

TEXTE

24/2014

Erarbeitung eines Konzepts zur Minderung der Umweltbelastung aus NRMM (non road mobile machinery) unter Berück- sichtigung aktueller Emissionsfaktoren und Emissionsverminderungs- optionen für den Bestand

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungskennzahl 3710 45 191
UBA-FB 001913

**Erarbeitung eines Konzepts zur
Minderung der Umweltbelastung aus
NRMM (non road mobile machinery)
unter Berücksichtigung aktueller
Emissionsfaktoren und Emissions-
verminderungsoptionen für den Bestand**

von

Hinrich Helms

Christoph Heidt

ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

UMWELTBUNDESAMT

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/erarbeitung-eines-konzepts-zur-minderung-der> verfügbar.

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

ISSN 1862-4804

Durchführung der Studie: ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
Wilckenstr. 3
69120 Heidelberg

Abschlussdatum: Dezember 2013

Herausgeber: Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel.: 0340/2103-0
Telefax: 0340/2103 2285
E-Mail: info@umweltbundesamt.de
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>
<http://fuer-mensch-und-umwelt.de/>

Redaktion: Fachgebiet I 3.2 Schadstoffminderung und Energieeinsparung im Verkehr
Helge Jahn

Dessau-Roßlau, März 2014

Kurzbeschreibung

Mobile Maschinen stellen eine wichtige Quelle motorischer Emissionen dar, deren Emissionsregulierung jedoch gegenüber Straßenfahrzeugen erst deutlich später erfolgte. Die Partikelemissionen der mobilen Maschinen liegen daher heute etwa so hoch wie die des gesamten Straßenverkehrs, bei Stickoxiden erreichen sie etwa ein Viertel. Da die europäischen Luftqualitäts-grenzwerte hinsichtlich der Feinstaub- und NO₂-Belastung nach wie vor an vielen städtischen Messstellen in Deutschland überschritten werden, müssen auch mobile Maschinen in die Luftreinhaltplanung einbezogen werden. Diese haben zwar einen begrenzten Beitrag zur lokalen Hintergrundbelastung in Städten, können jedoch lokal erhebliche Zusatzbelastung verursachen. Ziel der Studie ist es, den Emissions- und Immissionsbeitrag mobiler Maschinen aufzuzeigen und daraus Minderungsmöglichkeiten und -konzepte abzuleiten und zu bewerten.

Es zeigt sich, dass eine Weiterentwicklung der EU-Richtlinie 97/68/EG ein erhebliches Potenzial zur langfristigen Senkung der Emissionen mobiler Maschinen und insbesondere der Baumaschinen hat. Die Formulierung eines Partikelanzahlgrenzwertes für Neumaschinen ist aus Gesundheitssicht dringend geboten und könnte eine frühzeitige Filterausstattung beim OEM befördern. Eine erweiterte Grenzwertgesetzgebung zeigt aber im Gesamtbestand erst verzögert eine deutliche Minderungswirkung. Für eine kurzfristige Senkung der Emissionen mobiler Maschinen, insbesondere in stark belasteten Gebieten, sind daher zusätzliche Maßnahmen für den Bestand erforderlich. Einen kosteneffizienten Ansatz bietet die Nachrüstung größerer und neuerer Maschinen mit DPF, ältere Maschinen können dagegen vorzeitig durch neue, sauberere Maschinen ersetzt werden. Die Umsetzung für den Bestand könnte durch die Kommunen, z.B. in Umweltzonen, erfolgen, hierfür wäre aber eine nationale Kennzeichnung erforderlich.

Abstract

Non Road Mobile Machinery are an important source of exhaust emissions, because an emission regulation has been introduced later than for road vehicles. Particle emissions of mobile machinery today are about as high as road traffic emissions, NO_x emissions amount about a quarter of road traffic emissions. Since European air quality standards concerning particles and NO₂ are exceeded at many urban measurement sites, also mobile machinery have to be considered for future air quality measures. Though the contribution to the overall urban background concentration is limited, especially construction machinery can locally increase the concentration level considerably. This study aims to analyze the contribution of mobile machinery to urban emissions and pollutant concentrations and to identify options for reduction measures and develop potential concepts.

The analysis shows that the further development of EU directive 97/68/EC has a considerable potential for a mid- to long-term reduction of mobile machinery, especially construction equipment. The definition of particulate number limits for new engines has priority to mitigate the environmental impact on public health and further trigger the installation of DPF in new machinery. The reduction effect, however, is delayed. For a short-term improvement of the urban air quality situation, further measures for existing equipment are necessary. A cost efficient approach could be DPF-retrofitting of larger and newer machinery while old equipment can be replaced by new, clean equipment. A uniform national labeling could give municipalities the possibility for a regulation of existing equipment, e.g. in low emission zones.

Minderung der Umweltbelastung aus mobilen Maschinen (NRMM)

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	9
Tabellenverzeichnis.....	12
Abkürzungen	14
1 Zusammenfassung	15
1.1 Emissionen mobiler Maschinen.....	15
1.2 Immissionen mobiler Maschinen	16
1.3 Maßnahmenanalyse	17
1.4 Handlungsempfehlungen.....	20
2 Summary	23
2.1 Emissions from nonroad mobile machinery.....	23
2.2 Air quality impacts of nonroad mobile machinery.....	24
2.3 Evaluation of Measures	25
2.4 Policy recommendations	28
3 Einleitung.....	30
4 Hintergrund.....	32
4.1 Emissionen mobiler Maschinen im Vergleich zum Straßenverkehr	32
4.2 Überschreitungen der Luftqualitätsgrenzwerte in Städten.....	33
4.3 Gesundheitsgefährdung durch Dieselpartikel	34
4.4 Bisherige Maßnahmen anderer Länder und Akteure	35
5 Immissionsbeitrag mobiler Maschinen in Städten	37
5.1 PM ₁₀ -Beiträge im Stadtgebiet.....	37
5.2 Modellierung lokaler PM ₁₀ -Beiträge	38
5.3 Motorische PM ₁₀ -Zusatzbelastung im Fallbeispiel	41
5.4 PM ₁₀ -Belastung durch Aufwirbelung im Fallbeispiel	43
5.5 NO ₂ -Beiträge im Stadtgebiet.....	45
5.6 NO ₂ -Zusatzbelastung im Fallbeispiel.....	47
6 Bewertung technischer Minderungsmaßnahmen	49
6.1 Technische Minderungsmöglichkeiten.....	49
6.2 Kosteneffizienz der Partikelfilternachrüstung	51
6.3 Filterausstattung von Neumaschinen als OEM-Lösung	53
6.4 Kosteneffizienz einer SCR-Nachrüstung.....	54
6.5 Kosteneffizienz der vorgezogenen Anschaffung von Neumaschinen	55
7 Umsetzung und Wirkung von Minderungsmaßnahmen	58

7.1	Erwartete Emissionsentwicklung nach aktueller Grenzwertgesetzgebung.....	58
7.2	Auswirkungen einer Weiterentwicklung der Emissionsgrenzwerte.....	60
7.3	Emissionsreduktion durch kurzfristige Maßnahmen im Bestand	63
7.4	Auswirkung auf die lokale Luftqualität im Fallbeispiel.....	65
7.5	Umsetzbarkeit lokal begrenzter Maßnahmen	67
8	Handlungsempfehlungen	69
9	ANHANG I: TREMOD-MM - Eingangsdaten und Methoden.....	72
9.1	Berechnungsmethode	72
9.2	Bestände.....	73
9.2.1	Bestandsentwicklung nach Maschinengattung.....	73
9.2.2	Zusätzliche Annahmen bei Generatoren.....	75
9.2.3	Aufteilung nach Leistung und Alter	76
9.3	Nutzung	79
9.3.1	Jährliche Betriebsstunden.....	79
9.3.2	Differenzierung nach Leistung, Alter und Bezugsjahr	81
9.3.3	Lastfaktoren.....	83
9.4	Emissionsfaktoren.....	84
9.4.1	Basisemissionsfaktoren	84
9.4.2	Verschlechterungsfaktoren	84
9.4.3	Transiente Anpassungsfaktoren	84
9.5	Ergebnisse aller Sektoren.....	86
10	ANHANG II: Maßnahmen und Fallbeispiele.....	88
10.1	Emissionsfaktoren für OEM-Maßnahmenszenarien.....	88
10.2	Partikelfilterkosten	88
10.3	SCR-Kosten	90
10.4	Restlebenszeit der Maschinen und Retrofit-Systeme.....	91
10.5	Emissionen der Beispielbaustellen	92
11	ANHANG III: Expertenworkshop ‚Mobile Maschinen und Luftreinhaltung‘	94
12	Quellenverzeichnis.....	95

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Vergleich der deutschlandweiten NO _x - und Partikelemissionen des Straßenverkehrs und mobiler Maschinen für das Jahr 2010	15
Abbildung 2:	Entwicklung der PM-Emissionen mobiler Maschinen (alle Sektoren) mit Weiterentwicklung der Emissionsgrenzwerte ab 2020	18
Abbildung 1:	Entwicklung der NO _x -Emissionen mobiler Maschinen (alle Sektoren) mit Weiterentwicklung der Emissionsgrenzwerte ab 2020	18
Abbildung 3:	Minderungspotenzial durch kurzfristige Maßnahmen im Baumaschinenbestand hinsichtlich der PM- und NO _x -Emissionen.....	19
Abbildung 4:	Kosten pro vermiedener PM-Emission und Maschine durch DPF-Nachrüstung in Abhängigkeit der Lebenszeit für das Jahr 2015; Externe Kosten durch 1 kg PM-Emission.....	20
Abbildung 5:	Mehrsäulenstrategie zur Emissionsminderung von Mobilen Maschinen	22
Abbildung 6:	Comparison of NO _x and particulates emissions from the on road sector with NRMM in 2010	23
Abbildung 7:	Development of PM emissions of NRMM (all sectors) with additional emission limits from 2020 on	25
Abbildung 8:	Development of the NO _x emissions of NRMM (all sectors) with additional emission limits from 2020 on	26
Abbildung 9:	PM and NO _x reduction potential of short term measures for construction machinery	27
Abbildung 10:	Costs per reduced PM emission and equipment unit for DPF retrofit depending on the average equipment life in 2015; External costs through 1 kg PM emissions.....	28
Abbildung 11:	Pillars of the emission reduction strategy for mobile machinery.....	30
Abbildung 12:	Vergleich der deutschlandweiten NO _x - und Partikelemissionen des Straßenverkehrs und mobiler Maschinen für das Jahr 2010	32
Abbildung 13:	Anteil des Kfz-Verkehrs, mobiler Maschinen und sonstiger Quellen an der PM ₁₀ -Belastung (JMW) im städtischen Hintergrund	37
Abbildung 14:	PM ₁₀ -Konzentrationsspitzen durch Bautätigkeit neben der Station Mariendorfer Damm in der Zeit vom 19.07. bis 26.07.2009 (1/2-h-Werte).....	39
Abbildung 15:	Lage und Umgebung der untersuchten Beispielbaustellen in der Frankfurter Allee (links) und am Mariendorfer Damm (rechts).....	39
Abbildung 16:	Jahresmittelwert der lokalen PM ₁₀ - Zusatzbelastung aus Abgas durch Straßenverkehr (links) und eine Beispielbaustelle (rechts) für das Untersuchungsgebiet Frankfurter Allee.....	41

Abbildung 17:	Jahresmittelwert der lokalen PM ₁₀ - Zusatzbelastung aus Abgas durch Straßenverkehr (links) und eine Beispielbaustelle (rechts) für das Untersuchungsgebiet Mariendorfer Damm.....	42
Abbildung 18:	Virtuelle PM ₁₀ - Gesamtbelastung aus Abgas sowie Abrieb und Aufwirbelung ohne (links) und mit Beispielbaustelle (rechts) für das Untersuchungsgebiet Mariendorfer Damm.....	43
Abbildung 19:	Anteil des Kfz-Verkehrs, mobiler Maschinen und sonstiger Quellen an der NO ₂ -Belastung (JMW) im städtischen Hintergrund	46
Abbildung 20:	Jahresmittelwert der NO ₂ - Gesamtbelastung ohne (links) und mit Beispielbaustelle (rechts) für das Untersuchungsgebiet Frankfurter Allee	47
Abbildung 21:	Jahresmittelwert der NO ₂ - Gesamtbelastung ohne (links) und mit Beispielbaustelle (rechts) für das Untersuchungsgebiet Mariendorfer Damm.....	47
Abbildung 22:	Kosten pro vermiedener PM-Emission und Maschine durch DPF-Nachrüstung in Abhängigkeit der Lebenszeit für das Jahr 2015; Externe Kosten durch 1 kg PM-Emission.....	52
Abbildung 23:	Kosten pro vermiedener NOx-Emission und Maschine durch SCR-Nachrüstung in Abhängigkeit der Lebenszeit für das Jahr 2015; Externe Kosten durch 1 kg NOx-Emission.....	55
Abbildung 24:	Vergleich der Kosteneffizienz pro verminderte PM-Emission durch Nachrüstung und vorzeitige Neuanschaffung anhand von zwei Beispielmaschinen.....	56
Abbildung 25:	Vergleich der zukünftigen Entwicklung der PM -Emissionen bei mobilen Maschinen und dem Straßenverkehr in Deutschland nach Emissionsstandards (Business-as-usual-Szenario).....	58
Abbildung 26:	Vergleich der zukünftigen Entwicklung der NOx -Emissionen bei mobilen Maschinen und dem Straßenverkehr in Deutschland nach Emissionsstandards (Business-as-usual-Szenario).....	59
Abbildung 27:	Entwicklung der PM-Emissionen mobiler Maschinen (alle Sektoren) mit Weiterentwicklung der Emissionsgrenzwerte ab 2020	61
Abbildung 28:	Entwicklung der NOx-Emissionen mobiler Maschinen (alle Sektoren) mit Weiterentwicklung der Emissionsgrenzwerte ab 2020	62
Abbildung 29:	Minderungspotenzial durch kurzfristige Maßnahmen im Baumaschinenbestand hinsichtlich der PM- und NOx-Emissionen.....	64
Abbildung 30:	Lokale PM ₁₀ -Belastung (JMW) durch mit DPF nachgerüstete Baumaschinen der Stufe II (links) und Neumaschinen (rechts).....	65
Abbildung 31:	Mehrsäulenstrategie zur Emissionsminderung von Mobilen Maschinen	69
Abbildung 32:	Differenzierung der Eingangsdaten in TREMOD-MM und Zuordnung zu den Emissionsfaktoren.....	73

Abbildung 33:	Bestandsentwicklung und Datenquellen von Baggern und Ladern.....	74
Abbildung 34:	Bestandsverteilung nach Maschinenalter	78
Abbildung 35:	Jährliche Betriebsstunden nach kW-Klassen im Vergleich	81
Abbildung 36:	Jährliche Betriebsstunden von Baumaschinen in Abhängigkeit des Maschinenalters.....	82
Abbildung 37:	Korrekturfaktoren für konjunkturell bedingte jährliche Betriebsstunden	82
Abbildung 38:	Zusammenhang zwischen Lastfaktor und transientem Anpassungsfaktor bei verschiedenen Lastkollektiven am Beispiel PM	85
Abbildung 39:	Entwicklung des Diesel- (links) und Benzinverbrauchs (rechts) nach Sektoren	86
Abbildung 40:	Entwicklung der PM- (links) und NOx-Emissionen (rechts) nach Sektoren.....	86
Abbildung 41:	Entwicklung der HC- (links) und CO-Emissionen (rechts) nach Sektoren.....	87

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Überschreitungshäufigkeiten der Luftqualitätsgrenzwerte für NO ₂ - und PM ₁₀ in Deutschland von 2010 bis 2012.....	33
Tabelle 2:	Beispiele für geplante/bestehende Emissionsminderungsmaßnahmen bei mobilen Maschinen über die EU-Emissionsgrenzwertgesetzgebung hinaus	36
Tabelle 3:	Maximale PM ₁₀ -Zusatzbelastungen durch Abgas an den Auswertepunkten im Jahres-, Tages-, und Stundenmittelwert	42
Tabelle 4:	PM ₁₀ -Jahresmittelwerte und mögliche Tagesmittelwertüberschreitungen an der Baustelle Mariendorfer Damm	44
Tabelle 5:	Jahresmittelwerte der NO _x -Zusatzbelastung und NO ₂ - Gesamtbelastung an den Auswertungspunkten	48
Tabelle 6:	Entwicklung der Emissionsfaktoren/Grenzwerte bei PM und NO _x (in g/kWh)	49
Tabelle 7:	Abgasminderungstechnologien und spezifische Emissionsminderungsraten.....	50
Tabelle 8:	Zusätzliche Emissionsminderungen durch die Szenarien zur Weiterentwicklung der Grenzwertgesetzgebung	62
Tabelle 9:	Beispielhafte Optionen für die Regulierung von bestehenden Baumaschinen	63
Tabelle 10:	PM ₁₀ , NO _x und NO ₂ -Belastung in den Maßnahmenszenarien am Auswertungspunkt Mariendorer Damm	66
Tabelle 11:	Beispielhaftes Kennzeichnungsschema für mobile Maschinen > 37 kW	68
Tabelle 12:	Quellen für Baumaschinenbestände in Deutschland nach Bezugsjahren.....	73
Tabelle 13:	Bestände nach Maschinenkategorie in Bauwirtschaft und Industrie für 2010	75
Tabelle 14:	Anpassung der kW-Klassen bei Generatoren von DESTATIS auf TREMOM-MM.....	75
Tabelle 15:	Anteile der Generatorenbestände an mobilen Quellen	76
Tabelle 16:	Anteile der Maschinenbestände nach Größenklassen 2010	77
Tabelle 17:	Mittlere Lebenszeiten der Maschinentypen.....	79
Tabelle 18:	Aktuelle jährliche Betriebsstunden im Vergleich mit internationalen Studien.....	80
Tabelle 19:	Quellen und aktuelle Lastfaktoren nach Maschinentyp.....	83
Tabelle 20:	Transiente Anpassungsfaktoren für Motoren vor Stufe IIIB	85
Tabelle 21:	Emissionsfaktoren für PM und NO _x in den OEM- Maßnahmenszenarien und Vergleich mit dem BAU-Szenario	88

Tabelle 22:	Verwendete Quellen zur Ermittlung der Partikelfilterkosten	89
Tabelle 23:	Investitions- und laufende Kosten für die Nachrüstung mit Partikelfiltern in Euro	89
Tabelle 24:	Kostenangaben zur Nachrüstung von Dieselmotoren mit SCR- Systemen.....	90
Tabelle 25:	Eigene Annahmen zu SCR-Kosten.....	91
Tabelle 26:	Mittleres Alter und Restlebenszeit der DPF/SCR-Systeme und Maschinen nach kW- Klassen und Emissionsstandard	92
Tabelle 27:	Übersicht der Parameter und berechneten Emissionen der untersuchten Beispielbaustellen.....	93
Tabelle 28:	Summe der täglichen Abgasemissionen für die Baustelle Mariendorfer Damm in den Minderungsszenarien.....	93
Tabelle 29:	Teilnehmer des Expertenworkshops im März 2012.....	94

Abkürzungen

AGR	Abgasrückführung
BAU	Business as usual
CO	Kohlenmonoxid
DPF	Dieselpartikelfilter
EF	Emissionsfaktor
EU	Europäische Union
FAD	Förderkreis Abgasnachbehandlungstechnologien für Dieselmotoren
HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs
HC	Hydrocarbons (Kohlenwasserstoffe)
IFEU	Institut für Energie- und Umweltforschung
JMW	Jahresmittelwert
Kfz	Kraftfahrzeuge
kW	Kilowatt
LF	Lastfaktor
LRV	Luftreinhalteverordnung
MISKAM	Mikroskaliges Klima- und Ausbreitungsmodell
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO _x	Stickoxide (Stickstoffmonoxid + Stickstoffdioxid)
NRMM	Non Road Mobile Machinery
OEM	Original Equipment Manufacturer
OHR	Off-Highway Research
PM10	Particulate Matter (<10µm)
REC	Retrofit Emission Control
SCR	Selective Catalytic Reduction
SMW	Stundenmittelwert
SO ₂	Schwefeldioxid
TAF	Transient Adjustment Factor
TMW	Tagesmittelwert
TREMOD	Transport Emission Model
TREMOD-MM	Transport Emission Model - Mobile Machinery
TRGS	Technische Regelungen für Gefahrenstoffe
UBA	Umweltbundesamt
UFOPLAN	Umweltforschungsplan

1 Zusammenfassung

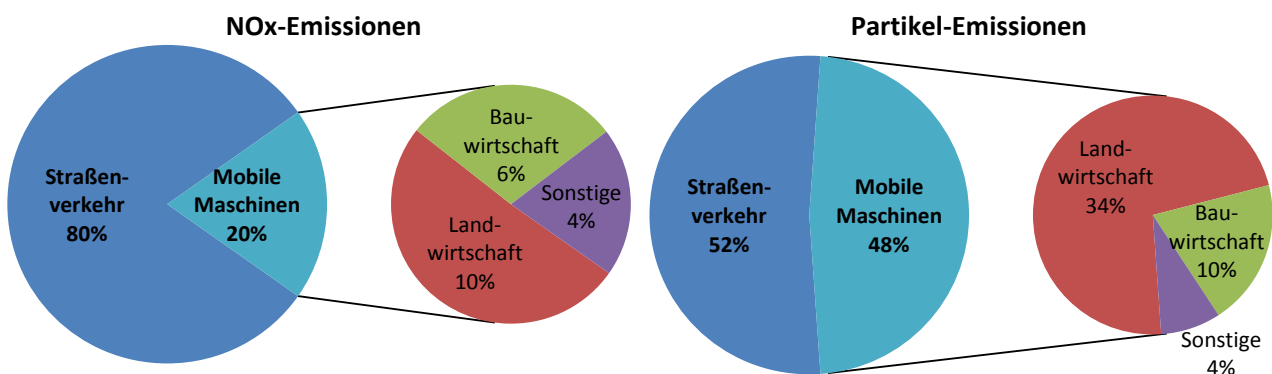
Mobile Maschinen und Geräte haben nach bisherigen Untersuchungen des IFEU (FKZ 299 45 113) einen hohen Anteil an den NO_x- und Dieselpartikelemissionen in Deutschland. Die hohen Emissionen sind darauf zurückzuführen, dass die bisherigen Abgasgrenzwerte weniger streng sind als im Straßenverkehr und teilweise auch noch viele ältere Dieselmotoren eingesetzt werden. Gleichzeitig gibt es für diese Maschinen bisher keine Einsatzbeschränkungen in Umweltzonen, obwohl die Luftqualitätsgrenzwerte für PM₁₀ und NO₂ an vielen hoch belasteten Gebieten in Deutschland überschritten werden.

Es ist daher geboten ein Konzept zur raschen und effektiven Minderung des durch mobile Maschinen verursachten Beitrags zu diesen Umweltbelastungen zu erstellen. Um dies zu ermöglichen, musste zunächst der Emissionsbeitrag mobiler Maschinen in Deutschland ermittelt werden. Das Modell TREMOD-MM ermöglicht eine detaillierte Berechnung der Emissionen von mobilen Geräten und Maschinen in der Landwirtschaft, Bauwirtschaft, Industrie, Grünpflege und Forstwirtschaft sowie der Sport- und Fahrgastschiffahrt. Dabei werden differenzierte Annahmen zur Flottenstruktur, zur Nutzung und zu den Emissionen berücksichtigt.

1.1 Emissionen mobiler Maschinen

Mobile Maschinen und Geräte werden in verschiedenen Sektoren, darunter in der Land- und Bau- und Forstwirtschaft, in der Industrie sowie in Haushalten und bei Freizeitaktivitäten eingesetzt. Viele dieser Geräte besitzen Verbrennungsmotoren und stoßen damit Schadstoffemissionen aus. Zwar werden diese über die EU-Richtlinie 97/68/EG begrenzt, die Emissionsgrenzwerte wurden aber wesentlich später als beispielsweise im Straßenverkehr eingeführt. Die aktuellen Berechnungen zeigen, dass mobile Maschinen deutschlandweit insgesamt etwa ein Viertel der NO_x Emissionen des Straßenverkehrs verursachen, bei den Partikelemissionen (PM) liegt der Beitrag der mobilen Maschinen beinahe genauso hoch wie der des Straßenverkehrs. 2010 entsprach dies deutschlandweit einer Menge von 123,6 Kilotonnen NO_x und 13,5 Kilotonnen abgasbedingtem Feinstaub (sowohl PM₁₀ als auch PM_{2,5}).

Abbildung 1: Vergleich der deutschlandweiten NO_x- und Partikelemissionen des Straßenverkehrs und mobiler Maschinen für das Jahr 2010



©IFEU 2013 (Quellen: TREMOD 5.32, TREMOD-MM 3.0)

Demgegenüber liegt der Energieverbrauch mobiler Maschinen mit 193 PJ bei weniger als 10 % des Straßenverkehrs. Dieser überproportional hohe Emissionsbeitrag wird vorwiegend von Die-

selmanmaschinen in der Landwirtschaft und Bauwirtschaft verursacht. Letztere werden, wie Straßenfahrzeuge, oft auch in städtischen Gebieten eingesetzt und haben damit direkten Einfluss auf die lokale Luftqualität. Möglichkeiten zur Minderung der Abgasemissionen mobiler Maschinen sollten daher dringend untersucht werden.

Im Mittelpunkt der aktuellen Luftreinhalteplanung steht die NO_2 - und Partikel-Belastung vor allem aufgrund der aktuellen Grenzwertüberschreitungen in Ballungsgebieten. Die Kommunen versuchen dabei die Grenzwerteinhalten mit verschiedensten Maßnahmen zu erreichen. Die Einhaltung der Grenzwerte bedeutet jedoch nicht, dass keine weitere gesundheitliche Belastung vorliegt. Da für Partikelemissionen kein Schwellenwert der gesundheitlichen Unbedenklichkeit bekannt ist [Wichmann 2013], gilt aus Gesundheitssicht ein Minderungsgebot auch über die Einhaltung der Grenzwerte hinaus.

Insbesondere bei Partikelemissionen ist für die Gesundheitswirkung zusätzlich die Partikelbeschaffenheit relevant. So gehen die aktuell nach Partikelmasse gemessenen Belastungen zu einem großen Teil auf Abrieb und Aufwirbelung durch Fahrzeuge zurück, die vor allem größere Partikelfraktionen erzeugen. Dabei sind jedoch insbesondere kleinere Partikelfraktionen gesundheitlich relevant. So enthält Dieselruß eine große Anzahl ultrafeiner Partikel, die tief in die Atemwege eindringen: *„Die Exposition gegenüber Dieselruß kann zu akuten Irritationen der Atemwege führen, ferner zu neurophysiologischen Reaktionen sowie Atembeschwerden und Asthma-ähnlichen Symptomen. ... Seit den 1980er Jahren zeigen epidemiologische Studien konsistent ein erhöhtes Lungenkrebsrisiko bei Arbeitern, die gegenüber Dieselruß exponiert waren ...“* [Wichmann 2013]. Zusätzlich hat die WHO Dieselaabgase aufgrund neuerer epidemiologischer Studien als kanzerogen eingestuft [WHO 2012]. So ist der Anteil der Verbrennungsprodukte am gesamten Feinstaub zwar relativ gering, jedoch besonders toxisch.

1.2 Immissionen mobiler Maschinen

In der Fachliteratur wird der Beitrag mobiler Maschinen zur PM_{10} -Belastung meist nur hinsichtlich der städtischen Hintergrundbelastung abgeschätzt. Einer Auswertung von Luftreinhalteplänen der Städte Berlin, Hamburg, Köln und Stuttgart zufolge tragen die Abgasemissionen mobiler Maschinen im Stadtgebiet daher nur zu etwa 0,2 % bis etwa 2 % zur PM_{10} -Konzentration bei. Ein Großteil des städtisch verursachten Anteils entfällt auf sonstige Quellen (z.B. Industrie und Kleinf Feuerung) und den Straßenverkehr. Gerade bei letzterem machen jedoch auch Reifen-, Bremsabrieb und Aufwirbelungsemissionen einen hohen Beitrag aus. In Stuttgart machen Kfz-Abgasemissionen z.B. nur ca. 4 % von insgesamt 17 % der PM_{10} -Emissionen des Straßenverkehrs aus [LUBW 2011].

Für NO_2 wurde aus den Informationen der Luftreinhaltepläne ein Beitrag zur städtischen Hintergrundbelastung von 1-9 % ermittelt. Der NO_2 -Beitrag mobiler Maschinen beträgt damit trotzdem nur einen Bruchteil des Beitrags durch den Kfz-Verkehr. In Einzelfällen wie Berlin und Stuttgart ergibt sich aber absolut ein relevanter Anteil gegenüber sonstigen Quellen.

Die städtische Hintergrundbelastung durch mobile Maschinen kann durch motorische Minderungsmaßnahmen nur begrenzt beeinflusst werden. Höhere Belastungsbeiträge, in deren Folge es auch zu Grenzwertüberschreitungen kommen kann, stammen in der Regel von lokalen Quellen (der sogenannten Zusatzbelastung). In der städtischen Luftreinhalteplanung steht hierbei meist der Straßenverkehr als Verursacher im Vordergrund. Immissionsbeiträge mobiler Maschinen, z.B. aus Baustellen, werden meist eher zufällig erfasst. Dabei kann in der Regel nicht zwischen abgasbedingten und nicht abgasbedingten (z.B. aus Aufwirbelung) entstandenen Partikeln unterschieden werden.

Um die lokale Zusatzbelastung durch mobile Maschinen besser beurteilen zu können, wurden im Rahmen dieses Projektes Ausbreitungsrechnungen für zwei definierte Fallbeispiele durchgeführt. Die untersuchten Beispielbaustellen wurden in direkter Nähe zu realen straßennahen Verkehrsmessstation platziert. Eine kleinere Baustelle wurde an der Frankfurter Allee untersucht, deren Straßenschlucht eine West-Ost-Ausrichtung aufweist. Eine größere Baustelle wurde im Nord-Süd ausgerichteten Mariendorfer Damm auf einem nahegelegenen Parkplatz untersucht.

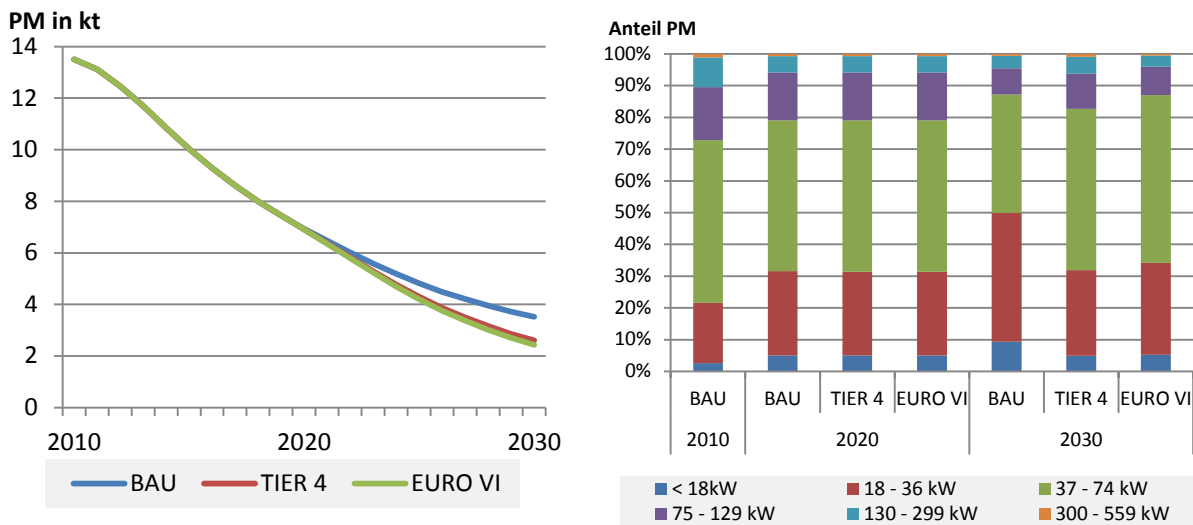
Die Beispiele zeigen eine starke lokale Zusatzbelastung durch Baustellen. So steigt die Partikelbelastung durch die kleinere Baustelle in der Frankfurter Allee (auf dem Mittelestreifen der Straße) um bis zu $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, beim Beispiel Mariendorfer Damm um bis zu $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die Zusatzbelastung durch Kfz-Abgase erreicht dagegen nur $3\text{-}4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die NO_2 -Belastung erhöht sich durch die Baustellen um etwa $1\text{-}4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, der Zusatzbeitrag liegt damit aber deutlich unter dem Straßenverkehr.

1.3 Maßnahmenanalyse

Eine zentrale Maßnahme zur Senkung der Emissionen mobiler Maschinen stellt die Verschärfung oder Erweiterung der Emissionsgrenzwerte für Neumaschinen dar, welche aktuell auch Bestandteil der Agenda für eine Revision der EU-Richtlinie 97/68/EG ist [COM 2013]. Zusätzlich zur bestehenden Gesetzgebung (Business-As-Usual-Szenario (BAU)) wurden zwei Szenarien für die Weiterentwicklung der Emissionsgrenzwerte für Neumaschinen betrachtet: einerseits die Ausdehnung aktueller Grenzwerte auf kleinere Leistungsklassen $<37 \text{ kW}$ in Anlehnung an die US-Grenzwertgesetzgebung Tier 4 (Tier 4-Szenario), andererseits eine zusätzliche Verschärfung der Grenzwerte für Maschinen mit $37\text{-}560 \text{ kW}$ nach dem Vorbild der Stufe Euro-VI für schwere Nutzfahrzeuge (Euro VI-Szenario). Aufgrund des internationalen Gesetzgebungsverfahrens und möglicher Übergangszeiten (z.B. Lagermotoren), gehen beide Szenarien von einer effektiven Einführung der Grenzwerte am Markt ab 2020 aus.

Für die Senkung der bundesweiten PM-Emissionen hat die Einbeziehung von Maschinen $<37 \text{ kW}$ (Tier 4-Szenario) den größten Effekt. Hierbei sticht vor allem die Größenklasse $18\text{-}36 \text{ kW}$ hervor, die zusätzlichen Grenzwerte für Motoren unterhalb 18 kW haben insgesamt einen geringeren Einfluss. Auch eine Verschärfung über den US Standard Tier 4 hinaus auf den EURO-VI-Lkw-Grenzwert führt nur zu einer geringen zusätzlichen Emissionsminderung, da die betroffenen Leistungsklassen $\geq 37 \text{ kW}$ mit Stufe IIIB schon sehr niedrige PM-Emissionen erreichen müssen. Den Euro-VI-Grenzwerten kommt jedoch durch den vorgeschriebenen Partikelanzahlgrenzwert eine wichtige Bedeutung zu. Dieser erfordert nach derzeitigem Kenntnisstand den Einsatz geschlossener Partikelfilter, welcher die PM-Emissionen noch deutlich unterhalb des Grenzwertes senken dürfte. Vor allem aber werden hierdurch besonders gesundheitsgefährdende feine Partikelfractionen abgeschieden.

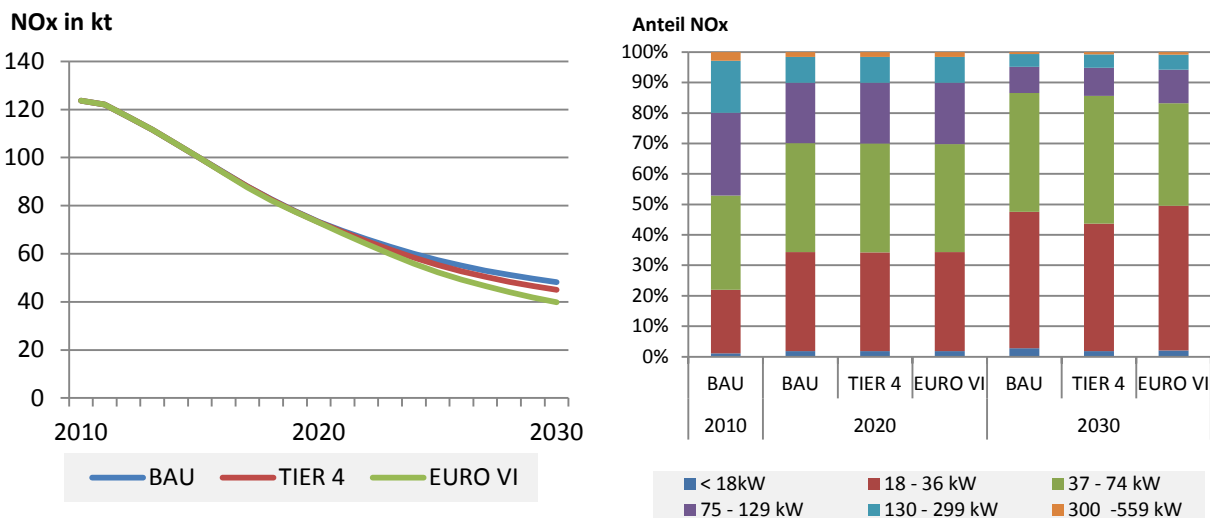
Abbildung 2: Entwicklung der PM-Emissionen mobiler Maschinen (alle Sektoren) mit Weiterentwicklung der Emissionsgrenzwerte ab 2020



©IFEU 2013

Bei den NO_x-Emissionen wirken sich die strengen Grenzwerte von Euro VI stärker aus. Neben den Maschinen < 37 kW werden auch die Emissionen der bisher mit Stufe IIIB regulierten Leistungsklasse 37-56 kW (in TREMOD-MM zusammengefasst zu 37-74 kW) reduziert. Deutliche Minderungseffekte sind aber sowohl bei den PM-, als auch bei den NO_x-Emissionen erst nach 2025 zu erwarten.

