



Dr. Karl Otto Schallaböck

## **Überlegungen zu Lärm und Schadstoffen im Zusammenhang mit dem Betrieb von Elektrofahrzeugen**

Teilbericht im Rahmen der Umweltbegleitforschung Elektromobilität  
im Förderschwerpunkt „Modellregionen Elektromobilität“  
(FKZ 03KP5003)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Verkehr, Bau  
und Stadtentwicklung

Koordiniert durch:



Wuppertal, im Januar 2012

**Inhalt**

Executive Summary .....	4
1. Lärm .....	8
<i>Zur Geräuschemessung und -wirkung</i> .....	8
<i>Denkbare Vorteile von Elektro-PKW</i> .....	9
<i>Denkbare Nachteile von Elektro-PKW</i> .....	11
2. Gasförmige Emissionen .....	13
<i>Entwicklung der Grenzwerte</i> .....	13
<i>Entwicklung bei den PKW-Neuzulassungen</i> .....	14
<i>Entwicklung im PKW-Bestand</i> .....	16
<i>Entwicklung nach Schadstofffraktionen</i> .....	18
<i>Entlastungsbeitrag der Elektro-Fahrzeuge</i> .....	24
3. Partikel.....	25
<i>Kritische Reflexion zur verwendeten Metrik</i> .....	25
<i>Entwicklung der Gesamtbelastung</i> .....	27
<i>Feinstaubbelastung aus dem Straßenverkehr</i> .....	28
<i>Entlastungsbeitrag der Elektro-Fahrzeuge</i> .....	31
Literatur .....	32

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Komponenten von Verkehrsgeräuschen und deren maßgebliche Einflussfaktoren .....	9
Tabelle 2	Übersicht zu den EU-Richtlinien zur Begrenzung der stofflichen Emissionen von PKW .....	13
Tabelle 3	Grenzwerte für stoffliche Emissionen von PKW in mg/km nach den Regelungen EURO 1 bis EURO 6 .....	14
Tabelle 4	Stickoxid-Emissionen aus dem Straßenverkehr, Gg NO <sub>2</sub> .....	20
Tabelle 5	Primäre Partikelemissionen des Straßenverkehrs, Gg PM(10) und PM(2,5) .....	29

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Maximale Vorbeifahrtpegel, gemessen in 7.5 m Abstand und auf 1,2 m Höhe nach Geschwindigkeit und verschiedenen Straßenbelägen .....	10
Abbildung 2	Unterschiedliche Vorbeifahrtgeräusche von Elektrofahrzeugen (EV) und herkömmlichen Fahrzeugen (ICE) .....	12
Abbildung 3	Anzahl der Neuzulassungen von PKW nach Antrieb und ausgewählten Emissionsklassen .....	15
Abbildung 4	Verteilung der Neuzulassungen der PKW nach Antrieb und ausgewählten Emissionsklassen .....	16
Abbildung 5	Bestand an PKW nach Antrieb und ausgewählten Emissionsklassen.....	17
Abbildung 6	Verteilung des Bestands an PKW nach Antrieb und ausgewählten Emissionsklassen .....	17
Abbildung 7	CO-Emissionen in Deutschland in Mio. t .....	18
Abbildung 8	HC (NMVOC) – Emissionen in Deutschland in Mio. t .....	19
Abbildung 9	NO <sub>x</sub> -Emissionen in Deutschland (als NO <sub>2</sub> ) in Mio. t .....	20
Abbildung 10	Maximale Stundenmittelwerte der Stickstoffdioxidkonzentration .....	21
Abbildung 11	Stundenmittelwerte der Stickstoffdioxidkonzentration .....	22
Abbildung 12	Altersstruktur der PKW-Flotte, 01.01.2011: kumulierte Verteilung in % über dem Alter in Jahren.....	23
Abbildung 13	Schematische Darstellung der Größenverteilung der Partikel in der Umgebungsluft.....	26
Abbildung 14	Gesamtstaub-Emission in Mio. t .....	27
Abbildung 15	PM(10) und PM(2,5) in Mio. t.....	28
Abbildung 16	Pkw mit Dieselantrieb 2007 nach Partikelwerten .....	30
Abbildung 17	Pkw mit Dieselantrieb 2008 nach Partikelwerten .....	30

## Executive Summary

Lärm und Luftschadstoffe bilden seit vielen Jahren kritisch verfolgte Begleiterscheinungen des PKW-Verkehrs. In beiden Kategorien versprechen Elektro-PKW offensichtlich entlastende Zielbeiträge wegen der Geräuscharmheit des Antriebs einerseits und der örtlichen Emissionsfreiheit andererseits. Umfang und Bedeutung dieser Zielbeiträge werden hier erörtert.

Zunächst ist zu beachten, dass es für die Stör- und Schadwirkungen auf die Immissionen ankommt, die sich aus dem Zusammenwirken der Belastungsbeiträge aller Emittenten ergeben. Neben den PKW sind es im vorliegenden Fall auch andere Fahrzeuge, neben dem Verkehr auch weitere Emittenten. Da die Elektro-PKW derzeit nur einen sehr geringen Anteil – weniger als 0,1 Promille – an der PKW-Flotte und deren Fahrleistung ausmachen, kann deren Entlastungsbeitrag gegenwärtig abgesehen von ausgesprochenen Sondersituationen vernachlässigt werden. Hinsichtlich der künftigen Potenziale muss eine differenzierte Inspektion der verschiedenen Belastungskategorien erfolgen, die auch die Entwicklung bei den Fahrzeugen mit herkömmlichem Antrieb berücksichtigt.

