

TEXTE

28/2010

# Aktualisierung des Modells TREMOD - Mobile Machinery (TREMOM-MM)



Förderkennzeichen 360 16 018  
UBA-FB 001377

## **Aktualisierung des Modells TREMOD - Mobile Machinery (TREMOD-MM)**

von

**Hinrich Helms**

**Udo Lambrecht**

**Wolfram Knörr**

ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter [http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/mysql\\_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=3944](http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/mysql_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=3944) verfügbar.

Die in der Studie geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

ISSN 1862-4804

**Herausgeber:** Umweltbundesamt  
Postfach 14 06  
06813 Dessau-Roßlau  
Tel.: 0340/2103-0  
Telefax: 0340/2103 2285  
E-Mail: [info@umweltbundesamt.de](mailto:info@umweltbundesamt.de)  
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>

**Redaktion:** Fachgebiet I 3.1 Umwelt und Verkehr  
Gunnar Gohlisch

Dessau-Roßlau, Mai 2010

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Übersicht.....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Grenzwertgesetzgebung der EU-Nonroad-Richtlinie.....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Daten zum Bestand und zur Nutzung.....</b>	<b>4</b>
3.1	Landwirtschaft .....	4
3.1.1	Bestandsdaten .....	4
3.1.2	Nutzungsdaten .....	8
3.2	Bauwirtschaft.....	10
3.2.1	Bestandsdaten .....	10
3.2.2	Nutzungsdaten .....	11
3.3	Forstwirtschaft.....	14
3.3.1	Bestandsdaten .....	14
3.3.2	Nutzungsdaten .....	16
3.4	Haushalt und Garten (Grünpflege).....	18
3.4.1	Bestandsdaten .....	18
3.4.2	Nutzungsdaten .....	20
3.5	Sportboote und Fahrgastschiffe.....	21
<b>4</b>	<b>Emissionsfaktoren .....</b>	<b>22</b>
4.1	Überprüfung der bisherigen Diesel-Emissionsfaktoren .....	22
4.1.1	Emissionsfaktoren bis Grenzwertstufen II .....	22
4.1.2	Emissionsfaktoren der Grenzwertstufe III und IV .....	24
4.2	Emissionsfaktoren für N <sub>2</sub> O, NH <sub>3</sub> und CH <sub>4</sub> .....	26
4.3	Transiente Anpassungsfaktoren .....	27
<b>5</b>	<b>Darstellung, Vergleich und Diskussion der Ergebnisse.....</b>	<b>29</b>
5.1	Differenzierte Ergebnisse.....	29
5.2	Gegenüberstellung mit den bisherigen Ergebnisse .....	32
5.3	Vergleich mit der Energiebilanz für den Offroad-Bereich .....	35
<b>6</b>	<b>Fazit .....</b>	<b>36</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>38</b>
<b>8</b>	<b>Verzeichnis der Tabellen und Abbildungen.....</b>	<b>41</b>
8.1	Tabellenverzeichnis .....	41
8.2	Abbildungsverzeichnis .....	42

# 1 Übersicht

Im Rahmen des Projektes „Entwicklung eines Modells zur Berechnung der Luftschadstoffemissionen und des Kraftstoffverbrauchs von Verbrennungsmotoren in mobilen Geräten und Maschinen“<sup>1</sup>, wurde von IFEU das Modell „TREMOM-MM“ (TREMOM Mobile Machinery) erstellt ([IFEU 2004]). Mit diesem Modell kann eine detaillierte Berechnung der Emissionen von mobilen Geräten und Maschinen in der Landwirtschaft, Bauwirtschaft, Forstwirtschaft und Grünpflege sowie der Sport- und Fahrgastschifffahrt durchgeführt werden. Dabei werden stark differenzierte Daten u. a. zur Altersstruktur, Motorleistung, Nutzung und zum Emissionsverhalten berücksichtigt. Somit ist es möglich, die Emissionen für verschiedene Szenarien in hohem Detaillierungsgrad zu berechnen.

Das IFEU wurde vom Umweltbundesamt beauftragt, eine Aktualisierung und Erweiterung der Datengrundlagen durchzuführen. Dabei geht es insbesondere um

- die Aktualisierung der Bestands- und Nutzungsdaten (Kapitel 3) und
- die Überprüfung und Erweiterung der Emissionsfaktoren (Kapitel 4).

Die aktualisierten Datengrundlagen werden in den entsprechenden Kapiteln vorgestellt und den bisherigen Datengrundlagen in [IFEU 2004] gegenübergestellt.

Die mit den aktualisierten und erweiterten Daten und Emissionsfaktoren berechneten Ergebnisse werden in Kapitel 5 dargestellt und diskutiert. Trotz zahlreicher Anpassungen in den Eingangsdaten, zeigen sich insbesondere beim Kraftstoffverbrauch und den NO<sub>x</sub>-Emissionen nur geringe Unterschiede gegenüber den bisherigen Berechnungen. Bei den Partikel-, HC- und CO-Emissionen sind die Unterschiede zwar etwas größer, aber vor dem Hintergrund der geänderten Szenarienannahmen (Transiente Anpassungsfaktoren, Anteil 4-Takt-Motoren, etc.) plausibel. Die qualitativen Erkenntnisse in [IFEU 2004] haben daher nach wie vor Bestand.

Im Vergleich zu [IFEU 2004] konnte eine Aktualisierung der Datengrundlage und in vielen Punkten auch Verbesserung der Szenarienannahmen erreicht werden. Bei vielen wichtigen Eingangsdaten bleibt die Datenlage jedoch deutlich unsicherer als im Straßenverkehr. Zukünftige Arbeiten sollten sich dabei auf die wichtigsten Einflussgrößen konzentrieren. Hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs und der NO<sub>x</sub>- und Partikelemissionen sollte der Fokus auf die großen Maschinen der Land- und Bauwirtschaft gelegt werden. Forschungsbedarf bleibt hier insbesondere bei

- den Betriebsstunden der Maschinen und Geräte,
- dem Bestand und der Bestandsstruktur in der Bauwirtschaft und
- den Emissionen der Maschinen im dynamischen Betrieb

Eine deutliche Verbesserung der Datenlage ließe sich vor allem über neue Erhebungen, evtl. in Zusammenarbeit mit geeigneten Verbänden erreichen. Bei den Emissionsfaktoren könnte die Datenbasis durch Auswertung weiterer Messdaten, insbesondere zu den Emissionen im dynamischen Betrieb, verbessert werden.

---

<sup>1</sup> UFOPLAN 299 45 113

## 2 Grenzwertgesetzgebung der EU-Nonroad-Richtlinie

Um eine zusätzliche Minderung der Schadstoffemissionen von mobilen Maschinen und Geräten zu erreichen, werden die Grenzwerte für Dieselmotoren zukünftig weiter verschärft. In [IFEU 2004] konnte nur ein Grenzwertvorschlag vom Rat der Europäischen Union für neue Grenzwerte der Stufe III B und IV für Dieselmotoren berücksichtigt werden. Inzwischen liegt die endgültige Fassung der Erweiterung der EU-Nonroad-Richtlinie ([EU 2004]) mit folgenden Abweichungen gegenüber [IFEU 2004] vor:

- Der CO-Grenzwert bleibt in allen Stufen gleich. Bisher war in Stufe IV ab 130 kW eine Absenkung auf 3,0 g/ kWh berücksichtigt.
- Die Grenzwerte der Stufe III B gelten nun erst für Motoren ab 37 kW (bisher ab 19 kW). Bis 37 kW gelten damit weiterhin die weniger strengen Grenzwerte der Stufe III A. Die ursprünglich ab 37 kW vorgesehenen Grenzwerte der Stufe III B gelten nun erst ab 56 kW.

Die Emissionsstufen und Einführungszeiten sind in Tab. 1 als Übersicht aufgeführt und werden für die Ableitung der entsprechenden Emissionsfaktoren für TREMOD-MM in Kapitel 4.1.2 berücksichtigt. Ab Stufe III B gelten die Partikelgrenzwerte dabei für einen dynamischen Zyklus und sind damit nur bedingt mit den vorherigen Partikelgrenzwerten vergleichbar.

Die in TREMOD MM erfassten Otto-Motoren werden nach der EU-Richtlinie 2002/88/EC ([EU 2002]) reguliert. Diese Richtlinie wurde bereits in [IFEU 2004] berücksichtigt.

**Tab. 1: Grenzwerte für Dieselmotoren nach der EU-Nonroad-Richtlinie**

Leistung	NO <sub>x</sub>	HC	Partikel	CO	Datum**
Emissionsgrenzwerte Stufe III A [g/kWh]					
19-37 kW	7,5*		0,6	5,5	2007
37-75 kW	4,7*		0,4	5,0	2008
75-130 kW	4,0*		0,3		2007
130-560 kW			0,2	3,5	2006
Emissionsgrenzwerte Stufe III B [g/kWh]					
37-56 kW	4,7*		0,025	5,0	2013
56-75 kW	3,3	0,19			5,0
75-130 kW					
130-560 kW	2,0			3,5	2011
Emissionsgrenzwerte Stufe IV [g/kWh]					
56-130 kW	0,4	0,19	0,025	5,0	10/2014
130-560 kW				3,5	2014
* Grenzwert für die Summe aus NO <sub>x</sub> und HC					
** Ab diesem Jahr dürfen nur Maschinen, die den Grenzwert einhalten in Verkehr gebracht werden					
Quelle: [EU 2004]					IFEU 2009

### 3 Daten zum Bestand und zur Nutzung

Die Abgas-Emissionen der im Offroad-Sektor eingesetzten mobilen Geräte und Maschinen werden im Berechnungsmodell nach folgendem einheitlichen Rechenverfahren berechnet:

$$EA = Anz \times P \times Z \times LF \times EF$$

mit

EA	Abgas Emissionen einer Schicht (z.B. Traktoren 37-75 kW; Baujahr 1990 im Bezugsjahr 2000)
Anz	Anzahl/Bestand von Geräten/Maschinen/Fahrzeugen
P	Mittlere Nennleistung (für diese Schicht)
Z	Zahl der spezifischen Nutzungsstunden
LF	typischer mittlerer Lastfaktor (<1)
EF	Emissionsfaktor (g/kWh)

Diese so genannte „Bestandesmethode“ hat sich auch international zur Berechnung von Emissionen mobiler Maschinen und Geräte etabliert. Die Werte für die berücksichtigten Parameter werden im Modell in möglichst hoher Differenzierung (nach Alter, Antrieb, Nennleistungsklasse, etc.) erfasst. Der Lastfaktor ist dabei eine vereinfachende Beschreibung der Nutzung des Motors. Er gibt das Verhältnis zwischen der durchschnittlichen Leistung der betrachteten Maschinen in bestimmten Einsatzzwecken und der Nennleistung des Motors an. Im Folgenden werden die bisherigen Eingangsdaten zu Bestand (Anzahl und Leistung) und Nutzung (Nutzungsstunden und Lastfaktor) für die einzelnen Bereiche aktualisiert.

#### 3.1 Landwirtschaft

##### 3.1.1 Bestandsdaten

###### Zugmaschinen

Das KBA veröffentlicht Bestandsdaten für Zugmaschinen, die nach Zulassungsjahr und Leistungsklasse differenziert sind. Auf diesen Daten basierte der bisher in TREMOD-MM berücksichtigte Bestand. Dabei konnten bis einschließlich 1999 Realdaten verwendet werden. Die weitere Entwicklung wurde mit einem auf Neuzulassungen und Überlebenskurven basierenden Modell berechnet. Die KBA-Daten sollen aufgrund ihrer hohen Differenzierung auch weiterhin verwendet werden, dabei sind jedoch zwei Änderungen in der Statistik zu beachten:

- Ab 2001 werden in den vom KBA veröffentlichten Statistiken Leistungsklassen verwendet, die nicht kompatibel zu der Grenzwertgesetzgebung im Offroad-Bereich sind. Für die Jahre 2005 bis 2008 wurde vom KBA jedoch ein Datensatz in der benötigten Leistungsklassendifferenzierung zur Verfügung gestellt ([KBA 2008]). Aufgrund der eindeutigen Trends in der Bestandsentwicklung wurden die Jahre 2000-2004 interpoliert. Von den gesamten Zugmaschinenbeständen in [KBA 2008] werden etwa 70 % explizit der Kategorie ‚Land- und forstwirtschaftliche Zugmaschinen‘ der Vollerwerbslandwirtschaft zugeschrieben. Ältere KBA-Aufschlüsselungen nach Haltergruppen ([KBA Reihe 2]) zeigen, dass der übrige Anteil der Zugmaschinen den „Arbeitnehmern und Nichterwerbspersonen“ zugeordnet wird. Hierbei handelt es sich um meist kleine

(< 19 kW) und ältere Zugmaschinen, die vor allem in der Nicht- oder Nebenerwerbs-Landwirtschaft eingesetzt werden.

- Ab 2008 werden vorübergehend stillgelegten 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 nach Auskunft des Kuratoriums für Waldarbeit und Forsttechnik ([KWF 2008]), häufig umgerüstete Ackerschlepper eingesetzt. Diese sind, entgegen der bisherigen Annahme, größtenteils in der KBA-Statistik unter Zugmaschinen erfasst. 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.

Die weitere Entwicklung des Bestandes bis 2020 wird vom IFEU auf Basis der nach Zulassungsjahr differenzierten Bestandsdaten des KBA für 2008 und Annahmen zur Entwicklung der Neuzulassungen berechnet. Die in [IFEU 2004] auf Basis einer Delphi-Studie ([Universität Hohenheim 2001]) getroffene Annahme sinkender Neuzulassungen hat sich bisher nicht bestätigt. Die Neuzulassungen sind von etwa 26.000 1999 auf gut 28.000 Fahrzeuge im Jahr 2007 angestiegen ([KBA Reihe 2]). Für die Jahre bis 2020 nehmen wir eine gleich bleibende Anzahl von 28.000 Neuzulassungen pro Jahr an.

Überdies zeigen aktuelle Daten aus anderen Ländern, dass zunehmend auch von einem relevant steigenden Anteil von Zugmaschinen mit über 130 kW Leistung ausgegangen werden muss (z.B. [BAFU 2008], [JRC 2008]). Eine genaue Differenzierung liegt hierzu vom KBA nicht vor. Als erste Abschätzung wird ein ab 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 bleibt dieser Anteil dann konstant, da die weitere Entwicklung noch nicht abzusehen ist. Für diese Maschinen wird eine durchschnittliche Leistung von 150 kW angenommen.

Die Anzahl der Zugmaschinen ist in Abb. 1 dargestellt. Bis 2005 liegt der Bestand auf Grund der Korrektur um die vorübergehend stillgelegten Fahrzeuge etwas niedriger als bisher. Im Szenario fällt der Rückgang des gesamten Bestandes dagegen deutlich schwächer aus als bisher. Dies ist auf die deutlich höher angenommene Anzahl von Neuzulassungen zurückzuführen. In der zeitlichen Entwicklung kommt es - wie bisher - zu einer Verschiebung des Bestandes hin zu größeren kW-Klassen (siehe Abb. 2). Der Bestand der mit über 129 kW angenommenen Zugmaschinen steigt dabei bis 2020 auf gut 2% des gesamten Bestandes. Die kleinen Zugmaschinen mit einer Leistung von weniger als 18 kW gehen nur langsam zurück. Hier sind noch sehr viele alte Zugmaschinen im Bestand, die wahrscheinlich nur noch selten benutzt werden. Dies ist über die altersabhängige Nutzungsdauer in TREMOD-MM berücksichtigt.