Abbildung 3: Entwicklung der NO_x-Emissionen mobiler Maschinen (alle Sektoren) mit Weiterentwicklung der Emissionsgrenzwerte ab 2020



©IFEU 2013

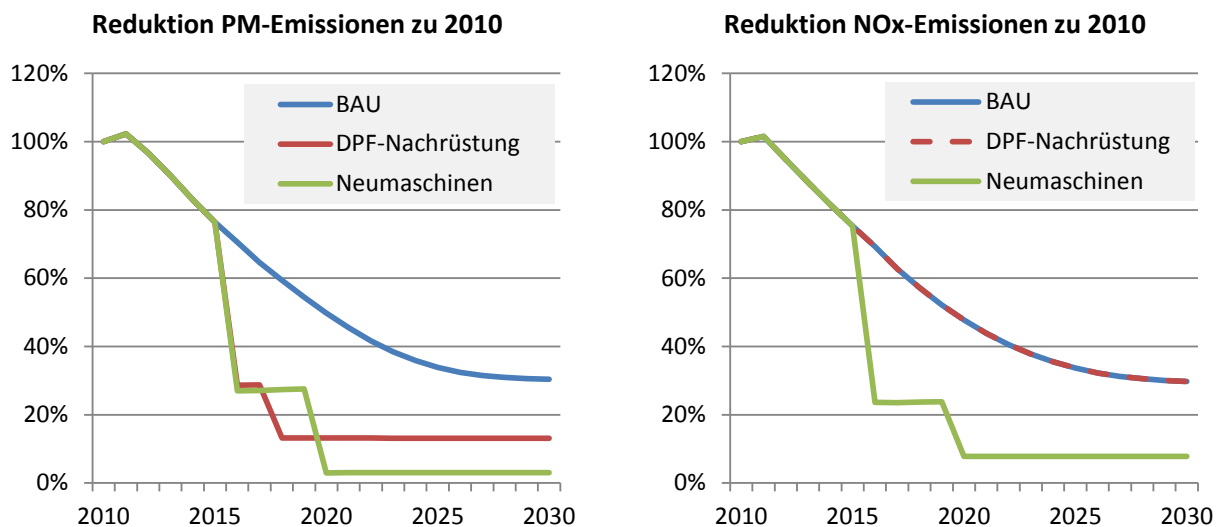
Durch die aktuelle Überschreitung von Luftqualitätsgrenzwerten und des Gefährdungspotenzials von Dieselpartikeln ergibt sich neben der langfristig notwendigen Weiterentwicklung der Grenzwertgesetzgebung auch kurzfristiger Handlungsbedarf. Dieser besteht vor allem in den innerstädtischen Belastungsgebieten und betrifft daher vor allem den Sektor Bauwirtschaft. Eine kurzfristige Minderung der Partikelemissionen kann hier einerseits durch die Nachrüstung der Maschinen mit Partikelfiltern und andererseits durch den gezielten Einsatz von Maschinen ab

Stufe IIIB erreicht werden. Dabei könnte je nach Alter der Maschine die kosteneffizientere Variante zwischen Nachrüstung oder vorgezogener Neuanschaffung gewählt werden.

Die jeweils zu erwartenden Minderungspotenziale der beiden Optionen „DPF-Nachrüstung“ der Bestandsmaschinen und Einsatz von „Neumaschinen“ wurden anhand des durchschnittlichen deutschen Baumaschinenbestands untersucht. Als Szenario für eine kurzfristige Minderungsmaßnahme wird angenommen, dass ab dem Jahr 2016 nur Maschinen >37kW eingesetzt werden dürfen, die mindestens die Abgasstufe IIIB oder IV erfüllen und alle Geräte ab dem Jahr 2020 neue Grenzwerte entsprechend dem Tier4/Euro VI-Szenario einhalten müssen. Alternativ dazu dürfen bestehende Geräte mit einer Leistung >37 kW ab 2016 sowie Geräte mit 18-36 kW ab 2018 weiterhin eingesetzt werden, wenn sie mit einem geschlossenen DPF nachgerüstet sind.

Abbildung 30 zeigt die jeweilige Emissionsminderung der beiden Optionen relativ zum Jahr 2010 in Gegenüberstellung mit dem „Business as usual“ (BAU)-Szenario. Die PM-Emissionen könnten dabei durch beide Optionen schon ab dem Jahr 2016 gegenüber dem BAU-Szenario deutlich reduziert werden. Diese zusätzliche Emissionsminderung wäre vor allem für städtische Gebiete eine Möglichkeit zur Senkung der lokalen Belastung. Eine Minderung der NOx-Emissionen erfolgt hingegen nur durch die Option „Neumaschinen“. Eine Nachrüstung mit SCR-System erscheint aus heutiger Sicht dagegen wenig erprobt und nicht kosteneffizient.

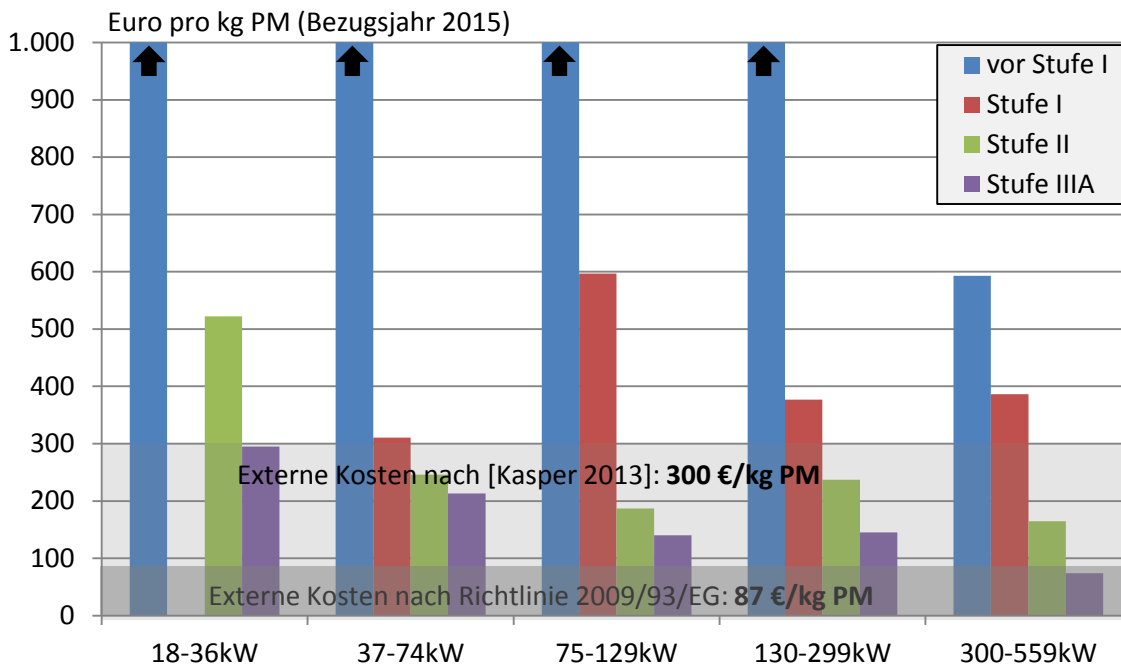
Abbildung 4: Minderungspotenzial durch kurzfristige Maßnahmen im Baumaschinenbestand hinsichtlich der PM- und NOx-Emissionen



©IFEU 2013

Auch wenn die Nachrüstung mit DPF gegenüber dem Einsatz von Neumaschinen eine vergleichbare Minderung der Partikelmasse und keine zusätzliche Minderung der NOx-Emissionen bewirkt, sollte diese als Maßnahme für den Bestand berücksichtigt werden. Nur durch den Einsatz von DPF kann auch schon vor der angenommenen Einführung eines Partikelanzahlgrenzwertes für Neumaschinen ab dem Jahr 2020 eine Reduktion an Feinstpartikeln zuverlässig erreicht werden. Durch die Stufen IIIB und IV ist dies aufgrund des fehlenden Partikelanzahlgrenzwertes nicht gewährleistet. Die Nachrüstung jüngerer Bestandsmaschinen ist dabei auch gegenüber den externen Kosten, z.B. durch Gesundheitsschäden, in vielen Fällen kosteneffizient.

Abbildung 5: Kosten pro vermiedener PM-Emission und Maschine durch DPF-Nachrüstung in Abhängigkeit der Lebenszeit für das Jahr 2015; Externe Kosten durch 1 kg PM-Emission



©IFEU 2013

1.4 Handlungsempfehlungen

Handlungsbedarf besteht besonders hinsichtlich der Partikelbelastung durch mobile Maschinen, bei der NO₂-Belastung bleibt der Straßenverkehr auch lokal der wichtigste Emitter!

Der Beitrag mobiler Maschinen zur städtischen Hintergrundbelastung ist bei Partikeln und NO₂ gering. In den Fallbeispielen konnte jedoch gezeigt werden, dass die lokale Belastung durch Baumaschinen bei PM₁₀ höher liegen kann als durch eine vielbefahrene Straße, bei NO₂ ist der Beitrag dagegen kleiner als der des Straßenverkehrs. Der Einbezug von mobilen Maschinen in die Luftreinhalteplanung ist also insbesondere hinsichtlich der Partikelbelastung sinnvoll.

Aus Gesundheitssicht sollte eine weitgehende Minderung der Partikelemissionen mit Filtern erfolgen, auch über die Grenzwerteinhaltung hinaus.

Für die Kommunen stellt die Einhaltung der Luftqualitätsgrenzwerte nach EU Richtlinie 2008/50 ein wichtiges Ziel dar. Die Einhaltung der PM₁₀-Grenzwerte alleine reicht aus gesundheitlicher Sicht jedoch nicht aus, sondern es müssen vor allem die Dieselabgase und insbesondere die Partikelanzahl weiter reduziert werden. Geschlossene Partikelfilter (DPF) senken neben der ausgestoßenen Partikelmasse vor allem auch die Partikelanzahl. In der Schweiz wird daher der Einsatz geschlossener Partikelfilter oder alternativ die Einhaltung eines Partikelanzahl-grenzwertes bereits seit 2010 umfassend gefordert.

Eine Weiterentwicklung der Richtlinie 97/68/EG ist dringend geboten, dabei sind insbesondere kleinere Leistungsklasse einzubeziehen und ein Partikelanzahlgrenzwert festzulegen.

Die europäische Grenzwertgesetzgebung ist für Neumaschinen das zentrale Instrument zur Minderung der Emissionen. Dabei gilt es zukünftig insbesondere für kleinere Leistungsklassen

(< 37 kW) schärfere Grenzwerte einzuführen, da für diese bisher keine Verschärfung nach Stufe IIIB bzw. IV vorgesehen ist. Ohne Anpassung der Gesetzgebung werden diese Maschinen zukünftig für den größten Anteil der Partikelemissionen der Bauwirtschaft verantwortlich sein. Eine weitere Verschärfung des ab Stufe IIIB geltenden Partikelmassengrenzwertes für Maschinen ≥ 37 kW hat demgegenüber nur einen geringen zusätzlichen Effekt auf die insgesamt ausgestoßene Partikelmasse und trägt somit auch nur wenig zur Grenzwerteinhaltung bei. Um den Ausstoß der ultrafeinen Partikel zu begrenzen, ist es wichtiger – analog zum EURO VI-Standard bei schweren Nutzfahrzeugen – einen Partikelanzahlgrenzwert einzuführen.

Die Szenarienberechnungen zeigen jedoch, dass durch die Weiterentwicklung der Emissionsgrenzwerte eine deutliche Minderungswirkung erst nach dem Jahr 2025 zu erwarten ist. Der Gesetzgebungsprozess dürfte nicht vor 2018 abgeschlossen sein und die neuen Maschinen ersetzen nur sukzessive den Altbestand. Daher sind zusätzliche Maßnahmen notwendig, um einerseits kurzfristig die Grenzwerte auch im direkten Umfeld von Baustellen einhalten zu können und andererseits die gesundheitliche Belastung durch Rußpartikel relevant zu verringern.

Eine Senkung lokaler Emissionen ist kurzfristig über Anforderungen an den Maschinenbestand möglich, zur kosteneffizienten Minderung müssen Alter und Leistung der Maschinen berücksichtigt werden.

Kurzfristiger Handlungsbedarf besteht vor allem für besonders belastete Innenstadtbereiche. Zur Senkung der Partikelemissionen sollte hier entweder der Einsatz von sauberen Neumaschinen oder die Partikelfilternachschrüstung von Bestandsmaschinen gefordert werden. Werden beide Optionen alternativ zugelassen, kann der Betreiber die jeweils kostengünstigste Alternative wählen.

Im Leistungsbereich ≥ 37 kW sind seit dem Jahr 2012 Maschinen mit der Stufe IIIB am Markt verfügbar, die einen deutlich reduzierten Ausstoß der Partikelmasse haben. Eine lokale Minderung der PM-Emissionen könnte hier also entweder durch eine Nachrüstung älterer Bestandsmaschinen ≥ 37 kW oder durch den Einsatz von Maschinen der neuesten Grenzwertstufe (IIIB oder IV) erfolgen. Die neuen Maschinen haben dabei gegenüber nachgerüsteten Maschinen den Vorteil einer Minderung weiterer Schadstoffemissionen, insbesondere NOx.

Für jüngere Maschinen der Stufe IIIA, die noch lange in Betrieb sind, lägen die Kosten einer Nachrüstung in der Regel im Rahmen der externen Kosten durch die vermiedene Partikelbelastung. Eine Nachrüstung dieser Maschinen zur Minderung der Partikelemissionen ist damit kosteneffizient. Bei älteren Maschinen wäre dagegen die vorgezogene Neuanschaffung einer Maschine der Stufe IIIB oder IV vorzuziehen.

Für kleinere Maschinen mit 18-37 kW hat die Weiterentwicklung der Grenzwertgesetzgebung nach EU Richtlinie 97/68 Priorität, da hier noch keine strengen Grenzwerte (vergleichbar Stufe IIIB) definiert wurden. Bis hier strengere Grenzwerte festgelegt werden, kommt als Minderungsmaßnahme nur die Nachrüstung in Betracht. Erst mit der Definition strengerer Grenzwerte ergibt sich auch in dieser Leistungsklasse die Option einer vorzeitigen Anschaffung sauberer Neumaschinen.

Eine national gültige Kennzeichnung von Baumaschinen kann die lokalen Anforderungen vereinheitlichen und sollte Maschinen mit Partikelfilter oder vergleichbarem Emissionsverhalten gesondert auszeichnen.

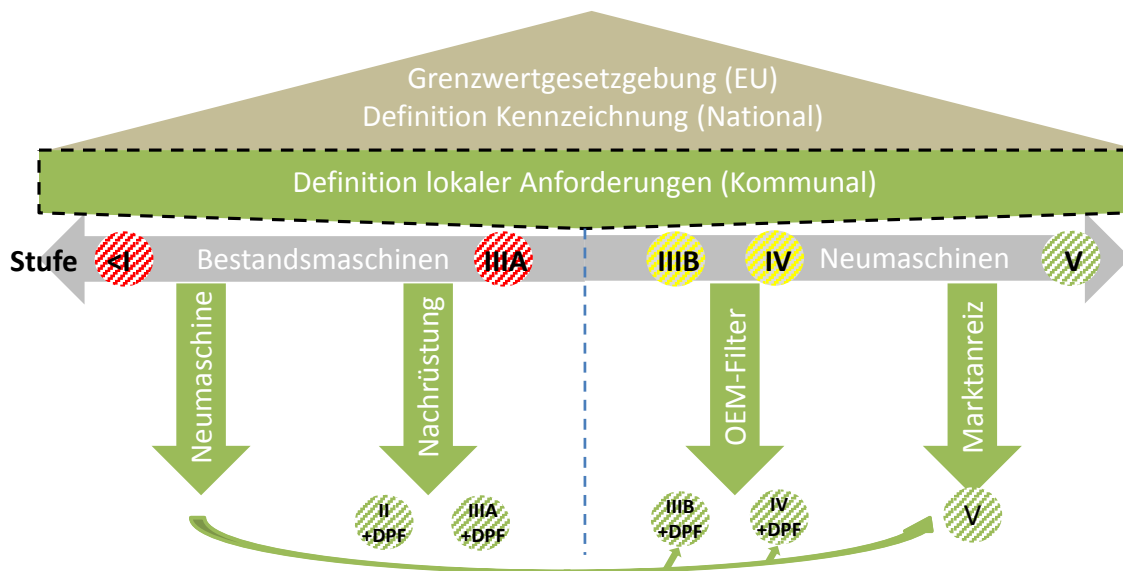
Zur Umsetzung lokaler Maßnahmen ist eine national gültige Kennzeichnung des Emissionsverhaltens sinnvoll um einen ‚Flickenteppich‘ unterschiedlicher Anforderungen zu vermeiden. Die Einbindung mobiler Maschinen in die aktuelle Kennzeichnungsverordnung kann durch den relevanten Emissionsbeitrag gut begründet werden, rechtlich ist sie nach einem Gutachten der

DUH zulässig. Eine differenzierte Kennzeichnung, z.B. analog zum Straßenverkehr in „rot, gelb, grün“, gibt den Kommunen trotzdem die Möglichkeit, die zeitliche Einführung an die lokalen Gegebenheiten anzupassen.

Da die aktuelle Grenzwertgesetzgebung nicht zwingend den Stand der Technik durchsetzt, ist sie als Grundlage für eine Kennzeichnung von Maschinen nicht ausreichend. Die Kennzeichnung von Baumaschinen sollte den Einsatz von DPF (bzw. die Einhaltung eines Partikelanzahl-grenzwertes) gesondert ausweisen. Die Markteinführung von Maschinen einer entsprechenden neuen Grenzwertstufe (z.B. einer Stufe V) würde damit zu dem beschleunigt.

Maschinen < 37 kW, für die bisher kein strenger Partikelgrenzwert nach IIIB festgelegt wurde, könnten bei Bedarf übergangsweise eine Ausnahmekennzeichnung zur Weiternutzung in Umweltzonen erhalten. Zu einem späteren Zeitpunkt, spätestens mit der Verfügbarkeit von Neumaschinen mit Partikelfilter in dieser Leistungsklasse, sollten jedoch auch für diese Geräte strengere Vorgaben gelten.

Abbildung 6: Mehrsäulenstrategie zur Emissionsminderung von Mobilien Maschinen



2 Summary

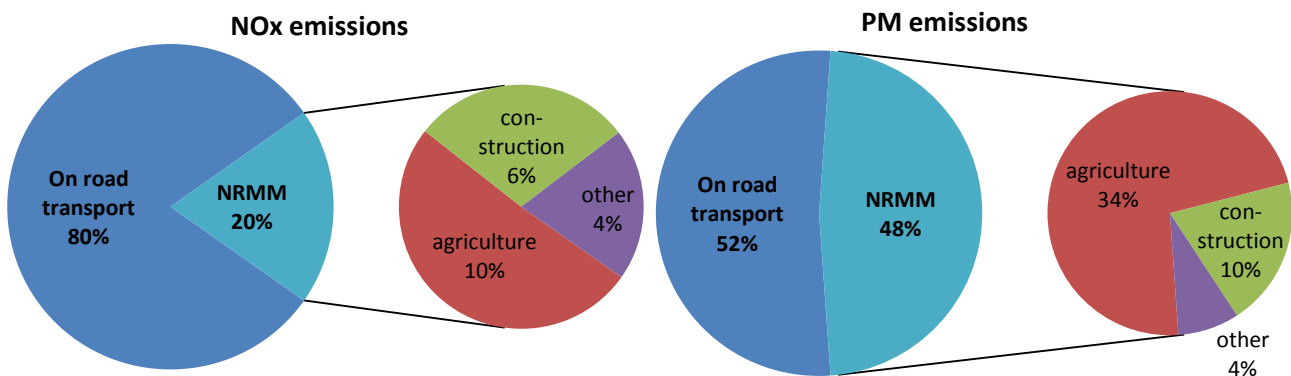
According to previous evaluations by IFEU (FKZ 299 45 113) non road mobile machinery (NRMM) have a high share on NO_x and diesel particulate emissions in Germany. The high emissions are due to less stringent emission limits than in the on road sector and the frequent utilization of old diesel equipment. At the same time there is no restriction for using this equipment in low emission zones, although the air quality limits of PM₁₀ and NO_x are exceeded in many polluted areas in Germany.

Therefore, a concept for a fast and effective reduction of the air pollution from NRMM is to be developed. This also calls for an assessment of the emission contribution of NRMM in Germany. The model TREMOD-MM allows for a detailed calculation of NRMM emissions in agriculture, construction, industry, forestry, gardening, sports and recreational navigation. It is based on specific data on fleet structure, machinery operation and emission behaviour.

2.1 Emissions from nonroad mobile machinery

NRMM operate in different sectors, such as agriculture, forestry, construction and industry, households and gardening, sports and recreational navigation. A large number of this equipment has combustion engines which produce pollutant emissions. Though these emissions are limited according to EU directive 97/68/EU, limit values were introduced much later than in the on road sector. Current evaluations demonstrate that NRMM cause approximately a quarter of the emissions of NO_x and close to the same amount of PM than the on road sector in Germany. In 2010 this corresponds to 123.6 kilo tonnes of NO_x and 13.5 kilo tonnes of exhaust particulates (both, PM₁₀ or PM_{2.5}).

Abbildung 7: Comparison of NO_x and particulates emissions from the on road sector with NRMM in 2010



©IFEU 2013 (Sources: TREMOD 5.32, TREMOD-MM 3.0)

On the other hand the energy consumption of NRMM amounts for only 193 PJ or 10 % of the energy consumption of the on road sector. This disproportionate emission share of NRMM is primarily due to diesel equipment in the agriculture and construction industry. Similarly to road vehicles the latter is often used in urban areas and thus has a direct impact on local air quality. Therefore measures for a reduction of exhaust emissions of NRMM need to be evaluated.

The focus of the current air quality management discussion is NO₂ and particulate pollution in urban areas due to the current exceeding of air quality limits. Local authorities try to comply with these limits with different kinds of measures. However, a compliance with the pollutant

limits does not lead to a no-effect situation in respect to human health impacts. Since there is no known threshold value for particulates, which leads to no adverse health impacts [Wichmann 2013], a reduction even below the current air quality limits should be pursued.

Especially the nature of particulate emissions is relevant for their impact on human health. Currently monitored air quality limits focus on the particulate mass, which mainly descends from larger particles due to abrasion and resuspension from road vehicles. However, especially fine particles are relevant because of their great health impact. Diesel soot contains a large number of ultrafine particulates, which can reach deeply into the respiratory tract: „The exposure to diesel soot can cause acute irritation of the respiratory tract and further neurophysic reactions, difficulties of breathing, and asthmatic symptoms... *since the 1980ies epidemiologic studies indicate consistently an enhanced risk of lung cancer for workers being exposed to diesel soot...*” [Wichmann 2013]. Additionally, the WHO has classified diesel exhausts as carcinogenic based on recent epidemiologic studies [WHO 2012]. As a consequence, these combustion products are highly toxic, even though the contribution to the total particulate mass is relatively low.

2.2 Air quality impacts of nonroad mobile machinery

Scientific literature mostly deals with the PM₁₀ contribution of NRMM to the urban background concentration. According to an evaluation of ‘Clean Air Plans’ from Berlin, Hamburg, Cologne and Stuttgart, exhaust emissions from mobile machinery used in the urban area make a contribution between 0,2 % to 2 % to PM₁₀ concentrations. Emissions from the urban area are mainly caused by road traffic and other sources (e.g. industry and small firing). Road traffic also causes a high share of emissions from abrasion and resuspension. Motor vehicle exhaust emissions in Stuttgart, for instance, only account for 4 % out of a total 17 % of PM₁₀ emissions from road traffic [LUBW 2011].

The contribution of mobile machinery in the urban area to the urban NO₂ background concentration has been assessed from Clean Air Plans in the range of 1-9 %. The NO₂ contribution of NRMM nevertheless accounts only for a small share of the contribution of motorized vehicle traffic. Individual cases such as Berlin and Stuttgart, however, show a relevant absolute emission share compared to other sources.

The influence of measures targeting exhaust emissions from mobile machinery on the urban background concentration is limited. High concentrations which also cause an exceedance of air quality limits are often caused by local sources. Urban air quality planning so far mainly has a focus on road traffic. The contribution of mobile machinery, e.g. from construction sites, has mostly been measured incidentally and the share of exhaust and non-exhaust particles (e.g. resuspension) can often not be distinguished.

An atmospheric dispersion modelling has therefore been undertaken as a part of this project for two case studies for a better assessment of the local contribution from NRMM. The investigated generic construction sites were placed next to two real measuring stations for road traffic. A smaller construction site was investigated in the “Frankfurter Allee” with a west-east oriented street canyon. A larger construction site was investigated at a parking site next to the north-south oriented “Mariendorfer Damm”.

The examples show a high additional contribution by the local construction sites. The smaller construction site at the Frankfurter Allee (in the centre strip of the road) causes an extra PM₁₀ concentration of about 4 µg/m³ (annual average). In the Mariendorfer Damm the PM₁₀ concentration increases by up to 7 µg/m³. On the other hand, the additional pollution from road vehi-

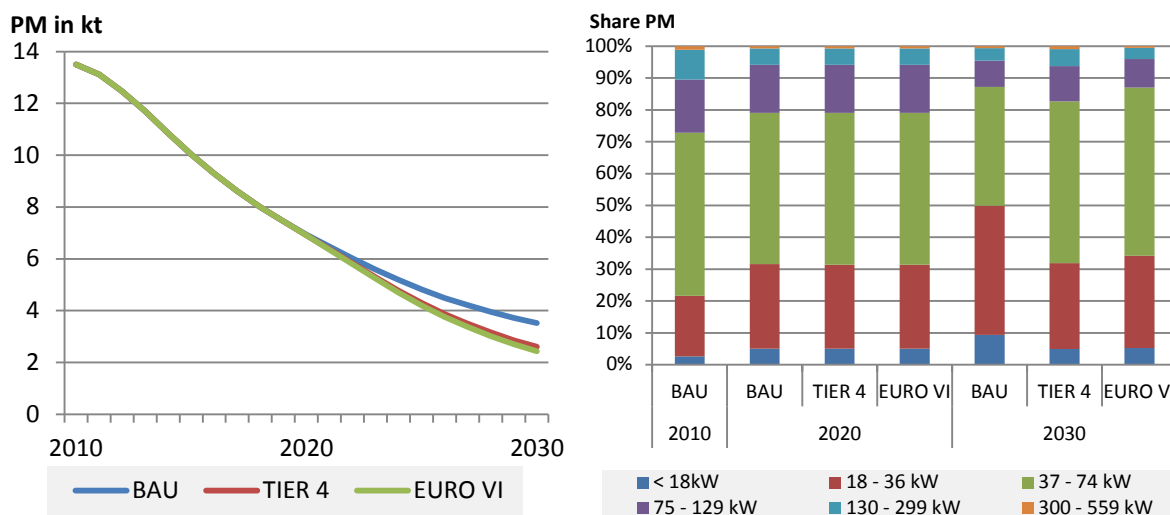
cle exhaust amounts just for 3-4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. The NO_2 concentration with the construction sites is increased by approximately 1-4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, which is significantly below the contribution of road traffic.

2.3 Evaluation of Measures

The most important instrument for the reduction of NRMM emissions is the further development of emission limits for new equipment defined by EU-directive 97/68/EU [COM 2013]. Two scenarios for an update of the current emission legislation have been investigated in addition to a scenario based on the existing emission standards (Business-As-Usual-Scenario (BAU)): First, an extension of current emission limits to smaller equipment <37 kW based on the current US regulations for Tier 4 (Tier 4 scenario). Second, a further tightening of emissions limits for equipment with 37-560 kW along the lines of Euro VI for heavy duty vehicles (Euro VI scenario). Both scenarios assume an implementation of the limits in the market from 2020, due to the international legislation process and a potential need for transitional periods.

The largest reduction effect for PM emissions in Germany is achieved by extending strict standards to engines below 37 kW (Tier 4 scenario). In this size classes, engines with 18-36 kW stand out against engines below 18 kW which have a lower contribution in total. Stricter emission limits based on the Euro VI standard for trucks can only slightly further reduce emissions, since NRMM engines ≥ 37 kW already must comply with stage IIIB which already defines very low PM emissions. However, the importance of the Euro VI emission standard lies in the particle number (PN) limit. According to the current state of knowledge this limit affords the use of closed diesel particulate filters, which may reduce PM emissions even below the emission limits. More important, however, is the fact that fine particulate fractions which are hazardous for human health are trapped and eliminated.

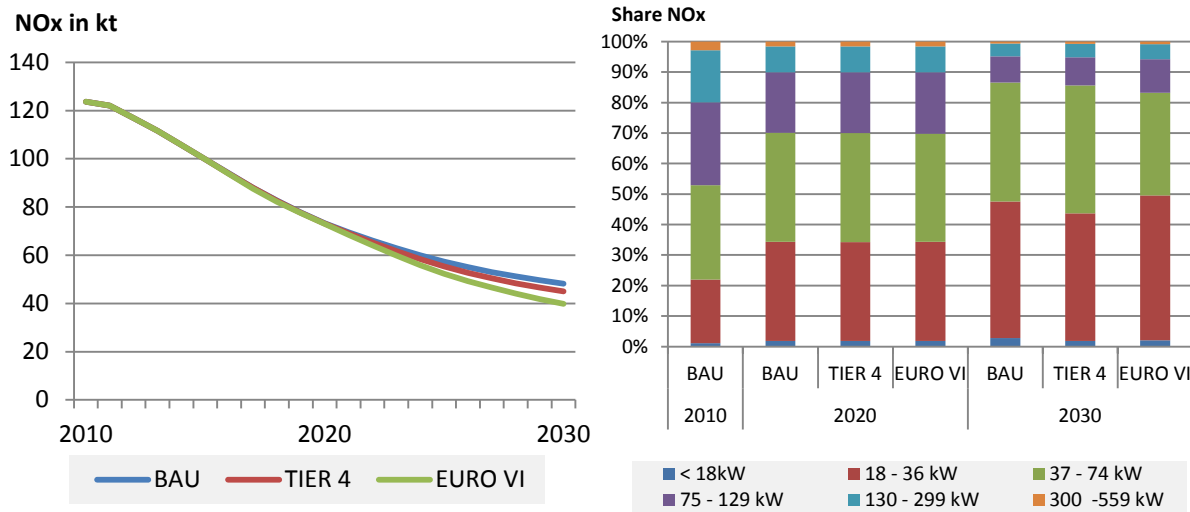
Abbildung 8: Development of PM emissions of NRMM (all sectors) with additional emission limits from 2020 on



©IFEU 2013

The proposed limits based on Euro VI have a greater effect on NO_x emissions. In addition to emissions from engines <37 kW also emissions from Stage IIIB engines with 37-56 kW (in TREMOD-MM as part of the size class 37-75 kW) are reduced. However, significant emission reductions both for PM and NO_x can only be expected just after 2025.

Abbildung 9: Development of the NOx emissions of NRMM (all sectors) with additional emission limits from 2020 on



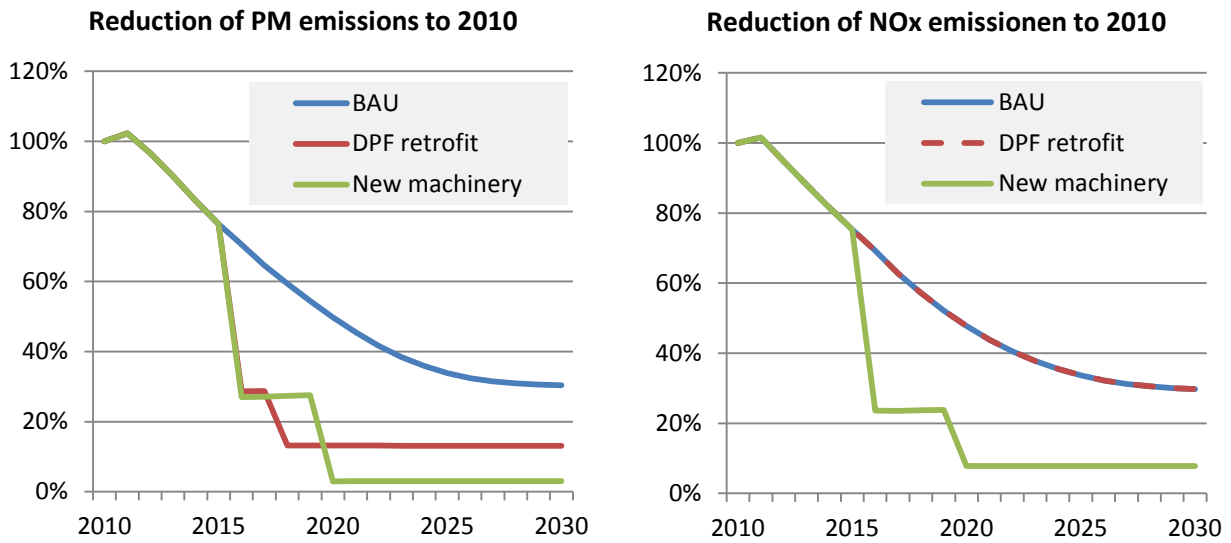
©IFEU 2013

Beside the long term necessity for extended emission standards, short term measures are required with respect to the current exceeding of air quality limits and the potential health hazards from diesel particles. These are most of all an issue for polluted urban areas and should focus especially on the construction sector. A short term reduction of PM emissions can be achieved by retrofitting of equipment with particulate traps or the local utilization of engines with stage IIIB or higher. Depending on the age of the equipment either retrofitting or an earlier purchase of new equipment can offer a cost effective option.

The emission reduction potential of either „DPF retrofit” or “new machinery” has been investigated for the average fleet of construction equipment in Germany. As a scenario for a short term measure it was assumed that engines >37kW must comply at least with stage IIIB or IV from 2016 and the additionally proposed standards for Tier4/Euro VI from 2020 on. As an alternative option, existing equipment with an engine power >37kW is supposed to be retrofitted with a closed DPF from 2016, the same applies for equipment with 18-36 kW from 2018 on.

Abbildung 10 demonstrates the relative emission reduction of both options as well as the “Business as usual” scenario compared to the year 2010. Both options can significantly reduce PM emissions after 2016 in comparison to the BAU scenario. A reduction of NOx emissions occurs only with the use of „new machinery” because only few experiences have been made with retrofitting of SCR systems which has also been demonstrated to be not cost efficient.

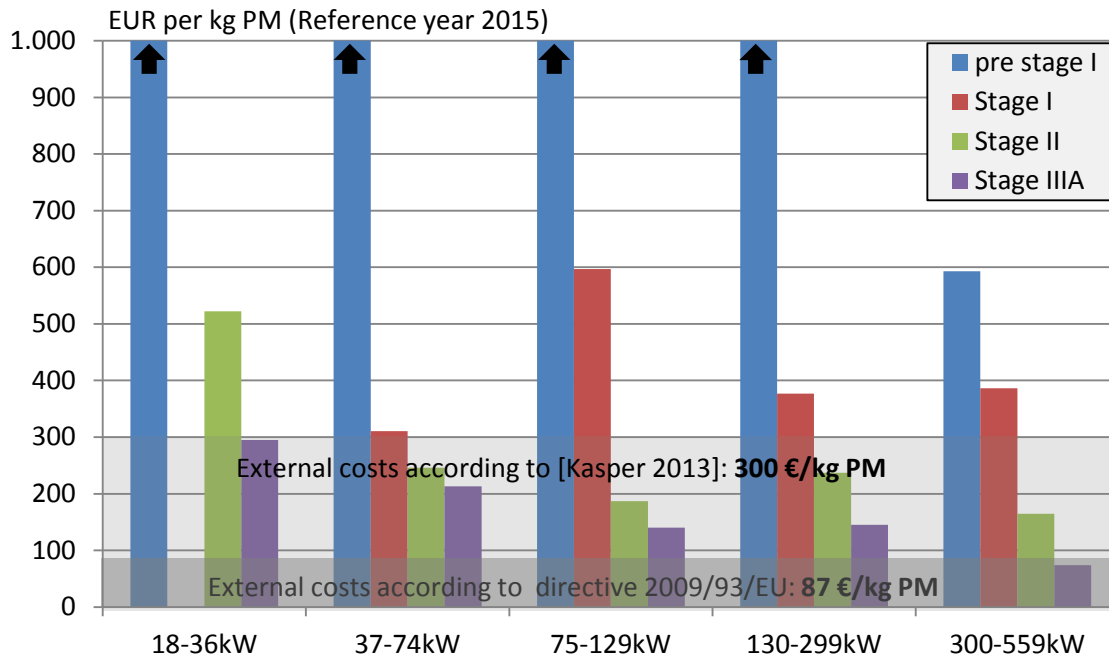
Abbildung 10: PM and NOx reduction potential of short term measures for construction machinery



©IFEU 2013

The particle mass reduction potential of retrofitting is similar to the use of new machinery but no additional reduction of NOx emissions occurs. Nevertheless retrofitting is an important option for existing equipment, because only the use of DPF leads to an ensured reduction of fine particle emissions before the introduction of a PN limit which is expected for new engines from 2020. The stages IIIB and IV do not guarantee such a reduction since no PN limit is required. For more recent machinery (stage IIIA) retrofitting is demonstrated to be cost efficient in comparison with external costs, e.g. through health damage.

Abbildung 11: Costs per reduced PM emission and equipment unit for DPF retrofit depending on the average equipment life in 2015; External costs through 1 kg PM emissions



©IFEU 2013

2.4 Policy recommendations

The need for action regards mostly particle emissions from mobile machinery, while for NO₂ emissions road traffic remains the most important emission source.

The contribution of mobile machinery to the urban background concentration is low for particles and NO₂ alike. The case studies, however, showed that the local contribution of construction equipment to the particle concentration can even be higher than the local contribution of traffic on a busy street. For NO₂ the contribution of road traffic remains dominant. It is therefore most important to consider mobile machinery in clean air planning regarding their particle emissions.

From a health perspective, a reduction of particle concentrations even below air quality limits with diesel particulate filters should be aimed for.

The compliance with air quality standards according to EU directive 2008/50 is an important goal for municipalities. The compliance with the mass based PM₁₀ air quality limit value, however, is not sufficient from a health perspective. Especially diesel exhaust emissions and the number of particles need to be reduced. Closed diesel particulate filters (DPF) not only reduce particle mass but also particle numbers significantly. In Switzerland therefore the use of a closed particulate filter or the compliance with a particle number limit is mandatory for most machinery since 2010.

A further development of directive 97/68/EC is necessary and should include smaller power classes and define a particle number limit value.

The European legislation for new machinery is the pivotal instrument for a reduction of emissions. Stricter emission limits should especially be introduced for smaller power classes

(< 37 kW), for which no stage IIIB and IV limits have been defined yet. Without a further development of the legislation, this machinery will be responsible for the largest share of construction particle emissions in the future. A further tightening of the particle mass emission limit introduced with stage IIIB for machinery ≥ 37 kW will only have a small effect on the emitted particle mass and thus only make a small contribution towards the compliance with air quality standards. In order to reduce ultrafine particle emissions it is more important – similar to the EURO VI-Standard for heavy duty vehicles – to introduce a particle number limit.

Scenario calculations show, however, that the further development of the legislation will only lead to a substantial emission reduction after 2025. The legislation process will hardly be concluded before 2018 and new machinery only successively replaces old machinery. Therefore additional measures are necessary in order to comply with air quality standards also in close proximity to construction sites on the one hand and substantially reduce health impacts of soot particles on the other hand.

A short term reduction of local emissions can be achieved by defining requirements for the locally used machinery, for a cost efficient reduction age and power class of machinery need to be taken into account.

Short term need for action especially exists for highly polluted urban areas. In order to reduce particle emission in such hot spots, either machinery complying with the current emission stage could be requested or retrofitting of the machinery fleet with diesel particulate filters. If both options are considered as alternatives, machinery operators can choose the more cost efficient alternative.

