81
Tabelle 48: Annahmen zu Entwicklung der Leistungsklassen bei Forstmaschinen.....	82
Tabelle 49: Bestände nach Maschinenkategorie in der Forstwirtschaft für 2018	83
Tabelle 50: Mittlere Lebensdauer der Maschinen in der Forstwirtschaft	83
Tabelle 51: Mittlere jährliche Betriebsstunden in der Forstwirtschaft.....	84
Tabelle 52: Lastfaktoren in der Forstwirtschaft	84
Tabelle 53: Eingesetzte Maschinen in der Grünpflege.....	85
Tabelle 54: Bestände nach Maschinenkategorie in der Grünpflege für 2018.....	87
Tabelle 55: Mittlere Lebensdauer der Maschinen in der Grünpflege.....	87
Tabelle 56: Mittlere jährliche Betriebsstunden in der Grünpflege	88
Tabelle 57: Lastfaktoren in der Grünpflege.....	88
Tabelle 58: Eingesetzte Motoren bei Sport- und Passagierbooten.....	89
Tabelle 59: Nennleistung bei Fahrgastschiffen im Jahr 2017.....	90
Tabelle 60: Bestände nach Maschinenkategorie bei Bootsmotoren für 2018.....	92
Tabelle 61: Mittlere Lebensdauer der Motoren in Fahrgastschiffen und Sportbooten.....	92
Tabelle 62: Mittlere jährliche Betriebsstunden bei Sport- und Passagierbooten.....	93
Tabelle 63: Lastfaktoren für Sport- und Passagierboote.....	93
Tabelle 64: Gegenüberstellung der Emissionen von NRMM und Straßenverkehr in Deutschland 2018 in Kilotonnen	95
Tabelle 65: Vergleich Endenergieverbrauch AG Energiebilanzen und TREMOD-MM für Deutschland 2018	101
Tabelle 66: Energieverbrauch der Bauwirtschaft.....	103
Tabelle 67: Vergleich der im Jahr 2018 geleisteten Betriebsstunden von Baumaschinen mit den Arbeitsstunden von Baumaschinenführern und Maschinisten im Baugewerbe	104

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BAFU	Bundesamt für Umwelt (Schweiz)
BC	Black Carbon (Feinstaub $\leq 2.5 \mu\text{m}$)
BRD	Bundesrepublik Deutschland
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Schweiz, seit 2006 Teil des BAFU)
ccm	Kubikzentimeter
CH ₄	Methan
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
COPERT	Computer programme to calculate emissions from road transport
DDR	Deutsche Demokratische Republik
DF	Degradationsfaktor (Verschlechterungsfaktor)
EC	Europäische Kommission
EEA	Europäische Umweltagentur
EF	Emissionsfaktor
EMEP	European Monitoring and Evaluation Programme
EU	Europäische Union
EUROMOT	European Association of Internal Combustion Engine Manufacturers
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (Sektor)
HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs
HC	Kohlenwasserstoff
ifeu	ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg
ISI	Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung
KBA	Kraftfahrtbundesamt
kW/kWh	Kilowatt/Kilowattstunde
KWF	Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik
LNG	Liquefied natural gas (Flüssigerdgas)
LPG	Liquified petroleum gas (Flüssiggasmischung aus Propan und Butan)
MWh	Megawattstunden
MWV	Mineralölwirtschaftsverband

Abkürzung	Bedeutung
N ₂ O	Distickstoffoxid (Lachgas)
NH ₃	Ammoniak
NO _x	Stickstoffoxide
NRE	Non-Road Engines
NRG	Non-Road Engines für Generatoren
NRMM	Non-Road Mobile Machinery
NRSC	Non Road Stationary Cycle
NRTC	Non Road Transient Cycle
PEMS	Portable Emission Measurement System
PM	Particulate Mass (Feinstaub)
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge
SO ₂	Schwefeldioxid
TAF	Transient Adjustment Factor
TREMOD-MM	Transport-Emissionsmodell für Mobile Maschinen
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
WSV	Wasser- und Schifffahrtsverwaltung
ZBBD	Zentrale Binnenschiffsbestandsdatei
ZKR	Zentralkommission für die Rheinschifffahrt
ZSE	Zentrales System Emissionen (Umweltbundesamt)
ZSKU	Zentralstelle Schiffsuntersuchungskommission/Schiffseichamt

Zusammenfassung

Mobile Maschinen und Geräte (auch NRMM für Non-Road Mobile Machinery) 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 heute daher relevant zur Emissions- und Immissionsbelastung in Deutschland bei. Da die europäischen Luftqualitätsgrenzwerte nach wie vor an einigen städtischen Messstellen überschritten werden, wurden auch mobile Maschinen zunehmend in die Luftreinhalteplanung einbezogen, z.B. durch die Luftqualitätsverordnung Baumaschinen des Landes Baden-Württemberg.

Zur Luftreinhalteplanung gehört auch die nationale Emissionsberichterstattung durch das Umweltbundesamt, welche für den Bereich der mobilen Maschinen und Geräte auf Grundlage des seit 2004 entwickelten Transport-Emissionsmodells für Mobile Maschinen (TREMOD-MM) durchgeführt wird. Dieser Bericht dokumentiert die für TREMOD-MM, Version 5.1 zugrundeliegenden Methoden, Daten und Ergebnisse.

Im Jahr 2019 wurden die Bestandsdaten einzelner Sektoren, soweit möglich, fortgeschrieben, die Emissionsfaktoren auf Grundlage der aktuellen Emissionsgrenzwerte und neuerer Messergebnisse aktualisiert sowie die Gesamtenergieverbräuche der Landwirtschaft und Bauwirtschaft plausibilisiert.

Ein weiterer Schwerpunkt dieses Berichts ist die vollständige Dokumentation aller verwendeten Daten in einer Veröffentlichung, welche zuletzt im Jahr 2004 vorlag. Daher werden auch ältere Datengrundlagen beschrieben, sofern keine aktuellen Anpassungen vorgenommen wurden.

Methodischer Ansatz in TREMOD-MM

TREMOD-MM ist ein szenarienfähiges Emissionsmodell, das in seiner Struktur der Kategorisierung der Gesetzgebung der Europäischen Union (EU) angepasst ist und durch die hohe Differenzierung eine detaillierte Analyse ermöglicht. Die betrachteten Bereiche ergänzen die in den übrigen TREMOD-Modulen berücksichtigten Verkehrsträger (Straßenverkehr, Eisenbahn, Binnenschifffahrt und Flugverkehr). Der Fokus von TREMOD-MM liegt daher nicht auf den üblicherweise als „Offroad“ bezeichneten Transportsektoren, die auch die Schiene umfassen, sondern auf dem Bereich der mobilen Maschinen, die üblicherweise Arbeitsgeräte sind und damit nicht dem Transport dienen (Ausnahme Fahrgastschiffe und Sportboote). Betrachtet werden die in Tabelle 1 zusammengefassten Bereiche.

Tabelle 1: Off-Road Sektoren nach EMEP/EEA und TREMOD-MM

Sektor in diesem Bericht	ZSE-Code/NFR Code	Bezeichnung EMEP/EEA
Landwirtschaft	1 A 4 c ii	Agriculture/Forestry/Fishing: Off -road vehicles & other machinery
Bauwirtschaft	1 A 2 g vii	Mobile Combustion in manufacturing industries and construction
Forstwirtschaft	1 A 4 c ii	Agriculture/Forestry/Fishing: Off -road vehicles & other machinery
Haushalt und Garten (Grünpflege)	1 A 4 b ii	Residential: Household and Gardening, Mobile
Fahrgastschiffe und Sportboote	1.A.5.b	Other, Mobile (inc. military, land based and recreational boats)

Sektor in diesem Bericht	ZSE-Code/NFR Code	Bezeichnung EMEP/EEA
Industrie/Sonstige	1 A 4 a ii	Commercial/institutional: Mobile

Quelle: EMEP/EEA (Winther / Dore, 2019). Anmerkung: *Im ZSE werden Fahrgastschiffe und Sportboote bisher nicht berücksichtigt.

Es werden die direkten Abgasemissionen für folgende Komponenten berechnet: CH₄, CO, CO₂, HC, N₂O, NH₃, NMHC, NO_x, Partikel, SO₂. Darüber hinaus können der Kraftstoffverbrauch (energetisch und massenbasiert) und die Maschinenleistung (in MWh) ermittelt werden. Bei Kohlenwasserstoffen werden zusätzlich zu den Abgasemissionen noch die Emissionen durch Verschüttung und Verdrängung während der Betankung (Betankungsemissionen) sowie die Verdunstungsemissionen (durch Temperaturschwankungen) berücksichtigt.

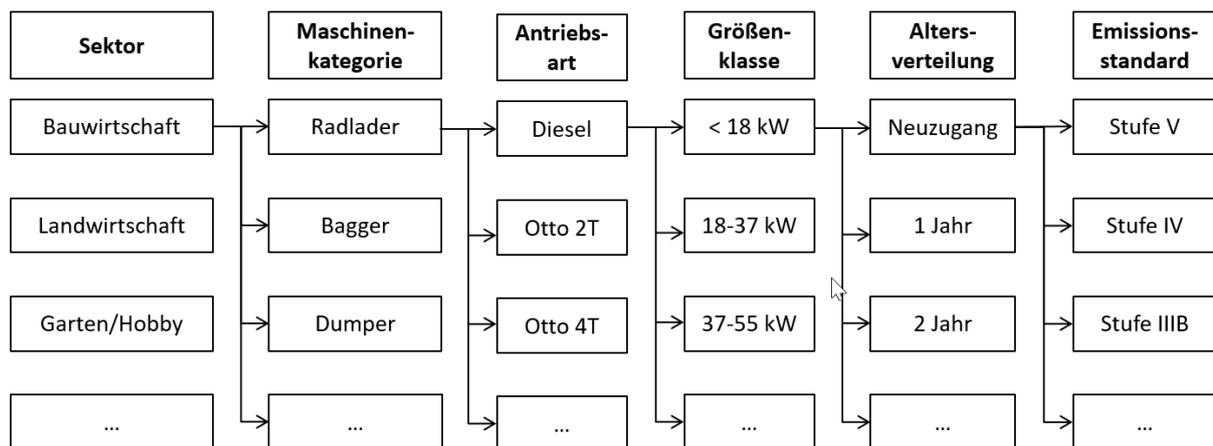
Die **Abgas-Emissionen** der im Off-Road-Sektor eingesetzten mobilen Geräte und Maschinen werden im Modell nach einem einheitlichen Rechenverfahren (siehe Formel 1) berechnet. Diese sogenannte „Bestandsmethode“ hat sich auch international zur Berechnung von Emissionen mobiler Maschinen und Geräte etabliert. Sie wird im Grundsatz analog zu dem Vorgehen im Handbuch Emissionsfaktoren (Notter et al., 2019), dem Berechnungsmodell der US Environmental Protection Agency (EPA) (NONROAD Modell in (US EPA, 2016) sowie von COPERT (Ntziachristos, / Samaras, 2019) durchgeführt.

Formel 1:	$E_A = \text{Anz} \times P \times Z \times \text{LF} \times \text{EF}$
mit	
E_A	Abgas Emissionen (einer Schicht, z.B. Traktoren 37-75 kW; Baujahr 1990, Bezugsjahr 2000)
Anz	Anzahl/Bestand von Geräten/Maschinen/Fahrzeugen
P	Mittlere Nennleistung (für diese Schicht)
Z	Zahl der spezifischen Betriebsstunden
LF	typischer mittlerer Lastfaktor (<1)
EF	Emissionsfaktor (g/kWh)

Die Werte für die berücksichtigten Parameter werden im Modell in möglichst hoher Differenzierung (nach Alter, Antrieb, Nennleistungsklasse etc.) erfasst. Damit ist es dann möglich differenzierte Aussagen über die wichtigsten Emittentengruppen zu treffen und damit Maßnahmen gezielter planen zu können.

Bei maximaler Differenzierung wird dabei im berücksichtigten Sektor (z.B. Landwirtschaft) die Art und Anzahl der eingesetzten Maschinen (z.B. Traktoren) ermittelt. Für jede dieser Maschinen wird berücksichtigt, welche Motoren eingesetzt werden (Leistungsklassen/ Hubraumklassen). Für diese Motorenklassen wird dann die Altersstruktur bestimmt – somit lassen sich den Jahrgängen der Motoren die jeweiligen emissionsrelevanten Grenzwertstufen zuordnen. Damit liegen der Berechnung hoch differenzierte Daten zugrunde (siehe Abbildung 1).

Abbildung 1: Schema zur Differenzierung der Daten in TREMOD-MM



Der Altersverteilung des Maschinenbestandes kommt eine besondere Bedeutung zu, weil damit einerseits eine Zuordnung zu einer Emissionsstufe erfolgt die für das Emissionsverhalten zentral ist. Zusätzlich wird eine Abnahme der Nutzungsintensität mit dem Maschinenalter unterstellt. Das Berechnungsschema erlaubt somit eine Modellierung von Änderungen des Emissionsverhaltes der Motoren einer bestimmten Kategorie, besonders durch

- ▶ eine Umschichtung der Flotte (Außerbetriebnahme alter Geräte und Kauf neuer Geräte),
- ▶ Einfluss der Gesetzgebung und
- ▶ das Alterungsverhalten der Motoren.

Datenquellen für TREMOD-MM

Alle Daten bis 2018 wurden, soweit möglich, aus Statistiken und eigenen Erhebungen abgeleitet. Lagen solche Daten nicht vor, wurden Schätzungen auf Basis verschiedener Datenquellen vorgenommen:

- ▶ **Bestand:** Der Maschinenbestand konnte nur teilweise über statistische Daten erfasst werden. Für die Landwirtschaft liegen dabei jährliche Daten seitens des Kraftfahrtbundesamtes (KBA) vor, für die Bauwirtschaft werden statistische Daten für das Jahr 2010 und 2016 auf Basis der Verkaufszahlen interpoliert und fortgeschrieben. In anderen Bereichen sind keine Realdaten verfügbar, so dass auf Basis von Expertengesprächen und Literaturrecherchen Annahmen über die Entwicklung getroffen wurden. Da in der Regel keine nach Alter differenzierten Daten vorliegen, erfolgt eine Zuordnung des Bestandes nach Maschinenalter für die meisten Maschinen anhand einer generischen Altersverteilungskurve sowie Annahmen zur mittleren Lebenszeit.
- ▶ **Nennleistung:** Die Bestände werden nach Leistungsklassen differenziert. In der Regel wird von einer mittleren durchschnittlichen Nennleistung innerhalb der Grenzen einer Leistungsklasse ausgegangen. Gibt es detaillierte Daten über Abweichungen von dieser mittleren Nennleistung innerhalb der Leistungsklasse und die zeitliche Entwicklung der mittleren Nennleistung einer bestimmten Maschinenkategorie, werden diese Werte verwendet.

- ▶ **Nutzungsdauer:** Für jede Maschinenkategorie wird in den entsprechenden Kapiteln, differenziert nach Größenklasse und Antrieb, eine mittlere jährliche Nutzungsdauer ermittelt. Es wird davon ausgegangen, dass die jährliche Nutzungsdauer der Maschinen mit ihrem Alter abnimmt. Dies wird mit einer altersabhängigen Nutzungsfunktion abgebildet.
- ▶ **Lastfaktor:** Die Nutzung des Motors wird vereinfachend durch den Lastfaktor beschrieben. Der Lastfaktor beschreibt dabei das Verhältnis der durchschnittlichen Leistung der betrachteten Maschinen für einen bestimmten Einsatzzweck zu ihrer Nennleistung.
- ▶ **Emissionsfaktor:** Emissionsfaktoren für Abgasemissionen wurden für verschiedene kW-/Hubraum-Klassen, Antriebsarten (Diesel, Otto, Gas) und Emissionsgrenzwertstufen abgeleitet. Basis für die Kategorisierung bildet die europäische Gesetzgebung (Richtlinie 97/68/EC und folgende).

Emissionsfaktoren in TREMOD-MM

Die Emissionsfaktoren in TREMOD-MM bilden die Emissionen im realen Betrieb ab. Diese werden entsprechend der Formel 2 berechnet.

Formel 2: $EF = EF_B \times DF_A \times TAF$

mit

EF_B	Basisemissionsfaktor für neue Geräte im Prüfzyklus gemäß Typgenehmigung
DF_A	Verschlechterungsfaktor für die Berücksichtigung der altersabhängigen Änderungen
TAF	Anpassungsfaktor zwischen stationären Zyklus und transienten Zyklus (Transient Adjustment Factor)

Basisemissionsfaktor

Der Basisemissionsfaktor gilt für neue Motoren unabhängig von ihrem Nutzungstyp (z.B. Bagger oder Traktor). Er wird nach den Merkmalen

- ▶ Motorkonzept (Diesel, Otto 2-Takt, Otto 4-Takt, Gas)
- ▶ Treibstoffart (Diesel, Benzin, Flüssiggas),
- ▶ Leistungs- bzw. Hubraumklasse und
- ▶ Grenzwertstufe

differenziert.

Transienter Anpassungsfaktor

Der Transiente Anpassungsfaktor (TAF) korrigiert die Emissionsfaktoren der stationären Anwendung an einen dynamischen Lastverlauf. Er unterscheidet sich je nach Maschinentyp (z.B. Bagger, Lader, Landwirtschaftliche Geräte) da die gesetzlichen Prüfzyklen Non Road Stationary Cycle (NRSC) und Non Road Transient Cycle (NRTC) nur ein generalisiertes Lastprofil¹ für alle

¹ Zeitlicher Verlauf von Motorleistung und Drehzahl

Anwendungen vorgeben. Dieses Lastprofil kann allerdings im realen Betrieb stark variieren und damit auch die Höhe der Emissionsfaktoren beeinflussen. Eine Anwendung des Transienten Anpassungsfaktors erfolgt bis zur Stufe IIIA, da ab Stufe IIIB bereits im NRTC getestet wird.

Altersabhängiger Änderungsfaktor

Die mögliche Abhängigkeit der Emissionen vom Alter bzw. der Nutzungszeit der eingesetzten Motoren wird im Modell durch einen altersabhängigen Änderungsfaktor berücksichtigt. Mit der im Modell hinterlegten Altersstruktur der einzelnen Maschinenkategorien kann die Auswirkung des Maschinenalters auf das Emissionsverhalten abgebildet werden.

Betrachtete Maschinen und Datenlage in TREMOD-MM

Es werden die folgenden Maschinen in TREMOD-MM betrachtet:

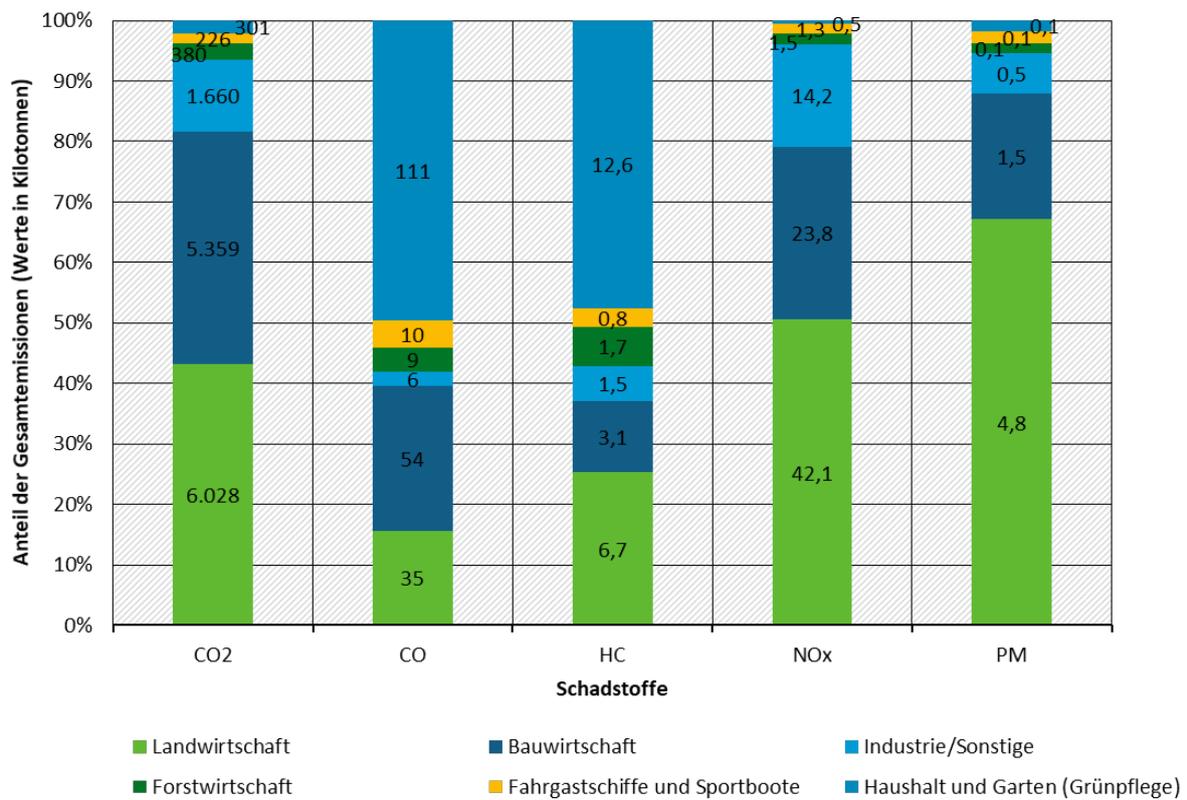
- ▶ **Landwirtschaft:** In der Landwirtschaft werden hauptsächlich dieselbetriebene Zugmaschinen (Ackerschlepper und Geräteträger), Mähdrescher sowie teilweise Rad- und Teleskoplader eingesetzt. Die ausschließlich in der Forstwirtschaft eingesetzten Forstschlepper werden dagegen in dem Sektor „Forstwirtschaft“ berücksichtigt. Die Leistungsbandbreite der eingesetzten Motoren ist dabei groß und reicht von sehr kleinen Ackerschleppern mit einer Leistung <18 kW bis zu großen Zugmaschinen und Mähdreschern mit über 130 kW. Die Bestandsdaten für die Zugmaschinen wurden zuletzt für das Bezugsjahr 2018 auf Basis von Daten des KBA aktualisiert. Für Mähdrescher werden Absatzdaten bis zum Jahr 2008 und anschließende Prognosen berücksichtigt. In der Landwirtschaft eingesetzte Rad- und Teleskoplader entstammen aus Hochrechnungen von Absatzzahlen bis zum Jahr 2016. Die Betriebsstunden wurden für das Bezugsjahr 2009 auf Basis von Gebrauchtbörsendaten und Schätzwerten aktualisiert.
- ▶ **Bauwirtschaft:** Baumaschinen werden im Straßen-, Hoch- und Tiefbau eingesetzt und variieren je nach Einsatzgebiet stark in ihrer Größe und Leistung. In der Bauwirtschaft werden zum größten Teil dieselbetriebene und nur wenige benzinbetriebene Maschinen eingesetzt. Kräne, Pumpen, Schweißgeräte und Kühleinheiten besitzen zum größten Teil einen Elektroantrieb und tragen daher nicht zu Luftschadstoffemissionen bei. Die Bestandsdaten für die Bauwirtschaft wurden zuletzt für das Bezugsjahr 2016 von ifeu aktualisiert und reflektieren damit einen aktuellen Stand. Die Differenzierung nach Leistungsklassen reflektiert den Stand für 2010 und die Betriebsstunden wurden für das Bezugsjahr 2012 auf Basis von empirischen Daten ermittelt.
- ▶ **Industrie/Sonstige:** In diesem Bereich werden Generatoren und Stapler zusammengefasst. Während Generatoren generell als dieselbetrieben angenommen werden, wird bei den Staplern zwischen Diesel und Gas unterschieden. Elektrische Stapler werden nicht berücksichtigt, da diese keine Auspuffemissionen haben und Vorkettenemission bisher in TREMOD-MM nicht erfasst werden. Die in der Industrie eingesetzten Maschinen werden hauptsächlich auf dem Betriebsgelände verwendet. Die Bestandsdaten für Generatoren wurden zuletzt für das Bezugsjahr 2016 aktualisiert und reflektieren damit einen aktuellen Stand. Die Bestandsdaten für Stapler beruhen jedoch auf alten Datenquellen und sollten aktualisiert werden. Die Betriebsstunden wurden für das Bezugsjahr 2012 auf Basis von empirischen Daten ermittelt.

- ▶ **Forstwirtschaft:** Die Forstwirtschaft beinhaltet neben der klassischen Holzwirtschaft auch die Aufforstung und Pflege des Waldes sowie die Instandhaltung von Wegen und andere Aufgaben. Die Maschinen, die dabei zum Einsatz kommen, sind handgehaltene Motor- bzw. Kettensägen und große Forstmaschinen zur Holzernte. Kleinere Arbeiten wie Transport und Pflege im Wald werden meistens durch Schlepper ausgeführt. Hierbei gibt es speziell ausgerüstete Forstschlepper sowie gewöhnliche Ackerschlepper. Die großen Maschinen sind dabei ausschließlich dieselbetrieben und haben kleine Bestände, während es sich bei den handgehaltenen Motorsägen um 2-Takt Geräte mit großem Bestand handelt. Die Bestandsdaten für die größeren Forstmaschinen wurden zuletzt für das Bezugsjahr 2008 aktualisiert und mit Absatzdaten bis zum Jahr 2017 grob abgeglichen. Für Motorsägen liegen Annahmen zu Absatzzahlen bis 2003 zugrunde. Die Betriebsstunden wurden für das Bezugsjahr 2009 auf Basis von Schätzwerten aktualisiert.
- ▶ **Grünpflege:** Im privaten Bereich werden zur Gartenpflege benzin- und elektrisch betriebene Geräte eingesetzt. Diese Geräte haben im Allgemeinen eine kleinere Leistung als die Geräte in den anderen Kategorien. Aus der hohen Anzahl der Gärten ergibt sich jedoch ein hoher Gerätebestand. Weiterhin gibt es hier auch viele professionell genutzte Geräte mit einer deutlich höheren jährlichen Nutzungsdauer. Private Bestände und verschiedene Arten professioneller Nutzung des gleichen Maschinentyps werden daher als unterschiedliche Maschinenkategorien behandelt. Die Bestandsdaten im Bereich Grünpflege wurden zuletzt für das Bezugsjahr 2008 überprüft und sollten daher aktualisiert werden. Auch die Betriebsstunden basieren auf Literaturquellen von 2008 und sollten daher aktualisiert werden.
- ▶ **Fahrgastschiffe und Sportboote:** Neben den großen dieselbetriebenen Fahrgastschiffen werden überwiegend privat genutzte Motorboote (meist Sport- und Freizeitboote) berücksichtigt. Hier werden Innen- und Außenbordmotoren unterschieden. Während Außenbordmotoren fast ausschließlich mit Benzin betrieben werden, gibt es bei den Innenbordmotoren auch einen großen Anteil an Dieselmotoren. Jetski werden nicht betrachtet, da sie für Deutschland keine große Bedeutung haben. Der Sektor Gütertransport mit Binnenschiffen wird schon seit einiger Zeit im TREMOD Transportmodul bilanziert und deshalb hier nicht aufgeführt. Bestandsdaten für Fahrgastschiffe liegen bis einschließlich des Bezugsjahres 2017 vor. Sportbootbestände basieren auf älteren Verkaufszahlen und daraus getroffenen Hochrechnungen und sollten daher aktualisiert werden. Die Betriebsstunden basieren auf älteren Literaturquellen und sollten daher ebenfalls aktualisiert werden.

Ergebnisse aus TREMOD-MM

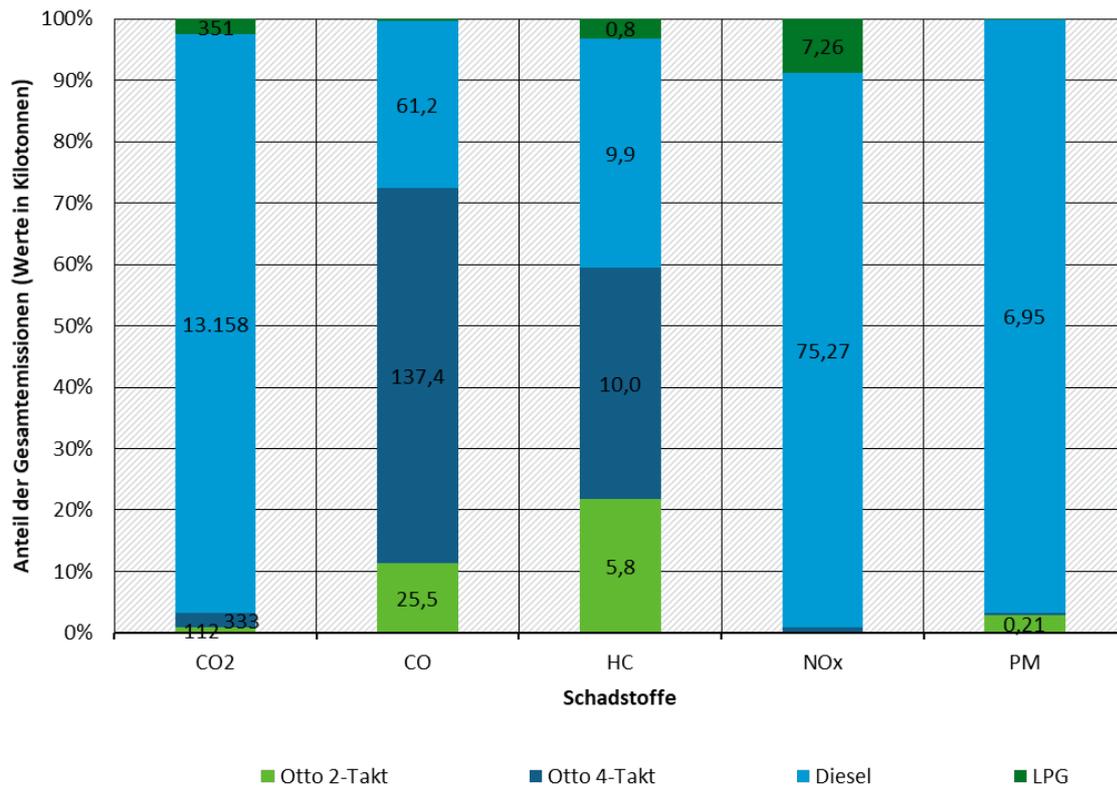
Abbildung 2 zeigt die absolute Höhe der Emissionen durch NRMM und die Anteile der jeweiligen Sektoren in Deutschland für das Jahr 2018. Die Dieselmotoren der Land- und Bauwirtschaft sind zusammen für etwa 80 % der CO₂-Emissionen mobiler Maschinen verantwortlich. Auch bei den NO_x- und PM-Emissionen dominieren diese beiden Sektoren, wobei der Anteil der Landwirtschaft aufgrund der teilweise noch sehr alten Dieseltraktoren hier höher ist als der Anteil der Baumaschinen. Geräte aus dem Bereich der Grünpflege, die überwiegend benzinbetrieben sind, haben mit fast 50 % hingegen den größten Anteil an den CO- und HC-Emissionen.

Abbildung 2: Anteil der Schadstoffemissionen mobiler Maschinen in Deutschland 2018 nach Sektoren



Die unterschiedliche Verteilung der Emissionen auf die Sektoren ist deutlich von den dort verwendeten Antriebsarten beeinflusst, wie Abbildung 3 zeigt. Demnach tragen benzinbetriebene Geräte, trotz eines geringen Anteils am Energieverbrauch und den direkt damit korrelierenden CO₂-Emissionen, überproportional zu den CO- und HC-Emissionen bei.

Abbildung 3: Anteile der Schadstoffemissionen mobiler Maschinen in Deutschland 2018 nach Motortypen und Energiearten



Die absoluten Gesamtemissionen mobiler Maschinen und Geräte sind in Tabelle 2 den Gesamtemissionen des Straßenverkehrs in Deutschland gegenübergestellt. Die Emissionen der mobilen Maschinen und Geräte sind im Vergleich mit denen des Straßenverkehrs bei den Luftschadstoffen CO, HC, NO_x und insbesondere PM deutlich höher als bei den direkt verbrauchsabhängigen CO₂-Emissionen. Der Hauptgrund für diesen überproportionalen Beitrag der mobilen Maschinen und Geräte zu den Schadstoffemissionen ist die spätere Einführung von Emissionsstandards für mobile Maschinen. Insbesondere durch die vergleichsweise strengen Grenzwerte der Abgasstufen IV sowie der nochmaligen Verschärfung und Ausweitung auf weitere Motorenklassen durch Stufe V ist jedoch von einer zukünftigen Reduktion der Emissionen mobiler Maschinen auszugehen.

Tabelle 2: Gegenüberstellung der Emissionen von NRMM und Straßenverkehr in Deutschland 2018 in Kilotonnen

Verkehrsart	CO ₂	CO	HC	NO _x	PM
NRMM	13.954	225	27	83	7,2
Straßenverkehr	184.540	1.094	110	536	8,3
Verhältnis NRMM/Straße	8 %	21 %	24 %	16 %	86 %

Quelle: NRMM: TREMOD-MM 5.1, Straßenverkehr: TREMOD 6.03 (Territorialprinzip, ohne Energiebereitstellung)

In der zeitlichen Entwicklung der Emissionen aller NRMM in Deutschland von 1980 bis 2030 zeigen sich mit den Ergebnissen aus TREMOD-MM 5.1 folgende Trends:

- ▶ Die CO₂-Emissionen zeigen einige Schwankungen, sind aber insgesamt von 1980 bis 2018 um 14 % angestiegen. Zukünftig werden annähernd konstante Emissionen erwartet, was jedoch dadurch bedingt ist, dass das Trendszenario in TREMOD-MM in erster Linie die Effekte der Abgasgesetzgebung abbildet. Mögliche Entwicklungen bei der Anzahl von Maschinen, Betriebsstunden, sowie der Energieeffizienz, alternativen Antrieben und CO₂-armen oder CO₂-neutralen Energieträgern sind derzeit nicht berücksichtigt.
- ▶ Die HC-Emissionen sind seit den 1990er Jahren kontinuierlich gesunken. Dies liegt an der Einführung der Abgasgrenzwerte und einer Verschiebung von Otto 2-Takt- hin zu 4-Takt-Motoren. Insgesamt beträgt der Rückgang von 1980 bis 2018 rund 64 %. Bis zum Jahr 2030 wird eine weitere Reduktion der HC-Emissionen um 25 % gegenüber 2018 erwartet.
- ▶ Die CO-Emissionen sind ebenfalls aufgrund strengerer Abgasgrenzwerte seit Mitte der 1990er Jahren gesunken. Insgesamt beträgt der Rückgang von 1980 bis 2018 in etwa 21 %. Bis zum Jahr 2030 wird ein Rückgang der CO-Emissionen um weitere 20 % gegenüber 2018 erwartet, wobei sich insbesondere die Einführung der Stufe V ab 2019 bemerkbar macht.
- ▶ Die NO_x-Emissionen stiegen bis zum Jahr 2000 an und begannen erst mit Einführung der Stufe I zu sinken. Dieser Trend setzte sich jedoch durch die Verschärfung der Emissionsstandards kontinuierlich fort. Insgesamt kommt es daher von 1980 bis 2018 zu einem Rückgang um 48 %. Bis zum Jahr 2030 wird ein weiterer Rückgang der NO_x-Emissionen um 49 % gegenüber 2018 erwartet.
- ▶ Die Partikelmasse-Emissionen (PM) zeigen seit den 1990er Jahren einen Rückgang, welcher sich ebenfalls durch die Einführung der Abgasgrenzwerte und einer Verschiebung von Otto 2-Takt- hin zu 4-Takt-Motoren fortsetzt. Insgesamt beträgt der Rückgang von 1980 bis 2018 ca. 79 %. Bis zum Jahr 2030 wird ein Rückgang der PM-Emissionen um weitere 69 % gegenüber 2018 erwartet.

Gegenüber früheren Versionen von TREMOD-MM zeigt die Version TREMOD-MM 5.1 vergleichsweise geringe Unterschiede im absoluten Emissionsniveau.

Summary

Non-road mobile machinery is an important source of engine emissions, but their emissions were regulated much later than those of road vehicles. Particulate and nitrogen oxide emissions from non-road mobile machinery and equipment therefore make a relevant contribution to total emissions and ambient air concentrations in Germany today. As the European air quality limits are still being exceeded at some urban hot spots, mobile machinery have also been increasingly included in clean air planning, e.g. due to the “Luftqualitätsverordnung Baumaschinen” in Baden-Württemberg.

Air pollution control also includes national emission reporting by the German Federal Environment Agency (UBA), which is carried out for mobile machinery based on the Transport Emission Model for Mobile Machinery (TREMOD-MM) developed since 2004. This report documents the underlying methods, data and results for TREMOD-MM, version 5.1.

In 2019, the inventory data of individual sectors were updated as far as possible, the emission factors were updated on the basis of the current emission limits and more recent measurement results, and the total energy consumption of agriculture and the construction industry was checked for plausibility.

A further focus of this report is the complete documentation of all data used in the model in one publication, which was last available in 2004. For this reason, older data are also described, unless current adjustments have been made.

Methodological approach in TREMOD-MM

TREMOD-MM is a scenario-capable emission model whose structure is adapted to the categorisation of the European Union (EU) legislation and which, due to its high degree of differentiation, allows detailed analysis. The areas considered complement the modes of transport considered in the other TREMOD modules (road, rail, inland waterways and air transport). The focus of TREMOD-MM is therefore not on the transport sectors usually referred to as "off-road", which also includes rail, but on mobile machinery, which is usually working equipment and therefore not used for transport (except passenger ships and recreational craft). The sectors considered are those summarised in Tabelle 3.

Tabelle 3: Non-road sectors according to EMEP/EEA and TREMOD-MM

Sector TREMOD-MM	ZSE-Code/NFR Code	Sector in EMEP/EEA
Agriculture	1 A 4 c ii	Agriculture/Forestry/Fishing: Off -road vehicles & other machinery
Construction	1 A 2 g vii	Mobile Combustion in manufacturing industries and construction
Forestry	1 A 4 c ii	Agriculture/Forestry/Fishing: Off -road vehicles & other machinery
Household and Gardening	1 A 4 b ii	Residential: Household and Gardening, Mobile
Passenger ships and recreational boats	1.A.5.b	Other, Mobile (inc. military, land based and recreational boats)
Industry/Other	1 A 4 a ii	Commercial/institutional: Mobile

Source: EMEP/EEA (Winther / Dore, 2019) Note: *The ZSE does currently not include Passenger ships and recreational boats.