Bei den Geräuschen ist neben der positiven Wirkung einer Belastungsminderung auch das Potenzial einer Erhöhung der Unfallgefahr durch die Geräuscharmheit der Elektro-PKW zu bedenken.

Die positiv empfundene Geräuschkürzung wird grundsätzlich dadurch relativiert, dass die bei Elektro-PKW geminderten bzw. vermiedenen Motor- und Auspuffgeräusche nur einen Teil der vom Fahrzeug ausgehenden Geräusche ausmachen: Die Rollgeräusche und die Windgeräusche sind vom Antrieb unabhängig, wie auch weitere Geräuschkomponenten, etwa Bremsgeräusche oder aus dem Fahrzeuginnen nach außen dringende künstlich erzeugte Geräusche durch Musikanlagen. Zudem wird die gesamte akustische Störwirkung des Straßenverkehrs örtlich vielfach durch den Schwerverkehr und/oder motorisierte Zweiräder, oder durch von Einzelfahrzeugen ausgelöste Geräuschspitzen geprägt. Generell ist daher auch bei verhältnismäßig hohen Anteilen von Elektro-PKW – deutlich oberhalb der für das Jahr 2020 markierten Zielmarke von 1 Mio. (entsprechend dann gut 2 Prozent des PKW-Bestands) – in aller Regel nur von verhältnismäßig bescheidenen Entlastungen unterhalb der Wahrnehmungsschwelle auszugehen. In besonderen städtischen Situationen, etwa im Anfahrbereich an Kreuzungen, kann der Entlastungseffekt relativ stärker ausfallen, zumal Elektro-PKW erwartungsgemäß im Vergleich zu den sonstigen PKW stärker im städtischen als im außerörtlichen Verkehr eingesetzt werden. Doch selbst hier dürfte – bezogen auf die gesamte Geräuschbelastung – in der Regel der Entlastungseffekt wegen des geringen Anteils der Elektro-PKW und des Auftretens einzelner anderer Fahrzeuge mit dominanten Störpegeln auf absehbare Zeit kaum wahrnehmbar sein. Dies schließt nicht aus, dass bei nahezu völligem Übergang auf Elektro-Fahrzeuge in besonders empfindlichen Gebieten relativ schnell örtlich relevante Effekte erzielt werden können. Auch ein beschleunigter Übergang auf elektrische Antriebe bei den spezifisch besonders belastenden Schwerverkehren (einschließlich Bussen) und motorisierten Zweirädern kann örtlich relevante Entlastungen zur Folge haben.

Anders als die Reduktion der Störwirkung durch die Minderung der Geräuschemissionen kann die Erhöhung der Verkehrsgefährdung durch die Geräuscharmheit der Elektro-PKW auch schon bei einer geringen Zahl von solchen Fahrzeugen potenziell von Bedeutung sein; denkbar ist jedoch, dass die Risiken mit steigender Zahl von Elektrofahrzeugen aufgrund von Gewöhnungs- und Anpassungseffekten sinken. In diese Richtung deuten vorliegende Ergebnisse bei ebenfalls weitgehend geräuschlosen Fahrrädern an, dass die Unfallgefahren

mit steigenden Verkehrsanteilen dieser Fahrzeuge auch abnehmen können. Insgesamt allerdings erscheinen nach den im Rahmen des Forschungsprogramms von D'Angelico (2011a, b) durchgeführten Recherchen die Gefahren eher limitiert: Zwar wird generell durchaus von der Erfahrung kritischer Verkehrssituationen berichtet, die mit der Geräuscharmheit in Verbindung gebracht werden, aber praktisch gar nicht von tatsächlichen Unfällen. Dies mag damit zusammenhängen, dass die Gefahrensituationen insbesondere in besonderen Verkehrssituationen außerhalb des normalen Verkehrsflusses und bei niedrigen Geschwindigkeiten auftreten, wo einerseits die Reaktionsbereitschaft der Verkehrsteilnehmer erhöht ist, andererseits die Fahrzeuge auch leicht zum Stillstand gebracht werden können. Auch die Untersuchungen von Dudenhöffer/Hause (2011) bestätigen die Relevanz des niedrigen Geschwindigkeitsbereichs (bis etwa 30 km/h), in dem die Rollgeräusche typischerweise gering ausfallen. Von besonderem Interesse und gut nachvollziehbar ist auch das Ergebnis von Dudenhöffer/Hause, dass nicht unbedingt die Lautstärke des Geräuschs maßgeblich ist, sondern vielmehr neben der Wahrnehmbarkeit das Geräuschemuster und seine örtliche und sachliche Interpretierbarkeit.

Da nach den Untersuchungen von D'Angelico speziell im tiefen Frequenzband von etwa 40-130 Hz Unterschiede auftreten, schlägt er vor, die Geräusche von Elektro-PKW nur in diesem Bereich des Frequenzspektrums mäßig anzuheben. Dies kann insbesondere die Annäherung, das Abstellen und Starten der Fahrzeuge akustisch besser wahrnehmbar machen. Andere Vorschläge gehen dahin, über besondere Assistenzsysteme die Kommunikation zwischen Elektrofahrzeugen und insbesondere hör- und/oder sehbeeinträchtigten Personen sicherzustellen. Eine vollständige Anhebung der Fahrzeuggeräusche auf das Niveau herkömmlich angetriebener PKW oder sogar darüber hinaus erscheint dagegen weder notwendig noch sinnvoll.

Bei den Schadstoffemissionen ist zu unterscheiden zwischen den gasförmigen Emissionen und den Partikelemissionen (Feinstäube, Schwebstäube).