In the power classes ≥ 37 kW stage IIIB machinery with significantly lower emissions of particle mass are available since 2012. A local emission reduction for these power classes could thus either be achieved by retrofitting the existing machinery or by using new machinery complying with stage IIIB or IV. New machinery has the advantage of an overall emission reduction, especially important for NO_x emissions.

For more recent machinery (stage IIIA), which will be in operation for several more years, retrofitting costs are in the range of external costs of avoided particle emissions. An emission reduction is therefore mostly cost efficient for this machinery generation. For older machinery an advanced replacement with stage IIIB or IV machinery will mostly be the better alternative.

For smaller power classes (18-37 kW) the further development of EU directive 97/68 is a priority, because no stricter emission limits (comparable to stage IIIB) have been defined yet. Until new emission limits are defined, retrofitting is the only reduction option. Only with definition of stricter emission limits the option of an advanced replacement with clean new machinery becomes available.

A national labelling of construction equipment can harmonize local requirements and should consider machinery with particulate filter or similar emission behaviour separately.

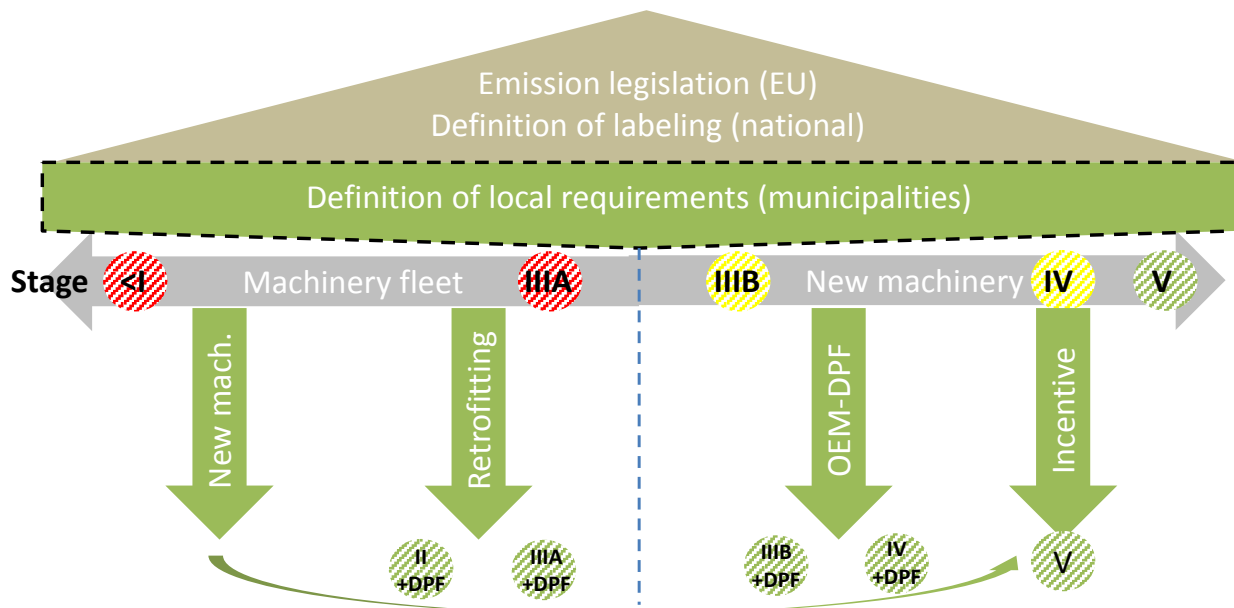
For the implementation of local measures a national labelling could help avoid a range of very different local requirements in Germany. The integration of mobile machinery in the current labelling of road vehicles can be motivated by the relevant emission contribution and is legally possible according to an expertise of “Deutsche Umwelthilfe” (DUH). An individual labelling, e.g. similar to road vehicles with “red”, “yellow” and “green”, gives municipalities nevertheless the opportunity to adjust the introduction schedule to the local situation.

The current emission legislation is not a sufficient basis for such a labelling scheme since it not necessarily enforces the best available technology. Labelling of construction machinery should

therefore consider machinery with particulate filter (or the compliance with a particle number limit value) separately. The introduction of machinery complying with a corresponding new emission limit (e.g. stage V) on the market would also be accelerated.

Machinery < 37 kW, for which so far no stricter particle limits according to stage IIIB have been defined, could have a label of temporal exemption for further use in environmental zones if necessary. At a later stage, latest with the availability of new machinery with particulate filters in this power class, stricter requirements should be applied also to this machinery.

Abbildung 12: Pillars of the emission reduction strategy for mobile machinery



©IFEU 2013

3 Einleitung

Mobile Maschinen und Geräte haben nach bisherigen Untersuchungen des IFEU (FKZ 299 45 113) einen hohen Anteil an den NO_x- und Dieselpartikelemissionen in Deutschland. Die hohen Emissionen sind darauf zurückzuführen, dass die bisherigen Abgasgrenzwerte weniger streng sind als im Straßenverkehr und teilweise auch noch viele ältere Dieselmotoren eingesetzt werden. Gleichzeitig gibt es für diese Maschinen bisher keine Einsatzbeschränkungen in Umweltzonen, obwohl die Luftqualitätsgrenzwerte für PM₁₀ und NO₂ an vielen hoch belasteten Gebieten in Deutschland überschritten werden.

Es ist daher geboten ein Konzept zur raschen und effektiven Minderung des durch mobile Maschinen verursachten Beitrags zu diesen Umweltbelastungen zu erstellen. Um dies zu ermöglichen, musste zunächst der Emissionsbeitrag mobiler Maschinen in Deutschland ermittelt werden. Bereits im Rahmen des Projektes „Entwicklung eines Modells zur Berechnung der Luftschadstoffemissionen und des Kraftstoffverbrauchs von Verbrennungsmotoren in mobilen Geräten und Maschinen“ (UFOPLAN 299 45 113) wurde hierzu von IFEU das Modell „TREMOMM“ (TREMOMM Mobile Machinery) erstellt. Dieses Modell ermöglicht eine detaillierte Berechnung der Emissionen von mobilen Geräten und Maschinen in der Landwirtschaft, Bauwirtschaft, Industrie, Grünpflege und Forstwirtschaft sowie der Sport- und Fahrgastschiffahrt. Dabei werden differenzierte Annahmen zur Altersstruktur, zur Nutzung und zu den Emissionen berücksichtigt.

Die Grundlagendaten des Modells wurden für die vorliegende Analyse mit besonderem Fokus auf Baumaschinen überarbeitet. Damit ermöglicht das Modell die Berechnung eines aktuellen Emissionsinventars für Deutschland sowie eines Trendszenarios auf Basis der aktuellen Gesetzesregelungen und bildet eine gute Grundlage für die Bewertung weitergehender Maßnahmen. Zusätzlich erfolgt die exemplarische Darstellung des möglichen Immissionsbeitrags von Baumaschinen in hochbelasteten städtischen Gebieten. Fokus der Betrachtung sind die derzeit im Mittelpunkt der Luftreinholdungsdiskussion stehenden Substanzen Feinstaub (PM₁₀) und Stickstoffdioxid (NO₂) bzw. die emissionsseitig regulierten Stickoxide (NO_x).

Auf dieser Basis wurden nun weitergehende Maßnahmen zur Minderung der Emissionen mobiler Maschinen identifiziert und ihre Emissions- und Immissionswirkung in Szenarien berechnet. Abschließend erfolgt eine Bewertung der Minderungskonzepte hinsichtlich der Umsetzungsmöglichkeiten, Kosten und Nutzen.

Im vorliegenden Bericht werden zunächst die wesentlichen Ergebnisse des Projektes hinsichtlich des Emissions- und Immissionsbeitrags mobiler Maschinen und der Wirkung von Maßnahmen sowie die sich daraus ableitenden Handlungsempfehlungen thesenartig dargestellt. Die ausführliche Dokumentation der Grundlagendaten und die Definition der Maßnahmenzenarien erfolgt im Anhang.

4 Hintergrund

4.1 Emissionen mobiler Maschinen im Vergleich zum Straßenverkehr

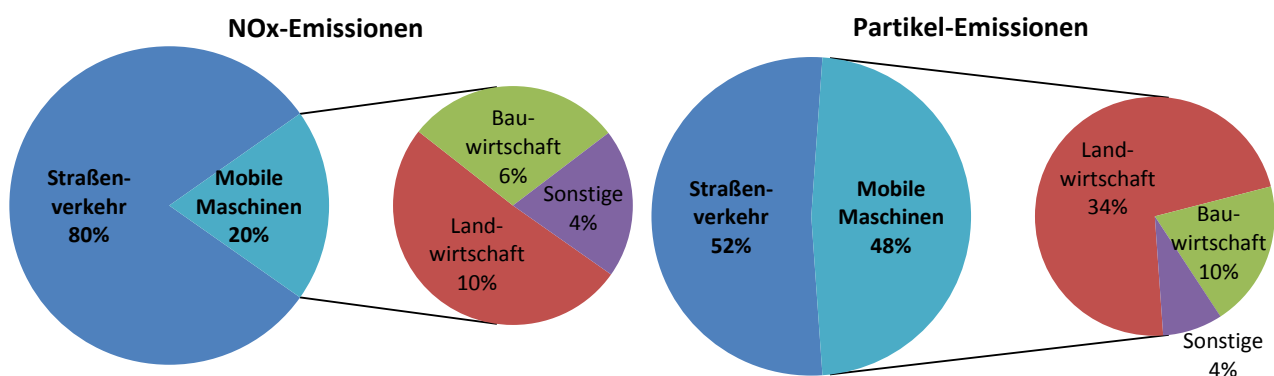
Mobile Maschinen verursachen in etwa die gleiche Menge Partikelemissionen und etwa ein Viertel der NO_x-Emissionen des Straßenverkehrs

Mobile Maschinen und Geräte werden in verschiedenen Sektoren, darunter in der Land- und Bau- und Forstwirtschaft, in der Industrie sowie in Haushalten und bei Freizeitaktivitäten eingesetzt. Viele dieser Geräte besitzen Verbrennungsmotoren und stoßen damit Schadstoffemissionen aus. Zwar werden diese über die EU-Richtlinie 97/68/EG begrenzt, die Emissionsgrenzwerte wurden aber wesentlich später als beispielsweise im Straßenverkehr eingeführt. Mit dem Emissionsmodell TREMOD-MM werden die Bestände, die Betriebszeiten und spezifischen Emissionsfaktoren von mobilen Maschinen in Deutschland erfasst, um somit ein bundesweites Emissionsinventar zu erstellen (detailliert beschrieben in Kapitel 9).

Die aktuellen Berechnungen zeigen, dass mobile Maschinen deutschlandweit insgesamt etwa ein Viertel der NO_x Emissionen des Straßenverkehrs verursachen, bei den Partikelemissionen (PM) liegt der Beitrag der mobilen Maschinen beinahe genauso hoch wie der des Straßenverkehrs (siehe Abbildung 13). 2010 entsprach dies deutschlandweit einer Menge von 123,6 Kilotonnen NO_x und 13,5 Kilotonnen abgasbedingtem Feinstaub (sowohl PM₁₀ als auch PM_{2,5}).

Demgegenüber liegt der Energieverbrauch mobiler Maschinen mit 193 PJ bei weniger als 10 % des Straßenverkehrs. Dieser überproportional hohe Emissionsbeitrag wird vorwiegend von Dieselmotoren in der Landwirtschaft und Bauwirtschaft verursacht. Letztere werden, wie Straßenfahrzeuge, oft auch in städtischen Gebieten eingesetzt und haben damit direkten Einfluss auf die lokale Luftqualität. Möglichkeiten zur Minderung der Abgasemissionen mobiler Maschinen sollten daher dringend untersucht werden.

Abbildung 13: Vergleich der deutschlandweiten NO_x- und Partikelemissionen des Straßenverkehrs und mobiler Maschinen für das Jahr 2010



©IFEU 2013 (Quellen: TREMOD 5.32, TREMOD-MM 3.0)

Neben mobilen Maschinen, finden sich Verbrennungsmotoren auch im stationären Bereich, vor allem bei Generatoren. Diese Motoren werden in der Regel von den gleichen Herstellern produziert und entsprechen häufig auch den Motoren in mobilen Anwendungen (siehe [DG ENTR 2013], sie unterliegen jedoch nicht den strengeren Grenzwerten nach der Richtlinie 97/68/EG.

Eine Regulierung ist auch hier höchstwahrscheinlich sinnvoll, aber nicht Gegenstand dieses Berichtes.

4.2 Überschreitungen der Luftqualitätsgrenzwerte in Städten

Viele Städte in Deutschland können aktuell die europäischen Luftqualitätsgrenzwerte für PM₁₀ und NO₂ nicht einhalten

Auf Basis der aktuellen „Richtlinie 2008/50/EG über Luftqualität und saubere Luft für Europa“ [EU 2008] gelten seit dem 1.1.2010 für die Konzentration an NO₂ und Benzol, sowie ab dem 1.1.2005 für Feinstaub (PM₁₀), SO₂, CO und Blei europaweite Grenzwerte. Aktuell kommt es nach Daten des Umweltbundesamtes [UBA 2013] hinsichtlich der zulässigen PM₁₀ und NO₂ Konzentration in Deutschland an vielen Messstationen zu Grenzwertüberschreitungen. Zu unterscheiden sind dabei die zulässigen Jahresmittelwerte von jeweils 40 µg/m³ bei NO₂ und PM₁₀ von den zulässigen Stunden- bzw. Tagesmittelwerten. So darf der zulässige NO₂ - Stundemittelwert von 200 µg/m³ nur an 18 Tagen pro Jahr überschritten werden und der zulässige PM₁₀ Tagesmittelwert von 50 µg/m³ nur an 35 Tagen im Jahr.

Während es bei NO₂ an etwa einem Drittel der Messstellen zu Überschreitungen des Jahresmittelwertes kommt, werden bei der Feinstaubbelastung die Jahresmittelwerte weitgehend eingehalten (Tabelle 1). Jedoch wird die zulässige Anzahl an Überschreitungen des PM₁₀-Tagesgrenzwertes bei bis zu 20 % (2011) des Messstellen verletzt. Die Daten des Umweltbundesamtes zeigen auch, dass die Überschreitungshäufigkeiten bei dem zulässigen NO₂ - Jahresmittelwert in den letzten Jahren nahezu unverändert hoch waren. Die gemessenen Feinstaub-Werte (PM₁₀) unterliegen dagegen größeren Schwankungen, die vor allem meteorologisch bedingt sind.

Tabelle 1: Überschreitungshäufigkeiten der Luftqualitätsgrenzwerte für NO₂- und PM₁₀ in Deutschland von 2010 bis 2012

	Grenzwertart	Grenzwert	Stationen mit Überschreitungen	2010	2011	2012
NO ₂	Jahresmittelwert	40 µg/m ³	Anzahl	165	173	171
			Anteil gesamt	34%	35%	34%
	Stundenmittelwert	200 µg/m ³ an max. 16 Tagen pro Jahr	Anzahl	7	7	5
			Anteil gesamt	2%	2%	1%
PM ₁₀	Jahresmittelwert	40 µg/m ³	Anzahl	2	1	0
			Anteil gesamt	0,5%	0,2%	0,0%
	Tagesmittelwert	50 µg/m ³ an max. 35 Tagen pro Jahr	Anzahl	63	80	11
			Anteil gesamt	15%	20%	3%

Quelle: [UBA 2013] und eigene Auswertungen

In über 95 % aller Fälle treten die Überschreitungen in städtischen Gebieten auf, oft in der Nähe von stark befahrenen Straßen. Der Straßenverkehr wird daher in vielen Luftreinhalteplänen als Hauptquelle für die städtische Schadstoffbelastung gesehen¹. Eine konsequente Luftreinhaltestrategie erfordert jedoch, dass auch andere Quellen, darunter mobile Maschinen, hinsichtlich ihres Minderungspotenzials untersucht und gegebenenfalls in die Maßnahmenplanung einbezogen werden.

4.3 Gesundheitsgefährdung durch Dieselpartikel

Dieselemissionen haben keinen Schwellenwert und werden von der WHO als kanzerogen eingestuft, gesundheitlich sind vor allem motorische Partikelfractionen relevant

Im Mittelpunkt der aktuellen Luftreinhaltungsdiskussion steht die NO₂- und Partikel-Belastung vor allem aufgrund der aktuellen Grenzwertüberschreitungen in Ballungsgebieten. Die Kommunen versuchen dabei die Grenzwerteinhalten mit verschiedensten Maßnahmen zu erreichen. Die Einhaltung der Grenzwerte bedeutet jedoch nicht, dass keine weitere gesundheitliche Belastung vorliegt. Da für Partikelemissionen kein Schwellenwert der gesundheitlichen Unbedenklichkeit bekannt ist [Wichmann 2013], gilt aus Gesundheitssicht ein Minderungsgebot auch über die Einhaltung der Grenzwerte hinaus.

Insbesondere bei Partikelemissionen ist für die Gesundheitswirkung zusätzlich die Partikelbeschaffenheit relevant. So gehen die aktuell nach Partikelmasse gemessenen Belastungen zu einem großen Teil auf Abrieb und Aufwirbelung durch Fahrzeuge zurück, die vor allem größere Partikelfractionen erzeugen. Dabei sind jedoch insbesondere kleinere Partikelfractionen gesundheitlich relevant. So enthält Dieselruß eine große Anzahl ultrafeiner Partikel, die tief in die Atemwege eindringen: *„Die Exposition gegenüber Dieselruß kann zu akuten Irritationen der Atemwege führen, ferner zu neurophysiologischen Reaktionen sowie Atembeschwerden und Asthma-ähnlichen Symptomen. ... Seit den 1980er Jahren zeigen epidemiologische Studien konsistent ein erhöhtes Lungenkrebsrisiko bei Arbeitern, die gegenüber Dieselruß exponiert waren ...“* [Wichmann 2013]. Zusätzlich hat die WHO Dieselaabgase aufgrund neuerer epidemiologischer Studien als kanzerogen eingestuft [WHO 2012]. So ist der Anteil der Verbrennungsprodukte am gesamten Feinstaub zwar relativ gering, jedoch besonders toxisch.

Die Fokussierung auf die Grenzwerteinhalten unter Berücksichtigung aller Partikel <10 µm ist damit für den Gesundheitsschutz nicht zielgenau. Vielmehr sollten die motorischen Emissionen und damit die Anzahl kleinerer Partikel stärker in den Blick genommen werden. Für den Bereich der schweren Nutzfahrzeuge wurde daher mit der Emissionsstufe VI auch ein Grenzwert für die Partikelanzahl festgelegt. Diese macht nach aktuellem Stand den Einsatz von Partikelfiltern notwendig und verhindert damit eine Verschiebung von großen Partikeln hin zu kleineren Fractionen. Der Fokus dieser Studie liegt demnach auch auf den motorischen Emissionen mobiler Maschinen, wenngleich auch Abrieb und Aufwirbelung durch mobile Maschinen erheblich zur PM₁₀-Belastung beitragen können.

¹Eine Auswertung von Luftreinhalte- und Aktionsplänen aus ganz Deutschland (insgesamt 132 Dokumente) ergab, dass sich ca. 80 % aller Maßnahmen sich auf den Kfz-Verkehr bezogen [IVU 2009a]

4.4 Bisherige Maßnahmen anderer Länder und Akteure

Einzelne Länder und Akteure ergreifen schon heute Minderungsmaßnahmen, die über die EU-Emissionsgesetzgebung hinausgehen

In der Schweiz wurden seit dem Jahr 2001 Partikelfilter für Baumaschinen auf Baustellen bestimmter Lage, Größe und Dauer gefordert [BAFU 2009]. Im Rahmen der neuen Luftreinhalteverordnung wurde die Regelung seit dem Jahr 2010 für Baumaschinen auf allen Baustellen ausgeweitet. Neumaschinen >18 kW müssen demnach einen Partikelanzahlgrenzwert von $1 \cdot 10^{12}$ erfüllen, der praktisch den Einsatz eines Partikelfilters erfordert. Ältere Maschinen im Bestand ≥ 37 kW müssen mit LRV²-konformen Partikelfiltersystemen ausgestattet sein. Die Schweizer Umweltbehörde verfolgt dabei einen Ansatz der Zusammenarbeit mit den Maschinenherstellern. So werden in die Schweiz verkaufte Neumaschinen grundsätzlich mit Partikelfiltern angeboten [D'Urbano 2011].

In Österreich gelten ab dem 1.10.2013 in belasteten Gebieten („IG-L-Sanierungsgebieten“) Einsatzbeschränkungen für mobile Maschinen. Danach dürfen nur typgenehmigte Maschinen nach Richtlinie 97/68/EU eingesetzt werden. Die Anforderung werden nach Größenklassen stufenweise erhöht: so müssen die eingesetzten Maschinen mit 130-560 kW ab dem 1.10.2018 und solche mit 19 bis <130 kW mindestens über Stufe IIIA verfügen. Alternativ können auch mit einem Partikelfilter nachgerüstet Maschinen eingesetzt werden. Die technischen Anforderungen hierfür sind im Anhang der 76. Verordnung nach Bundesgesetzblatt [BGBl. II 2013] festgelegt. Besonderheit der österreichischen Regelung ist, dass die Einsatzbeschränkungen nur vom 1.10. bis zum 31.3. eines Jahres gelten. In dieser Zeit treten in der Regel die höchsten PM₁₀-Belastungen auf.

In Deutschland müssen bisher im Tunnel- und Untertagebau Maschinen mit Partikelfiltern ausgestattet sein. Hierbei gelten die Auflagen nach den ‚Technische Regeln für Gefahrstoffe‘ (TRGS 554 und TRGS 900). In den letzten Jahren setzen sich aber auch vermehrt einzelne Akteure für „saubere“ Maschinen auf Baustellen ein.

Nach einem Rechtsstreit der Deutschen Bahn mit der Deutschen Umwelthilfe dürfen ab 1.2.2011 auf der Großbaustelle „Stuttgart 21“ nur noch Baumaschinen mit Partikelfilter eingesetzt werden, für die Einhaltung und Kontrolle ist das Eisenbahnbundesamt zuständig. Mittlerweile (seit dem 1.1.2013) fordert die Deutsche Bahn in allen Ausschreibungen von Bauvorhaben im innerstädtischen Bereich einen Partikelfilter für dieselgetriebene Baufahrzeuge. Die Auflagen sollen bis 2017 verschärft und auf den außerstädtischen Bereich ausgedehnt werden [DB 2012]. Im Rahmen einer Regelung der Senatsverwaltung der Stadt Berlin wird ab 2014 bei öffentlichen Bauvorhaben die Einhaltung des PM-Grenzwertes der Abgasstufe IIIB oder die Nachrüstung mit einem Partikelfilter gefordert. Vorerst beschränkt die Regelung sich auf die Sanierung oder den Neubau von Gebäuden, eine Ausweitung auf den Tiefbau ist geplant [Senat Berlin 2013].

² Luftreinhalte-Verordnung der Schweiz

Tabelle 2: Beispiele für geplante/bestehende Emissionsminderungsmaßnahmen bei mobilen Maschinen über die EU-Emissionsgrenzwertgesetzgebung hinaus

Ebene	Akteur	Gegenstand	Maßnahme	Umsetzung	Besonderheiten
National	Schweiz	Alle genehmigungsbedürftigen Baustellen (keine Steinbrüche, Kiesgruben)	<u>Neumaschinen</u> (≥ 19 kW): Einhaltung eines PN-Grenzwertes von $1 \cdot 10^{12}$ #/kWh <u>Bestand</u> (≥ 37 kW): Vorhandensein eines LRV-konformen Partikelfilters	1.1.2010	
National	Österreich	IG-L-Sanierungsgebiete	Typgenehmigung nach R. 97/68/EG 18 bis < 37 kW und 75 bis 560 kW 37 bis < 75 kW Stufe II nach R. 97/68/EG 130 bis 560 kW 37 bis < 130 kW Stufe IIIA nach R. 97/68/EG 130 bis 560 kW 19 bis < 130 kW oder Vorhandensein eines BGBl-konformen Partikelfilters	1.10.2013 1.10.2014 1.10.2015 1.10.2016 1.10.2018 1.10.2019 1.10.2013	Regelung gilt nur in den der Zeit vom 1.10. bis zum 31.3. eines Jahres Ausnahmeregelung für bestimmte Maschinentypen, z.B. Teleskopstapler
National	Deutschland	Bauarbeiten unter Tage	Vorhandensein eines Partikelfilters (VERT oder FAD-konform)		
National/Projekt	Deutsche Bahn	Bauausschreibungen in Innenstädten	Erfüllung des PM-Emissionsgrenzwertes der Stufe IIIB nach R. 97/68/EG Vorhandensein eines Partikelfilters	1.1.2013 (Stand 2012)	
Kommunal	Stadt Berlin	Öffentlich Bauausschreibungen im Hoch- und Abrissbau	Erfüllung des PM-Emissionsgrenzwertes der Stufe IIIB nach R. 97/68/EG Vorhandensein eines Partikelfilters	1.1.2014	

5 Immissionsbeitrag mobiler Maschinen in Städten

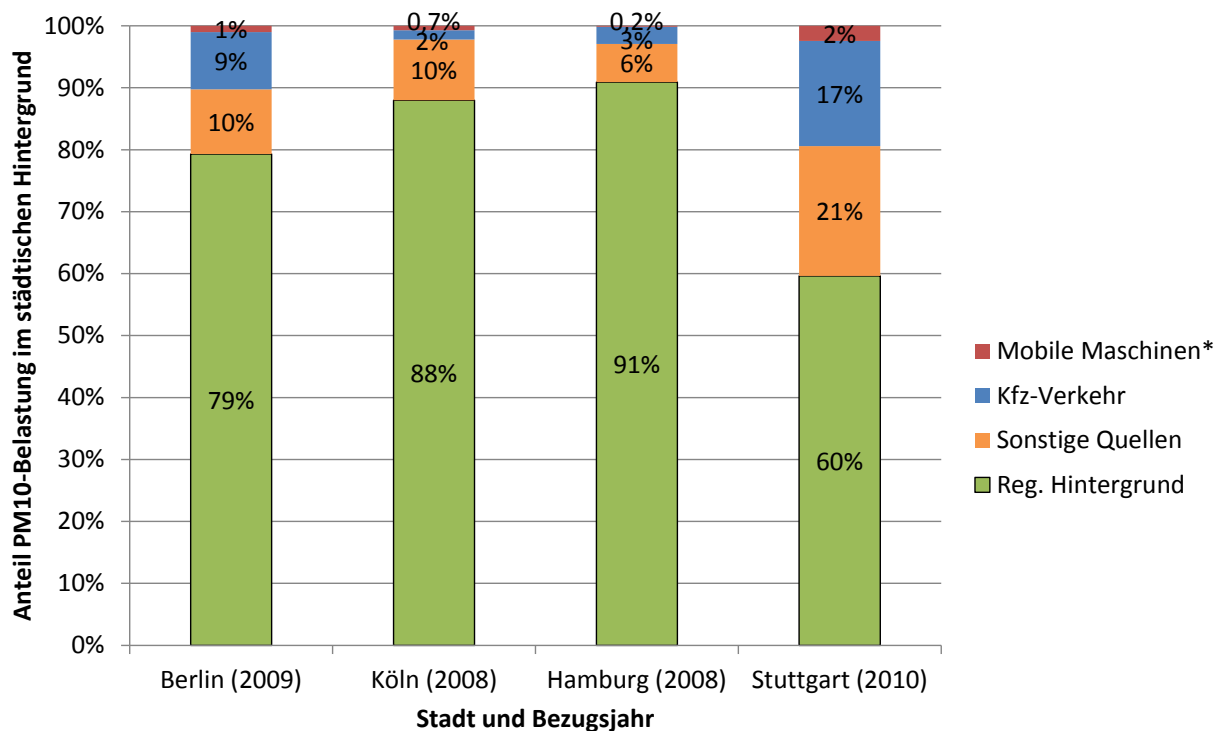
5.1 PM10-Beiträge im Stadtgebiet

Die Feinstaubbelastung wird durch verschiedenste Quellen verursacht, der mittlere abgasbedingte Beitrag mobiler Maschinen im Stadtgebiet ist daher gering

Die Herkunft von Feinstaubpartikeln lässt sich nur mit aufwendigen Methoden quantifizieren. Verschiedenste natürliche und anthropogene Quellen führen zur Partikelbildung, darunter mechanische Abriebe, Aerosole und Verbrennungsprozesse. Auch bei den abgasbedingten Partikelemissionen muss zwischen direkten Partikel (z.B. Ruß) und sekundären Partikel unterschieden werden. Letztere können sich aus gasförmigen Stoffen wie Schwefeldioxid, Stickoxiden und Ammoniak bilden und vor allem zum Ferntransport von Partikeln beitragen.

Aus einer Vielzahl räumlicher Quellanalysen zeigt sich, dass im Durchschnitt 55 % der lokalen PM₁₀-Belastung aus dem regionalen Hintergrund stammt, also durch außerstädtische Quellen oder Ferntransport zustande kommt und damit durch die kommunale Luftreinhaltung nicht beeinflusst werden kann. Im Durchschnitt stammt nur 20 % des Feinstaubes aus dem städtischen Hintergrund und 26 % aus lokalen Quellen [IVU 2009a].

Abbildung 14: Anteil des Kfz-Verkehrs, mobiler Maschinen und sonstiger Quellen an der PM₁₀-Belastung (JMW) im städtischen Hintergrund



* Für Berlin/Stuttgart über direkte PM₁₀-Emissionen abgeschätzt, da Anteile für mobile Maschinen in Berlin innerhalb "sonstiger Quellen", in Stuttgart zusammen mit "Biogene, Sonstige" ausgewiesen werden. Sekundärpartikel wurden hierbei nicht berücksichtigt.

©IFEU 2013. Quellen: [Sen. Berlin 2013], [LUBW 2011], [BR Köln 2012], [Stadt Hamburg 2012]; eigene Annahmen

In der Fachliteratur wird der Beitrag mobiler Maschinen zur PM₁₀-Belastung meist nur hinsichtlich der städtischen Hintergrundbelastung abgeschätzt. Aktuelle Luftreinhaltepläne der Städte Berlin, Hamburg, Köln und Stuttgart zufolge tragen die Abgasemissionen mobiler Ma-

schinen im Stadtgebiet daher nur zu etwa 0,2 % bis etwa 2 % zur PM_{10} -Konzentration bei (Abbildung 14). Ein Großteil des städtisch verursachten Anteils entfällt auf sonstige Quellen (z.B. Industrie und Kleinf Feuerung) und den Straßenverkehr. Gerade bei letzterem machen jedoch auch Reifen-, Bremsabrieb und Aufwirbelungsemissionen einen hohen Beitrag aus. In Stuttgart machen Kfz-Abgasemissionen z.B. nur ca. 4 % von insgesamt 17 % aus.

Die städtische Hintergrundbelastung durch mobile Maschinen kann durch motorische Minderungsmaßnahmen also nur begrenzt beeinflusst werden. Auch beim Straßenverkehr ist die mögliche Minderungswirkung motorischer Maßnahmen begrenzt. Grenzwertüberschreitungen sind häufig lokale Phänomene und werden stark von den lokalen Quellen beeinflusst. Hier spielt der Straßenverkehr eine besondere Rolle, der mögliche Beitrag von Baustellen zur lokalen Feinstaubbelastung wird in den folgenden Abschnitten exemplarisch untersucht.

5.2 Modellierung lokaler PM_{10} - Beiträge

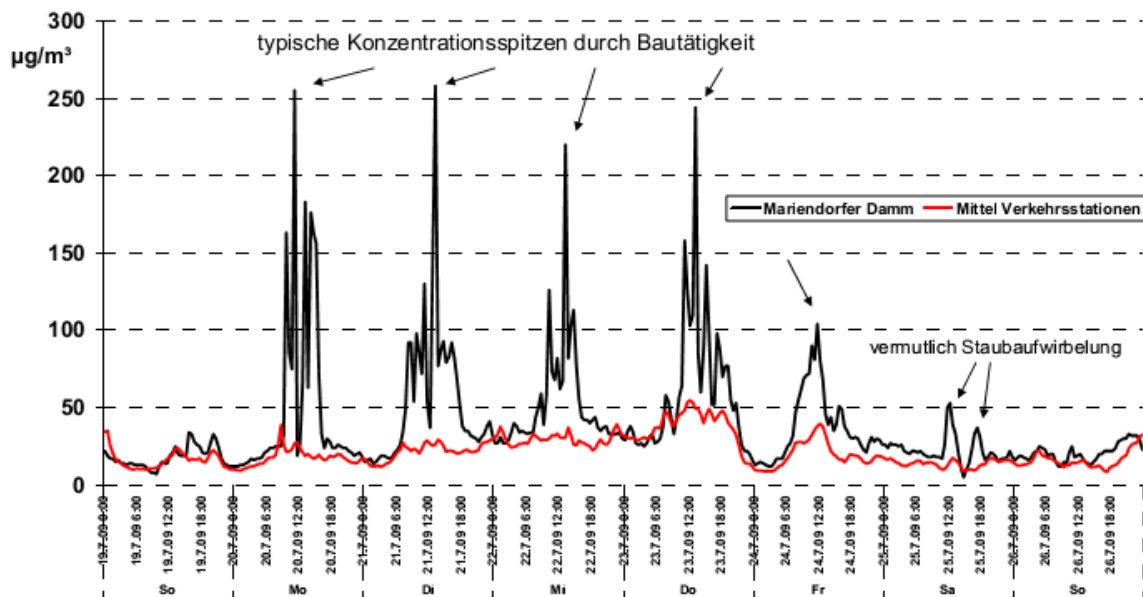
Die Datenlage zur lokalen PM_{10} -Zusatzbelastung durch Baustellen ist lückenhaft, daher wurde für zwei Beispielbaustellen eine Modellierung durchgeführt

Lokale Zusatzbelastungen mit PM_{10} werden meist dem Kfz-Verkehr zugerechnet. Im deutschen Luftqualitätsmessnetz macht der Stations-Typ „Verkehr“ bei PM_{10} knapp 40 % aller Messstationen aus. Lokale Zusatzbelastungen durch andere Emittenten werden daher eher zufällig erfasst. Im Luftreinhalteplan der Stadt Berlin für 2011-2017 wurde so zwischen März und Juli 2009 ein deutlicher Zusammenhang zwischen Bauarbeiten und erhöhten PM_{10} -Konzentrationen an der Messstation Mariendorfer Damm festgestellt. Es gab vor allem in den Vor- und Nachmittagszeiten deutliche Konzentrationsspitzen von bis zu $205 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Abbildung 15). In dieser kurzen Bauphase wurden auch 44 der insgesamt 73 Überschreitungstage des Jahres 2009 verursacht. Ähnliche Überschreitungszusammenhänge wurden an weiteren Messstationen in Berlin beobachtet, hier reichte die Zahl der zusätzlichen TMW-Überschreitungen von 1 bis 17 Tagen [Senat Berlin 2013]. Auch in Leipzig wurden 7 zusätzliche Überschreitungstage im Monat Januar einer Baustelle zugerechnet [Stadt Leipzig 2009].

Die Zusatzbelastung durch Baustelleneinfluss konzentriert sich häufig auf den Nahbereich und umfasst vor allem größere PM_{10} -Fraktionen, die nicht auf Abgaspartikel zurückzuführen sind [Senat Berlin 2013]. Eine quantitative Unterscheidung des Beitrags von Abgas- sowie Abrieb- und Aufwirbelungsemissionen ist auf Basis der vorliegenden Messdaten nicht möglich. Hierfür kann auf emissionsbasierte Modellierungen zurückgegriffen werden, die bei Untersuchungen zum Belastungsbeitrag des Straßenverkehrs bereits gängige Praxis sind. Für Baumaschinen wurde eine solche Abschätzung bereits von der Umweltschutzabteilung der Stadt Wien durchgeführt. Diese kommt zu dem Schluss, dass im Nahbereich eines Raupenbaggers innerhalb einer Häuserschlucht PM_{10} -Tagesmittelwerte von bis zu $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ verursacht werden [Tizeck 2013]³. Die Datenlage zu solchen Fallbeispielen - sowie zu vergleichbaren Abschätzungen für den Beitrag mobiler Maschinen zur lokalen NO_2 -Belastung - ist derzeit jedoch stark begrenzt.

³ Für die Emissionsrechnung wurden eine Nennleistung von 110 kW, ein Lastfaktor von 0,5, eine Betriebszeit von 12 h/Tag und ein Emissionsfaktor von $1,1 \text{ g}_{PM}/\text{kWh}$ zugrunde gelegt.

Abbildung 15: PM₁₀-Konzentrationsspitzen durch Bautätigkeit neben der Station Mariendorfer Damm in der Zeit vom 19.07. bis 26.07.2009 (1/2-h-Werte)



Quelle der Graphik: LRP Berlin 2011-2017

Um die lokale Zusatzbelastung durch mobile Maschinen besser beurteilen zu können, wurden im Rahmen dieses Projektes Ausbreitungsrechnungen für zwei definierte Fallbeispiele durchgeführt. Die untersuchten Beispielbaustellen wurden in direkter Nähe zu realen straßennahen Verkehrsmessstation platziert. Eine kleinere Baustelle wurde an der Frankfurter Allee untersucht, deren Straßenschlucht eine West-Ost-Ausrichtung aufweist. Eine größere Baustelle wurde im Nord-Süd ausgerichteten Mariendorfer Damm auf einem nahegelegenen Parkplatz untersucht (s. Abbildung 16).

Abbildung 16: Lage und Umgebung der untersuchten Beispielbaustellen in der Frankfurter Allee (links) und am Mariendorfer Damm (rechts)



Quelle der Graphik: [IVU 2013], modifiziert durch IFEU

Als Basisjahr der Modellierung wurde das Jahr 2010 festgelegt und daher für den gesamten Maschinenpark zunächst die Abgasstufe II der Richtlinie 97/68/EC angenommen⁴. Dies entspricht dem durchschnittlichen Emissionsverhalten des Maschinenparks in Deutschland zum Auswertungsjahr 2010. Zusätzliche Annahmen wurden hinsichtlich der Betriebsdauer der Maschinen pro Arbeitstag gemacht. Die motorischen Emissionen des größeren Maschinenparks am Mariendorfer Damm (fünf Maschinen) liegen damit etwas mehr als doppelt so hoch wie beim Beispiel Frankfurter Allee (drei Maschinen). Als Zeiten für die Bautätigkeit wurden nur die Wochentage zwischen 8 und 16 Uhr berücksichtigt. Hierzu wurde dann eine stundenfeine Ausbreitungsrechnung sowohl für die Baustelle als auch den angrenzenden Straßenverkehr durch die IVU-Umwelt GmbH mit dem Modell MISKAM vorgenommen. Methodisch vergleichbar wurde auch die mögliche Immissionswirkung von Maßnahmen mit geändertem Technologiestand der Maschinen untersucht (Kap. 10.5).