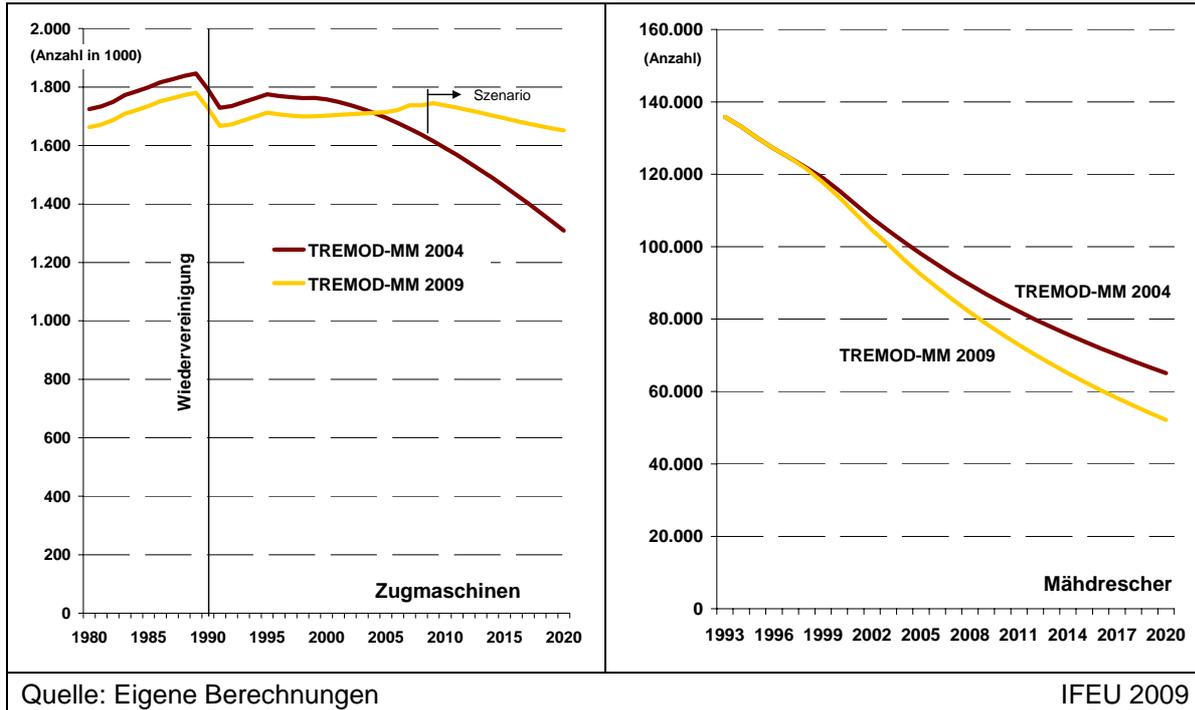


Abb. 1: Bestand 1980 - 2020 Zugmaschinen (links) und Mähdrescher (rechts)

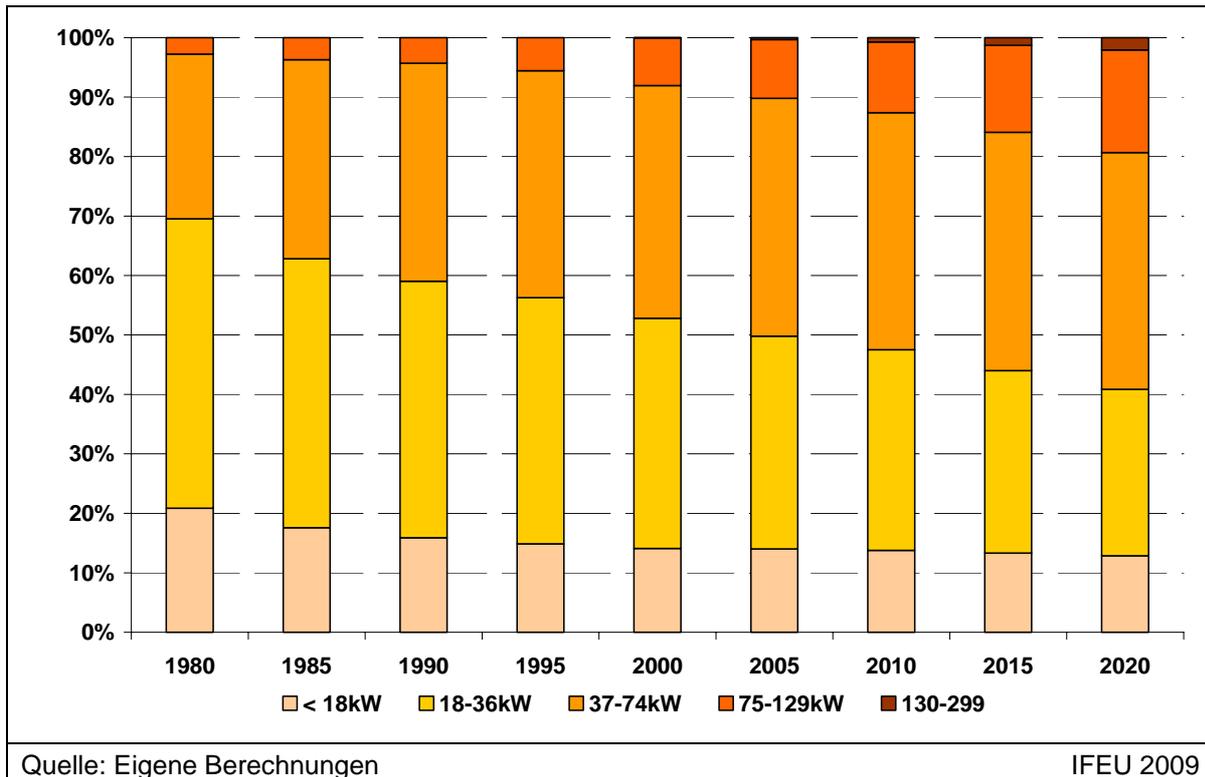


Abb. 2: Anteile der Leistungsklassen am Bestand der Zugmaschinen 1980 - 2020

Schwierigkeiten ergeben sich nach neuen Informationen bei der Zuordnung der Neuzulassungen zu bestimmten Emissionsstandards. Diese wurde bisher ([IFEU 2004]) auf Basis der jeweils gültigen Grenzwerte vorgenommen. Nach [Heseding 2008] gibt es jedoch verschiedene Ausnahmeregelungen, die insbesondere ab Stufe III A dazu führen, dass

einige Motoren (so genannte Lagermotoren<sup>2</sup>) in der Praxis erst später als in der Richtlinie gefordert, den Grenzwerten genügen.

Wie sich diese Ausnahmeregelung in Deutschland auswirkt, kann auf Basis der Neuzulassungszahlen des KBA ([KBA 2008]) nur unzureichend abgeschätzt werden. Nach den Daten des KBA sind 2007 noch etwa 2.500 Stufe II-Zugmaschinen der Leistungsklasse 18-36 kW und 75-90 kW, die zu diesem Zeitpunkt bereits den III A Grenzwert erfüllen sollten, in Verkehr gebracht worden. Überdies gibt es zu 23 % der Neuzulassungen 2007 keinen Eintrag oder den Eintrag „nicht bekannt“. Inwieweit diese ebenfalls den Grenzwertanforderungen der Stufe III A nicht genügen, konnte nicht abschließend geklärt werden.

Um das Phänomen der Lagermotoren dennoch zu berücksichtigen, gehen wir in einer ersten Abschätzung davon aus, dass ab Stufe III A im ersten Jahr der Grenzwertgültigkeit nur 50 %, im zweiten Jahr 80 % und erst im dritten Jahr 100 % der Neuzulassungen den Grenzwertanforderungen genügen. Der Anteil an Motoren die bereits strengere Anforderungen als notwendig erfüllen, kann nach den vorliegenden Daten vernachlässigt werden.

### **Mähdrescher**

Die Statistik zum Bestand an Mähdreschern wurde vom Statistischen Bundesamt 1994 eingestellt. Von der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung ([BLE 2008]) wurden jedoch Daten zum Inlandsabsatz von Mähdreschern zur Verfügung gestellt. Der Inlandsabsatz war dabei ab 2000 etwas geringer als für die Berechnungen in [IFEU 2004] angenommen. Eine Neuberechnung der Entwicklung des Mähdrescher-Bestands nach der in [IFEU 2004] beschriebenen Methodik (siehe Abb. 1), zeigt daher auch einen etwas stärkeren Rückgang des Mähdrescher-Bestands von etwas über 80.000 Mähdreschern heute (2008) auf gut 50.000 Mähdrescher 2020.

Der Bestand an aktiv genutzten Mähdreschern wird vom VDMA ([VDMA 2008]) auf etwa 40.000 Mähdreschern eingeschätzt. Hierbei ist aber nicht die gesamte Anzahl der zumindest sporadisch genutzten Mähdreschern enthalten, die auch in TREMOD-MM berücksichtigt werden sollte. Dem Phänomen, dass einige Maschinen nur selten genutzt werden, wird - wie bei den Zugmaschinen - über die altersabhängige Nutzungsdauer Rechnung getragen. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass es sich bei selten genutzten Maschinen überwiegend um alte, für den täglichen Einsatz ausrangierte Bestände handelt. Genaue Daten dazu liegen uns nicht vor.

---

<sup>2</sup> „Aufgrund dieser Ausnahmeregelung dürfen Motoren, die der vorangegangenen Abgasstufe entsprechen, noch für weitere zwei Jahre nach Einführung einer neuen Abgasstufe auf den Markt gebracht werden, wenn sie vor dem Einführungsstermin der neuen Stufe gebaut wurden“ ([Heseding 2008])

### 3.1.2 Nutzungsdaten

Während für den Bestand an Zugmaschinen sehr gute, auch nach Motorleistung differenzierte Daten vorliegen, sind die Informationen bezüglich der Nutzung der Zugmaschinen deutlich unsicherer. Dies betrifft sowohl die Lastfaktoren als auch die Nutzungsstunden.

#### a) Lastfaktoren

Zu Lastfaktoren liegen nur wenige Daten vor, da die tatsächliche Motornutzung in der Praxis für verschiedene Einsatzgebiete sehr unterschiedlich ist und Messungen entsprechend aufwendig sind. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** gibt einen Überblick über Lastfaktoren für landwirtschaftliche Maschinen. Da sich die bisher in TREMOD-MM implementierten Lastfaktoren an den Daten des BUWAL für die Schweiz orientiert haben, sollen jetzt auch die aktualisierten Daten vom schweizerischen Bundesamt für Umwelt ([BAFU 2008]) verwendet werden. Damit liegt der Lastfaktor für Zugmaschinen ein wenig höher und für Mähdrescher etwas niedriger als bisher in TREMOD-MM angenommen. Die Werte des [EPA 2004b] liegen in beiden Fällen deutlich höher, werden jedoch nicht verwendet, da sich die US-amerikanische Landwirtschaft sowohl in ihrer wirtschaftlichen Struktur als auch in ihrer klimatischen Bandbreite von der mitteleuropäischen deutlich unterscheidet. Insbesondere bei den immer leistungsstärker werdenden Zugmaschinen ist ein derartig hoher Lastfaktor überdies unplausibel.

**Tab. 2: Lastfaktoren für landwirtschaftliche Maschinen**

Kategorie	IFEU 2004	BAFU 2008	EPA 2004	IFEU 2009
Zugmaschinen	0,25	0,3	0,59	0,3
Mähdrescher	0,5	0,4	0,59	0,4
Quellen: [IFEU 2004], [BAFU 2008] und [EPA 2004b]				IFEU 2009

#### b) Nutzungsstunden

Die in TREMOD-MM für Zugmaschinen verwendeten Nutzungsstunden wurden in [IFEU 2004] in einem aufwendigen Verfahren durch Auswertung von Gebrauchtbörsen ermittelt. Dabei erfolgte auch eine Differenzierung nach kW-Klassen, bei der leistungsstarke Maschinen deutlich mehr genutzt werden als Maschinen mit geringer Motorisierung. Diese Annahme ist für die vielen kleineren und älteren Zugmaschinen (< 37 kW), die überwiegend als Aushilfe oder Nebentraktor oder nur in der privaten Landwirtschaft verwendet werden, durchaus plausibel. Bei den neueren und größeren Zugmaschinen (> 37 kW), die die Hauptarbeit in der Fläche verrichten, sollten die gesamten Betriebsstunden jedoch auch vor dem Hintergrund der Entwicklung der landwirtschaftlichen Nutzfläche plausibel sein.

Die landwirtschaftliche Nutzfläche lag in den letzten Jahren nahezu unverändert bei 17 Millionen Hektar ([Destatis 2009]) und wird sich wahrscheinlich bis 2020 nur geringfügig ändern. Da sich auch die Arbeitsprozesse in der Landwirtschaft nur graduell geändert haben, sollten sich auch die gesamten Betriebsstunden der Zugmaschinen bis 2020 kaum ändern. Aufgrund der Verschiebung hin zu immer größeren Leistungsklassen, würde es bei Berücksichtigung deutlich höherer Nutzungsstunden für die großen Zugmaschinen, zu einem deutlichen Anstieg der gesamten Betriebsstunden kommen. Dass dem nicht so ist, zeigt auch die Gasölabrechnung für die Landwirtschaft, die seit 1990 einen weitgehend konstanten Dieserverbrauch der Landwirtschaft zeigt (siehe Kapitel 5.3).

Für die Zugmaschinen mit einer Motorleistung > 37 kW sollen daher die gleichen Betriebsstunden verwendet werden. Das bestandsgewichtete Mittel der Nutzungsstunden für diese Maschinen liegt bei knapp 300 Stunden pro Jahr. Auswertung aus Gebrauchtbörsen der FAT ([Lips & Gazzarin 2005]) haben einen ähnlichen Wert von 307 Stunden pro Jahr ergeben. Daher werden in TREMOD-MM zukünftig 300 Stunden pro Jahr als Basisnutzungsstunden für alle Zugmaschinen > 37 kW verwendet. Die spezifischen Basisarbeitsstunden liegen damit bei etwa 13 Stunden pro Hektar landwirtschaftliche Nutzfläche.

Dabei ist der Maschinenaufwand pro Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche nach Nutzungsart sehr unterschiedlich. Nach [Borken et al. 1999] liegt der maschinelle Zeitaufwand pro Hektar und Jahr z.B. für Weizen bei knapp 4 Stunden, für Zuckerrüben bei gut 6 Stunden und für Kartoffeln bei über 12 Stunden. Berücksichtigt man, dass die tatsächlich im Modell berücksichtigten Betriebsstunden durch altersabhängige Korrektur etwas niedriger liegen als die Basisnutzungsstunden und Zugmaschinen auch noch für andere Arbeiten als die Feldarbeit, z.B. in der Tierhaltung eingesetzt werden, sind die spezifischen Arbeitsstunden durchaus plausibel.

Da die Entwicklung der landwirtschaftlichen Nutzfläche als weitgehend konstant angenommen wird, werden überdies ab 1995 die Gesamtnutzungsstunden der großen Maschinen ab 37 kW konstant gehalten. Damit sinken die spezifischen Basisnutzungsstunden der Maschinen > 37 kW bis 2020 auf 76 % ab. Dies ist durchaus plausibel, da die zunehmend leistungsstärker werdenden Zugmaschinen für die gleiche Arbeit wahrscheinlich weniger Arbeitszeit benötigen, da sie z.B. breitere Geräte ziehen können.

**Tab. 3: Nutzungsstunden für landwirtschaftliche Maschinen**

Kategorie	IFEU 2004	BAFU 2008	FAT 2005	EPA 2004	IFEU 2009
Zugmaschinen	100-430*	195	307	475	100-300*
Mähdrescher	150	100	-	150	150
* Abhängig von der Leistungsklasse					
Quellen: [IFEU 2004], [BAFU 2008] und [EPA 2004b]					IFEU 2009

## 3.2 Bauwirtschaft

### 3.2.1 Bestandsdaten

Bis 1994 wurden die Bestände an Maschinen im Baugewerbe vom Statistischen Jahrbuch erfasst. Die Statistik wurde danach eingestellt, so dass keine neuen Erkenntnisse über den Bestand an Baumaschinen vorliegen. Nachfragen bei verschiedenen Verbänden und Ministerien haben bestätigt, dass nach 1994 keine weitere Erhebung des Maschinenbestands in der Bauwirtschaft durchgeführt wurde ([BMVBS 2008a], [ZdB 2008], [HDB 2008]). Die Bestandsdaten bleiben daher unverändert, die dadurch entstehenden Unsicherheiten sollen durch eine Kopplung der Nutzungsdauer an das Bauvolumen zumindest teilweise ausgeglichen werden.

Eine aktuelle Abschätzung zum Bestand an Baumaschinen auf Basis von Verkaufszahlen liegt von [JRC 2008] für die EU-15 vor. Es erfolgt dabei jedoch nur eine Differenzierung der Geräte- und Maschinenbestände nach Leistungsklassen. Der gesamte Maschinenbestand in der Bauwirtschaft in Deutschland kann nach [JRC 2008] auf Basis der Bevölkerungszahl für 2005 auf etwa 631.000 abgeschätzt werden. Derzeit sind in TREMOD-MM für 2005 dagegen etwa 800.000 Maschinen im Bereich der Bauwirtschaft berücksichtigt. Die Werte liegen zwar in einer ähnlichen Größenordnung, weisen aber trotzdem eine deutliche Abweichung auf. Diese könnte evtl. durch den in [IFEU 2004] nicht bei den Beständen berücksichtigten, deutlichen Rückgang der Bautätigkeit zwischen 2000 und 2005 erklärt werden. Eine genaue Ableitung einer Entwicklung der Baumaschinenbestände auf Basis der Bautätigkeit ist jedoch problematisch. Daher soll die Bautätigkeit - wie bisher - bei den Nutzungsstunden berücksichtigt werden.

### 3.2.2 Nutzungsdaten

Tab. 4 gibt einen Überblick über Daten zur Nutzung von Maschinen in der Bauwirtschaft. Die bisher in TREMOD-MM implementierten Lastfaktoren wurden in Anlehnung an Daten für die Schweiz vom BUWAL abgeleitet. Diese Daten wurden jetzt vom schweizerischen Bundesamt für Umwelt (BAFU) aktualisiert ([BAFU 2008]) und werden daher auch TREMOD-MM zu Grunde gelegt. Die Lastfaktoren der US-EPA weichen teilweise deutlich davon ab. Die Situation in USA wird jedoch aufgrund unterschiedlicher wirtschaftlicher Geschäftsmodelle als schlechter übertragbar auf Deutschland angesehen. Alle geänderten Daten sind gelb unterlegt.