Bei den gasförmigen Emissionen werden traditionell insbesondere die Schadstofffraktionen Kohlenmonoxid (CO), flüchtige Kohlenwasserstoffe (NMVOC, non methane volatile organic compounds) und Stickoxide (NO<sub>x</sub>, üblicherweise gerechnet als NO<sub>2</sub>) betrachtet, bei deren Emission der Verkehr und insbesondere der PKW-Verkehr eine besondere Rolle spielen. Bei Kohlenmonoxid und den flüchtigen Kohlenwasserstoffen sind die PKW-bedingten Emissionen allerdings auf der Grundlage der Abgasgesetzgebung ab 1970 und insbesondere den Regelungen nach EURO 1 und folgenden ab 1991 sehr stark abgesunken und keineswegs mehr dominant. Ungeachtet der Aussicht auf auch künftig noch weiter sinkende Werte können sie vielmehr bereits jetzt in der Regel praktisch vernachlässigt werden. Hinsichtlich dieser Schadstofffraktionen bleibt zwar die grundsätzliche Vorteilhaftigkeit der örtlichen Emissionsfreiheit von Elektro-PKW bestehen; es kann jedoch – auch bei zunehmenden Zahlen von Elektro-PKW – nicht erwartet werden, dass dies Bedeutung erlangt.

Etwas anders, nämlich deutlich ungünstiger stellt sich die aktuelle Lage bei den Stickoxiden dar. Hier werden noch an vielen Messstellen, und zwar an solchen mit straßenverkehrsbedingt erhöhten Immissionskonzentrationen, Überschreitungen der zulässigen Grenzwerte festgestellt, und zwar sowohl des zulässigen Jahresmittelwerts als auch der zulässigen Anzahl hoch belasteter Stundenwerte. Nun sind auch bei den Stickoxiden die Emissionen der PKW stark reduziert worden, 2009 gegenüber 1990 um etwa drei Viertel. Die PKW tragen derzeit zu etwa 15 Prozent zu den gesamten Stickoxidemissionen (als NO<sub>2</sub>), bzw. zu rd. 40 Prozent zu jenen aus dem Straßenverkehr bei, sind aber wohl an den kritischen Messpunk-

ten in der Regel überproportional an den Belastungen beteiligt (LUBW, 2010). Entlastungen durch örtlich emissionsfreie Elektro-PKW wären daher hier besonders erwünscht.

Angesichts der bisher weitgehend vernachlässigbaren Zahl von Elektro-PKW können sich nennenswerte Entlastungsbeiträge allerdings erst in der Zukunft ergeben. Hinsichtlich der weiteren Entwicklung bestehen jedoch noch gewisse Unsicherheiten. Grundsätzlich ist auch bei den herkömmlich angetriebenen PKW von einer nennenswerten weiteren Emissionsabsenkung auszugehen. Bei den hier maßgeblichen Diesel-PKW betragen die Absenkungen der NO<sub>x</sub>-Normemissionen nach EURO 5 und EURO 6 gegenüber den bis vor kurzer Zeit im Bestand dominierenden EURO 3-Fahrzeugen immerhin 64 bzw. 84 Prozent (ibid.). Die weiter emissionsreduzierten PKW dürften im Jahr 2020 den Fahrzeugbestand deutlich dominieren, mit Anteilen der EURO 6-PKW von etwa 40 Prozent und der EURO 5-PKW von etwa 30 Prozent; Fahrzeuge nach EURO 3 und schlechter dürften auf eine Restgröße abgeschmolzen sein (IFEU, 2010). Zu den aktuellen EURO-5-Fahrzeugen liegen allerdings aus dem praktischen Betrieb noch keine gesicherten empirischen Werte vor, zu den EURO-6-Fahrzeugen noch gar keine Werte. Es ist daher in gewissem Umfang unsicher, wieweit die Absenkung der Grenzwerte auch im städtischen Fahrbetrieb zu Buche schlägt. Qualitativ lässt sich allerdings abschätzen, dass aus einer für das Jahr 2020 denkbaren Substitution von Euro 6-PKW durch Elektro-PKW im Umfang von etwa 2 Prozent des PKW-Bestands – bei Erreichen des Ziels von 1 Mio. Elektro-PKW – nur nachrangige Entlastungseffekte erwartet werden können. Zur Erreichung und dauerhaften Einhaltung der verbindlichen EU-Immissionsgrenzwerte auch an Belastungsschwerpunkten kommen daher weiterhin insbesondere verkehrlenkende Maßnahmen (wie Ausschluss bestimmter emissionsträchtiger Fahrzeugklassen, Verringerung der Verkehrsmenge, Vermeidung/Verminderung von Verkehrsstockungen, Verstetigung des Verkehrsflusses, Reduktion der freien Geschwindigkeiten) in Frage, fallweise darüber hinaus wohl auch Maßnahmen zur Absenkung der Grundbelastung aus dem städtischen Hintergrund.