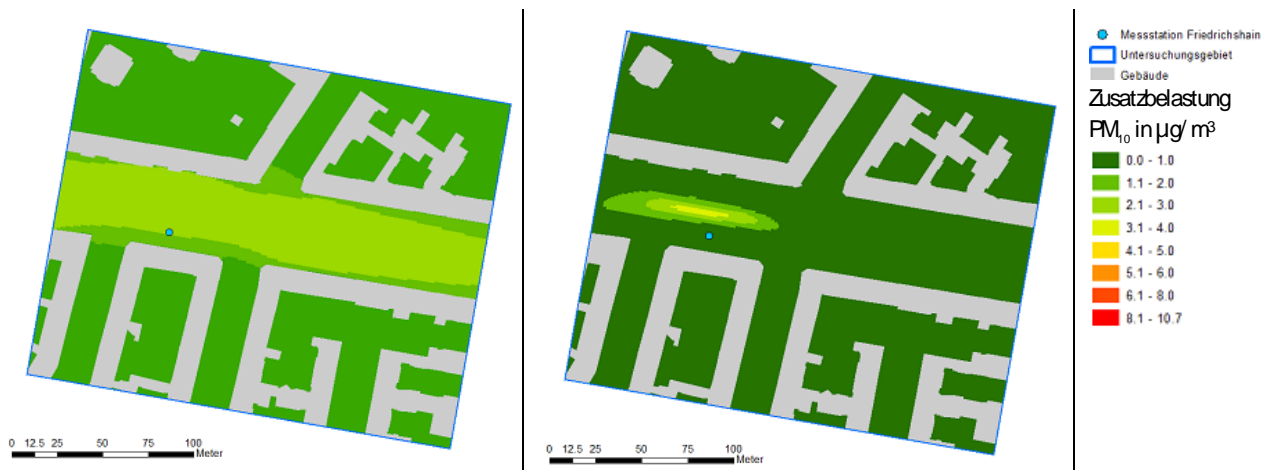
⁴ Die Emissionsstufe IIIA für Maschinen bis 130 kW wurde erst 2007 eingeführt, während das Durchschnittsalter der meisten Baumaschinen in Deutschland bei ca. 6 Jahren liegt.

5.3 Motorische PM₁₀-Zusatzbelastung im Fallbeispiel

Der Zusatzbeitrag der Beispielbaustellen zum PM₁₀-Jahresmittelwert liegt im Nahbereich höher als beim Verkehr, zusätzlich treten temporär hohe Spitzenkonzentrationen auf

In direkter Nähe der Baustellen liegt der PM₁₀-Beitrag durch Abgasemissionen der Baumaschinen höher als der des Straßenverkehrs. So steigt die Partikelbelastung durch die kleinere Baustelle in der Frankfurter Allee (auf dem Mittelstreifen der Straße) um bis zu 4 µg/m³ (Abbildung 17), beim Beispiel Mariendorfer Damm um bis zu 7 µg/m³ (Abbildung 18). Die Zusatzbelastung durch Kfz-Abgase erreicht dagegen nur 3-4 µg/m³. Trotz des auf die Arbeitszeiten an Wochentagen beschränkten Baumaschinenbetriebs ist also lokal mit einem relevanten PM₁₀-Zusatzbeitrag durch Baustellen zu rechnen. Auf der anderen Seite nimmt dieser Zusatzbeitrag jedoch stark mit der Entfernung von der Baustelle ab, zusätzlich werden nur wenige Baustellen über ein komplettes Jahr hinweg betrieben.

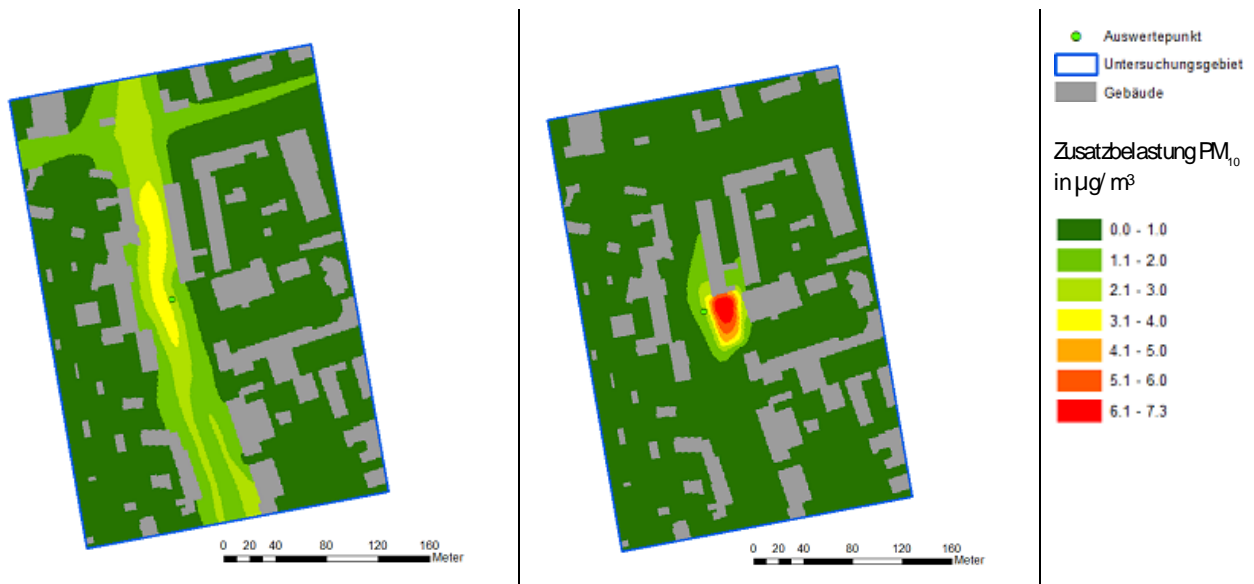
Abbildung 17: Jahresmittelwert der lokalen PM₁₀- Zusatzbelastung aus Abgas durch Straßenverkehr (links) und eine Beispielbaustelle (rechts) für das Untersuchungsgebiet Frankfurter Allee



Quelle der Graphik: [IVU 2013], modifiziert durch IFEU

Ein wichtiger Einflussfaktor der Ausbreitung sind die Lage und die Gebäudegeometrie. Beim Mariendorfer Damm breiten sich die Dieselabgase der Baustelle vom Parkplatz bis um die nahestehenden Gebäude herum aus. Die insgesamt betroffenen Bereiche sind bei Baustellen deutlich kleiner als beim Straßenverkehr, aber die höheren Partikel-Konzentrationen betreffen auch Anwohnerbereiche.

Abbildung 18: Jahresmittelwert der lokalen PM₁₀- Zusatzbelastung aus Abgas durch Straßenverkehr (links) und eine Beispielbaustelle (rechts) für das Untersuchungsgebiet Mariendorfer Damm



Quelle der Graphik: [IVU 2013], modifiziert durch IFEU

Baustellen sind nicht nur räumlich, sondern auch zeitlich dynamische Emissionsquellen. Dies zeigen die maximalen Tages- und Stundenmittelwerte: die PM₁₀-Konzentration kann im Tagesmittelwert das 3-7 fache und im Stundenmittelwert das 16-63fache des Jahresmittelwertes erreichen. Die Spitzenwerte der PM₁₀-Belastung (Stundenwerte) durch den Verkehr liegen niedriger als bei den Baustellen und zeigen geringere Abweichungen zum Jahresmittelwert (Tabelle 3).

Die hohen Spitzenkonzentrationen des PM₁₀-Zusatzbeitrags können zu Überschreitungen der Tagesmittelwerte führen. Weiterhin stellt auch die kurzzeitige Exposition von Dieselpartikeln eine Gefährdung für die Gesundheit von Arbeitern, Anwohnern und Passanten dar. Im Zentrum der Baustelle Mariendorfer Damm werden können sogar maximale Stundenmittelwerte von 74 µg/m³ Partikelmasse (nicht in der Tabelle aufgeführt) erreicht werden.

Tabelle 3: Maximale PM₁₀-Zusatzbelastungen durch Abgas an den Auswertepunkten im Jahres-, Tages-, und Stundenmittelwert

Wert	Frankfurter Allee - Baustelle		Mariendorfer Damm - Baustelle		Mariendorfer Damm - Kfz	
	µg PM ₁₀ /m ³	Vielfaches des JMW	µg PM ₁₀ /m ³	Vielfaches des JMW	µg PM ₁₀ /m ³	Vielfaches des JMW
JMW	0,3		2,1		2,6	
TMW (max)	2,2	7	6,4	3	5,8	2
SMW (max)	19	63	33,2	16	16,4	6

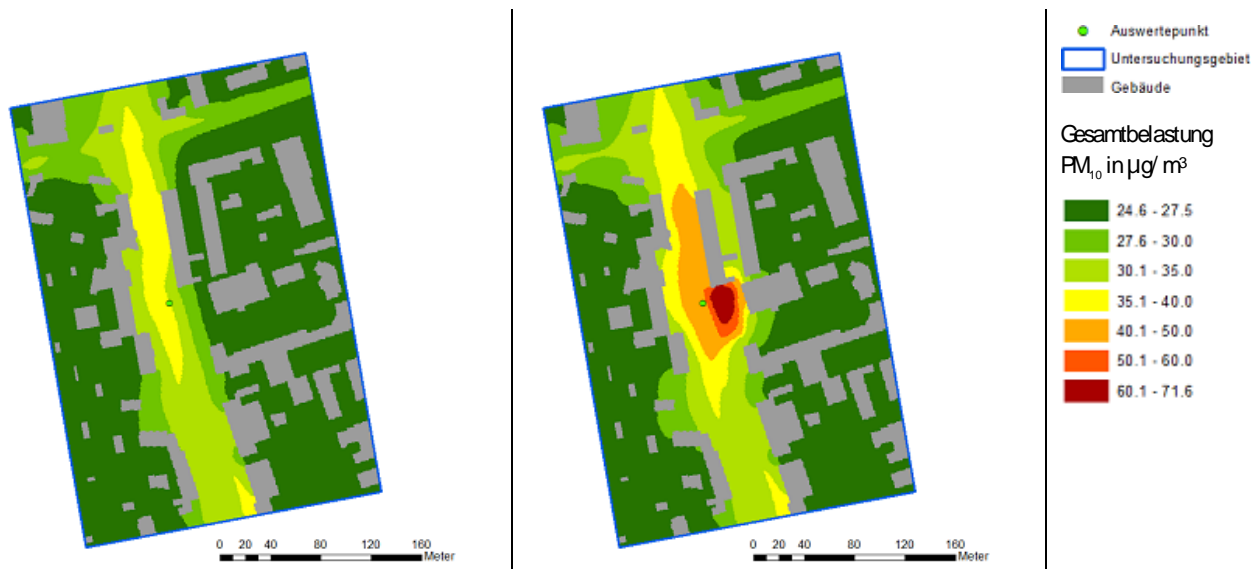
Quelle: [IVU 2013], eigene Berechnungen. (Anmerkung: Frankfurter Allee - Kfz nicht zwischen Abgas- und Aufwirbelungspartikel unterschieden)

5.4 PM₁₀-Belastung durch Aufwirbelung im Fallbeispiel

Neben den Abgasemissionen tragen vor allem Aufwirbelungsemissionen zur PM₁₀-Belastung und zur Überschreitung der Tagesgrenzwerte bei

Beim Straßenverkehr führen vor allem Partikel aus Abrieb und Aufwirbelung zur lokalen Erhöhung der PM₁₀-Konzentration. Für die Baustelle Mariendorfer Damm wurden neben den Abgasemissionen daher auch nicht-motorischen Emissionen untersucht⁵. Ohne die Baustelle ergäbe sich im JMW eine Gesamtbelastung von bis zu 40 µg/m³. Kommt die Baustelle mit den berechneten Aufwirbelungsemissionen hinzu, steigt die Belastung im Nahbereich auf bis zu 71,5 µg/m³ an, also um mehr als 30 µg/m³. Auch in noch bis zu 100 m Entfernung entlang der Straßenschlucht treten Erhöhungen von bis 10 µg/m³ auf, welche z.B. nahegelegene Messstationen beeinflussen könnten (Abbildung 19). Zu berücksichtigen sind dabei jedoch die größeren Unsicherheit bei der Abschätzung von Aufwirbelungsemissionen.

Abbildung 19: Virtuelle PM₁₀- Gesamtbelastung aus Abgas sowie Abrieb und Aufwirbelung ohne (links) und mit Beispielbaustelle (rechts) für das Untersuchungsgebiet Mariendorfer Damm



Quelle der Graphik: [IVU 2013], modifiziert durch IFEU

Durch die Erhöhung der PM₁₀-Konzentrationen im JMW steigt auch die Wahrscheinlichkeit der Grenzwertüberschreitung des TMW. Diese kann durch einen statistischen Zusammenhang beschrieben werden, hierfür wurden im Rahmen einer UBA-Studie 900 Messzeitreihen im Zeitraum 2002 bis 2004 ausgewertet⁶ [IVU 2009b]. Nach dieser Funktion ergäben sich am Auswertungspunkt alleine 18 Überschreitungstage pro Jahr durch die Vorbelastung, zusätzlich durch

⁵ Für die Baustelle wurden aufwirbelungsbedingte PM₁₀-Emissionen 863 g/d berechnet, also etwa dem 5fachen der Abgasemissionen durch Baumaschinen. Zugrunde gelegt wurde hierfür ein Emissionsfaktor für den Bau von Nichtwohngebäuden auf Basis von 0,21 kg PM₁₀ pro ha und Monat [Lohmeyer 2010]. Zwar ergeben sich bei dieser Abschätzung größere Unsicherheiten als bei den Abgasemissionen (z.B. durch witterungsbedingte Einflüsse), ähnliche Größenordnungen wurden jedoch auch in anderen Studien erarbeitet (vgl. [AWEL 2010]).

⁶ Folgende Funktion wurde entwickelt: PM₁₀ (TMW-Überschreitungen) = 10.51413 - 1.98711 * PM₁₀ (JMW) + 0.09389 * PM₁₀ (JMW)² [IVU 2009b]

den Kfz-Verkehr kommt es zu 58 Überschreitungen, 23 mehr als nach Richtlinie 2008/50/EG erlaubt sind. Bei ganzjährigem Betrieb der Baustelle würde die Anzahl alleine durch die Abgasemissionen der Baumaschinen um 10 zusätzliche Tage ansteigen. Weitere 60 Tage kämen durch nicht motorische PM₁₀-Emissionen hinzu (siehe Tabelle 4).

In der Praxis werden Baustellen jedoch nur selten ganzjährig betrieben. Dennoch können lokale Emissionsminderungsmaßnahmen aufgrund des hohen Beitrags zur Grenzwerteinhaltung beitragen. Einen wesentlichen Beitrag dürften hierbei Maßnahmen zur Verringerung von Baustaub – z.B. Abdeckung und Befeuchten von Erdmaterial – leisten. Dennoch kann auch die Vermeidung von Abgasemissionen einen relevanten Beitrag zur lokalen Grenzwerteinhaltung leisten.

Tabelle 4: PM₁₀-Jahresmittelwerte und mögliche Tagesmittelwertüberschreitungen an der Baustelle Mariendorfer Damm

Beitrag zur Gesamtbelastung	JMW am Auswertungspunkt	Mögliche Anzahl Tage > 50 g/m ³
Vorbelastung	24,6	18
Vorbelastung+Kfz	35,4	58
Vorbelastung+Kfz+Baustelle (Abgas)	37,5	68
Vorbelastung+Kfz+Baustelle (Abgas+Abrieb/Aufwirbelung)	47,5	128

Quelle: [IVU 2013], eigene Berechnungen

5.5 NO₂-Beiträge im Stadtgebiet

Die NO₂-Belastung wird stark durch den Straßenverkehr und dessen lokale Beiträge bestimmt, der Hintergrundbeitrag mobiler Maschinen ist daher begrenzt

Stärker noch als bei der Feinstaubbelastung steht die NO₂-Belastung im Zusammenhang mit dem Straßenverkehr: Nahezu alle (2010: 99 % gegenüber 82 % bei PM₁₀) der Grenzwertüberschreitungen treten an Verkehrsmessstationen auf⁷. Auch Untersuchungen in Luftreinhalteplänen untermauern die Rolle des lokalen Kfz-Verkehrs: Bei der durchschnittlichen räumlichen Zuordnung entfällt demnach 55 % der NO₂-Belastung auf lokale Quellen, unterschieden nach Verursachern entfällt 69 % auf den städtischen Kfz-Verkehr [IVU 2009a]. Weitere Beiträge stammen u.a. aus Industrie- und Kleinfeuerungsanlagen. Die NO₂-Konzentration an einer Luftmessstation muss dabei jedoch im Zusammenhang mit der gesamten Konzentration von Stickstoffoxiden (NO_x = NO+NO₂) analysiert werden. An stark verkehrsbeeinflussten Stationen kommt der überwiegende Teil der NO- und NO₂-Konzentrationen direkt von den Emissionen des lokalen Verkehrs (= lokale Zusatzbelastung). Die NO₂-Zusatzbelastung hat dabei jedoch zwei Hauptursachen:

- NO₂-Direktemissionen aus dem Auspuff: Im Straßenverkehr ist der Anteil von NO₂ an den gesamten (regulierten) NO_x-Emissionen moderner Diesel-Pkw mit Oxidationskatalysatoren stark erhöht. Trotz sinkender NO_x-Emissionen steigen daher in den letzten Jahren die direkten NO₂-Emissionen im Straßenverkehr an. Auch bei der Ausstattung von Baumaschinen mit Partikelfiltern kann es zu einer Erhöhung der direkten NO₂-Emissionen kommen.
- Luftchemische NO₂-Bildung in dem das lokal emittierte NO mit Ozon unter Bildung von NO₂ reagiert (NO + O₃ <=> NO₂ + O₂). Im Falle einer Zunahme der verfügbaren Ozonmenge erhöht sich die NO₂-Bildung durch den Ozonabbau.

Während der luftchemische NO₂-Beitrag vom Reaktionsgleichgewicht (u.a. der Verweilzeit und Reaktionsgeschwindigkeit) abhängt, tragen direkte NO₂-Emissionen sofort zur lokalen NO₂-Belastung bei.

Nach Abschätzungen die auf den Angaben in Luftreinhalteplänen basieren, kann für mobile Maschinen von einem Beitrag von 1-9 % zur städtischen Hintergrundbelastung ausgegangen werden (Abbildung 19). Der NO₂-Beitrag mobiler Maschinen beträgt damit trotzdem nur einen Bruchteil des Beitrags durch den Kfz-Verkehr. In Einzelfällen wie Berlin und Stuttgart ergibt sich aber absolut ein relevanter Anteil gegenüber den sonstigen Quellen aus.

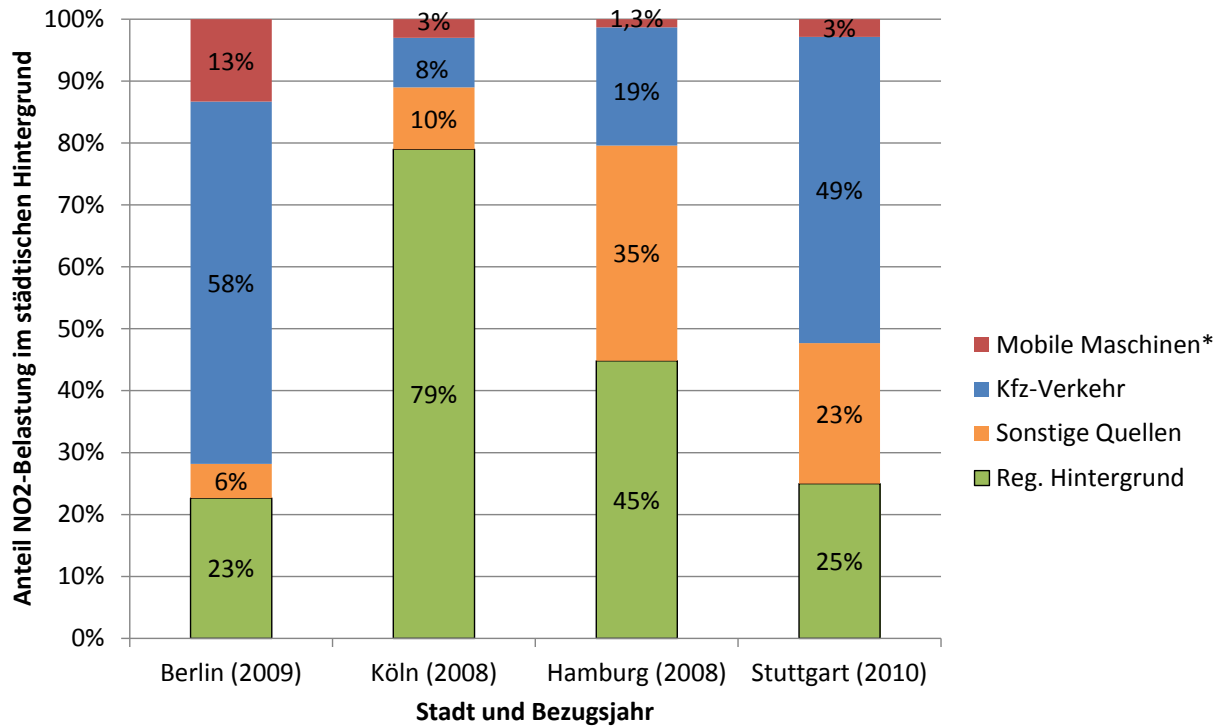
Verwertbare Informationen über die lokale NO₂-Zusatzbelastung durch mobile Maschinen liegen aufgrund der komplexen Bildungsmechanismen bisher kaum vor. Anhand der bundesweiten Emissionen (vgl. Kap. 4.1) lässt sich ableiten, dass mobile Maschinen bei NO₂ eine geringere Relevanz als bei Partikeln einnehmen⁸. Ein weiterer Grund für die dünne Datenlage könnte aber auch darin liegen, dass Grenzwertüberschreitungen bei NO₂ vornehmlich den Jahresmit-

⁷ Die Prozentangaben beziehen sich auf den Anteil der Stationen im deutschen Luftmessnetz, bei denen im Jahr 2010 Grenzwertüberschreitungen auftraten (bei NO₂ im JMW > 40 µg/m³, bei PM₁₀ im TMW >50 µg/m³ an mehr als 35 Tagen im Jahr). Quelle: [UBA 2013] und eigene Berechnungen.

⁸ Die jährlichen NO_x-Emissionen mobiler Maschinen entsprechen etwa 25 % der Emissionen des Straßenverkehrs. Bei abgasbedingten Partikeln liegt der Anteil dagegen fast genauso hoch und damit um das Vierfache höher als bei Stickoxiden.

telwert betreffen. Dadurch fallen temporäre Einflüsse beispielsweise durch den Maschinenbetrieb auf Baustellen weniger ins Gewicht als bei PM₁₀.

Abbildung 20: Anteil des Kfz-Verkehrs, mobiler Maschinen und sonstiger Quellen an der NO₂-Belastung (JMW) im städtischen Hintergrund



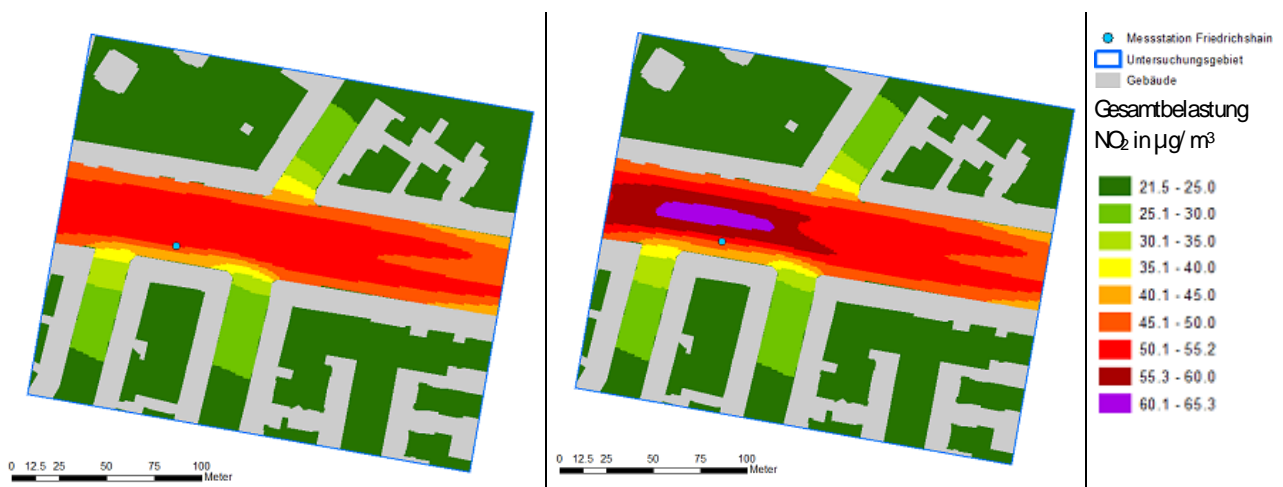
* Für Berlin/Stuttgart über NO_x-Emissionen abgeschätzt, da Anteile für mobile Maschinen in Berlin innerhalb "sonstiger Quellen", in Stuttgart zusammen mit "Industrie" ausgewiesen werden

5.6 NO₂-Zusatzbelastung im Fallbeispiel

Lokal können Baumaschinen zu Erhöhungen der NO₂-Belastung von bis zu 10 Mikrogramm (JMW) führen, den größten Anteil trägt jedoch der Straßenverkehr

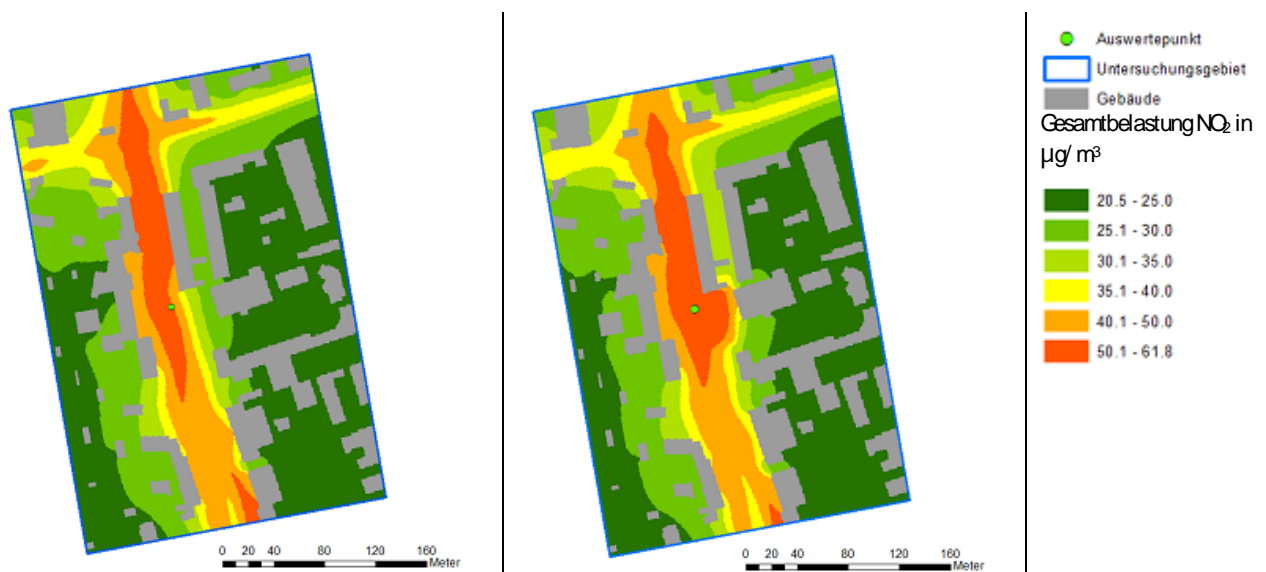
Zur Untersuchung des lokalen NO₂- Belastungsbeitrag wurden analog zum Feinstaub ebenfalls die beiden Beispielbaustellen betrachtet. In der Frankfurter Allee erhöht sich die lokale NO₂-Belastung um bis zu 10 µg/m³, diese bleibt aber auf die Straßenschlucht beschränkt (Abbildung 21). Am Mariendorfer Damm erstreckt sich die NO₂-Belastung durch die Baustelle dagegen auf einen größeren Bereich und dehnt sich auch in die Häuserschluchten aus. Auch hier werden die NO₂- Konzentrationen um bis zu 10 µg/m³ erhöht.

Abbildung 21: Jahresmittelwert der NO₂- Gesamtbelastung ohne (links) und mit Beispielbaustelle (rechts) für das Untersuchungsgebiet Frankfurter Allee



Quelle der Graphik: [IVU 2013], modifiziert durch IFEU

Abbildung 22: Jahresmittelwert der NO₂- Gesamtbelastung ohne (links) und mit Beispielbaustelle (rechts) für das Untersuchungsgebiet Mariendorfer Damm



Quelle der Graphik: [IVU 2013], modifiziert durch IFEU

Wie die modellierten NO_x- und NO₂-Konzentrationen an den Auswertungspunkten zeigen, liegt der NO_x-Zusatzbeitrag der Baumaschinen deutlich unter denen des Kfz-Verkehrs (Tabelle 5). An beiden Punkten wird der NO₂-Jahresmittelgrenzwert von 40 µg/m³ allein durch die Vorbelastung und den Kfz-Verkehr überschritten. Die Baumaschinen erhöhen die NO₂-Belastung um weitere 1- 4 µg/m³. Deutliche Erhöhungen des NO₂-Jahresmittelwertes, die zu Überschreitungen führen könnten, dürften jedoch selten auftreten, da die Baumaschinen meist nur eine begrenzte Zeit des Jahres aktiv sind.

Tabelle 5: Jahresmittelwerte der NO_x-Zusatzbelastung und NO₂-Gesamtbelastung an den Auswertungspunkten

Belastung	Situation	Einheit	Frankfurter Allee	Mariendorfer Damm
NO _x - Zusatzbelastung	Kfz Verkehr	µg/m ³	78	86,2
	Baustelle		4,5	30,7
NO ₂ -Gesamtbelastung	ohne Baustelle		50,4	52,7
	mit Baustelle		51,5	56,6
	Erhöhung durch die Baustelle	%	+ 2,2%	+ 7,4%

Quelle: [IVU 2013], eigene Berechnungen

6 Bewertung technischer Minderungsmaßnahmen

6.1 Technische Minderungsmöglichkeiten

Moderne Abgasminderungstechnologien können die spezifischen Emissionen mobiler Maschinen minimieren - die technischen und finanziellen Herausforderungen sollten aber bei der Maßnahmenplanung berücksichtigt werden

Mit modernen Abgasminderungstechniken lassen sich die Emissionen mobiler Maschinen auf ein Minimum reduzieren. Ab dem Jahr 2014 müssen mobile Maschinen Grenzwerte der Stufe IV erfüllen, deren spezifische Emissionen um über 95 % niedriger liegen als bei Maschinen ohne Emissionsstandards. Damit nähert sich die Emissionsgrenzwertgesetzgebung mobiler Maschinen bezüglich PM und NO_x weitgehend den Euro VI-Standards für Lkw an.

Tabelle 6: Entwicklung der Emissionsfaktoren/Grenzwerte bei PM und NO_x (in g/kWh)

Schadstoff	NRMM (75-130 kW)			Lkw	
	Ohne Standard (vor 1990)	Stufe IV	Reduktion Stufe IV zu vor 1990	Euro VI	Reduktion Euro VI zu Stufe IV
PM	1,0	0,025	- 97,5 %	0,01	- 60 %
NO _x	11,8	0,4	- 96,6 %	0,4	-

Quellen: TREMOD-MM 3.0, Richtlinie 97/68/EG, Richtlinie 595/2009

Zur Senkung der spezifischen Emissionen setzen die Motoren- und Maschinenhersteller einerseits auf innermotorische Maßnahmen wie eine Optimierung der Motoreinstellung und weitergehende Systeme wie Abgasrückführung und Dieseloxydationskatalysatoren. Die steigenden Emissionsstandards machen jedoch zunehmend den Einsatz von Abgasnachbehandlungssystemen wie Dieselpartikelfiltern (DPF) und selektiver katalytischer Reduktion (SCR) nötig. Hierdurch kann eine Reduktion der PM-Emissionen von über 90 % und der NO_x-Emissionen um bis zu 90 % erreicht werden (siehe Tabelle 7). Die Nutzung von DPF kann je nach Art des Beschichtungsmaterials auch zu einer Erhöhung der direkten NO₂-Emissionen (als Anteil von NO_x) führen, gängige Zertifizierungssysteme versuchen diesen Anstieg aber zu begrenzen [Mayer 2013].

Prinzipiell können DPF- und SCR-Systeme auch zur Nachrüstung bestehender Maschinen eingesetzt werden. Vor allem bei der DPF-Nachrüstung gibt es zahlreiche Praxiserfahrungen durch den Einsatz im Untertagebau und auf Baustellen in der Schweiz, während die SCR-Nachrüstung für mobile Maschinen in der Praxis bisher deutlich weniger erprobt ist.

Der Einsatz dieser Nachbehandlungssysteme birgt technische Herausforderungen. Alle auf Katalysatoren beruhenden Systeme erfordern eine hohe Kraftstoffqualität mit niedrigem Schwefelanteil. In Europa und den USA stellt dies derzeit kaum ein Problem dar, da nur schwefelfreier Kraftstoff im Verkehr eingesetzt werden darf. Teilweise müssen die Maschinenhersteller jedoch eine zusätzliche Modellvariante für den Verkauf in Entwicklungs- und Schwellenländern entwickeln [VDMA 2012]. Die Funktion der katalytischen Systeme ist auch stark von der Abgastemperatur abhängig, damit ausreichende Minderungsraten bei SCR und Regenerationsraten bei DPF („Abbrennen“ der Rußpartikel im Filter) gewährleistet werden. Die Systeme müssen daher speziell auf die Lastprofile der Maschinen und Anwendungsbereiche angepasst werden.

Tabelle 7: Abgasminderungstechnologien und spezifische Emissionsminderungsraten

Technologie	Spezifische Emissionsminderung				Quellen
	PM/PN*	NOx	HC	CO	
Oxidationskatalysator	20-50 %		60-90 %		[MECA 2009]
DPF (geschlossene) Material: Sintermetall, Keramik Varianten: aktive, passive Systeme	> 90 % PM >99% PN > 95% PM				[MECA 2009] [AECC 2013]
Nebenstromfilter	30-75 % 30-60 %				[MECA 2009] [AECC 2013]
SCR	20-30 %	70-90 %	80 %		[MECA 2009]
AGR Abgasrückführung		40 %			[MECA 2009]
DeNOx-Katalysator		>80 %			[MECA 2009]
NOx-Speicher-Katalysator		10-40 %			[MECA 2009]
Kombinierte Systeme (DOC, DPF, SCR)	95-97 %	87-96 %	82-95 %	89-100 %	[AECC 2011]

*Anmerkung: PN=Partikelanzahl („particle number“)

Die Regeneration von Dieselpartikelfiltern muss in regelmäßigem Abstand erfolgen, um angesammelten Ruß zu oxidieren und damit aus dem Filter zu entfernen. Filterhersteller lösen das Problem durch eine kontinuierliche Oxidation mittels Katalysatoren, Kraftstoffadditiven oder eine aktive Regeneration mittels Brenner. Zusätzlich kommen teilweise auch Wechselfilter zum Einsatz. Die komplexen Systeme erfordern eine Überwachungssensorik und regelmäßige Wartung, da defekte Systeme zu schweren Motorschäden führen können. Außerdem kann sich durch Erhöhung des Abgasgedruckes und durch aktive Regeneration der Treibstoffverbrauch erhöhen. SCR-Systeme erfordern ebenfalls sensible Steuerungstechnik für die Dosierung des Reduktionsmittels AdBlue®. Diese Harnstofflösung muss regelmäßig in einen separaten Tankbehälter nachgefüllt werden.

Um die technische Funktionalität zu gewährleisten sind verschiedene Zertifizierungsverfahren, wie die VERT-Filterliste oder das FAD-Qualitätssiegel, entwickelt worden. Auf EU-Ebene wird derzeit die REC-Richtlinie erarbeitet, die ab 2014 eine einheitliche Zertifizierungsgrundlage für die EU ermöglichen soll [Schulte 2013]. Durch diese verschiedenen Anstrengungen können technische Probleme minimiert werden. In jedem Falle führt der Einsatz von Abgasnachbehandlungssystemen jedoch sowohl bei Erstausrüstung durch den OEM (Original Equipment Manufacturer) als auch bei der Nachrüstung zu zusätzlichen Kosten, die dem jeweiligen Minderungsnutzen gegenübergestellt werden müssen.

6.2 Kosteneffizienz der Partikelfilternachschrüstung

Eine Partikelfilternachschrüstung liegt für Baumaschinen der aktuellen Stufe IIIA im Bereich der Kosteneffizienz

Die Kosteneffizienz einer Partikelfilternachschrüstung lässt sich durch die bei der Nachschrüstung entstandenen Kosten pro durch die Nachschrüstung vermiedene Emissionsmenge (€/kg PM) beschreiben. Wesentlich bei dieser Betrachtung sind Alter und Größe der Maschine, die ihrerseits folgende Parameter beeinflussen:

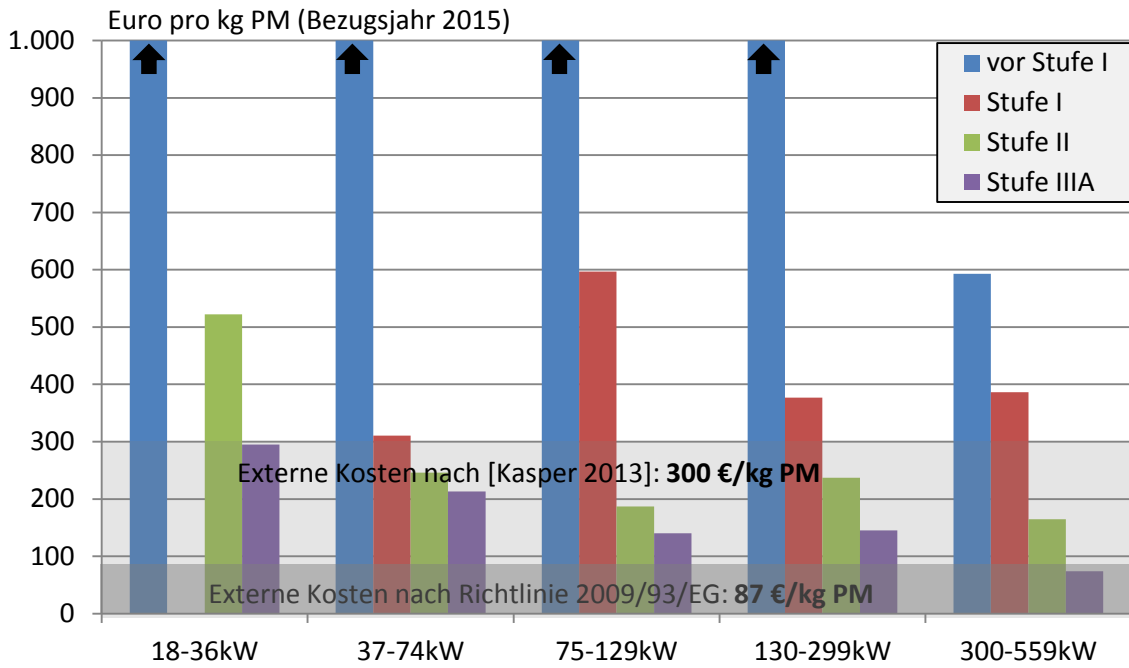
- die spezifischen Emissionen (g/kWh oder g/h)
- die Einsatzhäufigkeit (h/Jahr)
- die restliche Lebensdauer der Maschine bzw. des Filters
- die Kosten für Anschaffung und Instandhaltung des Filters

Die den folgenden Berechnungen zugrundeliegenden Annahmen zum Emissionsverhalten und den Kosten der Nachschrüstung sind im Anhang 10.2 dieses Berichts dokumentiert. Unterschieden werden dabei die Kosten für den Filter selbst, die Montagekosten der Nachschrüstung und die laufenden Wartungskosten. Die gesamte Kosteneffizienz hängt stark von der Lebenszeit und dem Alter der Maschinen ab. Es wird davon ausgegangen, dass die Maschinen maximal 20 Jahren genutzt werden und die Filter maximal 10 Jahre nutzbar sind. Als Bezugsjahr für die Nachschrüstung wurde das Jahr 2015 untersucht.