The direct exhaust emissions are calculated for the following components: CH₄, CO, CO₂, HC, N₂O, NH₃, NMHC, NO_x, PM, SO₂. In addition, fuel consumption (energy and mass based) and engine power (in MWh) can be determined. For hydrocarbons, in addition to exhaust emissions, emissions due to spillage and displacement during refuelling (refuelling emissions) and evaporative emissions (due to temperature variations) are also taken into account.

The exhaust emissions of non-road mobile equipment used in the off-road sector are calculated in the model using a uniform calculation method (see Formel 3). This so-called "inventory method" has also become established internationally for calculating emissions from non-road mobile machinery. In principle, it is carried out analogously to the procedure in the Handbook of Emission Factors (Notter et al., 2019), the EPA calculation model (NONROAD model in (US EPA, 2016) and COPERT (Ntziachristos, / Samaras, 2019).

Formel 3: $E_E = St \times P \times h \times LF \times EF$

with

E_E Exhaust emissions (of one layer, e.g. tractors 37-75 kW; built 1990, base year 2000)

St Stock of machinery

P Average power (for this layer)

h Specific operation hours

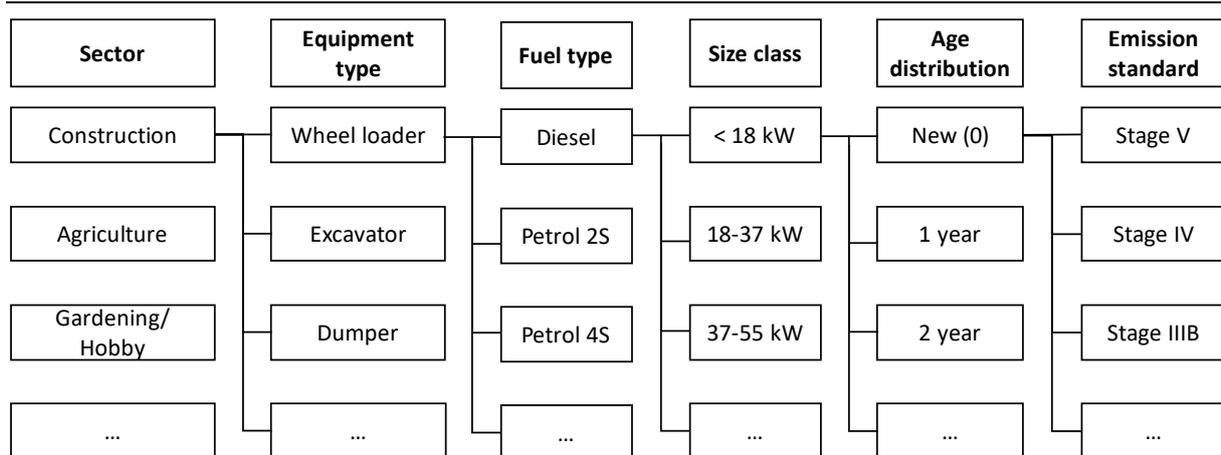
LF Typical average load factor (<1)

EF Emission factor (g/kWh)

The values for the considered parameters are integrated in the model in a high differentiation (according to age, drive, rated power class, etc.). This makes it possible to make differentiated statements about the most important groups of polluters and allows for further analysis of appropriate measures.

With maximum differentiation, the type and number of machines used (e.g. tractors) in the sector considered (e.g. agriculture) is determined. For each of these machines, the engines used are taken into account (power classes/capacity classes). For these engine classes, the age structure is then determined - thus, the respective emission-relevant limit values can be assigned to the years of manufacture of the engines. The calculation is thus based on highly differentiated data (see also Abbildung 4).

Abbildung 4: Schematic differentiation of data in TREMOD-MM



The age distribution of the machinery stock is of particular importance, because on the one hand it provides an allocation to an emission level that is central to the emission behaviour. On the other hand, it is assumed that the intensity of use decreases with the age of machinery. The calculation scheme thus allows a modelling of changes in the emission behaviour of engines of a certain category, especially by

- ▶ a restructuring of the fleet (scrapping of old equipment and purchase of new equipment),
- ▶ influence of legislation and
- ▶ the ageing behaviour of the engines.

Data sources for TREMOD-MM

All data up to 2018 were derived as far as possible from statistics and own surveys. If such data were not available, estimates were made on the basis of various data sources:

- ▶ **Stock:** The machinery stock could only be partially covered by statistical data. For agriculture, annual data is available from the German Federal Motor Transport Authority (KBA), for the construction industry statistical data for 2010 and 2016 are interpolated and updated on the basis of sales figures. In other areas, no statistical data are available, so assumptions about developments have been made on the basis of expert judgement and literature research. As there is usually no data differentiated by age, the total stock is differentiated by age for most machinery using a generic model curve.
- ▶ **Rated power:** The stock is further differentiated by power classes. As a rule, a mean average rated output is assumed within the limits of a power class. If there are detailed data on deviations from this average nominal output within the power class and the development over time for a specific type of machinery, these values are used instead.
- ▶ **Operational hours:** For each machine category, average annual operation hours are determined in the corresponding chapters, differentiated by size class and engine type. It is assumed that the annual useful life of machinery decreases with age. This is represented by an age-dependent utilisation function.

- ▶ **Load factor:** The use of the engine is described in a simplified way by the load factor. The load factor describes the ratio between the average power of the machines for a specific application and their rated power. In principle, load factors can also change over time, which can be taken into account via a correction factor.
- ▶ **Emission factor:** Emission factors for exhaust emissions have been derived for different power/capacity classes, engine types (diesel, petrol, gas) and emission limit value stages. The basis for the categorisation is the current European legislation.

Emission factors in TREMOD-MM

The emission factors in TREMOD-MM reflect the emissions in real operation and are calculated according to Formel 4.

Formel 4: $EF = EF_B \times DF_A \times TAF$

with

EF_B Base line emission factor for new machinery according to type approval

DF_A Degradation factor to take into account age dependent changes in the emission behaviour

TAF Adjustment factor between stationary cycle and transient use
(Transient Adjustment Factor)

Base line emission factors

The base line emission factor is assigned to all new engines independent of the machinery (e.g. excavator or tractor). It is differentiated by

- ▶ Engine type (Compressed ignition, spark ignition 2-stroke, spark ignition 4-stroke)
- ▶ Fuel type (Diesel, gasoline, liquefied petroleum gas),
- ▶ Class of power or capacity and
- ▶ Emission stage.

Transient adjustment factor

The Transient adjustment factor (TAF) corrects the emission factors of the stationary application to a dynamic load curve. It differs depending on the type of machine (e.g. excavator, loader, and agricultural equipment) as the statutory test cycles Non Road Stationary Cycle (NRSC) and Non Road Transient Cycle (NRTC) only provide a generalized load profile² for all applications. However, this load profile can vary considerably in real operation and thus also influence the level of emission factors. The transient adjustment factor is applied up to level IIIA since from level IIIB onwards, testing is also undertaken in the NRTC.

Deterioration factor

The dependence of emissions on the age or service life of the engines is taken into account in the model by an age-dependent deterioration factor. With the age structure of the individual

² Engine power and engine speed profile

machine categories in the model, the effect of machine age on emission behaviour can be taken into account.

Machinery and data situation in TREMOD-MM

The following machines are considered in TREMOD-MM:

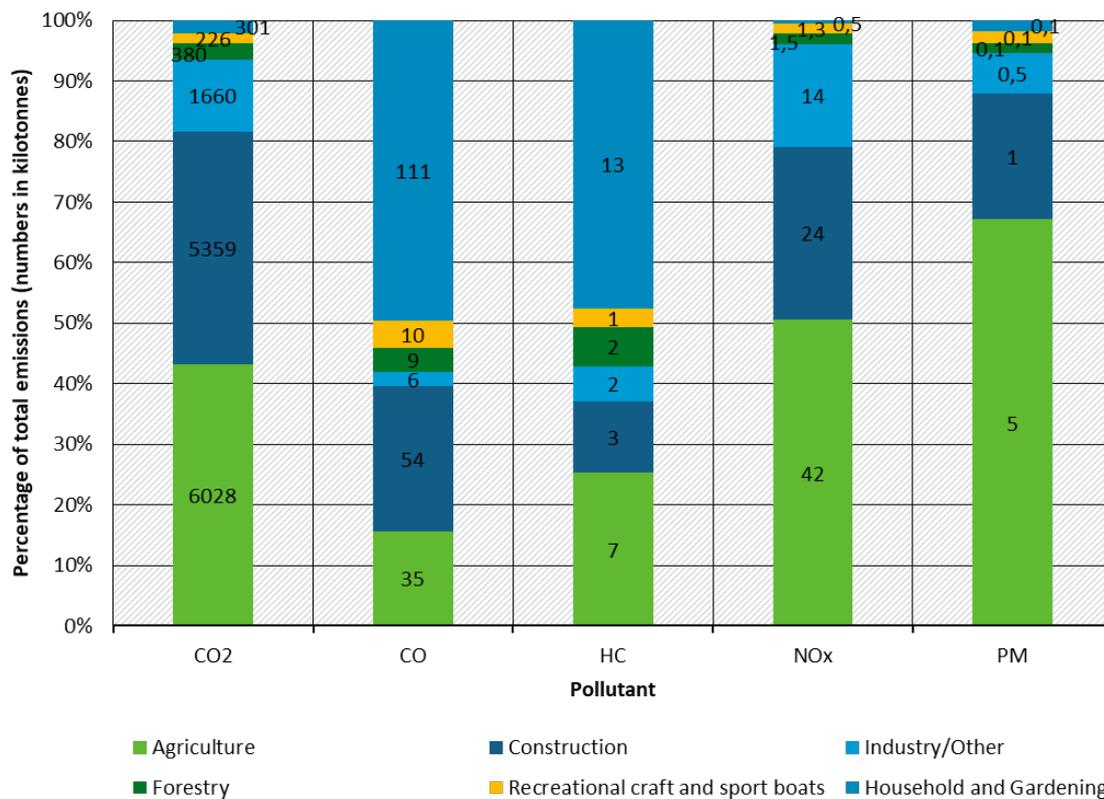
- ▶ **Agriculture:** In agriculture, mainly diesel-powered tractors (farm tractors and carriers), combine harvesters and partly wheel loaders and telescopic handlers are used. Forestry tractors used exclusively in forestry are included in the "forestry" sector. The power range of the engines used is wide, from very small agricultural tractors with a power of <18 kW to large tractors and combine harvesters with over 130 kW. The inventory data for the tractors were last updated for the reference year 2018 on the basis of data from the KBA. For combine harvesters, sales data up to 2008 and subsequent forecasts are taken into account. Wheel loaders and telescopic handlers used in agriculture are derived from extrapolations of sales figures up to 2016. The operating hours were updated for the reference year 2009 on the basis of resale data and estimated values.
- ▶ **Construction industry:** Construction machinery is used in road construction, building construction and civil engineering and varies greatly in size and power depending on the area of application. The construction industry uses mostly diesel-powered machines and only a few gasoline-powered machines. Trucks are not considered, as they are already included in road traffic. Cranes, pumps, welding equipment and cooling units are mostly electrically powered and therefore do not contribute to air pollutant emissions. The inventory data for the construction industry were last updated for the reference year 2016. The differentiation by power classes reflects the status for 2010 and the operating hours were determined for the reference year 2012 on the basis of empirical data.
- ▶ **Industry/Other:** This area includes generators and forklifts. While generators are generally assumed to be diesel-powered, a distinction is made between diesel and gas powered forklifts. Electric forklifts are not considered, as they have no exhaust emissions. The machines used in industry are mainly used on company premises. The inventory data for generators were last updated for the reference year 2016. The inventory data for forklifts, however, is currently based on older data sources. The operating hours were determined for the reference year 2012 on the basis of empirical data.
- ▶ **Forestry:** In addition to the traditional timber industry, forestry includes afforestation and care of the forest, as well as the maintenance of paths and other tasks. The machines used are hand-held chainsaws and large forestry machines for timber harvesting. Smaller jobs such as transport and maintenance in the forest are usually carried out by tractors. There are specially equipped forestry tractors and ordinary agricultural tractors. The large machines are exclusively diesel-powered and have small stocks, while the hand-held chainsaws have 2-stroke engines and exist in large stocks. The inventory data for the larger forestry machines were last updated for the reference year 2008 and roughly compared with sales data up to 2017. For chainsaws, assumptions are based on sales figures up to 2003. Operating hours were updated for 2009 based on estimates.

- ▶ **Household and gardening:** In the private sector, petrol and electrically powered equipment is used for garden maintenance. These appliances generally have a lower output than the appliances in the other categories. However, the large number of private gardens results in a high stock of equipment. Furthermore, there are also many professionally used devices with a significantly higher annual service life. Private stocks and different types of professional application which use the same type of machinery are therefore treated as different categories of machinery. The stock data in the field of gardening were last reviewed for the reference year 2008. Operating hours are also based on 2008 literature sources.
- ▶ **Passenger ships and recreational boats:** In addition to large diesel-powered passenger ships, mainly privately used boats (mostly recreational) are considered. A distinction is made here between inboard and outboard engines. While outboard engines are almost exclusively gasoline powered, there is also a large share of inboard diesel. Jet skis are not considered, as they are not of high relevance in Germany. The sector of freight transport by inland vessels has been included in the TREMOD transport module for some time and is therefore not considered in TREMOD-MM. Inventory data for passenger ships are available up to the reference year 2017. The recreational boats inventory is based on older sales figures and further extrapolations. The operating hours are also based on older literature sources.

Results from TREMOD-MM

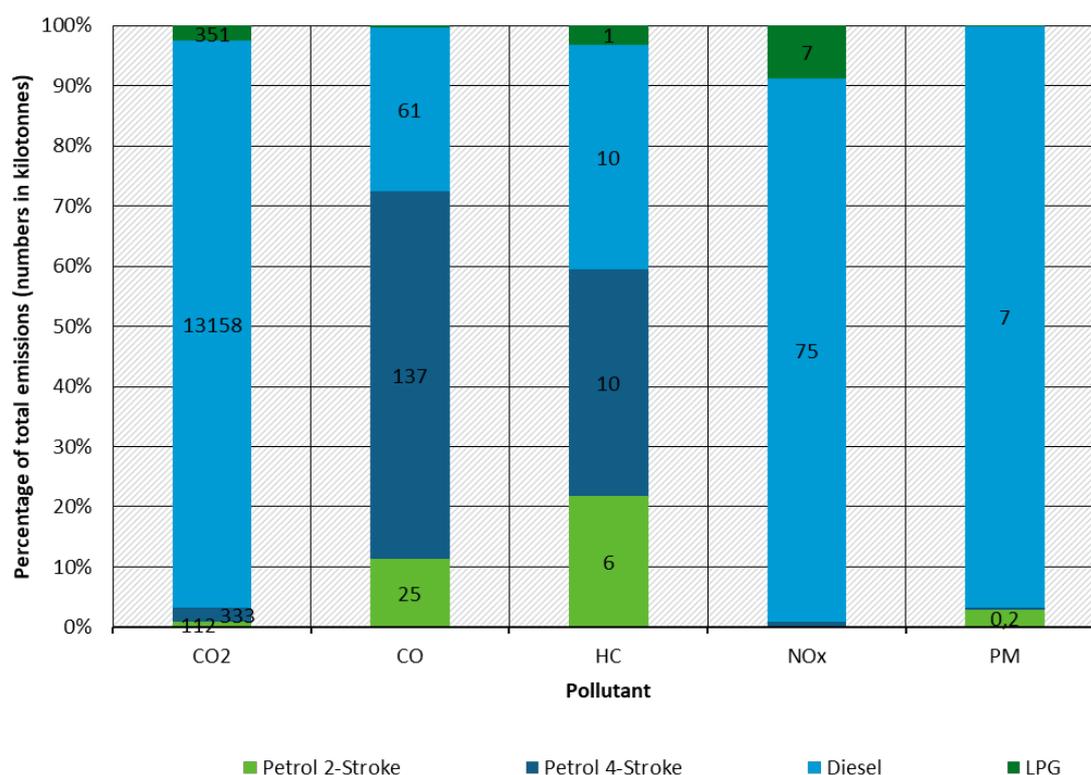
Abbildung 5 shows the absolute level of emissions from NRMM and the shares of the respective sectors in Germany for the year 2018. Diesel engines in the agricultural and construction industries together account for around 80 % of CO₂ emissions from non-road mobile machinery. These two sectors also dominate in NO_x and PM emissions, although the share of agriculture is higher than the share of construction machinery due to the diesel tractors, some of which are very old. On the other hand, equipment from the household and gardening sector, which is predominantly petrol-driven, accounts for the largest share of CO and HC emissions, at almost 50 %.

Abbildung 5: Results for pollutant emissions of non-road mobile machinery in Germany in 2018 by sectors



The different distribution of emissions among the sectors correlates accordingly with the engine types, as Abbildung 6 illustrate. According to this, gasoline-powered appliances contribute disproportionately to CO and HC emissions, despite their low share of energy consumption and the directly correlating CO₂ emissions.

Abbildung 6: Results for pollutant emissions of non-road mobile machinery in Germany in 2018 by engine and fuel type



The absolute total emissions of non-road mobile machinery are compared in Tabelle 4 with the total emissions from road transport in Germany. The emissions of non-road mobile machinery are significantly higher for the air pollutants CO, HC, NO_x and especially PM than for CO₂ emissions which are directly related to consumption. The main reason for this disproportionate contribution of non-road mobile machinery to pollutant emissions is the later introduction of emission standards for mobile machinery. However, a future reduction in emissions from non-road mobile machinery can be expected, in particular due to the comparatively strict limits of emission stage IV and the further tightening and extension to other engine classes through stage V.

Tabelle 4: Comparison of emissions from NRMM with road transport emissions in Germany 2018 in kilotons

Sector	CO ₂	CO	HC	NO _x	PM
NRMM	13.954	225	27	83	7,2
Road transport	184.540	1.094	110	536	8,3
Ratio NRMM/Road	8 %	21 %	24 %	16 %	86 %

Source: NRMM: TREMOD-MM 5.1, Road transport: TREMOD 6.03 (Territorial principle, without energy supply)

In the temporal development of the emissions of all NRMM in Germany from 1980 to 2030, the results from TREMOD-MM 5.1 show the following trends:

- CO₂ emissions show some fluctuations, but have increased overall by 14 % between 1980 and 2018. In the future, emissions are expected to remain almost constant, but this is due to

the fact that the trend scenario in TREMOD-MM primarily reflects the effects of the exhaust emissions legislation. Possible developments in engine population and operating hours, as well as in energy efficiency, alternative drives and low CO₂ or CO₂-neutral energy sources are currently not considered.

- ▶ HC emissions have fallen continuously since the 1990s. This is due to the introduction of exhaust emission limits and a shift from 2-stroke petrol engines to 4-stroke engines. In total, the decrease from 1980 to 2018 is about 64 %. A further 25 % reduction in HC emissions is expected by 2030 compared to 2018.
- ▶ CO emissions have also fallen since the mid-1990s as a result of stricter exhaust emission limits. Overall, the reduction from 1980 to 2018 is approximately 21 %. By 2030, CO emissions are expected to decrease by a further 20 % compared to 2018, with the introduction of Stage V from 2019 onwards having a particularly significant impact.
- ▶ NO_x emissions increased until the year 2000 and only started to decrease with the introduction of Stage I. However, this trend has continued steadily due to the tightening of emission standards. Overall, there was a 48 % decrease between 1980 and 2018. By 2030, NO_x emissions are expected to decrease further by 49 % compared to 2018.
- ▶ Particulate mass emissions have been declining since the 1990s, a trend that is also continuing due to the introduction of exhaust emission limits and a shift from 2-stroke to 4-stroke petrol engines. In total, the decrease from 1980 to 2018 is approximately 79 %. By the year 2030, PM emissions are expected to decrease by a further 69 % compared to 2018.

Compared to earlier versions of TREMOD-MM, version TREMOD-MM 5.1 shows comparatively small differences.

1 Einleitung

Mobile Maschinen und Geräte (auch NRMM für Non Road Mobile Machinery) 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 heute daher relevant zur Emissions- und Immissionsbelastung in Deutschland bei. Da die europäischen Luftqualitätsgrenzwerte nach wie vor an einigen städtischen Messstellen überschritten werden, wurden auch mobile Maschinen zunehmend in die Luftreinhalteplanung einbezogen.

Für die nationale Emissionsberichterstattung durch das Umweltbundesamt (UBA) wird der Bereich der mobilen Maschinen und Geräte auf Grundlage des seit 2004 entwickelten Transport-Emissionsmodells für Mobile Maschinen (TREMOD-MM) durchgeführt. Der vorliegende Bericht dokumentiert die für TREMOD-MM, Version 5.1 zugrundeliegenden Methoden, Daten und Ergebnisse.

Die Bestandsdaten einzelner Sektoren wurden, soweit möglich, fortgeschrieben, die Emissionsfaktoren auf Grundlage der aktuellen Emissionsgrenzwerte und neuerer Messergebnisse aktualisiert sowie der Gesamtenergieverbräuche der Landwirtschaft plausibilisiert.

Ein weiterer Schwerpunkt dieses Berichts ist die vollständige Dokumentation aller verwendeten Daten in einer Veröffentlichung, welche zuletzt im Jahr 2004 vorlag. Daher werden auch Arbeiten aus vorigen Aktualisierungen und internen Berichten beschrieben, sofern keine neueren Arbeiten vorgenommen worden sind.

Zunächst wird in diesem Bericht der methodische Ansatz von TREMOD-MM erläutert (Kapitel 2) und es werden die aktuellen Emissionsgrenzwerte für mobile Maschinen dokumentiert (Kapitel 3). Anschließend erfolgt eine vollständige Dokumentation der in TREMOD-MM verwendeten Emissionsfaktoren (Kapitel 4). In Kapitel 5 werden dann die verwendeten Bestands- und Aktivitätsdaten für die einzelnen Sektoren beschrieben. Abschließend erfolgt eine Darstellung und Plausibilisierung zentraler Ergebnisse aus TREMOD-MM 5.1 (Kapitel 6) sowie die Zusammenfassung des weiteren Aktualisierungs- und Forschungsbedarfs (Kapitel 7).

2 Methodischer Ansatz von TREMOD-MM

TREMOD-MM ist ein szenarienfähiges Emissionsmodell, das in seiner Struktur der Kategorisierung der Gesetzgebung der Europäischen Union (EU) angepasst ist und durch seine hohe Differenzierung der Daten eine detaillierte Analyse ermöglicht. Die betrachteten Bereiche ergänzen die in den übrigen TREMOD-Modulen berücksichtigten Bereiche (Straßenverkehr, Eisenbahn, Binnenschifffahrt und Luftverkehr). Der Fokus von TREMOD-MM liegt daher nicht auf den üblicherweise als „Offroad“ bezeichneten Transportsektoren, die auch Schiene etc. umfassen, sondern auf dem Bereich der mobilen Maschinen, die üblicherweise Arbeitsgeräte sind und damit nicht dem Transport dienen (Ausnahme Fahrgastschiffe und Sportboote).

Tabelle 5: Off-Road Sektoren nach EMEP/EEA und TREMOD-MM

Sektor in diesem Bericht	ZSE-Code/NFR Code	Bezeichnung EMEP/EEA
Landwirtschaft	1 A 4 c ii	Agriculture/Forestry/Fishing: Off -road vehicles & other machinery
Bauwirtschaft	1 A 2 g vii	Mobile Combustion in manufacturing industries and construction
Forstwirtschaft	1 A 4 c ii	Agriculture/Forestry/Fishing: Off -road vehicles & other machinery
Haushalt und Garten (Grünpflege)	1 A 4 b ii	Residential: Household and Gardening: Mobile
Fahrgastschiffe und Sportboote*	1.A.5.b	Other, Mobile ((inc. military, land based and recreational boats)
Industrie/Sonstige	1 A 4 a ii	Commercial/institutional: Mobile

Quelle: ifeu, EMEP/EEA 2019 (Winther / Dore, 2019). Anmerkung: *Im ZSE werden Fahrgastschiffe und Sportboote bisher nicht berücksichtigt.

Es werden einerseits die **direkten Abgasemissionen** für folgende Komponenten berechnet: CH₄, CO, CO₂, HC, N₂O, NH₃, NMHC, NO_x, Partikel, SO₂. Darüber hinaus kann der Kraftstoffverbrauch (energetisch und massenbasiert) und die Maschinenleistung (in MWh) bestimmt werden. Bei Kohlenwasserstoffen werden zusätzlich zu den Abgasemissionen noch die Emissionen durch Verschüttung und Verdrängung während der Betankung (**Betankungsemissionen**) sowie **Verdunstungsemissionen** (durch Temperaturunterschiede) berücksichtigt.

Die **Abgas-Emissionen** der im Off-Road-Sektor eingesetzten mobilen Geräte und Maschinen werden im Modell nach einem einheitlichen Rechenverfahren (siehe Formel 5) berechnet. Diese sogenannte „Bestandsmethode“ hat sich auch international zur Berechnung von Emissionen mobiler Maschinen und Geräte etabliert. Sie wird im Grundsatz analog zu dem Vorgehen in dem Handbuch Emissionsfaktoren (Notter et al., 2019), dem Berechnungsmodell der US Environmental Protection Agency (EPA) (NONROAD Modell in (US EPA, 2016) sowie von COPERT (Ntziachristos, / Samaras, 2019) durchgeführt.

Formel 5: $E_A = \text{Anz} \times P \times Z \times \text{LF} \times \text{EF}$

mit

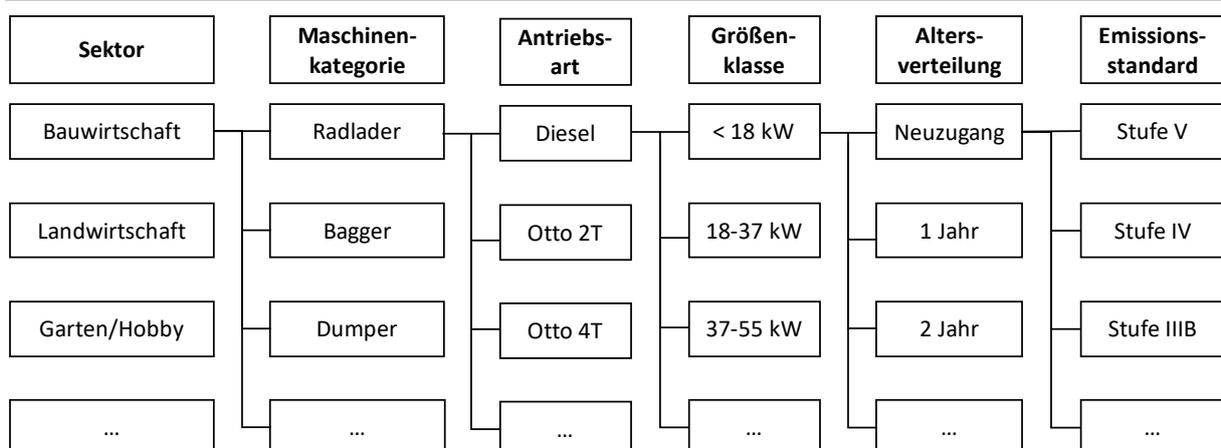
E_A Abgas Emissionen (einer Schicht, z.B. Traktoren 37-75 kW; Baujahr 1990, Bezugsjahr 2000)

Anz	Anzahl/Bestand von Geräten/Maschinen/Fahrzeugen
P	Mittlere Nennleistung (für diese Schicht)
Z	Zahl der spezifischen Betriebsstunden
LF	typischer mittlerer Lastfaktor (<1)
EF	Emissionsfaktor (g/kWh)

Die Werte für die berücksichtigten Parameter werden im Modell in möglichst hoher Differenzierung (nach Alter, Antrieb, Nennleistungsklasse etc.) erfasst. Damit ist es dann möglich, bei der Analyse differenzierte Aussagen über die wichtigsten Emittentengruppen oder auch bezüglich detaillierter Maßnahmen zu treffen.

Bei maximaler Differenzierung wird dabei im berücksichtigten Sektor (z.B. Landwirtschaft) die Art und Anzahl der eingesetzten Maschinen (z.B. Traktoren) ermittelt. Für jede dieser Maschinen wird berücksichtigt, welche Motoren eingesetzt werden (Leistungsklassen/ Hubraumklassen). Für diese Motorenklassen wird dann die Altersstruktur bestimmt – somit lassen sich den Jahrgängen der Motoren die jeweiligen emissionsrelevanten Grenzwertstufen zuordnen. Damit liegen der Berechnung hoch differenzierte Daten zugrunde (siehe auch Abbildung 7).

Abbildung 7: Schema zur Differenzierung der Daten in TREMOD-MM



Der Altersverteilung des Maschinenbestandes kommt eine besondere Bedeutung zu, weil damit einerseits eine Zuordnung zu einer Emissionsstufe erfolgt, die für das Emissionsverhalten zentral ist. Zusätzlich wird eine Abnahme der Nutzungsintensität mit dem Maschinenalter unterstellt. Das Berechnungsschema erlaubt somit eine Modellierung von Änderungen des Emissionsverhaltes der Motoren einer bestimmten Kategorie, besonders durch

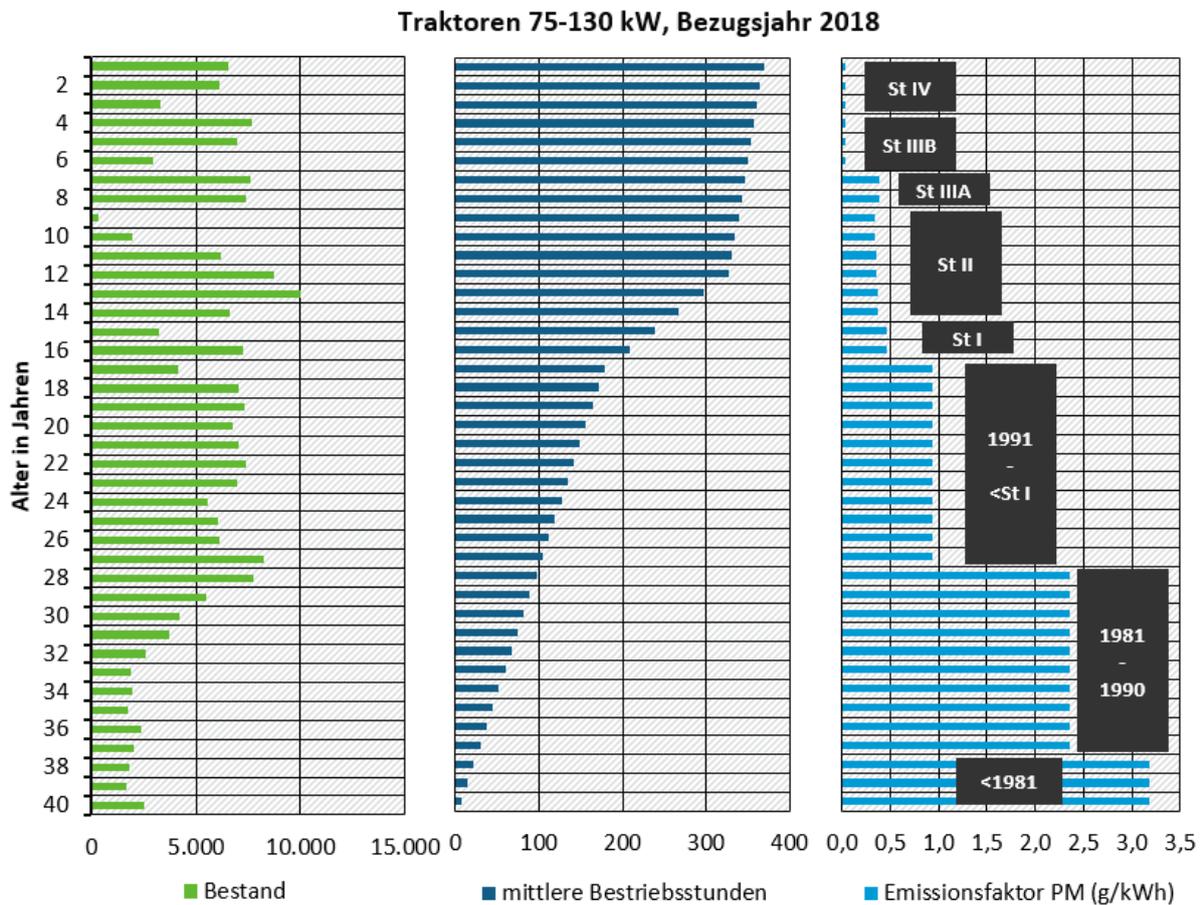
- ▶ eine Umschichtung der Flotte
(Außerbetriebnahme alter Geräte und Kauf neuer Geräte),
- ▶ Einfluss der Gesetzgebung und
- ▶ das Alterungsverhalten der Motoren.

Alle Daten bis 2018 wurden, soweit möglich, aus Statistiken und eigenen Erhebungen abgeleitet. Lagen solche Daten nicht vor, wurden Schätzungen auf Basis verschiedener Datenquellen vorgenommen:

- ▶ **Bestand:** Der Maschinenbestand konnte nur teilweise über statistische Daten erfasst werden. Für die Landwirtschaft liegen dabei jährliche Bestands- und Neuzulassungsdaten seitens des Kraftfahrtbundesamtes (KBA, n.d.) vor, für die Bauwirtschaft werden statistische Daten für das 2010 und 2016 auf Basis der Verkaufszahlen interpoliert und fortgeschrieben. In anderen Bereichen sind keine Realdaten verfügbar, so dass auf Basis von Expertengesprächen und Literaturrecherchen Annahmen über die Entwicklung getroffen wurden. Da in der Regel keine nach Alter differenzierten Daten vorliegen, erfolgt eine Zuordnung des Bestandes nach Maschinenalter für die meisten Maschinen anhand einer generischen Modellkurve (siehe unten).
- ▶ **Nennleistung:** Die Leistungsklassen sind über die Bestände definiert. In der Regel wird von einer mittleren durchschnittlichen Nennleistung innerhalb der Grenzen einer Leistungsklasse ausgegangen. Gibt es detaillierte Daten über Abweichungen von dieser mittleren Nennleistung innerhalb der Leistungsklasse und die zeitliche Entwicklung der mittleren Nennleistung einer bestimmten Maschinenkategorie, werden diese Werte verwendet.
- ▶ **Nutzungsdauer:** Für jede Maschinenkategorie wird in den entsprechenden Kapiteln, differenziert nach Größenklasse und Antrieb, eine mittlere jährliche Nutzungsdauer ermittelt. Es wird davon ausgegangen, dass die jährliche Nutzungsdauer der Maschinen mit ihrem Alter abnimmt. Dies wird mit einer altersabhängigen Nutzungsfunktion abgebildet (siehe unten). Für bestimmte Maschinen wird weiterhin eine altersunabhängige Nutzungskorrektur in Abhängigkeit des Bezugsjahrs verwendet, um temporäre Effekte auf die Betriebsstunden der Gesamtflotte abzubilden, z.B. Kopplung der Betriebsstunden der Forstwirtschaft an den Holzeinschlag
- ▶ **Lastfaktor:** Die Nutzung des Motors wird vereinfachend durch den Lastfaktor beschrieben. Der Lastfaktor beschreibt dabei das Verhältnis der durchschnittlichen Leistung der betrachteten Maschinen für einen bestimmten Einsatzzweck zu ihrer Nennleistung.
- ▶ **Emissionsfaktoren:** Emissionsfaktoren für Abgasemissionen wurden für verschiedene kW-/Hubraum-Klassen, Antriebsarten (Diesel, Otto, Gas) und Emissionsgrenzwertstufen abgeleitet. Basis für die Kategorisierung bildet die europäische Gesetzgebung (EU Richtlinie 97/68 und folgende).

Abbildung 8 verdeutlicht den Zusammenhang der Aktivitätsdaten und Emissionsfaktoren in Abhängigkeit des Maschinenalters am Beispiel der Traktoren.

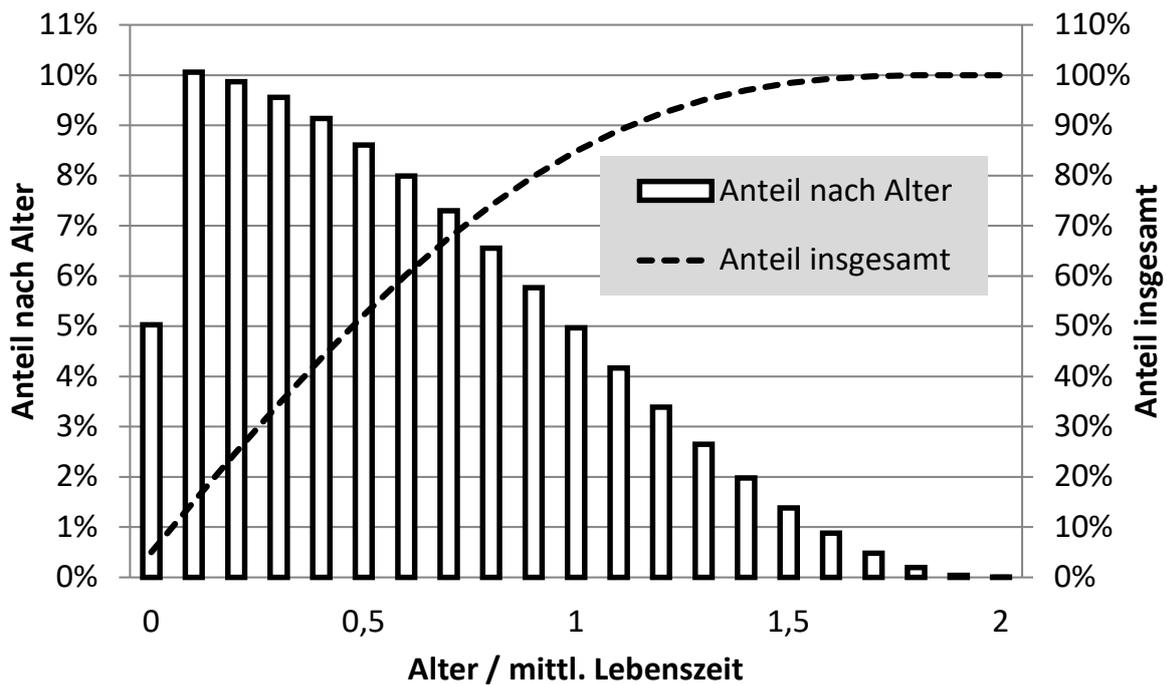
Abbildung 8: Schema zur Differenzierung der Aktivitätsdaten und Emissionsfaktoren nach Maschinenalter



Quelle: verschiedene Quellen und ifeu-Annahmen. Anmerkung: Traktoren >40 Jahren werden nicht aufgeführt.