Die Partikelemissionen, insbesondere auch aus dem Verkehr, sind um das Jahr 2005 mit dem Wirksamwerden der schwer einzuhaltenden Verschärfungen der Immissionsgrenzwerte verstärkt ins Bewusstsein getreten. Ein erhebliches Beurteilungsproblem ergibt sich in diesem Bereich durch die eingeführte trügerische Metrik: Herangezogen werden die Gesamtmassen an Feinstäuben (emissionsseitig etwa bezogen auf die Fahrleistung, immissionsseitig bezogen auf das Luftvolumen); dagegen besteht große fachliche Einigkeit darüber, dass die Partikelanzahl maßgeblich ist, wobei die Gefährdung umso größer ist, je kleiner die Partikel sind (WHO, 2010). Die verständliche Begründung dafür ist, dass die mögliche Eindringtiefe über die Atmungsorgane, aber auch über andere Wege, bei reduzierter Partikelgröße zunimmt. Die Gesamtmasse an Partikeln, die sich in ihren Einzelmassen um eine ganze Reihe von Größenordnungen unterscheiden und die auch in ihrer Zusammensetzung deutlich unterschiedlich vorgefunden werden, kann aber diesbezüglich offensichtlich nur beschränkt Hinweise liefern. Die neuesten Ansätze der EURO 5- und EURO 6-Regelungen nehmen die Partikelzahl als zusätzlichen Regelungsgegenstand zwar auf, können diesbezüglich aber nur die Absicht anbieten, geeignete Verfahren entwickeln zu wollen. Die darüber hinaus gehende Notwendigkeit, auch die chemische und physikalische Beschaffenheit der Partikel mit einzubeziehen, da auch davon die biologische Störwirkung maßgeblich geprägt wird, wird im Regulierungsrahmen bislang noch nicht einmal angesprochen.

Soweit man sich mit dem notwendigen Vorbehalt auf die eingeführte Metrik der rechtsverbindlichen Vorgaben einlässt, stellt man auch bei den Stäuben und Feinstäuben fest, dass in der Folge der schrittweise verschärften Luftreinhaltevorschriften auch die Emissionen deut-

lich abgenommen haben (UBA, 2011a). Dies gilt insbesondere auch für den PKW-Verkehr, der aktuell nur mehr rd. 4 Prozent (bei PM(2,5)) bzw. 2 Prozent (bei PM(10)) der Partikelmasse emittiert. Bei den hier wiederum maßgeblichen Diesel-PKW ist der Emissionsgrenzwert von EURO 1 auf EURO 5 von 180 auf 5 mg/km, mithin um etwa 97% reduziert worden, tatsächlich weisen aktuell schon rd. 80 % der neuen Diesel-PKW Emissionskennwerte im Bereich bis 2 mg/km auf. Aufgrund des schrittweisen Eindringens der Neufahrzeuge mit den niedrigen Emissionswerten in die Fahrzeugflotte ist auch künftig mit einer signifikanten antriebsseitigen Emissionsminderung zu rechnen. Mit zunehmender Durchsetzung dieser Standards steigt bereits bisher die relative Bedeutung der nicht-antriebsseitigen Partikelemissionen (Abriebe von Straßen, Reifen, Bremsen) innerhalb der gesamten Partikelemissionen des Straßenverkehrs an, von 1995 bis 2009 bei den enger abgegrenzten PM(2,5) von knapp 20 auf knapp 50 Prozent, bei den weiter abgegrenzten PM(10) von gut 30 auf gut 60 Prozent. Bei Fortsetzung dieser laufenden Entwicklungen ist auch von einer bis 2020 deutlich erhöhten Anzahl von Elektro-PKW keine nennenswerte Reduktion der verkehrsbedingten Partikellasten zu erwarten, weder emissionsseitig noch insbesondere immissionsseitig, da ja dabei zusätzlich auch die Sekundäremission bereits sedimentierter Partikel durch den Verkehrsfluss zu beachten ist, die naturgemäß nicht von der Antriebsart der Fahrzeuge abhängt.



## 1. Lärm

### **Zur Geräuschemessung und -wirkung**

Geräuschemessung und die Abschätzung von Geräuschwirkungen gehören zu den stark problembehafteten Feldern im Verkehr und nicht nur dort. Im Folgenden werden hierzu einige Hinweise gegeben.:

- Die administrative Metrik legt in der Regel als Einheit emissionsseitig Maximalpegel und immissionsseitig Dauerschallpegel, jeweils ausgedrückt in dB(A) zugrunde. B steht für Bel, eine logarithmisch (zur Basis 10) skalierte Größe für Druckverhältnisse, dabei bedeutet eine Erhöhung um 1 eine Verzehnfachung, eine solche um z.B. 0,3 etwa eine Verdoppelung. dB für Dezibel steht entsprechend für eine um den Faktor 10 erweiterte Skala, d.h. hier bedeutet eine Erhöhung um 3 annähernd eine Verdoppelung. Der Zusatz (A) bedeutet, dass die physikalischen Werte mit dem Bewertungsfilter A verrechnet werden (es gibt auch eine Reihe anderer Bewertungsfilter). Dadurch werden bei der Zusammenführung die gemessenen Pegelstärken in den einzelnen Frequenzen in standardisierter Form unterschiedlich rechnerisch verändert, insbesondere bei Frequenzen unter 1000 Hz zunehmend gemindert (bei 10 Hz um annähernd 70 dB). Damit soll die Hörempfindlichkeit des Menschen nachgebildet werden, die ihrerseits allerdings keinem klaren quantitativen Standard folgt, sich jedoch in aller Regel im normalen Lebensverlauf dahingehend verändert, dass die Hörempfindlichkeit von den hohen Frequenzen (etwa 20.000 Hz) ausgehend mit zunehmendem Alter abnimmt. Bei dem immissionsseitig zugrunde gelegten lärmäquivalenten Dauerschallpegel  $L_{eq}$  wird eine durchschnittliche Geräuschstärke über eine bestimmte Zeitspanne hinweg errechnet. Die Ergebnisse dieser Rechnung sind wegen der logarithmischen Skalierung des Parameters keineswegs einfach zu verstehen und verdecken zwangsläufig die möglicherweise enthaltenen entscheidenden Geräuschspitzen.
- Die direkte physiologische Wirkung von Geräuschen insbesondere auf das Gehör in Abhängigkeit von der Lautstärke lassen sich verhältnismäßig gut beschreiben; daraus lassen sich grobe Grenzen ableiten, ab welchen Pegeln die Lautstärke als schmerzhaft empfunden wird, und ab wann vorübergehende und dauerhafte organische Schäden auftreten. Solche Pegel werden aber im Straßenverkehr praktisch nicht erreicht.
- Die Wirkung von Geräuschen unterhalb dieser physiologischen Störschwellen lässt sich nur beschränkt mit Ingenieursmethoden bestimmen, das aber wird durchaus eher häufig versucht. Noch relativ leicht – aber aufgrund der unterschiedlichen Hörempfindlichkeit insbesondere bei höheren Frequenzen nicht intersubjektiv gleich – lässt sich die Störung durch Geräusche beschreiben, die durch Überdeckung die (erwünschte) Interpretierbarkeit anderer Geräusche zunichtemachen. Wieweit darüber hinaus Geräusche als störend empfunden werden, ist u.a. ganz maßgeblich von der semantischen Aufladung des Hörerlebnisses abhängig. Auch außerhalb der musikalischen Geschmacksbildung ist dies ein weites, keineswegs intersubjektiv konsistentes Feld, das vielfach durch nicht bewusst kontrollierte und kontrollierbare Lern- und Gewöhnungsprozesse gestaltet ist. Die Lautstärke eines Geräusches ist dabei keineswegs als der entscheidende Parameter, der mit der Störung korrespondiert, heranzuziehen: Vielfach wird dies zwar durchaus der Fall sein, in vielen Fällen sind aber ganz andere Funktionsverläufe zwischen Lautstärke und Störungsumfang maßgeblich.