Es ergeben sich unter diesen Annahmen Kosten für Bestandsmaschinen ab Stufe I zwischen 74 € und 600 € pro vermiedenem Kilogramm Partikelmasse (Abbildung 23). Am effizientesten ist die Nachschrüstung von Maschinen der Stufe IIIA, da diese im Durchschnitt öfter eingesetzt werden und über eine längere Restlebenszeit als ältere Maschinen verfügen. Bei älteren Maschinen ist die Kosteneffizienz, trotz der hohen spezifischen Emissionen eher niedrig, da diese Maschinen in der Regel nur noch selten genutzt werden und früher aus dem Bestand ausscheiden als neuere Maschinen. Für Maschinen vor Stufe I ergäben sich somit meist Kosten von über 1000 € pro vermiedenem Kilogramm Partikelmasse. Trotz höherer Kosten pro Filter ergibt sich für die größeren Maschinen eine bessere Kosteneffizienz als für die kleineren, da diese im Mittel weniger im Einsatz sind und pro Maschine jährlich weniger Emissionen verursachen. Für neuere Baumaschinen der Stufe IIIA liegen die Kosten mit 74 € bis 295 € in einer ähnlichen Größenordnung wie in der Literatur für Pkw (193 €) und Lkw (113 €) angegeben [AK 2009].

Von der EU-Richtlinie 2009/33/EG [EU 2009] werden die pro kg PM-Emissionen anfallenden externen Kosten von Straßenfahrzeugen auf 87 € pro kg PM₁₀ beziffert. Dieser Betrag rechtfertigt bereits die ermittelten Nachschrüstungskosten für Maschinen der Stufe IIIA \geq 300 kW. Dabei wird jedoch noch nicht berücksichtigt, dass die Folgekosten von Emissionen in Ballungsgebieten (z.B. Umweltzonen) tendenziell höher liegen. Nach [Kasper 2013] liegen die Folgekosten für ein kg PM₁₀ in Mitteleuropa im Durchschnitt sogar bei 300 € und werden durch „Behandlungskosten und Arbeitsausfall betroffener Personen“ verursacht. Setzt man diese Kosten an, ist die Nachschrüstung von IIIA-Maschinen in allen Größenklassen kosteneffizient, auch die Nachschrüstung von Maschinen der Stufe II mit über 37 kW stellt sich dann noch als kosteneffizient dar. Die Nachschrüstung älterer Maschinen vor Stufe I ist jedoch auch im Vergleich mit diesen hohen Folgekosten in der Regel nicht kosteneffizient. Hier bietet sich die Alternative, diese Maschinen frühzeitig durch „saubere“ Neumaschinen (möglichst mit Partikelfilter) zu ersetzen.

Abbildung 23: Kosten pro vermiedener PM-Emission und Maschine durch DPF-Nachrüstung in Abhängigkeit der Lebenszeit für das Jahr 2015; Externe Kosten durch 1 kg PM-Emission



©IFEU 2013

6.3 Filterausstattung von Neumaschinen als OEM-Lösung

Der Einbau von Partikelfiltern in Neumaschinen als OEM-Lösung senkt die Kosten und kann über die frühzeitige Definition zukünftiger Grenzwerte befördert werden

Die Partikelanzahl bzw. der Ausstoß an Feinstpartikeln wird durch den Einsatz von Partikelfiltern am zuverlässigsten gemindert. Diese kommen nach aktueller Gesetzeslage aber in Neumaschinen nicht zwangsläufig zum Einsatz. Zwar ist es wahrscheinlich, dass ein Teil neuer Maschinen (ab 37 kW) mit DPF ausgestattet wird, um den PM-Grenzwert von 0,025 g/kWh einzuhalten, die Hersteller können aber auch andere Minderungsstrategien wählen. So ist es zum Beispiel dem Hersteller JCB bereits gelungen einen Stufe-IIIB-Motor auf Basis rein innermotorischer Maßnahmen zu entwickeln⁹. Vorteile einer solchen Strategie sind geringere Wartungskosten und die Möglichkeit, die Maschinen auch mit schwefelhaltigerem Kraftstoff betreiben zu können.

Die gesundheitliche Entlastung der Bevölkerung fällt mit solchen Strategien jedoch deutlich geringer aus, da eine Reduktion der Partikelanzahl (PN) nicht sicher gewährleistet ist. Laut dem Schweizer Bundesamt für Umwelt (BAFU) emittieren Maschinen, die den geltenden PM-Grenzwert der Stufe IIIB bzw. IV mit rein innermotorischen Maßnahmen einhalten bis zu 1000mal mehr ultrafeine Partikel als mit einem effizienten Dieselpartikelfilter ausgestattete Maschinen [BAFU 2012]. Sinnvoll wäre es daher, frühzeitig Anreize für die Ausstattung von Neumaschinen mit einem Partikelfilter zu schaffen bzw. die Einhaltung eines PN-Grenzwertes für Neumaschinen zu verlangen. Dies bietet sich auch für die kleineren Geräte mit 18 bis <37 kW an, die bisher nur mit der Abgasstufe IIIA geregelt werden.

Die Forderung eines Partikelanzahlgrenzwertes für eine Weiterentwicklung der Richtlinie 97/68/EG wird auf EU-Ebene seit längerem diskutiert (siehe [DG ENTR 2013]). Damit würde der Partikelfilter als kosteneffiziente OEM-Lösung zukünftig faktisch umgesetzt. Gleichzeitig würden aber auch Anreize geschaffen diese Technologie schon vorher verstärkt einzusetzen. Der standardmäßige Einbau von Filtern als OEM-Lösung ist dabei tendenziell kostengünstiger als eine nachträgliche Nachrüstung, insbesondere wenn der Motorbauraum der Neumaschinen für die Ausstattung mit DPF konzipiert wurde. Herstellerangaben beziffern den Kostenvorteil durch eine OEM-Lösung gegenüber der Nachrüstung pauschal auf 50 %¹⁰. Mögliche Einsparungen wären durch folgende Effekte zu erwarten:

- Keine Zusatzkosten für Montage der Nachrüstfilter (je nach Filter und Größe etwa 500 € bis 3000 € bzw. etwa 10-30 % der gesamten Investitionskosten)
- Senkung der Filterkosten durch höhere Stückzahlen (Abstimmung von Bedarf an die Maschinenproduktion möglich)
- Keine Zusatzkosten für Erstellung eines maschinenspezifischen Temperatur-/Lastprofils

⁹ <http://www.constructionequipment.com/jcb-ecomax-engines>, letzter Abruf am 12.08.2013

¹⁰ Mündliche Herstellerangabe beim Workshop "Partikelfilter an Baumaschinen", Berlin, Mai 2013

6.4 Kosteneffizienz einer SCR-Nachrüstung

Die Nachrüstung ist bei SCR-Systemen bisher weniger erprobt und gegenüber den vermiedenen externen Kosten nicht effizient

Eine deutliche Verschärfung des NO_x-Grenzwertes für mobile Maschinen erfolgt erst mit der Emissionsstufe IV und damit später als bei den Partikelemissionen. Prinzipiell kann eine Nachrüstung des Maschinebestandes mit SCR-Systemen das Emissionsverhalten auch im Bestand deutlich verbessern. Eine Analyse der Kosteneffizienz einer SCR-Nachrüstung ist dabei mit größeren Unsicherheiten verbunden, da die Systeme bisher vorwiegend für den Einsatz in Neumaschinen vorgesehen werden und im Vergleich zu DPF-Systemen weniger Praxiserfahrungen vorliegen. Die angenommenen Kosten werden im Anhang, Kapitel 10.3, aufgeführt.

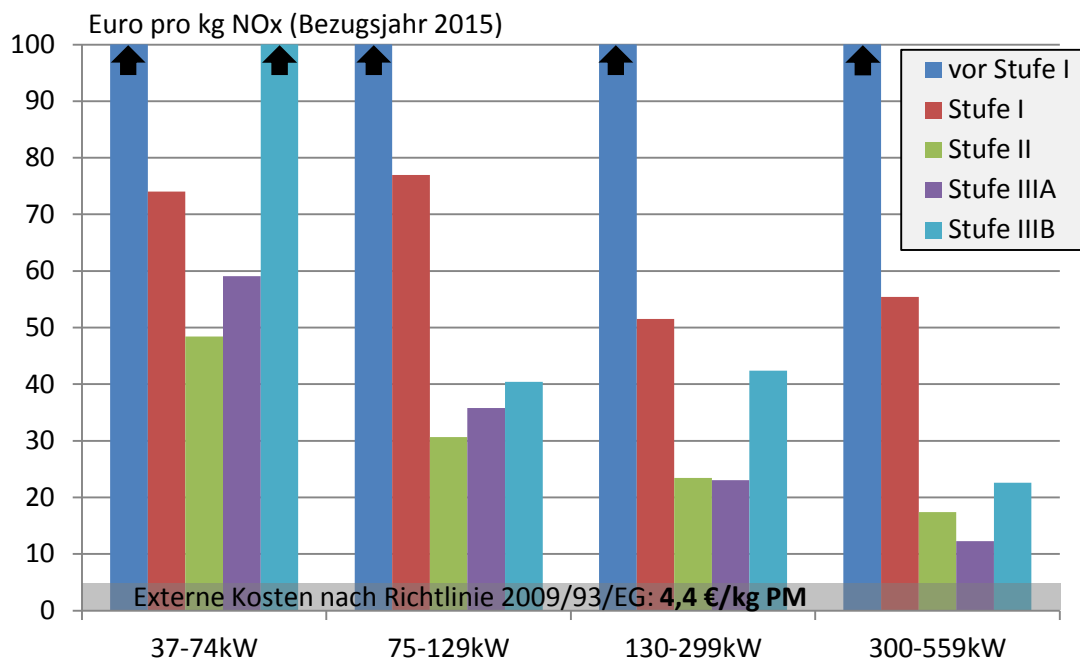
Die Kosteneffizienz bei der Nachrüstung mit SCR-Systemen wird analog zu DPF-Systemen für den mittleren deutschen Baumaschinenpark nach Größenklassen und Emissionsstandards untersucht. Da eine deutliche Verschärfung der NO_x-Grenzwerte von Stufe IIIA erst mit dem Inkrafttreten von Stufe IV stattfindet, wurde auch eine SCR-Nachrüstung der Stufe IIIB untersucht. Maschinen unter 37 kW werden aufgrund der bisher schwächeren Gesetzgebung nicht betrachtet. Für die NO_x-Emissionsminderung durch SCR-Nachrüstung wird von einer Abscheiderate von 70 % ausgegangen¹¹.

Das Ergebnis der Analyse (siehe Abbildung 24) zeigt einen ähnlichen Trend wie bei der Partikelfilternachrüstung: Die Kosteneffizienz ist bei leistungsstarken Maschinen (> 130 kW) tendenziell größer als bei kleineren Leistungsklassen, auch sind die NO_x-Minderungskosten bei alten Maschinen, insbesondere Stufe I und älter, eher höher als bei neueren (mit Ausnahme von Stufe IIIB, 37-74 kW).

Der Vergleich der Kosten pro vermiedene NO_x-Emission mit den externen Kosten nach Richtlinie 2009/33/EC zeigt jedoch ein deutlich ungünstigeres Verhältnis. Die Kosteneffizienz aller betrachteten Nachrüstungsvarianten liegt deutlich über den externen Kosten von 4,40 € pro kg NO_x nach [EU 2009]. Auch unter Berücksichtigung möglicher Unsicherheiten der Kostenermittlung ist bei der SCR-Nachrüstung damit tendenziell keine Kosteneffizienz gegeben. Zusätzlich gilt es zu berücksichtigen, dass die lokalen NO₂-Beiträge in städtischen Hotspots zu einem deutlich größeren Anteil vom Straßenverkehr verursacht werden. Wichtig wird es dagegen sein, durch Partikelfilternachrüstungen keine deutlichen zusätzlichen NO₂-Emissionen zu verursachen oder zur gleichzeitigen Minderung von NO_x und PM neuere Maschinen einzusetzen (vgl. Kap. 7.4).

¹¹ Die NO_x-Abscheideraten für SCR-Systeme werden mit 70-90 % [MECA 2009] angegeben. Bisherige Vorschläge für die REC-Richtlinie fordern mindestens 60 % für NO_x-Nachbehandlungssysteme [Schulte 2013].

Abbildung 24: Kosten pro vermiedener NO_x-Emission und Maschine durch SCR-Nachrüstung in Abhängigkeit der Lebenszeit für das Jahr 2015; Externe Kosten durch 1 kg NO_x-Emission



©IFEU 2013

6.5 Kosteneffizienz der vorgezogenen Anschaffung von Neumaschinen

Für ältere Maschinen kann die vorgezogene Anschaffung neuer Maschinen eine kosteneffiziente Emissionsminderungsmaßnahme darstellen

Analog zu bestehenden Maßnahmenkonzepten einiger Akteure (siehe Kapitel 4.4), können für eine Minderung der PM-Emissionen auch Maschinen der neuesten Grenzwertstufe eingesetzt werden. Maschinen ab einer Leistung von 37 kW müssen seit dem Jahr 2011 die Grenzwertstufe IIIB erfüllen und weisen damit zumindest hinsichtlich der Partikelmasse ein deutlich verbessertes Emissionsverhalten als Geräte der Stufe IIIA auf. Zusätzlich werden ab Stufe IV auch die NO_x-Emissionen der Maschinen > 56 kW deutlich gesenkt. Gerade bei älteren Maschinen, die meist eine geringe Restnutzungszeit und damit eine geringe Kosteneffizienz bei der DPF-Nachrüstung aufweisen, könnte ein vorgezogener Ersatz durch eine Neumaschine zudem die kosteneffizientere Maßnahme sein.

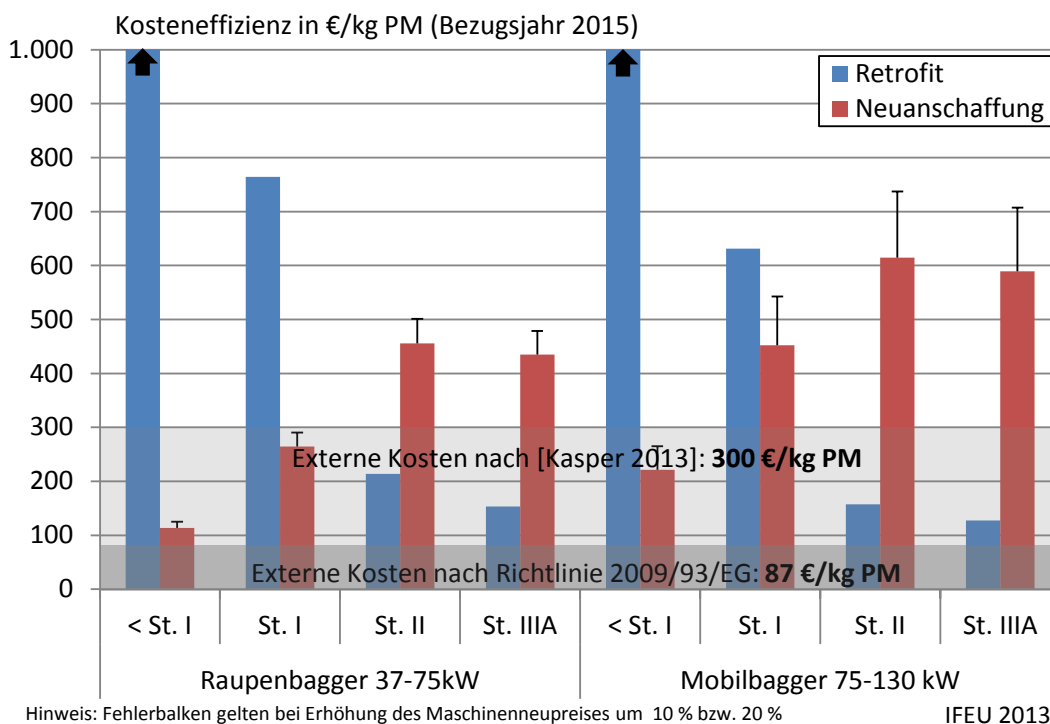
Für Maschinen mit einer Leistung unter 37 kW wurde dagegen bisher kein ähnlich niedriger Partikelgrenzwert formuliert. Hier bleiben nur die DPF-Ausstattung (entweder als Nachrüstung im Bestand oder als OEM-Lösung für Neumaschinen) oder die Weiterentwicklung der Grenzwertgesetzgebung (siehe Kapitel 7.2) als Weg zu einer nachhaltigen Senkung der Partikelemissionen.

Zur groben Einordnung der Kosteneffizienz durch vorgezogene Neuanschaffungen werden die Investitionskosten für zwei Maschinenbeispiele den jeweiligen Nachrüstungs- und Wartungskosten pro Arbeitsstunde gegenübergestellt¹².

¹² Als Investitionskosten wurden nach [WKO 2009] 70.000 € für einen Raupenbagger mit 42 kW und 160.000 € für einen Mobilbagger mit 110 kW angenommen. Für neuere Baureihen könnten die Investitionskosten auf-

Für die vorgezogene Neuanschaffung werden die Opportunitätskosten für die Anschaffung der Maschine mit einem angenommenen kalkulatorischen Zinssatz von 5 % berücksichtigt und auf die durchschnittlichen jährlichen Nutzungsstunden neuer Maschinen umgelegt. Für das Emissionsverhalten der Neumaschinen wurde eine Einhaltung des PM-Grenzwertes der Stufe IIIB/IV angenommen, das Vorhandensein eines Partikelfilters wird dabei nicht vorausgesetzt. Die Kosteneffizienz der Nachrüstung wird entsprechend Kap. 0 über die durchschnittlichen PM-Emissionen, Kosten für Filter, Montage und Wartung, sowie die jeweils pro Emissionsstufe erwartete Restlebenszeit beschrieben. Den Vergleich der Kosteneffizienz zwischen vorgezogener Neuanschaffung und DPF-Nachrüstung („Retrofit“) zeigt Abbildung 25.

Abbildung 25: Vergleich der Kosteneffizienz pro verminderte PM-Emission durch Nachrüstung und vorzeitige Neuanschaffung anhand von zwei Beispielmaschinen



©IFEU 2013

In beiden Beispielen liegen die Emissionsminderungskosten für Maschinen der Stufe I oder älter durch den vorzeitigen Ersatz mit einer Neumaschine unterhalb der Nachrüstungskosten (Abbildung 25). Bei Maschinen ohne Standard (vor Stufe I) liegen die Kosten für die Neuanschaffung mit ca. 110 bis 220 €/kg PM-Emission auch unter den nach [Kasper 2013] angegebenen externen Kosten. Das Ersetzen dieser Altmaschinen durch Neumaschinen ist damit ähnlich kos-

grund der aufwändigeren Abgasnachbehandlung steigen. Der VDMA rechnet beispielsweise für die Produktion von Stufe IIIB-Geräten mit Mehrkosten von 10-15 %. Unklar ist aber, ob diese komplett auf den Maschinenneupreis übertragen werden [VDMA 2012]. Als Sensitivität für eine mögliche Preiserhöhung wird daher beim Raupenbagger (Stufe IIIB) ein Aufschlag um 10 % und beim Mobilbagger (Stufe IV) um 20 % untersucht (siehe Fehlerbalken in

Abbildung 13).

teneffizient wie die Nachrüstung bei neueren Maschinen. Eine mögliche Erhöhung des Anschaffungspreises der Neumaschinen um 10-20 % (dargestellt als Fehlerbalken) aufgrund der aufwändigeren Abgasnachbehandlung bei Stufe IIIB und IV würde die Kosteneffizienz für die Neuanschaffung zwar reduzieren. Für Maschinen vor Stufe I wäre eine Kosteneffizienz hinsichtlich der externen Kosten aber dennoch gegeben. Die geringste Kosteneffizienz ergibt sich auch bei der Wahl der jeweils günstigeren Maßnahme für Stufe-I-Maschinen, da es für eine Nachrüstung in der Regel „zu spät“ und für eine Neuanschaffung noch „zu früh“ ist.

Neben den Investitionskosten spielen auch andere Faktoren eine Rolle bei der Kostenbewertung der Optionen, die jedoch nicht exakt und allgemeingültig quantifiziert werden können. Allgemeine Faktoren sind dabei die jährlichen Reparaturkosten, die bei alten Maschinen tendenziell höher liegen als bei Neumaschinen und der Wertverlust, insbesondere bei Neumaschinen. Diese Faktoren dürften die Kosteneffizienz einer vorzeitigen Neuanschaffung älterer Maschinen tendenziell noch erhöhen.

Zusätzlich werden aber individuelle Faktoren, wie der Zustand und die geplante Weiternutzung der nachzurüstenden Maschine sowie die Zusammensetzung des weiteren Maschineparks des Betreibers die Entscheidung beeinflussen. So können ältere Maschinen reine Ersatzmaschinen sein, für die eine Neuanschaffung nicht sinnvoll ist, oder als gut gepflegte Spezialmaschinen noch intensiv betrieben werden und daher eine kosteneffiziente Nachrüstung ermöglichen. Auch muss der inhomogene Markt der Maschinenanwender berücksichtigt werden. Ältere Maschinen werden hierbei eher über den Gebrauchtmärkte an kleingewerbliche oder Privatanwender übergehen, während die Neuanschaffung eher durch größere Baufirmen oder Baumaschinenvermieter erfolgt.

Die letztliche Entscheidung für oder gegen eine Option kann daher nur vom Maschinenbetreiber selbst getroffen werden. Die Beispieluntersuchung macht jedoch deutlich, dass die vorgezogene Neuanschaffung eine kosteneffiziente Alternative zur Nachrüstung älterer Maschinen sein kann. Zusätzlich können durch eine vorzeitige Neuanschaffung neben Partikeln auch weitere Schadstoffemissionen, insbesondere NO_x, gemindert werden.

In der Maßnahmenumsetzung sollten ältere Maschinen daher nicht von Bestandsregulierung ausgenommen werden. Ebenso wenig ist aber eine ausschließliche Forderung von Neumaschinen sinnvoll. Stattdessen sollte dem Anwender die Wahl der jeweils kostengünstigere Alternative überlassen werden.

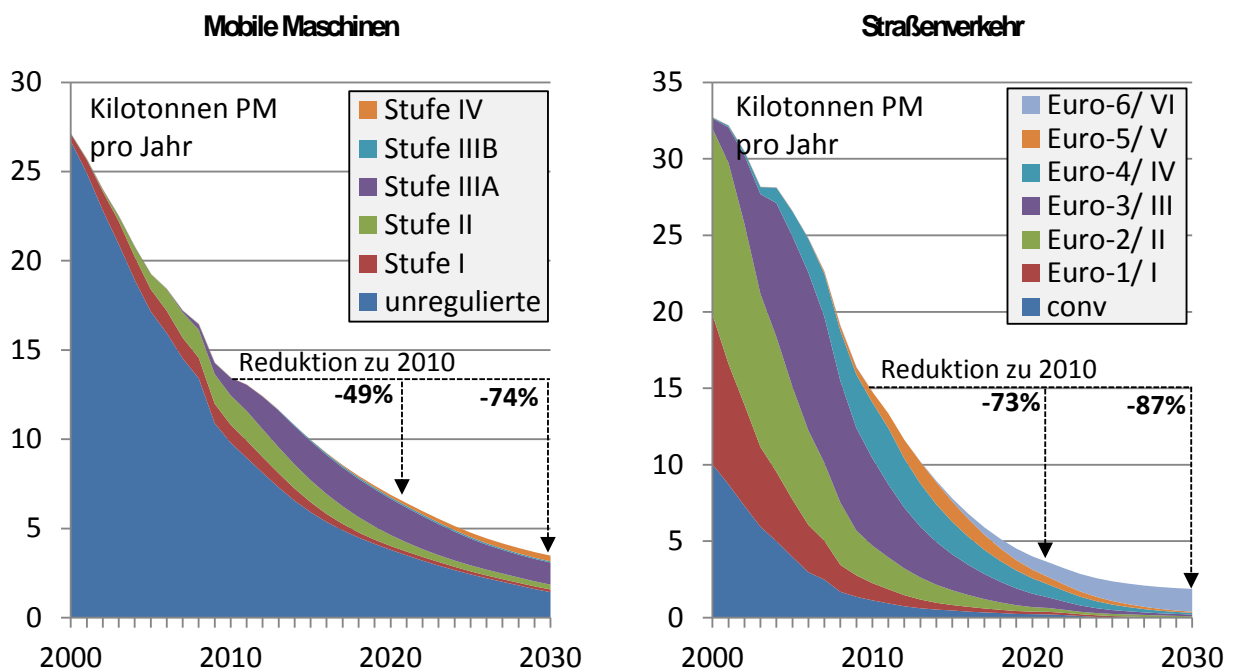
7 Umsetzung und Wirkung von Minderungsmaßnahmen

7.1 Erwartete Emissionsentwicklung nach aktueller Grenzwertgesetzgebung

Die aktuelle Grenzwertgesetzgebung führt zur deutlichen Senkung der PM- und NO_x-Emissionen, jedoch eher langfristig und in geringerem Maße als beim Straßenverkehr

Durch die bereits beschlossenen Emissionsgrenzwerte nach EU-Richtlinie 97/68/EG ist zukünftig eine deutliche Senkung der Emissionen mobiler Maschinen zu erwarten. Abbildung 26 zeigt, dass sich die PM-Emissionen seit dem Jahr 2000 bis heute etwa halbiert haben, eine weitere Reduktion gegenüber den Emissionen des Jahre 2010 wäre um 49 % bis 2020 bzw. um 74 % bis 2030 zu erwarten. Im Vergleich dazu werden beim Straßenverkehr jedoch deutlich höhere und schnellere Minderungen (73 % bis 2020, 87 % bis 2030) erwartet.

Abbildung 26: Vergleich der zukünftigen Entwicklung der PM -Emissionen bei mobilen Maschinen und dem Straßenverkehr in Deutschland nach Emissionsstandards (Business-as-usual-Szenario)



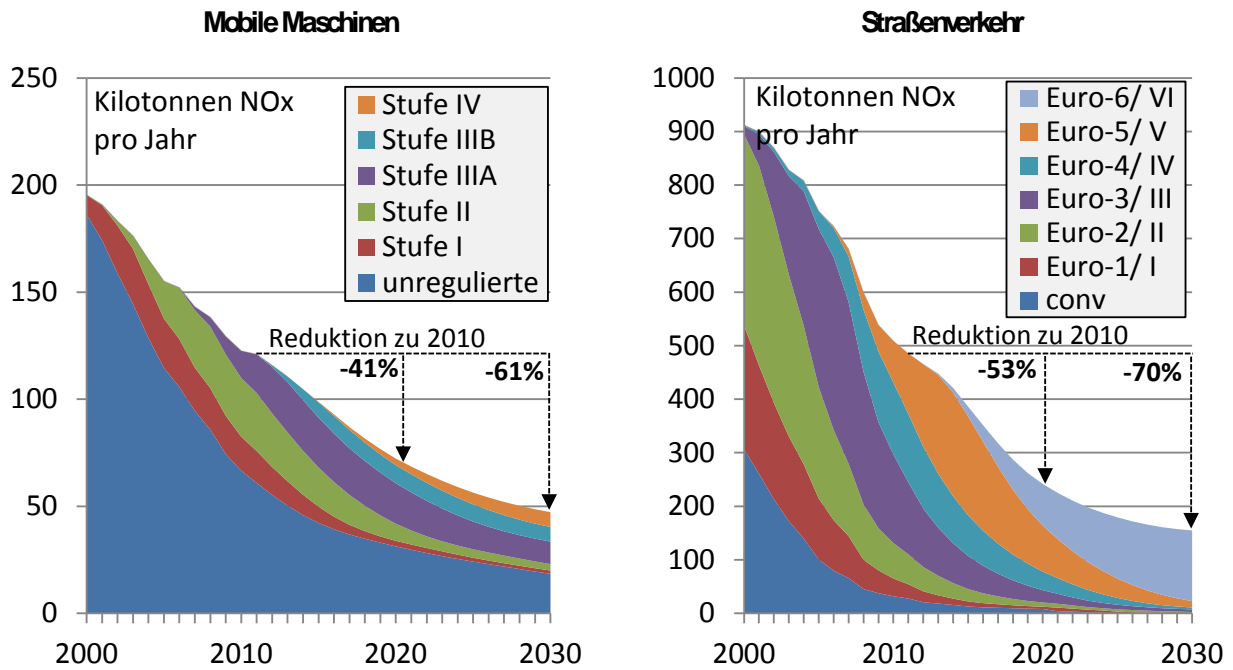
©IFEU 2013. Quelle: TREMOD-MM 3.0, TREMOD 5.32

Deutlich zeigt sich im Vergleich zu den mobilen Maschinen die schnellere Einführung der neueren Abgasstufen Euro-5/V und Euro-6/VI im Straßenverkehr. Durch die frühe und konsequente Einführung dieser Standards (alle Größenklassen sind betroffen) sind im Jahr 2030 somit kaum noch Emissionen durch unregulierte („conv“ in Abbildung 26) Pkw und Lkw zu erwarten, stattdessen werden vorwiegend Euro 6/VI-Fahrzeuge auf den Straßen sein. Demgegenüber verursachen unregulierte mobile Maschinen zukünftig fast 50 % der Emissionen. Hierfür sind zum Großteil die langen Lebenszeiten - insbesondere kleinerer landwirtschaftlicher Maschinen - verantwortlich. In Innenstädten spielen diese unregulierten Maschinen dagegen eine geringe Rolle. Hier verursachen zukünftig vor allem kleinere Geräte der Bauwirtschaft (<37 kW), deren Grenzwerte sich bisher auf Stufe IIIA beschränken, hohe PM-Emissionen.

Ähnlich verhält es sich mit den NO_x-Emissionen, auch hier sind die erwarteten Minderungen im Straßenverkehrs gegenüber 2010 mit 70 % im Jahr 2030 größer als bei den mobilen Maschinen (61 %). Neben der langsamen Bestandumschichtung aufgrund der langen Lebensdauer der

Maschinen weist die derzeitige Grenzwertgesetzgebung auch für NO_x Lücken gegenüber den Kfz auf. So gilt die Emissionsstufe IV, mit demselben NO_x-Grenzwert wie für Euro-VI-Lkw, nur für Maschinen ≥ 56 kW.

Abbildung 27: Vergleich der zukünftigen Entwicklung der NO_x-Emissionen bei mobilen Maschinen und dem Straßenverkehr in Deutschland nach Emissionsstandards (Business-as-usual-Szenario)



©IFEU 2013. Quelle: TREMOD-MM 3.0, TREMOD 5.32

Grundsätzlich sind zwei Ansätze für Minderungsmaßnahmen denkbar:

1. Weiterentwicklung der Emissionsgrenzwerte für Neumaschinen auf EU-Ebene: Damit könnten das Emissionsverhalten langfristig weiter verbessert und Lücken der derzeitigen Emissionsgesetzgebung geschlossen werden, um zu vermeiden, dass einzelne Maschinensegmente (insb. <56 kW) überproportional zu den Emissionen beitragen. Dieser Ansatz wird im folgenden Abschnitt 7.2 diskutiert.
2. Eine gezielte Emissionssenkung der Bestandsmaschinen, wodurch die langsame Umsetzung neuer Grenzwertstufen im Bestand überbrückt werden kann. Hierfür kommt einerseits die Nachrüstung von Bestandsmaschinen mit Abgasnachbehandlungssystemen (insb. DPF) in Frage, auch kann der Einsatz älterer Maschinen in belasteten Gebieten unterbunden und damit eine vorzeitige Anschaffung neuer Maschinen befördert werden. Diese Ansätze und ihre Umsetzung werden in den Abschnitte 0 bis 7.4 diskutiert.

7.2 Auswirkungen einer Weiterentwicklung der Emissionsgrenzwerte

Eine Weiterentwicklung der Emissionsgrenzwerte für Neumaschinen senkt die PM- und NO_x-Emissionen vor allem bei Baumaschinen, deutliche Minderungen sind aber nur mittelfristig zu erwarten

Eine zentrale Maßnahme zur Senkung der Emissionen mobiler Maschinen stellt die Verschärfung oder Erweiterung der Emissionsgrenzwerte für Neumaschinen dar, welche aktuell auch Bestandteil der Agenda für eine Revision der EU-Richtlinie 97/68/EG ist [COM 2013]. Die zu erwartenden Emissionsminderungen sind dabei landespezifisch, die Kosten für Forschung und Entwicklung betreffen hingegen Motoren-/Maschinenhersteller (OEM) auf dem gesamten europäischen Markt. Da der Fokus dieses Berichts auf Deutschland liegt, werden nur die Auswirkungen einer Grenzwertverschärfung bzw. -erweiterung hinsichtlich einer zukünftigen Emissionsminderung in Deutschland untersucht, die Kosteneffizienz wird nicht analysiert.

Zusätzlich zur bestehenden Gesetzgebung (Business-As-Usual-Szenario (BAU)) wurden zwei Szenarien für die Weiterentwicklung der Emissionsgrenzwerte für Neumaschinen untersucht: einerseits die Ausdehnung aktueller Grenzwerte auf kleinere Leistungsklassen <37 kW in Anlehnung an die US-Grenzwertgesetzgebung Tier 4 (Tier 4-Szenario), andererseits zusätzlich eine Verschärfung der Grenzwerte auch für leistungsstärkere Maschinen nach dem Vorbild der Stufe Euro-VI für schwere Nutzfahrzeuge (Euro VI-Szenario). Aufgrund des internationalen Gesetzgebungsverfahrens und möglicher Übergangszeiten (z.B. Lagermotoren), gehen beide Szenarien von einer effektiven Einführung der Grenzwerte am Markt ab 2020 aus.

Tier 4-Szenario:

- Strengere Grenzwerte für Größenklassen <37 kW in Anlehnung an die US-Grenzwertgesetzgebung für mobile Maschinen.
- Die PM-Emissionen (in g pro kWh) werden für Maschinen mit 18-36 kW um 95 %, für Maschinen <18 kW um 77 % gesenkt. Die NO_x-Emissionen werden um jeweils 34 % bzw. 47 % reduziert.

Euro VI-Szenario:

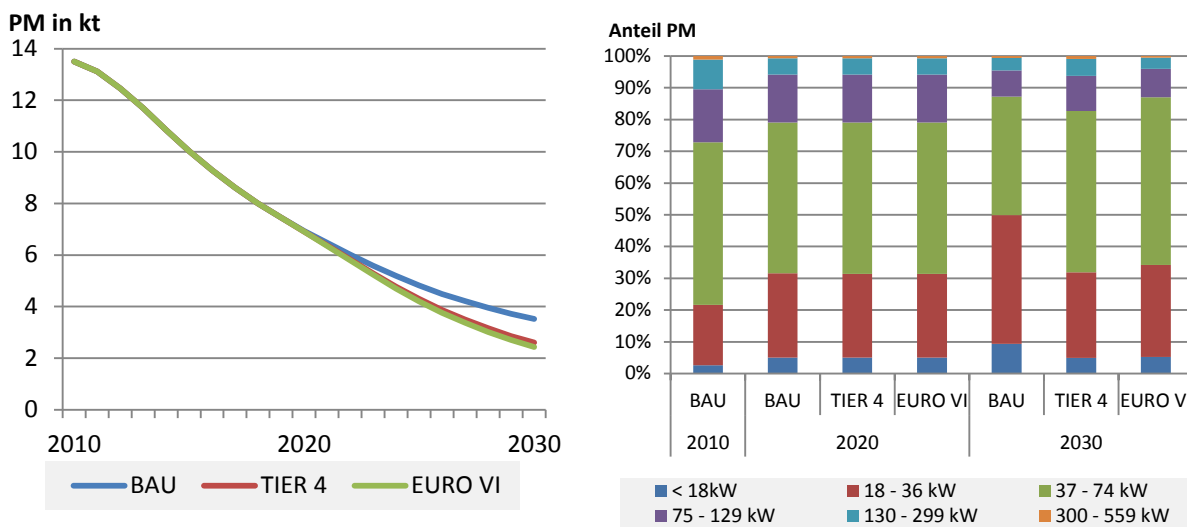
- Für Maschinen <37 kW gilt das Tier 4-Szenario, alle Maschinen ≥37 kW müssen die Euro VI-Grenzwerte für Lkw erfüllen.
- Die PM-Emissionen für Maschinen ≥37 kW werden um 60 % gesenkt, zusätzlich gilt ein Partikelanzahlwert von 6x10¹¹ /kWh. Für die Klasse 37-75 kW werden die NO_x-Emissionen um 81 % gesenkt.

Nicht untersucht wurde im Rahmen der Szenarien eine Einbeziehung von Maschinen >560 kW sowie eine Verschärfung der Grenzwerte für Motoren mit konstanter Drehzahl, da diese Segmente in Deutschland nach aktuellen Annahmen nur gering zu den Emissionen mobiler Maschinen beitragen. Maschinen > 560 kW werden vor allem in stationären Anwendungen eingesetzt (vgl. Annahmen zu Generatoren im Anhang, Kap. 9.2.2). Hier wird weiterer Regulierungsbedarf gesehen (siehe [DG ENTRm2013]), der aber nicht Schwerpunkt dieser Betrachtung mobiler Maschinen ist.