Die Modellkurve für die Altersverteilungen der Maschinenbestände folgt dabei einer Funktion, die in Abhängigkeit zur mittleren Lebenszeit (Median) der Maschinen steht (Abbildung 9). Damit sind ca. 85 % der Maschinen jünger als die angesetzte mittlere Lebenszeit. Es werden aber auch Maschinen bis zur doppelten mittleren Lebenszeit berücksichtigt, die auch in der Praxis beobachtet werden. Die Austrittswahrscheinlichkeit der Maschinen nimmt dabei mit zunehmendem Alter zu, sei es durch Verschrottung oder durch Weiterverkauf in das Ausland. Die Neuzugänge des Bezugsjahres werden nur zur Hälfte berücksichtigt, da die Maschinen erst sukzessive im Verlauf des Jahres auf den Markt kommen.

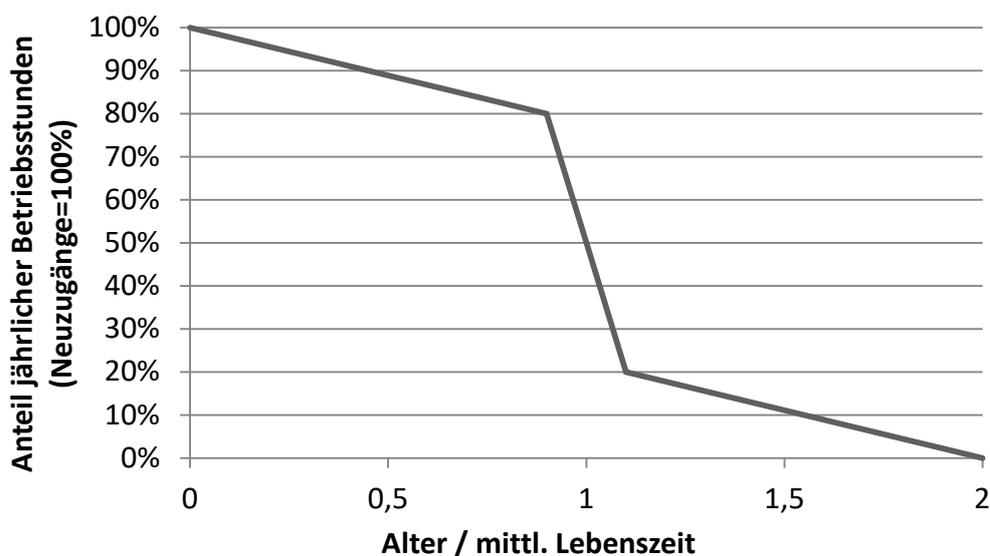
Abbildung 9: Bestandsverteilung nach Maschinenalter



Quelle: (Helms / Heidt, 2014a)

Die altersabhängige Nutzungsfunktion berücksichtigt zusätzlich die Lebenszyklen der Maschinen. Hierfür wurde eine Modellkurve abgeleitet, welche die Entwicklung der jährlichen Betriebsstunden über die mittlere Lebenszeit darstellt. Der Kurve liegt eine Unterteilung der gesamten Lebenszeit einer Maschine in verschiedene Nutzungsphasen zugrunde. So nimmt die Nutzungsintensität von Maschinen mit zunehmendem Lebensalter stufenweise ab.

Abbildung 10: Jährliche Betriebsstunden nach Maschinenalter



Quelle: (Helms / Heidt, 2014a)

Die Berechnung der Emissionen mit TREMOD-MM bildet neben der Vergangenheit auch ein sogenanntes Trendszenario ab. Hierdurch sollen zukünftige Entwicklungen berücksichtigt werden, die sich aus bereits heute beschlossenen Maßnahmen ergeben. Dies sind insbesondere

die Einführung neuer Emissionsgrenzwerte und deren Durchdringung im Bestand der mobilen Maschinen und Geräte. Somit kann modelliert werden, wie sich die deutschlandweiten Emissionen auch nach der Einführung von Emissionsgrenzwerten weiterentwickeln.

Darüber hinaus werden bereits heute erkennbare Trends, wie z.B. Entwicklungen der Anzahl und Leistung der Maschinen berücksichtigt, sofern die Datenlage und die Modellstruktur dies erlauben. Da alternative Antriebsarten, z.B. batteriebetriebene Geräte, bisher noch nicht in TREMOD-MM definiert wurden, wird angenommen, dass die mobilen Maschinen und Geräte weiterhin mit den heute üblichen Antriebsarten, in der Regel Benzin und Diesel, betrieben werden.

Der aktuelle Zeitraum des Trendszenarios reicht bis 2050 und ist damit konsistent mit dem Trendszenario des Verkehrs im Modell TREMOD, Version 6 (Allekotte et al., 2019).

3 Aktuelle Emissionsgrenzwerte für mobile Maschinen

Die Emissionsgrenzwerte für mobile Maschinen und Geräte werden aktuell - mit Ausnahme der Sportboote - über die Verordnung (EU) 2016/1628 (EU, 2016) geregelt, welche die vorherige, 2017 außer Kraft getretene Richtlinie 97/68/EG, ersetzt. Im Folgenden werden die Emissionsgrenzwerte für die verschiedenen Motorenkategorien dargestellt.

3.1 Selbstzündungsmotoren

Emissionsgrenzwerte für große Dieselmotoren wurden in der EU ab 1999 eingeführt³ (Stufe I) und kurz darauf insbesondere in Hinblick auf die NO_x- und Partikelmissionen verschärft und auf kleinere Leistungsklassen (18-37 kW) erweitert (Stufe II). Reguliert wurden dabei CO, HC, NO_x und PM. Stufe IIIB (ab 2011) senkte dann insbesondere den Partikelgrenzwert, während Stufe IV (ab 2014) dann auch eine deutliche Verschärfung des NO_x-Grenzwertes mit sich brachte. Aktuell wird die Stufe V eingeführt, die erstmals auch Motoren mit kleineren Leistungen unter 19 kW sowie Generatoren mit größeren Leistungen über 560 kW abdeckt. Zusätzlich wird erstmalig eine Grenzwerteinhaltung für die Partikelanzahl (PN) verpflichtend.

Tabelle 6: Emissionsgrenzwerte für mobile Maschinen mit Dieselmotoren in g/kWh (PN: #/kWh)

Nennleistung P (kW)	Einführungsjahr	CO	HC	HC+NO _x	NO _x	PM	PN
Stufe I (g/kWh)							
130 ≤ P ≤ 560	1999	5,0	1,3	NA	9,2	0,54	NA
75 ≤ P < 130	1999	5,0	1,3	NA	9,2	0,70	NA
37 ≤ P < 75	1999	6,5	1,3	NA	9,2	0,85	NA
Stufe II (g/kWh)							
130 ≤ P ≤ 560	2002	3,5	1,0	NA	6,0	0,2	NA
75 ≤ P < 130	2003	5,0	1,0	NA	6,0	0,3	NA
37 ≤ P < 75	2004	5,0	1,3	NA	7,0	0,4	NA
18 ≤ P < 37	2001	5,5	1,5	NA	8,0	0,8	NA
Stufe IIIA (g/kWh)							
130 ≤ P ≤ 560	2006	3,5	NA	4,0	NA	0,2	NA
75 ≤ P < 130	2007	5,0	NA	4,0	NA	0,3	NA
37 ≤ P < 75	2008	5,0	NA	4,7	NA	0,4	NA
19 ≤ P < 37	2007	5,5	NA	7,5	NA	0,6	NA
Stufe IIIB (g/kWh)							
130 ≤ P ≤ 560	2011	3,5	0,19	NA	2,0	0,025	NA
75 ≤ P < 130	2012	5,0	0,19	NA	3,3	0,025	NA

³ Für landwirtschaftliche Maschinen galt die Stufe I für ab dem Jahr 2001 in Verkehr gebrachte Motoren.

Nennleistung P (kW)	Einführungsjahr	CO	HC	HC+NO _x	NO _x	PM	PN
56 ≤ P < 75	2012	5,0	0,19	NA	3,3	0,025	NA
37 ≤ P < 56	2013	5,0	-	4,7	-	0,025	NA
Stufe IV (g/kWh)							
130 ≤ P ≤ 560	2014	3,5	0,19	NA	0,4	0,025	NA
56 ≤ P < 130	2014	5,0	0,19	NA	0,4	0,025	NA
Stufe V (g/kWh)							
P < 8	2019	8,00	NA	7,50	NA	0,40	NA
8 ≤ P < 19	2019	6,60	NA	7,50	NA	0,40	NA
19 ≤ P < 37	2019	5,00	NA	4,70	NA	0,015	1×10 ¹²
37 ≤ P < 56	2019	5,00	0,19	4,70	NA	0,015	1×10 ¹²
56 ≤ P < 130	2019	5,00	0,19	NA	0,4	0,015	1×10 ¹²
130 ≤ P < 560	2019	5,00	0,19	NA	0,4	0,015	1×10 ¹²
P > 566	2019	5,00		NA	3,5	0,045	NA
Stufe V (Generatoren) (g/kWh)							
P > 560	2019	3,50	0,19		0,67	0,035	

Quelle: ifeu-Darstellung nach (dieselnet.com, 2019). Anmerkung: für Gasmotoren können abweichenden HC-Grenzwerte gelten

3.2 Fremdzündungsmotoren

Für Fremdzündungsmotoren wurden Grenzwerte im Jahr 2005 eingeführt, wobei zwischen handgehaltenen und nicht handgehaltenen Geräten unterschieden wird (siehe Tabelle 7). Des Weiteren erfolgt eine Differenzierung nach Hubraum. Mit der Stufe II wurden ab 2008 weitere Hubraumklassen einbezogen und ein Summenwert für HC und NO_x eingeführt. Die jüngst (2019) eingeführte Stufe V verschärft dann insbesondere die Anforderungen für leistungsstärkere und mit größerem Hubraum ausgestatteten Otto-Motoren. Weiterhin werden auch gasförmige Bezugskraftstoffe festgelegt, unter welche in TREMOD-MM die LPG-Stapler im Sektor Industrie/Sonstige fallen.

Tabelle 7: Emissionsgrenzwerte für mobile Maschinen mit Otto-Motoren in g/kWh

Kategorie		Größe (ccm)	Jahr	CO	HC	NO _x	HC+NO _x
Stufe I (g/kWh)							
Handgehalten	SH1	< 20 ccm	2005	805	295	5,36	NA
	SH2	20 bis < 50 ccm		805	241		
	SH3	>= 50 ccm		603	161		
Nicht-Handgehalten	SN3	100 bis <225 ccm	2005	519	NA	NA	16,1
	SN4	>= 225 ccm					13,4
Stufe II (g/kWh)							
Handgehalten	SH1	< 20 ccm	2008	805	NA	NA	50
	SH2	20 bis < 50 ccm					
	SH3	>= 50 ccm					
Nicht-Handgehalten	SN1	< 66 ccm	2005	610	NA	NA	50
	SN2	66 bis < 100 ccm					40
	SN3	100 bis < 225 ccm	2008				16,1
	SN4	>= 225 ccm	2007				12,1
Stufe V (g/kWh)							
Handgehalten	NRSh-v-1a	< 50 ccm	2019	805	NA	NA	50
	NRSh-v-1b	>= 50 ccm					72
Nicht-Handgehalten < 19 kW	NRS-vr/vi-1a	80 bis < 225 ccm	2019	610	NA	NA	10
	NRS-vr/vi-1b	>= 225 ccm					8
Nicht-Handgehalten 19 bis < 30 kW	NRS-v-2a	<= 1000 ccm	2019	610	NA	NA	8
	NRS-v-2b	> 1000 ccm		4,40*			2,70*
Nicht-Handgehalten 30 bis < 56 kW	NRS-v-3	alle	2019	4,40*	NA	NA	2,70*

* Oder eine beliebige Kombination von Werten, die die Gleichung $(HC+NO_x) \times CO^{0,784} \leq 8,57$ und die Bedingungen $CO \leq 20,6$ g/kWh und $(HC+NO_x) \leq 2,7$ g/kWh erfüllen.

Quelle: ifeu-Darstellung nach (dieselnet.com, 2019)

3.3 Motoren für Sportboote

Nachfolgend sind die geltenden Grenzwerte für Sportboote gemäß Richtlinie 2013/53/EU (EU, 2013) dargestellt. Da die Struktur und Festlegung der Grenzwerte anhand unterschiedlicher Merkmale erfolgt, sind diese entsprechend der Gesetzgebung in separaten Tabellen aufgeführt.

- ▶ Die für die im Zeitraum 2006 bis 17.1.2016 zugelassenen Motoren geltenden Grenzwerte gehen auf Richtlinie 2003/44/EG zurück und unterscheiden sich nach Antriebsart (Otto 2-Takt, Otto-4-Takt und Diesel). Für die CO und HC-Emissionen leiten sich die Grenzwerte aus Funktionen in Abhängigkeit der Nennleistung ab (Tabelle 8).
- ▶ Für Baujahre ab 2016 wurden die Grenzwerte für Dieselmotoren an die Struktur der Motoren für Binnenschiffe nach Richtlinie 97/68/EG angepasst und unterscheiden sich damit nach Hubraums und Nennleistungsklassen, während für NO_x und HC ein Summengrenzwert gilt (Tabelle 9).
- ▶ Die Grenzwerte für Fremdzündungsmotoren unterscheiden Außenbord- und Innenbordantrieb. Es gilt ebenfalls ein NO_x+HC Summenwert. Bei Außenbordern wird die Nennleistung teils anhand von Funktionen, bei Innenbordantrieben anhand von Leistungsklassen berücksichtigt. (Tabelle 10).

Tabelle 8: Emissionsgrenzwerte für Sportboote ab 31.12.2005 in g/kWh

Typ	Kohlenmonoxid (CO) = $A + B / P_N^n$			Kohlenwasserstoffe (HC) = $A + B / P_N^n$			Stickoxide (NO _x)	Partikel
	A	B	n	A	B	n		
Otto Zweitakter	150	600	1,0	30,0	100	0,75	10,0	k.A.
Otto Viertakter	150	600	1,0	6,0	50	0,75	15,0	k.A.
Kompressionszündungsmotoren	5,0	0	0	1,5	2,0	0,5	9,8	1,0

Quelle: ifeu-Darstellung nach (EU, 2013). Erläuterung: Der Wert P_N stellt die Nennleistung dar.

Tabelle 9: Emissionsgrenzwerte für Sportboote mit Selbstzündungsmotoren ab 18.1.2016 in g/kWh

Hubraum SV (L/Zylinder)	Motornennleistung PN (kW)	Kohlenmonoxid (CO)	Partikel (PT)	Kohlenwasserstoffe und Stickoxide (HC + NO _x)
SV < 0,9	PN < 37	5,0	die in Tabelle 8 genannten Werte	
	37 ≤ PN < 75 (+)	5,0	0,30	4,7
	75 ≤ PN < 3 700	5,0	0,15	5,8
0,9 ≤ SV < 1,2	PN < 3 700	5,0	0,14	5,8
1,2 ≤ SV < 2,5		5,0	0,12	5,8
2,5 ≤ SV < 3,5		5,0	0,12	5,8
3,5 ≤ SV < 7,0		5,0	0,11	5,8

(+) Alternativ dürfen Selbstzündungsmotoren mit einer Nennleistung von 37 kW oder mehr und unter 75 kW sowie mit einem Hubraum unter 0,9 L/Zylinder einen PT-Emissionsgrenzwert von 0,20 g/kWh und einen kombinierten HC+NOx-Emissionsgrenzwert von 5,8 g/kWh nicht überschreiten.

Quelle: ifeu-Darstellung nach (EU, 2013)

Tabelle 10: Emissionsgrenzwerte für Sportboote mit Fremdzündungsmotoren ab 18.1.2016 in g/kWh

Motortyp	Motornennleistung	Kohlenmonoxid (CO)	Kohlenwasserstoffe und Stickoxide (HC + NO _x)
Motoren mit Z-Antrieb und Innenbordmotoren	$P_N \leq 373$	75	5
	$373 < P_N \leq 485$	350	16
	$P_N > 485$	350	22
Außenbordmotoren und Wassermotorrad-Motoren	$P_N \leq 4,3$	$500 - (5,0 \times P_N)$	30
	$4,3 < P_N \leq 40$	$500 - (5,0 \times P_N)$	$15,7 + (50/P_N^{0,9})$
	$P_N > 40$	300	$15,7 + (50/P_N^{0,9})$

Quelle: ifeu-Darstellung nach (EU, 2013)

4 Emissionsfaktoren

Die für die Berechnung der Emissionen nach der Bestandsmethode (Formel 5) benötigten Abgas-Emissionsfaktoren wurden für unregulierte Dieselmotoren (vor 1999) sowie Motoren der Stufe I und II auf Basis umfangreicher Messdaten abgeleitet (Lambrecht et al., 2004). Hier liegen zahlreiche, in sich konsistente Messungen vor. Die Datenlage bei noch unregulierten Motoren ist jedoch deutlich schlechter gegenüber Motoren der Stufe I und II. Wegen fehlender Grenzwerte und damit Testzyklen sind die Ergebnisse der Messungen zudem schwerer vergleichbar. Bis einschließlich Stufe II werden diese Emissionsfaktoren jedoch weiterhin angewendet, da nur noch wenige alte Maschinen im Bestand sind. Für Motoren ab Stufe IIIA konnten bisher keine umfangreichen Messdaten ausgewertet werden. Die Ableitung der Emissionsfaktoren erfolgt daher auf Basis der Grenzwerte oder im Falle von NO_x auf Basis von aktuelleren PEMS-Messungen.

Die Methode zur Ableitung der Emissionsfaktoren wird im Folgenden kurz beschrieben, dann werden die Emissionsfaktoren für Diesel- und Otto-Motoren dokumentiert.

4.1 Methodik

Die Emissionsfaktoren in TREMOD-MM bilden die Emissionen im realen Betrieb ab. Diese werden entsprechend der Formel 6 berechnet.

Formel 6: $EF = EF_B \times DF_A \times TAF$

mit

EF_B	Basisemissionsfaktor für neue Geräte im Prüfzyklus gemäß Typgenehmigung
DF_A	Verschlechterungsfaktor für die Berücksichtigung der altersabhängigen Änderungen
TAF	Anpassungsfaktor zwischen stationären Zyklus und transienten Zyklus (Transient Adjustment Factor)

Basisemissionsfaktor

Der Basisemissionsfaktor gilt für neue Motoren unabhängig von ihrem Nutzungstyp (z.B. Bagger oder Traktor). Er wird nach den Merkmalen

- ▶ Motorkonzept (Diesel, Otto 2-Takt, Otto 4-Takt)
- ▶ Treibstoffart (Diesel, Benzin, Flüssiggas),
- ▶ Leistungs- bzw. Hubraumklasse und
- ▶ Grenzwertstufe

differenziert.

Transienter Anpassungsfaktor

Der Transiente Anpassungsfaktor (TAF) korrigiert die Emissionsfaktoren des stationären Prüfzyklus für eine dynamische - und damit für die meisten Maschinen realitätsnähere - Anwendung. Er unterscheidet sich je nach Maschinentyp (z.B. Bagger, Lader,

Landwirtschaftliche Geräte), da die gesetzlichen Prüfzyklen Non Road Stationary Cycle (NRSC) und Non Road Transient Cycle (NRTC) nur ein generalisiertes Lastprofil⁴ für alle Anwendungen vorgeben. Dieses Lastprofil kann allerdings im realen Betrieb stark variieren und damit auch die Höhe der Emissionsfaktoren beeinflussen. Eine Anwendung des Transienten Anpassungsfaktors erfolgt bis zur Stufe IIIA.

Altersabhängiger Änderungsfaktor

Verschiedene Studien zeigen eine Abhängigkeit der Emissionen vom Alter bzw. der Nutzungszeit der eingesetzten Motoren. Dies gilt vor allem für kleinere 2- und 4-Takt-Motoren. Dieses Emissionsverhalten wird im Modell durch einen **altersabhängigen Änderungsfaktor** berücksichtigt. Mit der im Modell hinterlegten Altersstruktur der einzelnen Maschinenkategorien kann die Auswirkung auf das Emissionsverhalten abgebildet werden.

Größenklassen (Nennleistungs- und Hubraumklassen)

In der EU-Gesetzgebung werden Diesel-Motoren in Leistungsklassen unterschieden. Die Kategorisierung in TREMOD-MM (Tabelle 11) orientiert sich an diesen Klassen.

Bei benzinbetriebenen Maschinen <19 kW werden von der Gesetzgebung dagegen handgehaltene (SH) und nichthandgehaltene (SN) Maschinen unterschieden. Die Gesetzgebung dieser Geräte richtet sich nach Hubraum-Klassen (Tabelle 11). Auch diese Klassen werden für die Kategorisierung in TREMOD-MM übernommen. Um die Kompatibilität mit der Berechnungsmethode über die Nennleistung (kW) zu gewährleisten, werden diesen Hubraum-Klassen für die einzelnen Geräte Nennleistungen zugeordnet.

Mit der Stufe IIIB wurde die zusätzliche Klassengrenze von 56 kW eingeführt, während darunter weiterhin die Grenzwertstufe III A Gültigkeit hat. Daher stellt der Emissionsfaktor der Stufe III B für Maschinen mit 37-75 kW den Mittelwert aus dem für Maschinen mit 37-75 kW der Stufe III A und dem für Maschinen mit 56-75 kW der Stufe III B ermittelten Emissionsfaktor dar. Ab Stufe V werden weitere Größenklassen eingeführt, z.B. bei Selbstzündungsmotoren <19 kW und größer 560 kW und bei Fremdzündungsmotoren die Kategorien NRS v2a, b und NRS v3. Letztere werden mangels diesbezüglicher Informationen in den Bestandsdaten in der bisherigen Kategorie SN4 zusammengefasst.

Tabelle 11: Kategorisierung der Größenklassen der eingesetzten Motoren

Kategorien der EU-Gesetzgebung	Kategorien in TREMOD-MM
Dieselmotoren	
< 19 kW (seit Stufe V)	< 18 kW
19-37 kW	18-37 kW
37-56 kW (seit Stufe IIIB, davor 37-75 kW)	37-75 kW
56-75 kW (seit Stufe IIIB, davor 37-75 kW)	37-75 kW
75-130 kW	75-130 kW
130-560 kW	130-300 kW
	300-560 kW

⁴ Zeitlicher Verlauf von Motorleistung und Drehzahl

Kategorien der EU-Gesetzgebung	Kategorien in TREMOD-MM
>560 kW (seit Stufe V)	560-1000 kW
-	> 1000 kW
Handgehaltene Motoren (2- und 4-Takt)	
SH1 (seit Stufe V NRSH v1a)	< 20 ccm
SH2 (seit Stufe V NRSH v1a)	≥ 20 bis < 50 ccm (1-2,5 kW*)
SH3 (seit Stufe V NRSH v1 b)	≥ 50 ccm (>2,5 kW*)
Nichthandgehaltene Motoren (2- und 4-Takt)	
SN1	< 66 ccm
SN2	≥ 66 < 100 ccm
SN3	≥ 100 < 225 ccm (2-5 kW*)
SN4	≥ 225 ccm (>5 kW*)
NRS v2 a (seit Stufe V), <1000 ccm, 19-30 kW	≥ 225 ccm (>5 kW*)
NRS v2 b (seit Stufe V), >1000 ccm, 19-30 kW	≥ 225 ccm (>5 kW*)
NRS v3 (seit Stufe V), alle ccm, 30-56 kW	≥ 225 ccm (>5 kW*)

Quelle: EU Richtlinie 97/68/EC, Verordnung (EU) 2016/1628 und ifeu-Annahmen. *Abschätzungen des IFEU

Zur Ableitung der Emissionsfaktoren wurden in (Lambrecht et al., 2004) zahlreiche Emissionsmessungen zunächst gesammelt, in eine Datenbank aufgenommen und dort ausgewertet.

Die in die Datenbank aufgenommenen Daten wurden zuerst für jede Datenquelle getrennt analysiert. Damit wurde geprüft ob die jeweiligen Datensätze in sich konsistent sind (gleiche Randbedingungen, Messverfahren usw.). Folgende Auswertungen der Emissionsmessungen wurden für alle Schadstoffe vorgenommen:

- ▶ nach Motortechnik (z.B. mit/ohne Abgasturbolader; Direkteinspritzer) in Abhängigkeit von der Leistung
- ▶ pro kW-Klasse und Motortechnik
- ▶ pro kW-Klasse, Motortechnik und Herstellungsjahr der Motoren

Bei der Auswertung zeigte sich, dass bei einer Differenzierung der Emissionsfaktoren nach Motortechnik der Zusammenhang zwischen Emissionshöhe und Motortechnik nicht immer eindeutig ist. Zudem nimmt die statistische Signifikanz der Ergebnisse bei höherer Differenzierung stark ab. Da außerdem die Datenlage bei den Motorbeständen für eine Unterscheidung nach Motortechniken nicht ausreichend ist, wurden Emissionsfaktoren für

- ▶ verschiedene kW-Klassen bzw. Hubraumklassen
- ▶ Baujahren/Grenzwertstufen

abgeleitet. In diesen Emissionsfaktoren sind somit implizit verschiedene Motortechniken berücksichtigt.

4.2 Basis-Emissionsfaktoren Diesel-Motoren

Kurzfassung zum Datenstand

- ▶ Die Basis Emissionsfaktoren für Motoren bis Stufe II wurden im Jahr 2004 aus umfangreichen Messdaten abgeleitet.
- ▶ Die Emissionsfaktoren von neueren Motoren ab Stufe IIIA wurden weitgehend auf Basis der Emissionsgrenzwerte und weiterer Annahmen abgeleitet. Mithilfe erster PEMS-Messungen wurden realitätsnähere Werte für NO_x abgeleitet.
- ▶ Die Verfügbarkeit von Messdaten bei neueren Motoren ist jedoch eingeschränkt. Unsicherheiten bestehen insbesondere für die PM-Emissionen bei Stufe IIIA.

Die Basis-Emissionsfaktoren für Diesel-Motoren wurden aus verschiedenen Quellen abgeleitet (Tabelle 12). Um den zeitlichen Verlauf der spezifischen Emissionen der Motoren zu analysieren, wurden die Emissionsmessungen nach Baujahresklassen der Motoren sowie Grenzwertstufen ausgewertet.

Tabelle 12: Anzahl von Messungen zur Ableitung von Emissionsfaktoren für Dieselmotoren

Baujahr Motor/ Grenzwertstufe	(BUWAL, 1996)	(Euromot , 1995)	(FAT, 2002)	(KBA, 2002)	(Schwing shackl et al., 2017)	Verwendete Quellen
Bemerkung	Messungen im stationären Prüfzyklus				PEMS	
Bis 1980	16					(BUWAL, 1996)
1981 – 1990	253	4				(Euromot, 1995) (BUWAL, 1996)
1991 - Stufe I	41	170	69			(Euromot, 1995), (FAT, 2002)
Stufe I				95	2	(KBA, 2002)
Stufe II				50	5	(KBA, 2002)
Stufe IIIA					5	Grenzwert*
Stufe IIIB					9	(Schwingshackl et al., 2017) für NO _x , Grenzwert* für übrige Schadstoffe
Stufe IV					4	
Stufe V						Grenzwert*

Quelle: ifeu-Darstellung. Ergänzung * Übernahme des Emissionsfaktors der vorigen Stufe sofern niedriger

Die Basis-Emissionsfaktoren bis zur Stufe II wurden aus den oben aufgeführten Messdaten im gesetzlichen Prüfzyklus NRSC abgeleitet (Lambrecht et al., 2004). Für Stufe IIIA wurde der Basis-Emissionsfaktor anhand des Grenzwerts abgeleitet bzw. der Emissionsfaktor der Stufe II übernommen, sofern dieser niedriger liegt. Diese Emissionsfaktoren entsprechen damit dem Stand aus TREMOD-MM 4, welche in (Helms / Heidt, 2014a; Lambrecht et al., 2004) dokumentiert sind.

Für die Stufen IIIB und IV werden Emissionsfaktoren des österreichischen Inventarmodells NEMO verwendet, welche aus Emissionsmessungen im realen Betrieb mithilfe von Portable Emission Measurement Systems (PEMS) abgeleitet wurden (Schwingshackl et al., 2017). Im Gegensatz zu den früheren Stufen, bilden diese Emissionsfaktoren daher bereits den realen Betrieb ab. Die NO_x-Emissionen liegen hierbei deutlich höher als der Grenzwert, da die Abgasnachbehandlung mit SCR aufgrund von Kaltstart- oder Leerlaufphasen mit der damit verbundenen geringen Abgastemperatur eine geringere NO_x-Reduktionsrate aufweist als im Prüfzyklus. Ähnliche Effekte wurden auch bei schweren Nutzfahrzeugen im Stop+Go Betrieb beobachtet (Matzer et al., 2019).

Obwohl auch PEMS-Daten ab Stufe I bis IIIA vorlagen, wurde für TREMOD-MM auf eine Anpassung der Stufen I und II verzichtet, da diese Daten gegenüber den bereits ausgewerteten Messdaten eine deutlich kleinere Stichprobe aufweisen. Da TREMOD-MM die Emissionen bereits ab 1980 berechnet, sind die PEMS-Messungen zudem für diese Baujahre wahrscheinlich nicht repräsentativ. Für die Stufe IIIA lagen widersprüchliche Ergebnisse aus den vorhandenen Publikationen vor⁵, die im Rahmen der vorliegenden Aktualisierung nicht geklärt werden konnten.

Folgende Unsicherheiten sind bei den PEMS-Daten hervorzuheben:

- ▶ Die Anzahl gemessener Maschinen ist noch gering und deckt nicht alle Maschinentypen, Größenklassen und Abgasstufen ab.
- ▶ Die PM-Emissionen lassen sich mit PEMS nur mit hohem Aufwand gravimetrisch messen. Demzufolge wurden diese in den bisherigen Messungen nicht direkt gemessen, sondern auf Basis von Ruß-Emissionen oder Partikelanzahlemissionen abgeschätzt.
- ▶ Der Einfluss der Lastzyklen ist noch nicht ausreichend erforscht, auch wurden diese bisher nur für Baumaschinen erfasst. Es besteht damit die Möglichkeit, dass die Messwerte nicht repräsentativ für alle Maschinen sind.

Diese Fragen sollten daher weiter untersucht werden. Das aktuell bis zum Jahr 2022 laufende UBA-Projekt „Fortentwicklung der Verordnung (EU) Nr. 2016/1628 für Mobile Maschinen und Geräte - NRMM (Non Road Mobile Machinery)“ (FKZ 3719 51 103 0) könnte dazu neue Erkenntnisse liefern, die bei der zukünftigen Aktualisierung von TREMOD-MM berücksichtigt werden sollten.

Die verwendeten Basis-Emissionsfaktoren sind in Tabelle 13 dargestellt.

⁵ Im Inventarmodell NEMO (Schwingshackl et al., 2017) werden deutlich niedrigere PM-Emissionsfaktoren als in TREMOD-MM (Lambrecht et al., 2004) vorgeschlagen, jedoch zeigten die Ergebnisse der einzelnen Messungen in (Blassnegger, 2014) deutlich höhere PM-Werte, welche eher zu den Emissionsfaktoren in TREMOD-MM passen.

Tabelle 13: Basisemissionsfaktoren für Diesel-Motoren in g/kWh

	< 18 kW	18-36 kW	37-74 kW	75-129 kW	130-299 kW	300-559 kW	560-1000 kW
Kraftstoffverbrauch (g/kWh)							
vor 1981	300	300	290	280	270	270	260
1981-1990	285	281	275	267,5	260	260	255
1991-Stufe I	270	262	260	255	250	250	250
Stufe I	0	262	260	255	250	250	250
Stufe II	0	262	260	255	250	250	250
Stufe IIIA	0	262	260	255	250	250	250
Stufe IIIB		262	260	255	250	250	
Stufe IV			260	255	250	250	
Stufe V	270	262	260	255	250	250	250
NO_x (g/kWh)							
vor 1981	12	18	7,7	10,5	17,8	17,8	17,8
1981-1990	11,5	18	8,6	11,8	12,4	12,4	12,4
1991-Stufe I	11,2	9,8	11,5	13,3	11,2	11,2	11,2
Stufe I	0	0	7,7	8,1	7,6	7,6	7,6
Stufe II	0	6,5	5,5	5,2	5,2	5,2	5,2
Stufe IIIA	0	6,1	3,8	3,2	3,2	3,2	3,2
Stufe IIIB		6,1	5,1	4,35	2,63	2,63	
Stufe IV			4,05	2,25	2,25	2,25	
Stufe V	6,75	4,23	2,1	0,4	0,4	0,4	0,67
PM (g/kWh)							
vor 1981	2,8	2	1,8	1,35	0,9	0,9	0,9
1981-1990	2,3	1,4	1,2	1	0,8	0,8	0,8
1991-Stufe I	1,6	1,4	0,8	0,4	0,4	0,4	0,4
Stufe I	0	1,4	0,35	0,2	0,2	0,2	0,2
Stufe II	0	0,37	0,22	0,16	0,1	0,1	0,1
Stufe IIIA	0	0,37	0,22	0,16	0,1	0,1	0,1

	< 18 kW	18-36 kW	37-74 kW	75-129 kW	130-299 kW	300-559 kW	560-1000 kW
Stufe IIIB		0,54	0,025	0,025	0,025	0,025	
Stufe IV			0,025	0,025	0,025	0,025	
Stufe V	0,4	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,035

HC (g/kWh)

vor 1981	5	2,5	2,4	2	1,5	1,5	1,5
1981-1990	3,75	2,15	1,95	1,6	1	1	1
1991-Stufe I	2,5	1,8	1,5	1,2	0,5	0,5	0,5
Stufe I	0	1,8	0,6	0,4	0,3	0,3	0,25
Stufe II	0	0,6	0,4	0,3	0,25	0,25	0,25
Stufe IIIA	0	0,6	0,4	0,3	0,25	0,25	0,25
Stufe IIIB		0,68	0,28	0,13	0,13	0,13	
Stufe IV			0,28	0,13	0,13	0,13	
Stufe V	0,75	0,47	0,28	0,13	0,13	0,13	0,13

CO (g/kWh)

vor 1981	7	6,5	6	5	2,5	2,5	2,5
1981-1990	6	5,5	5,25	4,25	2,5	2,5	2,5
1991-Stufe I	5	4,5	4,5	3,5	2,5	2,5	2,5
Stufe I	0	4,5	2,2	1,5	1,5	1,5	1,5
Stufe II	0	2,2	2,2	1,5	1,5	1,5	1,5
Stufe IIIA	0	2,2	2,2	1,5	1,5	1,5	1,5
Stufe IIIB		3,3	3	3	2,1	2,1	
Stufe IV			3	3	2,1	2,1	
Stufe V	5	2,2	3	3	2,1	2,1	2,1

Quelle: (BUWAL, 1996), (Euromot, 1995), (FAT, 2002), (KBA, 2002), (Schwingshackl et al., 2017) und ifeu-Annahmen

4.3 Basis-Emissionsfaktoren Otto-Motoren

Kurzfassung zum Datenstand

- ▶ Die Basis Emissionsfaktoren für Otto-Motoren wurden im Jahr 2004 aus umfangreichen Messdaten abgeleitet.
- ▶ Die Emissionsfaktoren von neueren Motoren wurden weitgehend auf Basis der Emissionsgrenzwerte und weiterer Annahmen abgeleitet, da keine neueren Messdaten vorlagen.
- ▶ Die Betankungs- und Verdunstungsverluste entstammen aus Literatur der 1990er Jahre und wurden seither nicht aktualisiert.

Die Emissionsfaktoren für Otto-Motoren wurden in (Lambrecht et al., 2004)- analog dem Vorgehen bei den Dieselmotoren - für emissionsrelevante Schichten ermittelt. Die Differenzierung der Schichten orientiert sich an technischen Eigenschaften (2-Takt, 4-Takt), Energieträger (Otto und LPG) sowie der Klassenbildung der Gesetzgebung in

- ▶ handgehaltenen Geräten: SH1 (0-20 ccm), SH2 (20-50 ccm) bzw. NRS v1 a (<50 ccm), SH3 (>50 ccm) bzw. NRS v1 b (≥50 ccm)
- ▶ nicht handgehaltenen Motoren: SN1 (0-66 ccm), SN2 (66-100 ccm), SN3 (100-225 ccm), SN4 (>225 ccm), NRS v2a (19-30 kW <1000 ccm), NRS v 2b (19-30 kW >1000 ccm), NRS v 3 (19-30-56 kW).

4.3.1 Viertaktmotoren

Grundlage für die Emissionsfaktoren der Klassen SN3 und SN4 „1991 bis Stufe 1“ sind Auswertungen vorhandener Messdaten [Sachse 2002a]. Dort wird auch beschrieben, dass der Unterschied der Emissionen nach den Prüfzyklen

- ▶ D2 (Stromerzeugungsaggregate mit veränderlicher Last),
- ▶ G1 (Nicht handgehaltene Ottomotoren < 19 kW mit Zwischendrehzahlanwendung, wie z.B. Rasenmäher) und
- ▶ G2 (Nicht handgehaltene Ottomotoren mit Nenndrehzahlanwendung, wie z.B. Pumpen)

vernachlässigbar gering ist und dass deshalb für die Beschreibung der Emissionen der Maschinen ein Mittelwert angesetzt werden kann. Zur Abschätzung der Emissionsfaktoren für die Klassen „bis 1980“ wurden auf Basis der vorhandenen Daten aus (Euromot, 1995) und (BUWAL, 1996) Minderungs- bzw. Erhöhungsfaktoren gegenüber der Basisschicht „1991 bis Stufe 1“ abgeleitet und auf diese angewandt. Die Zwischenschicht „1981 – 1990“ wird linear zwischen den Werten der Schicht „bis 1980“ und „1991 bis Stufe 1“ interpoliert.

Für Zweitakt-Motoren der Klasse SN3 (hauptsächlich Rasenmäher) wurden für die 80er-Jahre die gleichen Emissionsfaktoren verwendet wie für die folgenden Jahre, da hier von gleicher Motortechnik ausgegangen wird. Bei der Ermittlung von Emissionsfaktoren von kleinen Otto-4-Takt-Motoren (<19 kW), die die Grenzwerte der Stufe I oder II erfüllen, wurden das

Emissionsverhalten von aktuellen Motoren, EPA-Typprüfdaten (EPA, 2003a) sowie die Grenzwerte berücksichtigt.