Das Feld der aufgrund der akustischen Störungen reaktiv gebildeten somatischen Störungen und schließlich von deren physiologischen Fixierungen lässt sich nur schwer eingrenzen, auch wenn sich jeweils in konkreten Populationen durchaus Erhebungen durchführen lassen, die zwar zu raum-zeitlich bestimmten, darüber hinaus jedoch nur beschränkt übertragbaren statistischen Ergebnissen führen können.

- Neuerdings wird zunehmend ein Recht auf Stille proklamiert, was angesichts des an vielen Orten vorherrschenden dauernden Schallteppichs als nachvollziehbare Forderung einzuschätzen ist; andererseits stellt auch eine übertriebene und insbesondere anhaltende Minderbeaufschlagung mit Geräuschen in aller Regel eine ggf. fatale psychische Belastung dar.

Diese hier nur skizzierte Komplexität, die eingeschränkte Aussagekraft der eingeführten quantitativen Metriken, wie auch die daraus herrührenden Bewertungsprobleme sollten bei einem sachgemessenen Diskurs über Lärmbelastungen und Lärminderungen berücksichtigt werden, auch wenn dies die schlichte Ableitung von Handlungsanweisungen erschwert.

### **Denkbare Vorteile von Elektro-PKW**

Der denkbare akustische Vorteil von Elektrofahrzeugen ist offensichtlich: Der Elektromotor als Antriebsaggregat verursacht weniger Lärm als der herkömmliche Verbrennungsmotor. Praktisch allerdings ist dieser Vorteil erheblich zu relativieren, da sich die Verkehrsgeräusche keineswegs auf die Geräusche von Motor und Auspuff beschränken. Eine Übersicht über wesentliche Geräuscharten und deren maßgebliche Einflussfaktoren wird in der nachfolgenden *Tabelle 1* gegeben.

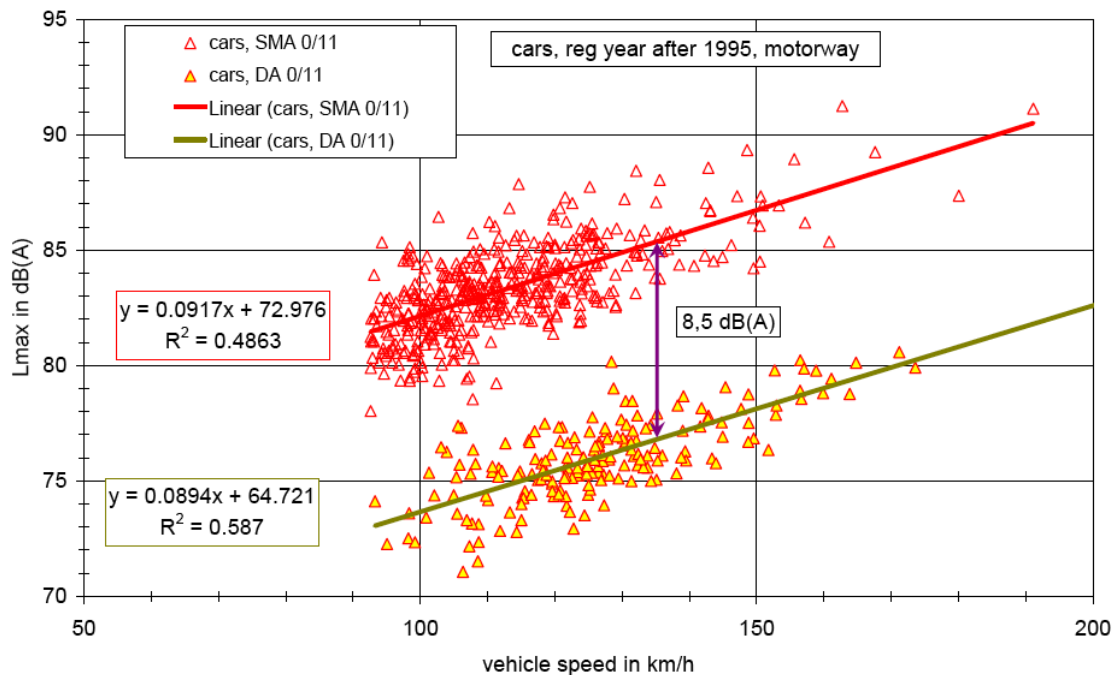
**Tabelle 1**      **Komponenten von Verkehrsgeräuschen und deren maßgebliche Einflussfaktoren**