Für die Senkung der bundesweiten PM-Emissionen hat die Einbeziehung von Maschinen <37 kW (Tier 4-Szenario) den größten Effekt (Abbildung 28). Hierbei sticht vor allem die Grö-

Benklasse 18-36 kW hervor, die zusätzlichen Grenzwerte für Motoren unterhalb 18 kW¹³ haben insgesamt einen geringeren Einfluss. Auch eine Verschärfung über den US Standard Tier 4 hinaus auf den EURO-VI-Lkw-Grenzwert führt nur zu einer geringen zusätzlichen Emissionsminderung, da die betroffenen Leistungsklassen ≥ 37 kW mit Stufe IIIB schon sehr niedrige PM-Emissionen erreichen müssen. Den Euro-VI-Grenzwerten kommt jedoch durch den vorgeschriebenen Partikelanzahlgrenzwert eine wichtige Bedeutung zu. Dieser erfordert nach derzeitigem Kenntnisstand den Einsatz geschlossener Partikelfilter, welcher die PM-Emissionen noch deutlich unterhalb des Grenzwertes senken dürfte. Vor allem aber werden hierdurch besonders gesundheitsgefährdende feine Partikelfraktionen abgeschieden (vgl. Kap. 6.3).

Abbildung 28: Entwicklung der PM-Emissionen mobiler Maschinen (alle Sektoren) mit Weiterentwicklung der Emissionsgrenzwerte ab 2020

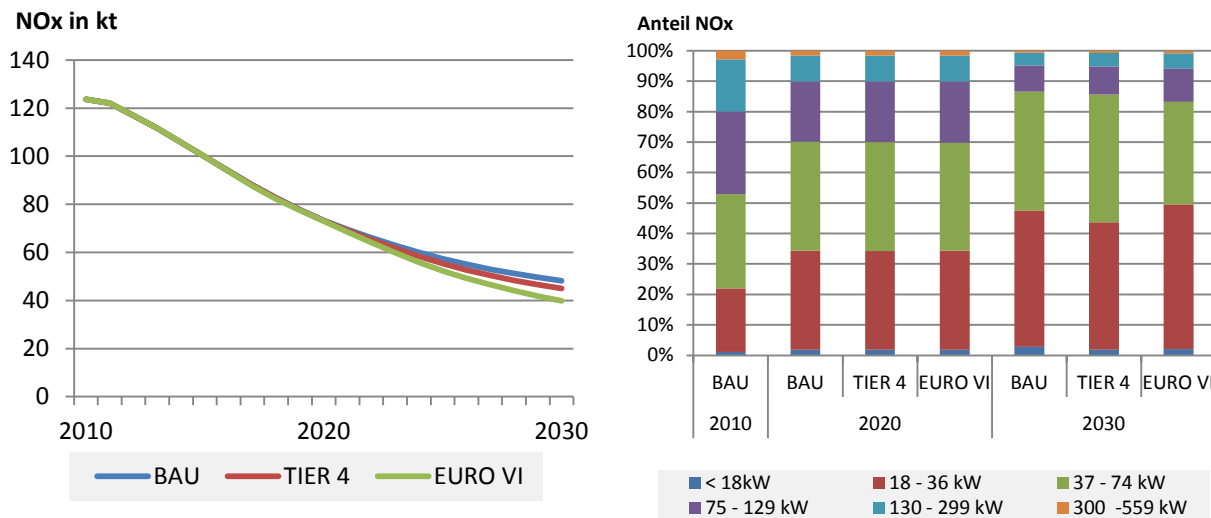


©IFEU 2013

Bei den NO_x-Emissionen wirken sich die strengen Grenzwerte von Euro VI stärker aus (Abbildung 29). Neben den Maschinen < 37 kW werden auch die Emissionen der bisher mit Stufe IIIB regulierten Leistungsklasse 37-56 kW (in TREMOD-MM zusammengefasst zu 37-74 kW) reduziert. Deutliche Minderungseffekte sind aber sowohl bei den PM-, als auch bei den NO_x-Emissionen erst nach 2025 zu erwarten.

¹³ Die Klassengrenzen in TREMOD-MM für die unteren Leistungsklassen werden noch mit 18 kW statt 19 kW bezeichnet, entsprechend der Emissionsgrenzwertgesetzgebung in Richtlinie 97/68/EC

Abbildung 29: Entwicklung der NOx-Emissionen mobiler Maschinen (alle Sektoren) mit Weiterentwicklung der Emissionsgrenzwerte ab 2020



©IFEU 2013

Während die weiterentwickelte Grenzwertgesetzgebung Dieselmotoren in allen Sektoren betrifft, ist die Relevanz der einzelnen Sektoren für die lokale Luftqualität unterschiedlich. Bundesweit sind landwirtschaftliche Maschinen für den größten Emissionsanteil verantwortlich, deren Beitrag beschränkt sich aber in der Regel auf den regionalen Hintergrund. Für die Luftreinhaltung in den stark belasteten städtischen Zonen spielt dagegen vor allem die Bauwirtschaft eine Rolle. Hier wirkt sich die Emissionsminderung bis zum Jahr 2030 stärker aus als in der Summe aller Sektoren (welche insbesondere durch die Landwirtschaft dominiert werden).

Die PM-Emissionen werden demnach bis 2030 durch das Euro-VI-Szenario gegenüber dem BAU-Szenario zusätzlich um 78 % (alle Sektoren 31 %) verringert, die NOx-Emissionen um 42 % (alle Sektoren 17 %) (Tabelle 8). Grund für den hohen Minderungseffekt ist der relevante Anteil kleinerer Maschinen, z.B. Minibagger, die von der neuen Grenzwertstufe betroffen wären. Weiterhin liegt die mittlere Lebenszeit der Baumaschinen deutlich unter der von Traktoren, so dass sich die Grenzwerte schneller in der Flotte durchsetzen.

Tabelle 8: Zusätzliche Emissionsminderungen durch die Szenarien zur Weiterentwicklung der Grenzwertgesetzgebung

Schadstoff	Szenario	Emissionsreduktion in 2030 gegenüber BAU-Szenario	
		alle Sektoren	Bauwirtschaft
PM	Tier 4	-26%	-67%
	Euro VI	-31%	-78%
NOx	Tier 4	-7%	-18%
	Euro VI	-17%	-42%

Für die kurzfristige Minderung der Luftbelastung kann die Weiterentwicklung der Emissionsgrenzwerte jedoch auch in der Bauwirtschaft nur einen begrenzten Beitrag leisten. Daher müssen zusätzliche Maßnahmen für den Bestand in Erwägung gezogen werden.

7.3 Emissionsreduktion durch kurzfristige Maßnahmen im Bestand

Eine kurzfristige Emissionsminderung in belasteten Gebieten kann erreicht werden, indem nur Maschinen mit der aktuellsten Abgasstufe oder mit nachgerüstetem DPF eingesetzt werden.

Die Analyse des Immissionsbeitrags mobiler Maschinen in Kapitel 5 hat gezeigt, dass bei mobilen Maschinen vor allem hinsichtlich ihrer Partikelemissionen Handlungsbedarf besteht. Hier kann der lokale Zusatzbeitrag einer Baustelle sogar den Beitrag des Straßenverkehrs deutlich überschreiten, während der NO₂-Beitrag mobiler Maschinen deutlich hinter dem Straßenverkehr zurückbleibt. Zusätzlich stellt sich die Partikelfilternachschrüstung als Bestandsmaßnahme auch kostengünstiger dar als eine SCR-Nachschrüstung, während Neumaschinen mit niedrigeren NO_x-Emissionen erst ab Stufe IV und ab 56 kW verfügbar sind.

Durch die aktuelle Überschreitung von Luftqualitätsgrenzwerten und des Gefährdungspotenzials von Dieselpartikeln ergibt sich neben der langfristig notwendigen Weiterentwicklung der Grenzwertgesetzgebung auch kurzfristiger Handlungsbedarf. Dieser besteht vor allem in den innerstädtischen Belastungsgebieten und betrifft daher vor allem den Sektor Bauwirtschaft. Eine kurzfristige Minderung der Partikelemissionen kann hier einerseits durch die Nachrüstung der Maschinen mit Partikelfiltern und andererseits durch den gezielten Einsatz von Maschinen ab Stufe IIIB erreicht werden. Dabei könnte je nach Alter der Maschine die kosteneffizientere Variante zwischen Nachrüstung oder vorgezogener Neuanschaffung gewählt werden.

Ein beispielhaftes Szenario für entsprechende Bestandsmaßnahmen ab dem Jahr 2016 ist in Tabelle 9 dargestellt: Neumaschinen ab 37 kW müssen mindestens die Abgasstufe IIIB einhalten. Diese sind damit zwar nicht zwangsläufig mit einem DPF ausgestattet, haben aber gegenüber Stufe IIIA deutliche geringere Emissionen nach Partikelmasse. Mit der Stufe IV für Maschinen ≥ 56 kW, welche ab 2014 auf dem Markt sind, werden auch die NO_x-Emissionen deutlich reduziert. Für diese Leistungsklassen könnte also eine Nachrüstung oder alternativ der Einsatz von Maschinen nach Stufe IIIB (bzw. Stufe IV für Maschinen ≥ 56 kW) gefordert werden.

Im Bereich der Maschinen mit 18-36 kW werden nach aktueller Gesetzeslage keine Neumaschinen mit strengeren Emissionsstandards als der Stufe IIIA verfügbar sein. Aufgrund des hohen Emissionsanteils dieser Leistungsklasse ist eine DPF-Nachschrüstung jedoch sinnvoll. Aufgrund der bisher nicht verfügbaren „sauberen“ Neumaschinen könnte diese jedoch später gefordert werden (Szenarioannahme 2018). Hierdurch könnte auch die Einführung von Maschinen einer neuen Grenzwertstufe (hier bezeichnet als Stufe V) forciert werden, so dass ggf. auch schon vor 2020 Neumaschinen mit Partikelfilter auf den Markt kommen.

Ab dem Jahr 2020 sollten Maschinen der Stufe V für alle Leistungsklassen auf dem Markt verfügbar sein und alternativ zur DPF-Nachschrüstung gefordert werden. Hierbei wird angenommen, dass diese in Anlehnung an die Grenzwertszenarien bis 37 kW die Anforderungen der US-Tier4 erfüllen und ab 37 kW die Euro VI-Grenzwerte für schwere Nutzfahrzeuge.

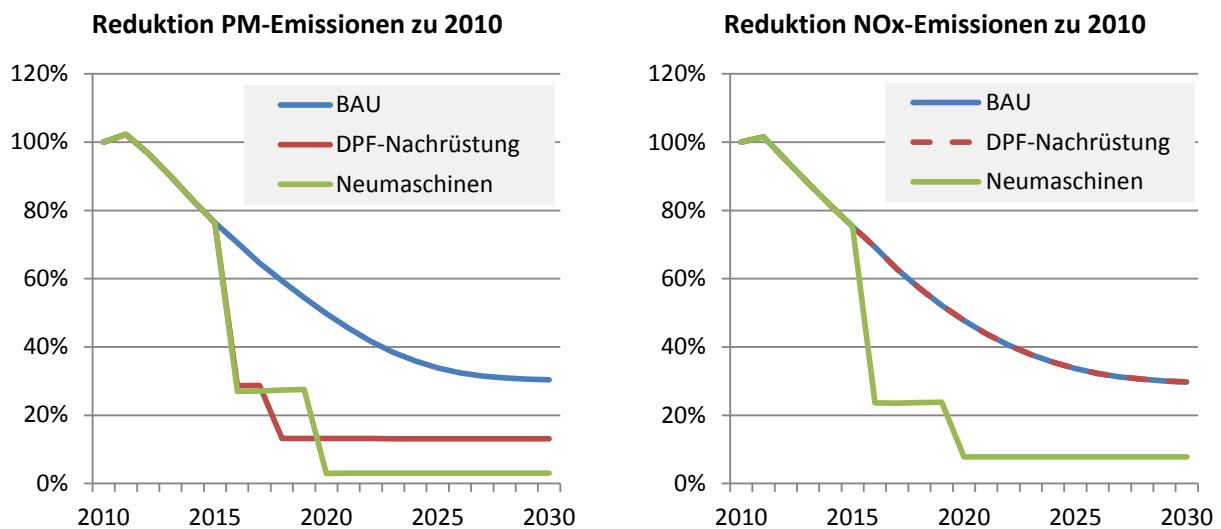
Tabelle 9: Beispielhafte Optionen für die Regulierung von bestehenden Baumaschinen

Größenklasse	<18kW	18-36kW	37-55kW	≥ 56 kW
2016-2017			IIIB oder DPF	IV oder DPF
2018-2019		DPF	IIIB oder DPF	IV oder DPF
Ab 2020	V	V oder DPF	V oder DPF	V oder DPF

Quelle: Eigene Annahmen

Abbildung 30 zeigt die Minderungspotenziale der beiden Optionen „DPF-Nachrüstung“ der Bestandsmaschinen und Einsatz von „Neumaschinen“ im Vergleich mit dem „Business as usual“ (BAU), bezogen auf den deutschen Baumaschinenbestand. Dargestellt wird hierbei nur die relative Emissionsminderung, welche in regulierten Gebieten erreicht werden kann. Die PM-Emissionen könnten dabei durch beide Optionen schon ab dem Jahr 2016 gegenüber dem BAU-Szenario deutlich reduziert werden. Eine Minderung der NOx-Emissionen erfolgt hingegen nur durch die Option „Neumaschinen“.

Abbildung 30: Minderungspotenzial durch kurzfristige Maßnahmen im Baumaschinenbestand hinsichtlich der PM- und NOx-Emissionen



©IFEU 2013

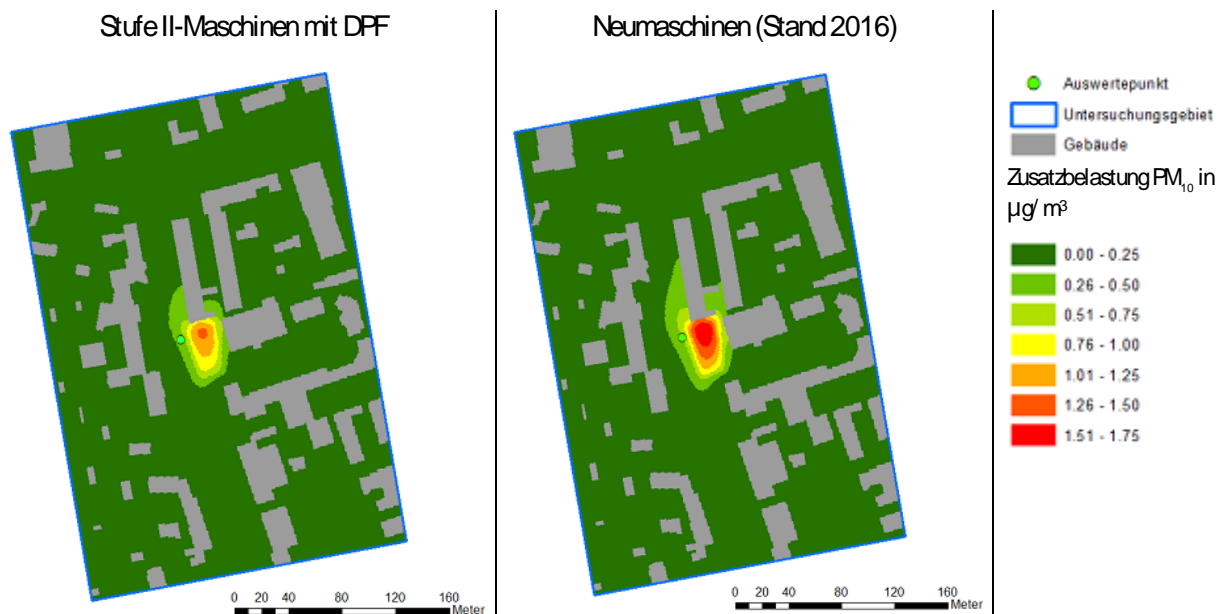
Auch wenn die Nachrüstung mit DPF gegenüber dem Einsatz von Neumaschinen eine vergleichbare Minderung der Partikelmasse und keine zusätzliche Minderung der NOx-Emissionen bewirkt, sollte diese als Maßnahme für den Bestand berücksichtigt werden. Zum einen kann durch den Einsatz von DPF auch schon vor der angenommenen Einföhrung eines Partikelanzahlgrenzwertes im Jahr 2020 eine Reduktion an Feinstpartikeln erreicht werden. Durch die Stufen IIIB und IV ist dies aufgrund des fehlenden Partikelanzahlgrenzwertes nicht gewährleistet. Zum anderen kann die Nachrüstung für jüngerer Bestandsmaschinen auch die kosteneffizientere Maßnahme darstellen.

7.4 Auswirkung auf die lokale Luftqualität im Fallbeispiel

Die lokale abgasbedingte PM_{10} -Belastung kann sowohl durch die Nachrüstung mit DPF als auch den Einsatz neuer Maschinen deutlich gesenkt werden, nicht zertifizierte DPF könnten aber zur Erhöhung der lokalen NO_2 -Belastung beitragen.

Die Auswirkungen von Maßnahmen auf die lokale Luftqualität können anhand der bereits in Kap. 5 dargestellten Fallbeispiele betrachtet werden. Hier zeigte sich, dass die Zusatzbelastungen an PM_{10} im Jahresmittelwert bis zu $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ betragen können, die Tages- und Stundenmittelwerte können dagegen um ein vielfaches höher liegen (vgl. Kap. 5.3). Abbildung 31 stellt die Auswirkungen auf die PM_{10} -Belastung durch mögliche Bestandsmaßnahmen dar: Bei Nachrüstung aller Maschinen der Baustelle ab 37 kW mit einem DPF würde die abgasbedingte PM_{10} -Zusatzbelastung auf weniger als $1,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sinken. Ein ähnlich niedriges Niveau der Zusatzbelastung nach Partikelmasse (max. $1,75 \mu\text{g}/\text{m}^3$) könnte durch Maschinen der ambitioniertesten Grenzwertstufe (je nach kW-Klasse Stufe IIIA bis Stufe IV) erreicht werden.

Abbildung 31: Lokale PM_{10} -Belastung (JMW) durch mit DPF nachgerüstete Baumaschinen der Stufe II (links) und Neumaschinen (Stand 2016) (rechts)



Quelle der Graphik: [IVU 2013], modifiziert durch IFEU

Unterschiede zwischen den untersuchten Maßnahmen können sich auch bei ihrem Einfluss auf die lokale NO_2 -Zusatzbelastung ergeben, da die Filternachrüstung mit einer u.U. deutlichen Erhöhung der NO_2 -Direktemissionen verbunden sein kann. Um die Auswirkungen darzustellen, wurden drei Szenarien mit folgenden Annahmen untersucht:

1. Die mit DPF nachgerüsteten Maschinen emittieren 25 % direktes NO_2 (als Anteil von NO_x). Dieser Fall repräsentiert, dass ein Filter die aktuell diskutierten REC-Zertifizierungskriterien einhält.
2. Die mit DPF nachgerüsteten Maschinen emittieren 60 % direktes NO_2 (als Anteil von NO_x). Dieser Fall soll den maximal möglichen NO_2 -Anteil darstellen, falls keine Zertifizierungskriterien für NO_2 gelten. Aus Test-Protokollen der VERT-Filterliste ist ersichtlich,

dass Anteile in dieser Größenordnung nur selten und bei bestimmten Abgastemperaturen entstehen.

- Die Neumaschinen der Stufe IV emittieren 7 % direktes NO₂. Hierbei wird angenommen, dass die Geräte mit SCR ausgestattet sind, aber über keinen DPF verfügen¹⁴.

Die Ergebnisse in Tabelle 10 zeigen, dass sich die NO₂-Belastung durch den Einsatz der Filter vor allem bei älteren Maschinen deutlich erhöhen kann, selbst wenn aktuelle Zertifizierungskriterien eingehalten werden. So liegt die NO₂-Konzentration im Fallbeispiel Mariendorfer Damm bei Einhaltung des 25 % NO₂-Anteils an den NO_x-Emissionen um 25 % höher als im Fall ohne DPF. Bei einem maximal zu erwartenden NO₂-Anteil von 60 % erhöht sich die NO₂-Konzentration am Auswertungspunkt um 57 % bzw. auf 82,7 µg/m³. Durch den Einsatz neuer Maschinen ohne Filter nimmt die NO₂-Belastung dagegen nur um ca. 2 % zu. Selbst wenn diese Maschinen über einen DPF (und damit einen höheren NO₂-Anteil) verfügen, ist keine relevante absolute Erhöhung der NO₂-Direktemissionen zu erwarten, da bei Stufe-IV-Maschinen der NO_x-Ausstoß durch den strengen Emissionsgrenzwertes von 0,4 g/kWh bereits sehr niedrig liegt.

Die Analyse des Belastungsbeitrags mobiler Maschinen in Kapitel 5 hat jedoch auch gezeigt, dass vor allem hinsichtlich des Partikelbeitrags Handlungsbedarf besteht. Hier ist der Partikelfilter die aktuell beste verfügbare Technik. Negative Auswirkungen wie eine Erhöhung der NO₂-Emissionen können dabei durch geeignete Zertifizierungskriterien minimiert werden.

Tabelle 10: PM₁₀, NO_x und NO₂-Belastung in den Maßnahmenzenarien am Auswertungspunkt Mariendorfer Damm

Szenario	PM ₁₀ - Zusatz	NO _x - Gesamt		NO ₂ - Gesamt	
	JMW	JMW	Rel. Zunahme	JMW	Rel. Zunahme
Vorbelastung	-	115,8	+0%	52,7	+0%
Verkehr	2,6				
Baumaschinen mit Abgasstufe II	2,1	146,5	+27%	56,6	+7%
Baumaschinen mit Abgasstufe II+DPF (25% NO ₂)	0,4				
Baumaschinen mit Abgasstufe II+DPF (60% NO ₂)	0,4				
Baumaschinen als Neumaschinen ohne DPF	0,5	115,8	+0%	54	+2%

Quelle: [IVU 2013], eigene Berechnungen

¹⁴ Vereinfachend wurde hier der gleiche NO₂-Anteil wie bei Euro V-Lkw mit SCR nach HBEFA (3.1) angenommen.

7.5 Umsetzbarkeit lokal begrenzter Maßnahmen

Lokale Maßnahmen (z.B. in Umweltzonen) sind rechtlich am wenigsten problematisch und auch besonders kosteneffizient, eine einheitliche Kennzeichnung ist jedoch Voraussetzung

Für eine flächendeckende Umsetzung der in Kapitel 7.3 diskutierten kurzfristigen Maßnahmen in Deutschland, müssten ab dem Jahr 2016 etwa 190.000 Baumaschinen ersetzt oder mit DPF nachgerüstet werden. Durch den Einbezug von kleineren Geräten (18-37 kW) ab 2018 wären über 400.000 Maschinen betroffen. Dieser Aufwand und die zu erwartenden Kosten sollte bei der Maßnahmenplanung berücksichtigt werden. Auch sind die rechtliche Durchsetzung (siehe [DUH 2012]) und logistische Umsetzung einer kurzfristigen flächendeckenden Bestandsmaßnahme problematisch.

Die im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Maßnahmen könnten also vor allem in belasteten Gebieten, z.B. Umweltzonen, sinnvoll umgesetzt werden. Durch lokale, z.B. auf Umweltzonen beschränkte, Maßnahmen wird das Risiko von (abgasbedingten) Grenzwertüberschreitungen ebenfalls verringert und das Gesundheitsrisiko durch Dieselpartikel zumindest in dicht besiedelten Gebieten begrenzt. Solche lokalen Maßnahmen würden in ihrer Wirkung zudem wahrscheinlich deutlich über ihr Anwendungsgebiet hinausstrahlen.

Als zusätzlicher Effekt ist auch eine Reduktion des finanziellen Aufwands durch Nachrüstung oder Neuanschaffung von Maschinen zu erwarten. Um die Bauaktivität in Umweltzonen abzudecken, sollte auch unter Berücksichtigung einer flexiblen Maschinennutzung, eine den Forderungen entsprechende Maschinenleistung von 50 % der deutschlandweiten Betriebsstunden ausreichen¹⁵. Würden sich die Anforderungen auf Maschinen ≥ 37 kW beschränken, die nicht mindestens über die Stufe IIIB oder IV verfügen, so reicht bereits die Nachrüstung weniger zusätzlicher Maschinen der Stufe IIIA, um den geschätzten Maschinenbedarf abzudecken. Die mit dieser Nachrüstung verbundenen Investitionskosten von etwa 0,3 Mrd. € liegen dabei deutlich unter den Kosten einer flächendeckenden Nachrüstung von etwa 1,3 Mrd. €.

Ansatzpunkt und Voraussetzung für die Überwachung lokaler Maßnahmen wäre dabei die Einbindung mobiler Maschinen in die aktuelle Kennzeichnungsverordnung. Ein Rechtsgutachten der Deutschen Umwelthilfe ([DUH 2012]) kommt zu dem Schluss, dass *„... die Aufnahme von Baumaschinen in die Plakettenverordnung rechtlich zulässig und politisch geboten [ist]. Die Ausnahme ist seinerzeit damit begründet worden, dass der Emissionsbeitrag aus solchen Maschinen auf innerstädtischen Straßen gering sei.“* Letztgenannte Begründung kann hinsichtlich des lokalen Beitrags mobiler Maschinen zur Partikelbelastung mit dieser Studie widerlegt werden.

Eine Kennzeichnung von Baumaschinen sollte dabei in Umweltzonen auch die Umsetzung einer Partikelfilterpflicht ermöglichen, wie sie aktuell diskutiert und teilweise gefordert wird¹⁶. Da die bisherige Grenzwertgesetzgebung für mobile Maschinen vor allem auf die Begrenzung der Partikelmasse abzielt, wäre die Ausstattung mit einem Partikelfilter bzw. die technologie-

¹⁵ Auf Basis von Baustatistiken und Einwohnerzahlen wurde abgeschätzt, dass nur etwa 10 % der deutschlandweiten Betriebsstunden von Baumaschinen auf Umweltzonen entfallen [IFEU 2012b]. Dieser Anteil könnte theoretisch von vergleichsweise wenigen Maschinen geleistet werden. Um eine realistischere, flexible Nutzung der Maschinen zu berücksichtigen (z.B. wechselnde Standorte sowie Wartungs- u. Reparaturausfälle) wird jedoch ein Anteil von 50 % betrachtet.




¹⁶ Z.B. DUH-Kampagne Kein Diesel ohne Filter: http://www.duh.de/kein_diesel_ohne_filter.html

neutrale Einhaltung eines Partikelanzahlgrenzwertes gesondert zu berücksichtigen. Die höchste Kennzeichnungsstufe (z.B. grün oder gesonderte Filterkennzeichnung) würden dann auch Maschinen der Stufen IIIB und IV nur dann erhalten, wenn diese mit einem Partikelfilter ausgestattet sind. Dies befördert die Ausstattung mit Partikelfiltern als OEM-Lösung für neue Maschinen und senkt damit gegenüber einer nachträglichen Nachrüstung die Kosten.

Bei einer frühzeitigen Definition neuer Grenzwertanforderungen mit einem Partikelanzahlgrenzwert, könnte dessen Einhaltung theoretisch auch die technologie neutrale Erreichung der grünen Kennzeichnung ermöglichen. Bestandsmaschinen können über eine DPF-Nachrüstung eine bestmögliche Kennzeichnung erreichen. Maschinen die allein den Partikelmassengrenzwert der Stufe IIIB/IV erreichen, würden demgegenüber abgestuft gekennzeichnet (z.B. gelbe Kennzeichnung). Die Kommunen haben damit die Möglichkeit auch lediglich die Einhaltung der aktuellen Grenzwertstufen IIIB und IV zu fordern. So können die Anforderungen zwar von den Kommunen individuell gestaltet werden, die übergeordneten Kriterien zum Einsatz der Maschinen in ganz Deutschland wären jedoch klar definiert.

Für Maschinen unter 37 kW gibt es bisher keinen über die Stufe IIIA hinausgehenden Grenzwert, eine entsprechende Kennzeichnungsgrundlage entfällt demnach. Insbesondere die Maschinen zwischen 18 und 37 kW werden jedoch zukünftig erheblich zu den Gesamtemissionen mobiler Maschinen beitragen (siehe Kapitel 9.5). Nach Möglichkeit sollten diese Maschinen daher in die Umweltzonenregelungen einbezogen werden. Auch hier besteht für Bestandsmaschinen prinzipiell die Möglichkeit zur DPF-Nachrüstung, wobei eine Übergangsfrist bis zur Definition neuer Grenzwerte für diese Leistungsklassen auf EU-Ebene und damit der Verfügbarkeit sauberer Neumaschinen jedoch sinnvoll wäre. Diese Ausnahmeregelung würde dann eine gesonderte Kennzeichnung (z.B. graue Plakette) erfordern.

Tabelle 11: Beispielhaftes Kennzeichnungsschema für mobile Maschinen > 37 kW

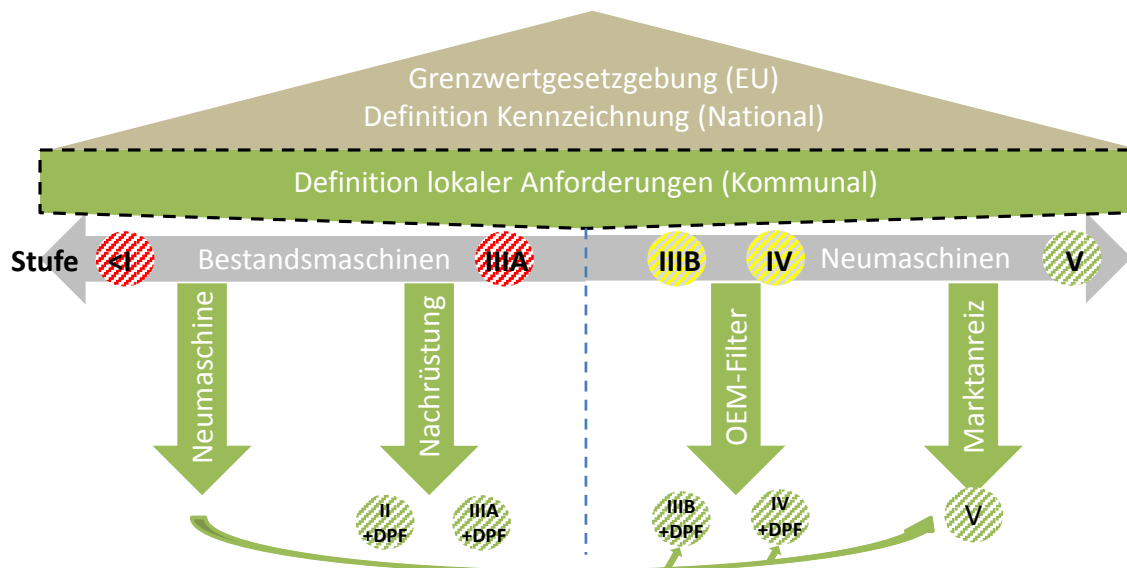
Schema	Beschreibung
	Maschinen mit geschl. Partikelfilter oder Einhaltung Partikelanzahlwert von 6×10^{11}
	Maschinen der Stufe IIIB und IV (ohne Nachweis DPF oder PN-Grenzwert)
	Maschinen Stufe IIIA oder vorher

8 Handlungsempfehlungen

Verschiedene Ansätze zur Minderung der Umweltbelastung durch mobile Maschinen wurden in dieser Studie untersucht, der Fokus lag auf den Baumaschinen. Neben der Verschärfung der EU-Grenzwertgesetzgebung für Neumaschinen wurden Wirkung und Kosten von Nachrüstungen analysiert.

Während die Verschärfung der EU-Grenzwertgesetzgebung erst langfristig wirkt, können lokale Emissionsanforderungen an die eingesetzten Maschinen die Emissionen kurzfristig reduzieren und somit direkt zur Luftverbesserung beitragen. Solche lokale Anforderungen benötigen eine Kennzeichnung der Fahrzeuge. Die Fahrzeugbetreiber können dann – z.B. unter Kostengesichtspunkten – entscheiden, ob sie Neufahrzeuge einsetzen oder alte Maschinen mit Partikelfiltern nachrüsten.

Abbildung 32: Mehrsäulenstrategie zur Emissionsminderung von Mobilien Maschinen



©IFEU 2013

Im Einzelnen ergeben sich aus dieser Studie die folgenden Handlungsempfehlungen:

Handlungsbedarf besteht besonders hinsichtlich der Partikelbelastung durch mobile Maschinen, bei der NO₂-Belastung bleibt der Straßenverkehr auch lokal der wichtigste Emittent.

Der Beitrag mobiler Maschinen zur städtischen Hintergrundbelastung ist bei Partikeln und NO₂ gering. In den Fallbeispielen konnte jedoch gezeigt werden, dass die lokale Belastung durch Baumaschinen bei PM₁₀ höher liegen kann als durch eine vielbefahrene Straße, bei NO₂ ist der Beitrag dagegen kleiner als der des Straßenverkehrs. Der Einbezug von mobilen Maschinen in die Luftreinhalteplanung ist also insbesondere hinsichtlich der Partikelbelastung sinnvoll.

Aus Gesundheitssicht sollte eine weitgehende Minderung der Partikelemissionen mit Filtern erfolgen, auch über die Grenzwerteinhaltung hinaus.

Für die Kommunen stellt die Einhaltung der Luftqualitätsgrenzwerte nach EU Richtlinie 2008/50 ein wichtiges Ziel dar. Die Einhaltung der PM₁₀-Grenzwerte alleine reicht aus gesund-

heitlicher Sicht jedoch nicht aus, sondern es müssen vor allem die Dieselabgase und insbesondere die Partikelanzahl weiter reduziert werden. Geschlossene Partikelfilter (DPF) senken neben der ausgestoßenen Partikelmasse vor allem auch die Partikelanzahl. In der Schweiz wird daher der Einsatz geschlossener Partikelfilter oder alternativ die Einhaltung eines Partikelanzahl-grenzwertes bereits seit 2010 umfassend gefordert.

Eine Weiterentwicklung der Richtlinie 97/68/EG ist dringend geboten, dabei sind insbesondere kleinere Leistungsklasse einzubeziehen und ein Partikelanzahlgrenzwert festzulegen.

Die europäische Grenzwertgesetzgebung ist für Neumaschinen das zentrale Instrument zur Minderung der Emissionen. Dabei gilt es zukünftig insbesondere für kleinere Leistungsklassen (< 37 kW) schärfere Grenzwerte einzuführen, da für diese bisher keine Verschärfung nach Stufe IIIB bzw. IV vorgesehen ist. Ohne Anpassung der Gesetzgebung werden diese Maschinen zukünftig für den größten Anteil der Partikelemissionen der Bauwirtschaft verantwortlich sein. Eine weitere Verschärfung des ab Stufe IIIB geltenden Partikelmassengrenzwertes für Maschinen ≥ 37 kW hat demgegenüber nur einen geringen zusätzlichen Effekt auf die insgesamt ausgestoßene Partikelmasse und trägt somit auch nur wenig zur Grenzwerteinhaltung bei. Um den Ausstoß der ultrafeinen Partikel zu begrenzen, ist es wichtiger – analog zum EURO VI-Standard bei schweren Nutzfahrzeugen – einen Partikelanzahlgrenzwert einzuführen.

Die Szenarienberechnungen zeigen jedoch, dass durch die Weiterentwicklung der Emissionsgrenzwerte eine deutliche Minderungswirkung erst nach dem Jahr 2025 zu erwarten ist. Der Gesetzgebungsprozess dürfte nicht vor 2018 abgeschlossen sein und die neuen Maschinen ersetzen nur sukzessive den Altbestand. Daher sind zusätzliche Maßnahmen notwendig, um einerseits kurzfristig die Grenzwerte auch im direkten Umfeld von Baustellen einhalten zu können und andererseits die gesundheitliche Belastung durch Rußpartikel relevant zu verringern.

Eine Senkung lokaler Emissionen ist kurzfristig über Anforderungen an den Maschinenbestand möglich, zur kosteneffizienten Minderung müssen Alter und Leistung der Maschinen berücksichtigt werden.

Kurzfristiger Handlungsbedarf besteht vor allem für besonders belastete Innenstadtbereiche. Zur Senkung der Partikelemissionen sollte hier entweder der Einsatz von saubereren Neumaschinen oder die Partikelfilternachschrüstung von Bestandsmaschinen gefordert werden. Werden beide Optionen alternativ zugelassen, kann der Betreiber die jeweils kostengünstigste Alternative wählen.

Im Leistungsbereich ≥ 37 kW sind seit dem Jahr 2012 Maschinen mit der Stufe IIIB am Markt verfügbar, die einen deutlich reduzierten Ausstoß der Partikelmasse haben. Eine lokale Minderung der PM-Emissionen könnte hier also entweder durch eine Nachrüstung älterer Bestandsmaschinen ≥ 37 kW oder durch den Einsatz von Maschinen der neuesten Grenzwertstufe (IIIB oder IV) erfolgen. Die neuen Maschinen haben dabei gegenüber nachgerüsteten Maschinen den Vorteil einer Minderung weiterer Schadstoffemissionen, insbesondere NO_x.

Für jüngere Maschinen der Stufe IIIA, die noch lange in Betrieb sind, lägen die Kosten einer Nachrüstung in der Regel im Rahmen der externen Kosten durch die vermiedene Partikelbelastung. Eine Nachrüstung dieser Maschinen zur Minderung der Partikelemissionen ist damit kosteneffizient. Bei älteren Maschinen wäre dagegen die vorgezogene Neuanschaffung einer Maschine der Stufe IIIB oder IV vorzuziehen.

Für kleinere Maschinen mit 18-37 kW hat die Weiterentwicklung der Grenzwertgesetzgebung nach EU Richtlinie 97/68 Priorität, da hier noch keine strengen Grenzwerte (vergleichbar Stufe IIIB) definiert wurden. Bis hier strengere Grenzwerte festgelegt werden, kommt als Minde-

rungsmaßnahme nur die Nachrüstung in Betracht. Erst mit der Definition strengerer Grenzwerte ergibt sich auch in dieser Leistungsklasse die Option einer vorzeitigen Anschaffung sauberer Neumaschinen.

Eine national gültige Kennzeichnung von Baumaschinen kann die lokalen Anforderungen vereinheitlichen und sollte Maschinen mit Partikelfilter oder vergleichbarem Emissionsverhalten gesondert auszeichnen.

Zur Umsetzung lokaler Maßnahmen ist eine national gültige Kennzeichnung des Emissionsverhaltens sinnvoll um einen ‚Flickenteppich‘ unterschiedlicher Anforderungen zu vermeiden. Die Einbindung mobiler Maschinen in die aktuelle Kennzeichnungsverordnung kann durch den relevanten Emissionsbeitrag gut begründet werden, rechtlich ist sie nach einem Gutachten der DUH zulässig. Eine differenzierte Kennzeichnung, z.B. analog zum Straßenverkehr in „rot, gelb, grün“, gibt den Kommunen trotzdem die Möglichkeit, die zeitliche Einführung an die lokalen Gegebenheiten anzupassen.