Schon heute liegen die Emissionen der 4-Takt-Motoren einiger Größenklassen unter den zukünftig vorgeschriebenen Grenzwerten. In diesem Fall werden auch für Motoren, die die zukünftige Grenzwertgesetzgebung erfüllen müssen, die gleichen Emissionsfaktoren verwendet. Erreichen die heutigen Motoren die zukünftige Grenzwertgesetzgebung nicht, wird auf Basis von EPA-Typprüfdaten und den Grenzwerten ein Emissionsfaktor ermittelt. Für die Stufe V wurde mangels weiterer Daten angenommen, dass die Emissionsfaktoren genau den Grenzwerten entsprechen.

Tabelle 14: Emissions- und Verbrauchsfaktoren für Otto 4-Takt-Motoren in g/kWh

	SH1	SH2	SH3	SN1	SN2	SN3	SN4*
Kraftstoffverbrauch (g/kWh)							
vor 1981		496,1		603	627	600,6	538,78
1981-1990		473,55		603	598,5	573,3	514,29
1991-Stufe I		451		603	570	546	489,8
Stufe I		405,9		475	450	546	489,8
Stufe II		405,9		475	450	546	489,8
Stufe V		405,9		475	450	546	489,8
NO_x (g/kWh)							
vor 1981		2,35		1,21	2,35	2,55	1,3
1981-1990		3,53		1,81	3,52	3,83	1,95
1991-Stufe I		4,7		2,41	4,69	5,1	2,6
Stufe I		4,7		4,32	4,69	5,1	2,6
Stufe II		4,7		4,32	4,69	5,1	2,6
Stufe V		4,7		4,32	3,5	2,6	1,4
PM (g/kWh)							
vor 1981		0,09		0,09	0,09	0,09	0,09
1981-1990		0,08		0,08	0,08	0,08	0,08
1991-Stufe I		0,06		0,06	0,06	0,06	0,06
Stufe I		0,06		0,06	0,06	0,06	0,06
Stufe II		0,06		0,06	0,06	0,06	0,06
Stufe V		0,06		0,06	0,06	0,06	0,06
HC (g/kWh)							
vor 1981		33		26,94	10,46	19,05	11,1
1981-1990		27,5		22,45	8,71	15,88	9,25

	SH1	SH2	SH3	SN1	SN2	SN3	SN4*
1991-Stufe I		22		17,96	6,97	12,7	7,4
Stufe I		22		16,05	6,97	11,64	7,4
Stufe II		22		16,05	6,97	9,39	7,4
Stufe V		22		16,05	6,5	7,4	3,95
CO (g/kWh)							
vor 1981		198		822,45	822,45	525	657
1981-1990		165		685,38	685,38	437,5	547,5
1991-Stufe I		132		548,3	548,3	350	438
Stufe I		132		411,24	467,1	350	438
Stufe II		132		411,24	467,1	350	438
Stufe V		132		411,24	467,1	350	221

Quelle: (Euromot, 1995), (BUWAL, 1996), (EPA, 2003a) und ifeu-Annahmen. Ergänzung: * ab Stufe V aus dem Mittelwert des Grenzwertes für NRS v2a und NRS v 2b,3 abgeleitet

4.3.2 Zweitaktmotoren

Heutzutage werden Zweitaktmotoren fast nur noch in handgehaltenen Geräten - insbesondere bei professionellen Kettensägen - eingesetzt. Bis in die 80er-Jahre wurde auch noch eine größere Anzahl von 2-Takt-Motoren bei neuen Rasenmähern eingebaut.

Aktuell basieren die Emissionsfaktoren auf Auswertungen von verschiedenen Messprogrammen in [Sachse 2002a]. Emissionsfaktoren für Motoren ab Stufe I wurden bei HC, CO und NO_x analog dem Verfahren bei 4-Takt-Motoren aus der Kombination von Grenzwerten und vorhandenen Typprüfdaten der EPA abgeleitet. Die Werte für PM-Emissionen der Otto-Motoren basieren auf weiteren Messwerten, u.a. aus (EPA, 1999; Sachse, 2002). Die 2-Takt-Motoren fallen ebenfalls unter die Grenzwerte der Stufe V. Wurden hierbei die Stufe V-Grenzwerte schon mit den Emissionsfaktoren der Stufe II unterschritten, wird der Emissionsfaktor der Stufe II beibehalten, da nicht davon ausgegangen wird, dass die Emissionen bei Stufe V Motoren gestiegen sind.

Tabelle 15: Emissions- und Verbrauchsfaktoren für Otto 2-Takt-Motoren in g/kWh

2 Takt	ES	HC	CO	NO _x	PM	Kraftstoff
SH2	bis 1980	305	695	1,0	7,0	882
	1981-1990	300	579	1,0	5,3	809
	1991 bis Stufe I	203	463	1,1	3,5	735
	Stufe I	188	379	1,5	3,5	720
	Stufe II	44	379	1,5	3,5	500
	Stufe V	44	379	1,5	3,5	500
SH3	bis 1980	189	510	1,1	3,6	665
	1981-1990	158	425	1,1	2,7	609

SN3	1991 bis Stufe I	126	340	1,2	1,8	554
	Stufe I	126	340	2,0	1,8	529
	Stufe II	64	340	1,2	1,8	500
	Stufe V	64	340	1,2	1,8	500
	bis 1980	155	418	0,5	2,6	652
	1981-1990	155	418	0,5	2,6	652
	1991 bis Stufe I	155	418	0,5	2,6	652
	Stufe V	9,97	418	0,03	2,6	652

Quelle: (EPA, 1999; Sachse, 2002) und ifeu-Annahmen

4.3.3 Emissionsfaktoren für Freizeitboote

Für Motorboote mit Otto-Motor, die noch keiner Richtlinie unterliegen, wurden Emissionsfaktoren auf Basis des NONROAD-Modells der EPA (EPA, 2002) zu Grunde gelegt. Abweichend vom EPA-Verfahren werden für Innenbordmotoren, die i.A. eine größere Leistung als die Außenbordmotoren und damit ein anderes Emissionsverhalten haben, die Emissionsfaktoren der Klasse 75 – 130 kW der Außenbordmotoren zu Grunde gelegt. Für Dieselmotoren werden die in diesem Projekt abgeleiteten Emissionsfaktoren der Jahre 1980 bis 1990 der entsprechenden kW-Klassen verwendet.

Die Emissionen der Motoren, die die Werte der Richtlinien 2003/44/EC (2006-2015) und 2013/53/EU (ab 2016) erfüllen müssen, werden dabei auf Basis der in den Richtlinien angegebenen Grenzwerte bzw. Formeln berechnet. Da die Motoren die Emissionswerte über ihre Lebenszeit erfüllen müssen, wird unterstellt, dass die Motoren im Neuzustand bei HC, CO, Partikel und NO_x um 20 % unter dem Grenzwert liegen. Liegen die bisherigen Emissionswerte schon unter den in der Richtlinie vorgeschlagenen Werten, dann werden auch für zukünftige Motoren diese Werte verwendet.

Tabelle 16: Emissions- und Verbrauchsfaktoren für Bootsmotoren in g/kWh

Antrieb	Otto 2-Takt Außenbord			Otto 4-Takt Außenbord			Otto 4-Takt Innenbord	Diesel Innenbord		
	0-3	3-12	>12	0-3	3-12	>12	75-130	<15	15-50	> 50
NO_x (g/kWh)										
ohne Grenzwert	4	2	3	5	7	10	12	11,5	18	8,6
2003/44/EU	4	2	3	5	7	10	12	7,8	7,8	7,8
2013/53/EU	1,4	1,1	1,6	1,2	5,4	7,5	3,3	4,1	4,2	4,3
PM (g/kWh)										
ohne Grenzwert	10	10	10	0,08	0,08	0,08	0,08	2,3	1,4	1,2
2003/44/EU	10	10	10	0,08	0,08	0,08	0,08	0,8	0,8	0,8
2013/53/EU	10	10	10	0,08	0,08	0,08	0,08	0,2	0,2	0,2

Antrieb	Otto 2-Takt Außenbord			Otto 4-Takt Außenbord			Otto 4-Takt Innenbord	Diesel Innenbord		
HC (g/kWh)										
ohne Grenzwert	341	257	172	121	24	14	10	3,8	2,2	2
2003/44/EU	83	42	30	121	24	14	6	1,7	1,5	1,3
2013/53/EU	28,6	22,8	16,3	28,8	18,5	10,5	1,7	0,9	0,8	0,7
CO (g/kWh)										
ohne Grenzwert	532	427	374	585	520	390	346	6	5,5	5,3
2003/44/EU	440	184	134	585	520	390	125	4	4	4
2013/53/EU	440	184	134	493	463	345	75	4	4	4
Kraftstoff (g/kWh)										
ohne Grenzwert	791	791	791	426	426	426	426	285	281	275
2003/44/EU	791	791	791	426	426	426	426	285	281	275
2013/53/EU	791	791	791	426	426	426	426	285	281	275

Quelle: (EPA, 2002), (EU, 2013) und ifeu-Annahmen

4.3.4 Emissionsfaktoren für Gabelstapler (Flüssiggasmotoren)

Die Emissionsfaktoren für Treibgasstapler wurden basierend auf Daten aus einem Messprogramm für die EU (Miersch, Wolfgang / Sachse, Jürgen, 1999) von drei Flüssiggasmotoren für Gabelstapler im Messzyklus C2 abgeleitet. Da vor der Einführung der Stufe V in Europa keine Emissionsstandards für LPG-Motoren in mobilen Maschinen bestanden, wurde hierbei ein Mittelwert angenommen, der über alle Jahre konstant bleibt. Da keine Messdaten zu den PM-Emissionen vorlagen, wurde der Emissionsfaktor aus (BAFU, 2008) für die Technologie LPG Oxi-Kat übernommen. Die Emissionsfaktoren für die Stufe V werden aus den entsprechenden Grenzwerten für Fremdzündungsmotoren abgeleitet. Liegen keine Grenzwerte vor (z.B. PM und Kraftstoffverbrauch) oder wurden diese bereits in der vorigen Stufe unterschritten, wird der Emissionsfaktor der vorigen Stufe übernommen.

Tabelle 17: Emissionsfaktoren für Treibgas-Stapler (19-37 kW) in g/kWh

Emissionsstufe	HC	CO	NO _x	PM	Kraftstoffverbrauch
bis 1980 bis Stufe V	2,17	1,5	19	0,01	311
Stufe V	0,27	1,5	2,43	0,01	311

Quelle: (Miersch, Wolfgang / Sachse, Jürgen, 1999), (BAFU, 2008) und ifeu-Annahmen

4.3.5 Betankungs- und Verdunstungsverluste

Neben den Emissionen, die während des Betriebs der Motoren durch die Verbrennung der Kraftstoffe entstehen, treten auch Emissionen beim Betanken und durch Verdunstung auf. Hierbei handelt es sich vor allem um Emissionen von Kohlenwasserstoffen bei mit Benzin

betriebenen Motoren. Betankungs- und Verdunstungsverluste beim Betrieb von Diesel-Motoren werden in TREMOD-MM nicht berücksichtigt. Deren Höhe wird als gering eingeschätzt und zudem liegen hier wenig abgesicherte Daten vor. Eine ausführliche Konzeption, Darstellung und umfassende Datensammlung wurde von der EPA (Dolce, 1998; Harvey, 1998) veröffentlicht. Diese Daten wurden für TREMOD-MM adaptiert.

Die Berechnung der Kohlenwasserstoff-Emissionen erfolgt nach Formel 7:

$$\text{Formel 7: } E_{\text{HC}} = E_{\text{NHC}} + [E_{\text{FB}} * \text{KV}] + [E_{\text{FV}} * \text{B}]$$

mit

E_{NHC} : HC Emissionen durch die Nutzung (g)

E_{FB} : Emissionsfaktor für die Betankung (g HC/g Kraftstoff)

KV: Kraftstoffverbrauch durch die Nutzung (g Kraftstoff)

E_{FV} : Emissionsfaktor für die Verdunstung (g HC/ a)

B: Bestand

Betankungsemissionen (Verschüttung und Verdrängung)

Betankungsverluste werden in Verschüttung flüssigen Kraftstoffs und Verdrängung von Benzindampf unterschieden. Durch die Betankung mit einem Liter Benzin wird z. B. ein Liter Benzindampf verdrängt. Zur Bestimmung der Emissionsfaktoren für die Betankung ist das Tankvolumen eine wichtige Größe. Die EPA und andere Institutionen werteten hierzu zahlreiche Hersteller-Daten aus und ergänzten sie durch Expertenabschätzungen und Regressionen.

Die Verschüttungsverluste bei der Betankung verschiedener Maschinen wurden detailliert von (LTC, 1994) behandelt. Pro Betankungsvorgang werden im Durchschnitt 9,5 g verschüttet, wobei die Bandbreite von 2,1 bis 41,3 g sehr groß ist. Die Werte der (CEPA, 1998) liegen zwischen 3,6 und 17 g, also in der gleichen Größenordnung und ebenfalls mit einer erheblichen Streuung.

Da die Emissionsfaktoren für Betankungsemissionen (Verschüttung und Verdrängung) bei der EPA (CEPA, 1998) detaillierter vorliegen, werden diese in TREMOD-MM übernommen (Tabelle 18). Damit werden im Modell die HC-Emissionen bei der Betankung über den Kraftstoffverbrauch der Motoren berechnet.

Tabelle 18: Emissionsfaktoren für Betankung (Verschüttung und Verdrängung)

2-Takter	g/g Kraftstoffverbrauch
Rasenmäher	0,0195
Kettensägen	0,0242
Trimmer/Freischneider	0,0336
Sonstige Ausrüstung	0,0336
Sport- und Freizeitboote	0,0010
4-Takter	g/g Kraftstoffverbrauch
Verdichtungsmaschinen	0,0064

Rasenmäher	0,0195
Aufsitzmäher	0,0025
Sport- und Freizeitboote	0,0010

Quelle: (CEPA, 1998) und ifeu-Annahmen

Verdunstungsverluste

Als Verdunstungsverlust wird die Verdunstung unverbrannten Treibstoffes vor allem am Tank und im Vergaser bezeichnet. Von der EPA werden diejenigen Verdunstungsverluste berücksichtigt, die durch natürliche Änderungen in den Umweltbedingungen (Temperatur, Druck, etc.) – während die Maschine nicht genutzt wird - auftreten. Verdunstung, die direkt nach oder während der Benutzung, z.B. durch die erhöhte Temperatur der Motoren auftreten, konnten aufgrund fehlender Daten nicht berücksichtigt werden (Harvey, 1998).

Tabelle 19: Emissionsfaktoren für die Verdunstung in g/Tag

Maschinenkategorie	Verdunstung (g/ Tag)	Verdunstung (g/ a)
Rasenmäher	4,00	916
Trimmer/Freischneider	0,54	124
Sonstige Ausrüstung	0,54	124
Motorsägen	0,32	73
Aufsitzmäher	3,70	847
Verdichtungsmaschinen (Stampf- und Rüttelgeräte sowie Walzen)	2,40	550
Sport- und Freizeitboote	2,40	550

Quelle: (Harvey, 1998), (GLC, 2003) und ifeu-Annahmen

Die Verdunstungsverluste entstehen unabhängig von der Nutzung der Maschinen. Deshalb werden die Werte von (Harvey, 1998) in g/ Tag angegeben. Unter zu Zugrundelegung einer „Evaporative Emission Season“ von 229 Tagen (GLC, 2003), wird die jährliche Verdunstung für die verschiedenen Maschinen ermittelt (Tabelle 19).

4.4 Verschlechterungsfaktoren

Kurzfassung zum Datenstand

- ▶ Die Verschlechterungsfaktoren entstammen aus Literatur der 1990er Jahre und wurden seither nicht aktualisiert.
- ▶ Für Otto-Motoren werden Verschlechterungsfaktoren bis zur Stufe II nach Emissionsstandard differenziert, für Dieselmotoren bis Stufe IIIA. Für neuere Motoren wurden die Verschlechterungsfaktoren der vorigen Stufen übernommen, da keine aktuellen Daten vorlagen.

Die Veränderung der spezifischen Emissionen von Motoren in Abhängigkeit vom Alter wird im Modell mit einem Änderungsfaktor abgebildet, der sogenannte „Verschlechterungsfaktor“. In der

Literatur und aktuellen Modellen werden sehr unterschiedliche Systematiken bei der Anwendung von Verschlechterungsfaktoren genutzt. Ein Vergleich der Faktoren ist durch die Unterschiede in der Systematik kaum möglich. Das differenzierte Modell der US EPA berücksichtigt sowohl die Größenklasse, die Emissionsstufe als auch Abgasreinigungstechniken (Lindhjem, 1998). Dieses Modell wurde daher für TREMOD-MM adaptiert. Der Änderungsfaktor wird also errechnet als:

Formel 8: $DF_A = 1 + DF_{konst} * (Z)$ für Diesel und 2-Takt Maschinen

Formel 9: $DF_A = 1 + DF_{konst} * (Z)^{0,5}$ für 4-Takt Maschinen

DF_A Änderungsfaktor für die Berücksichtigung der altersabhängigen Emissions-Änderungen

DF_{konst} Änderungskonstante

$Z =$ Alter/ mittlere Lebensdauer für Alter \leq mittlere Lebensdauer

$Z =$ 1 für Alter $>$ mittlere Lebensdauer

Durch den linearen Zusammenhang zwischen Alter und Verschlechterung bzw. Verbesserung bei Diesel- und 2-Takt-Motoren ändert sich damit der Emissionsfaktor bis zur mittleren Lebensdauer konstant um DF_{konst} /mittleres Lebensalter pro Jahr und erreicht bei der mittleren Lebensdauer sein Maximum ($1 + DF_{konst}$). Danach bleibt er auch für ältere Motoren konstant. Nach dem Erreichen der mittleren Lebensdauer findet keine weitere Verschlechterung statt. So bedeutet ein Faktor von 0,473 bei Partikeln, dass sich die spezifischen Emissionen (g/kWh) bis zur mittleren Lebensdauer der Motoren um 47,3 % erhöhen und danach konstant bleiben. Bei NO_x kommt es teilweise sogar zu einer Verbesserung des Emissionsverhaltens mit dem Alter. Der Grund wird nach {Citation} darin gesehen, dass die Abnutzung der kleinen Motoren dazu neigt, das Kraftstoff-Luft-Verhältnis fetter werden zu lassen, wodurch Produkte unvollständiger Verbrennung wie Kohlenwasserstoffe, Partikel und Kohlenmonoxid zunehmen, während die NO_x -Bildung unterdrückt wird.

Die angewendeten Verschlechterungsfaktoren sind in Tabelle 20 bis Tabelle 22 dokumentiert. Da keine neueren Auswertungen einbezogen werden konnten, werden die nur für ältere Abgasstufen vorliegenden Daten auch für die neue Abgasstufen übernommen. Für LPG-Stapler werden die Verschlechterungsfaktoren der 4-Takt Motoren (SN4) übernommen.

Tabelle 20: Verschlechterungsfaktoren für handgehaltene Otto-Maschinen

Motorklasse	Schadstoff	(% Änderung pro % verstrichener Lebensdauer)			
		vor Stufe I	Stufe I	Stufe II	Stufe V
SH1 (2-Takt)	HC	0,2	0,24	0,24	0,24
	CO	0,2	0,24	0,24	0,24
SH2 (2-Takt)	HC	0,2	0,29	0,29	0,29
	CO	0,2	0,24	0,24	0,24
SH3 (2-Takt)	HC	0,2	0,266	0,266	0,266
	CO	0,2	0,231	0,231	0,231
	NO_x	-0,031	0	0	0

Quelle: (Lindhjem, 1998) und ifeu-Annahmen

Tabelle 21: Verschlechterungsfaktoren für nichthandgehaltene Otto-Maschinen

Motorklasse	Schadstoff	vor Stufe I	Stufe I	Stufe II	Stufe V
		(% Änderung pro % verstrichener Lebensdauer)			
SN1-3 (2-Takt)	HC	0,201	0,266	0	0
	CO	0,9	1,109	1,109	1,109
	NO _x	-0,6	-0,33	-0,33	-0,33
	PM	1,1	5,103	5,103	5,103
SN 1-3 (4-Takt)	HC	1,1	1,753	1,753	1,753
	CO	0,9	1,051	1,051	1,051
	NO _x	-0,6	-0,3	-0,3	-0,3
	PM	1,1	1,753	1,753	1,753
SN 4 (2-Takt)	HC	0,201	0	0	0
	CO	0,199	0	0	0
	CO	0,9	0,887	0,887	0,887
	NO _x	-0,6	-0,274	-0,274	-0,274
	PM	1,1	1,935	1,935	1,935
SN4 (4-Takt)	HC	1,1	1,095	1,095	1,095
	CO	0,9	1,307	1,307	1,307
	NO _x	-0,6	-0,599	-0,599	-0,599
	PM	1,1	1,095	1,095	1,095

Quelle: (Lindhjem, 1998) und ifeu-Annahmen

Tabelle 22: Verschlechterungsfaktoren für Dieselmotoren

	vor Stufe I	Stufe I	Stufe II	Stufe IIIA	Stufe IIIB	Stufe IV	Stufe V
(% Änderung pro % verstrichener Lebensdauer)							
HC	0,047	0,036	0,034	0,027	0,027	0,027	0,027
CO	0,185	0,101	0,101	0,151	0,151	0,151	0,151
NO _x	0,024	0,024	0,009	0,008	0,008	0,008	0,008
PM	0,473	0,473	0,473	0,473	0,473	0,473	0,473

Quelle: (EPA, 2003b) und ifeu-Annahmen

4.5 Anpassung an transiente Zyklen („in-use adjustment“)

Kurzfassung zum Datenstand

- ▶ Die transienten Anpassungsfaktoren stammen aus älteren Studien und wurden zuletzt im Jahr 2014 validiert.
- ▶ Transiente Anpassungsfaktoren werden nur für Dieselmotoren bis zur Stufe IIIA verwendet, ab Stufe IIIB wird davon ausgegangen, dass die Basisemissionsfaktoren bereits den dynamischen Betrieb berücksichtigen.

Aktuell werden die transienten Anpassungsfaktoren (TAF) in TREMOD-MM bis einschließlich Stufe IIIA angewandt, da die Basisemissionsfaktoren hier nur den stationären Betrieb im NRSC und damit die realen Einsatzbedingungen nur ungenügend repräsentieren. Das reale Emissionsverhalten wird daher in TREMOD-MM bis Stufe IIIA über einen transienten Anpassungsfaktor (TAF) abgebildet, wobei Formel 10 zu Grunde liegt:

$$\text{Formel 10: TAF} = \text{EF}_{\text{trans}} / \text{EF}_{\text{stationär}}$$

TAF = Transient Adjustment Factor

EF_{trans} = Emissionen im transienten Zyklus

EF_{stationär} = Emissionen im stationären Zyklus

Als Datenquellen für die TAF werden Erhebungen der US EPA verwendet (EPA, 2010c). Der Ansatz der EPA, die TAF nach Lastgruppen einzuteilen, wurde übernommen. Zusätzlich wurde jedoch eine weitere Gruppe für Maschinen mit mittlerem Lastfaktor eingeführt. Zur Unterscheidung nach Grenzwertstufen werden die TAFs für Tier 0 bis 2 bis Stufe II und für Tier 3 bis Stufe IIIA verwendet (siehe Tabelle 20).

Tabelle 23: Transiente Anpassungsfaktoren für Motoren bis Stufe IIIA

Quelle	Lastfaktor		Stufe	PM*	NO _x	CO	HC	KV
(EPA, 2010c)	Hoch	> 0,45	< St. II	1,23	0,95	1,53	1,05	1,01
			St. IIIA	1,47	1,04			
	niedrig	< 0,25	< St. II	1,97	1,1	2,57	2,29	1,18
			St. IIIA	2,37	1,21			
Eigene Annahme	mittel	0,25-0,45	< St. II	1,6	1,03	2,05	1,67	1,1
			St. IIIA	1,92	1,125			

Quelle: (EPA, 2010c) und ifeu-Annahmen. Ergänzung: * für PN werden dieselben TAF angenommen wie für PN

Ab Stufe IIIB kommt für die Typprüfung zusätzlich der Non-Road Transient Cycle (NRTC) zum Einsatz. Damit soll sichergestellt werden, dass die Emissionen auch im transienten Betrieb die Grenzwerte unterschreiten. Daher sind die Realemissionen bereits näherungsweise im Basisemissionsfaktor enthalten und es wird ein TAF von 1 angenommen. Wie zuvor beschrieben, zeigen die PEMS-Messungen im Realbetrieb jedoch, dass dies nicht für alle Schadstoffe der Fall ist. Allerdings liegen zum dynamischen Emissionsverhalten dieser neueren

Motoren noch nicht genügend Daten vor, um eine Unterscheidung nach Anwendung bzw. Maschinentyp vorzunehmen.

4.6 Emissionsfaktoren für N₂O, NH₃, CH₄, CO₂, SO₂, BC, und PN

Kurzfassung zum Datenstand

- ▶ CH₄, NH₃, und N₂O Emissionsfaktoren stammen aus dem aktuellen EMEP/EEA Emission Inventory Guidebook 2019. Die Daten gehen jedoch auf ältere Quellen aus dem Jahr 2007 zurück.
- ▶ Die CO₂ und SO₂ Faktoren stammen aus TREMOD 6.1, 2019.
- ▶ Die Black Carbon-Anteile gehen auf ältere Studien aus dem Jahr 2007 zurück.
- ▶ Die Partikelanzahl-Emissionen wurden aus Einzelmessungen für NRMM und den Emissionsfaktoren für schwere Nutzfahrzeuge bis zum Jahr 2014 abgeleitet.

Eine Reihe von Komponenten wird nicht durch Emissionsstandards begrenzt. Daher ist die Verfügbarkeit von Messdaten hier eingeschränkt, und einige Komponenten wurden erst nachträglich in TREMOD-MM ergänzt bzw. in die Regulierung aufgenommen (z.B. PN). Für diese Komponenten erfolgt keine weitere Korrektur, um eine Verschlechterung oder transiente Nutzung abzubilden. Die Ableitung der Emissionsfaktoren wird daher hier gesondert dargestellt.

4.6.1 CH₄, NH₃ und N₂O

Die Schadstoffe CH₄, NH₃ und N₂O werden nicht durch Emissionsstandards begrenzt, daher liegen auch deutlich weniger Daten vor. Aufgrund der geringeren Datenverfügbarkeit können die Emissionsfaktoren nicht - ähnlich den regulierten Schadstoffen - aus Messdaten abgeleitet werden. Aus Gründen der Konsistenz und der internationalen Vergleichbarkeit werden für NH₃ und N₂O die Faktoren aus dem EMEP/EEA-Handbuch der Europäischen Umweltagentur (EEA) in der Version von 2019 übernommen (Winther / Dore, 2019).

Aufgrund der geringen Differenzierung und schlechteren Datenlage sind hier die Unsicherheiten jedoch größer als bei den Emissionsfaktoren für regulierte Schadstoffe. Da keine gesetzlichen Bestimmungen gelten, werden die Faktoren des EMEP/EEA Handbuchs für alle Emissionsstufen angesetzt. Überdies werden die Faktoren auch nicht nach Motorleistung sondern nur nach Motortyp (Diesel und Otto) unterschieden.

Die Emissionsfaktoren für Methan werden über ihren Anteil an den gesamten Kohlenwasserstoffemissionen berechnet. Dieses Vorgehen wird auch im Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs HBEFA angewandt und sichert die Konsistenz der berechneten Emissionen zwischen HC und CH₄. Die Methananteile für Diesel- und Otto-Motoren werden aus (Helms et al., 2009) übernommen. Für LPG werden die Daten von (Winther / Dore, 2019) verwendet.

Tabelle 24: Emissionsfaktoren N₂O und NH₃ in g/kWh

Schadstoff	Diesel	Otto 2-Takt	Otto 4-Takt	LPG
N ₂ O	0,035 g/kWh	0,010 g/kWh	0,030 g/kWh	0,050 g/kWh

Schadstoff	Diesel	Otto 2-Takt	Otto 4-Takt	LPG
NH ₃	0,002 g/kWh	0,002 g/kWh	0,002 g/kWh	0,003 g/kWh

Quelle: (Winther / Dore, 2019) und ifeu-Annahmen

Tabelle 25: Anteil der Methanemissionen an den gesamten HC-Emissionen

Schadstoff	Anteil CH ₄ an HC
Diesel	2,4 %
Otto 4-Takt	3,4 %
Otto 2-Takt	7,0 %
LPG	5,0 %

Quelle: (Winther / Dore, 2019) und ifeu-Annahmen

4.6.2 CO₂ und SO₂

Für die Berechnung der direkten CO₂-Emissionen werden kraftstoffbezogene Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes, bezogen auf den Energieinhalt der Kraftstoffe, verwendet (Allekotte et al., 2019). Die CO₂-Emissionsfaktoren für die Kraftstoffe und Gase wurden im Jahr 2018 vom Umweltbundesamt aktualisiert und gehen aus Tabelle 26 hervor.

Tabelle 26: CO₂-Emissionsfaktoren für Kraftstoffe und Gase (in kg/TJ)

Benzin	Diesel	Flüssiggas
75.286	74.027	66.334

Quelle: UBA-Daten, siehe (Allekotte et al., 2019)

Die direkten Emissionen von Schwefeldioxid werden verursacht durch die in den Kraftstoffen enthaltenen Schwefelanteile. Aufgrund der Gesetzgebung wurde der Schwefelgehalt jedoch stufenweise reduziert, so dass seit 2003 nur noch schwefelarme Kraftstoffe zugelassen sind (siehe Tabelle 27).

Tabelle 27: Schwefelanteil in den Kraftstoffen für ausgewählte Bezugsjahre in % (g/g) am Kraftstoffverbrauch

	1980	1990	2000	Ab 2011
Benzin	0,0250 %	0,0220 %	0,0070 %	0,0008 %
Diesel	0,2700 %	0,1700 %	0,0300 %	0,0008 %
LPG	0,0010 %	0,0010 %	0,0010 %	0,0010 %

Quelle: ifeu-Annahmen

4.6.3 Black Carbon (BC)

Die Emissionsfaktoren für die Komponente BC wurden aus dem EMEP/EEA Handbuch (2019) abgeleitet, wobei die dort verfügbaren Werte zuletzt in dem Jahr 2007 aktualisiert wurden. Die BC-Emissionen werden dabei als Anteile an den PM-Emissionen definiert. Grundlage dieser Anteilsfaktoren sind Analogieschlüsse zu ähnlichen Motorkonzepten in Straßenfahrzeugen. Die BC-Anteile an PM konnten direkt aus dem EMEP/EEA Handbuch in TREMOD-MM übernommen

werden, für die Stufe V wurde bei Dieselmotoren ein Konzept mit Partikelfilter angenommen. Die Anteile sind in nachfolgender Tabelle aufgeführt.

Tabelle 28: Emissionsfaktoren für Black Carbon (Anteile an PM g/g)

Antrieb	Leistung	Vor Stufe I	Stufe I	Stufe II	Stufe IIIA	Stufe IIIB	Stufe IV	Stufe V
Diesel	>=130 kW	50 %	70 %	70 %	70 %	70 %	70 %	15 %
Diesel	<130 kW	55 %	80 %	80 %	80 %	80 %	80 %	15 %
Benzin-2T	<130 kW	5 %	5 %	5 %				5 %
Benzin-4T	<130 kW	5 %	5 %	5 %				5 %
LPG	<130 kW	15 %	15 %	15 %	15 %			15 %

Quelle: (Winther / Dore, 2019) und ifeu-Annahmen

4.6.4 Partikelanzahl (PN)

Eine umfangreiche Datenlage zu den PN-Emissionen (Partikelanzahl) ist aktuell nur für Straßenfahrzeuge vorhanden. Dabei sind die PN-Emissionen von Lkw im Gegensatz zu den PM-Emissionen (Partikelmasse) in der Vergangenheit kaum gesunken. Dies liegt darin begründet, dass erst seit Euro-VI (bei Diesel-Pkw ab Euro 5) ein PN-Grenzwert eingehalten werden muss, welcher in der Regel den Einsatz von Partikelfiltern erfordert. Eine solche Regulierung für mobile Maschinen erfolgt erst für die ab 2019 vorgesehene Stufe V. Der Einsatz von Partikelfiltern bei Stufe IIIB und IV wurde in (Helms / Heidt, 2014b) untersucht. Laut Angaben verschiedener Maschinenhersteller und Experteneinschätzungen wurde hierbei für Baumaschinen und Traktoren ab 56 kW nur für 13-40 % der Neuzulassungen der Einbau eines Dieselpartikelfilters (DPF) erwartet, für kleinere Maschinen gar kein Einsatz von DPF. Daher wird vereinfacht davon ausgegangen, dass erst mit Stufe V eine signifikante Reduktion der PN-Emissionen stattfindet. Zur Überprüfung dieser Annahme bedarf es jedoch weiterer Untersuchungen.

Die PN-Emissionen mobiler Maschinen wurden bisher nur in vereinzelten Messprogrammen von Herstellern untersucht und veröffentlicht. Daher müssen diese Faktoren weitgehend neu abgeleitet werden. Dabei wurde wie folgt vorgegangen:

- ▶ **Auswertung von PN-Messungen für einzelne Motoren:** Messergebnisse für die PN-Emissionen mobiler Maschinen sind in (May et al., 2010) und (Niemi et al., 2012) veröffentlicht. In (May et al., 2010) wurden Messungen an einem Motor mit 93 kW Leistung, konzipiert für die Stufe IIIB, mit und ohne Abgasminderungssystem durchgeführt. Die Ergebnisse wurden jeweils für verschiedene Prüfzyklen sowie im heißen und kalten Zustand dargestellt. In (Niemi et al., 2012) wurden mehrere Motoren mit unterschiedlicher Einstellung und verschiedenen Abgasminderungssystemen (EGR, SCR) in diversen Betriebspunkten (z.B. halbe Last, Nenndrehzahl) getestet. Die Ergebnisse der beiden Quellen wurden, so weit möglich, aufbereitet, um den Emissionsfaktoren pro Abgasstufe in TREMOD-MM zugeordnet werden zu können.
- ▶ **Abschätzung der PN-Emissionen aus Werten für schwere Nutzfahrzeuge (SNF):** Aus den Werten des HBEFA 3.2 wurde das Verhältnis der PN/PM-Emissionen von SNF (siehe

Abbildung 11) ausgewertet. Ausgehend von einer Abschätzung in (Helms / Heidt, 2014a) wurden den Emissionsstufen der Straßenfahrzeuge vergleichbare Stufen für mobile Maschinen zugeordnet. Aus der Multiplikation der PM-Faktoren in TREMOD-MM mit dem PN/PM-Verhältnis der SNF wurden somit die PN-Emissionen abgeschätzt.

- ▶ **Berücksichtigung des Emissionsgrenzwertes für Stufe V:** Mit Einführung der Stufe V gilt ein konkreter PN-Grenzwert von $1 \cdot 10^{12}$ Partikeln pro kWh für alle Dieselmotoren in mobilen Maschinen von 19 bis 560 kW.

Die Werte der beiden Literaturquellen wurden dabei, soweit möglich, den verschiedenen Emissionsstufen in TREMOD-MM zugeordnet. Eine Unterscheidung nach Leistungsklassen wird aufgrund mangelnder Informationen nicht vorgenommen. Wegen der geringen Anzahl an Daten und der eingeschränkten Übertragbarkeit, der aus dem HBEFA abgeleiteten Werte, wurden nur drei Klassen unterschieden:

- ▶ Für Motoren bis zur Stufe IIIA wird mit $1 \cdot 10^{15}$ Partikel pro kWh derselbe Wert angenommen. Der Faktor liegt damit über der Abschätzung nach HBEFA, aber unter den Messergebnissen von (Niemi et al., 2012).
- ▶ Für Motoren mit Stufe IIIB und IV wurde mit $3 \cdot 10^{14}$ Partikel pro kWh eine Reduktion gegenüber den älteren Stufen angenommen, da dieser Trend sich auch aus den HBEFA-Daten abzeichnet. Der Wert wurde jedoch etwas höher angenommen und orientiert sich somit stark an den wenigen Messergebnissen für mobile Maschinen.
- ▶ Der Wert für Stufe V wird analog zum Grenzwert von $1 \cdot 10^{12}$ und damit ebenfalls eher konservativ angesetzt.
- ▶ Für Benzin- und LPG-Motoren wird mangels konkreter Messwerte entsprechend dem PN/PM-Verhältnis von Benzin-Pkw mit Euro 0, bzw. 2-Taktern ein Wert von $2 \cdot 10^{14}$ Partikel je Gramm PM angenommen. Die PN-Basisemissionsfaktoren der mobilen Maschinen haben damit eine ähnliche Bandbreite wie die der Dieselmotoren ($\sim 1 \cdot 10^{15}$ #/kWh bei handgehaltenen 2-Taktern, $2 \cdot 10^{12}$ #/kWh bei LPG-Staplern).

Aus den Untersuchungen von (Niemi et al., 2012) zeigt sich auch, dass die Betriebsbedingungen einen relevanten Einfluss auf die Höhe der PN-Emissionen haben. Unter Extrembedingungen, z.B. bei 10 % Motorlast und Nenndrehzahl liegen die Emissionen um den Faktor 2 bis 5 höher als bei halber Last und Nenndrehzahl. Bei den PM-Emissionsfaktoren bis zur Stufe IIIA wird dieser Effekt in TREMOD-MM über transiente Anpassungsfaktoren abgebildet (Faktor 1,47-2,37 gegenüber dem Basisfaktor). Aufgrund der geringen Datenverfügbarkeit werden dieselben Faktoren auch für die PN-Emissionen übernommen. Dies gilt auch für die altersbedingten Verschlechterungsfaktoren.

5 Bestands- und Aktivitätsdaten

Das folgende Kapitel fasst die aktuellen Datengrundlagen des Mengengerüsts von TREMOD-MM für jeden Sektor zusammen. Zu den Bestandsdaten zählen die Anzahl der Maschinen im Bestand, die Anteile nach Antriebsart und Größenklassen sowie die mittleren Lebenszeiten. Bei den Aktivitätsdaten werden die mittleren jährlichen Betriebsstunden und Lastfaktoren beschrieben. Für das Trendszenario werden die Daten –soweit nicht anders beschrieben– übernommen.