**Tab. 4: Lastfaktoren für Maschinen in der Bauwirtschaft**

Kategorie	IFEU 2004	BAFU 2008	EPA 2004	IFEU 2009
Fertiger (Schwarzdecke)	0,5	0,2	0,59	0,2
Fertiger und Verteiler (Betonstraße)	0,5			0,2
Rambären aller Art	0,5	0,2		0,2
Verdichtungsmaschinen	0,5	0,2	0,43	0,2
Universalsbagger	0,5	0,48	0,49	0,5
Betonmischer	0,5		0,43	0,5
Turmdrehkrane	0,5			0,5
Mobi-/Autokrane	0,5	0,48	0,43	0,5
Grader, Straßenhobel	0,5	0,48	0,59	0,5
Planiertraupen	0,5	0,48	0,59	0,5
Lader	0,5	0,48	0,21	0,5
Vorderkipper/ Dumper	0,5	0,48	0,21	0,5
Stapler	0,25	0,2	0,59	0,2
Betonpumpen aller Art	0,5	0,2	0,43	0,2
Kompressoren aller Art	0,5		0,43	
Quellen: [IFEU 2004], [BAFU 2008] und [EPA 2004b]				IFEU 2009

Tab. 5 gibt einen Überblick über Daten zur jährlichen Nutzungsdauer von Baumaschinen. Die Angaben der EPA für die USA liegen in der Regel deutlich über den Angaben des BAFU für die Schweiz und auch den bisherigen IFEU-Daten. Ein Grund hierfür könnte die aufgrund unterschiedlicher Klimate (z.B. in Kalifornien) teilweise ganzjährige Bausaison sein. Die Nutzungsstunden für die Schweiz nach [BAFU 2008] werden für die Situation in Deutschland als repräsentativer angesehen und liegen deutlich näher an den bisherigen IFEU-Werten. Diese wurden in [IFEU 2004] in einem aufwendigen Verfahren durch Auswertung von Gebrauchtbörsen ermittelt und sollen daher weitgehend beibehalten werden.

Weichen allerdings sowohl der Wert der EPA als auch der Wert des BAFU in eine Richtung von [IFEU 2004] ab, erfolgt eine Anpassung (teilweise unter Rundung) an die Daten des BAFU. Bei Betonmischern liegt die Angabe der EPA - im Gegensatz zu allen anderen EPA-Werten - deutlich unter dem Wert des IFEU. Zudem erscheint es unplausibel, dass in Deutschland Betonmischer ganzjährig (also ca. 250 Arbeitstage) täglich über 2 Stunden genutzt werden. Da keine Angabe für die Schweiz vorliegt, wird hier der EPA-Wert übernommen. Alle geänderten Daten sind gelb unterlegt.

**Tab. 5: Jährliche Nutzungsstunden für Maschinen in der Bauwirtschaft**

Kategorie	IFEU 2004	BAFU 2008	EPA 2004	IFEU 2009
Fertiger (Schwarzdecke)	300	300	821	300
Fertiger und Verteiler (Betonstraße)	300			300
Rambären aller Art	300	300		300
Verdichtungsmaschinen	250	350	484	350
Universalbagger	600	649	1092	650
Betonmischer	600		275	275
Turmdrehkrane	500			500
Mobil-/Autokrane	500	308	990	500
Grader, Straßenhobel	650	700	962	700
Planierraupen	650	350	899	650
Lader	500	506	1135	500
Vorderkipper/ Dumper	400	500	566	500
Stapler	1.200	720	1.700	1.200
Betonpumpen aller Art	100	146	403	150
Kompressoren aller Art	200	200		200
Quellen: [IFEU 2004], [BAFU 2008] und [EPA 2004b]				IFEU 2009

Einen wichtigen Hinweis auf die Entwicklung der Arbeitsleistung und damit auch der Emissionen in der Bauwirtschaft gibt die Bautätigkeit. In den aktualisierten Daten zeigt sich gegenüber den bisherigen Annahmen ein deutlich stärkerer Rückgang der Bautätigkeit in den letzten Jahren (siehe Abb. 3). Dieser sollte sich auch in den Emissionen der Bauwirtschaft widerspiegeln. Um dies zu erreichen, werden die gesamten Nutzungsstunden (Summe über den gesamten Maschinenbestand) an den Bauindex gekoppelt. Das Bezugsjahr für die Basisnutzungsstunden wird dabei von bisher 1995 auf 2000 verschoben, da 1995 ein Jahr besonders hoher Bautätigkeit im Nachgang der Wiedervereinigung war. 2000 war dagegen ein Jahr mittlerer Bautätigkeit und ist in auch Bezugsjahr in vielen Quellen zur Nutzungsdauer.

Die weitere Entwicklung der Bautätigkeit kann kaum zuverlässig vorhergesagt werden. Aufgrund der aktuellen wirtschaftlichen Lage ist in den nächsten Jahren auf jeden Fall nicht mit einem deutlichen Anstieg der Bautätigkeit zu rechnen. Daher wird das Bauvolumen konstant fortgeschrieben. Der resultierende Korrekturfaktor ist ebenfalls in Abb. 3 dargestellt. Die gesamten jährlichen Maschinenstunden in der Bauwirtschaft liegen damit bis 2020 bei etwa 375 Millionen. Die mittlere spezifische jährliche Nutzungsdauer der Maschinen liegt bei knapp 460 Stunden pro Jahr und damit unter 2 Stunden pro Arbeitstag.

Die Kopplung der Nutzungsstunden an das Bauvolumen trägt auch dazu bei, dass Unsicherheiten die aus den ab 1994 fehlenden Informationen zu Bestandsdaten entstehen, im Gesamtergebnis teilweise ausgeglichen werden. In der Realität ist zwar davon auszugehen, dass eine Änderung der Bautätigkeit sich sowohl in einer Änderung der Nutzungsdauer als auch des Bestandes niederschlägt. Bei den Bestandszahlen ist der Zusammenhang mit der Bautätigkeit aber wahrscheinlich zeitlich weniger eng verbunden. Die Kopplung über die Nutzungsdauer erscheint damit für das Gesamtergebnis folgerichtiger.

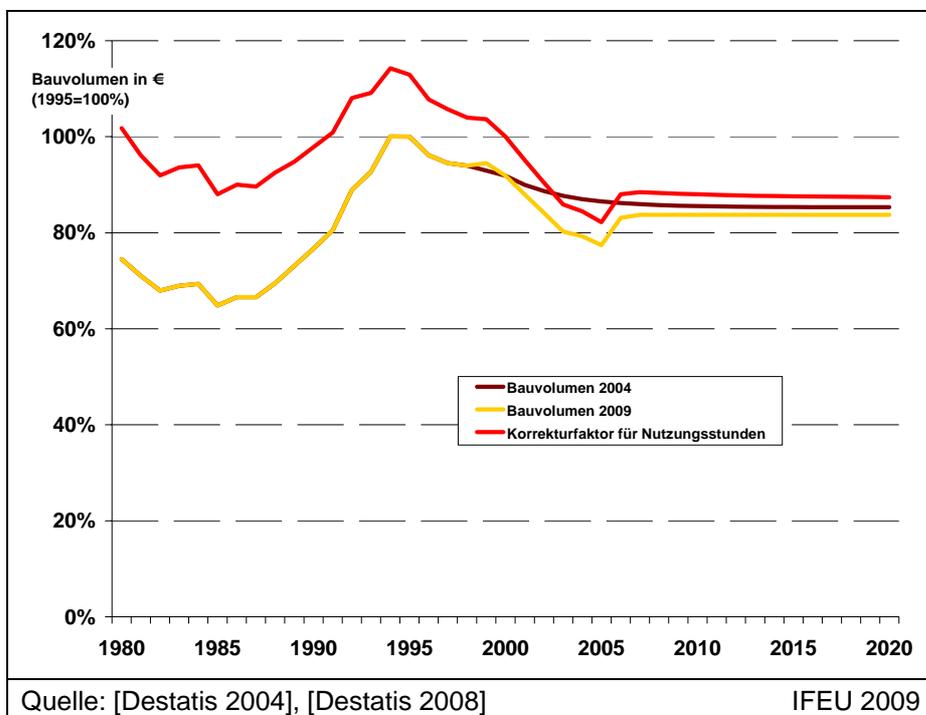


Abb. 3: Entwicklung des Bauvolumens in Deutschland

### 3.3 Forstwirtschaft

#### 3.3.1 Bestandsdaten

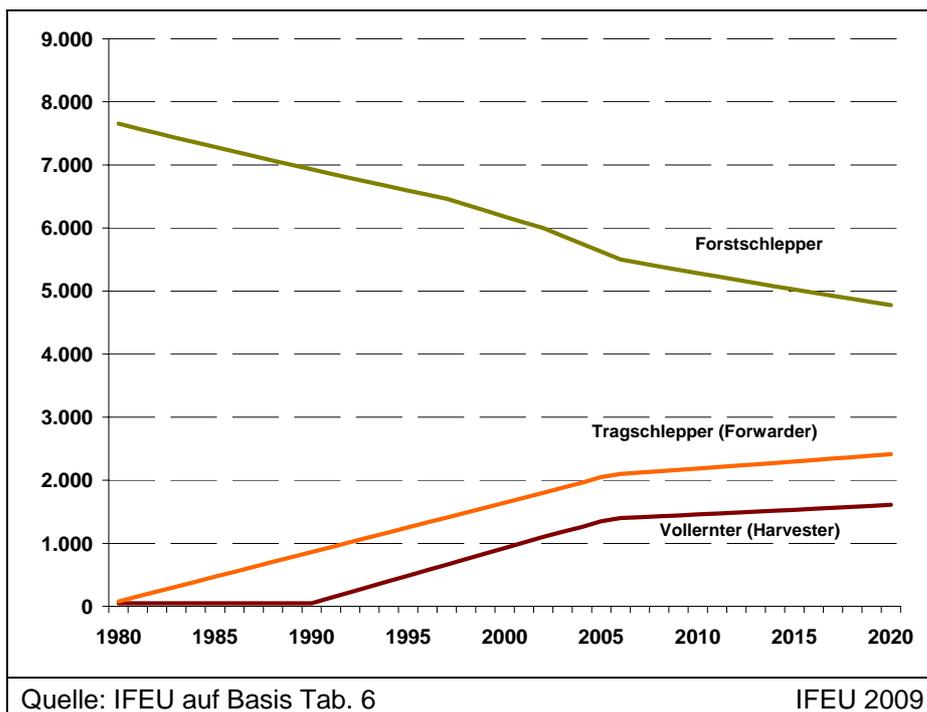
Das Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik (KWF) e.V. führt im Rahmen einer Maschinenstatistik auch Abschätzungen des Bestands auf Basis von Verkaufszahlen durch. Die bisherigen Bestandsdaten in TREMOD-MM basieren auf diesen Zahlen und sollen jetzt aktualisiert werden. Die bisher im Bereich Forstwirtschaft aufgeführten Fortschlepper sind nach aktueller Auskunft des KWF ([KWF 2008]) entgegen der bisherigen Annahme größtenteils auch in der KBA-Statistik unter Zugmaschinen erfasst, da es sich dabei häufig um umgerüstete Ackerschlepper handelt. Die im Bereich Forstwirtschaft berücksichtigten Maschinen werden daher im Bereich der Landwirtschaft herausgerechnet, damit eine Zuordnung der Emissionen zu den verschiedenen Sektoren möglich ist.

Während der Bestand an Forwardern und Harvester seit 2002 deutlich gestiegen ist ([FTI 2007]), sind die Bestände an Forstschleppern und Entrindungsanlagen rückläufig. Da nach Auskunft des KWF nach wie vor viele Waldarbeiterstellen zugunsten mechanisierter Verfahren abgebaut werden, ist auch der Bestand an Motorsägen seit 2002 um ca. 10 % zurückgegangen. Die Anhand der Angaben des KWF ([KWF 2003]. [KWF 2008]) abgeschätzte Entwicklung der Bestände ist in Tab. 6 zusammengefasst. Im Zeitraum 2002 bis 2006 werden die Bestände interpoliert, ab 2006 erfolgt eine abgeschwächte Fortschreibung des bisherigen Trends (1 % Zu-/Abnahme pro Jahr<sup>3</sup>). Bei Forstschleppern wird auch für die Jahre vor 2002 ein Rückgang des Bestandes unterstellt. Der Aufbau der Bestände an Harvester und Forwardern wurde bereits in [IFEU 2004] abgeleitet und wird beibehalten. Damit ergibt sich eine Bestandsentwicklung wie Abb. 4 dargestellt.

**Tab. 6: Bestand an Geräten und Maschinen in der Forstwirtschaft**

Maschine	Bestand 2002/2003	Bestand 2006/2007
Forstschlepper	6.000*	5.500 **
Tragschlepper (Forwarder)	1.800**	2.100***
Vollernter (Harvester)	1.100**	1.400***
Entrindungsanlagen	70*	50**
Motorsägen	40.000*	36.000**
Quelle: * [KWF 2003]; ** [KWF 2008]; *** [FTI 2007]		IFEU 2009

<sup>3</sup> Bei Entrindungsanlagen wird von 1980 bis 2006 von einem gleichmäßigen Rückgang von 5 Anlagen pro Jahr ausgegangen. Der Bestand reduziert sich damit von 180 Anlagen 1980 auf 50 Anlagen 2006. Anschließend wird ein weiterer Rückgang um zwei Anlagen pro Jahr unterstellt.



**Abb. 4: Bestandentwicklung großer Maschinen in der Forstwirtschaft**

Neue Erkenntnisse ([FTI 2006]) machen überdies eine Anpassung der Motorleistung erforderlich:

- „So lässt sich feststellen, dass die Tragschlepper, wie auch in den vergangenen Jahren, mit immer stärkeren Motoren ausgestattet werden. Immerhin hat inzwischen jeder dritte ausgelieferte Forwarder mehr als 130 kW unter der Haube.“
- „Bei Harvestern hingegen stagniert der Anteil der Maschinen mit großen Motoren bereits seit drei Jahren, während kleinere Motoren unter 140 kW deutliche Zuwächse verzeichneten.“

Da nach kW-Klassen differenzierte Verkaufszahlen nur für den Zeitraum 2002-2007 vorliegen, können die Anteile der Maschinen an den Leistungsklassen im Bestand nur geschätzt werden. Eine solche Schätzung wird trotz der damit verbundenen Unsicherheit den aktuellen Trends der Realität wahrscheinlich eher Rechnung tragen, als die bisherigen Annahmen hinsichtlich einer konstanten Leistung. Die IFEU Abschätzung dazu ist in Tab. 7 aufgeführt.

**Tab. 7: Differenzierung der Forwarder und Vollernter nach Motorleistung**

	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.
2020	65 %	35 %	90 %	10 %
Quelle: IFEU auf Basis von Angaben in [FTI 2006]				IFEU 2009

### 3.3.2 Nutzungsdaten

Vom [BAFU 2008] wird für Forstschlepper – wie für Zugmaschinen in der Landwirtschaft – ein Lastfaktor von 0,3 verwendet. Dieser wird anstelle des bisher genutzten Lastfaktors 0,5 übernommen, da es sich bei den Forstschleppern nach Auskunft des KWF ([KWF 2008]) größtenteils um umgerüstete Ackerschlepper handelt.