<b>Geräuschart</b>	<b>Einflussfaktoren</b>
<b>Windgeräusch</b>	Form und Größe des Fahrzeugs Geschwindigkeit
<b>Antriebsgeräusch</b>	Fahrzeugart und -modell Geschwindigkeit Fahrodynamik (Beschleunigung) Steigung
<b>Rollgeräusch</b>	Fahrzeugart Fahrbahnbelag(-Reifen-Kombination) Geschwindigkeit
<b>Sonstiges, z.B.</b>	unterschiedlich
durch Bremsen	Fahrzeugzustand, Nutzerverhalten
durch Ladung	Fahrzeug, Ladungsart, Nutzerverhalten
durch Reifen	Fahrstil
durch Musik	Nutzerverhalten

Quelle: eigene Zusammenstellung.

Die Bedeutung der einzelnen Geräuscharten variiert ganz erheblich, und das Antriebsgeräusch ist keineswegs stets dominant. So dominieren bei hohen Geschwindigkeiten typischerweise die Roll- und Windgeräusche, dabei noch erheblich variiert etwa nach der Ausführung der Fahrbahndecke, wie die nachfolgende *Abbildung 1* zeigt. Aber auch innerorts kann bei entsprechendem Straßenbelag das Rollgeräusch dominant werden.

**Abbildung 1** Maximale Vorbeifahrtpegel, gemessen in 7.5 m Abstand und auf 1,2 m Höhe nach Geschwindigkeit und verschiedenen Straßenbelägen



Quelle: Heinz (2005).

Außerdem setzt sich die verkehrsbedingte Geräuschbelastung aus den Belastungsbeiträgen aller beteiligter Fahrzeuge zusammen, und dabei dominieren ggf. der Schwerverkehr oder die motorisierten Zweiräder; insbesondere was die besonders störenden Geräuschspitzen betrifft, bilden diese Fahrzeugarten häufig die maßgebliche Störgröße.

Abgesehen von einem vorläufig – bei einer lediglich geringen Anzahl von Elektro-PKW – praktisch vernachlässigbaren Effekt ist deshalb auch bei einem in fernerer Zukunft denkbaren nennenswerten Anteil von Elektro-PKW nur eine wenig relevante partielle Lärminderung im Bereich des Verkehrslärms zu erwarten. Durchaus denkbar ist allerdings bereits deutlich früher, dass in besonders schützenswerten Bereichen infolge von Verkehrsbeschränkungen für herkömmlich angetriebene Fahrzeuge eine deutliche Minderung der Verkehrsgeräusche erzielt werden kann.

Außerhalb des hier betrachteten Bereichs des PKW-Verkehrs können insbesondere innerorts relevantere Effekte erwartet werden, wenn es gelingt, Busse (mit typischerweise dominant störenden Geräuschpegeln in den tiefen Frequenzen) und/oder motorisierte Zweiräder (mit typischerweise dominant störenden Geräuschpegeln in den hohen Frequenzen) auf elektrische Antriebe umzustellen. Auf die besondere Problematik der in den immissionsseitigen Dauerschallpegeln weitgehend unkenntlich gemachten Geräuschspitzen ist hierbei besonders hinzuweisen: Soweit – was häufig der Fall ist – bei Bussen und motorisierten Zweirädern die Geräuschspitzen durch Einzelfahrzeuge die maßgebliche Störwirkung entfalten, ist für deren Beseitigung bzw. maßgebliche Reduktion eine vollständige oder zumindest weitgehende Umstellung auf die geräuschärmeren elektrischen Antriebe erforderlich.

### **Denkbare Nachteile von Elektro-PKW**

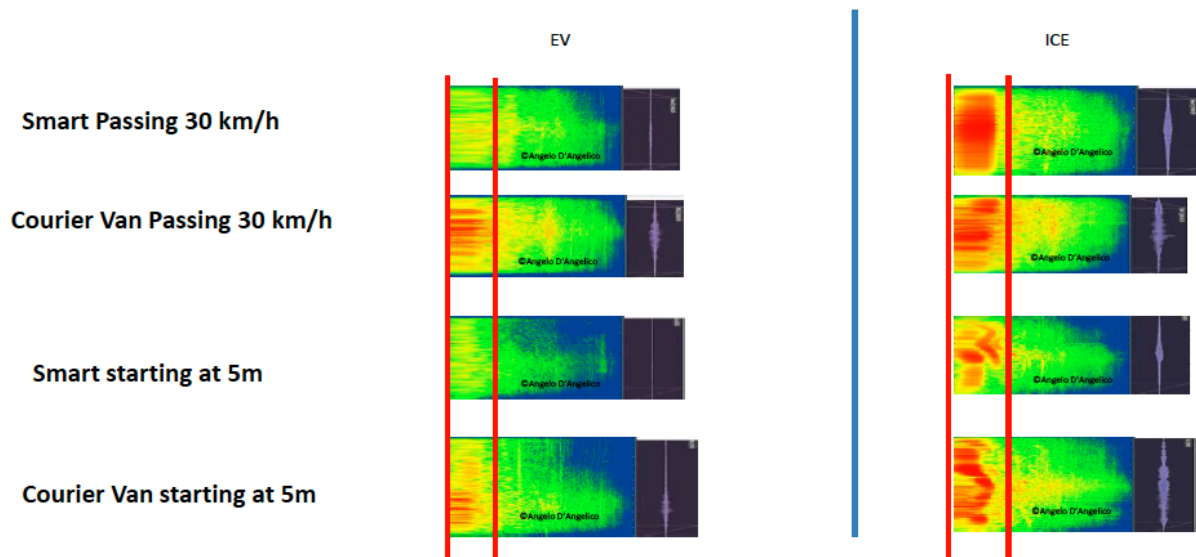
In der öffentlichen Debatte weniger vertreten ist die Tatsache, dass ein Mangel an Geräuschentwicklung von Fahrzeugen von einem Teil der Fahrzeugführer selbst schon als Mangel empfunden wird. Wie jedem Autohersteller klar ist, der Geräuschdesigner in seiner Entwicklungsabteilung beschäftigt, sind die Fahrzeuggeräusche nach innen und außen und deren Modulation nach Fahrzustand und Fahrdynamik ein durchaus absatzrelevantes Konstruktionselement. Diese Frage soll hier jedoch nicht weiter vertieft werden.