5.1 Landwirtschaft

Kurzfassung zum Datenstand

- ▶ Die Bestandsdaten für die Zugmaschinen wurden zuletzt für das Bezugsjahr 2018 auf Basis von KBA-Daten (01.01.2019) aktualisiert. Für Mähdrescher werden Absatzdaten bis zum Jahr 2008 und anschließende Prognosen berücksichtigt. In der Landwirtschaft eingesetzte Rad- und Teleskoplader entstammen aus Hochrechnungen von Absatzzahlen bis zum Jahr 2016.
- ▶ Die Differenzierung nach Leistungsklassen reflektiert für Zugmaschinen den Stand des Jahres 2018. Für die Mähdrescher liegen Annahmen aus den Jahren 2008, für Ladegeräte aus dem Jahr 2010 zugrunde.
- ▶ Die Betriebsstunden wurden für das Bezugsjahr 2009 auf Basis von Gebrauchtbörsendaten und Schätzwerten aktualisiert.
- ▶ Die Lastfaktoren wurden aus der Schweizer Offroad-Datenbank übernommen.

In der Landwirtschaft werden hauptsächlich dieselbetriebene Zugmaschinen (Ackerschlepper und Geräteträger), Mähdrescher sowie teilweise Rad- und Teleskoplader eingesetzt. Die Leistungsbandbreite der eingesetzten Motoren ist dabei groß und reicht von sehr kleinen Ackerschleppern mit einer Leistung kleiner 18 kW bis zu großen Zugmaschinen und Mähdreschern mit über 130 kW (siehe Tabelle 29).

Tabelle 29: Eingesetzte Maschinen in der Landwirtschaft

Maschinenkategorie	Antrieb
Zugmaschinen	Diesel (< 18 bis 299 kW)
Mähdrescher	Diesel (130 bis 299 kW)
Radlader	Diesel (18 bis 299 kW)
Teleskoplader	Diesel (37 bis 129 kW)

5.1.1 Bestandsdaten

Das KBA erhebt für das Zentrales Fahrzeugregister (ZFZR) die Zulassungszahlen für Zugmaschinen, die unter anderem nach Zulassungsjahr und Leistungsklasse differenziert sind. Im Rahmen der regelmäßigen TREMOD-Aktualisierungen werden die Daten jährlich vom KBA bereitgestellt (KBA, n.d.). Relevant für die Landwirtschaft sind hierbei die sogenannten

landwirtschaftlichen Zugmaschinen⁶ (Ackerschlepper und Geräteträger), während Sattelzugmaschinen dem Straßenverkehr zugerechnet werden. Auf diesen Daten basiert der in TREMOD-MM berücksichtigte Bestand. Zwei Änderungen gegenüber der Statistik sind zu beachten:

- ▶ Von 2001 bis 2004 werden in den vom KBA veröffentlichten Statistiken Leistungsklassen verwendet, die nicht kompatibel zu der Grenzwertgesetzgebung im Non-Road-Bereich sind. Aufgrund der eindeutigen Trends in der Bestandsentwicklung wurden die Jahre 2000-2004 daher interpoliert.
- ▶ Ab 2008 werden vorübergehend stillgelegte Fahrzeuge in der KBA-Statistik nicht mehr berücksichtigt. Da diese Fahrzeuge bis 2007 nicht getrennt ausgewiesen wurden, müssen sie nun auf Basis des relativen Bestandsunterschieds zwischen 2007 und 2008 für die einzelnen Leistungsklassen herausgerechnet werden. Im Durchschnitt lagen die Bestandsdaten des KBA im Jahr 2008 etwa 3 % unter den Daten für 2007. Deshalb wird für die Jahre vor 2008 der Bestand im Modell entsprechend reduziert, um nur noch den Bestand ohne vorübergehend stillgelegte Fahrzeuge zu berücksichtigen.
- ▶ In der Forstwirtschaft werden häufig umgerüstete Ackerschlepper eingesetzt. Der Anteil ist mit deutlich weniger als 1 % am Gesamtbestand allerdings sehr gering. Zur genauen Abgrenzung werden die im Bereich Forstwirtschaft berücksichtigten Forstschlepper jedoch für den Bereich Landwirtschaft von den Bestandsdaten des KBA der entsprechenden Leistungsklasse 75-130 kW abgezogen.

Der Großteil des Maschinebestandes in der Landwirtschaft besteht heute aus Zugmaschinen. Hier lag der Bestand 2018 bei ca. 1,8 Mio. Fahrzeugen (siehe Tabelle 30). Abbildung 11 zeigt dabei eine Verschiebung des Maschinenbestandes hin zu Leistungsklassen größer 37 kW. Überdies kann von einem relevant steigenden Anteil von Zugmaschinen mit über 130 kW Leistung ausgegangen werden (Helms et al., 2009). Eine genaue Differenzierung liegt hierzu vom KBA jedoch nicht vor. Als erste Abschätzung wurde ein ab dem Jahr 2000 um jährlich 0,5 % wachsender Anteil der vom KBA mit über 75 kW Motorleistung erfassten Zugmaschinen der Leistungsklasse 130-299 kW zugeordnet. Ab 2010 wurde dieser Anteil jedoch als konstant angenommen, da es keine belastbaren Daten für die weitere Entwicklung gibt. Für die Maschinen dieser Leistungsklasse wird eine durchschnittliche Leistung von 150 kW angenommen.

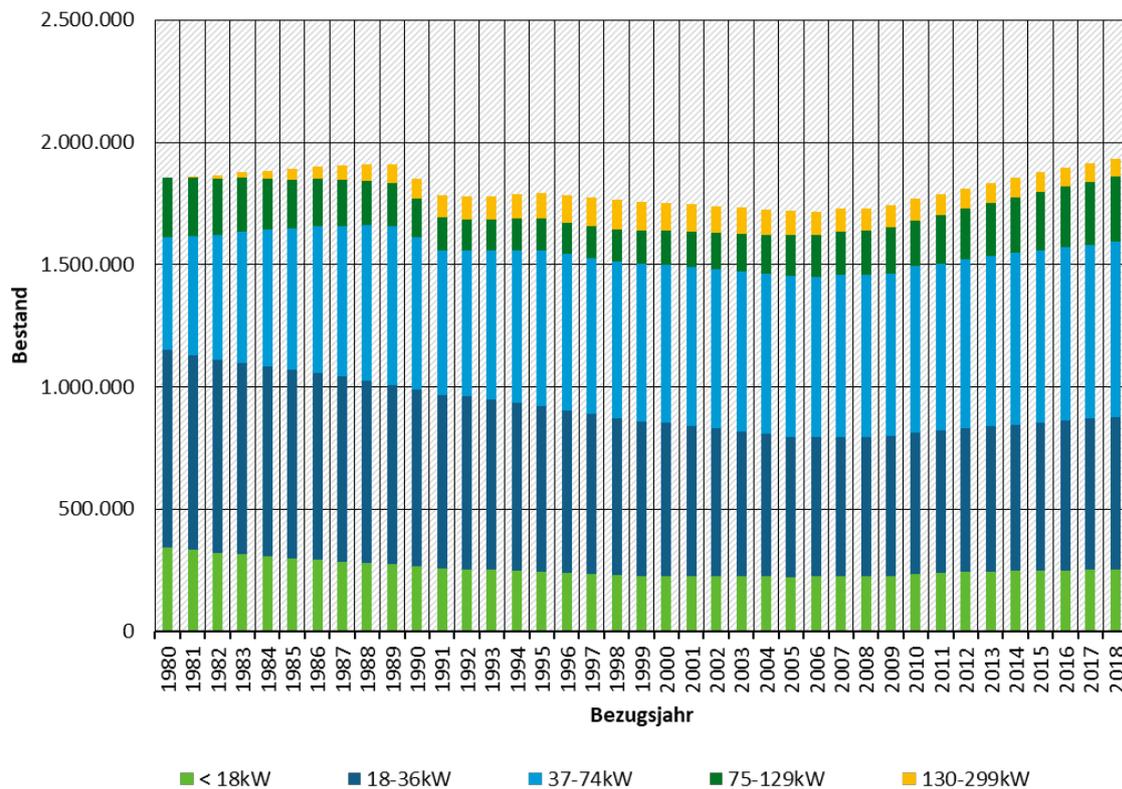
Der Bestand an Mähdreschern ist bis 1994 in den Jahrbüchern des Statistischen Bundesamt erfasst. Ab dann muss der Bestand auf Basis von Daten zum Inlandsabsatz von Mähdreschern der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE, 2008) abgeschätzt werden. Der hieraus ersichtliche Rückgang der Mähdrescher-Zulassungen wurde bis 2018 fortgeschrieben. Gleichzeitig ergab die Auswertung von Gebrauchtbörsen deutliche Leistungssteigerungen bei Mähdreschern für neuere Baujahre. Für die zukünftige Entwicklung der Leistung der Mähdrescher wird der bestehende Trend zunächst fortgeschrieben und läuft auf höherem Niveau von etwa 250 kW langsam aus. Ein ähnlicher Anstieg wurde auch von (Vorgrimler / Wübben, 2001) prognostiziert. Die Segmentanteile für Mähdrescher werden anhand der Entwicklung der mittleren Leistung abgeleitet. Dabei geht der Anteil der Mähdrescher von 75-

⁶ Dazu gehören laut KBA auch sogenannte „sonstiger Zugmaschinen“ mit Erstzulassungsjahr vor 1972

130 kW zwischen 1980 und 1999 von 100 % auf 0 % zurück. Ab 2000 wird dann für alle Mährescher von einer Leistung zwischen 130 und 300 kW ausgegangen.

Rad- und Teleskoplader werden ebenfalls in der Landwirtschaft eingesetzt; ihr Bestand ist jedoch vergleichsweise gering. Nach Empfehlungen des VDMA und Auswertungen von Off-Highway Research im Rahmen von (Helms / Heidt, 2014a) wurde hierbei angenommen, dass 30 % aller Radlader und 70 % aller Teleskoplader in der Landwirtschaft eingesetzt werden. Die restlichen Maschinen werden der Bauwirtschaft zugerechnet. Die Verteilung nach Leistungs- und Altersklassen wird analog zur Bauwirtschaft angenommen.

Abbildung 11: Entwicklung des Bestandes in der Landwirtschaft nach Leistungsklasse* 1980 bis 2018



Quellen: (BLE, 2008; KBA, n.d.; OHR, 2016; Vorgrimler / Wübben, 2001) und ifeu-Annahmen. Ergänzung: * Maschinen ohne nähere Angabe haben einen Dieselmotor

Tabelle 30: Bestände nach Maschinenkategorie in der Landwirtschaft für 2018

Maschinenkategorie	Anzahl
Mährescher	56.083
Radlader	36.846
Teleskoplader	9.719
Zugmaschinen	1.829.166

Quelle: (BLE, 2008; KBA, n.d.; OHR, 2016; Vorgrimler / Wübben, 2001) und ifeu-Annahmen. Ergänzung

Für das Trendszenario werden folgende Annahmen getroffen:

- ▶ Die Entwicklung für Zugmaschinen von 2019 bis 2050 wird auf Basis von Annahmen zur Entwicklung der jährlichen Neuzulassungen und aus den Statistiken des KBA abgeleiteten Überlebenswahrscheinlichkeiten berechnet. Für die Jahre 2019 bis 2050 wird ausgehend von dem Mittelwert der letzten neun Jahre eine gleichbleibende Anzahl von 45.000 Neuzulassungen pro Jahr angenommen. Die Verschiebung hin zu größeren Leistungsklassen setzt sich abgeschwächt fort.
- ▶ Der Rückgang der Mähdrescher-Zulassungen setzt sich bis 2020 fort, danach bleibt der Bestand mit ca. 50.000 Maschinen konstant.
- ▶ Der Bestand an Rad- und Teleskopladern bleibt konstant.

5.1.2 Aktivitätsdaten

Die in TREMOD-MM für Zugmaschinen und Mähdrescher verwendeten Nutzungsstunden basieren auf Auswertung von Gebrauchtbörsen, dokumentiert in (Lambrecht et al., 2004). Diese ergaben eine Tendenz zu höheren Betriebsstunden größerer Zugmaschinen. Diese Werte können aber nicht mehr plausibel auf die gesamte Zeitreihe angewandt werden. So sind Bestand und Nennleistung der Zugmaschinen zwar tendenziell angestiegen, die landwirtschaftliche Fläche und der gemäß Gasölrückerstattung gemeldete Dieselsatz sind jedoch eher stagnierend bis rückläufig. Daher wurden folgende Anpassungen vorgenommen:

- ▶ Die Basis-Nutzungsstunden wurden für alle Zugmaschinen >37 kW, welche den Hauptanteil an der Feldarbeit leisten, mit 300 h/a angesetzt. Hochgerechnet auf den gesamten Zugmaschinenbestand wird damit mit etwa 13 Stunden pro Hektar landwirtschaftliche Nutzfläche eine plausible Größenordnung abgebildet (Helms et al., 2009).
- ▶ Auf die Basis-Nutzungsstunden aller Zugmaschinen >37 kW werden jährliche Korrekturfaktoren aufgeschlagen, um den Anstieg des Zugmaschinenbestands und der mittleren Nennleistung abzuschwächen. Die jährlichen Basis-Nutzungsstunden liegen somit bis 1995 bei 300 h/a, im Jahr 2019 hingegen bei ca. 215 h/a.

Tabelle 31: Mittlere jährliche Betriebsstunden in der Landwirtschaft

Maschinentyp	Nutzungsstunden
Zugmaschinen < 18 kW	100
Zugmaschinen 18-36 kW	125
Zugmaschinen 37-129 kW	300*
Mähdrescher 130-299 kW	150
Teleskoplader < 18 kW	360
Teleskoplader 37-74 kW	480
Teleskoplader 75-129 kW	720
Teleskoplader 130-299 kW	950

Maschinentyp	Nutzungsstunden
Radlader < 18 kW	350
Radlader 18-36 kW	490
Radlader 37-74 kW	800
Radlader 75-129 kW	1.130
Radlader 130-299 kW	1.310

Quelle: Gebrauchtbörsenauswertungen und ifeu-Annahmen, siehe (Helms / Heidt, 2014a; Lambrecht et al., 2004)

* Basiswert, wird über Korrekturfaktor reduziert (2019 215 h/a)

Zu Lastfaktoren (siehe Tabelle 32) liegen nur wenige Daten vor, da die tatsächliche Motornutzung in der Praxis für verschiedene Einsatzgebiete unterschiedlich ist und Messungen entsprechend aufwendig sind. Es werden daher Daten vom schweizerischen Bundesamt für Umwelt verwendet, die für Zugmaschinen bei 0,3 und Mähdrescher bei 0,4 liegen (Notter / Schmied, 2015). Die Lastfaktoren für Teleskop- und Radlader wurden von den Baumaschinen übernommen (siehe Kapitel 5.2.2).

Tabelle 32: Lastfaktoren in der Landwirtschaft

Maschinentyp	Lastfaktor
Zugmaschinen	0,3
Mähdrescher	0,4
Teleskoplader	0,3
Radlader	0,35

Quelle: (Notter / Schmied, 2015)

5.2 Bauwirtschaft

Kurzfassung zum Datenstand

- ▶ Die Bestandsdaten für die Bauwirtschaft wurden zuletzt für das Bezugsjahr 2016 aktualisiert.
- ▶ Die Differenzierung nach Leistungsklassen reflektiert den Stand für 2010.
- ▶ Die Betriebsstunden wurden für das Bezugsjahr 2012 auf Basis von empirischen Daten ermittelt.
- ▶ Die Lastfaktoren wurden aus älteren Literaturquellen abgeleitet

Baumaschinen werden vor allem im Straßen-, Hoch- und Tiefbau eingesetzt und variieren je nach Einsatzgebiet stark in ihrer Größe und Leistung. In der Bauwirtschaft werden sowohl dieselbetriebene als auch benzinbetriebene Maschinen eingesetzt, wobei letztere nur bei kleineren Geräten vorkommen und einen geringen Anteil am Kraftstoffverbrauch der Bauwirtschaft haben. Kräne, Pumpen, Betonmischer, Schweißgeräte und Kühleinheiten, welche

über einen Elektroantrieb verfügen, werden nicht in TREMOD-MM berücksichtigt, da sie keine direkten Luftschadstoffemissionen emittieren.

Tabelle 33: Eingesetzte Maschinen in der Bauwirtschaft

Maschinenkategorie	Antrieb
Baggerlader	Diesel (37-74 kW)
Bauaufzüge	Elektrisch (< 18 kW)
Betonmischer	Diesel (< 18 kW)
Betonpumpen	Diesel (18-36 kW)
Dumper/ Muldenkipper	Diesel (130-559 kW)
Grader, Straßenhobel	Diesel (37-299 kW)
Gußasphaltkocher (Schwarzdecke)	Diesel (37-74 kW)
Kompaktlader	Diesel (18-74 kW)
Kompressoren	Diesel (<18-299 kW)
Minibagger	Diesel (<18-74 kW)
Mischanlagen (Schwarzdecke)	Diesel (37-74 kW)
Mobil- und Autokrane	Diesel (75-299 kW)
Mobilbagger	Diesel (37-299 kW)
Mörtelförderer- und Verputzgeräte	Diesel (18-36 kW)
Planierraupen	Diesel (37-299 kW)
Radlader	Diesel (18-299 kW)
Rambären	Diesel (75-129 kW)
Raupenbagger	Diesel (37-559 kW)
Raupenlader	Diesel (18-299 kW)
Straßenfertiger	Diesel (<18-299 kW)
Teleskoplader	Diesel (37-299 kW)
Turmdrehkrane	Elektrisch (37-74 kW)
Verdichtungsmaschinen	Diesel (<18-299 kW) Otto SN4

Anmerkung: Für elektrische Geräte werden Bestandsdaten erfasst, aber keine Energieverbräuche/Emissionen berechnet.

5.2.1 Bestandsdaten

Da die Bestände von Baumaschinen weniger detailliert erfasst und dokumentiert sind als bei Kraftfahrzeugen des Straßenverkehrs, müssen die Bestände der einzelnen Maschinensegmente schrittweise ermittelt werden. So werden zunächst Gesamtbestandszahlen der einzelnen

Baumaschinentypen erfasst und anschließend weiter differenziert nach Antriebsart, Leistung, Alter und Emissionsstandart.

Als Basis für die Baumaschinenbestände von 1980 bis 1996 werden Daten der statistischen Jahrbücher der BRD (bzw. der DDR) (SBD, n.d.) bis 1996 verwendet. Die weitere Bestandsentwicklung für 2010 und 2016 basiert (siehe Tabelle 34) auf den des britischen Consulting Unternehmens „Off Highway Research“ veröffentlichten Populationszahlen zu einzelnen Gerätetypen (OHR, 2016).

Tabelle 34: Quellen für Baumaschinenbestände in Deutschland nach Bezugsjahren

Quelle	Werte	Bezugsjahre im Modell
Statistische Jahrbücher [SBD]	Bestandszahlen	1980 bis 1996
Produktionsstatistik und Außenhandelsstatistik [DESTATIS]	Produktion und Ein- und Ausfuhr in Stückzahlen	1996 bis 2010
Equipment analysis reports Off Highway Research [OHR]	Bestandszahlen	2010 bis 2016

Die Bestandsentwicklung zwischen 1996 und 2010 wurde dann auf Basis von (DESTATIS, 2011) über die Produktionszahlen, sowie die Ein- und Ausfuhr von Maschinen modelliert. Dabei wurden die Abgänge über Verschrottung mit einberechnet, um mithilfe nachstehender Gleichung die jährliche Bestandsänderung zu berechnen:

$$\text{Jährliche Bestandsänderung} = \text{Produktion} + \text{Einfuhr} - \text{Ausfuhr} - \text{Verschrottung}$$

Da für die Verschrottungsrate keine Daten vorlagen, wurden hier Annahmen getroffen, die sich nach der durchschnittlichen mittleren Lebenszeit richten. Zwischen 2010 und 2016 erfolgt dann eine weitere Interpolation der Bestandszahlen.

Die ermittelten Bestände der einzelnen Maschinenkategorien werden dann weiter nach Nennleistungsklassen differenziert, die sich an der europäischen Grenzwertgesetzgebung orientieren. Als Basis für die Anteile der Nennleistungsklassen bis zum Basisjahr 1990 wurden Angaben von (Couson, 2003) übernommen, die Anteile für 2010 sowie die mittlere Leistung pro Klasse orientieren sich an Auswertungen von Firmendaten (siehe (Helms / Heidt, 2014a)). Für die dazwischenliegenden Bezugsjahre wurden die Anteile linear interpoliert. Ab 2010 wird angenommen, dass die Anteile nach Größenklassen unverändert bleiben.

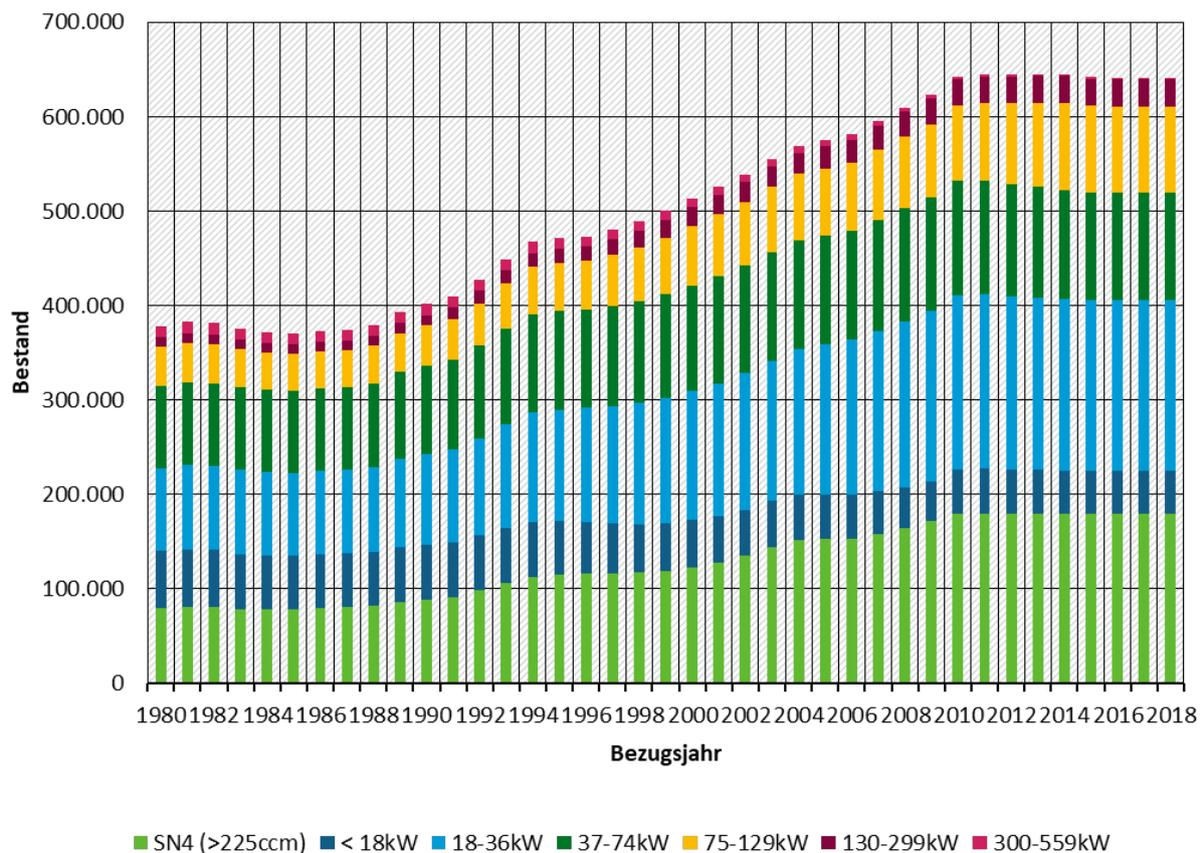
Tabelle 35: Anteile der Maschinenbestände nach Größenklassen 2018

Maschinen-Kategorie	< 18 kW	18-36 kW	37-74 kW	75-129 kW	130-299 kW	300-559 kW
Baggerlader		0%	100%	0%	0%	
Bauaufzüge (elektrisch)	100%					
Betonmischer	100%					
Betonpumpen		100%				
Dumper/ Muldenkipper	0%	0%	0%	0%	68%	32%

Maschinen-Kategorie	< 18 kW	18-36 kW	37-74 kW	75-129 kW	130-299 kW	300-559 kW
Grader, Straßenhobel		0%	10%	84%	6%	0%
Gußasphaltkocher (Schwarzdecke)			100%			
Kompaktlader	28%	28%	44%			
Kompressoren	8%	74%	15%	3%	0%	0%
Minibagger	21%	76%	3%			
Mischanlagen (Schwarzdecke)			100%			
Mobil- und Autokrane			0%	70%	30%	
Mobilbagger			9%	86%	6%	
Mörtelförderer- und Verputzgeräte		100%				
Planierraupen			5%	67%	28%	0%
Radlader		2%	85%	4%	9%	0%
Rambären				100%		
Raupenbagger			19%	50%	28%	2%
Straßenfertiger	1%	6%	10%	33%	51%	0%
Teleskoplader	0%	0%	13%	87%		
Turmdrehkrane (elektrisch)			100%			
Verdichtungsmaschinen	82%	5%	7%	5%	1%	

Die Entwicklung des resultierenden Gesamtbestandes an Baumaschinen ist von 1980 bis 2018 differenziert nach Leistungsklassen in Abbildung 12 dargestellt. Der Bestand der meisten Maschinenkategorien hat bis 2010 kontinuierlich zugenommen, vor allem bei den kleinen Leistungsklassen gab es große Zuwächse. Diese Entwicklung begründet sich in einer zunehmenden Mechanisierung der Bauwirtschaft, also eher strukturellen als konjunkturellen Trends. So werden insbesondere kleine Maschinen wie Minibagger vermehrt eingesetzt, um ehemals händische Arbeiten zu übernehmen (Helms / Heidt, 2014a). Zwischen 2010 und 2018 folgte dann eine Stagnation der Maschinenbestände. Die Bestände nach Maschinenkategorien sind beispielhaft für 2018 in Tabelle 36 aufgeführt.

Abbildung 12: Entwicklung des Bestandes in der Bauwirtschaft nach Leistungsklasse* 1980 bis 2018



Quellen: (Couson, 2003; DESTATIS, 2011; OHR, 2016; SBD, n.d.) und ifeu-Annahmen. * Maschinen ohne nähere Angabe haben einen Dieselmotor

Tabelle 36: Bestände nach Maschinenkategorie in der Bauwirtschaft für 2018

Maschinenkategorie	Anzahl	Maschinenkategorie	Anzahl
Baggerlader	5.000	Mobilbagger	48.000
Bauaufzüge	46.361	Mörtelförderer- und Verputzgeräte	30.615
Betonmischer	110.574	Planiertrauen	6.000
Betonpumpen	2.518	Radlader	70.000
Dumper/ Muldenkipper	3.500	Rammbären	3.580
Grader, Straßenhobel	800	Raupenbagger	35.000
Gußasphaltkocher (Schwarzdecke)	1.514	Raupenlader	1.000
Kompaktlader	5.500	Straßenfertiger	3.000
Kompressoren	87.061	Teleskoplader	3.600
Minibagger	90.000	Turmdrehkrane	35.033
Mischanlagen (Schwarzdecke)	241	Verdichtungsmaschinen	227.977
Mobil- und Autokrane	5.090		

Quellen: (Couson, 2003; DESTATIS, 2011; OHR, 2016; SBD, n.d.) und ifeu-Annahmen

Für die Bestimmung der durchschnittlichen mittleren Lebensdauern stützen sich die Annahmen auf die Emissionsinventare des JRC (JRC, 2008) und AEAT (McGinlay, 2004) sowie auf empirische Daten aus Firmenumfragen und Gebrauchtbörsen:

- ▶ (JRC, 2008) gibt nur zwei Klassen von Lebenszeiten an, mit 10 Jahren bzw. 6200 h für Motoren <37 kW und 16 Jahren bzw. 10000 h für Maschinen >37 kW.
- ▶ Die Zahlen von (McGinlay, 2004) liegen deutlich unter denen von JRC, repräsentieren aber mit Großbritannien einen Markt der extrem durch das Mietgeschäft und damit einen vergleichsweise jüngeren Maschinenpark geprägt sein dürfte⁷.
- ▶ Aus Daten von Gebrauchtbörsen und Industriedaten wurden Vergleichswerte für den Stand im Jahr 2010 abgeleitet. Diese Daten wurden zur Plausibilisierung und Differenzierung der Literaturwerte herangezogen, stellen jedoch nur eine Stichprobe des deutschen Bestandes dar.

Die abgeleitete mittlere Lebensdauer für die wichtigsten Maschinentypen zeigt Tabelle 37. Diese werden im Modell noch nach Größenklassen unterschieden.

Tabelle 37: Mittlere Lebensdauer der Maschinen in der Bauwirtschaft

Maschinenkategorie	Mittlere Lebensdauer in Jahren (Spannweite über die kW-Klassen)
Muldenkipper	10
Minibagger	10 - 12
Raupenbagger	10
Mobilbagger	10 - 12
Baggerlader	10 - 12
Planierraupen	14
Radlader	10 - 14
Raupenlader	10 - 15
Kompaktlader	10 - 12
Teleskoplader	10 - 12
Grader, Straßenhobel	10 - 12
Verdichtungsmaschinen	10 - 14
Straßenfertiger	9 - 11

⁷ Die Maschinen aus der Vermietung hierzulande gehen nach ca. 6-8 Jahren in den Gebrauchtmkt über. Je nach Maschinentyp gehen zwischen 30 und 50 % des Inlandabsatzes in das Mietgeschäft. In Großbritannien beträgt der Anteil der Mietmaschinen dagegen fast 90 % (Helms / Heidt, 2014a)

Maschinenkategorie	Mittlere Lebensdauer in Jahren (Spannweite über die kW-Klassen)
Kompressoren aller Art	12 - 16

Quellen: (JRC, 2008; McGinlay, 2004) und ifeu-Annahmen

Für das Trendszenario wird vereinfachend angenommen, dass die Anzahl der Maschinen und die Verteilung nach Antrieb und Leistungsklassen bis zum Jahr 2050 konstant bleiben.

5.2.2 Aktivitätsdaten

Zur Ermittlung der jährlichen Betriebsstunden wurde eine umfangreiche Auswertung empirischer Quellen verwendet, da die meisten größeren Baumaschinen über Betriebsstundenzähler verfügen. Mithilfe des Baujahrs einer Maschine und den abgelesenen Betriebsstunden kann somit auf die mittlere jährliche Nutzung rückgeschlossen werden.

Praxisdaten für die Auswertung wurden aus Gebrauchtbörsen bezogen und von Baufirmen zur Verfügung gestellt (Helms / Heidt, 2014a). Bei den Gebrauchtbörsen wurde darauf geachtet, nur Maschinenangebote mit Deutschland als Standort einzubeziehen. Insgesamt ergab sich hiermit eine Stichprobe von über 10.000 Maschinen. Beim Vergleich der resultierenden Werte mit Daten anderer Studien zeigt sich eine recht gute Übereinstimmung. Unterschiede bei den Stunden ließen sich teilweise über länderspezifische Anwendungen erklären⁸.

Zur Differenzierung der jährlichen Betriebsstunden nach Nennleistung wurden, wie bei den Betriebsstunden nach Maschinenkategorien, ebenfalls Daten aus Firmenbefragungen herangezogen. Diese wurden, wo möglich, mit den Daten aus Gebrauchtbörsen und Literaturwerten verglichen bzw. um solche ergänzt. Hierbei zeigt sich ein Trend von höheren Betriebsstunden bei höherer Nennleistung.

Eine Übersicht der aktuell verwendeten mittleren Betriebsstunden ist in Tabelle 38 dargestellt. Für Maschinenneuzugänge wird dabei, aufgrund fehlender Daten, ein pauschaler Aufschlag von 10 % auf die mittleren Praxiswerte angenommen.

Tabelle 38: Mittlere jährliche Betriebsstunden in der Bauwirtschaft

Maschinentype	Stunden	Maschinentype	Stunden
Baggerlader	650	Planierraupen (Diesel) 37-75 kW	820
Bauaufzüge	300	Planierraupen (Diesel) 75-130 kW	1.070
Betonmischer	280	Planierraupen (Diesel) 130-300 kW	1.220
Betonpumpen	250	Planierraupen (Diesel) 300-560 kW	1.200
Grader, Straßenhobel (Diesel) 18-37 kW	310	Radlader (Diesel) <18 kW	350
Grader, Straßenhobel (Diesel) 37-75 kW	390	Radlader (Diesel) 18-37 kW	490
Grader, Straßenhobel (Diesel) 75-130 kW	910	Radlader (Diesel) 37-75 kW	800
Grader, Straßenhobel (Diesel) 130-300 kW	1.560	Radlader (Diesel) 75-130 kW	1.130
Grader, Straßenhobel (Diesel) 300-560 kW	1.350	Radlader (Diesel) 130-300 kW	1.310

⁸ Beispielsweise werden Mobilbagger in Deutschland häufig eingesetzt, während Baggerlader und Kompaktlader verglichen mit England oder den USA hierzulande seltener zum Einsatz kommen.

Maschinentype	Stunden	Maschinentype	Stunden
Gußasphaltkoche (Schwarzdecke)	300	Radlader (Diesel) 300-560 kW	1.390
Kompaktlader (Diesel) < 18kW	260	Rammgeräte (Diesel)	300
Kompaktlader (Diesel) 18-37 kW	370	Raupenbagger (Diesel) <18 kW	290
Kompaktlader (Diesel) 37-75 kW	390	Raupenbagger (Diesel) 18-37 kW	560
Kompressoren aller Art (Diesel) <18 kW	80	Raupenbagger (Diesel) 37-75 kW	810
Kompressoren aller Art (Diesel) 18-37 kW	180	Raupenbagger (Diesel) 75-130 kW	1.200
Kompressoren aller Art (Diesel) 37-75 kW	290	Raupenbagger (Diesel) 130-300 kW	1.280
Kompressoren aller Art (Diesel) 75-130 kW	490	Raupenbagger (Diesel) 300-560 kW	1.260
Kompressoren aller Art (Diesel) 130-300 kW	530	Raupenlader (Diesel)	650
Kompressoren aller Art (Diesel) 300-560 kW	280	Straßenfertiger (Diesel) <18 kW	200
Minibagger (Diesel) <18 kW	290	Straßenfertiger (Diesel) 18-37 kW	410
Minibagger (Diesel) 18-37 kW	560	Straßenfertiger (Diesel) 37-75 kW	500
Minibagger (Diesel) 37-75 kW	560	Straßenfertiger (Diesel) 75-130 kW	700
Mischanlagen (Schwarzdecke) (Diesel) 37-75 kW	300	Straßenfertiger (Diesel) 130-300 kW	870
Mobil- und Autokrane (Diesel) 37-74 kW	490	Straßenfertiger (Diesel) 300-560 kW	930
Mobil- und Autokrane (Diesel) 75-129 kW	850	Teleskoplader (Diesel) <18 kW	290
Mobil- und Autokrane (Diesel) 130-299 kW	860	Teleskoplader (Diesel) 18-37 kW	380
Mobilbagger (Diesel) <18 kW	280	Teleskoplader (Diesel) 37-75 kW	580
Mobilbagger (Diesel) 18-37 kW	540	Teleskoplader (Diesel) 75-130 kW	720
Mobilbagger (Diesel) 37-75 kW	890	Teleskoplader (Diesel) 130-300 kW	770
Mobilbagger (Diesel) 75-130 kW	1.110	Teleskoplader (Diesel) 300-560 kW	860
Mobilbagger (Diesel) 130-300 kW	1.280	Verdichtungsm. (Diesel) <18 kW	140
Mobilbagger (Diesel) 300-560 kW	1.110	Verdichtungsm. (Diesel) 18-37 kW	380
Mörtelförderer- und Verputzgeräte (Diesel)	300	Verdichtungsm. (Diesel) 37-75 kW	530
Muldenkipper (Diesel) <18 kW	200	Verdichtungsm. (Diesel) 75-130 kW	610
Muldenkipper (Diesel) 18-37 kW	200	Verdichtungsm. (Diesel) 130-300 kW	670
Muldenkipper (Diesel) 37-75 kW	200	Verdichtungsm. (Otto-4-Takt)	130
Muldenkipper (Diesel) 75-130 kW	200		
Muldenkipper (Diesel) 130-300 kW	1.220		
Muldenkipper (Diesel) 300-560 kW	990		
Mobil- und Autokrane	5.090		

Quelle: Auswertung von Gebrauchtbörsen, Daten von Baufirmen und ifeu-Annahmen, siehe (Helms / Heidt, 2014a)

Die abgeleiteten mittleren jährlichen Betriebsstunden in Tabelle 38 repräsentieren jedoch einen Mittelwert des Maschinenparks für das Bezugsjahr 2011. Vor 2011 werden die jährlichen Betriebsstunden nach Bezugsjahren korrigiert. Hierfür wird ein preisbereinigter Index des baugewerblichen Umsatzes im Tiefbau verwendet, der sich auf Daten des Statistischen Bundesamts und des Hauptverbands der Deutschen Bauindustrie stützt. Dieser Index schwankt im Zeitraum der letzten zwanzig Jahre um ca. 30 %, und fällt tendenziell seit Mitte der 1990er. Da in derselben Zeitspanne eine Zunahme der Maschinenanzahl bei den meisten Kategorien erfolgte, erscheint eine Anpassung der Nutzung plausibel, um die konjunkturelle Entwicklung zu berücksichtigen. Nach 2011 hat sich die Anzahl der Maschinen im Bestand verglichen mit den Jahren davor wenig verändert. Daher wurde auf eine Anpassung der Nutzungsstunden verzichtet.

Die Lastfaktoren unterscheiden sich stark nach Maschine und Art der Nutzung. Beispielsweise werden Bagger und Radlader sehr dynamisch betrieben, sowohl temporär bei hoher Leistung, als auch über längere Zeiträume im Leerlauf. Straßenbaugeräte, wie Fertiger, werden dagegen bei geringer Last betrieben und Betonpumpen arbeiten oft mit konstanter und vergleichsweise hoher Last (McGinlay, 2004). Die verwendeten Lastfaktoren orientieren sich an Literaturwerten (McGinlay, 2004) und sind nach Maschinenkategorien differenziert (siehe Tabelle 17).