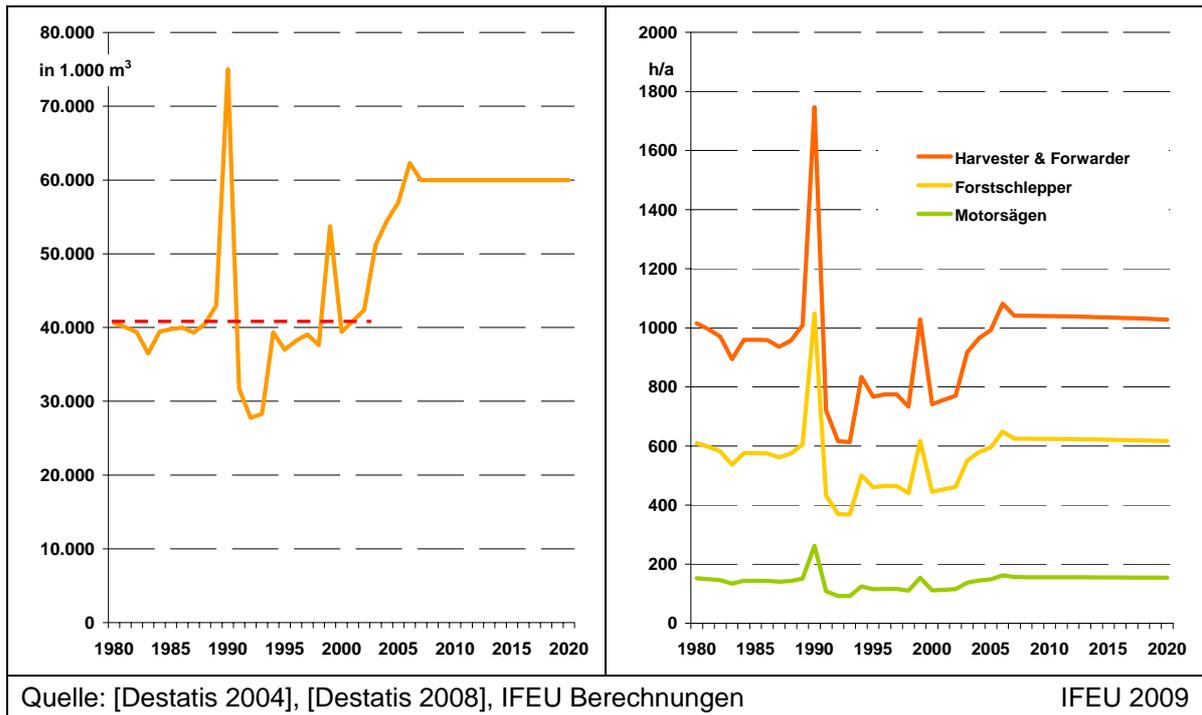
Tab. 8 gibt einen Überblick über Daten zur jährlichen Nutzung von Forstmaschinen. Der Vergleich zeigt, dass die in [IFEU 2004] verwendeten Nutzungsstunden für Motorsägen sehr hoch angesetzt sind. Hier werden daher die Daten des BAFU für die bisher durchschnittlich jährlich anfallende Waldarbeit übernommen. Bei den im Bestand rückläufigen Forstschleppern erscheint es ebenfalls plausibel, dass diese weniger eingesetzt werden, als die an Bedeutung zunehmenden, speziell für die Waldarbeit konzipierten Forwarder und Harvester. Daher wird auch hier der Wert des BAFU übernommen. Geänderte Daten sind gelb unterlegt.

**Tab. 8: Nutzungsstunden für Maschinen in der Forstwirtschaft**

Kategorie	IFEU 2004	BAFU 2008	EPA 2004	IFEU 2009
Motorsägen	400	150	303	150
Forstschlepper	1.000	577	1.276	600
Tragschlepper (Forwarder)	1.000	988		1.000
Vollernter (Harvester)	1.000	1.050		1.000
Quellen: [IFEU 2004], [BAFU 2008] und [EPA 2004b]				IFEU 2009

Die in Tab. 8 aufgeführten Daten werden für die bisher durchschnittlich jährlich anfallende Waldarbeit als Basisnutzungsdauern angenommen. Zusätzlich erfolgt eine Korrelation mit dem Holzeinschlag. Die bis 2006 aktualisierten Daten ([Destatis 2008]; [Destatis 2004]) zum Holzeinschlag (siehe Abb. 5) zeigen bis 2002 Schwankungen des Holzeinschlags um einen Mittelwert von etwa 40 Mio. m<sup>3</sup>, anschließend jedoch einen allgemeinen Anstieg des Holzeinschlags. Nach Auskunft des KWF ([KWF 2008]) ist dieser Anstieg auf einen Ausbau der Kapazitäten, u. a. im Zusammenhang mit dem Bioenergieboom, zurückzuführen. Der bisherige Mittelwert von 40 Millionen m<sup>3</sup> wird daher als Bezugsgröße für die Basisnutzung der Maschinen verwendet.

Da die aktualisierten Bestandsdaten eine leichte Zunahme des Gesamtbestandes großer Dieselmotoren aufweisen, werden die Nutzungsstunden für den gesamten Bestand dieser Maschinen an den Holzeinschlag gekoppelt. Der sich ergebende Korrekturfaktor wird auch für Motorsägen verwendet, da deren Einsatz wahrscheinlich proportional zum Einsatz der großen Maschinen ist. Der Holzeinschlag und die damit korrigierten Nutzungsstunden entwickeln sich damit wie in Abb. 5. Trotz stark ansteigendem Holzeinschlag kommt es bei den großen Dieselmotoren ab 2000 nur zu einem geringfügigen Anstieg der Nutzungsdauer gegenüber den Basisannahmen. Die wachsenden Bestände können also den Zuwachs der Arbeitsleistung weitgehend ausgleichen.



**Abb. 5: Holzschlag (links) und damit korrelierte Nutzungsstunden (rechts)**

## 3.4 Haushalt und Garten (Grünpflege)

### 3.4.1 Bestandsdaten

Der Gerätebestand in der Grünpflege wird in [JRC 2008] auf Basis von Verkaufszahlen für die EU-15 abgeschätzt. Zu Vergleichszwecken wird dieser Bestand durch den Bevölkerungsanteil Deutschlands an der EU-15 geteilt. Die sich daraus für Deutschland ergebende Abschätzung weicht nur geringfügig von den für 2005 implementierten Bestandsdaten in TREMOD-MM ab (siehe Tab. 9). Dies liegt sicherlich daran, dass die Bestandsermittlung in beiden Fällen auf den Verkaufszahlen für die Geräte beruht. Auch die angegebene mittlere Leistung der Geräte ist identisch; die Zuordnung zu einer Leistungsklasse weicht nur in zwei Fällen ab (siehe Tab. 10). Um mit der in [IFEU 2004] festgelegten Zuordnung konsistent zu bleiben, wird hier die bisherige Leistungsklasse beibehalten.

**Tab. 9: Abschätzung des Gerätebestandes mit Verbrennungsmotor in der Grünpflege**

	TREMOD-MM	JRC 2008*
Rasenmäher privat	5.000.000	5.037.026
Rasenmäher profi	9.000	8.889
Aufsitzmäher privat	580.000	572.838
Aufsitzmäher profi	107.740	108.642
Trimmer/ Freischneider privat	1.139.289	1.185.183
Trimmer/Freischneider profi	54.252	39.506
Motorsägen privat	1.800.000	1.777.774
Motorsägen professionell	72.500	98.765
Sonstige Ausrüstung privat	694.651	691.357
Sonstige Ausrüstung profi	33.345	29.630
Quelle: [IFEU 2004] und IFEU Abschätzung auf Basis von [JRC 2008]		IFEU 2008

Für das Emissionsverhalten der Maschinen ist auch der Anteil an 2- und 4-Takt-Motoren am Bestand von Bedeutung. Die in [JRC 2008] diesbezüglich vorliegenden Informationen zeigen im Gegensatz zu den bisherigen Annahmen, dass bei Trimmern und Freischneidern sowie sonstigen Gartengeräten ab 2005 auch relevante Anteile an 4-Takt-Motoren verkauft werden. Dies soll daher unter folgenden Annahmen in TREMOD-MM berücksichtigt werden:

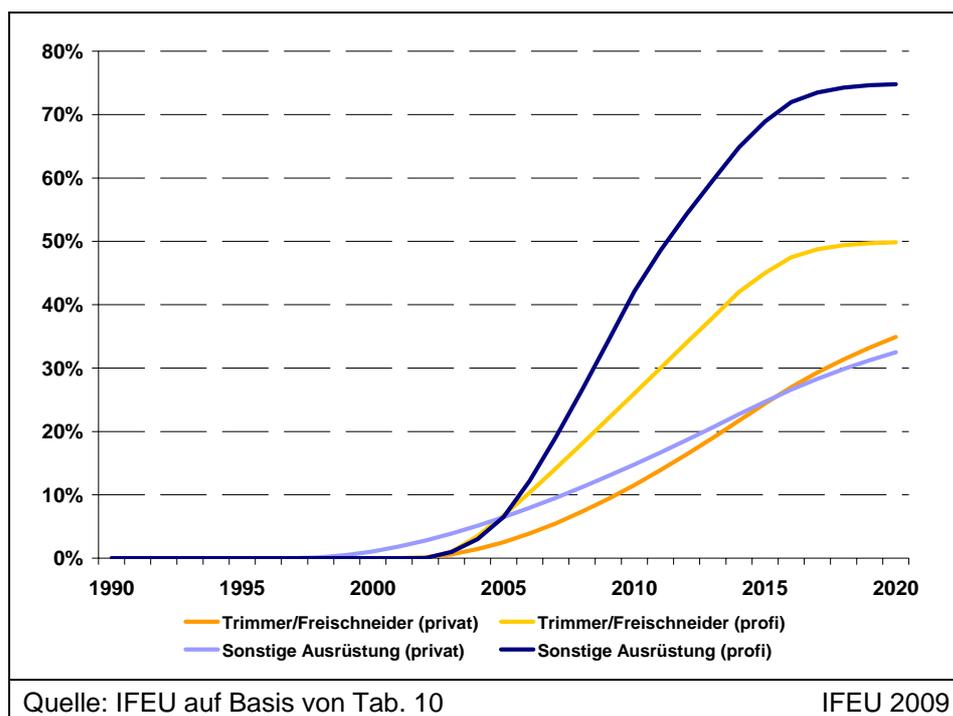
- Der Anteil an 4-Takt-Motoren nimmt in Deutschland im gleichen Maße zu, wie auf dem europäischen Markt.
- Die Entwicklung der Neuzugänge zwischen 2005 und 2010 nach [JRC 2008] wird bis 2015 fortgeschrieben. Bei professionell genutzter sonstiger Ausrüstung erfolgt aufgrund des sehr starken Anstiegs zwischen 2005 und 2010 dabei jedoch eine etwas abgeschwächte Fortschreibung.
- Der 2015 erreichte Anteil an 4-Takt-Motoren an den Neuzugängen wird dann bis 2020 als konstant angenommen.
- Vor 2005 wird eine Rückschreibung des Trends bis auf 0 % 4-Takt-Motoren angenommen.

- Zur Überschlagsmäßigen Berechnung des Bestandes wird gemäß den in [IFEU 2004] abgeleiteten Zahlen von einer mittleren Lebensdauer der privat genutzten Geräte von 8 Jahren und der professionell genutzten Geräte von 2 Jahren ausgegangen.

Damit stellt sich der Anteil an 4-Takt-Motoren am Bestand handgehaltener Geräte der Grünpflege wie in Abb. 6 dar. Trotz zahlreicher unsicherer Annahmen bei der Bestandsberechnung, wird die Berücksichtigung des Anteils der 4-Takt-Motoren für die Emissionsberechnung als besonders wichtig und damit sinnvoll erachtet. Die zugrunde liegende Verkaufszahlen können dabei als zuverlässige Grundlage bewertet werden.

**Tab. 10: Geräte mit Verbrennungsmotor im Bereich Grünpflege**

Kategorie	Klasse	kW	2-Takt 2005	2-Takt 2010
Rasenmäher privat	SN 3	2,5	< 20 % (5 %)	0 % (0 %)
Rasenmäher profi	SN 3	3,5	< 20 % (0 %)	0 % (0 %)
Aufsitzmäher privat	SN 4	10	0 % (0 %)	
Aufsitzmäher profi (Sport und Freizeit)	SN 4	10		
Aufsitzmäher profi (öffentl. Grünfläche)	SN 4	10		
Aufsitzmäher profi (betrieblich)	SN 4	10		
Trimmer/ Freischneider privat	SH 2	1	80 % (100 %)	50 % (100 %)
Trimmer/ Freischneider profi	SH 3 (SH 2)	1,5	90 % (100 %)	70 % (100 %)
Motorsägen privat	SH 2	1,8	100 % (100 %)	
Motorsägen profi	SH 3	3	100 % (100 %)	
Sonstige Ausrüstung privat	SH 2	1	70 % (100 %)	50 % (100 %)
Sonstige Ausrüstung profi	SH 3 (SH 2)	1,5	90 % (100 %)	50 % (100 %)
Quelle: [JRC 2008], Werte in () sind derzeit in TREMOD-MM implementiert				IFEU 2008



**Abb. 6: Anteil Viertaktmotoren am Bestand handgehaltener Gartengeräte (ohne Motorsägen)**

### 3.4.2 Nutzungsdaten

Die in [JRC 2008] verwendeten Lastfaktoren sind identisch mit den derzeit von TREMOD-MM verwendeten Daten. Gegenüber [BAFU 2008] gibt es nur geringe Abweichungen. Die Lastfaktoren werden daher beibehalten.

Bei den Nutzungsstunden gibt es dagegen zum Teil deutliche Unterschiede (siehe Tab. 11). Dies betrifft insbesondere die professionell genutzten Rasenmäher und auch die Motorsägen. Für diese liegen die bisherigen IFEU-Werte deutlich über denen von BAFU und JRC verwendeten Daten. Da viele Gartengeräte in Mitteleuropa nur saisonal eingesetzt werden, erscheint es plausibel, dass professionell genutzte Rasenmäher und Motorsägen in der Grünpflege durchschnittlich weniger benutzt werden, als bisher angenommen. Auch bei den übrigen Geräten bestehen in den bisher genutzten Daten noch erhebliche Unsicherheiten.

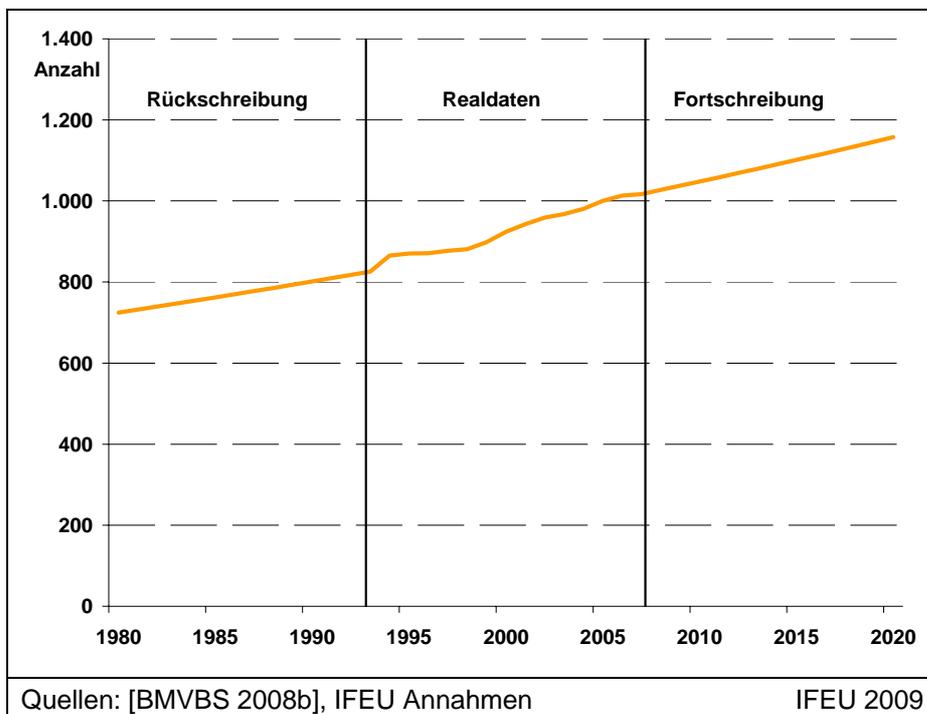
Als Nutzungsstunden werden daher weitgehend die aktuelleren Daten des BAFU übernommen, da diese im Rahmen eines eigenen Forschungsvorhabens in Zusammenarbeit mit fachspezifischen Begleitgruppen erstellt wurden. Bei sonstiger Ausrüstung wird der Wert von [JRC 2008] übernommen, da vom BAFU keine Daten vorliegen. Bei den Aufsitzmähern wird die bisherige Differenzierung mit den entsprechenden Nutzungsstunden beibehalten, zumal die Nutzungsstunden in einer ähnlichen Größenordnung liegen wie in den anderen Quellen.

**Tab. 11: Nutzungsstunden von Geräten mit Verbrennungsmotor in der Grünpflege**

Kategorie	IFEU 2004	BAFU 2008	JRC 2008	IFEU 2009
Trimmer/Freischneider privat	17	6	6,25	6
Trimmer/Freischneider profi	273	200	150	200
Rasemäher privat	15	13	12,5	13
Rasemäher profi	320	100	62,5	100
Motorsägen privat	14	6	6,25	6
Motorsägen profi	400	150	150	150
Sonstige Ausrüstung privat	17	-	6,25	6
Sonstige Ausrüstung profi	240	-	150	150
Aufsitzmäher privat	15	13	25	15
Aufsitzmäher profi (Sport und Freizeit)	35	200	125	35
Aufsitzmäher profi (öffentl. Grünfläche)	280			280
Aufsitzmäher profi (betrieblich)	128			128
Quellen: [IFEU 2004], [BAFU 2008] und [JRC 2008]				IFEU 2009

### 3.5 Sportboote und Fahrgastschiffe

Der Bestand an Fahrgastschiffen wurde bis 2007 nach "Verkehr in Zahlen" ([BMVBS 2008b]) aktualisiert und stellt sich jetzt wie in Abb. 7 dar. Die reale Entwicklung seit 2003 stimmt dabei weitgehend mit den in [IFEU 2004] getroffenen Annahmen überein. Außerhalb der vorliegenden Realdaten wird von einer Zunahme des Bestandes um 1 % pro Jahr ausgegangen.