Als jedoch wichtiges Thema in der öffentlichen Debatte haben sich potenzielle Sicherheitsprobleme etabliert, ausgehend von der Hypothese, die geringe Geräuschentwicklung von Elektrofahrzeugen könnte die davon ausgehende Gefährdung insbesondere für nicht motorisierte Verkehrsteilnehmer erhöhen. Hierzu hat D'Angelico (2011a, b) im Rahmen des Programms Modellregionen Elektromobilität Bedeutendes zutage gefördert:

- Tatsächliches Unfallgeschehen wegen (zu) geringer Geräuschentwicklung von Elektrofahrzeugen lässt sich bislang kaum erhärten, wohl aber wird nicht selten von kritischen Verkehrssituationen berichtet, für die auch die Geräuscharmheit als ursächlich angesehen wird.
- Die von D'Angelico durchgeführten Vergleichsmessungen belegen, dass im relevanten Spektrum niedriger Fahrgeschwindigkeiten die Elektrofahrzeuge insbesondere im Frequenzband von etwa 40 – 130 Hz niedrigere Amplituden (Lautstärken) aufweisen, vgl. auch die nachfolgende *Abbildung 2*.
- Dies betrifft insbesondere auch den Zeitraum und das Geschehen unmittelbar vor dem Passieren, also das Herannahen, ggf. Abstellen oder Starten: Die hierfür gewohnte charakteristische Geräuschkulisse herkömmlicher Fahrzeuge fehlt bei Elektrofahrzeugen und damit auch deren Vorwarncharakter.
- Daher bietet sich an, die Elektrofahrzeuge genau in diesem Frequenzband mit zusätzlichen akustischen Gebern auszustatten, die eine vergleichbare Erkennung der Fahrzeugannäherung ermöglichen.
- Besonderes Augenmerk sollte dabei auch den Vorgängen Abstellen und Anfahren gewidmet werden, damit wie bei herkömmlichen Fahrzeugen über das Lernen bestimmter Geräuschmuster bzw. der passenden inhaltlichen Deutungen zu diesen Mustern die Kommunikation gewährleistet werden kann.

Eine diesen Ergebnissen entsprechende akustische Zusatzausstattung der Elektrofahrzeuge müsste nach den Ergebnissen von D'Angelico zu ihrer sachgerechten Wirksamkeit keine besonders hohe Lautstärke entfalten.

**Abbildung 2** Unterschiedliche Vorbeifahrtgeräusche von Elektrofahrzeugen (EV) und herkömmlichen Fahrzeugen (ICE)



Anmerkungen: Vertikalskalen: Zeit; Horizontalskalen: Frequenzen; Farbcodierung: Amplitude (Lautstärke), von blau = leise zu rot = laut ansteigend; EV = Electric Vehicle, ICE = Internal Combustion Engine (= Verbrennungsmotor)

Quelle: D'Angelico Acousitiv Consult (2011b).

Untersuchungen von Dudenhöffer und Hause (2011) an der Univ. Duisburg-Essen haben sich mit der Geräuschwahrnehmung von herkömmlich und elektrisch angetriebenen Fahrzeugen durch nicht motorisierte Verkehrsteilnehmer im Vergleich beschäftigt. Sie bestätigen erwartungsgemäß die Hypothese, dass elektrische Fahrzeuge in der Regel als leiser wahrgenommen werden, wobei fallweise kein Unterschied auffällt, oder sogar ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor fälschlich als Elektrofahrzeug eingeschätzt wird. Dies bestätigt den Eindruck, dass auch herkömmliche Fahrzeuge sehr leise sein können, wobei naturgemäß im sog. „Segelbetrieb“ (d.h. im trägheitsbedingten Schubetrieb bei ausgeschaltetem Motor) überhaupt keine Motorgeräusche anfallen. Insbesondere bei seh- und/oder hörbeeinträchtigten Personen können dadurch Gefahren auftreten, und zwar insbesondere bei niedrigen Geschwindigkeiten bis etwa 30 km/h, bei denen die Rollgeräusche nicht dominant sind. Von besonderem Interesse erscheint auch die Erkenntnis von Dudenhöffer/Hause, dass teils weniger die Lautstärke (der Geräuschpegel in dB(A)) als vielmehr das Geräuschmuster von Bedeutung ist: Auch durchaus wahrnehmbare Geräusche sind zur Gefahrenvermeidung nur bedingt tauglich, wenn sie örtlich oder sachlich nicht klar zugeordnet werden können. Auch dies spricht für eine Hinterlegung der Elektrofahrzeuge bei geringen Geschwindigkeiten mit einem Geräusch, das nicht unbedingt laut ist, aber eindeutig interpretierbar. Alternativ wird an der Univ. Duisburg-Essen an einem Assistenzsystem gearbeitet, „das Blinde oder Handicap-Gruppen für das Elektroauto wahrnehmbar macht und umgekehrt, jedoch ohne neue künstliche Geräusche.“ (ebd. S. 59)