Tabelle 39: Lastfaktoren in der Bauwirtschaft

Maschinenkategorie	Lastfaktor
Baggerlader (Diesel)	0,35
Betonmischer (Diesel)	0,50
Betonpumpen (Diesel)	0,80
Grader, Straßenhobel (Diesel)	0,35
Gußasphaltkocher (Schwarzdecke) (Diesel)	0,50
Kompaktlader (Diesel)	0,25
Kompressoren aller Art (Diesel)	0,50
Minibagger (Diesel)	0,40
Mischanlagen (Schwarzdecke) (Diesel)	0,50
Mobil- und Autokrane (Diesel)	0,40
Mobilbagger (Diesel) <18-74 kW	0,35
Mobilbagger (Diesel) 75-559 kW	0,25
Mörtelförderer- und Verputzgeräte (Diesel)	0,50
Muldenkipper (Diesel)	0,40
Planiertrauben (Diesel)	0,40
Radlader (Diesel)	0,35
Raupenbagger (Diesel)	0,40
Raupenlader (Diesel)	0,40
Straßenfertiger (Diesel)	0,30

Maschinenkategorie	Lastfaktor
Teleskoplader (Diesel)	0,30
Verdichtungsmaschinen (Diesel)	0,30
Verdichtungsmaschinen (Otto-4-Takt)	0,20

(McGinlay, 2004) und ifeu-Annahmen

5.3 Industrie/Sonstige

Kurzfassung zum Datenstand

- ▶ Die Bestandsdaten für Generatoren wurden zuletzt für das Bezugsjahr 2016 aktualisiert. Die Bestandsdaten für Stapler beruhen jedoch auf Daten bzw. Prognosen aus dem Jahr 2001, ergänzt um neuere Informationen für LPG-Stapler.
- ▶ Die Differenzierung nach Leistungsklassen reflektiert den Stand für 2010.
- ▶ Die Betriebsstunden wurden für das Bezugsjahr 2012 auf Basis von empirischen Daten ermittelt.
- ▶ Die Lastfaktoren wurden aus einer Studie aus dem Jahr 2004 abgeleitet.

Im Bereich Industrie/Sonstige werden Generatoren und Stapler zusammengefasst. Während Generatoren generell als dieselbetrieben angenommen werden, wird bei den Staplern zwischen Diesel und Gas unterschieden. Elektrische Stapler werden nicht berücksichtigt, da diese keine Auspuffemissionen haben und Vorkettenemissionen bisher nicht in TREMOD-MM berücksichtigt werden. Die in der Industrie eingesetzten Maschinen werden hauptsächlich auf dem Betriebsgelände verwendet.

Tabelle 40: Eingesetzte Maschinen in der Industrie/Sonstiges

Maschinenkategorie	Antrieb
Generatoren	Diesel (< 18 bis 559 kW)
Stapler	Diesel (18 bis 129 kW)
	LPG (18 bis 36 kW)

5.3.1 Bestandsdaten

Die Bestandsentwicklung von Generatoren (nur „dieselbetriebene Stromerzeugungsaggregate“) wurde, analog zu den Baumaschinen, aus Eckwerten des Gesamtbestandes bis 1996 nach (SBD, n.d.) und für 2010 bis 2016 nach (OHR, 2016) berechnet. Die Bestandsentwicklung zwischen 1996 und 2010 wurde ebenfalls auf Basis von (DESTATIS, 2011) über die Produktionszahlen, sowie die Ein- und Ausfuhr von Maschinen modelliert (siehe Kapitel 0). Zwischen 2010 und 2016 wurden die Werte interpoliert

Die Anteile der Leistungsklassen wurden von der Produktionsstatistik übernommen. Diese Aufteilung entspricht jedoch nicht der des Bestandes in TREMOD-MM, sondern dem Gesamtabsatz von Generatoren. Die Generatoren gehen nach (EPA, 2010a) mit zunehmender

Nennleistung nur noch zum Teil in mobile und stattdessen in stationäre Anwendungen (Tabelle 41). Da die Klasseneinteilung der Statistik nicht den Nennleistungsklassen von TREMOD-MM entspricht und sich im Lauf der Jahre verändert, wurden die Anteile jeweils den Größenklassen der Grenzwertgesetzgebung angepasst (siehe Tabelle 42).

Tabelle 41: Anteile der Generatoren Bestände an mobilen Quellen

EPA 2010		Übertragung auf TREMOD-MM	
0-18 kW	90 %	0-18 kW	90 %
18-30 kW	90 %	18-37 kW	85 %
30-75 kW	70 %	37-75 kW	65 %
75-130 kW	20 %	75-130 kW	20 %
130-223 kW	15 %	130-300 kW	12 %
223-447 kW	10 %	>300 kW	5 %

Quelle: (EPA, 2010a) und ifeu-Annahmen

Tabelle 42: Anpassung der kW-Klassen bei Generatoren von DESTATIS auf TREMOD-MM

TREMOD-MM	DESTATIS Produktionsstatistik								
Verfügbare Zeitreihe	1982- 2008	1982- 2008	1970- 1982, ab 2008	1970- 1995	1995- 2010	1970- 1982	1982- 1995	1995- 2010	1995- 2010
Nennleistung [kW]	<7,5	7,5-75	<75	75-225	75-375	>225	225- 750	375- 750	>750
0-18	100 %	50 %	75 %						
18-37		20 %	10 %						
37-75		30 %	15 %						
75-130				50 %	25 %				
130-300				50 %	50 %	25 %	25 %		
>300					25 %	75 %	75 %	100 %	100 %

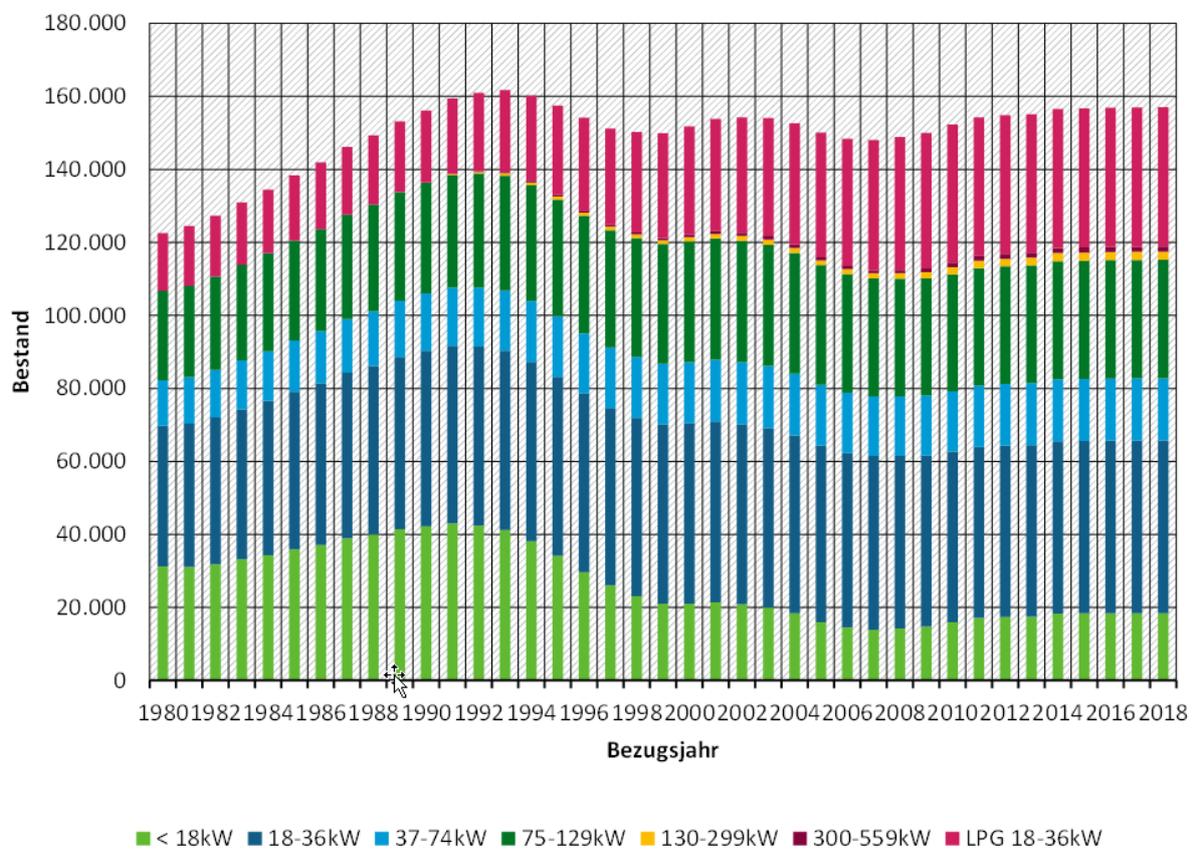
Quelle: (DESTATIS, 2011) und ifeu-Annahmen

Daten zu den Beständen an Staplern wurden bei Erstellung von TREMOD-MM einmalig von der Linde AG (Linde, 2001) bis zum Bezugsjahr 2001 zur Verfügung gestellt, wobei in durch Diesel und Gas angetriebene Stapler unterschieden wird. Hinsichtlich der Bestände waren daher weitgehende Extrapolationen notwendig. Auch der prozentuale Anteil nach Kraftstoffen wurde extrapoliert bzw. bei auslaufendem Trend fortgeschrieben. Wegen der geringen Anzahl statistischer Daten und damit weitreichender Extrapolation und Fortschreibung bestanden hinsichtlich der Staplerbestände damit jedoch große Unsicherheiten. Eine Korrektur erfolgt daher auf Basis von Abschätzungen zum inländischen Treibgasabsatz seit 2001 vom deutschen Verband Flüssiggas e.V. (DVG) (Krämer, 2015). Diese zeigten, dass die mit TREMOD-MM

berechneten Treibgasverbräuche durchgehend etwa um 50 % höher lagen als die abgesetzten Mengen. Die Bestände der LPG-Stapler wurden daher zusätzlich um den Faktor 1,5 reduziert.

Als Basis für die Anteile der Nennleistungsklassen wurden bis zum Basisjahr 1990, wie bei den Baumaschinen, Angaben von (Couson, 2003) übernommen. Die Anteile für 2010 sowie die mittlere Leistung pro Klasse orientieren sich an Auswertungen von Firmendaten (Helms / Heidt, 2014a). Für die dazwischenliegenden Bezugsjahre wurden die Anteile linear interpoliert. Die daraus resultierende Bestandsentwicklung für Stapler wird in Abbildung 13 dargestellt. Die Bestände nach Maschinenkategorien sind beispielhaft für 2018 in Tabelle 43 aufgeführt. Die mittlere Lebensdauer der Maschinen im Sektor Industrie/Sonstiges ist in Tabelle 44 zusammengefasst.

Abbildung 13: Entwicklung des Bestandes in der Industrie/Sonstiges nach Leistungsklasse* 1980 bis 2018



Quellen: (DESTATIS, 2011; EPA, 2010a; Krämer, 2015; Linde, 2001) und ifeu-Annahmen. Ergänzung * Maschinen ohne nähere Angabe haben einen Dieselmotor

Tabelle 43: Bestände nach Maschinenkategorie in der Industrie/Sonstige für 2018

Maschinenkategorie	Anzahl
Generatoren	28.815
Stapler	128.250

Quellen: (DESTATIS, 2011; EPA, 2010a; Linde, 2001) und ifeu-Annahmen

Tabelle 44: Mittlere Lebensdauer der Maschinen in der Industrie/Sonstige

Maschinenkategorie	Mittlere Lebensdauer (in Jahren)
Generatoren	16
Stapler	16

Quellen: ifeu-Annahmen

Für das Trendszenario wird vereinfachend angenommen, dass die Anzahl der Maschinen und die Verteilung nach Antrieb und Leistungsklassen bis zum Jahr 2050 konstant bleiben.

5.3.2 Aktivitätsdaten

Die Ermittlung der jährlichen Betriebsstunden erfolgte für Stapler analog den Baumaschinen auf Basis empirischer Quellen, da die meisten über Betriebsstundenzähler verfügen. Für Generatoren wurden die mittleren Betriebsstunden auf Basis von Studien abgeleitet (siehe Tabelle 38).

Tabelle 45: Mittlere jährliche Betriebsstunden in der Industrie/Sonstige

Maschinentyp	Motor/Leistung	Nutzungsstunden pro Jahr
Stapler	Diesel	650
	Gas	1.200
Generatoren	Diesel (< 18 kW)	100
	Diesel (18-36 kW)	180
	Diesel (37-74 kW)	290
	Diesel (75-129 kW)	380
	Diesel (130-299 kW)	660
	Diesel (300-559 kW)	1.390

Quelle: Gebrauchtbörsenauswertungen und ifeu-Annahmen, siehe (Helms / Heidt, 2014a)

Die verwendeten Lastfaktoren orientieren sich an Literaturwerten (McGinlay, 2004) (siehe Tabelle 46).

Tabelle 46: Lastfaktoren in der Industrie/Sonstiges

Maschinentyp	Lastfaktor
Generatoren	0,5
Stapler	0,3

Quelle: (McGinlay, 2004)

5.4 Forstwirtschaft

Kurzfassung zum Datenstand

- ▶ Die Bestandsdaten für die größeren Forstmaschinen wurden zuletzt für das Bezugsjahr 2008 aktualisiert und anhand von Absatzdaten bis zum Jahr 2017 fortgeschrieben. Für Motorsägen liegen Annahmen zu Absatzzahlen bis 2003 zugrunde.
- ▶ Die Differenzierung nach Leistungsklassen reflektiert für größere Forstmaschinen den Stand für 2007 auf Basis von Verkaufszahlen. Für Motorsägen liegen Annahmen aus älteren Literaturquellen zugrunde.
- ▶ Die Betriebsstunden wurden für das Bezugsjahr 2009 auf Basis von Schätzwerten aktualisiert.
- ▶ Die Lastfaktoren wurden aus der Schweizer Offroad-Datenbank übernommen.

Die Forstwirtschaft beinhaltet neben der klassischen Holzwirtschaft auch die Aufforstung und Pflege des Waldes sowie die Instandhaltung von Wegen und andere Aufgaben. Die Maschinen, die dabei zum Einsatz kommen, sind handgehaltene Motor- bzw. Kettensägen und große Forstmaschinen zur Holzernte. Kleinere Arbeiten wie Transport und Pflege im Wald werden meistens durch Schlepper ausgeführt. Hierbei gibt es speziell ausgerüstete Forstschlepper sowie gewöhnliche Ackerschlepper. Die großen Maschinen sind dabei ausschließlich dieselbetrieben und haben kleine Bestände, während es sich bei den handgehaltenen Motorsägen um 2-Takt Geräte mit großem Bestand handelt.

Tabelle 47: Eingesetzte Maschinen in der Forstwirtschaft

Maschinenkategorie	Motor-Klasse
Forstschlepper	Diesel (75-129 kW)
Tragschlepper	Diesel (75-129 kW)
Vollernter	Diesel (75-129 kW)
Entrindungsanlagen	Diesel (130-299 kW)
Motorsägen	Otto 2-Takt SH3

Im Bereich Forstwirtschaft werden nur Forstbetriebe berücksichtigt, deren Forstwirtschaft als Haupterwerb dient. Landwirtschaftliche Betriebe beispielsweise werden nicht betrachtet, da deren Anteil an der Waldarbeit oft gering ist, außerdem sind die hierbei genutzten Maschinen (v.a. Ackerschlepper) schon beim Bereich der Landwirtschaft erfasst.

5.4.1 Bestandsdaten

Das Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik (KWF) e.V. führt im Rahmen einer Maschinenstatistik auch Abschätzungen des Bestands auf Basis von Verkaufszahlen durch. Da die Forstschlepper größtenteils auch in der KBA-Statistik unter Zugmaschinen erfasst sind (es handelt sich häufig um umgerüstete Ackerschlepper), werden die im Bereich Forstwirtschaft berücksichtigten Maschinen im Bereich der Landwirtschaft herausgerechnet, damit eine Zuordnung der Emissionen zu den verschiedenen Sektoren möglich ist.

Die Bestandsdaten bis 2008 beruhen auf Angaben des Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik (KWF) für zwei Bezugsjahre (KWF, 2003, 2008). Die Bestände dazwischen wurden interpoliert. Aktuellere Bestandsdaten konnten nicht ermittelt werden, jedoch existieren vom KWF Verkaufszahlen von 2008 bis 2017 (Harbauer, 2018). Diese zeigen einen weiteren Rückgang der Zulassungszahlen für Forstschlepper sowie etwa ab dem Jahr 2010 eine Sättigung der Verkaufszahlen für Harvester und Forwarder. Die Fortschreibung wird daher analog zu (Helms et al., 2009) angenommen, wonach die Trends vor 2010 sich bis 2018 noch in abgeschwächter Form fortsetzen.

Für den Bestand der Motorsägen wurde ein Rückgang zwischen 1980 und 2003 von 70.000 auf 40.000 Geräte angenommen. Dieser Trend setzt sich abgeschwächt bis 2018 fort.

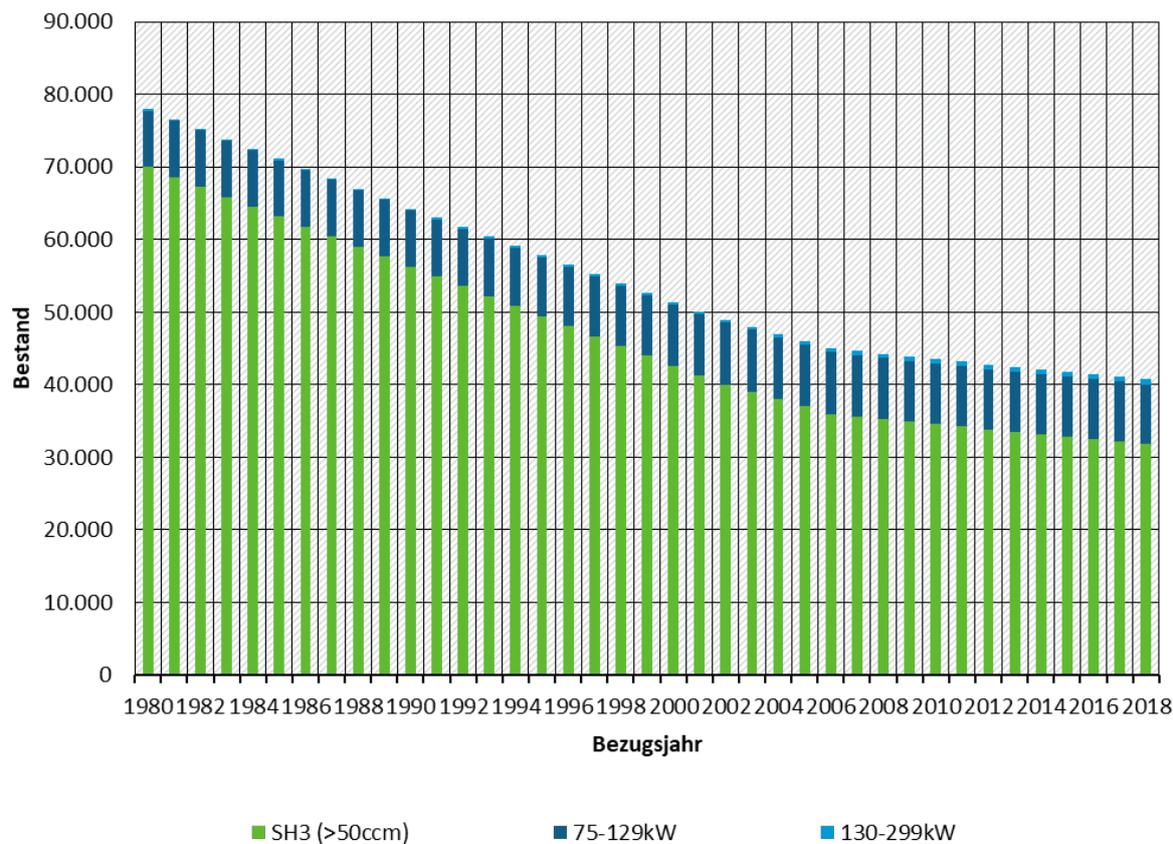
Die Nennleistung der Maschinen wurde auf Basis der nach kW-Klassen differenzierten Verkaufszahlen für den Zeitraum 2002-2007 abgeschätzt und über die Verschiebung zwischen den Leistungsklassen abgebildet (siehe Tabelle 48).

Tabelle 48: Annahmen zu Entwicklung der Leistungsklassen bei Forstmaschinen

	Tragschlepper (Forwarder)		Vollernter (Harvester)	
	75-130 kW	130-300 kW	75-130 kW	130-300 kW
Bis 2005	95 %	5 %	75 %	25 %
Ab 2006	- 2 % p.a.	+ 2 % p.a.	+ 1 % p.a.	- 1 % p.a.
Ab 2010	65 %	35 %	90 %	10 %

Damit ergibt sich eine Entwicklung des Gesamtbestandes in der Forstwirtschaft nach Leistungsklassen, wie in Abbildung 14 dargestellt. Der Bestand nach Maschinentyp ist beispielhaft für 2018 in Tabelle 49 aufgeführt. Die mittlere Lebensdauer der Maschinen im Sektor Forstwirtschaft ist in Tabelle 50 zusammengefasst.

Abbildung 14: Entwicklung des Bestandes in der Forstwirtschaft nach Leistungsklasse* 1980 bis 2018



Quelle: (KWF, 2003, 2008), (Harbauer, 2018) und ifeu-Annahmen. Ergänzung: * Maschinen ohne nähere Angabe haben einen Dieselmotor

Tabelle 49: Bestände nach Maschinenkategorie in der Forstwirtschaft für 2018

Maschinenkategorie	Anzahl
Entrindungsanlagen	26
Forstschlepper	4.875
Kettensägen	31.910
Tragschlepper/ Forwarder	2.366
Vollernter/ Harvester	1.578

Quelle: (KWF, 2003, 2008), (Harbauer, 2018) und ifeu-Annahmen

Tabelle 50: Mittlere Lebensdauer der Maschinen in der Forstwirtschaft

Maschinenkategorie	Mittlere Lebensdauer (in Jahren)
Entrindungsanlagen	10
Forstschlepper	10
Kettensägen	2
Tragschlepper/ Forwarder	10

Maschinenkategorie	Mittlere Lebensdauer (in Jahren)
Vollernter/ Harvester	10

Quelle: ifeu-Annahmen

Für das Trendszenario wird vereinfachend angenommen, dass die Anzahl der Maschinen und die Verteilung nach Antrieb und Leistungsklassen bis zum Jahr 2050 konstant bleiben.

5.4.2 Aktivitätsdaten

Neben dem Bestand wurde auch die jährliche Einsatzdauer der Geräte in Gesprächen mit dem Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik abgeschätzt (Tabelle 54). Daten zur Einsatzdauer von professionell genutzten Motorsägen werden auch von der (EPA, 2010b) und (Bortfeld, 2002) angegeben. Für den Gesamtbestand wurden jedoch die geringeren Werte auf Basis von (BAFU, 2008) übernommen. In TREMOD-MM werden jedoch die für die Situation in Deutschland bereits abgeschätzten Daten verwendet.

Tabelle 51: Mittlere jährliche Betriebsstunden in der Forstwirtschaft

Maschinenkategorie	Nutzungsstunden
Entrindungsanlagen	1.000
Motorsägen	150
Forstschlepper	600
Tragschlepper (Forwarder)	1.000
Vollernter (Harvester)	1.000

Quelle: (EPA, 2010b), (BAFU, 2008), (Bortfeld, 2002) und ifeu-Annahmen

Darüber hinaus wird die zeitliche Entwicklung der Betriebsstunden mit aktuellen Statistiken zum Holzeinschlag korreliert. Damit werden auch punktuelle Ereignisse (z.B. Orkane) abgebildet, die voraussichtlich zu gesteigerter Aktivität führen.

Die Lastfaktoren wurden für große Forstmaschinen von (Notter / Schmied, 2015) übernommen und betragen dort 0,48. Der Testzyklus für Motorsägen (G3) geht von einem Lastfaktor von 0,85 angepasst (15 % Leerlauf, 85 % Vollast). Der Lastfaktor für Forstschlepper wurde von der Landwirtschaft übernommen.

Tabelle 52: Lastfaktoren in der Forstwirtschaft

Maschinentyp	Lastfaktor
Entrindungsanlagen	0,5
Motorsägen	0,85
Forstschlepper	0,3
Tragschlepper (Forwarder)	0,5
Vollernter (Harvester)	0,5

Quelle: (Notter / Schmied, 2015) und ifeu-Annahmen

5.5 Haushalt und Garten (Grünpflege)

Kurzfassung zum Datenstand

- ▶ Die Bestandsdaten im Bereich Grünpflege und die Differenzierung nach Motortyp (2-/4-Takt) wurden zuletzt für das Bezugsjahr 2008 überprüft
- ▶ Die Betriebsstunden basieren ebenfalls auf Literaturquellen von 2008.
- ▶ Die Lastfaktoren wurden aus der Schweizer Offroad-Datenbank aus dem Jahr 2000 übernommen.

Im privaten Bereich werden zur Gartenpflege benzin- und elektrisch betriebene Geräte eingesetzt (Tabelle 53). Diese Geräte haben im Allgemeinen eine kleinere Leistung als die Geräte in den anderen Kategorien. Aus der hohen Anzahl der Gärten ergibt sich jedoch ein hoher Gerätebestand. Weiterhin gibt es hier auch viele professionell genutzte Geräte mit einer deutlich höheren jährlichen Nutzungsdauer. Private Bestände und verschiedene Arten professioneller Nutzung des gleichen Maschinentyps werden daher hier als unterschiedliche Maschinenkategorien behandelt. Die in TREMOD-MM zugeordnete Leistungsklassen für die einzelnen Maschinenkategorien sind in Tabelle 53 dargestellt.

Tabelle 53: Eingesetzte Maschinen in der Grünpflege

Maschinenkategorie	Antrieb
Rasenmäher privat	Otto 2-Takt SN3
	Otto 4-Takt SN3
Rasenmäher professionell	Otto 4-Takt SN3
Aufsitzmäher privat	Otto 4-Takt SN4
Aufsitzmäher professionell (Sport und Freizeit)	Otto 4-Takt SN4
Aufsitzmäher professionell (öffentliche Grünflächen)	Otto 4-Takt SN4
Aufsitzmäher professionell (betrieblich)	Otto 4-Takt SN4
Trimmer/ Freischneider privat	Otto 2-Takt SH2
Trimmer/ Freischneider professionell	Otto 2-Takt SH2
Motorsägen privat	Otto 2-Takt SH2
Motorsägen professionell	Otto 2-Takt SH3
Sonstige Ausrüstung privat	Otto 2-Takt SH2
Sonstige Ausrüstung professionell	Otto 2-Takt SH2

5.5.1 Bestandsdaten

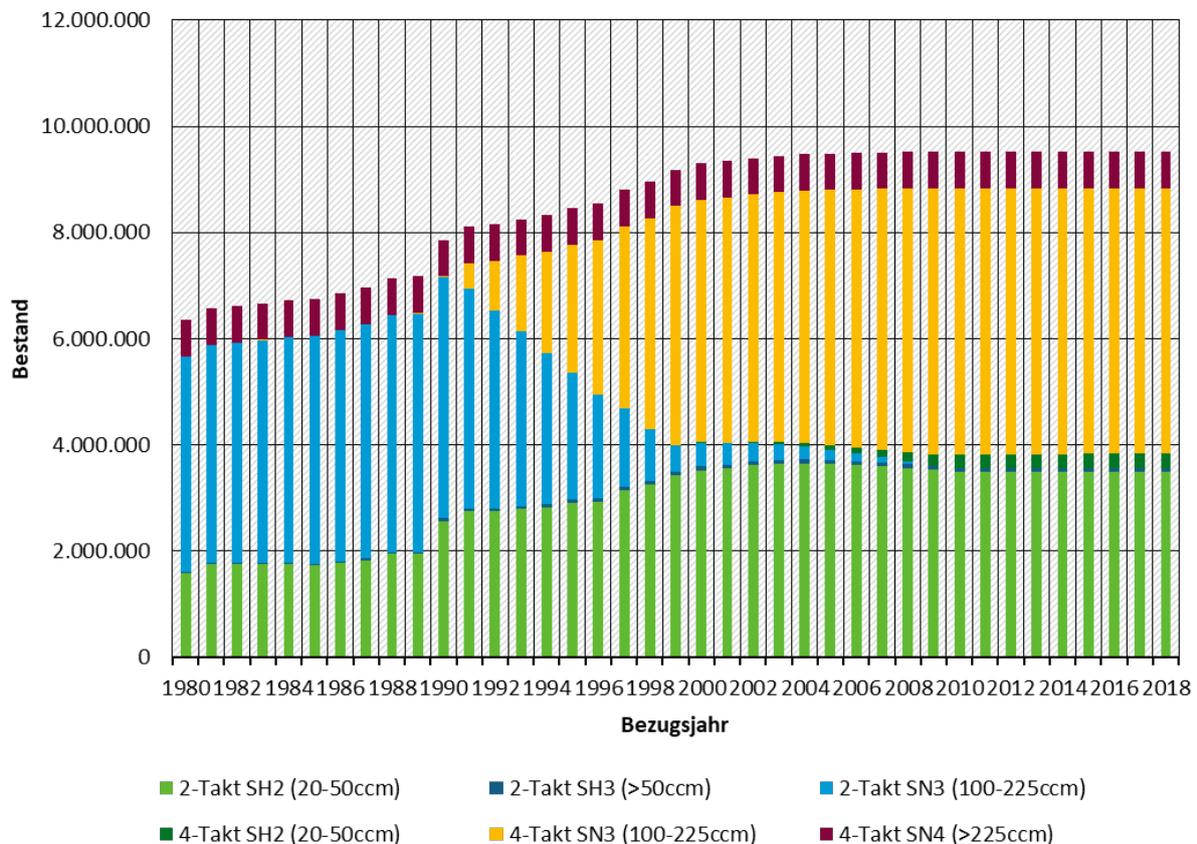
Die Bestände im Bereich Haushalt und Garten (Grünpflege) wurden ursprünglich auf der Basis von Verkaufszahlen und der Lebensdauer der Maschinen für das Jahr 1999 abgeleitet und

werden dann konstant fortgeschrieben. Für das Jahr 2008 erfolgt ein Abgleich mit einer Bestandsermittlung für die EU-15 in (JRC, 2008), die eine gute Übereinstimmung erzielte. Darüber hinaus wurde die Annahme getroffen, dass der Bestand an privaten Rasenmähern von 1980 bis 1999 um jährlich ein Prozentpunkt zugenommen hat.

Für das Emissionsverhalten des Maschinenbestandes ist dann vor allem der Anteil an 2- und 4-Takt-Motoren von Bedeutung. Bei privaten Rasenmähern nimmt der Anteil an 2-Taktern entsprechend der Annahmen in (Lambrecht et al., 2004) in den 90er Jahren jährlich um zehn Prozentpunkte ab, so dass 1999 der Gesamtbestand zu 90 % aus 4-Taktern besteht. In den folgenden Jahren nimmt der 2-Takter-Anteil langsamer ab und verschwindet ab 2009 aus dem Bestand. Für die übrigen Gartengeräte wurden die in (JRC, 2008) vorliegenden Informationen berücksichtigt, die ab 2005 größere Anteile an 4-Takt-Motoren zeigen. Für TREMOD-MM wurde angenommen, dass sich die Neuzulassungen 2005 und 2010 nach Antriebsart in Deutschland im gleichen Maße wie auf dem europäischen Markt entwickeln. Nach 2015 bleibt der Anteil an 4-Takt-Motoren konstant. Zur überschlagsmäßigen Berechnung des Bestandes wird von einer mittleren Lebensdauer der privat genutzten Geräte von 8 Jahren und der professionell genutzten Geräte von 2 Jahren ausgegangen, vgl. (Helms et al., 2009).

Damit ergibt sich eine Bestandsentwicklung wie in Abbildung 15 dargestellt. Tabelle 54 zeigt den Bestand nach Maschinenkategorien exemplarisch für 2018. Die mittlere Lebensdauer der Maschinen im Sektor Grünpflege ist in Tabelle 55 zusammengefasst.

Abbildung 15: Entwicklung des Bestandes in der Grünpflege nach Leistungsklasse 1980 bis 2018



Quellen: (JRC, 2008) und ifeu-Annahmen.

Tabelle 54: Bestände nach Maschinenkategorie in der Grünpflege für 2018

Maschinentyp	Bestand
Aufsitzmäher privat	580.000
Aufsitzmäher professionell (betrieblich)	4.500
Aufsitzmäher professionell (öffentliche Grünflächen)	3.240
Aufsitzmäher professionell (Sport und Freizeit)	100.000
Kettensägen privat	1.800.000
Kettensägen professionell	72.500
Rasenmäher privat	5.000.000
Rasenmäher professionell	9.000
Sonstige Ausrüstung privat	710.372
Sonstige Ausrüstung professionell	33.108
Trimmer/Freischneider privat	1.159.098
Trimmer/Freischneider professionell	55.195

Quellen: (JRC, 2008) und ifeu-Annahmen

Tabelle 55: Mittlere Lebensdauer der Maschinen in der Grünpflege

Maschinenkategorie	Mittlere Lebensdauer (in Jahren)
Aufsitzmäher privat	10
Aufsitzmäher professionell	8
Kettensägen privat	8
Kettensägen professionell	2
Rasenmäher privat	10
Rasenmäher professionell	8
Sonstige Ausrüstung privat	8
Sonstige Ausrüstung professionell	2
Trimmer/Freischneider privat	8
Trimmer/Freischneider professionell	2

Quellen: ifeu-Annahmen

Für das Trendszenario wird vereinfachend angenommen, dass die Anzahl der Maschinen und die Verteilung nach Antrieb und Leistungsklassen bis zum Jahr 2050 konstant bleiben.

5.5.2 Aktivitätsdaten

Als Nutzungsstunden wurden Daten des schweizerischen Bundesamtes für Umwelt (BAFU, 2008) übernommen, da diese im Rahmen eines eigenen Forschungsvorhabens in

Zusammenarbeit mit fachspezifischen Begleitgruppen erstellt wurden. Bei sonstiger Ausrüstung wurde der Wert von (JRC, 2008) übernommen, da vom BAFU keine Daten vorlagen.

Tabelle 56: Mittlere jährliche Betriebsstunden in der Grünpflege

Maschinenkategorie	Nutzungsstunden
Aufsitzmäher privat (Otto-4-Takt) >225 ccm	15
Aufsitzmäher professionell (betrieblich) (Otto-4-Takt) >225 ccm	128
Aufsitzmäher professionell (öffentliche Grünflächen) (Otto-4-Takt) >225 ccm	280
Aufsitzmäher professionell (Sport und Freizeit) (Otto-4-Takt) >225 ccm	35
Motorsägen Garten privat (Otto-2-Takt) 20-50 ccm	6
Motorsägen Garten professionell (Otto-2-Takt) >50 ccm	150
Rasenmäher privat (Otto-2-Takt) 100-225 ccm	13
Rasenmäher privat (Otto-4-Takt) 100-225 ccm	13
Rasenmäher professionell (Otto-4-Takt) 100-225 ccm	100
Sonstige Ausrüstung privat (Otto-2-Takt) 20-50 ccm	6
Sonstige Ausrüstung privat (Otto-4-Takt) 20-50 ccm	6
Sonstige Ausrüstung professionell (Otto-2-Takt) 20-50 ccm	150
Sonstige Ausrüstung professionell (Otto-4-Takt) 20-50 ccm	150
Trimmer/Freischneider privat (Otto-2-Takt) 20-50 ccm	6
Trimmer/Freischneider privat (Otto-4-Takt) 20-50 ccm	6
Trimmer/Freischneider professionell (Otto-2-Takt) 20-50 ccm	200
Trimmer/Freischneider professionell (Otto-4-Takt) 20-50 ccm	200

Quelle: (BAFU, 2008), (JRC, 2008) und ifeu-Annahmen

Die Lastfaktoren wurden von (BUWAL, 2000) übernommen, da keine eigene Untersuchungen für Deutschland vorlagen (Tabelle 57).

Tabelle 57: Lastfaktoren in der Grünpflege

Maschinenkategorie	Lastfaktor
Rasenmäher	0,5
Aufsitzmäher	0,4
Motorsägen privat	0,5
Motorsägen professionell	0,85
Sonstige	0,5

Quelle: (BUWAL, 2000)

5.6 Fahrgastschiffahrt und Sportboote

Kurzfassung zum Datenstand

- ▶ Bestandsdaten für Fahrgastschiffe liegen bis einschließlich zum Bezugsjahr 2017 vor. Sportbootbestände basieren auf Verkaufszahlen bis zum Jahr 2002 und daraus getroffenen Hochrechnungen.
- ▶ Die Differenzierung nach Leistungsklassen bei Fahrgastschiffen beruht auf Bestandsdaten bis 2018, für Sportboote liegen nur Abschätzungen aus der ifeu-Studie des Jahres 2004 vor.
- ▶ Die Betriebsstunden und Lastfaktoren für Sportboote und Fahrgastschiffe basieren auf Literaturquellen aus dem Jahr 2002. Für Kabinenschiffe liegen bisher noch keine spezifischen Daten vor.

Neben den großen dieselbetriebenen Fahrgastschiffen werden überwiegend privat genutzte Motorboote (meist Sport- und Freizeitboote) berücksichtigt (siehe Tabelle 58). Hier können Innen- und Außenbordmotoren unterschieden werden. Während Außenbordmotoren fast ausschließlich mit Benzin betrieben werden, gibt es bei den Innenbordmotoren auch einen großen Anteil an Dieselmotoren. Jetski werden nicht betrachtet, da sie für Deutschland keine große Bedeutung haben. Der Sektor Gütertransport mit Binnenschiffen wird im TREMOD Transportmodul bilanziert und deshalb hier nicht aufgeführt⁹.

Tabelle 58: Eingesetzte Motoren bei Sport- und Passagierbooten

Maschinenkategorie	Antrieb
Motorboote mit Außenbordmotor Sport- und Freizeitboote	Otto 2-Takt
	Otto 4-Takt
Motorboote mit Innenbordmotor Sport- und Freizeitboote	Otto 4-Takt
	Diesel
Kabinenschiffe	Diesel
Tagesausflugs- und sonstige Fahrgastschiffe	Diesel

Sportboote sind im Sinne der Richtlinie (EU, 1994), unabhängig von der Antriebsart, sämtliche Boote mit einer nach der einschlägigen harmonisierten Norm gemessenen Rumpflänge von 2.500 bis 24.000 mm, die für Sport- und Freizeitwecke bestimmt sind. Boote, die gleichzeitig auch für Charter- oder Schulungszwecke verwendet werden können, fallen ebenfalls in den Anwendungsbereich dieser Richtlinie, sofern sie für Sport- oder Freizeitwecke in Verkehr gebracht werden.

Fahrgastschiffe sind, nach § 3 Abs. 1 der Verordnung über die Schiffssicherheit in der Binnenschiffahrt (Binnenschiffsuntersuchungsordnung – BinSchUO), Schiffe mit

⁹ Die Verkehrsleistungen für Güterschiffe in Deutschland werden regelmäßig statistisch erfasst, weswegen hier nicht die Bestandsmethode aus TREMOD-MM angewendet wird.