**Abb. 7: Bestand an Fahrgastschiffen 1980-2020**

Die Bestände an Motoren in Sport- und Freizeitbooten wurden bisher auf Basis von Verkaufszahlen des internationalen Verbandes der Hersteller von Bootsmotoren (ICOMIA) abgeschätzt. Hier wurde eine Anfrage bezüglich aktuellerer Daten gestellt, diese konnten jedoch im Zeitrahmen des Projektes nicht mehr zur Verfügung gestellt werden. Daher werden hier die bisherigen Daten beibehalten.

## 4 Emissionsfaktoren

Im Rahmen der Aktualisierung von TREMOD-MM soll eine Überprüfung der bisherigen Emissionsfaktoren auf Basis neuer Erkenntnisse durchgeführt. Fokus sind dabei die Dieselmotoren, da diese für den größten Teil des Kraftstoffverbrauchs und auch der derzeit kritischen Emissionen (insbesondere Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und Partikel) verantwortlich sind. So verzeichnen Dieselmotoren über 90% des Kraftstoffverbrauchs und der NO<sub>x</sub>-Emissionen und sind nahezu allein für die gesamten Partikelemissionen der mobilen Maschinen verantwortlich. Eine detaillierte Überprüfung der übrigen Emissionsfaktoren ist daher im begrenzten Rahmen dieses Projektes nicht sinnvoll. Diese könnte Bestandteil einer weiteren Aktualisierung mit Schwerpunkt auf Emissionsfaktoren sein.

### 4.1 Überprüfung der bisherigen Diesel-Emissionsfaktoren

In [IFEU 2004] wurden die Emissionsfaktoren in aufwendigen Verfahren auf Basis umfangreicher Messdaten abgeleitet. Diese Daten lagen zu unregulierten Motoren und zu Motoren der Grenzwertstufe I und II vor. In einem ersten Abschnitt sollen diese Daten kurz überprüft werden. In den Jahren 2006 bis 2008 ist zudem die Grenzwertstufe III A in Kraft getreten. Hier konnten die Emissionsfaktoren bisher nur grob anhand des Grenzwertes abgeschätzt werden. Die Annahmen hierzu werden daher anhand jetzt verfügbarer Informationen aktualisiert. Für die Grenzwertstufe III B und IV liegen noch keine Messdaten vor, hier wird die Abschätzung auf Basis der Informationen für Stufe III A aktualisiert.

#### 4.1.1 Emissionsfaktoren bis Grenzwertstufen II

Verbrauchs- und Emissionsfaktoren für Dieselmotoren wurden im Dezember 2008 vom [BAFU 2008] veröffentlicht. Diese Basisfaktoren zeigen mit den von IFEU [IFEU 2004] abgeleiteten Basisfaktoren (siehe Abb. 8) eine große Übereinstimmung im Bereich Kraftstoffverbrauch und eine weitgehende Übereinstimmung bei den Stickoxiden. Bei den übrigen Schadstoffen sind die Abweichungen zwar teilweise größer, liegen aber in nur wenigen Fällen über 50% (rot markiert). Insgesamt sind die Abweichungen außerdem uneinheitlich, d.h. die vom schweizerischen BAFU verwendeten Werte weichen nicht systematisch von den bisher in [IFEU 2004] verwendeten Werten ab. Einige Abweichungen erklären sich dadurch, dass in [BAFU 2008] eine Verbesserung des Emissionsverhaltens auch ohne Verschärfung der Grenzwerte unterstellt wird. Die IFEU-Faktoren folgen dagegen nicht dieser Annahme.

Aufgrund der umfangreichen Datengrundlage, die für die Ableitung der bisherigen Emissionsfaktoren verwendet wurde (siehe [IFEU 2004] Anlagenband), wird keine Notwendigkeit einer Änderung der Dieselemissionsfaktoren bis Stufe II gesehen. Eine Nachrüstung älterer Motoren mit Partikelfiltern und damit die Erreichung niedrigerer Partikelemissionen ist zwar prinzipiell möglich, derzeit aber noch sehr kostspielig, so dass auf absehbare Zeit nicht mit einem relevanten Anteil nachgerüsteter Motoren zu rechnen ist (vgl. [Landis 2007]).

<b>Stickoxide (g/kWh)</b>						
	<b>0-18 kW</b>	<b>18 - 37 kW</b>	<b>37-75 kW</b>	<b>75-130 kW</b>	<b>130-300 kW</b>	<b>300-560 kW</b>
Stufe 2	46,9%	2,5%	-19,3%	-9,0%	-8,8%	-8,8%
Stufe 1	46,9%	35,3%	-16,2%	-4,2%	-7,8%	-7,8%
1996 - Stufe 1	26,8%	16,3%	14,2%	25,1%	11,1%	11,1%
vor 1996	10,3%	42,7%	-44,2%	-6,1%	-1,0%	-1,0%
<b>Partikel (g/kWh)</b>						
	<b>0-18 kW</b>	<b>18 - 37 kW</b>	<b>37-75 kW</b>	<b>75-130 kW</b>	<b>130-300 kW</b>	<b>300-560 kW</b>
Stufe 2	50,0%	-50,0%	-60,0%	-20,0%	-60,0%	-60,0%
Stufe 1	37,5%	47,1%	-17,5%	-75,0%	-10,0%	-10,0%
1996 - Stufe 1	26,3%	32,9%	-6,2%	-17,5%	-17,5%	-17,5%
vor 1996	34,3%	14,3%	9,2%	39,0%	23,8%	23,8%
<b>Kohlenwasserstoff (g/kWh)</b>						
	<b>0-18 kW</b>	<b>18 - 37 kW</b>	<b>37-75 kW</b>	<b>75-130 kW</b>	<b>130-300 kW</b>	<b>300-560 kW</b>
Stufe 2	60,0%	6,7%	-15,0%	-16,7%	0,0%	0,0%
Stufe 1	36,0%	48,9%	-8,3%	-12,5%	-43,3%	-43,3%
1996 - Stufe 1	8,8%	-33,9%	11,3%	24,2%	-82,0%	-82,0%
vor 1996	40,0%	-9,5%	33,5%	43,1%	9,0%	9,0%
<b>Kohlenmonoxid (g/kWh)</b>						
	<b>0-18 kW</b>	<b>18 - 37 kW</b>	<b>37-75 kW</b>	<b>75-130 kW</b>	<b>130-300 kW</b>	<b>300-560 kW</b>
Stufe 2	42,0%	-10,0%	25,9%	32,7%	39,3%	39,3%
Stufe 1	42,0%	38,7%	15,0%	14,7%	30,7%	30,7%
1996 - Stufe 1	-34,2%	-49,1%	-4,0%	-3,4%	-44,8%	-44,8%
vor 1996	-11,8%	-22,0%	11,7%	15,8%	-44,8%	-44,8%
<b>Kraftstoffverbrauch (g/kWh)</b>						
	<b>0-18 kW</b>	<b>18 - 37 kW</b>	<b>37-75 kW</b>	<b>75-130 kW</b>	<b>130-300 kW</b>	<b>300-560 kW</b>
Stufe 2	8,1%	5,3%	4,6%	12,5%	10,8%	10,8%
Stufe 1	8,1%	5,3%	4,6%	12,5%	10,8%	10,8%
1996 - Stufe 1	8,1%	5,3%	4,6%	12,5%	10,8%	10,8%
vor 1996	13,0%	11,7%	9,8%	16,8%	14,2%	14,2%

Abweichung

- < 10%
- 10%-30%
- 30%-50%
- >50%

Quellen: [IFEU 2004], [BAFU 2008] IFEU 2009

**Abb. 8: Abweichung der Emissionsfaktoren in [IFEU 2004] von [BAFU 2008]**

#### 4.1.2 Emissionsfaktoren der Grenzwertstufe III und IV

Die Grenzwertstufe III A ist bereits in Kraft getreten, so dass erste Typprüfdaten zu den Motoren gemessen wurden. Nach Einschätzung von Experten besteht bei Typprüfdaten jedoch mittlerweile die Gefahr, dass diese aufgrund von Optimierungen auf den Zyklus („cycle beating“, ähnlich der Praxis bei Lkw-Motoren) wenig Aussagekraft über das reale Emissionsverhalten haben. Überdies werden die Typprüfdaten vom KBA nicht veröffentlicht, da diese in der Regel im Auftrag der Motorenhersteller von einem zertifizierten Messlabor erhoben wurden.

Die bisherige Ableitung von Emissionsfaktoren für Motoren der Grenzwertstufe III und IV wird daher auf Basis neuer qualitativer Informationen von Experten ([Schulte 2009], [Nertwig 2008], [Hausberger 2009]) aktualisiert. Im Wesentlichen konnten die folgenden Informationen gewonnen werden:

- Der Summenwert für HC und NO<sub>x</sub> der Stufe III A entfällt weitgehend (Annahme 90%) auf NO<sub>x</sub>.
- Bei NO<sub>x</sub> und Partikeln wird der Grenzwert in der Regel nur geringfügig unterschritten, es wird daher für beide Schadstoffe in Stufe III A und für NO<sub>x</sub> in Stufe III B ein Emissionsfaktor 10 % unter dem Grenzwert angesetzt.
- Durch die starke Verschärfung des Partikelgrenzwertes ab Stufe III B und des NO<sub>x</sub>-Grenzwertes ab Stufe IV wird der Abstand zum Grenzwert noch geringer. Daher wird hier der Grenzwert als Emissionsfaktor angesetzt (keine Unterschreitung). Die starke Verschärfung der Grenzwerte - insbesondere des Partikelgrenzwertes ab Stufe III B - wird durch eine Nachbehandlung (wahrscheinlich Partikelfilter) erreicht.
- Der Grenzwert für CO wird deutlich unterschritten, es wird ein Emissionsfaktor 40 % unter dem Grenzwert angesetzt. Bei Maschinen mit periodisch regenerierender Nachbehandlung kann es unter Umständen kurzfristig zu einer Erhöhung der CO-Emissionen kommen. Dies kann in einem durchschnittlichen Emissionsfaktor jedoch nicht abgebildet werden.
- Auch der Grenzwert für HC unterschreitet in Stufe III B und IV den Grenzwert deutlich, es wird ein Emissionsfaktor 30% unter dem Grenzwert angesetzt,

Die Ableitungsregeln sind in der folgenden Tab. 12 zusammengefasst:

**Tab. 12 Ableitungsregeln für Emissionsfaktoren ab Stufe III**

	NO <sub>x</sub>	HC	Partikel	CO
III A	Grenzwert - 10%, davon:		Grenzwert - 10%	Grenzwert - 40%
	90%	10%		
III B	Grenzwert - 10%	Grenzwert - 30%	Grenzwert	Grenzwert - 40%
IV	Grenzwert	Grenzwert - 30%	Grenzwert	Grenzwert - 40%
Quelle: IFEU auf Basis von Expertenabschätzungen <sup>4</sup>				IFEU 2009

<sup>4</sup> [Schulte 2009], [Nertwig 2008], [Hausberger 2009]

Ab Stufe III B folgt die Einteilung in Leistungsklassen nicht mehr der Differenzierung der Bestandsdaten. Innerhalb der Leistungsklasse 37-75 kW gelten die Grenzwerte der Stufe III B erst ab einer Motorleistung von 56 kW, 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 ermitteltem Emissionsfaktor und dem für Maschinen mit 56-75 kW der Stufe III B ermittelten Emissionsfaktor dar<sup>5</sup>. Die resultierenden Emissionsfaktoren sind in Tab. 13 zusammengefasst. Der Vergleich mit den in [BAFU 2008] abgeleiteten Emissionsfaktoren zeigt eine weitgehende Übereinstimmung.

**Tab. 13 Basisemissionsfaktoren für Dieselmotoren ab Stufe III**

		<b>19-37</b>	<b>37-75</b>	<b>75-130</b>	<b>130-560</b>
<b>NOx</b>	<b>III A</b>	6,1	3,8	3,2	3,2
	<b>III B</b>	6,1	3,4	3,0	1,8
	<b>IV</b>	6,1	2,1	0,4	0,4
<b>HC</b>	<b>III A</b>	0,68	0,42	0,36	0,36
	<b>III B</b>	0,68	0,28	0,13	0,13
	<b>IV</b>	0,68	0,28	0,13	0,13
<b>Partikel</b>	<b>III A</b>	0,54	0,36	0,27	0,18
	<b>III B</b>	0,54	0,025	0,025	0,025
	<b>IV</b>	0,54	0,025	0,025	0,025
<b>CO</b>	<b>III A</b>	3,3	3,0	3,0	2,1
	<b>III B</b>	3,3	3,0	3,0	2,1
	<b>IV</b>	3,3	3,0	3,0	2,1
Quelle: IFEU auf Basis von Grenzwerten und Tab. 12					IFEU 2009

<sup>5</sup>  $EF_{37-75kW; Stufe III B} = (EF_{56-75kW/ Stufe III B} + EF_{37-75kW/ Stufe III A}) / 2$

## 4.2 Emissionsfaktoren für N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub> und CH<sub>4</sub>

Die Schadstoffe CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub> und N<sub>2</sub>O werden nicht durch Emissionsstandards begrenzt und sind daher bisher nicht in TREMOD-MM berücksichtigt. Da jedoch Methan (CH<sub>4</sub>) und Lachgas (N<sub>2</sub>O) als Klimagase in der aktuellen Diskussion an Bedeutung gewinnen und Ammoniak (NH<sub>3</sub>) durch die NEC-Richtlinie (2001/81/EG, [EU 2001]) begrenzt wird, soll TREMOD-MM um diese Schadstoffe erweitert werden.

Aufgrund der geringeren Datenverfügbarkeit können die Emissionsfaktoren hier jedoch nicht - ähnlich den regulierten Schadstoffen - aus Messdaten abgeleitet werden. Aus Gründen der Konsistenz und der internationalen Vergleichbarkeit werden für NH<sub>3</sub> und N<sub>2</sub>O die Faktoren aus dem CORINAIR-Handbuch der Europäischen Umweltagentur (EEA) in der Version von 2007 übernommen ([EEA 2007]).

Die betreffenden Daten sind allerdings seit 1995 nicht überarbeitet worden. Andere Quellen zu ähnlichen Daten (z.B. [BUWAL 1996]) sind jedoch auch kaum aktueller, so dass hier den internationalen CORINAIR-Faktoren der Vorzug gegeben wird. Die Emissionsfaktoren ermöglichen eine Abschätzung der Emissionen dieser Schadstoffe aus dem Offroad-Bereich. 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 in [EEA 2007] 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 Straßenverkehrsmodul von TREMOD angewandt und sichert die Konsistenz der berechneten Emissionen zwischen HC und CH<sub>4</sub>. Die Methananteile für den Straßenverkehr in [IFEU 2006] werden dabei nach Motorkonzept unterschieden. Da keine spezifischen Daten für den Offroad-Bereich vorliegen, werden diese Daten übernommen.

**Tab. 14: Emissionsfaktoren N<sub>2</sub>O und NH<sub>3</sub>**

Schadstoff	Diesel	Otto
N <sub>2</sub> O	0,35 g/kWh	0,01 g/kWh
NH <sub>3</sub>	0,002 g/kWh	0,002 g/kWh
Quelle: [EEA 2007]		IFEU 2009

**Tab. 15: Anteil der Methanemissionen an den gesamten HC-Emissionen**

Schadstoff	Anteil CH <sub>4</sub> an HC
Diesel	2,4 %
Otto 4-Takt	3,4 %
Otto 2-Takt	7,0 %
Quelle: [IFEU 2006]	
IFEU 2009	

### 4.3 Transiente Anpassungsfaktoren

Die verwendeten Emissionsfaktoren beruhen auf Messdaten, die in einem stationären Zyklus gemessen wurden und können sich bei einigen Maschinen, die sehr dynamisch betrieben werden, stark von den Emissionen bei realer Nutzung unterscheiden. Daher wurden die Diesel-Emissionsfaktoren in [IFEU 2004] durch einen transiente Anpassungsfaktor (engl. ‚Transient Adjustment Factor‘ (TAF)) korrigiert. Die Daten beruhen dabei auf Messungen der US EPA und sollen nun aktualisiert werden. Zwei Änderungen sind dabei von Bedeutung:

- Für NO<sub>x</sub> und Partikel wird nun ab Tier 3<sup>6</sup> ein anderer TAF verwendet. Da in der EU ab Stufe III B die Partikelemissionen in einem transienten Zyklus gemessen werden, wird diese Differenzierung nur für gasförmige Schadstoffe wirksam.
- Die bisher verwendeten EPA-Daten haben einigen Maschinen TAFs zugewiesen, die nach neuen Erkenntnissen stationär betrieben werden. Die EPA hat diesen Fehler inzwischen korrigiert (vgl. [EPA 2004a]). Aufgrund der Plausibilität der Korrektur (stationärer Betrieb von Betonmischern, Kompressoren, etc.) soll dies auch in TREMOD-MM korrigiert werden. Damit wird für weniger Maschinen als bisher eine transiente Anpassung angewendet (vgl. Tabelle Tab. 17).