Da die aktuelle Grenzwertgesetzgebung nicht zwingend den Stand der Technik durchsetzt, ist sie als Grundlage für eine Kennzeichnung von Maschinen nicht ausreichend. Die Kennzeichnung von Baumaschinen sollte den Einsatz von DPF (bzw. die Einhaltung eines Partikelanzahl-grenzwertes) gesondert ausweisen. Die Markteinführung von Maschinen einer entsprechenden neuen Grenzwertstufe (z.B. einer Stufe V) würde damit zu dem beschleunigt.

Maschinen < 37 kW, für die bisher kein strenger Partikelgrenzwert nach IIIB festgelegt wurde, könnten bei Bedarf übergangsweise eine Ausnahmekennzeichnung zur Weiternutzung in Umweltzonen erhalten. Zu einem späteren Zeitpunkt, spätestens mit der Verfügbarkeit von Neumaschinen mit Partikelfilter in dieser Leistungsklasse, sollten jedoch auch für diese Geräte strengere Vorgaben gelten.

9 ANHANG I: TREMOD-MM - Eingangsdaten und Methoden

Eine erste Bilanzierung der Emissionen von mobilen Maschinen und Geräten in Deutschland wurde von IFEU bereits im Rahmen vergangener UBA-Vorhaben (UFOPLAN- Nr. 299 45 113 und UFOPLAN-Nr. 360 16 018) durchgeführt. In diesem Rahmen wurde das differenzierte Bilanzierungsmodell TREMOD-MM (Transport Emission Model¹⁷ – Mobile Machinery) entwickelt. Zugleich wurden jedoch auch verschiedene Schwachstellen in der Datenlage identifiziert, die insbesondere die für die Luftreinhalteplanung besonders relevante Bauwirtschaft betreffen.

Die in diesem Anhang dokumentierte Aktualisierung und Erweiterung der Datengrundlage fokussiert daher auf den Sektor Bauwirtschaft. Dies umfasst eine Aktualisierung der Maschinenbestände und Betriebsstunden, sowie die Berücksichtigung von Emissionsfaktoren, die das reale, oft dynamische Nutzungsprofil, besser abbilden. Die Methodik und Datengrundlage für die Sektoren Land- und Forstwirtschaft, Garten- und Hobby, Sport- und Freizeitboote bleibt bis auf wenige Aktualisierungen gemäß der letzten Dokumentation [IFEU 2004, 2009] erhalten.

9.1 Berechnungsmethode

Es werden sowohl die direkten Abgasemissionen (insbesondere NO_x, Partikel, CO, HC, SO_x) und bei Kohlenwasserstoffen zusätzlich noch die Emissionen durch Verschüttung und Verdrängung während der Betankung (Betankungsemissionen) sowie Verdunstungsemissionen (durch Temperaturschwankungen) berücksichtigt.

Die Abgas-Emissionen der im Off-Road-Sektor eingesetzten mobilen Geräte und Maschinen werden im Modell nach einem einheitlichen Rechenverfahren 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 der Schweiz [BUWAL 2000], dem Berechnungsmodell der EPA NON-ROAD Modell in [EPA 1991] und [EPA 2003] sowie von COPERT [AUT 2000] durchgeführt.

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

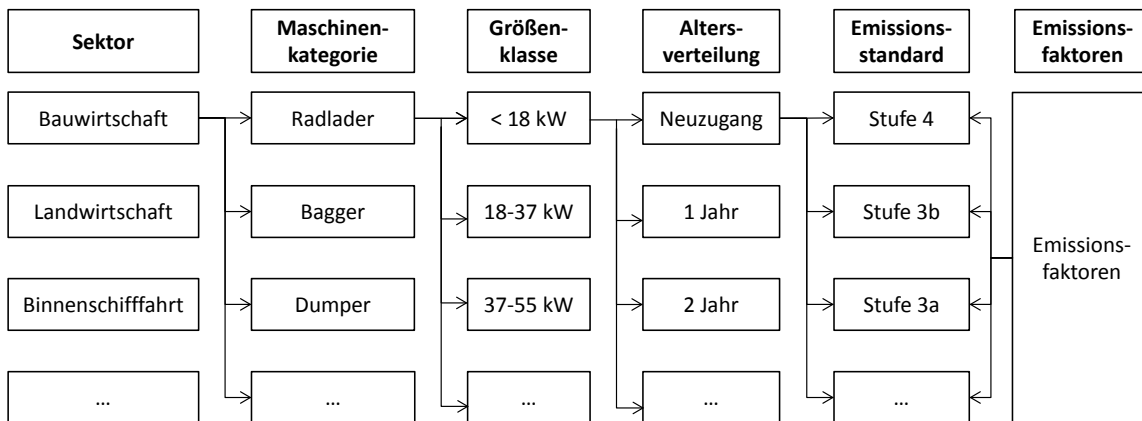
mit

E_A	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 Betriebsstunden
LF	typischer mittlerer Lastfaktor (<1)
EF	Emissionsfaktor (g/kWh)

Die Berechnung der Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs in TREMOD-MM erfolgt für jedes einzelne Maschinensegment, das sich aus Sektor, Maschinenkategorie, Größen-, Altersklasse und Emissionsstandard sowie der verwendeten Kraftstoffart zusammensetzt (siehe Abbildung 33). Dieses Vorgehen ermöglicht einerseits eine detaillierte Verursacheranalyse, andererseits auch die Betrachtung von Maßnahmenwirkungen in Szenarien.

¹⁷ Ergänzungsmodell zum ‚Transport Emission Model‘ (TREMOM) des IFEU für den Transportbereich.

Abbildung 33: Differenzierung der Eingangsdaten in TREMOD-MM und Zuordnung zu den Emissionsfaktoren



9.2 Bestände

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 ermittelt und anschließend weiter differenziert nach Antriebsart, Leistung, Alter und Emissionsstandart.

9.2.1 Bestandsentwicklung nach Maschinengattung

Als Basis für die Baumaschinenbestände von 1980 bis 1996 werden wie bereits in IFEU 2004 Daten der statistischen Jahrbücher der BRD (bzw. der DDR) [SBD] bis 1996 verwendet. Die weitere Bestandsentwicklung bis 2010 basiert (siehe Tabelle 10) auf der Produktions- und Außenhandelsstatistik des statistischen Bundesamtes [DESTATIS 2011] und den von dem britischen Consulting Unternehmen „Off Highway Research“ veröffentlichten Populationszahlen zu einzelnen Gerätetypen [OHR 2011].

Tabelle 12: 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

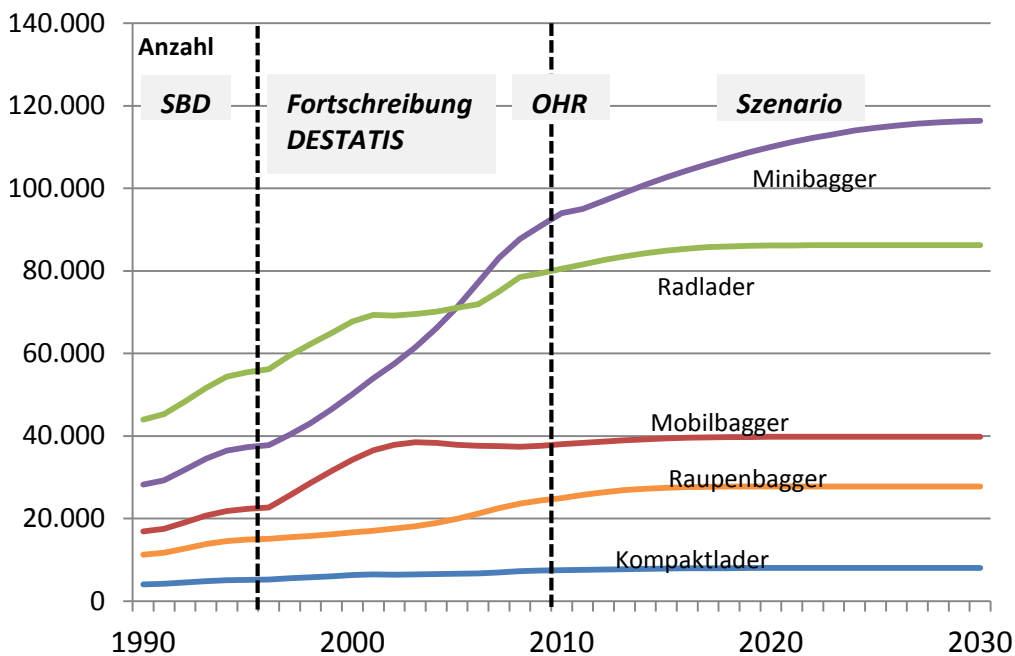
Eckwerte des Gesamtbestandes sind dabei die Bestandszahlen für bis 1996 nach [SBD] und für 2010 nach [OHR 2011]. Die Bestandsentwicklung zwischen 1996 und 2010 wurde dann auf Basis von [DESTATIS 2011] über die Produktionszahlen, sowie die Ein- und Ausfuhr von Maschinen modelliert. Zusätzlich müssen die Abgänge über Verschrottung mit einberechnet werden 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 vorhanden sind, wurden hier Annahmen getroffen, die sich nach der durchschnittlichen mittleren Lebenszeit richten. Da für Generatoren keine aktuellen Daten vorlagen, konnte der Bestand hier nur über Produktionszahlen sowie Ein- und Ausfuhr von Maschinen ermittelt werden. Die Fortschreibung der Bestände ist beispielhaft für einige wichtige Erdbewegungsmaschinen in Abbildung 34 dargestellt.

Der Bestand der meisten Maschinenkategorien hat in den letzten Jahren kontinuierlich zugenommen, vor allem bei Minibaggern, deren Anzahl sich zwischen 1990 und 2010 mehr als verdreifacht hat. 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 [IFEU Workshop 2012]. Für das Trendszenario 2010 bis 2030 wurde wie in [IFEU 2004] eine konservativ auslaufende Fortschreibung angenommen. Die Bestände aller Maschinenkategorien für das Jahr 2010 sind in Tabelle 13 aufgeführt.

Abbildung 34: Bestandsentwicklung und Datenquellen von Baggern und Ladern



©IFEU 2013. Quellen: [DESTATIS 2011; OHR 2011; SBD]; eigene Annahmen und Berechnungen

Tabelle 13: Bestände nach Maschinenkategorie in Bauwirtschaft und Industrie für 2010

Maschinenkategorie	Anzahl	Maschinenkategorie	Anzahl
Betonmischer	110.586	Teleskoplader	3.900
Betonpumpen	2.518	Dumper/ Muldenkipper	6.500
Mobil- und Autokrane	5.092	Grader, Straßenhobel	1.508
Minibagger	94.000	Straßenfertiger	3.003
Raupenbagger	25.000	Planierraupen	5.000
Mobilbagger	38.000	Verdichtungsmaschinen	227.810
Baggerlader	5.005	Rammbären	3.583
Radlader	80.500	Kompressoren	87.060
Raupenlader	1.000	Generatoren	25.097
Kompaktlader	7.500	Stapler	146.085

9.2.2 Zusätzliche Annahmen bei Generatoren

Die Bestände von Generatoren (nur „dieselbetriebene Stromerzeugungsaggregate“) wurden für die Summe aller Größenklassen anhand einer Lebenszeit von 16 Jahren berechnet, die Anteile der Leistungsklassen wurden von der Produktionsstatistik übernommen. Diese Aufteilung entspricht nicht der des Bestandes in TREMOD-MM, sondern dem Gesamtabsatz von Generatoren. Diese gehen nach [EPA 2010c] mit zunehmender Nennleistung nur noch zum Teil in mobile Anwendungen und stattdessen in stationäre Anwendungen (Tabelle 15). 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 (Tabelle 14).

Tabelle 14: 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]; eigene Annahmen und Berechnungen

Tabelle 15: Anteile der Generatorenbestände 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 2010c], eigene Annahmen

9.2.3 Aufteilung nach Leistung und Alter

9.2.3.1 Leistung

Die zuvor ermittelten Bestände der einzelnen Maschinenkategorien werden nach Nennleistungsklassen unterteilt, die sich an den Nennleistungsklassen der europäischen Grenzwertgesetzgebung orientieren. Diese Unterteilung ermöglicht die Zuordnung von Emissionsstandards sowie von spezifischen Lebenszeiten und Nutzungsdauern (siehe folgende Kapitel). Darüber hinaus werden über die Nennleistungsklassen mittlere Motorleistungen abgeschätzt, die wiederum in die Berechnung des Energieverbrauchs einfließen.

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 aktuelle Auswertungen von Firmendaten [IFEU 2012]. Für die dazwischen liegenden Bezugsjahre wurden die Anteile linear interpoliert.

Tabelle 16: Anteile der Maschinenbestände nach Größenklassen 2010

Maschinen-Kategorie	< 18 kW	18-36 kW	37-74 kW	75-129 kW	130-299 kW	300-559 kW
Muldenkipper					70%	30%
Minibagger	20%	75%	5%			
Raupenbagger			20%	50%	30%	
Mobilbagger			10%	85%	5%	
Baggerlader			100%			
Planierraupen			5%	65%	30%	
Radlader			85%	5%	10%	
Raupenlader		30%	35%	20%	15%	
Kompaktlader	30%	30%	40%			
Teleskoplader			15%	85%		
Grader, Straßenhobel			10%	85%	5%	
Verdichtungsmaschinen	85%	5%	5%	5%		
Straßenfertiger		5%	10%	35%	50%	
Kompressoren aller Art	10%	70%	15%	5%		
Generatoren	65%	8%	8%	6%	8%	5%
Stapler		70%	10%	20%		

Quelle: Firmenbefragungen und eigene Annahmen

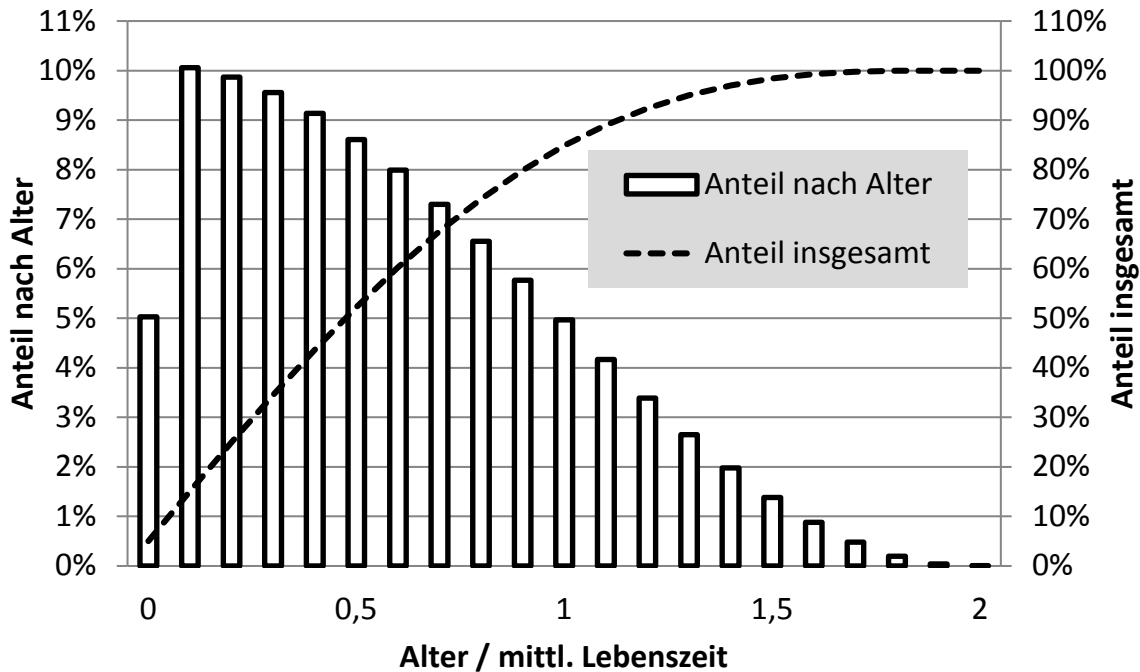
9.2.3.2 Altersverteilung

Die Altersverteilung der Maschinenbestände ist von zentraler Bedeutung für die Zuordnung von Emissionsstandards, Nutzungsintensitäten und für die Betrachtung von Nachrüstungszenarien.

In der Praxis haben Maschinen häufig verschiedene Nutzungsphasen oder ‚mehrere Leben‘ bei verschiedenen Anwendern, etwa Mietparks sowie größeren oder kleineren Firmen im In- und Ausland. Die verfügbaren Praxisdaten, unter anderem aus den Maschinenbeständen aus Industriedaten und Gebrauchtbörsen, sind nicht ausreichend für eine repräsentative Darstellung, konnten aber als Vergleichswerte zur Plausibilisierung verwendet werden.

Die Altersverteilungen der Maschinenbestände beruht auf Modellkurven, die für den Bestand eines Bezugsjahres den Anteil verschiedener Baujahre angibt. Grundlage ist eine Cosinus-Funktion, die in Abhängigkeit zur mittleren Lebenszeit (Median) der Maschinen steht (Abbildung 35).

Abbildung 35: Bestandsverteilung nach Maschinenalter



Quelle: [IFEU 2004], aktuelle Darstellung

Aus Abbildung 35 geht hervor, dass ca. 85 % der Maschinen jünger als die angesetzte mittlere Lebenszeit sind. 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.

9.2.3.3 Mittlere Lebensdauer

Für die durchschnittliche mittlere Lebensdauer wurden die Annahmen aus Emissionsinventaren von JRC [JRC 2008] und AEAT [AEAT 2004] sowie aktuellere empirische Daten von Firmenumfragen und Gebrauchtbörsen ausgewertet:

- JRC 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 AEAT liegen deutlich unter denen von JRC, repräsentieren aber mit Großbritannien einen Markt der extrem durch das Mietgeschäft und damit einen vergleichsweise jungen jüngeren Maschinenpark geprägt sein dürfte¹⁸.
- Aus den Daten der Gebrauchtbörsen und den Industriedaten lassen sich Vergleichswerte ableiten. Diese Daten werden zur Plausibilisieren und Differenzierung der Literaturwerte herangezogen, stellen jedoch nur eine Stichprobe des deutschen Bestandes dar.

¹⁸ Die Maschinen aus der Vermietung hierzulande gehen nach ca. 6-8 Jahren in den Gebrauchtmärkte über. Je nach Maschinentyp gehen zwischen 30 und 50 % des Inlandabsatzes in das Mietgeschäft. In Großbritannien beträgt der Anteil der Mietmaschinen dagegen fast 90 % [IFEU-Workshop 2012]

Die Datengrundlage sowie die abgeleitete mittlere Lebensdauer für die wichtigsten Maschinentypen zeigt Tabelle 17. Diese werden im Modell noch nach Größenklassen unterschieden, wobei die JRC Werte in der Regel (bis auf Kompressoren, Generatoren und Stapler) als Obergrenze gewählt wurden.

Tabelle 17: Mittlere Lebenszeiten der Maschinentypen

Maschinentyp	Literaturdaten		Auswertung empirischer Daten	TREMOM-MM 2012 (Spannweite über die kW-Klassen)
	JRC 2008	AEAT 2004	Gebrauchtbörsen, Firmendaten	Eigene Annahme
Muldenkipper	10 - 16	8	10	10
Minibagger		5	11	10 - 12
Raupenbagger		6	10	10
Mobilbagger		6	11	10 - 12
Baggerlader		8	11	10 - 12
Planierraupen		8	14	14
Radlader		8	13	10 - 14
Raupenlader		10	13	10 - 15
Kompaktlader		4	11	10 - 12
Teleskoplader		6	11	10 - 12
Grader, Straßenhobel		12	11	10 - 12
Verdichtungsmaschinen		9	12	10 - 14
Straßenfertiger		4	10	9 - 11
Kompressoren aller Art		4	15	12 - 16
Generatoren		6	18	16
Stapler		6	17	12 - 16

Quellen: [AEAT 2004; JRC 2008]; eigene Annahmen. Anmerkung:* JRC Werte gelten für kW-Klassen der Motoren und wurden auf die Maschinentypen umgelegt

9.3 Nutzung

Die Maschinennutzung wird über die mittlere jährliche Nutzungsdauer (Betriebsstunden), sowie einen Lastfaktor, der die durchschnittliche Intensität der abgerufenen Motorleistung charakterisiert, abgebildet. Wie bei den Beständen werden die Daten nach Maschinensegmenten differenziert.

9.3.1 Jährliche Betriebsstunden

Zur Ermittlung der jährlichen Betriebsstunden konnte eine umfangreiche Auswertung aktueller empirischer Quellen verwendet werden, 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 [GB 2011] und von Firmen [IFEU 2012] zur Verfügung gestellt. Bei den Gebrauchtbörsen wurde darauf geachtet, nur

Maschinenangebote mit Deutschland als Standort einzubeziehen. Insgesamt ergab sich hiermit eine Stichprobe von über 10.000 Maschinen. Eine Gegenüberstellung mit weiteren Datenquellen ist in Tabelle 18 dargestellt.

Tabelle 18: Aktuelle jährliche Betriebsstunden im Vergleich mit internationalen Studien

Maschinentyp	Ggf. Untertyp	TREMOD-MM	Vergleichswerte anderer Modelle			
			BAFU 2008	AEAT 2004	JRC* 2008	EPA 2010
Betonmischer		275	n.a.	n.a.	150-500	n.a.
Mobil-und Autokrane		850	310	n.a.	900-1300	990
Betonpumpen		250	150	n.a.	150-500	n.a.
Dumper/Muldenkipper	Muldenkipper	1000	500	880-1250	1100-1300	1640
	Minidumper/ Raupendumper	200		n.a.	150-500	566
Universalbagger	Minibagger	500	650	1100	600	1100
	Raupenbagger	1150		1000	900-1300	
	Mobilbagger	1100		875	900-1300	
Baggerlader		650	n.a.	1000	600-900	1140
Planierraupen		1100	350	380	900-1100	900
Lader	Radlader	850	510	1100	600-1300	760
	Raupenlader	650		500	600-1300	1140
	Kompaktlader	350		1000	600	820
	Teleskoplader	700		1050	600-1100	n.a.
Grader/ Straßenhobel		900	500	375	600-1100	960
Rambären		300	300	n.a.		460
Verdichtungsmaschinen	Stampfer/ Rüttler	120	350	n.a.	150-500	170-500
	Walzen	400	350	n.a.	600-900	760
Straßenfertiger	Straßenfertiger	750	300	750	600-1300	820
	Kleinfertiger	200		n.a.	150-250	
Kompressoren		200	200	875	150-500	480
Stapler	Geländegängig	650	720	850	600-900	660
	Industrie	1200				1700-1800
Generatoren		250	80	855	150-500	

Quellen: eigene Berechnungen ([GB 2011], [IFEU 2012]); [AEAT 2004; BAFU 2008; EPA 2010b; JRC 2008]. Anmerkung: * JRC Werte gelten für kW-Klassen der Motoren und wurden auf die Maschinentypen umgelegt

Für die Betriebsstunden der Maschinenneuzugänge wurde aufgrund fehlender Daten ein pauschaler Aufschlag von 10 % auf die mittleren Praxiswerte der Betriebsstunden angenommen. Beim Vergleich der resultierenden Werte mit Daten aus anderen Studien zeigt sich eine recht

gute Übereinstimmung. Unterschiede bei den Stunden lassen sich teilweise über länderspezifische Anwendungen erklären¹⁹.

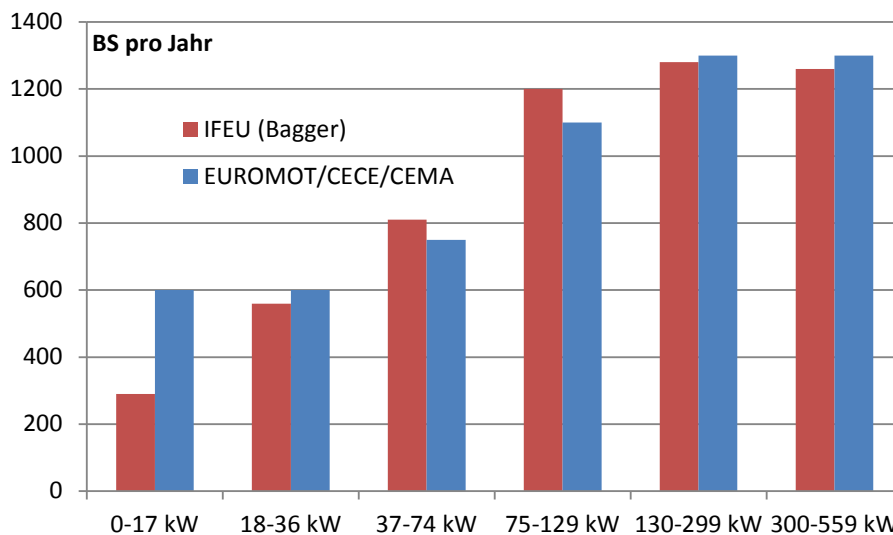
9.3.2 Differenzierung nach Leistung, Alter und Bezugsjahr

9.3.2.1 Nennleistung

Zur Differenzierung der jährlichen Betriebsstunden nach Nennleistung wurden wie bei den Betriebsstunden nach Maschinenkategorien Daten aus Firmenbefragungen herangezogen verwendet. 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. Als Beispiel sind in Abbildung 36 die mittleren jährlichen Betriebsstunden von Baggern aufgeführt und dazu im Vergleich die Zahlen, welche die europäischen Maschinenherstellerverbände für die Klassen „light“- und „heavy construction equipment“ angeben. Bis auf kleine Maschinen <18 kW zeigt sich hierbei eine gute Übereinstimmung.

Abbildung 36: Jährliche Betriebsstunden nach kW-Klassen im Vergleich



Quellen: eigene Firmenbefragungen; [EUROMOT/CECE/CEMA]

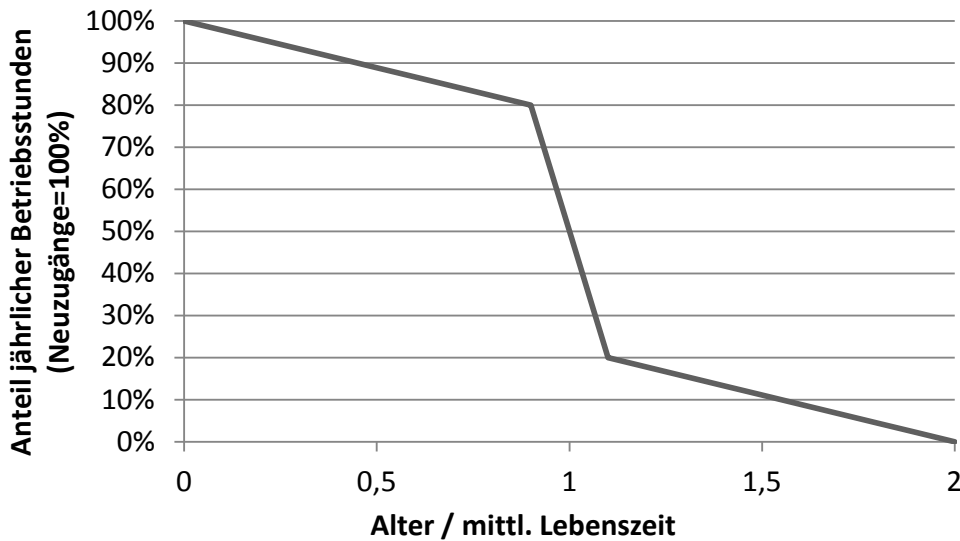
9.3.2.2 Alter

Die Entwicklung der Nutzungsintensität muss die Lebenszyklen der Maschinen berücksichtigen. Hierfür wurde eine Modellkurve, basierend auf [EUROMOT/CECE/CEMA] angenommen, welche die Entwicklung der jährlichen Betriebsstunden über die mittlere Lebenszeit darstellt.

Der Kurve liegt die bereits in Kap. 9.2.3 beschriebene Unterteilung der gesamten Lebenszeit einer Maschine in verschiedene Nutzungsphasen zugrunde. So nimmt die Nutzungsintensität von Maschinen mit zunehmendem Lebensalter stufenweise ab.

¹⁹ Beispielsweise werden Mobilbagger in Deutschland häufig eingesetzt, während Baggerlader und Kompaktlader verglichen mit England oder den USA hierzulande seltener zum Einsatz kommen.

Abbildung 37: Jährliche Betriebsstunden von Baumaschinen in Abhängigkeit des Maschinenalters



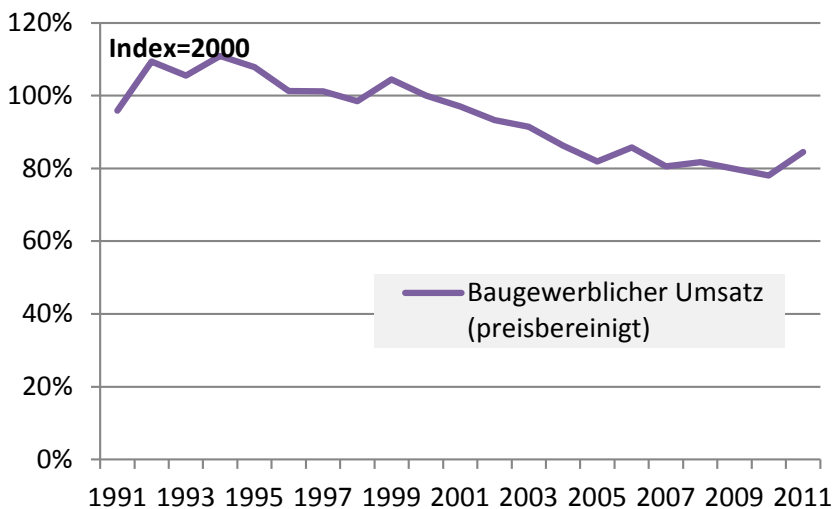
Quelle: Eigene Auswertung auf Basis von Industriedaten

9.3.2.3 Bezugsjahr (Zeitreihe)

Die erfassten mittleren jährlichen Betriebsstunden repräsentieren einen Mittelwert des Maschinenparks 2011. Um die Nutzungsintensität konjunkturell bedingten Schwankungen anzupassen, 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 (Abbildung 38). Dieser Index schwankt im Zeitraum der letzten zwanzig Jahre um ca. 30 %, und fällt tendenziell seit Mitte der 90er. Da in derselben Zeitspanne eine Zunahme der Maschinenanzahl bei den meisten Kategorien erfolgte, erscheint eine Anpassung der Nutzung plausibel, um die konjunkturellen Entwicklung abzubilden.

Abbildung 38: Korrekturfaktoren für konjunkturell bedingte jährliche Betriebsstunden



Quellen: [DESTATIS 2012]; [EVLIRA 2011], eigene Berechnungen

9.3.3 Lastfaktoren

Über die Bestandsdaten ist nur die Nennleistungsbandbreite der Maschinensegmente bekannt. Diese wird in der Praxis jedoch nur selten voll ausgenutzt. Deshalb wird das Verhältnis der tatsächlichen mittleren Motorleistung zur Nennleistung im Modell über Lastfaktoren dargestellt.

Die Werte können sich je nach Maschine und Art der Nutzung sehr stark unterscheiden, 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 Generatoren arbeiten oft mit konstanter und vergleichsweise hoher Last [AEAT 2004]. Die verwendeten Lastfaktoren orientieren sich an Literaturwerten [AEAT 2004] und liegen differenziert nach Maschinenkategorien vor (siehe Tabelle 17).

Tabelle 19: Quellen und aktuelle Lastfaktoren nach Maschinentyp

Maschinenkategorie	AEAT 2004	TREMOM-MM
Mobil- und Autokrane	n.a.	0,4
Grader, Straßenhobel	0,35	0,35
Kompressoren aller Art	0,6	0,5
Minibagger	0,4	0,4
Raupenbagger	0,33	0,4
Mobilbagger	0,3	0,35
Baggerlader	0,33	0,35
Radlader	0,3	0,35
Raupenlader	0,35	0,4
Kompaktlader	0,25	0,25
Teleskoplader	0,28	0,3
Muldenkipper	0,3	0,4
Planierraupen	0,38	0,4
Rambären	n.a.	0,2
Straßenfertiger	0,35	0,3
Verdichtungsmaschinen	0,4	0,3
Stapler	0,3	0,3
Generatoren	0,5	0,5

Häufig werden in vergleichbaren Rechenmodellen Lastfaktoren verwendet, die sich an der mittleren Last der Prüfzyklen orientieren, und damit bei etwa 0,5 liegen (vgl. [BAFU 2008; JRC 2008]). Experimentell bestimmte Lastfaktoren aus maschinenspezifischen Betriebszyklen werden von der US EPA verwendet [EPA 2010b], diese wurden aber für Deutschland als weniger repräsentativ als die Werte von AEAT [2004] angesehen.

9.4 Emissionsfaktoren

Die Emissionsfaktoren wurden gegenüber [IFEU 2009] nur in Teilen aktualisiert. Schwerpunkt war dabei die Ermittlung und Plausibilisierung von transienten Anpassungsfaktoren.

9.4.1 Basisemissionsfaktoren

Die Basisemissionsfaktoren für TREMOD-MM bis Stufe II wurden aus umfangreichen Messdaten abgeleitet (vgl. [IFEU 2004]) und benötigen daher keine Aktualisierung. Da im aktuellen Forschungsprojekt keine weiteren Emissionsmessdaten ausgewertet wurden, orientieren sich die Emissionsfaktoren ab Stufe IIIA wie bisher an den Emissionsgrenzwerten und zusätzlichen Annahmen aus Expertenbefragungen [IFEU 2009]. Jedoch lagen die bisher auf Basis des Grenzwertes angenommenen Emissionsfaktoren für Stufe IIIA (trotz angenommener Grenzwertunterschreitung) für PM um ca. 50-80% über den gemessenen Emissionsfaktoren der Stufe II. Da der Unterschied zwischen Stufe II und IIIA in aktuellen Expertenbefragungen nicht bestätigt werden konnte, werden die Emissionsfaktoren für Stufe IIIA mit denen der Stufe II gleichgesetzt. Für weitere Abgasstufen und Schadstoffe erfolgte keine Anpassung.

9.4.2 Verschlechterungsfaktoren

Die altersabhängige Änderung des Emissionsverhaltens wird über Verschlechterungsfaktoren abgebildet. Diese wurden gegenüber [IFEU 2004] beibehalten und nicht aktualisiert.

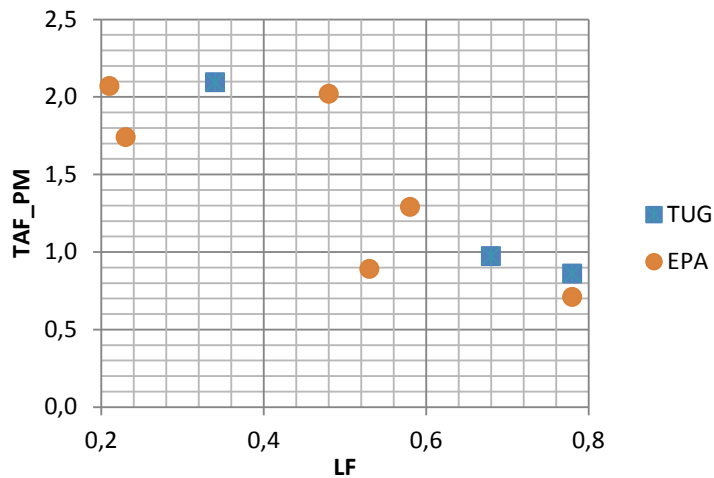
9.4.3 Transiente Anpassungsfaktoren

Die Basisemissionsfaktoren orientieren sich an dem Emissionsverhalten des Motors auf dem Prüfstand. Insbesondere beim stationären Prüfzyklus (non-road stationary cycle oder NRSC), welcher bis zur Stufe IIIA angewendet wurde, kann dieses jedoch die realen Einsatzbedingungen nur ungenügend abbilden. Das reale Emissionsverhalten wird in TREMOD-MM daher über einen transienten Anpassungsfaktor (TAF) abgebildet, wobei folgende Formel zu Grunde liegt:

$$TAF [-] = \frac{\text{Emission}_{\text{transient}} \text{ in } \frac{\text{g}}{\text{kWh}}}{\text{Emission}_{\text{stationär}} \text{ in } \frac{\text{g}}{\text{kWh}}}$$

Als Datenquellen für die TAF werden Erhebungen der US EPA verwendet und Auswertungen der TU Graz, die im Rahmen eines Unterauftrages zum aktuellen Projekt durchgeführt wurden. Wie sich am Beispiel der PM-Emissionen zeigt, können die Emissionen im dynamischen Betrieb deutlich von denen des stationären Betriebs abweichen und insbesondere bei niedriglastigen Anwendungen deutlich höher liegen (Abbildung 39).

Abbildung 39: Zusammenhang zwischen Lastfaktor und transientem Anpassungsfaktor bei verschiedenen Lastkollektiven am Beispiel PM



Quellen: [EPA 2010a; Hausberger 2012]; eigene Berechnungen

Die zugrunde liegende Datenbasis der Modellierung ist jedoch begrenzt²⁰, und für eine detaillierte Abbildung nicht ausreichend. Die Ergebnisse bestätigen jedoch grob die Korrekturfaktoren der US-EPA, so dass der Ansatz der EPA, die TAF nach Lastgruppen einzuteilen, beibehalten wird. Zusätzlich wird jedoch eine weitere Gruppe für Maschinen mit mittlerem Lastfaktor eingeführt. Dies wird auf Basis des Trends in Abbildung 39 als plausibel angesehen und wird den verschiedenen Lastfaktoren differenzierter gerecht. Für die Unterscheidung nach Grenzwertstufen werden die TAFs für Tier 0-2 bis Stufe II und für Tier 3 bis Stufe IIIA verwendet (siehe Tabelle 20). Da die Typprüfung für Motoren ab Stufe IIIB auch im transienten Zyklus (NRTC) erfolgen muss, werden hier keine TAFs für die Schadstoffemissionen angewendet. Für den Kraftstoffverbrauch werden die TAFs bis Stufe IIIA übernommen.