Antriebsmaschinen, die zur gewerbsmäßigen oder gelegentlichen Beförderung von Fahrgästen gegen Entgelt verwendet werden.

5.6.1 Bestandsdaten

Aktuelle Daten zur Anzahl von Fahrgastschiffen werden jährlich in der zentralen Binnenschiffsbestandsdatei (ZBBD) der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) publiziert. Hieraus werden Tagesausflugsschiffe, Kabinenschiffe, Personenfähren und Barkassen für TREMOD-MM erfasst. Neben der Anzahl wird die kumulierte Nennantriebsleistung nach Schiffstypen differenziert.

Ausgehend von weiteren Recherchen in einem UBA Projekt zum Reiseverkehr (Schulz et al., n.d.), konnten die Daten zu den Kabinenschiffen noch tiefer analysiert werden. Da die Flusskreuzfahrt aktuell eine stark wachsende Branche ist, liegt hierauf eine besondere Aufmerksamkeit. Außerdem wurde bereits im früheren Austausch von der Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR) angemerkt, dass TREMOD-MM die Emissionen der Personenschifffahrt wahrscheinlich unterschätzt, da der zusätzliche Energieverbrauch durch Hilfs- und Nebenaggregate noch nicht berücksichtigt ist (Kriedel, 2013). Diese Aggregate haben gerade bei den Kabinenschiffen einen relevanten Anteil. Hinzu kommt, dass die Kabinenschiffe häufig mehr als eine Maschine für den Hauptantrieb eingebaut haben, demnach wird die Anzahl der Motoren in TREMOD-MM stark unterschätzt. Die Kabinenschiffe werden daher als neue Kategorie in TREMOD-MM aufgenommen. Die übrigen Schiffstypen werden unter der Kategorie Tagesausflugs- und sonstige Fahrgastschiffe erfasst.

Eine Besonderheit bei Fahrgastschiffen besteht darin, dass einerseits mehrere (i.d.R. zwei bis vier) Antriebsmotoren und andererseits zusätzliche Hilfsmotoren eingesetzt werden können, so dass die Leistung pro Motor geringer ist. Die Sonderauswertung der Daten der Zentralstelle Schiffsuntersuchungskommission/Schiffseichamt (ZSKU) stellte hierzu Anzahl und Leistung von seit dem Jahr 2003 eingebauten Motoren bereit.

Da insbesondere bei den Kabinenschiffen Hilfsmotoren, z.B. für die Bordstromversorgung, einen relevanten Anteil am Energieverbrauch haben, wurde ein Zuschlag für die Generatorleistung ermittelt und die durchschnittliche Anzahl an Motoren pro Schiff berücksichtigt. Bei den Tagesausflugs- und Fahrgastschiffen wurde dieser Effekt nicht berücksichtigt, unter der Annahme, dass die Antriebsmotoren die Hauptarbeit leisten. Tabelle 59 stellt die daraus abgeleiteten Annahmen dar.

Tabelle 59: Nennleistung bei Fahrgastschiffen im Jahr 2017

Schiffstyp	Anteile an den Leistungsklassen						mittlere Leistung pro Schiff	
	19-37	37-75	75-130	130-300	300-560	>560	TREMOD-MM	ZBBD (nur Antrieb)
Kabinenschiffe			20 %	25 %	35 %	20 %	2.148	1.331
Tagesausflugs- und sonstige Fahrgastschiffe	10 %	10 %	15 %	50 %	15 %	0%	196	202

Quelle: (WSV, n.d.; ZSKU, 2019) und ifeu-Annahmen

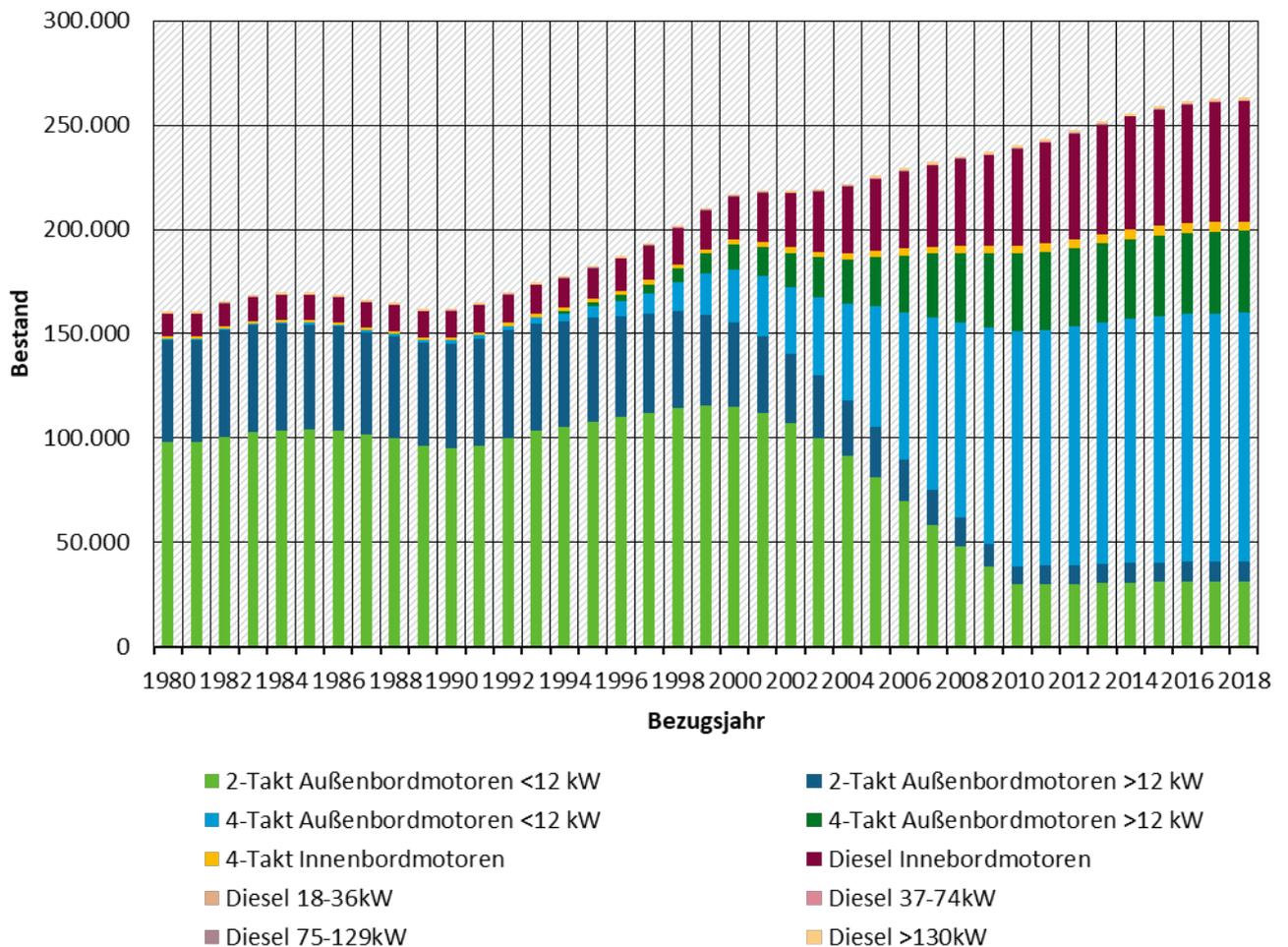
Die Bestandszahlen von Sportbooten konnten nicht über Zulassungszahlen (wie z.B. bei Traktoren) ermittelt werden, da Boote von zahlreichen verschiedenen Stellen zugelassen werden können und dort auch nicht vollständig erfasst werden. Der Bestand wird daher anhand von Verkaufszahlen der Innen- und Außenbordbootmotoren von 1980 bis 2002, die von der

„International Council of Marine Industry Associations“ (ICOMIA) zur Verfügung gestellt wurden (Matthiesen, 2003), abgeleitet. Der größere Anteil der verkauften Bootsmotoren sind dabei Außenbordmotoren.

Zur Abschätzung der Bestände wurde dabei ein Modell angewandt, das von einer durchschnittlichen Lebenszeit der Otto-Motoren von 10 Jahren und der Diesel-Motoren von 15 Jahren ausgeht. Dies entspricht auch den Annahmen des (UBA, 1995), der EU sowie der EPA und wird daher auch den Altersverteilungen zugrunde gelegt. Weiterhin wurden zur Bestimmung des Ausgangsbestandes im Jahr 1980 Abschätzungen für die Verkaufszahlen von 1965-1979 gemacht. Für die Verkaufszahlen von 2003 bis 2018 wurden ebenfalls Abschätzungen durchgeführt. Hier wurde – dem Trend entsprechend – von einer deutlichen Minderung des Anteils der 2-Takter ausgegangen.

Die ermittelten Bestände sind in Abbildung 16 dargestellt. Dabei wurde davon ausgegangen, dass es sich bei den Innenbord-Ottomotoren ausschließlich um 4-Takter handelt. Bei den Innenbordmotoren ist ein deutlicher Zuwachs aller Größenklassen festzustellen. Bei den Außenbordmotoren wachsen die Gesamtbestände vor allem in den 1990er Jahren, bleiben danach aber etwa auf konstantem Niveau. Es kommt dabei jedoch zu einer für die Emissionen besonders relevanten Verschiebung von 2-Taktern hin zu 4-Taktern. Grund für das Wachsen des Bestandes ist die mehr als Verdoppelung der Verkaufszahlen in den 1990er Jahren. Wurden 1990 weniger als 1.200 Innenbord Dieselmotoren in Deutschland verkauft, waren es im Jahr 2000 schon fast 2.900. Daraus resultierend ergibt sich eine Bestandsentwicklung für Bootsmotoren, wie sie in Abbildung 16 dargestellt ist. Die Tabelle 60 zeigt den Bestand nach Motorkategorie exemplarisch für 2018. Die mittlere Lebensdauer der Geräte ist in Tabelle 61 zusammengefasst.

Abbildung 16: Entwicklung des Bestandes an Motoren in Sportbooten und Fahrgastschiffen nach Leistungsklassen 1980-2018



Quelle: (Matthiesen, 2003; WSV, n.d.; ZSUK, 2019) und ifeu-Annahmen

Tabelle 60: Bestände nach Maschinenkategorie bei Bootsmotoren für 2018

Maschinentyp	Bestand
Motorboote mit Außenbordmotor	199.202
Motorboote mit Innenbordmotor	59.734
Tagesausflugs- und sonstige Fahrgastschiffe	1.304
Kabinenschiffe (Anzahl Motoren)	360

Quelle: (Matthiesen, 2003; WSV, n.d.; ZSUK, 2019) und ifeu-Annahmen

Tabelle 61: Mittlere Lebensdauer der Motoren in Fahrgastschiffen und Sportbooten

Maschinenkategorie	Mittlere Lebensdauer (in Jahren)
Motorboote mit Außenbordmotor	10
Motorboote mit Innenbordmotor	15
Tagesausflugs- und sonstige Fahrgastschiffe	15
Kabinenschiffe	15

Quelle: ifeu-Annahmen

Für das Trendszenario wird vereinfachend angenommen, dass die Anzahl der Maschinen und die Verteilung nach Antrieb und Leistungsklassen bis zum Jahr 2050 konstant bleiben.

5.6.2 Aktivitätsdaten

Es wird für Fahrgastschiffe eine durchschnittliche Nutzungsdauer von etwa 1.000 Stunden pro Jahr angenommen, was einer Nutzungsintensität von ca. 6 Stunden/Tag in den Monaten April bis Oktober entspricht. (BUWAL, 2000) geht hier von 988 Stunden aus.

Die jährliche Nutzungsdauer beträgt nach (Matthiesen, 2003) 35 Stunden für Außenbordmotoren und etwa 48 Stunden für Innenbordmotoren. Diese Angaben werden hier übernommen und scheinen plausibel: Bei 32 Wochenenden in der schönen Jahreszeit ergibt sich bei zweiwöchentlicher Nutzung mit jeweils zwei bis drei Stunden eine jährliche Nutzungsdauer von ca. 32 bis 48 Stunden pro Jahr und Fahrzeug. Das damalige schweizerische Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) hat für seine Berechnungen eine ähnliche Nutzungsdauer von 30 Stunden pro Jahr und Fahrzeug angenommen (BUWAL, 2000).

Tabelle 62: Mittlere jährliche Betriebsstunden bei Sport- und Passagierbooten

Name	Nutzungsdauer [h/a]
Außenbordmotoren	35
Innenbordmotoren	48
Kabinenschiffe	1000
Tagesausflugs- und sonstige Fahrgastschiffe	1.000

Quelle: (BUWAL, 2000) und ifeu-Annahmen

Es werden die Lastfaktoren nach ISO 8178 verwendet. Das bedeutet einen Lastfaktor von 0,2144 für Außenbordmotoren und 0,3425 für Innenbordmotoren (UBA, 1995). Dieser Wert entspricht auch etwa dem mittleren Lastfaktor des (BUWAL, 2000) von 0,27 für private Motor- und Segelboote. Der Lastfaktor für Fahrgastschiffe wird vom (BUWAL, 2000) übernommen und beträgt 0,5. Tabelle 63 fasst die Lastfaktoren für den Bereich Sport- und Passagierboote noch einmal zusammen.

Tabelle 63: Lastfaktoren für Sport- und Passagierboote

Name	LF
Außenbordmotoren	0,21
Innenbordmotoren	0,34
Kabinenschiffe	0,5
Tagesausflugs- und sonstige Fahrgastschiffe	0,5

Quelle: (BUWAL, 2000), (UBA, 1995) und ifeu-Annahmen

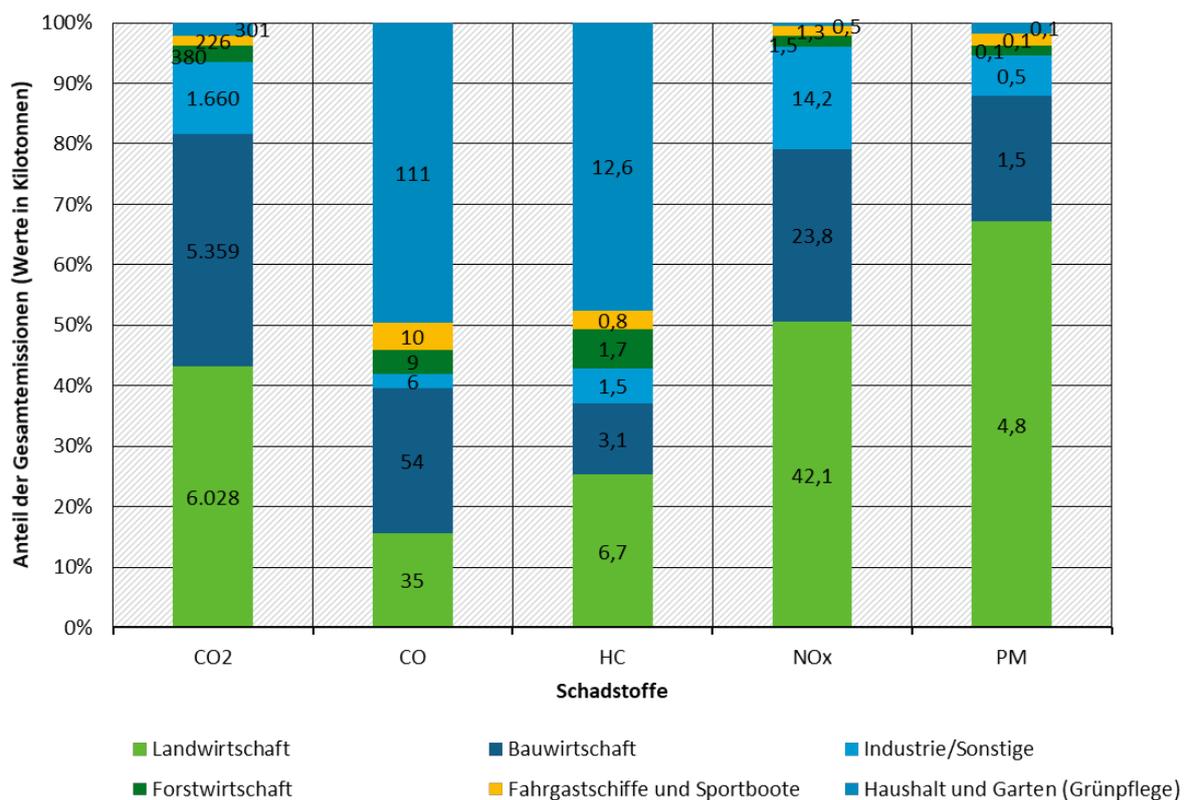
6 Ergebnisse aus TREMOD 5.1

In diesem Kapitel werden ausgewählte Ergebnisse für den Energieverbrauch und die Emissionen mobiler Maschinen in Deutschland dargestellt und erläutert. Da TREMOD-MM als hochdifferenziertes Modell eine Vielzahl von Ergebnissen berechnen kann, können hier nur einige exemplarische Ergebnisse dargestellt werden. Einige Schadstoffe und Differenzierungen (z.B. nach Sektor, Antrieb, Leistung und Emissionsstandard) bleiben daher unberücksichtigt.

6.1 Emissionen im Jahr 2018 nach Sektoren und Energieart

Abbildung 17 zeigt die absolute Höhe der Emissionen von NRMM und die Anteile pro Sektor in Deutschland für das Jahr 2018. Die Dieselmotoren der Land- und Bauwirtschaft sind zusammen für etwa 80 % der CO₂-Emissionen mobiler Maschinen verantwortlich. Auch bei den NO_x- und PM-Emissionen dominieren diese beiden Sektoren. Der Anteil der Landwirtschaft ist jedoch aufgrund der teilweise noch sehr alten Dieseltraktoren höher als der Anteil der Baumaschinen. Bei den CO- und HC-Emissionen haben Geräte aus dem Bereich der Grünpflege, die überwiegend benzinbetrieben sind, mit fast 50 % den größten Anteil.

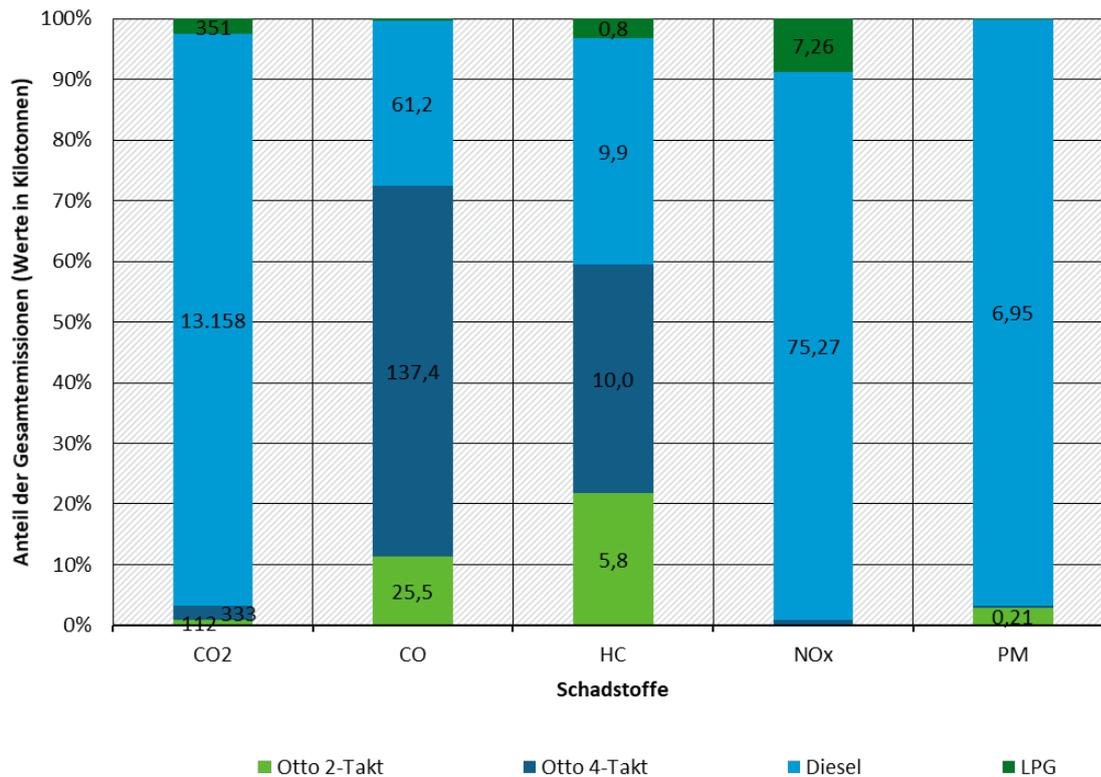
Abbildung 17: Anteil der Schadstoffemissionen mobiler Maschinen in Deutschland 2018 nach Sektoren



Quelle: ifeu-Berechnungen (TREMOD-MM 5.1)

Die unterschiedliche Verteilung der Emissionen auf die Sektoren ist deutlich von den dort verwendeten Antriebsarten beeinflusst, wie Abbildung 18 verdeutlicht. Demnach tragen benzinbetriebene Geräte, trotz eines geringen Anteils am Energieverbrauch und den damit korrelierenden CO₂-Emissionen, überproportional zu den CO- und HC-Emissionen bei.

Abbildung 18: Anteil der Schadstoffemissionen mobiler Maschinen in Deutschland 2018 nach Motortypen und Energiearten



Quelle: ifeu-Berechnungen (TREMOD-MM 5.1)

Die absoluten Emissionen aller mobiler Maschinen und Geräte sind in Tabelle 64 den Emissionen des Straßenverkehrs in Deutschland gegenübergestellt. Die Emissionen der mobilen Maschinen und Geräte sind geringer als die des Straßenverkehrs. Während die CO₂-Emissionen der NRMM jedoch nur 8 % der CO₂-Emissionen des Straßenverkehrs entsprechen, ist das Verhältnis der Luftschadstoffemissionen der NRMM bezogen auf die Straßenverkehrsemissionen bei CO (21 %), HC (24 %), NO_x (16 %) und insbesondere PM (86 %) deutlich höher. Der Hauptgrund für den überproportionalen Beitrag der mobilen Maschinen und Geräte zu den Schadstoffemissionen ist die spätere Einführung von Emissionsstandards für mobile Maschinen. Insbesondere durch die vergleichsweise strengen Grenzwerte der Abgasstufen IV sowie der nochmaligen Verschärfung und Ausweitung auf weitere Motorenklassen durch Stufe V ist jedoch von einer zukünftigen Reduktion der Emissionen von NRMM auszugehen (siehe Kapitel 6.2).

Tabelle 64: Gegenüberstellung der Emissionen von NRMM und Straßenverkehr in Deutschland 2018 in Kilotonnen

Verkehrsart	CO ₂	CO	HC	NO _x	PM
NRMM	13.954	225	27	83	7,2
Straßenverkehr	184.540	1.094	110	536	8,3
Verhältnis NRMM/Straße	8 %	21 %	24 %	16 %	86 %

Quelle: NRMM: TREMOD-MM 5.1, Straßenverkehr: TREMOD 6.03 (Territorialprinzip, ohne Energiebereitstellung)

6.2 Zeitliche Entwicklung der Gesamtemissionen und Änderungen zu Vorversionen

Abbildung 19 bis Abbildung 23 stellen die zeitliche Entwicklung der Emissionen aller NRMM in Deutschland von 1980 bis 2030¹⁰ dar. Insgesamt zeigen sich mit den Ergebnissen aus TREMOD-MM 5.1 folgende Trends:

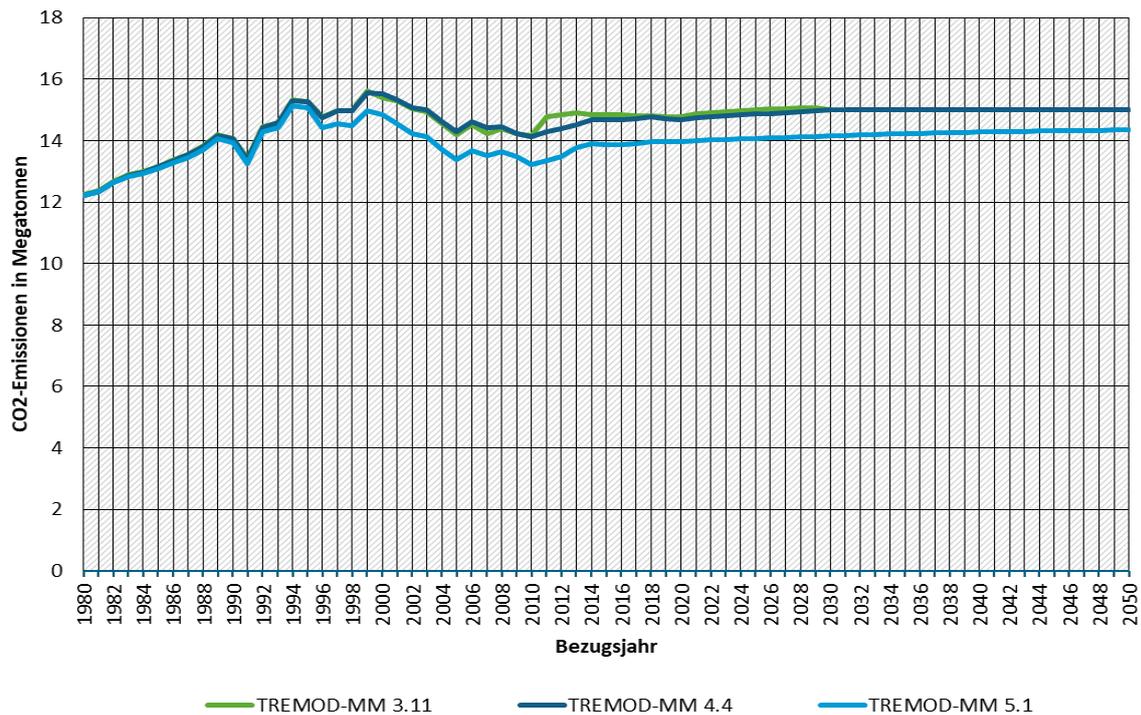
- ▶ Die CO₂-Emissionen (Abbildung 19) zeigen einige Schwankungen, sind aber insgesamt von 1980 bis 2018 um 14 % angestiegen. Zukünftig werden annähernd konstante Emissionen erwartet, was jedoch dadurch bedingt ist, dass das Trendszenario in TREMOD-MM in erster Linie die Effekte der Abgasgesetzgebung abbildet. Mögliche Entwicklungen bei der Anzahl von Maschinen, Betriebsstunden, sowie der Energieeffizienz, alternativen Antrieben und CO₂-armen oder CO₂-neutralen Energieträgern sind derzeit nicht berücksichtigt.
- ▶ Die HC-Emissionen (Abbildung 20) sind seit den 1990er Jahren kontinuierlich gesunken. Dies liegt an der Einführung der Abgasgrenzwerte und einer Verschiebung von Otto 2-Takt hin zu 4-Takt Geräten. Insgesamt beträgt der Rückgang von 1980 bis 2018 64 %. Bis zum Jahr 2030 wird eine weitere Reduktion der HC-Emissionen um 25 % gegenüber 2018 erwartet.
- ▶ Die CO-Emissionen (Abbildung 21) sind ebenfalls aufgrund strengerer Abgasgrenzwerte seit Mitte der 1990er Jahren gesunken. Insgesamt beträgt der Rückgang von 1980 bis 2018 21 %. Bis zum Jahr 2030 wird ein Rückgang für die CO-Emissionen um weitere 20 % gegenüber 2018 erwartet, wobei sich insbesondere die Einführung der Stufe V ab 2019 bemerkbar macht.
- ▶ Die NO_x-Emissionen (Abbildung 22) steigen bis zum Jahr 2000 an und beginnen erst mit Einführung der Stufe I zu sinken. Dieser Trend setzte sich jedoch durch die Verschärfung der Emissionsstandards kontinuierlich fort. Insgesamt kommt es daher von 1980 bis 2018 zu einem Rückgang um 48 %. Bis zum Jahr 2030 wird ein weiterer Rückgang der NO_x-Emissionen um 49 % gegenüber 2018 erwartet.
- ▶ Die Partikelmasse-Emissionen (Abbildung 23) zeigen seit den 1990er Jahren einen Rückgang, welcher sich durch die Einführung der Abgasgrenzwerte und einer Verschiebung von Otto 2-Takt hin zu 4-Takt fortsetzt. Insgesamt beträgt der Rückgang von 1980 bis 2018 79 %. Bis zum Jahr 2030 wird ein Rückgang der PM-Emissionen um weitere 69 % gegenüber 2018 erwartet.

Die Abbildungen stellen weiterhin die Änderungen gegenüber früheren Versionen von TREMOD-MM dar. TREMOD-MM 3.11 entspricht der Version, welche zuletzt in (ifeu, 2014) dokumentiert wurde. TREMOD-MM 4.4 liegt der nationalen Emissionsberichterstattung des Umweltbundesamtes für die Berichtsperiode 1990-2018 zugrunde. TREMOD-MM 5.1 ist die aktuelle Version, welche aus den Daten dieses Berichtes hervorgeht.

¹⁰ Zwar können mit TREMOD-MM auch Daten bis 2050 berechnet werden (siehe Abbildungen), diese sind jedoch mangels genauerer Analysen für diesen Zeitraum mit Vorsicht zu bewerten.

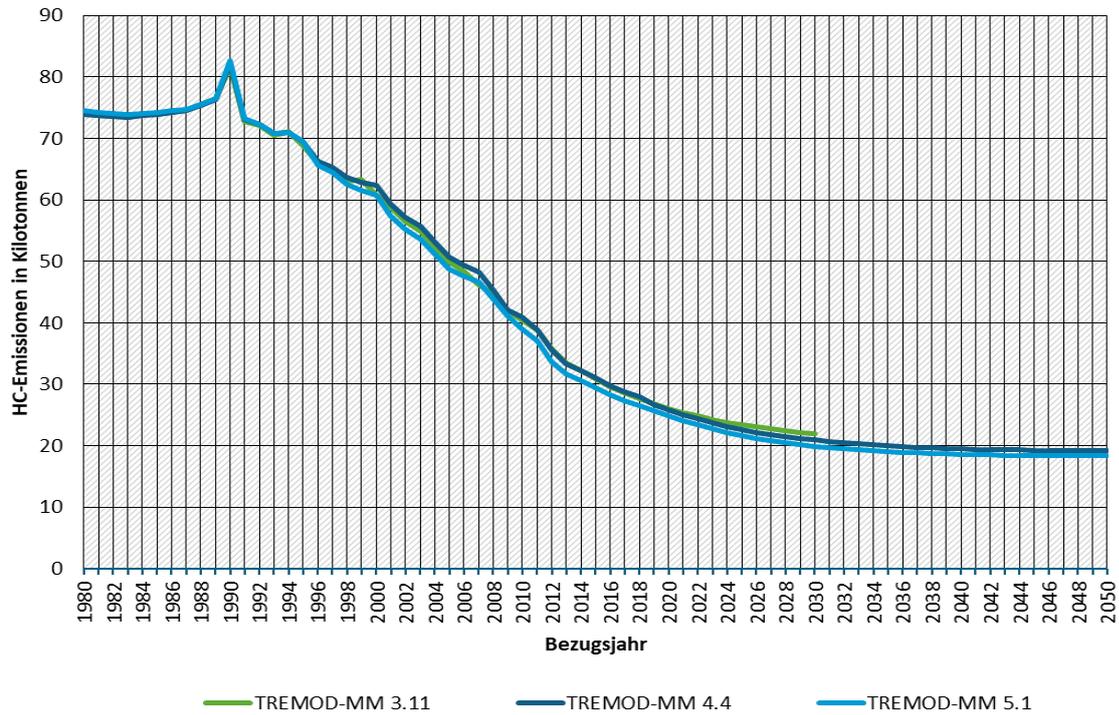
Die Unterschiede zwischen den Versionen sind vergleichsweise gering. TREMOD-MM 5.1 führt im Gesamtergebnis zu etwas niedrigeren Emissionen als die Vorversionen, da der Kraftstoffverbrauch für die Landwirtschaft rückwirkend reduziert wurde. Die Aktualisierung der Emissionsfaktoren der Stufe V und für NO_x bei Dieselgeräten ab Stufe IIIB führen zu unterschiedlichen Emissionsniveau im Trendszenario ab 2018. Durch das insgesamt niedrige Emissionsniveau ist dieser Unterschied jedoch kaum sichtbar (bei NO_x und PM liegen die Abweichungen bis 2030 unter 15 %).

Abbildung 19: Vergleich der CO₂-Emissionen in TREMOD-MM 3.11, 4.4 und 5.1 zwischen 1980 und 2050



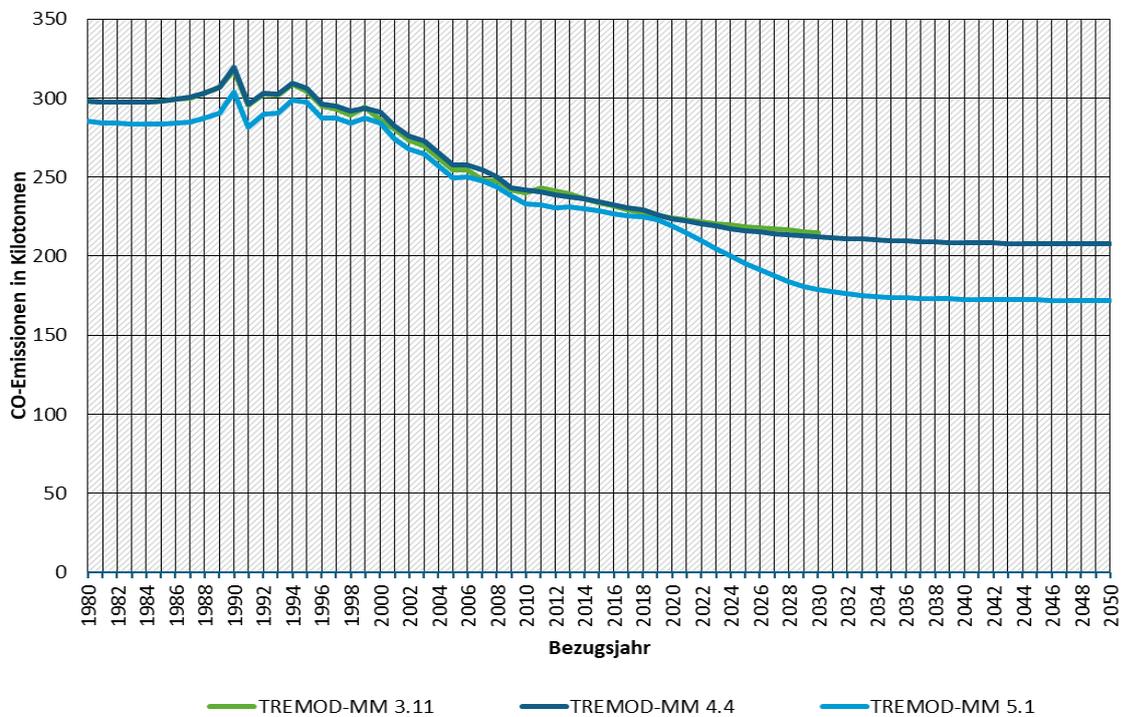
Quelle: ifeu-Berechnungen mit TREMOD-MM

Abbildung 20: Vergleich der HC-Emissionen in TREMOD-MM 3.11, 4.4 und 5.1 zwischen 1980 und 2050



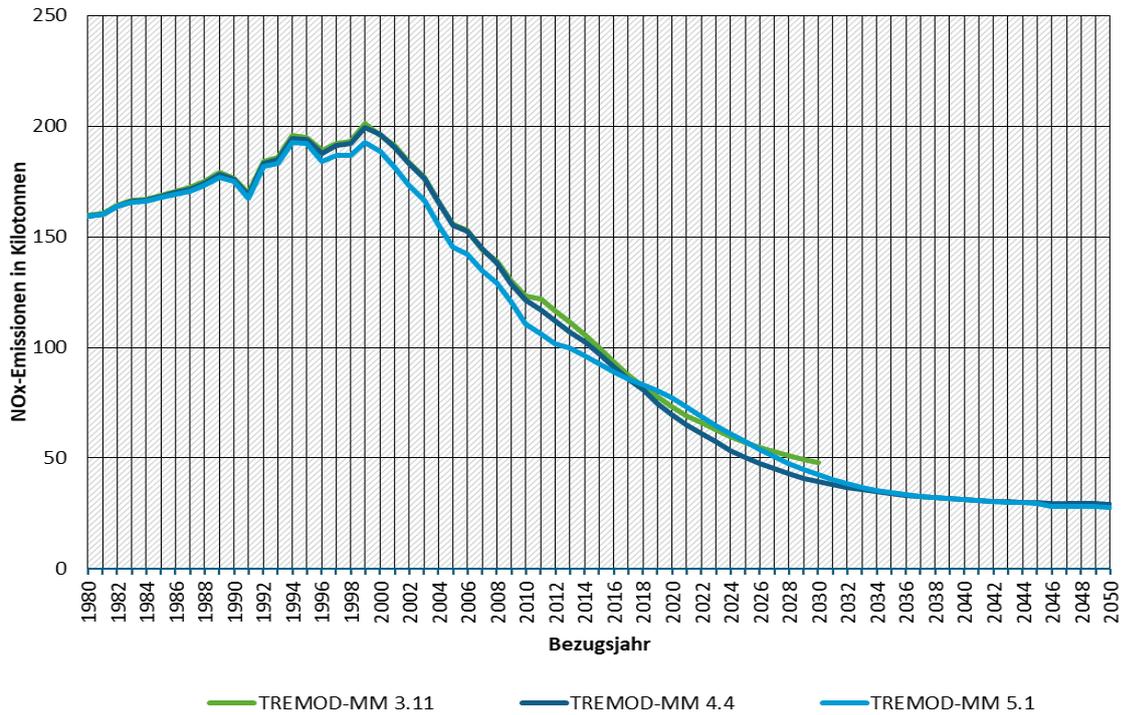
Quelle: ifeu-Berechnungen mit TREMOD-MM

Abbildung 21: Vergleich der CO-Emissionen in TREMOD-MM 3.11, 4.4 und 5.1 zwischen 1980 und 2050



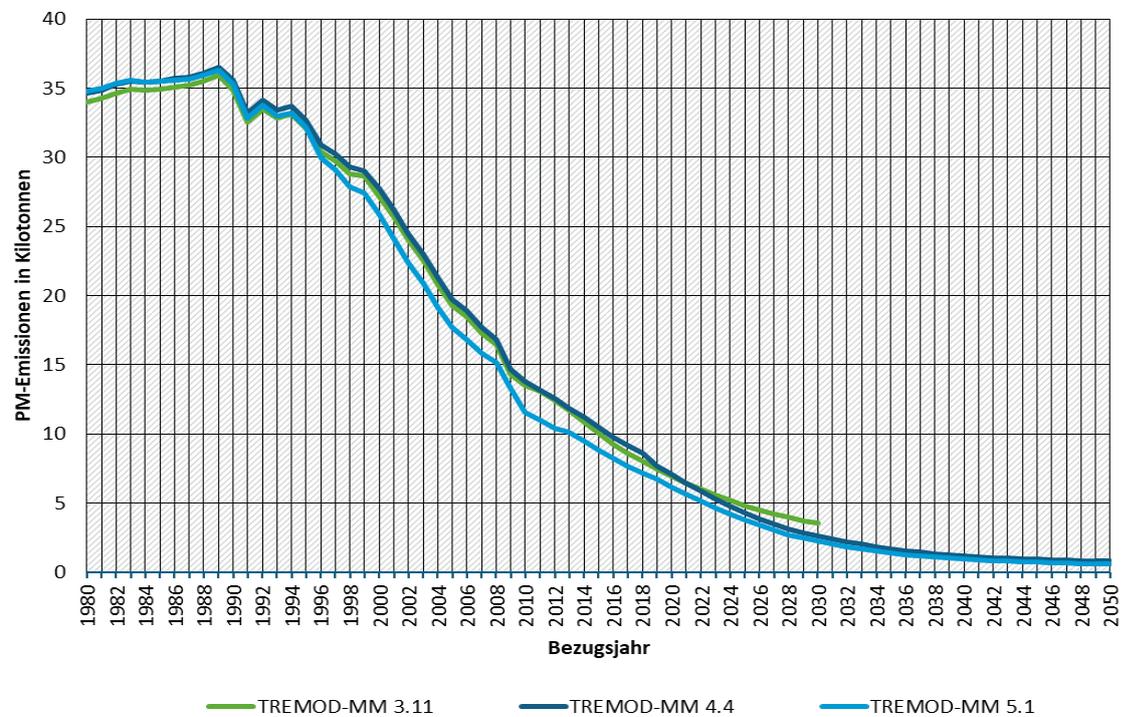
Quelle: ifeu-Berechnungen mit TREMOD-MM

Abbildung 22: Vergleich der NO_x-Emissionen in TREMOD-MM 3.11, 4.4 und 5.1 zwischen 1980 und 2050



Quelle: ifeu-Berechnungen mit TREMOD-MM

Abbildung 23: Vergleich der PM-Emissionen in TREMOD-MM 3.11, 4.4 und 5.1 zwischen 1980 und 2050



Quelle: ifeu-Berechnungen mit TREMOD-MM

6.3 Plausibilisierung des Energieverbrauchs

6.3.1 Vergleich mit AG Energiebilanzen

Im TREMOD Transportmodell erfolgt eine regelmäßige Plausibilisierung des Energieverbrauchs durch den Vergleich der hochgerechneten Verbrauchsmengen (Bottom-up) der Verkehrsarten Straße, Schiene, Luft und Güterschifffahrt mit den aus von Mineralöllieferanten gemeldeten und in der Energiebilanz erfassten Daten zum Kraftstoffabsatz der AG Energiebilanzen (Top-Down). Letztere bilden auch die Bezugsgröße für den Energieverbrauch des nationalen Emissionsinventars des Umweltbundesamtes, während aus den Bottom-Up Berechnungen die feinere Aufteilung des Energieverbrauchs auf gewisse Untergruppen und die spezifischen Emissionsfaktoren abgeleitet werden.