Die verwendeten TAFs sind in Tab. 16 aufgeführt. Die Zuordnung zu den Maschinenkategorien erfolgt anhand der in TREMOD-MM verwendeten Lastfaktoren und kann damit von der Zuordnung der US-EPA abweichen. Lastfaktoren unter 0,4 werden der Kategorie ‚Niedrig‘ zugeordnet, Lastfaktoren ab 0,4 der Kategorie ‚Hoch‘ (siehe Tab. 17). Durch die Aktualisierung der Lastfaktoren erfolgt bei einigen Maschinen der Bauwirtschaft eine gegenüber [IFEU 2004] andere Zuordnung.

**Tab. 16: Transiente Anpassungsfaktoren**

Lastfaktor	Emissionsstufe	HC	CO	NOx	Partikel	Kraftstoffverbrauch
Hoch	Bis Stufe 3 A	1,05	1,53	0,95	1,23	1,01
	Ab Stufe 3 B			1,04	1,00	
Niedrig	Bis Stufe 3 A	2,29	2,57	1,10	1,97	1,18
	Ab Stufe 3 B			1,21	1,00	
Quelle: [EPA 2004a]						IFEU 2009

<sup>6</sup> Stufe 3 der US-Amerikanischen Gesetzgebung, wird hier der EU Stufe III B gleichgesetzt.

**Tab. 17: Verwendung der Transienten Anpassungsfaktoren**

<b>Kat.-Nr.</b>	<b>Kat.-Name</b>	<b>Lastfaktor</b>	<b>TAF</b>
101	Zugmaschinen	0,30	Niedrig
102	Mähdrescher	0,40	Hoch
207	Vorderkipper, Dumper (Schütter)	0,50	Hoch
208	Universalbagger	0,50	Hoch
209	Planierraupen	0,50	Hoch
210	Lader	0,50	Hoch
211	Grader, Straßenhobel 18-37kW	0,50	Hoch
215	Fertiger (Schwarzdecke)	0,20	Niedrig
217	Fertiger und Verteiler (Betonstraße)	0,20	Niedrig
219	Stapler (Diesel)	0,20	Niedrig
301	Forstschlepper	0,30	Niedrig
302	Tragschlepper/ Forwarder	0,50	Hoch
303	Vollernter/ Harvester	0,50	Hoch
304	Entrindungsanlagen	0,50	Hoch
502	Motorboote mit Innenbordmotor (Diesel)	0,34	Niedrig
503	Fahrgastschiffe	0,50	Hoch
			IFEU 2009

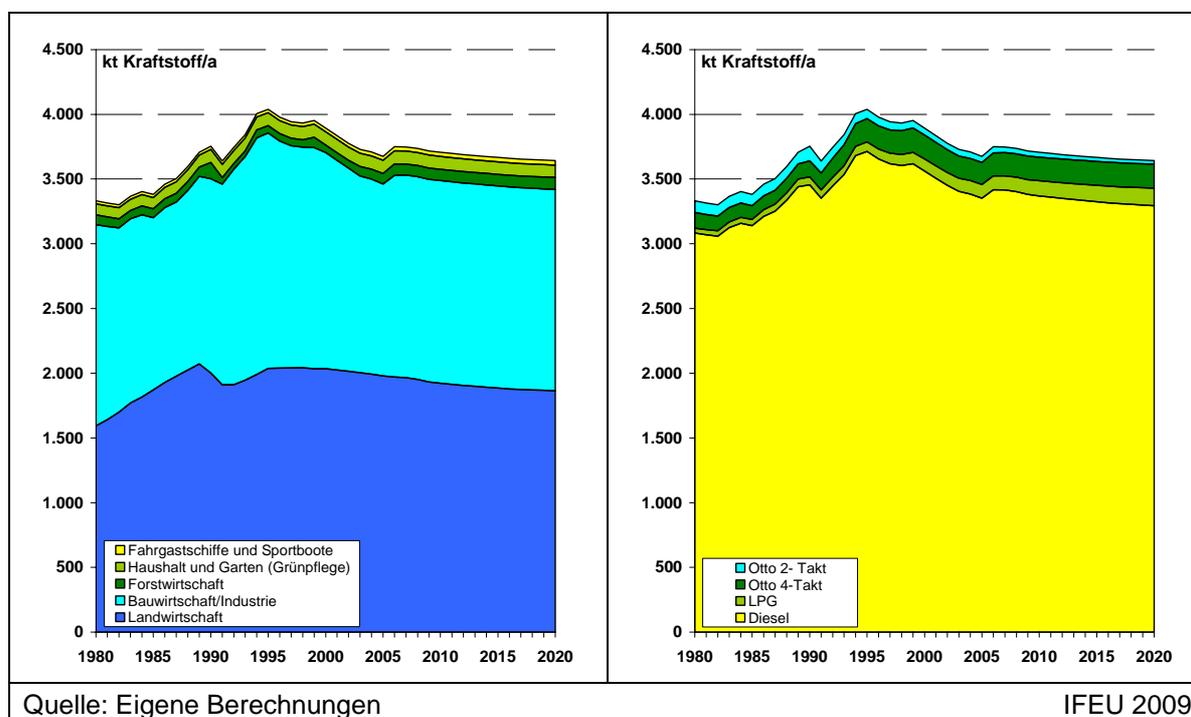
## 5 Darstellung, Vergleich und Diskussion der Ergebnisse

Zunächst werden die neu berechneten Ergebnisse differenziert dargestellt und beschrieben. Anschließend werden die Gesamtergebnisse für wichtige Schadstoffe den Berechnungen mit TREMOD-MM 2004 gegenübergestellt und Abweichungen diskutiert.

### 5.1 Differenzierte Ergebnisse

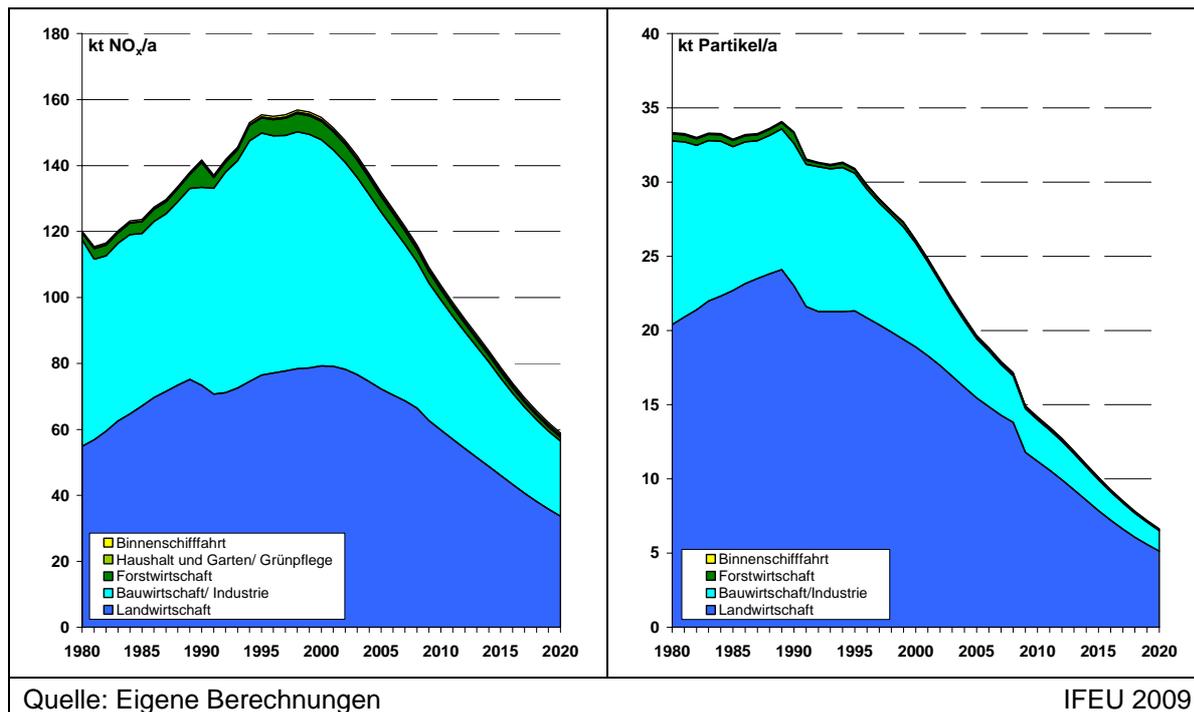
Der Gesamtkraftstoffverbrauch im Offroad-Sektor (Abb. 9) geht vor allem auf die Land- und Bauwirtschaft zurück. Hier werden vornehmlich große Dieselmotoren eingesetzt, so dass Dieselmotoren über 90% des im Offroad-Bereich verwendeten Kraftstoffs darstellen. In den Bereichen Forstwirtschaft, Grünpflege und in der Binnenschifffahrt kommen auch viele Otto-Motoren zum Einsatz, der Verbrauch ist aber vergleichsweise gering. Der Flüssiggasverbrauch (LPG) ist auf Industriestapler zurückzuführen.

Insgesamt steigt der Verbrauch von 1980 bis 2000 von etwa 3.300 kt auf etwa 4.000 kt an. Anschließend ist ein leichter Verbrauchsrückgang sowohl in der Land- als auch in der Bauwirtschaft zu verzeichnen.

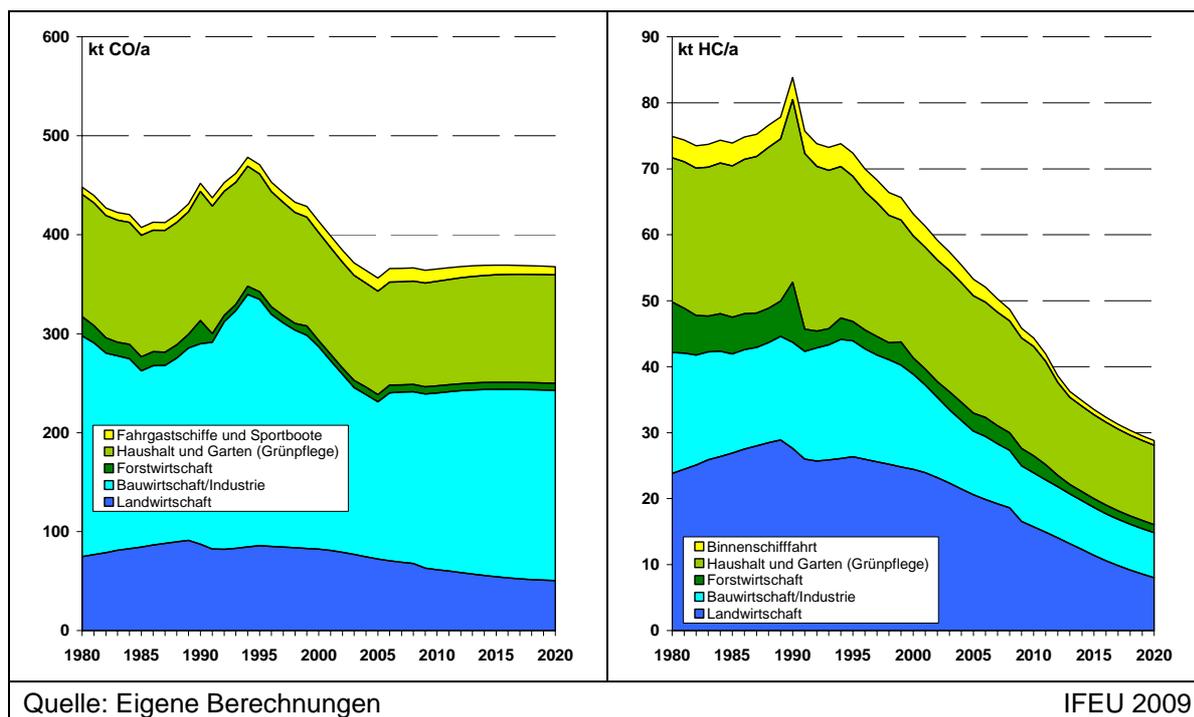


**Abb. 9: Kraftstoffverbrauch nach Sektoren (links) und Motortyp (rechts)**

NO<sub>x</sub>- und Partikelemissionen (Abb. 10) entstehen überwiegend beim Betrieb von Dieselmotoren. Daher werden beide Schadstoffe von der Land- und Bauwirtschaft dominiert. Trotz des ansteigenden Kraftstoffverbrauchs gehen die Emissionen ab 2000 aufgrund der Einführung und Verschärfung der Grenzwerte stark zurück. Bei NO<sub>x</sub> steigen die Emissionen zunächst von etwa 120 kt auf knapp 160 kt an, sinken dann aber bis 2020 auf etwa 60 kt ab. Bei den Partikelemissionen kommt es zu einer noch stärkeren Minderung von etwa 33 kt in den 1980ern auf etwa 7 kt im Jahr 2020.



**Abb. 10: NO<sub>x</sub>- (links) und Partikelemissionen (rechts) nach Sektoren**

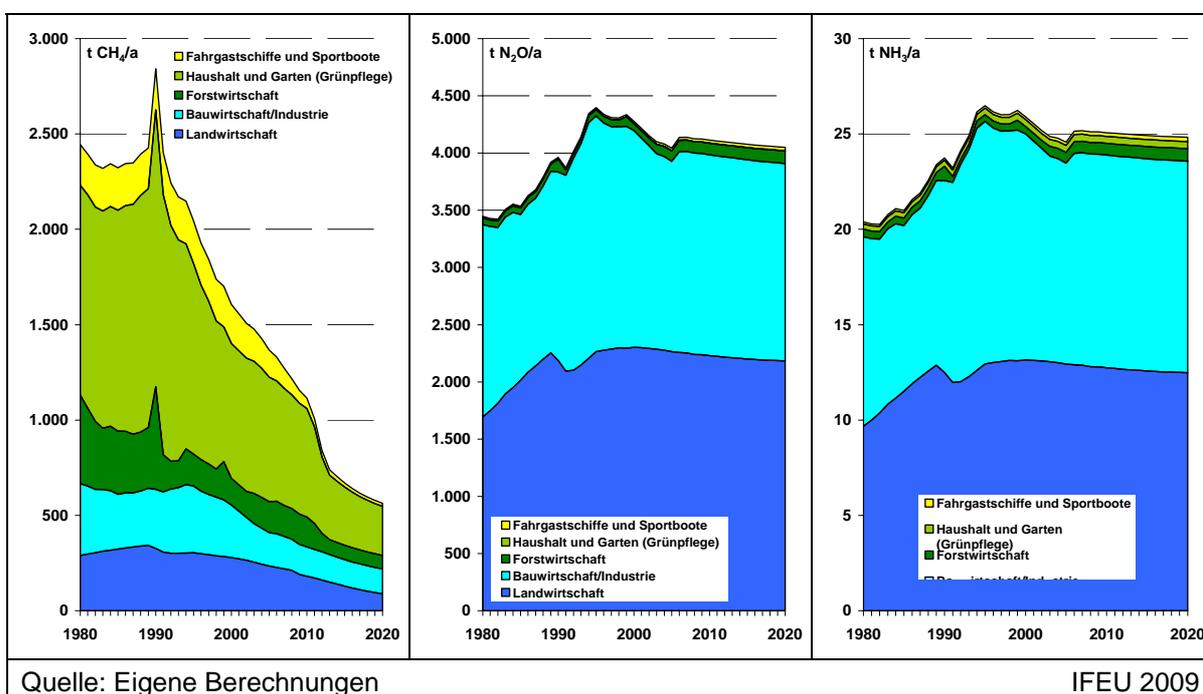


**Abb. 11: CO (links) und HC-Emissionen (rechts) nach Sektoren**

Bei den CO- und HC-Emissionen (Abb. 11) spielen auch Sektoren, in denen viele Otto-Motoren eingesetzt werden, eine relevante Rolle. Dies betrifft insbesondere den Bereich der Grünpflege, in dem zahlreiche Zweitaktmotoren verwendet werden. Die CO-Emissionen gehen bis 2020 nur wenig zurück, da nach 2002 keine weitere relevante Grenzwertverschärfung erfolgt. Im Gegensatz dazu ist bei den HC-Emissionen ein deutlicher Rückgang zu verzeichnen, da auch die Emissionsgrenzwerte für die großen Maschinen der Land- und Bauwirtschaft weiter verschärft werden. Dadurch sinkt das Emissions-

niveau von etwa 75 kt in den 1980ern auf knapp 30 kt 2020. Der Emissionspeak im Jahr 1990 ist auf die Forstwirtschaft zurückzuführen und hängt mit Orkanereignisse in diesem Jahr zusammen.