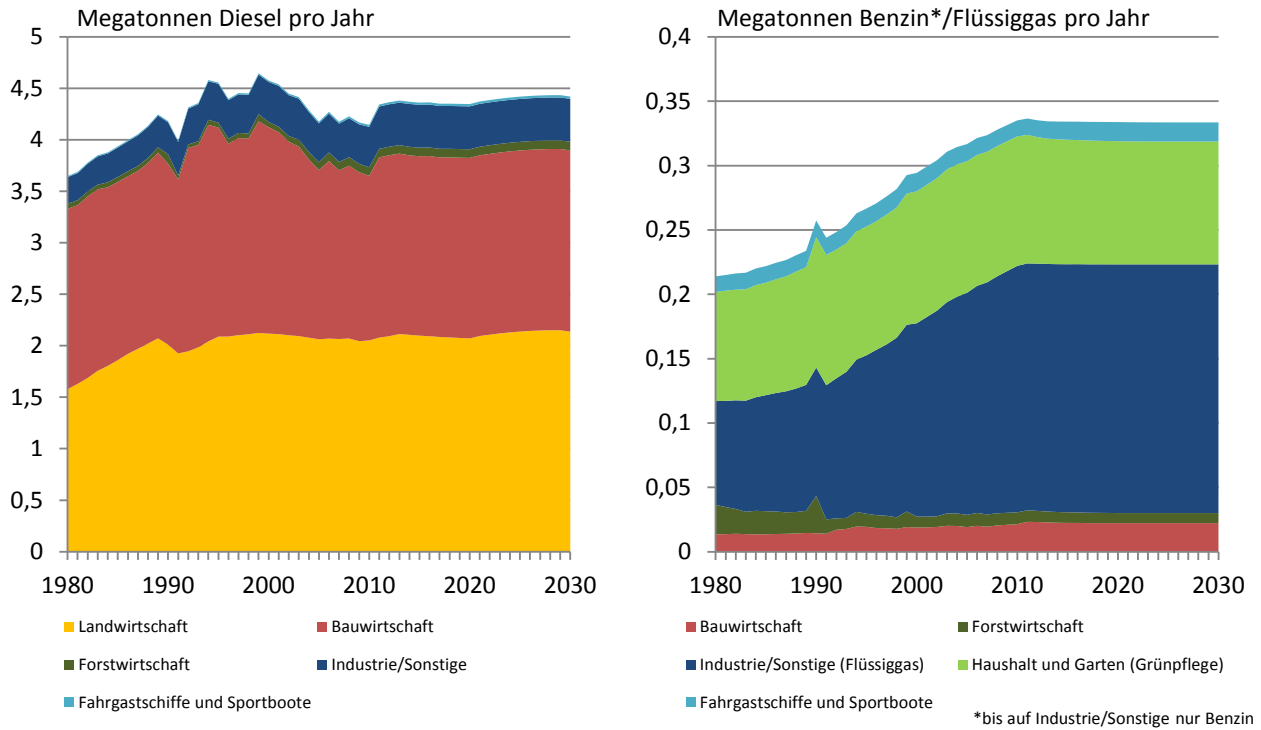
Tabelle 20: Transiente Anpassungsfaktoren für Motoren vor Stufe IIIB

Quelle	Lastfaktor		Stufe	PM	NOx	CO	HC	KV
[EPA 2010b]	hoch	LF > 0,45	< St. II	1,23	0,95	1,53	1,05	1,01
			St. IIIA	1,47	1,04			
	niedrig	LF < 0,25	< St. II	1,97	1,1	2,57	2,29	
			St. IIIA	2,37	1,21			
Eigene Annahmen	mittel	0,25 > LF < 0,45	≅ < St. II	1,6	1,03	2,05	1,67	1,1
			St. IIIA	1,92	1,125			

²⁰ Die EPA Messungen fanden an 15 Motoren der Stufe Tier 1-2 statt, die Ergebnisse der TU Graz beziehen sich auf Simulationen mit dem PHEM Modell auf Basis eine Schleppermotors der Stufe IIIA sowie Messungen an schweren Nutzfahrzeugen.

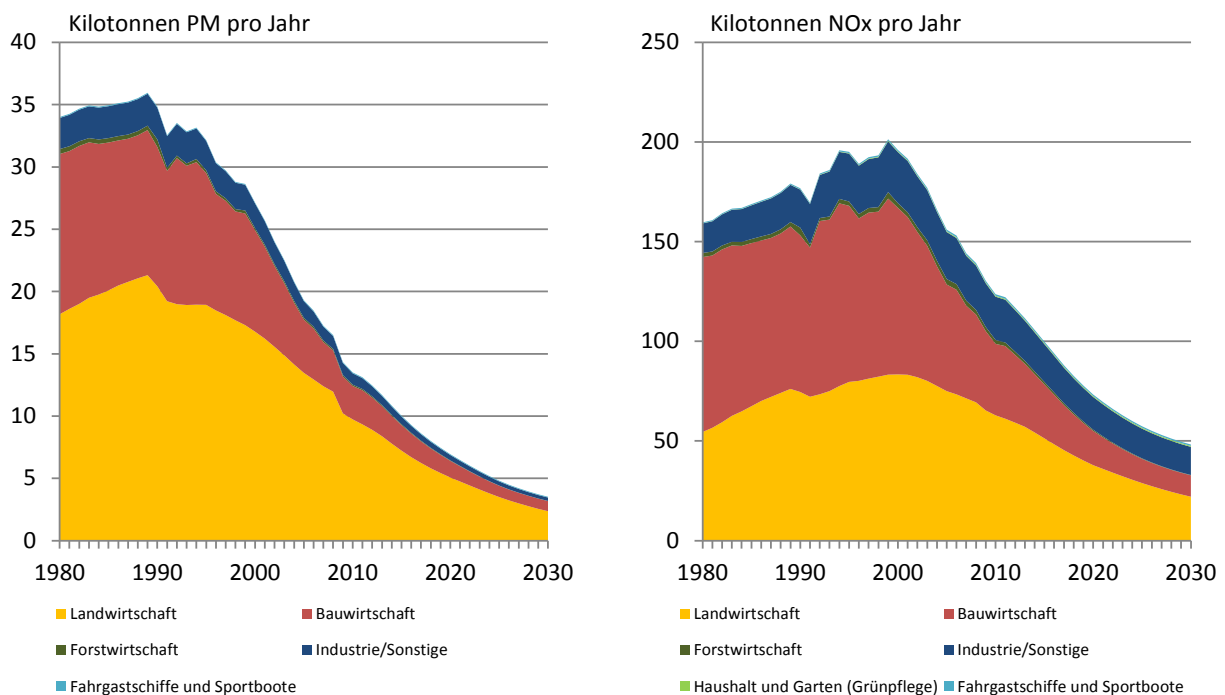
9.5 Ergebnisse aller Sektoren

Abbildung 40: Entwicklung des Diesel- (links) und Benzinverbrauchs (rechts) nach Sektoren



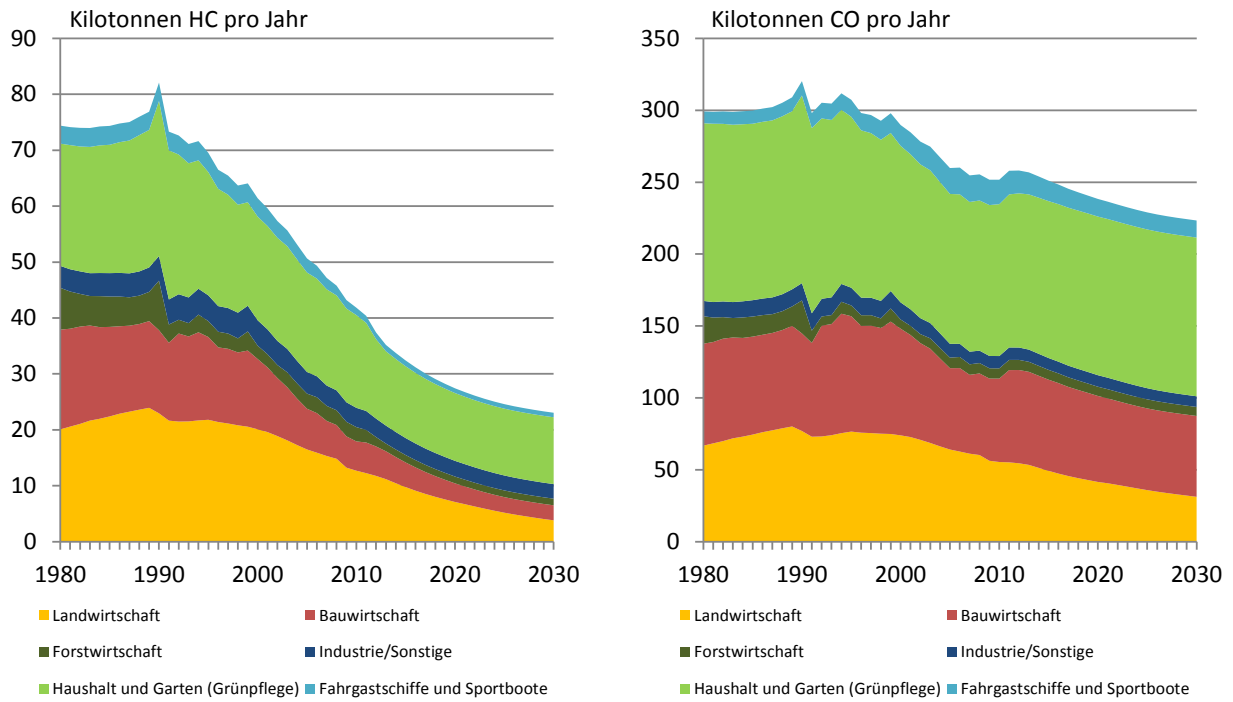
©IFEU 2013. Quelle: TREMOD MM 3.0

Abbildung 41: Entwicklung der PM- (links) und NOx-Emissionen (rechts) nach Sektoren



©IFEU 2013. Quelle: TREMOD MM 3.0

Abbildung 42: Entwicklung der HC- (links) und CO-Emissionen (rechts) nach Sektoren



©IFEU 2013. Quelle: TREMOD MM 3.0

10 ANHANG II: Maßnahmen und Fallbeispiele

10.1 Emissionsfaktoren für OEM-Maßnahmenszenarien

Tabelle 21: Emissionsfaktoren für PM und NO_x in den OEM-Maßnahmenszenarien und Vergleich mit dem BAU-Szenario

Nennleistung in kW	Abgasstufe	PM (in g/kWh bzw. %)					NO _x (in g/kWh bzw. %)				
		BAU	BAU	Tier 4	EURO VI		BAU	Tier 4	EURO VI		
< 18	keine	1,6	0,375	-77%	0,375	-77%	11,2	6,0	-47%	6,0	-47%
18-36	IIIA	0,54	0,025	-95%	0,025	-95%	6,1	4,0	-34%	4,0	-34%
37-55 / 56-74	IIIB/ IV	0,025	Keine Änderung		0,01	-60%	2,1	Keine Änderung		0,4	-81%
75-129	IV	0,025	Keine Änderung		0,01	-60%	0,4	Keine Änderung		Keine Änderung	
130-560	IV	0,025	Keine Änderung		0,01	-60%	0,4	Keine Änderung		Keine Änderung	

Erläuterung zu den Emissionsfaktoren:

Für die Emissionsfaktoren der Maschinen <37 kW (Tier 4-Szenario), die bisher entweder unreguliert sind oder Stufe IIIA entsprechen, wurden Annahmen der US-EPA [EPA 2010] übernommen. Für Maschinen mit 37-560 wurde vereinfachend eine Einhaltung der PM- und NO_x-Grenzwerte angenommen. Messerergebnisse von Prototypmotoren zeigen zwar, dass mit hochwertigen Abgasnachbehandlungstechnologien auch deutlich niedrigere Emissionen erreicht werden können²¹, es liegen bisher jedoch kaum Messdaten über in Verkehr gebrachte Motoren vor.

10.2 Partikelfilterkosten

Die Kostenanalyse berücksichtigt folgende Kosten

- Investitionskosten
 - Filterkosten
 - Montagekosten
- Laufende Kosten
 - Fixkosten
 - Wartungskosten

Die Kosten wurden auf Basis verschiedener Literaturquellen zusammengestellt. Tabelle 22 gibt einen Überblick über die verwendeten Quellen.

²¹ ca. 50 % weniger NO_x, 90 % weniger PM als beim Stufe IV-Grenzwert [AECC 2011]

Tabelle 22: Verwendete Quellen zur Ermittlung der Partikelfilterkosten

Quelle	Gesamtkosten	Investitionskosten			Laufende Kosten		
		gesamt	Filter	Montage	gesamt	Fixkosten	Wartung
[DUH 2013]		x	x	x			
[AK 2009]	x						
[BAFU 2007]	x	x			x	x	x
Firmenbefragungen		x	x	x			

Tabelle 23 beinhaltet die Kostenangaben der verschiedenen Quellen und die hieraus resultierenden Annahmen für die vorliegende Studie (IFEU).

Tabelle 23: Investitions- und laufende Kosten für die Nachrüstung mit Partikelfiltern in Euro

kW-Klasse	Insgesamt (Jährlich auf 10 Jahre)		Investition (einmalig)							Laufende Kosten (jährlich)			
			Insgesamt		Filter			Montage		Insgesamt		Fix-Kosten	Wartung
	IFEU	AK 2009	IFEU	BAFU 2007*	IFEU	DUH 2013	FB	DUH 2013	FB	IFEU	BAFU 2007 (nach IFEU-Auswertung*)		
bis 18kW	520	512 - 865	4000	4375	3000	2000-3000	2500 - 6000	500-1200	1000-3000	120	118	63	55
18-37kW	750	690 - 1049	5000	6250	3750		2500 - 6100			250	229	94	135
37-75kW	1050	738 - 1203	6000	7500	4500	3000-4500	3100 - 9800			450	492	125	367
75-130kW	1500	876 - 2196	7500	10000	5625		4400 - 10000			750	979	156	823
130-300kW	2250	1079-2731	9000	11875	6750	4500-7500	5100 - 17100			1350	1902	156	1746
300-560kW	2500		10000		7500		6200 - 26500			1500	1683	156	1527

Quellen: [AK 2009], [BAFU 2007], [DUH 2013], FB= Firmenbefragungen, eigene Berechnungen. Anmerkung: *Laufende Kosten in [BAFU 2007] werden pro Betriebsstunde angegeben. Kosten für Erhöhung der Kraftstoffkosten wurden von IFEU nicht berücksichtigt. Die jährlichen Betriebsstunden als Mittelwert pro kW-Klasse wurden aus TREMO-MM entnommen. Weiterhin wurden die Kosten von Schweizer Franken in Euro umgerechnet (Kurs 2007: 1,6 CHF/€).

Für die laufenden Kosten wurden Annahmen aus [BAFU 2007] verwendet. Diese umfassen jährliche Fixkosten und Kosten für Wartung und Regeneration der Filter in Abhängigkeit der Betriebsstunden. Die dargestellten Kosten sind zur Vergleichbarkeit mit den durchschnittlichen Kosten für Baumaschinen nach TREMOD-MM berechnet worden. Durch die höheren jährlichen Betriebsstunden bei großen Maschinen liegen hier auch die laufenden Kosten (sowohl absolut als auch im Verhältnis zu den Gesamtkosten) höher als bei den kleineren kW-Klassen. Auf eine Abschätzung der Kosten durch zusätzlichen Treibstoffverbrauch, wie in [BAFU 2007] wurde verzichtet, da einige Filterhersteller keine Erhöhung des Treibstoffverbrauches angeben. Auch sind bei zertifizierten Filtern (z.B. nach VERT) nur Verbrauchserhöhungen von max. 2 % zulässig.

Die Filterkosten wurden gegenüber den Angaben der DUH und den vorliegenden Firmeninformationen erhöht. Bei den Firmeninformationen wurde erwähnt, dass die Kosten für die Montage auf dem freien Markt deutlich höher liegen können. Dennoch liegen die Montagekosten etwas höher als von der DUH angenommen. Hieraus wurde abgeleitet, dass die Montagekosten bis zu 20 % der gesamten Investitionskosten ausmachen.

Die sich ergebenden Gesamtkosten, auf eine Dauer von 10 Jahren abgeschrieben, liegen in der Bandbreite von Angaben, die sich bei Auswertungen von [AK 2009] ergaben. Die Angaben wurden durch eine Befragung von acht verschiedenen Herstellern erarbeitet und stellen damit eine plausible Datengrundlage dar. Aus den Angaben geht hervor, dass der Preis für die Partikelfilter stark schwanken kann.

Unterschiede können sich hierbei je nach System und Maschine ergeben. Zum Beispiel kann laut einer Studie der MECA (Manufacturers of Emission Controls Association) der Preis für Filter mit aktiver Regeneration um 80-120 % über dem für Filter mit passiver Regeneration liegen [MECA 2009]. Welche Filter eingesetzt werden können hängt unter anderem auch von der Maschine, dem Lastprofil und technischen Voraussetzungen wie Bauraum ab. Die für die Maßnahmenbetrachtung abgeleiteten Werte können damit nur einen vereinfachten Ansatz zur Abbildung der möglichen Kosten auf dem Nachrüstungsmarkt darstellen.

10.3 SCR-Kosten

SCR-Systeme werden bisher vorwiegend für den Einsatz in Neumaschinen vorgesehen, um die NOx-Grenzwerte der Stufe IV zu erfüllen, prinzipiell können die Systeme aber auch zur Nachrüstung eingesetzt werden. Da dies bei mobilen Maschinen in der Praxis bisher kaum umgesetzt wird, existieren nur wenige Angaben zu den Kosten. Für den US-Markt werden die Kosten für SCR-Retrofit-Systeme mit 10.000 bis 20.000 US\$ angegeben (Tabelle 24). Die Bandbreite der Kosten liegt mit dem Faktor 2 deutlich geringer als bei DPF: hier liegen die maximalen Kosten je nach Quelle um den Faktor 5-10 über den Minimalkosten, was unter anderem auf die verschiedenen Systeme (u.a. aktive vs. passive Regeneration) zurückzuführen ist. Auch bei SCR-Systemen ergeben sich Kostenunterschieden u.a. bei unterschiedlichen Größenklassen [MECA 2009], hierzu werden aber keine konkreten Angaben gemacht.

Eine Differenzierung in System-, Montage- und laufende Kosten wird bei den untersuchten Quellen ebenfalls nicht vorgenommen, daher wird angenommen, dass die Angaben sich nur auf die Systemkosten beziehen.

Tabelle 24: Kostenangaben zur Nachrüstung von Dieselmotoren mit SCR-Systemen

Quelle	Kosten	Bemerkung
[EPA 2013]	10.000 - 20.000 US Dollar	
[MECA 2009]	18.000 US Dollar	Mit DOC, Kombisysteme mit DPF bis zu 30.000 US Dollar; Unterschiede nach Größenklassen

Für die Kostenanalyse im den deutschen bzw. europäischen Markt werden Systemkosten von 9.000 bis 15.000 € angenommen (was etwa 12.000 bis 20.000 US \$ entspricht) angenommen (Tabelle 25). Vereinfachend wird davon ausgegangen, dass die angegebene Bandbreite zur Abdeckung der unterschiedlichen Größenklassen herangezogen werden kann. Als Größenklassen

werden nur Maschinen über 37 kW untersucht, da die Stufe IV bisher nur für Motoren >56 kW geplant ist²².

Als zusätzliche Kosten werden analog zu DPF zusätzliche Montagekosten von 25% der gesamten Investitionskosten veranschlagt. Die laufenden Kosten werden ebenso in Anlehnung an die Angaben für DPF abgeleitet. Hierfür werden jährliche Fixkosten in von 1,5% der Investitionskosten angenommen (abgeleitet aus [BAFU 2007]). Wartungskosten, die bei DPF den Großteil der laufenden Kosten ausmachen, werden bei SCR vernachlässigt, da hier keine Reinigung von Ascherückständen erfolgen muss. Somit ergeben sich für die jährlichen Kosten über 10 Jahre mit 1.218 € bis 2.030 € ähnliche Kosten wie bei den DPF (vgl. Kap. 10.2). Bei kürzeren Restnutzungszeiten liegen die jährlichen Kosten aber über denen der DPF-Nachrüstung, da die Investitionskosten bei den SCR-Systemen einen größeren Anteil ausmachen. Dies wirkt sich in der Kosteneffizienz für ältere Maschinen nachteilig aus.

Tabelle 25: Eigene Annahmen zu SCR-Kosten

Größenklasse	Gesamtkosten auf 10 Jahre in €/Jahr	Systemkosten in €	Montagekosten in €	Laufende Fixkosten in €/Jahr
37-75kW	1218	9000	3000	180
75-130kW	1489	11000	3667	220
130-300kW	1759	13000	4333	260
300-560kW	2030	15000	5000	300

Die in Tabelle 25 angenommenen Kosten sind aufgrund der geringen Datenverfügbarkeit mit Unsicherheiten behaftet und dienen vorwiegend zur Ermittlung einer Größenordnung der Kosteneffizienz von einer SCR-Nachrüstung.

10.4 Restlebenszeit der Maschinen und Retrofit-Systeme

Um die Abschreibungszeit in den Nachrüstungskosten einzubeziehen, wird eine Restlebenszeit (Restnutzungszeit) der verschiedenen Maschinensegmente auf Basis der Altersverteilungen des Baumaschinenbestands in TREMOD-MM abgeleitet (siehe auch Kap. 9.2). Hierbei wird angenommen, dass die Maschinen maximal 20 Jahre lang genutzt werden²³. Als Lebensdauer für die Filter und SCR-Systeme werden 10 Jahre angenommen. Damit berechnet sich die Restlebenszeit zunächst aus der Lebenszeit der Maschinen, also aus der Differenz des Maximalalters und des mittleren Maschinenalters. Liegt diese höher als 10 Jahre, wird die Restlebenszeit durch die Lebenszeit der Nachrüstungssysteme bestimmt (vgl. Tabelle 26).

²² In TREMOD-MM wird die Klasse 37-74 kW nicht weiter unterschieden. Die Einführung der Stufe IV >56 kW wird zusammen mit der Stufe IIIB für 37-55 kW als Mittelwert der Klasse betrachtet.

²³ Zwar existieren auch noch ältere Maschinen, deren jährliche Nutzung ist aber in der Regel vernachlässigbar.

Tabelle 26: Mittleres Alter und Restlebenszeit der DPF/SCR-Systeme und Maschinen nach kW- Klassen und Emissionsstandard

	Größenklasse	1991-Stufe I	Stufe I	Stufe II	Stufe IIIA
Mittleres Maschinenalter in Jahren	< 18kW	5,9			
	18-36kW	16,1		10,3	3,2
	37-74kW	19,1	13,7	8,9	4,5
	75-129kW	18,7	14,3	9,8	4,9
	130-299kW	19,0	14,8	10,7	5,8
	300-559kW	17,5	14,8	10,6	5,8
Restlebenszeit der Maschinen/Filter in Jahren	< 18kW	10			
	18-36kW	3,9		9,7	10
	37-74kW	0,9	6,3	10	10
	75-129kW	1,3	5,7	10	10
	130-299kW	1,0	5,2	9,3	10
	300-559kW	2,5	5,2	9,4	10

Quelle: Eigene Auswertungen

10.5 Emissionen der Beispielbaustellen

Die Parameter der Beispielbaustellen, den Maschinenparks und Nutzungsdaten, sowie die berechneten Emissionen sind in Tabelle 27 aufgeführt. Die Emissionsdaten wurden der Datengrundlage von TREMOD-MM [IFEU 2009] entnommen. Für die Berechnung der NO₂-Direktemissionen wurde ein NO₂-Anteil von 7 % angenommen. Dies entspricht den Annahmen für Euro III Nutzfahrzeuge aus dem Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBE-FA, v.3.1), welche hinsichtlich des Emissionsverhaltens mit NRMM der Stufe II vergleichbar sind.

Für die Minderungsszenarien wurden folgende Annahmen getroffen:

- DPF-Retrofit
 - Die PM-Reduktion durch DPF beträgt 90 %
 - Im Fall 1 beträgt der Anteil der NO₂-Emissionen an NO_x 25 %. Dies entspricht in etwa einem zertifizierten Filtersystem (bei REC ist eine Erhöhung von maximal 20 % zulässig, bei VERT darf der NO₂-Anteil durch den DPF maximal um das 3-fache steigen)
 - Im Fall 2 beträgt der Anteil der NO₂-Emissionen an NO_x 60 %. Dieser soll den „worst case“ abbilden. Ähnliche Werte werden u.a. bei [MAYER 2013] und [AK 2009] dokumentiert.
- Neumaschinen
 - Alle Maschinen erfüllen die zuletzt für ihre kW-Klasse gültigen Grenzwerte, wenn es sich um Neumaschinen ab dem Jahr 2014 handeln würde. Für Maschinen mit Stufe IV wurde ein NO₂-Anteil von 7 %, entsprechend einem Euro V Nutzfahrzeug mit SCR (ohne DPF) angenommen, für IIIA Maschinen wurde ein NO₂-Anteil von 21 %, entsprechend einem Euro 4 mit AGR unterstellt.

Tabelle 27: Übersicht der Parameter und berechneten Emissionen der untersuchten Beispielbaustellen

Messstation	Baustellenfläche	Maschinenpark			Nutzung			Emissionen in g/d		
		Anzahl	Typ	Nennleistung	Einsatzdauer (h/d)	Lastfaktor	Abgasstufe	PM ₁₀ /PM _{2,5}	NOx	davon NO ₂
Frankfurter Allee 86b, Berlin	6x60 m	1	Mobilbagger	90	6	0,3	II	51	867	61
		1	Minibagger	35	2	0,3	II	17	141	10
		1	Kompressor	50	2	0,5	II	14	276	19
		Summe	3		175	10			82	1285
Mariendorfer Damm 148, Berlin	25x50 m	1	Mobilbagger	90	4	0,35	II	41	658	46
		1	Raupenbagger	110	6	0,4	II	87	1379	97
		1	Radlader	60	2	0,3	II	16	199	14
		1	Minibagger	25	2	0,4	II	15	131	9
		1	Kompressor	50	2	0,5	II	17	276	19
Summe	5		335	16			177	2644	185	

Quelle: Eigene Annahmen und Berechnungen

Tabelle 28: Summe der täglichen Abgasemissionen für die Baustelle Mariendorfer Damm in den Minderungsszenarien

Szenario	Summe Abgasemissionen in g/d		
	PM ₁₀	Nox	NO ₂
Nullfall - 7% NO ₂	177	2644	186
DPF-retrofit (ab 37 kW) - 25% NO ₂	31		661
DPF-retrofit (ab 37 kW) - 60% NO ₂			1586
Neumaschinen (Stand 2014) -7-21% NO ₂	42	483	68

Quelle: Eigene Annahmen und Berechnungen

11 ANHANG III: Expertenworkshop ‚Mobile Maschinen und Luftreinhaltung‘

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde am 22. März 2012 ein Expertenworkshop zur Diskussion mit dem Thema ‚Mobile Maschinen und Luftreinhaltung‘ und Luftreinhaltung durchgeführt. Ziel des Workshops war

- Stakeholdern über die UBA-Aktivitäten zu informieren
- Bisherige Daten und Methoden des Modells TREMOD-MM abzustimmen
- Neuerkenntnisse zu weiteren Datengrundlagen zu gewinnen
- Maßnahmenkonzepte und bisherige Erfahrungen der Stakeholder zu diskutieren.

Eine Liste der anwesenden Experten bzw. Firmen/Institutionen ist in Tabelle 29 aufgeführt.

Tabelle 29: Teilnehmer des Expertenworkshops im März 2012

Person	Firma/Institution
Karsten Just	BMTI Baumaschinentchnik
Giovanni D'Urbano	Bundesamt für Umwelt (BAFU) Schweiz
Karl-Heinz Zierock	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)
Raimund Müller	EMITEC
Jean Jacques Woeldgen	EU-Kommission, DG Enterprise
Dirk Siewert	Hauptverband der Deutschen Bauindustrie
Udo Lambrecht	IFEU
Hinrich Helms	IFEU
Christoph Heidt	IFEU
Mario Keller	Infras
Manfred Ogris	Lebensministerium Österreich
Wolfgang Burget	Liebherr EMtech
François Jaussi	Liebherr Machines Bulle SA
Bernd Vollmer	Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz NRW
Volker Schlickum	Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin
Stephan Nentwig	TÜV Nord
Martin Gassner	Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich (UGZ)
Helge Jahn	Umweltbundesamt (UBA)
Udo Kiesevalter	Verband der Baubranche, Umwelt- und Maschinentchnik (VDBUM)
Günter Hähn	Wirtgen GmbH

12 Quellenverzeichnis

- [AEAT 2004]: McGinlay, J.; Non-Road Mobile Machinery: Usage, Life and Correction Factors
- [AECC 2011]: Favre, C.; Emissions from Tractors and Non-Road Mobile Machinery Engines; Hearing on “Agricultural and forestry vehicles: a new regulatory framework”, European Parliament IMCO Committee Brussels; Association for Emissions Control by Catalyst (AECC), April 2011
- [AECC 2013]: Einführung in die Abgasreinigungs-Technologie; online abrufbar unter <http://www.aecc.be/de/Technology/einfuehrung.html>; Letzter Zugriff am 28.08.2013
- [AK 2009]: Feinstaubproblem Baumaschine Emissionen und Kosten einer Partikelfilternachschrüstung. Informationen zur Umweltpolitik Nr. 179, im Auftrag der Kammer für Arbeiter und Angestellte für Wien in Österreich, 2009
- [AUT 2000]: COPERT, V. III, Herausgeber: Aristotle University of Thessaloniki - Lab of Applied Thermodynamics, 2000
- [AWEL 2010]: Rometsch, R. und Giger, K.; Grundlagenbericht zum Massnahmenplan Luftreinhaltung 2008. Baudirektion Kanton Zürich, AWEL Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Abteilung Lufthygiene; Zürich, 2010
- [BAFU 2008]: U. Schäffeler und M. Keller. Treibstoffverbrauch und Schadstoffemissionen des Offroad-Sektors. Studie für die Jahre 1980–2020. Bundesamt für Umwelt (BAFU); Bern, 2008
- [BAFU 2009]: Richtlinie über betriebliche und technische Massnahmen zur Begrenzung der Luftschadstoff-Emissionen von Baustellen (Baurichtlinie Luft), Bundesamt für Umwelt (BAFU); Bern, Aktualisierte Ausgabe vom 1. Januar 2009
- [BAFU 2012]: Weniger Russ aus Dieselmotoren, Erfolge der Schweiz bei der Emissionsreduktion, Bundesamt für Umwelt (BAFU); Bern, 2012
- [BGBl. II 2013]: BUNDESGESETZBLATT FÜR DIE REPUBLIK ÖSTERREICH, Teil II, 76. Verordnung: Verwendung und Betrieb von mobilen technischen Einrichtungen, Maschinen und Geräten in IG-L-Sanierungsgebieten (IG-L Off-RoadV); März 2013
- [BR Köln 2012]: Luftreinhalteplan für das Stadtgebiet Köln. Erste Fortschreibung 2012, Bezirksregierung Köln, April 2012
- [BUWAL 2000]: Handbuch Offroad-Datenbank. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, 2000
- [COM 2013]: Stakeholder Consultation on the revision of Directive 97/68/EC on emissions from non-road mobile machinery engines. European Commission – Enterprise and Industry Directorate General; January 2013
- [Couson, B. 2003]: Couson, B., Daten zum Bestand von Baumaschinen; per Email; 2003
- [D’Urbano 2011]: D’Urbano, G., Bundesamt für Umwelt (BAFU); Dieselmotorminderung bei Baumaschinen auf Baustellen in der Schweiz; Präsentation im Rahmen des IFEU Workshops ‘Mobile Maschinen und Luftreinhaltung’, März 2012
- [DB 2012]: DB Netze Presseinformation; Auf Bahnbaustellen sollen künftig nur noch Maschinen mit Rußpartikelfiltern eingesetzt werden; Herausgeber: Deutsche Bahn AG; 13.09.2012
- [DESTATIS 2011]: Produktions- und Außenhandelsstatistiken des verarbeitenden Gewerbes. Sonderabfrage durch IFEU. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 2011

- [DG ENTR 2013]: Stakeholder Consultation on the revision of Directive 97/68/EC on emissions from non-road mobile machinery engines, Directorate General Enterprise and Industry (DG ENTR), Brüssel, 2013
- [DUH 2012]: Nicklas, C.; Rechtsgutachten zur Ausstattung von mobilen Maschinen mit Rußfiltern. Deutsche Umwelthilfe e.V. (DUH), Berlin, 2012
- [DUH 2013]: Deutsche Umwelthilfe e.V.: Partikelfilter für Baumaschinen - Verfügbarkeit, Wirksamkeit und Kosten für Dieselpartikelfilter. <http://www.russfrei-bauen.de>, zuletzt aufgerufen am 16.10.2013
- [EPA 1991]: Nonroad engine and vehicle emission study. US Environmental Protection Agency, Washington D. C., 1991
- [EPA 2003]: Draft regulatory impact analysis: Control of emissions from nonroad diesel engines. US Environmental Protection Agency, Washington D. C., 2003
- [EPA 2010a]: Exhaust and Crankcase Emission Factors for Nonroad Engine Modeling - Compression-Ignition. US Environmental Protection Agency, Washington D. C., 2010
- [EPA 2010b]: Median Life, Annual Activity, and Load Factor Values for Nonroad Engine Emissions Modeling. US Environmental Protection Agency, Washington D. C., 2010
- [EPA 2010c]: Nonroad Engine Population Estimates. US Environmental Protection Agency, Washington D. C., 2010
- [EU 2008]: EU-Richtlinie 2008/50/EG vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa; Brüssel, 2008
- [EUROMOT/CECE/CEMA]: European Inventory Calculations for Agricultural (Ag) and Construction Equipment (CE) Applications of Diesel-Powered Non-Road Mobile Machinery (NRMM).
- [GB 2011]: Internetgebrauchtbörsen für Baumaschinen, <http://www.machineryzone.de/>; <http://www.bau-portal.com/>, Letzter Aufruf: 6.6.2011
- [Hausberger, S. 2012]: Hausberger, S.; Simulation der Emissionen verschiedener Motortypen in Off-Road Lastkollektiven. Institut für Thermodynamik und Verbrennungskraftmaschinen, Technische Universität Graz; 2012
- [IFEU 2004]: Lambrecht, U. et al.; Entwicklung eines Modells zur Berechnung der Luftschadstoffemissionen und des Kraftstoffverbrauchs von Verbrennungsmotoren in mobilen Geräten und Maschinen; Endbericht; Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg, 2004
- [IFEU 2009]: Helms, H.; Lambrecht, U. und Knörr, W.; Aktualisierung des Modells TREMOD - Mobile Machinery (TREMOM-MM); Endbericht; Institut für Energie- und Umweltforschung; Heidelberg, 2009
- [IFEU 2012]: Interne IFEU-Auswertung von Industriedaten von Baufirmen bezüglich der Maschinenbestände nach Alter, Leistung und Betriebsstunden; 2012
- [IFEU 2012b]: Helms; H. und Heidt, C.; Erarbeitung eines Konzepts zur Minderung der Umweltbelastung aus NRMM (non road mobile machinery) unter Berücksichtigung aktueller Emissionsfaktoren und Nachrüstooptionen (FKZ 3710 45 191); Interner Zwischenbericht (Aktualisierung); im Auftrag des Umweltbundesamt; Heidelberg, Dezember 2012
- [IFEU Workshop 2012]: Expertenworkshop 'Mobile Maschinen und Luftreinhaltung'; Heidelberg, März 2012

- [IVU 2009a]: IVU Umwelt GmbH, Erneute Aktualisierung der Bestandsaufnahme der Luftreinhalte- und Aktionspläne. FKZ 363 01 194. Im Auftrag des Umweltbundesamtes; 2009
- [IVU 2009b]: Wiegand, G.; Diegmann, V.; IVU Umwelt GmbH; PM₁₀ - Anzahl Überschreitungen Tagesmittelwert-Grenzwert versus Jahresmittelwert; Teilbericht zum F&E-Vorhaben „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung - PAREST“ Im Auftrag des Umweltbundesamtes, 2009
- [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; 2008
- [Lohmeyer 2010]: Bretschneider, D; Düring, I.; Ingenieurbüro Lohmeyer; Verursacher, Flächenhafte Belastung und Tendenzen für PM_{2,5} in Sachsen; Sachstandsbericht vom 04.01.2010, Auftraggeber: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG); Januar 2010
- [LUBW 2011]: Luftreinhaltepläne für Baden-Württemberg, Grundlagenband 2010; LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg; Dezember 2011
- [Mayer 2013]: Mayer, A. Probleme vermeiden – wie finde ich den geeigneten Filter für meine Maschine und Einsatzzwecke?; Präsentation im Rahmen des Workshops: „Partikelfilter an Baumaschinen“ der Senatsverwaltung Berlin; Berlin, Mai 2013
- [MECA 2009]: Retrofitting emission controls for diesel-powered vehicles. Manufacturers of Emission Controls Association, Washington D. C., 2009
- [OHR 2011]: The Construction Equipment Industry in Europe - Equipment Analysis. Verschiedene Jahrgänge (2007 bis 2011). Off-Highway Research Limited; London, 2011
- [SBD]: Statistische Jahrbücher für die BRD. Statistisches Bundesamt Deutschland, Wiesbaden; verschiedene Jahrgänge
- [Schulte 2013]: Schulte, L.E.; TÜV Nord Mobilität; UN-ECE Arbeiten zur Nachrüstungsrichtlinie für Partikel- und NO_x-reduzierende Abgasnachbehandlungen (REC); Präsentation im Rahmen des Workshops: „Partikelfilter an Baumaschinen“ der Senatsverwaltung Berlin; Berlin, Mai 2013
- [Sen. Berlin 2013]: Luftreinhalteplan 2011 bis 2017 für Berlin; Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, bezogen am 12.8.2013, unter <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/luftqualitaet/de/luftreinhalteplan/download.shtml>; Veröffentlichungsjahr unbekannt
- [Stadt Hamburg 2012]: Luftreinhalteplan für Hamburg, 1. Fortschreibung 2012, Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt; Hamburg, Dezember 2012
- [Stadt Leipzig 2009]: Luftreinhalteplan für die Stadt Leipzig, Dezernat Umwelt, Ordnung, Sport/ Amt für Umweltschutz/ Abteilung Umweltvorsorge; Dezember 2009
- [Tizeck 2013]: Tizeck, H; Regelungen zu Baumaschinen in Österreich / Erfahrungen mit der Wiener Regelung. Präsentation im Rahmen des Workshops: „Partikelfilter an Baumaschinen“ der Senatsverwaltung Berlin; Berlin, Mai 2013
- [UBA 2013]: Überschreitungstabellen für PM₁₀ und NO₂, online verfügbar unter: <http://www.env-it.de/umweltbundesamt/luftdaten/pollutants.fwd>, abgerufen am 12.08.2013
- [VDMA 2012]: Stellungnahme Fachverband Bau- und Baustoffmaschinen zum IFEU Workshop „Mobile Maschinen und Luftreinhaltung“; Heidelberg, März 2012

[Wichmann 2013]: Wichmann E., Gesundheitliche Risiken durch Dieselpartikel aus Baumaschinen, Präsentation im Rahmen des Workshops: „Partikelfilter an Baumaschinen“ der Senatsverwaltung Berlin; Berlin, Mai 2013

[WKO 2009]: Kalkulation von Erdbaugeräten; Wirtschaftskammer Österreich (WKO), Bundesin-nung Bau; Wien, November 2009