Den mobilen Maschinen ordnet das Umweltbundesamt hierbei die Kraftstoffverbräuche der Sektoren „Haushalte“ (Zeile 66 in (AGEB, 2019)) und „Gewerbe, Handel, Dienstleistungen“ (Zeile 67 in (AGEB, 2019)) zu. Während der Sektor „Haushalte“ den mobilen Geräten im Bereich „Hobby, Garten“ in TREMOD-MM entspricht, wird der Energieverbrauch der Kategorie „Gewerbe, Handel, Dienstleistungen“ (GHD) zwischen den übrigen Sektoren in TREMOD-MM aufgeteilt. Zum Vergleich mit den TREMOD-MM Daten wurden folgende Anpassungen vorgenommen:

- ▶ Beim Sektor GHD wurde der Kraftstoffverbrauch durch das Militär gemäß (BAFA, n.d.) abgezogen, da das Militär nicht in TREMOD-MM erfasst wird.
- ▶ Da die AGEB Daten in Zeile 66 und 67 nur die fossilen Kraftstoffe enthalten, wird der energetische Anteil an Biokraftstoffen im Jahr 2018 von 4,3% Ethanol am Benzin und 5,5% Biodiesel am Diesel MJ/MJ gemäß TREMOD (Allekotte et al., 2019) aufgeschlagen.

Die Gegenüberstellung zeigt die Tabelle 65. Bei den Haushalten stimmen die Daten weitgehend überein. Bei GHD liegt die Summe des mit TREMOD-MM berechneten Endenergieverbrauchs für Benzin jedoch um 73 % niedriger und für Diesel um 64% höher als die Angaben des Sektors GHG in der Energiebilanz. So wird beim Dieselabsatz zumindest die Größenordnung des Absatzes grob wiedergegeben, beim Benzinabsatz gibt es jedoch deutliche Diskrepanzen. Eine exakte Abgrenzung und Zuordnungen der Bereiche sind dabei jedoch nicht gegeben.

Tabelle 65: Vergleich Endenergieverbrauch AG Energiebilanzen und TREMOD-MM für Deutschland 2018

Kraftstoff	AGEB Abgrenzung	AGEB Verbrauch*	TREMOD-MM Abgrenzung	TREMOD-MM Verbrauch	Differenz TREMOD-MM zu AGEB
Benzin	Haushalte (Z 66)	4.418 TJ	Hobby, Garten	4.179 TJ	-239 TJ (-5 %)
	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (Z 67)	5.091 TJ	Land-, Bau-, Forstwirtschaft und Industrie	1.388 TJ	-3.703 TJ (-73 %)
Diesel	Haushalte (Z 66)	-	Hobby, Garten	-	-
	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (Z 67)	107.064 TJ	Land-, Bau-, Forstwirtschaft und Industrie	175.345 TJ	+68.281 TJ (+64 %)

Quelle: (AGEB, 2019), BAFA und ifeu-Berechnungen mit TREMOD-MM- *Anmerkung: AGEB-Daten wurden von ifeu verändert (Aufschlag eines Anteils für Biokraftstoffe und Abzug des Verbrauchs durch das Militär bei GHD)

So gehen die Kraftstoffverbräuche der AG Energiebilanzen im Wesentlichen auf die Statistiken der BAFA zurück, welche die deutschlandweiten Kraftstoffabsätze nach Kraftstoffart erfasst. Eine Schwierigkeit ist die Aufteilung auf die Sektoren (sowie auch auf die Verkehrsarten in TREMOD), da die Kraftstofflieferanten nur in die Kategorien: Internationale Bunkerungen, Luftfahrt, Binnenschifffahrt, Militär und sonstige Verbraucher unterscheiden müssen. Ein wesentlicher Teil der Diesel- und Benzinabsätze entfällt in der Regel auf die sonstigen Verbraucher. Die AG Energiebilanzen verwenden daher weitere Informationen, z.B. aus Energiesteuerdaten und Energiekosten, zur Bestimmung des Verbrauchs in einzelnen Sektoren.

Daten für den Benzinverbrauch der Haushalte wurden in der Vergangenheit durch die AGEB vom ifeu bezogen, was die geringen Unterschiede erklären könnte. Da die Erfassungsmethoden des Verbrauchs im Sektor GHD jedoch nicht genau nachvollzogen werden konnten, können die Differenzen zu TREMOD-MM nicht abschließend erklärt werden.

Für die größten Sektoren Landwirtschaft und Bauwirtschaft werden jedoch zusätzliche Plausibilisierungen durchgeführt.

6.3.2 Vergleich mit der Gasölrückerstattung für den Sektor Landwirtschaft:

Für den Energieverbrauch von NRMM im Bereich Landwirtschaft wurden für den Zeitraum von 2010 bis 2017 Daten der Generalzolldirektion zur Steuerentlastung nach § 57 Energiesteuergesetz (Agrardieselentlastung) und von 1999 bis 2014 die Jahresberichte des Mineralölwirtschaftsverbands (MWV) ausgewertet. Letztere beruhen ebenfalls auf Daten nach dem Gasölverwendungsgesetz (LwGVG), bzw. ab 2001, auf Daten des Agrardieselgesetzes und sollten damit vergleichbar sein.

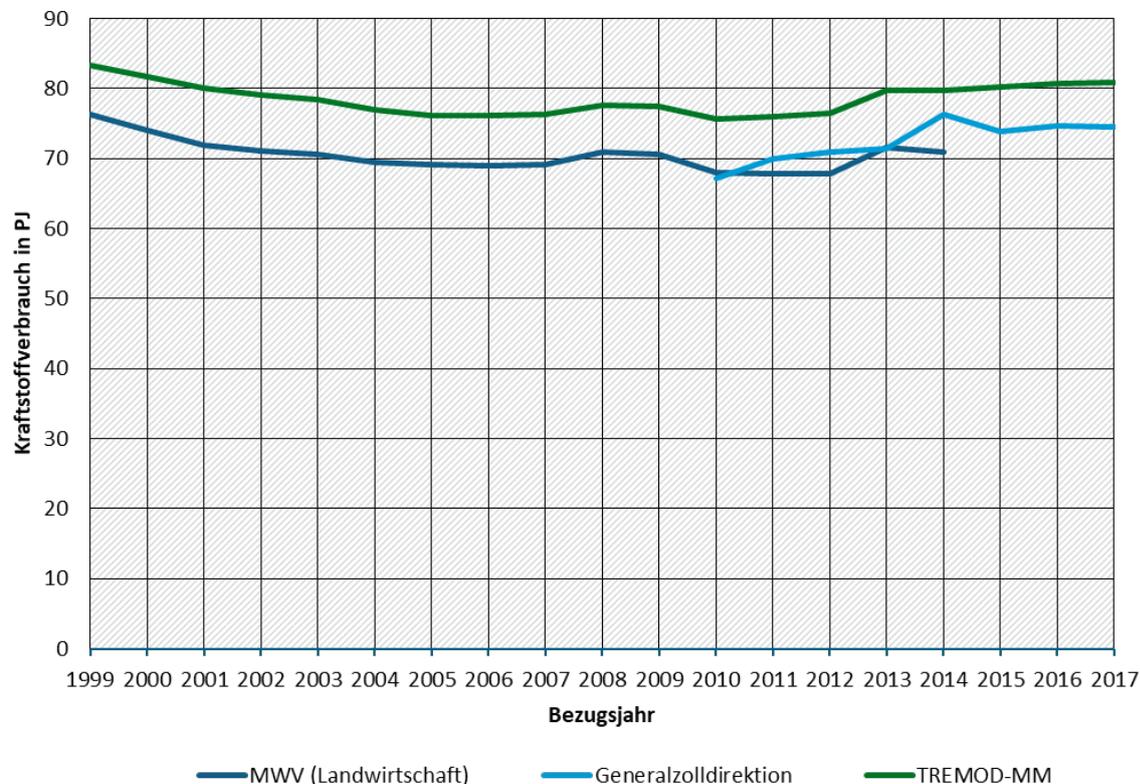
Eine frühere Analyse in (ifeu, 2009) zeigte, dass die errechneten Energieverbräuche in TREMOD-MM zwischen ca. 10 % und 20 % höher lagen als die MWV-Daten. Jedoch wird über das Agrardieselgesetz nur der Kraftstoff erfasst, für den tatsächlich eine Rückerstattung beantragt wurde. Das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft ging bisher davon aus, dass nur etwa 90 % des gesamten Kraftstoffverbrauchs durch die Gasölabrechnung erfasst wird. Da in TREMOD-MM auch die Neben- und Nichterwerbslandwirtschaft vollständig berücksichtigt werden, wurde eine Differenz von ca. +10 % als plausibel betrachtet. In zwischenzeitlichen

Updates von TREMOD-MM ((Helms / Heidt, 2014a) haben jedoch verschiedene Annahmen zu einer Erhöhung des Kraftstoffverbrauchs geführt:

- ▶ Ein Teil der Radlader und Teleskoplader wurde auf Empfehlungen des VDMA hin zur Landwirtschaft verschoben.
- ▶ Bei den Landmaschinen wurden ab 2009 auch sonstige Zugmaschinen erfasst, bei welchen es sich jedoch nur bei älteren Fahrzeugen zum Teil um land- oder forstwirtschaftliche Geräte handelt. Dies wurde in der aktuellen Version von TREMOD-MM korrigiert.
- ▶ Der Zugmaschinenbestand und die mittlere Leistung sind seit 2009 weiter angestiegen. Die Anpassung der Nutzungsstunden an die landwirtschaftliche Nutzfläche, um diesen Trend auszugleichen, wurde nicht aktualisiert.

In der aktuellen Version von TREMOD-MM wurde die Nutzungsstundenkorrektur direkt auf eine plausible Abweichung von ca. 10 % zwischen gemeldetem Kraftstoffverbrauch und dem Ergebnis von TREMOD-MM bezogen (siehe 5.1.2). Dadurch ist die Abweichung entsprechend gering und der zeitliche Verlauf annähernd parallel zu den Kraftstoffabsatzdaten (siehe Abbildung 24). Es ist anzunehmen, dass diese Anpassung ebenfalls zu Unsicherheiten führt. Mangels besserer Daten und aus Konsistenzgründen zur Energiebilanz, erscheint dieses Vorgehen jedoch angemessen.

Abbildung 24: Vergleich des Dieserverbrauchs der Landwirtschaft in TREMOD-MM mit Daten der Gasölrückerstattung



Quellen: (Generalzolldirektion, 2019; MWV, 2014) und ifeu-Berechnungen

6.3.3 Plausibilisierung für den Sektor Bauwirtschaft

Für die Bauwirtschaft konnten nur bedingt vergleichbare Daten zum Energieverbrauch bzw. -absatz identifiziert werden. Folgende Quellen werden gegenübergestellt:

- ▶ Die Erhebung für die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen zum „Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland“ (Kleeberger et al., 2016)¹¹.
- ▶ Die Umweltökonomischen Gesamtrechnungen (UÖG) des statistischen Bundesamts (DESTATIS, 2020)
- ▶ Die Kostenstruktur der Unternehmen im Baugewerbe des statistischen Bundesamts (DESTATIS, 2017)

Tabelle 66 zeigt die Gegenüberstellung der zusammengestellten bzw. berechneten Daten. Die Bandbreite der für die Bauwirtschaft ermittelten Werte liegt zwischen 36.709 TJ und 319.312 TJ und ist damit sehr groß. Der TREMOD-MM Wert liegt mit 72.440 TJ im Jahr 2017 innerhalb dieser Bandbreite, jedoch deutlich am unteren Ende. Zur weiteren Einordnung können folgende Hinweise dienen:

- ▶ Der obere Wert aus den UÖG weicht sehr stark ab. Es ist nicht auszuschließen, dass in den dafür von DESTATIS verwendeten Input-Output-Rechnungen auch Energiemengen enthalten sind, die nicht der Umwandlung in mechanische Arbeit oder Wärme dienen und daher nicht einem Energieverbrauch mobiler Maschinen entsprechen. Weiterhin umfasst der Wert alle Energieträger, also auch Strom, Heizöl, etc.
- ▶ Der untere Wert aus den GHD-Anwendungsbilanzen (Kleeberger et al., 2016) wiederum vernachlässigt den eigentlich relevanten Energieverbrauch auf Baustellen und kann damit nicht direkt zum Vergleich herangezogen werden. Als Differenz zu den Erhebungen von DESTATIS, welche alle Energieträger und Verbräuche des Gewerbes umfassen, liefert er jedoch einen Hinweis auf dessen Höhe. Bei den umweltökonomischen Gesamtrechnungen entspräche diese einem Wert von 269.204 TJ, bei den aus den Energiekosten abgeschätzten Verbrauch einem Wert von bis zu 103.143 TJ für alle Energieträger.

Der Anteil des Verbrauchs an Otto- und Dieselmotoren von Baumaschinen an diesen Energiemengen kann zwar nicht weiter aufgeschlüsselt werden. Jedoch liegt der mit TREMOD-MM berechnete Kraftstoffverbrauch in beiden Fällen niedriger, was eine Überschätzung des Verbrauchs eher unwahrscheinlich macht.

Tabelle 66: Energieverbrauch der Bauwirtschaft

Quelle	(Kleeberger et al., 2016) Energiebilanzen GHD	(DESTATIS, 2020) UÖG	(DESTATIS, 2017) Kostenstruktur	TREMOD-MM 5.1
Energieträger	alle Energieträger	alle Energieträger		Otto- und Dieselmotoren

¹¹ Vorversionen dieser Erhebungen für das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie durch Fraunhofer ISI wurden ebenfalls analysiert.

Quelle	(Kleeberger et al., 2016) Energiebilanzen GHD	(DESTATIS, 2020) UÖG	(DESTATIS, 2017) Kostenstruktur	TREMOD-MM 5.1
Abgrenzung	Alle Verbräuche der Betriebe exkl. Verbrauch auf Baustellen	Alle Verbräuche der Betriebe	Alle Verbräuche der Betriebe	Energiebedarf der Baumaschinen
Methode	Hochgerechnet aus Stichprobenbefragungen und Anzahl Beschäftigter	Abgeleitet aus Daten der Energiebilanz	Erhebung zu Kosten für den Energieverbrauch (€)	Hochrechnung aus Bestandsmethode (Baumaschinen)
Verbrauch in Tj/a	50.108 (davon 36.709 für Brennstoffe und Fernwärme)	319.312 (192.078 exkl. Bauinstallation und Abriss)	*88.467 bis 153.249	72.440

*eigene Berechnungen des ifeu. Die Energiekosten wurden in physikalische Einheit mit einem Großkunden-Preis von 90,39 ct/L Diesel umgerechnet. Der untere Wert gilt für die Kosten für Betriebe mit mehr als 20 Beschäftigten, der obere Werte für alle Betriebe - unter der Annahme, dass die Kosten pro Beschäftigten hochskaliert werden können.

Als eine weitere Plausibilisierung wird die vom statistischen Bundesamt im Bauhauptgewerbe erfasste Anzahl von Beschäftigten (DESTATIS, 2018) und geleisteten Arbeitsstunden den in TREMOD-MM geschätzten Betriebsstunden der Baumaschinen gegenübergestellt (siehe Tabelle 67). Prinzipiell wird in den meisten Fällen eine Baumaschine von einer Person bedient, so dass eine Arbeitsstunde einer Betriebsstunde entsprechen würde. Die geschätzten Arbeitsstunden der Berufsgruppen "Baumaschinenführer, Berufskraftfahrer" sowie "Fachwerker, Maschinisten" liegen hierbei jeweils höher als die geschätzten Betriebsstunden aller mobilen Maschinen. Es ist jedoch anzunehmen, dass die Arbeitsstunden nicht direkt den Maschinenbetriebsstunden entsprechen, sondern niedriger liegen müssen, da zum einen die Berufsbezeichnungen weiter gefasst sind als das reine Fachpersonal für Baumaschinen (z.B. auch LKW-Fahrer) und zum anderen auch Arbeitszeiten ohne Maschineneinsatz (z.B. Transport, Wartungsarbeiten) anfallen dürften. Analog zu den Energieverbrauchsdaten zeigt die Gegenüberstellung somit, dass eine Überschätzung der Betriebsstunden in TREMOD-MM eher unwahrscheinlich, wegen der nur eingeschränkten Vergleichbarkeit jedoch auch nicht komplett ausgeschlossen ist.

Tabelle 67: Vergleich der im Jahr 2018 geleisteten Betriebsstunden von Baumaschinen mit den Arbeitsstunden von Baumaschinenführern und Maschinisten im Baugewerbe

Quelle:	TREMOD-MM	(DESTATIS, 2018)*	(DESTATIS, 2018)*
Abgrenzung:	Baumaschinen (nur Dieselantrieb)	Beruf "Baumaschinenführer, Berufskraftfahrer"	Beruf "Fachwerker, Maschinisten"
Anzahl Maschinen bzw. Beschäftigte	461.265	300.929	131.819
Anzahl Stunden pro Einheit pro Woche*	9	40	40
Anzahl Betriebs- bzw. Arbeitsstunden (in 1000)*	217.100	625.932	274.184

* Die wöchentlichen bzw. Gesamt-Arbeitsstunden stammen nicht von (DESTATIS, 2018) sondern wurden von ifeu abgeschätzt.

7 Weiterer Aktualisierungs- und Forschungsbedarf

Im Rahmen der Dokumentation wurde der Datenstand bereits an vielen Stellen zusammengefasst. Dieser zeigt dabei einerseits Bereiche auf, in den die Daten einer weiteren Aktualisierung bedürfen, andererseits werden aber auch darüberhinausgehende Forschungsfragen aufgeworfen. Dieser weitere Aktualisierungs- und Forschungsbedarf betrifft dabei sowohl die Emissionsfaktoren als auch die Bestands- und Aktivitätsdaten. Verschiedene Fragestellungen zu Emissionsfaktoren werden dabei auch in dem aktuell laufenden UBA ReFoPlan-Vorhaben „Fortentwicklung der Verordnung (EU) Nr. 2016/1628 für Mobile Maschinen und Geräte - NRMM (Non Road Mobile Machinery)“ (FKZ 3719 51 103 0) unter Leitung des ifeu untersucht, so dass die Ergebnisse absehbar auch in TREMOD-MM eingehen können.

7.1 Emissionsfaktoren

Die Verfügbarkeit von Messdaten für Diesel-Motoren ab Stufe IIIA ist derzeit noch gering. Um die Unsicherheiten der Verbrauchs- und Emissionsfaktoren dieser Stufen zu reduzieren, sollten weitere Messungen durchgeführt bzw. existierende Daten aus Literaturrecherchen oder Typgenehmigungsdatenbanken gesammelt und ausgewertet werden. Von der Typgenehmigung unabhängige Messungen im realen Betrieb, z.B. mit PEMS, wären hierbei besonders wichtig. Um jedoch ein breiteres Spektrum an Schadstoffen abzudecken, sollten auch Messungen auf dem Prüfstand durchgeführt bzw. analysiert werden. Neben Dieselmotoren, sollte auch die Datengrundlage für Otto- und Gasmotoren aktualisiert werden.

Die Methodik zur Bestimmung der Realemissionen, welche bisher bis Stufe IIIA nur über die transiente Anpassung für Motoren erfolgt, sollte erweitert werden und den Einfluss maschinen- oder arbeitsspezifischer Lastprofile, der Häufigkeit von Kaltstarts, von Außentemperatur und Vibrationen/Erschütterungen untersuchen.

In diesem Zusammenhang sollten, soweit vorhanden, auch Langzeitmessungen ausgewertet werden, um die Verschlechterungsfaktoren zu überprüfen, welche derzeit auf einer älteren Datengrundlage basieren. Auch hier sollte versucht werden, auf die im Rahmen von Typgenehmigungen erhobenen Daten zurückzugreifen. Gleiches gilt für die Verdunstungsemissionsfaktoren.

Die Emissionsfaktoren für nicht-regulierte Schadstoffe, z.B. CH₄, N₂O, NH₃ beruhen auf sehr alten Daten und pauschalen Annahmen. Diese Emissionsfaktoren sollten anhand neuerer Erkenntnisse überprüft werden. Hierfür könnten auch Messungen aus dem Bereich des Straßenverkehrs genutzt werden.

7.2 Bestands- und Aktivitätsdaten

Grundsätzlich unterliegen alle Bestandsdaten mobiler Maschinen, mit Ausnahme der vom KBA erfassten landwirtschaftlichen Zugmaschinen, großen Unsicherheiten bezüglich der absoluten Anzahl, Nennleistung und Altersstruktur. Insbesondere zu kleineren benzinbetriebenen Geräten im Bereich Forstwirtschaft und Grünpflege, z.T. in der Bauwirtschaft, aber auch bezüglich der Motoren für Sportboote, wurden seit längerer Zeit keine Überprüfungen bzw. Aktualisierungen mehr vorgenommen, da sie nur wenig zu den vorrangig diskutierten Luftschadstoffen NO₂ und PM beitragen. Es sollten daher neuere Verkaufszahlen recherchiert und die weiteren Annahmen mit Experten bzw. Herstellern abgestimmt werden. Insbesondere der aktuelle Trend hin zu Elektrogeräten im Bereich der Grünpflege, welche die für die HC- und CO-Emissionen relevanten

benzinbetriebenen Geräte möglicherweise zum Teil ersetzen, sollte hierbei genauer untersucht werden.

Die Lastfaktoren basieren derzeit weitgehend auf älteren Literaturdaten und sollten durch gemessene Daten überprüft bzw. aktualisiert werden. Solche können einerseits im Rahmen von PEMS-Messungen erhoben werden, könnten aber möglicherweise durch Telematik- oder On-Board Diagnostic Systeme bei größeren Fuhrparks bzw. für neueren Maschinen bereits erfasst worden sein. Sollten solche Lastfaktoren auch in zeitlich hoch aufgelöster Form vorliegen, lassen sich damit die Realemissionen genauer und spezifischer für konkrete Maschinentypen und Arbeitsschritte ermitteln.

Für das Trendszenario sollte die Relevanz alternativer Antriebe in allen Sektoren untersucht werden, um diese soweit möglich in TREMOD-MM abzubilden. Ansonsten besteht das Risiko, dass das Trendszenario für die mobilen Maschinen langfristig inkonsistente Entwicklungen gegenüber den übrigen Sektoren, wie dem Straßenverkehr, widerspiegelt.

8 Quellenverzeichnis

- AGEB (2019): Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2018. Datenstand: 27. Februar 2020. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen. Erscheinungsweise jährlich.
- Allekotte, M.; Heidt, C.; Knörr, W. (2019): Aktualisierung der Modelle TREMOD/TREMOD-MM für die Emissionsberichterstattung 2020 (Berichtsperiode 1990-2018) - Berichtsteil „TREMOD“ (noch unveröffentlicht).
- BAFA (n.d.): Amtliche Mineralöl-daten für die Bundesrepublik Deutschland; Jahresbericht. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA). Erscheinungsweise jährlich, im Monatsbericht Dezember.
- BAFU (2008): Treibstoffverbrauch und Schadstoffemissionen des Offroad-Sektors. Bundesamt für Umwelt Bern.
- Blassnegger, J. (2014): Onboard Emissionsmessung an Baumaschinen unterschiedlicher Emissionsstufen im realen Betrieb; Erstellt im Auftrag des Lebensministeriums Abteilung V/4 Immissions- und Klimaschutz, Bericht Nr.; I-06/13/JBlass Em 2012/25. TU Graz.
- BLE (2008): Daten per Email (31.10.2008). Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung.
- Bortfeld (2002): Variationsbreite von Emissionsfaktoren je nach Motortyp am Beispiel von 2-Takt-Motoren, Heutiger Stand und zukünftige Tendenzen. Präsentation im Rahmen der Konferenz "Entwicklung eines Modells zur Berechnung der Luftschadstoffemissionen und des Kraftstoffverbrauchs von Verbrennungsmotoren in mobilen Maschinen und Geräten" am 14.2.2002 in Heidelberg. Stihl AG.
- BUWAL (1996): Schadstoffemissionen und Treibstoffverbrauch des Offroad-Sektors.
- BUWAL (2000): Handbuch Offroad-Datenbank. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- CEPA (1998): Proposed Refuelling Emission Inventory. California Environmental Protection Agency, Sacramento.
- Couson (2003): Email 23.4.2003. Electrowatt Infra AG.
- DESTATIS (2011): Produktions- und Außenhandelsstatistiken des verarbeitenden Gewerbes. Sonderabfrage durch IFEU. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- DESTATIS (2017): Fachserie 4 Reihe 5.3. Produzierendes Gewerbe. Kostenstruktur der Unternehmen im Baugewerbe und Daten zur Energiepreisentwicklung - Lange Reihen von Januar 2005 bis Januar 2020 -. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- DESTATIS (2018): Fachserie 4 Reihe 5.1. Produzierendes Gewerbe. Tätige Personen und Umsatz der Betriebe im Baugewerbe 2017. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- DESTATIS (2020): Energieverbrauch: Deutschland, Jahre, Produktionsbereiche. Zeitreihe 1995 bis 2017. Abgerufen über GENISIS Online. In: *Statistisches Bundesamt*. (11.03.2020).
- dieselnet.com (2019): DieselNet: Engine Emission Standards. <https://dieselnet.com/standards/#eu>. (30.03.2020).
- Dolce (1998): Refueling emissions for nonroad engine modelling. NR-013. US Environmental Protection Agency, Washington.
- EPA (1999): Exhaust emission factors for nonroad engine modeling - spark ignition. NR-010b. US Environmental Protection Agency, Washington.
- EPA (2002): Exhaust emission factors for nonroad engine modelling - sprak ignition. NR-010c. US Environmental Protection Agency, Washington.
- EPA (2003a): Final Phase 2 Standards for Small Spark-Ignition Handheld Engines. In: *EPA - Vehicle and Engine Certification*. <https://www.epa.gov/ve-certification/certification-and-compliance-nonroad-vehicles-and-engines>.

- EPA (2003b): Draft regulatory impact analysis: Control of emissions from nonroad diesel engines. US Environmental Protection Agency, Washington.
- EPA (2010a): Nonroad Engine Population Estimates. US Environmental Protection Agency, Washington.
- EPA (2010b): Median Life, Annual Activity, and Load Factor Values for Nonroad Engine Emissions Modeling. US Environmental Protection Agency, Washington D. C. US Environmental Protection Agency, Washington.
- EPA (2010c): Exhaust and Crankcase Emission Factors for Nonroad Engine Modeling - Compression-Ignition. NR-009d. US Environmental Protection Agency, Washington. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockkey=P10081UI.pdf> (25.03.2020).
- EU (1994): RICHTLINIE 94/25/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 16. Juni 1994 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten über Sportboote. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:1994L0025:20081211:de:PDF> (26.03.2020).
- EU (2013): Richtlinie 2013/53/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. November 2013 über Sportboote und Wassermotorräder und zur Aufhebung der Richtlinie 94/25/EG Text von Bedeutung für den EWR. S. 42.
- EU (2016): 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.
- Euromot (1995): European Association of Internal Combustion Engine Manufacturers. Excel Datei per E-Mail vom 12.04.2002.
- FAT (2002): Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik: Datenblätter von Traktorentests aus den Jahren 1998 bis 2002.
- Generalzolldirektion, H. (2019): Daten zur Menge an Rückerstattetem Dieselkraftstoff für die Landwirtschaft per E-Mail. Generalzolldirektion Direktion IV, Referat 3 Verbrauchsteuer (Energieerzeugnisse, Strom und Biokraftstoffe). Generalzolldirektion, Neustadt a.d. Weinstraße.
- GLC (2003): Scope Study for Expanding the Great Lakes Toxic Emission Regional Inventory to include Estimated Emissions from Mobile Sources: Chapter 5 Estimating Air Toxics Emissions from Nonroad Sources. Great Lakes Commission.
- Harbauer, P. (2018): KWF-Pressemitteilung 05/2018: Forstmaschinenstatistik zeigt stark gestiegene Absatzzahlen für Österreich und die Schweiz. Stabile Verkaufszahlen für Deutschland. https://www.kwf-online.de/images/KWF/Presse/2018/05/KWF_Forstmaschinenstatistik_2018_Deutschland_Verkaufszahlen.jpg. (25.03.2020).
- Harvey (1998): Basic evaporation emission rates for nonroad engine modelling. NR-012. US Environmental Protection Agency, Washington.
- Helms, H.; Heidt, C. (2014a): Erarbeitung eines Konzepts zur Minderung der Umweltbelastung aus NRMM (non road mobile machinery) unter Berücksichtigung aktueller Emissionsfaktoren und Emissionsverminderungsoptionen für den Bestand.
- Helms, H.; Heidt, C. (2014b): Schadstoffemissionen und Belastungsbeitrag mobiler Maschinen in Baden-Württemberg. ifeu.
- Helms, H.; Lambrecht, U.; Knörr, W. (2009): Aktualisierung des Modells TREMOD – Mobile Machinery (TREMOD-MM).

- JRC (2008): 2007 Technical Review of the NRMM Directive 1997/68/EC as amended by Directives 2002/88/EC and 2004/26/EC. European Commission/Directorate General/Joint Research Center.
- KBA (2002): Kraftfahrt-Bundesamt: Korrespondenz 25.09.2002.
- KBA (n.d.): Jährliche Sonderauswertung des Kraftfahrzeugbestands und der Neuzulassungen des Kraftfahrtbundesamtes für TREMOD. Kraftfahrt-Bundesamt.
- KBA (n.d.): Bestand und Neuzulassungen - Bereitstellung der Jahresdaten für TREMOD.
- Kleeberger, H.; Hardi, L.; Geiger, B. (2016): Erstellen der Anwendungsbilanzen 2013 bis 2017 für den Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD). Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (IfE), Technische Universität München.
- Krämer, A. (2015): Abschätzung DVFG zum Treibgas-Absatz Deutschland zwischen 2001 und 2014. erhalten als Excel-Datei per E-Mail von Frau Krämer 04.08.2015. Deutscher Verband Flüssiggas e.V.
- Kriedel, N. (2013): Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs und des Carbon Footprint der Binnenschifffahrt durch Auswertung der Daten des CDNI. Sekretariat der ZKR. Runder Tisch. Umsetzung der Strategie der ZKR zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauch und der Treibhausgasemissionen in der Rheinschifffahrt. 24. April 2013.
- KWF (2003): Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik: Email-Verkehr und Telefongespräche mit Lars Nick. Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik:
- KWF (2008): Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik: Email-Verkehr und Telefongespräche am 12.11.2008 und 4.12.2008 mit Lars Nick. Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik.
- Lambrecht, U.; Helms, H.; Kullmer, K.; Knörr, W. (2004): Entwicklung eines Modells zur Berechnung der Luftschadstoffemissionen und des Kraftstoffverbrauchs von Verbrennungsmotoren in mobilen Geräten und Maschinen.
- Linde (2001): Fax 1.8.2001. LINDE AG.
- Lindhjem (1998): Emission degradation factors for the NONROAD emission model. NR-011. US Environmental Protection Agency, Washington.
- LTC (1994): Spillage while refuelling (Supplement). Lombard Technical Consulting, Charlotte NC.
- Matthiesen (2003): International Council of Marine Industry Associations: Email 2.7.2003. International Council of Marine Industry Associations.
- 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).
- May, J.; Favre, C.; Bosteels, D.; Andersson, J.; Such, C.; Fagg, S. (2010): AECC Non-Road Mobile Machinery (NRMM) Test Programme: Particle Measurement and Characterisation. 14th ETH Conference on Combustion Generated Nanoparticles Zürich, 2 August 2010. AECC, Ricardo, Zürich.
- McGinlay, J. (2004): Non-Road Mobile Machinery: Usage, Life and Correction Factors.
- Miersch, Wolfgang; Sachse, Jürgen (1999): Emission Testing of Engines to be Installed in Non-Road Mobile Machinery. Abgasprüfstelle Berlin-Adlershof GmbH. Im Auftrag der EU Kommission.
- MWV (2014): MWV Jahresberichte/Mineralölgzahlen 2005, 2008, 2014. Mineralölwirtschaftsverband e.V.
- Niemi, S.; Ekman, Krister; Nousiainen, Pekka (2012): Particle Number Emissions of Nonroad Diesel Engines of Various Ages. In: *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. Vol. 134, No.9.
- Notter, B.; Cox, B.; Jamet, M.; Keller, M.; Cox, B. (2019): HBEFA 4.1 Development Report.

- Notter, B.; Schmied, M. (2015): Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des Non-road-Sektors. Studie für die Jahre 1980–2050. INFRAS, Für das Bundesamt für Umwelt, Bern.
- Ntziachristos, L.; Samaras, Z. (2019): EMEP EEA Guidebook - 1.A.3.b.i-iv Road transport 2019. File, <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-b-i> (16.12.2019).
- OHR (2016): The Construction Equipment Industry in Europe - Equipment Analysis. Verschiedene Jahrgänge (2006 bis 2016). Off-Highway Research Limited. Off-Highway Research Limited, London.
- Sachse (2002): Auswertung von EU und UBA Messprogrammen für 2-Takt und 4-Takt Motoren im Auftrag des IFEU. Korrespondenz und Datenträger 24.6.2002.
- SBD (n.d.): Statistisches Jahrbuch für die BRD (verschiedene Jahrgänge). Statistisches Bundesamt Deutschland.
- Schulz, A.; Kuhnimhof, T.; Nobis, C.; Chlond, B.; Magdolen, M.; Bergk, F.; Kämper, C.; Knörr, W.; Kräck, J.; et. al. (n.d.): Klimawirksame Emissionen des deutschen Reiseverkehrs. Forschungskennzahl 3717 16 108 0 (in Bearbeitung). DLR – Institut für Verkehrsforschung; KIT – Institut für Verkehrswesen; ifeu, Kantar TNS, INFRAS.
- Schwingshackl, M.; Rexeis, M.; Hausberger, S. (2017): Emissionsauswirkung von stufenweisen Einsatzbeschränkungen für mobile Maschinen und Geräte in österreichischen PM und NO₂-Sanierungsgebieten. TU Graz.
- UBA (1995): Excel Datei. Umweltbundesamt.
- US EPA, O. (2016): Nonroad Technical Reports. In: *US EPA. Reports and Assessments*, <https://www.epa.gov/moves/nonroad-technical-reports>. (20.12.2019).
- Vorgrimler, D.; Wübben, D. (2001): Prognose der Entwicklung des Agrartechnikmarktes. Eine Expertenbefragung nach der Delphi-Methode. Hohenheimer Agrarökonomische Arbeitsberichte Nr. 7. Universität Hohenheim.
- Winther, M.; Dore, C. (2019): EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019 - 1.A.4 Non road mobile machinery. https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-4-non-road-1/at_view/file#pdfjs.action=download (25.03.2020).
- WSV (n.d.): Zentrale Binnenschiffsbestandsdatei der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung. Berichte verschiedener Jahre. <https://www.gdws.wsv.bund.de/DE/service/statistik/statistik-node.html>. (30.03.2020).
- ZSUK (2019): Sonderauswertung von Typgenehmigungsdaten zu Binnenschiffen und den eingebauten Motoren der Zentralstelle Schiffsuntersuchungskommission/Schiffseichamt. Nicht veröffentlicht.