Die Ergebnisse für die neu in TREMOD-MM aufgenommenen Schadstoffe CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O und NH<sub>3</sub> sind in Abb. 12 dargestellt. Die CH<sub>4</sub>-Emissionen werden als Anteil an den HC-Emissionen berechnet und weisen daher einen ähnlichen Verlauf auf. Unterschiede im Verlauf gegenüber den HC-Emissionen sind durch die unterschiedlichen Anteile der verschiedenen Motortypen bedingt. Die Emissionen gehen von knapp 2.500 Tonnen pro Jahr auf etwa 600 Tonnen pro Jahr zurück, da die HC-Emissionen durch die Grenzwertgesetzgebung stetig sinken. Die N<sub>2</sub>O- und NH<sub>3</sub>-Emissionen werden vor allem durch die Dieselmotoren der Land- und Bauwirtschaft verursacht. Da hier keine Grenzwertgesetzgebung gilt, ist auch kein relevanter Rückgang der Emissionen zu erwarten. Die zeitliche Entwicklung der Emissionen ist daher dem Kraftstoffverbrauch ähnlich.



Quelle: Eigene Berechnungen

IFEU 2009

Abb. 12: Ergebnisse für neue Schadstoffe (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>)

## 5.2 Gegenüberstellung mit den bisherigen Ergebnisse

Über 90 % des im Offroad-Bereich verbrauchten Kraftstoffs ist Dieseldieselkraftstoff. Hier bleibt der neu berechnete Verbrauch bis 1995 nahezu Deckungsgleich mit den früheren Berechnungen<sup>7</sup> (siehe Abb. 13 links). Erst ab 1995 kommt es aufgrund geänderter Szenarioannahmen zu größeren Abweichungen:

- In der **Landwirtschaft** (Abb. 14 oben links) liegt der neu berechnete Dieseldieselverbrauch insgesamt bis 1995 etwas höher als bisher berechnet. Dafür ist vor allem der für Zugmaschinen um 20% angehobenen Lastfaktor verantwortlich.
- Gegenüber bisherigen Berechnungen geht der Dieseldieselverbrauch in der **Landwirtschaft** ab 1995 außerdem etwas stärker zurück. Diese liegt an der Angleichung der Nutzungsstunden für große Zugmaschinen und deren langsamen Rückgang.
- Unterschiede im Kraftstoffverbrauch der **Bauwirtschaft** (Abb. 14 oben rechts) sind überwiegend auf Änderungen bei der Kopplung der Nutzungsdauer an das Bauvolumen zurückzuführen. Zudem wurde hier bei einigen großen Maschinen der Lastfaktor gesenkt.
- Die deutlichen Unterschiede in der Forstwirtschaft und Grünpflege (Abb. 14 unten) sind auf geänderte Annahmen zur Geräte- und Maschinennutzung zurückzuführen.

Der neu berechnete Benzinverbrauch (Abb. 13 rechts) liegt dagegen, insbesondere aufgrund der niedriger angenommenen Betriebsstunden der Geräte im Bereich der Forstwirtschaft und Grünpflege, über den gesamten betrachteten Zeitraum deutlich niedriger als in früheren Berechnungen.

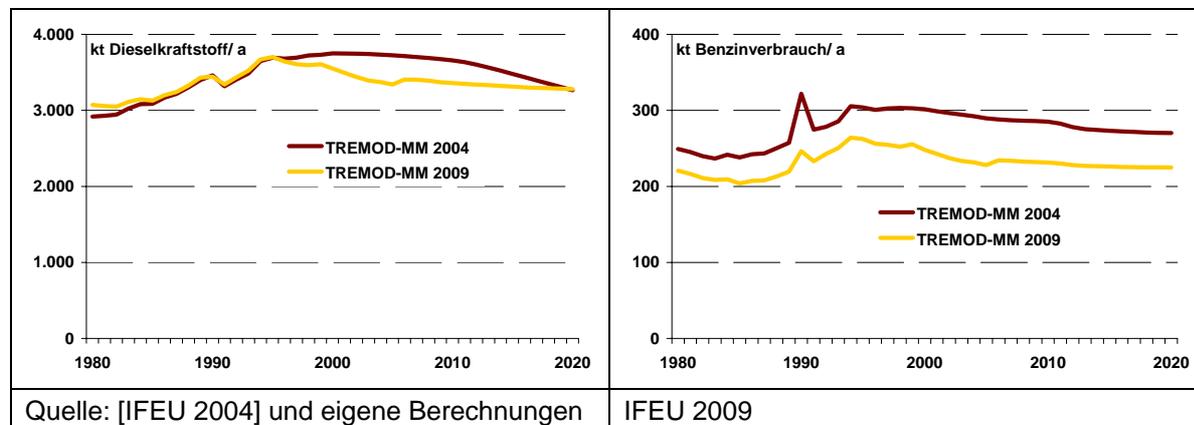
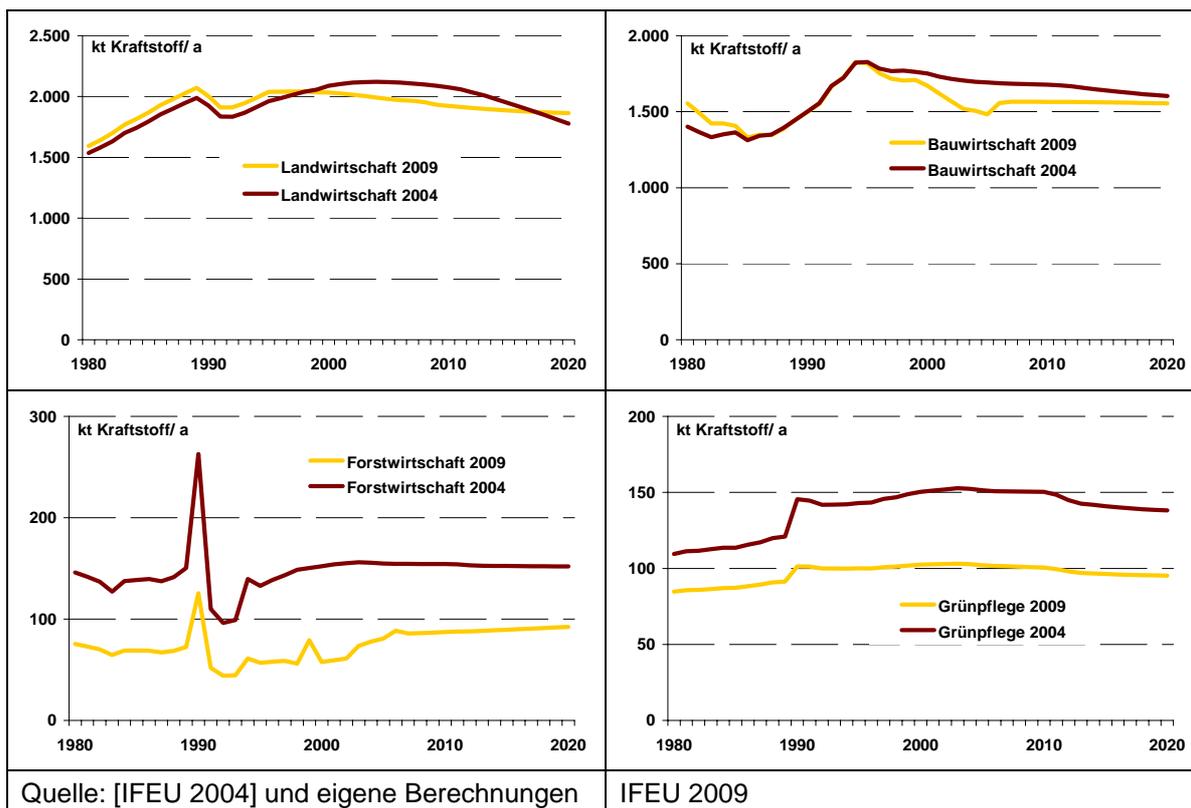


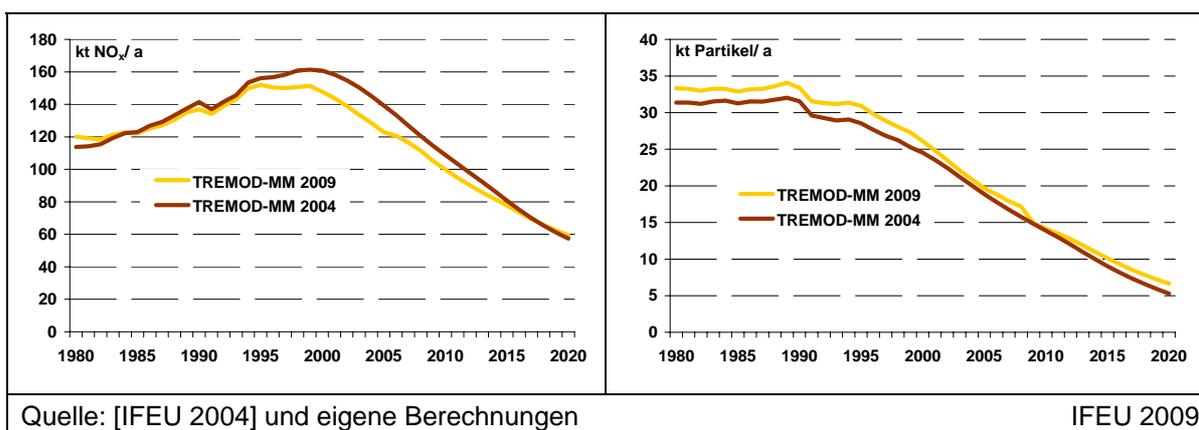
Abb. 13: Diesel- und Benzinverbrauch aller Offroad-Sektoren im Vergleich

<sup>7</sup> Zugrunde gelegt werden die Berechnungen unter Berücksichtigung des damaligen Kommissionsvorschlags für die Grenzwertstufe 3 B und 4.



**Abb. 14: Gesamtkraftstoffverbrauch verschiedener Offroad-Sektoren**

Die NO<sub>x</sub> und Partikelemissionen des Offroad-Sektors sind in Abb. 15 dargestellt. Bei den NO<sub>x</sub>-Emissionen gibt es zunächst nur geringe Unterschiede gegenüber den bisherigen Berechnungen. Die aufgrund des höheren Lastfaktors für Zugmaschinen höheren Emissionen in der Landwirtschaft, werden durch etwas niedrigere Emissionen in der Bau- und Forstwirtschaft weitgehend ausgeglichen. Nach 1995 werden durch die konstante Fortschreibung der gesamten Nutzungsstunden in der Landwirtschaft niedrigere Emissionen berechnet.



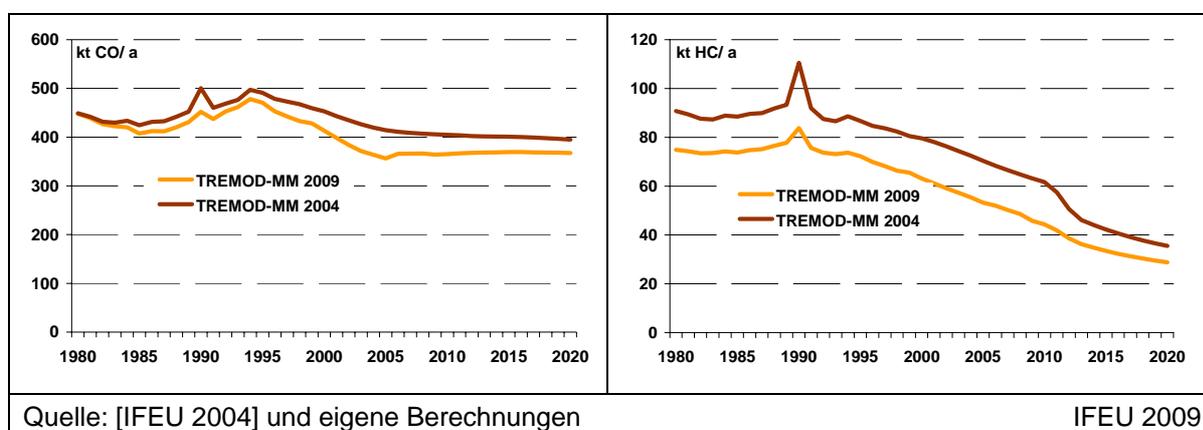
**Abb. 15: Gesamte NO<sub>x</sub>- (links) und Partikelemissionen (rechts) im Vergleich**

Bei den Partikelemissionen liegen die neu berechneten Ergebnisse durchweg etwas höher als die Bisherigen. Die etwas höheren Emissionen der Landwirtschaft werden nicht – wie bei den NO<sub>x</sub>-Emissionen – durch niedrigere Emissionen in der Bauwirtschaft ausgeglichen. Dies liegt an den für einige Maschinen der Bauwirtschaft, als Folge geänderter Lastfaktoren, deutlich höheren transienten Anpassungsfaktoren (TAFs) für Partikelemissi-

onen als bisher (TAF 1,94 anstatt 1,23). Die Differenz nimmt nach 1995 aufgrund der konstanten Fortschreibung der gesamten Nutzungsstunden in der Landwirtschaft ab.

Die von Otto-Motoren mitbestimmten CO- und HC-Emissionen liegen insgesamt etwas niedriger als bisher berechnet. Dies liegt vor allem an den niedriger als bisher angenommenen Nutzungsdauern (siehe Abb. 16). Da bei CO auch in der Bauwirtschaft relevante Emissionen entstehen, kommt es hier aufgrund der aktualisierten Entwicklung der Bautätigkeit zwischen 2000 und 2005 zu einer zusätzlichen Absenkung des Emissionsniveaus.

Bei den HC-Emissionen fällt der Unterschied gegenüber den bisherigen Berechnungen besonders deutlich aus. Dies liegt daran, dass in den Bestandsdaten der Grünpflege ein deutlich größerer Anteil an 4-Taktmotoren - mit einem deutlich niedrigeren HC-Emissionsfaktor - für die Berechnung angenommen wurde. Dadurch fällt auch die deutliche Verschärfung des HC-Grenzwertes für handgehaltene Maschinen mit Zweitaktmotoren ab 2011 (Stufe 2) weniger ins Gewicht als in den bisherigen Berechnungen.



**Abb. 16: Gesamte CO- (links) und HC-Emissionen (rechts) im Vergleich**

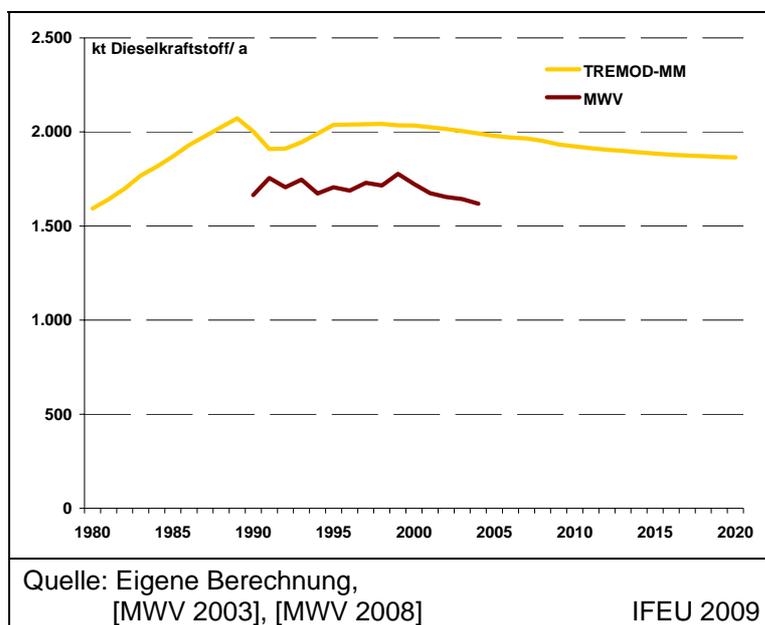
### 5.3 Vergleich mit der Energiebilanz für den Offroad-Bereich

Aufgrund der Unsicherheiten in verschiedenen Eingangsdaten der hoch differenzierten Verbrauchs- und Emissionsberechnung, ist ein Vergleich mit verfügbaren Energiebilanzen für den Offroad-Bereich sinnvoll. Fokus sind aufgrund des hohen Anteils am Gesamtverbrauch die Land- und Bauwirtschaft.

Daten zum Verbrauch an Dieseldieselkraftstoff in der Landwirtschaft werden vom MWV veröffentlicht ([MWV 2002], [MWV 2008]) und beruhen auf der Gasölabrechnung nach dem Gasölverwendungsgesetz (LwGVG) bzw. ab 2001 auf dem Agrardieselgesetz (AgrdG). Ab 2005 ist dieser Ansatz jedoch nur noch bedingt verwendbar, da die Rückerstattung begrenzt wurde. So wurde eine Unter- (1862 Liter je Betrieb) und Obergrenze (10.000 Liter je Betrieb) für die Förderung eingeführt. Damit wird seit 2005 ein deutlich geringer Kraftstoffverbrauch über die Gasölabrechnung erfasst.

Zumindest die Zahlen des MWV bis 2004 können jedoch für einen Vergleich herangezogen werden. Der mit TREMOD-MM berechnete Verbrauch liegt dabei zwischen 10 % und 20 % über den Angaben des MWV. Die durchschnittliche Abweichung im betrachteten Zeitraum liegt bei 15%.

Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass über das Agrardieselgesetz nur der Kraftstoff erfasst wird, für den tatsächlich eine Rückerstattung beantragt wurde. So geht auch das Bundeslandwirtschaftsministerium (siehe [IFEU 2004]) davon aus, dass nur etwa 90 % des gesamten Kraftstoffverbrauchs durch die Gasölabrechnung erfasst wird. So ist in TREMOD-MM auch die Neben- und Nichterwerbslandwirtschaft vollständig berücksichtigt.



**Abb. 17: Dieseldieselkraftstoffverbrauch in der Landwirtschaft 1980-2020**

Für weitere „Stationäre und ortsbewegliche Motoren sowie nichtmotorische Zwecke“ wird vom MWV für 2007 ein Dieseldieselverbrauch von 465 kt angegeben. Dieser Wert beträgt etwa nur ein Drittel des mit TREMOD-MM für die übrigen Sektoren, vor allem die Bauwirtschaft, berechneten Dieseldieselverbrauchs. Die Zahlen des MWV stützen sich dabei allerdings auf grobe Hochrechnungen auf Basis des Produktionsindex der Bauwirtschaft und sind damit für einen direkten Vergleich kaum verwendbar. Es ist davon auszugehen, dass der Dieseldieselverbrauch des Offroad-Sektors in der MWV-Statistik damit eher unterschätzt wird.

## 6 Fazit

Die Eingangsdaten für das Emissionsberechnungsmodell TREMOD-MM wurden umfassend aktualisiert. Es wurden sowohl die seit 2004 neu verfügbar gewordenen Statistiken berücksichtigt, als auch neue Erkenntnisse bezüglich Bestandszusammensetzung (Motortyp, Leistungsklasse), Nutzungsmuster (Lastfaktor und Nutzungsdauer) und Emissionsverhalten. Überdies wurden zusätzliche Schadstoffe in die Betrachtung aufgenommen.

Trotz zahlreicher Anpassungen in den Eingangsdaten, zeigen sich insbesondere beim Dieselmotorkraftstoffverbrauch, aber auch bei den NO<sub>x</sub>-Emissionen nur geringe Unterschiede gegenüber den bisherigen Berechnungen. Bei den Partikel-, HC- und CO-Emissionen sind die Unterschiede zwar etwas größer, aber vor dem Hintergrund der geänderten Szenarienannahmen (Transiente Anpassungsfaktoren, Anteil 4-Takt-Motoren, etc.) plausibel. Die qualitativen Erkenntnisse in [IFEU 2004] haben daher nach wie vor Bestand.

Für den Kraftstoffverbrauch der mobilen Maschinen sind vor allem die Land- und Bauwirtschaft verantwortlich. Hier werden vornehmlich große Dieselmotoren eingesetzt, so dass Dieselmotorkraftstoff über 90% des verwendeten Kraftstoffs darstellt. Insgesamt steigt der Dieselmotorkraftstoffverbrauch im betrachteten Zeitraum von 1980 bis 2020 zunächst von etwa 3.100 kt auf etwa 3.700 kt an und sinkt danach langsam auf 3.300 kt ab. Bei den wichtigen Schadstoffemissionen – insbesondere Stickoxid und Partikel – sinken die Emissionen dagegen nach 2000 aufgrund der Einführung und kontinuierlichen Verschärfung der Grenzwerte deutlich.

Zwar konnte im Vergleich zu [IFEU 2004] eine Aktualisierung der Datengrundlage und in vielen Punkten auch Verbesserung der Szenarienannahmen erreicht werden. Bei vielen wichtigen Eingangsdaten bleibt die Datenlage jedoch deutlich unsicherer als im Straßenverkehr (siehe Tab. 18): Während für den Straßenverkehr differenzierte Bestandsstatistiken vorliegen, regelmäßige Fahrleistungsuntersuchungen durchgeführt und reale Fahrprofile aufgezeichnet wurden, beruhen die Eingangsdaten für den Offroad-Bereich in weiten Teilen auf wenigen Untersuchungen, Hochrechnungen und plausiblen Abschätzungen. Auch liegen im Straßenverkehr Emissionsfaktoren für die verschiedensten realen Nutzungsprofile vor, während über die reale Motornutzung von Offroad-Maschinen nur wenig bekannt ist.

Zukünftige Arbeiten sollten daher versuchen diese Defizite zu beheben und sich dabei auf die wichtigsten Einflussgrößen konzentrieren. Hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs und der NO<sub>x</sub>- und Partikelemissionen sollte der Fokus auf die großen Maschinen der Land- und Bauwirtschaft gelegt werden. Forschungsbedarf bleibt hier insbesondere bei folgenden Punkten:

- Betriebsstunden der Maschinen und Geräte
- Bestand und Bestandsstruktur in der Bauwirtschaft
- Emissionen der Maschinen im dynamischen Betrieb

Zur Nutzung der Maschinen in Deutschland gibt es keine aktuellen und abgesicherten Statistiken. Ebenso fehlt eine aktuelle Bestandserhebung für die Bauwirtschaft in Deutschland. Von Interesse ist hier nicht nur der Gesamtbestand, sondern auch die Zusammensetzung des Bestandes hinsichtlich Motorleistung, Alter, etc. Eine deutliche Verbesserung der Datenlage ließe sich vor allem über neue Erhebungen, evtl. in Zusammenarbeit mit geeigneten Verbänden erreichen. Die kalifornische Umweltbehörde CARB nutzt hierfür mittlerweile auch Telefonbefragungen ([Baker 2009]).

Auch bei den Emissionsfaktoren könnte die Datenbasis durch Auswertung weitere Messdaten verbessert werden. Dabei stellt sich insbesondere die Frage nach den Emissionen im dynamischen Betrieb, da viele stationäre Zyklen nur noch wenig Aussagekraft über das reale Emissionsverhalten haben. Eng verknüpft ist dies mit den Lastfaktoren, die eine vereinfachende Beschreibung der Maschinennutzung darstellen. Diese Fragen könnten insbesondere durch die Auswertung von Messdaten, evtl. in Zusammenarbeit mit einem großen Motorenhersteller beantwortet werden.

**Tab. 18: Unterschiede in der Datenqualität für Straßenverkehr und mobile Maschinen**

Eingangsdaten	TREMODO-Straßenverkehr	TREMODO-Mobile Maschinen
Bestandsdaten	Differenzierte Erfassung durch die Zulassungs- und Bestandstatistiken des KBA	Erfassung durch das KBA nur bei Zugmaschinen; Statistik bei Baumaschinen veraltet; sonst grobe Hochrechnungen auf Basis von Verkaufszahlen o. ä.
Fahrzeug-/ Maschinennutzung	Regelmäßige Straßenverkehrszählungen und Fahrleistungserhebungen	Nur wenige Untersuchungen zu Betriebsstunden liegen vor; zahlreiche Plausibilisierungen und Abschätzungen
Nutzungsprofil	Reales Fahrverhalten in verschiedenen Verkehrssituation wurde aufgezeichnet und zu Fahrmustern gebündelt	Über reale Nutzung wenig bekannt; vereinfachende Beschreibung der Motornutzung über einen Lastfaktor; Anpassung an dynamischen Betrieb auf Basis einer Untersuchung
Emissionsfaktoren	Umfangreiche Messprogramme und Simulation des Emissionsverhaltens in den aufgezeichneten realen Verkehrssituationen	Abgeleitet auf Basis von Typprüfdaten in stationären Zyklen; keine Messdaten zur dynamischen Nutzung; Problem des ‚cycle beating‘
IFEU 2009		

## 7 Literaturverzeichnis

- [BAFU 2008] Schäffeler, U. und M. Keller: Treibstoffverbrauch und Schadstoffemissionen des Offroad-Sektors. Studie für die Jahre 1980–2020. Umwelt-Wissen Nr. 0828. Bundesamt für Umwelt. Bern 2008.
- [Baker 2009] Baker, R.: Characterization of the Offroad Equipment Population. Präsentation im Rahmen der 'Chair's Air Pollution Seminar Series' des 'California Air Resources Board' (CARB) am 29.1.2009. Eastern Research Group (ERG) Inc. El Monte, California 2009.
- [BLE 2008] Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung. Email und Daten vom 31.10.2008.
- [BMVBS 2008a] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung (BMVBS): Email vom 7.11.2008.
- [BMVBS 2008b] Radke, S.: Verkehr in Zahlen 2006/2007. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung (BMVBS). Berlin 2006.
- [Borken et al. 1999] Borken, J., A. Patyk und G. A. Reinhardt: Basisdaten für ökologische Bilanzierungen. Braunschweig/Wiesbaden 1999.
- [BUWAL 1996] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft: Schadstoffemissionen und Treibstoffverbrauch des Offroad-Sektors. Bern 1996.
- [Destatis 2004] Statistisches Bundesamt Deutschland: Statistisches Jahrbuch 2004. Wiesbaden 2004.
- [Destatis 2008] Statistisches Bundesamt Deutschland: Statistisches Jahrbuch 2008. Wiesbaden 2008.
- [Destatis 2009] Statistisches Bundesamt Deutschland: Genesis Online Datenbank unter: <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/logon>
- [EEA 2007] European Environment Agency: EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook – 2007. Kopenhagen 2007.
- [EPA 2004a] U.S. Environmental Protection Agency: Exhaust and Crankcase Emission Factors for Nonroad Engine Modeling - Compression-Ignition. Washington, DC 2004.
- [EPA 2004b] U.S. Environmental Protection Agency: Median Life, Annual Activity, and Load Factor Values for Nonroad Engine Emissions Modeling. Washington, DC 2004.
- [EU 2001] Europäische Union 2001: Richtlinie 2001/81/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2001 über nationale Emissionshöchstmengen für bestimmte Luftschadstoffe.

- [EU 2002] Europäische Union 2002: Richtlinie 2002/88/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. Dezember 2002 zur Änderung der Richtlinie 97/68/EG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte
- [EU 2004] Europäische Union 2004: Richtlinie 2004/26/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. April 2004 zur Änderung der Richtlinie 97/68/EG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte.
- [FTI 2007] Nick, L.: Maschinenstatistik 2006. In: Forsttechnische Informationen 11+12/2007. Mitteilungsblatt des Kuratoriums für Waldarbeit und Forsttechnik. Groß-Umstadt 2007.
- [Hausberger 2009] Telefongespräch mit Stefan Hausberger, TU Graz am 19.1.2009.
- [HDB 2008] Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V.: Email vom 5.11.2008.
- [Heseding 2008] Heseding, M.: Herausforderung zukünftiger Abgasemissionsgrenzwerte für Industriedieselmotoren. Vortrag auf der FAD Konferenz am 6.11.2008 in Dresden. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA), Fachverband Motoren und Systeme. Frankfurt 2008.
- [IFEU 2004] Lambrecht, U. et al.: Entwicklung eines Modells zur Berechnung der Luftschadstoffemissionen und des Kraftstoffverbrauchs von Verbrennungsmotoren in mobilen Geräten und Maschinen. Endbericht und Anlagenband. Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU) Heidelberg im Auftrag des Umweltbundesamtes. Heidelberg 2004.
- [IFEU 2006] Knörr, W. et al.: Fortschreibung "Daten- und Rechenmodell: Schadstoffemissionen aus dem motorisierten Verkehr in Deutschland 1960 - 2030", Erstellung und Aktualisierung der Software TREMOD - Transport Emission Model. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg. Laufende Arbeiten im Auftrag des Umweltbundesamt seit 1993.
- [JRC 2008] Krasenbrink, A. und A. Dobranskyte-Niskota, A.: 2007 Technical Review of the NRMM Directive 1997/68/EC as amended by Directives 2002/88/EC and 2004/26/EC. Joint Research Centre der Europäischen Kommission. Brüssel 2008.
- [KBA 2008] Kraftfahrt-Bundesamt: Datensatz Bestände und Neuzulassungen von Zugmaschinen 2005-2008. Kraftfahrt-Bundesamt, Abteilung Statistik. Flensburg 2008.
- [KBA Reihe 2] Kraftfahrt-Bundesamt: Statistische Mitteilungen Reihe 2. Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern. Flensburg - verschiedene Jahrgänge.
- [KWF 2003] Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik: Email-Verkehr und Telefongespräche mit Lars Nick.

- [KWF 2008] Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik: Email-Verkehr und Telefongespräche am 12.11.2008 und 4.12.2008 mit Lars Nick.
- [Landis 2007] Landis, M., I. Schiess und U. Wolfensberger: Partikelfilter-Nachrüstung bei Traktoren. In: ART-Berichte 677/2007. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART). Ettenhausen 2007.
- [Lips & Gazzarin 2005] Lips, M. und C. Gazzarin: Wie steht es um die Auslastung?. In UFA- Revue 3/05. Winderthur 2005.
- [MWV 2003] Mineralölwirtschaftsverband: Jahresbericht Mineralöl-Zahlen 2002. Hamburg 2003.
- [MWV 2008] Mineralölwirtschaftsverband: Jahresbericht Mineralöl-Zahlen 2007. Hamburg 2008.
- [Nertwig 2008] Telefongespräch mit Stefan Nertwig, TÜV-Nord am 16.12.2008.
- [Schulte 2009] Email von Leif-Erik Schulte, TÜV-Nord vom 13.1.2009
- [Universität Hohenheim 2001] Vorgrimler, D. und D. Wübben: Prognose der Entwicklung des Agrartechnikmarktes. Eine Expertenbefragung nach der Delphi-Methode. Hohenheimer Agrarökonomische Arbeitsberichte Nr. 7. Hohenheim 2001.
- [VDMA 2008] Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau, Fachverband Landtechnik: Email vom 6.11.2008.
- [ZdB 2008] Zentralverband Deutsches Baugewerbe: Email vom 4.11.2008.

## 8 Verzeichnis der Tabellen und Abbildungen

### 8.1 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Grenzwerte für Dieselmotoren nach der EU-Nonroad-Richtlinie .....	3
Tab. 2: Lastfaktoren für landwirtschaftliche Maschinen .....	8
Tab. 3: Nutzungsstunden für landwirtschaftliche Maschinen .....	9
Tab. 4: Lastfaktoren für Maschinen in der Bauwirtschaft.....	11
Tab. 5: Jährliche Nutzungsstunden für Maschinen in der Bauwirtschaft .....	12
Tab. 6: Bestand an Geräten und Maschinen in der Forstwirtschaft.....	14
Tab. 7: Differenzierung der Forwarder und Vollernter nach Motorleistung .....	15
Tab. 8: Nutzungsstunden für Maschinen in der Forstwirtschaft.....	16
Tab. 9: Abschätzung des Gerätebestandes mit Verbrennungsmotor in der Grünpflege .....	18
Tab. 10: Geräte mit Verbrennungsmotor im Bereich Grünpflege .....	19
Tab. 11: Nutzungsstunden von Geräten mit Verbrennungsmotor in der Grünpflege .....	20
Tab. 12: Ableitungsregeln für Emissionsfaktoren ab Stufe III .....	24
Tab. 13: Basisemissionsfaktoren für Dieselmotoren ab Stufe III .....	25
Tab. 14: Emissionsfaktoren N <sub>2</sub> O und NH <sub>3</sub> .....	26
Tab. 15: Anteil der Methanemissionen an den gesamten HC-Emissionen .....	26
Tab. 16: Transiente Anpassungsfaktoren .....	27
Tab. 17: Verwendung der Transienten Anpassungsfaktoren.....	28
Tab. 18: Unterschiede in der Datenqualität für Straßenverkehr und mobile Maschinen .....	37

## 8.2 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Bestand 1980 - 2020 Zugmaschinen (links) und Mähdrescher (rechts).....	6
Abb. 2: Anteile der Leistungsklassen am Bestand der Zugmaschinen 1980 - 2020.....	6
Abb. 3: Entwicklung des Bauvolumens in Deutschland .....	13
Abb. 4: Bestandsentwicklung großer Maschinen in der Forstwirtschaft .....	15
Abb. 5: Holzeinschlag (links) und damit korrelierte Nutzungsstunden (rechts).....	17
Abb. 6: Anteil Viertaktmotoren am Bestand handgehaltener Gartengeräte .....	19
Abb. 7: Bestand an Fahrgastschiffen 1980-2020 .....	21
Abb. 8: Abweichung der Emissionsfaktoren in [IFEU 2004] von [BAFU 2008] .....	23
Abb. 9: Kraftstoffverbrauch nach Sektoren (links) und Motortyp (rechts) .....	29
Abb. 10: NO <sub>x</sub> - (links) und Partikelemissionen (rechts) nach Sektoren .....	30
Abb. 11: CO (links) und HC-Emissionen (rechts) nach Sektoren .....	30
Abb. 12: Ergebnisse für neue Schadstoffe (CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, NH <sub>3</sub> ) .....	31
Abb. 13: Gesamtkraftstoffverbrauch im Vergleich.....	33
Abb. 14: Gesamte NO <sub>x</sub> - (links) und Partikelemissionen (rechts) im Vergleich.....	33
Abb. 15: Gesamte CO- (links) und HC-Emissionen (rechts) im Vergleich.....	34
Abb. 16: Dieserverbrauch in der Landwirtschaft 1980-2020 .....	35