Andere, in der internationalen Diskussion der zugehörigen Regelansätze vertretene Positionen legen als Ziel dagegen zugrunde, dass das einzelne Elektrofahrzeug als akustisches Einzelereignis aus der sonstigen – auch verkehrsbedingten – Geräuschkulisse herausgehört werden soll. Dies wird insbesondere unter dem Aspekt des besonderen Schutzes sehbehinderter Personen als angemessen erachtet. In diesem Fall wäre allerdings der Vorteil einer

möglichen Geräuschreduzierung durch Elektrofahrzeuge aufgegeben – was dann jedoch nicht durch das Elektrofahrzeug konstituiert würde, sondern durch die Verwirklichung eines außerhalb des Elektro-Antriebs ansetzenden Schutzziels.

## 2. Gasförmige Emissionen

### *Entwicklung der Grenzwerte*

Stoffliche, insbesondere gasförmige Emissionen von PKW sind seit langer Zeit Gegenstand der europäischen und nationalen Regulierung. Die nachfolgende *Tabelle 2* gibt eine Übersicht über die europäischen Richtlinien hierzu. Wie zu erkennen, waren anfänglich (1970) lediglich Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffe im Fokus, später wurden auch die Stickoxidemissionen begrenzt (1977), und nochmals deutlich später auch die Partikelemissionen (1988). Auf letztere wird weiter unten eingegangen.

**Tabelle 2**      **Übersicht zu den EU-Richtlinien zur Begrenzung der stofflichen Emissionen von PKW**

RL	Fundstelle, ABl.:	Stichwort (nicht amtlich):
70/220/EWG	L 76 v. 06.04.1970, S. 1	Grenzwerte f. CO- und CH-Emissionen
74/290/EWG	L 159 v. 15.06.1974, S. 61	Herabsetzung der Grenzwerte
77/102/EWG	L 32 v. 03.02.1977, S. 32	Ergänzung Grenzwerte f. NO <sub>x</sub> -Emissionen
78/665/EWG	L 223 v. 14.08.1978, S. 48	Herabsetzung der Grenzwerte
83/351/EWG	L 197 v. 20.07.1983, S. 1	Herabsetzung der Grenzwerte
88/76/EWG	L 36 v. 09.02.1988, S. 1	Herabsetzung der Grenzwerte
88/436/EWG	L 214 v. 06.08.1988, S. 1	Ergänzung Grenzwerte f. PM-Emissionen
89/458/EWG	L 226 v. 03.08.1989, S. 1	Verschärfung der Grenzwerte kleiner PKW
91/441/EG	L 242 v. 30.08.1991, S. 1	EURO 1
94/12/EG	L 100 v. 19.04.1994, S. 1	EURO 2
98/69/EG	L 350 v. 28.12.1998, S. 1	EURO 3, EURO 4
715/2007/EG	L 171 v. 29.06.2007, S. 1	EURO 5, EURO 6
692/2008/EG	L 199 v. 18.07.2008, S. 1	Aktuelle DurchführungsVO hierzu

Quelle: eigene Zusammenstellung.

Zunächst hatte man sich auf absolute Emissionsgrößen in definierten Fahrzyklen bezogen, differenziert nach der Fahrzeugmasse. Ab EURO 1 finden wir die gegenwärtig übliche Darstellung in mg/km (aus definierten Fahrprogrammen abgeleitet). Die Übersicht über den jeweiligen Geltungsbereich und den Zeitpunkt des Wirksamwerdens der einzelnen Grenzwertstufen EURO 1 bis EURO 6 findet sich in der nachfolgenden *Tabelle 3*. Zu erkennen ist die massive relative Absenkung, die bei HC + NO<sub>x</sub> etwa 85 Prozent beträgt, sowie bei CO gut zwei Drittel (bei Benzinern) bzw. gut fünf Sechstel (bei Diesel-PKW).

Besonders zu betonen ist aber, dass die zunächst maßgebliche Reduktion bereits davor liegt: Die Diskussion über die Einführung von effizienten Katalysator-Lösungen, um die drei wichtigsten Emissionsfraktionen (Kohlenmonoxid, Stickoxide und Kohlenwasserstoffe) zu reduzieren, hat die 1980er Jahre beherrscht. In der Europäischen Union hat man sich dazu

erst entschieden, nachdem die EFTA-Länder<sup>1</sup> diesbezüglich in Vorlage getreten sind. Jedenfalls sind in der Folge mit den ergänzenden Verschärfungen nach EURO 1 die zulässigen spezifischen Emissionen auf einen vergleichsweise wenig relevanten Rest reduziert worden. Zweifellos ist im Grundsatz jede weitere Reduktion wünschenswert, die weitere mögliche Entlastung und der weitere Handlungsdruck sind jedoch als vergleichsweise beschränkt einzuschätzen.

**Tabelle 3 Grenzwerte für stoffliche Emissionen von PKW in mg/km nach den Regelungen EURO 1 bis EURO 6**

	EURO 1	EURO 2	EURO 3	EURO 4	EURO 5	EURO 6
<b>Gültigkeit für</b>						
Typprüfung ab	01.07.92	01.01.96	01.01.00	01.01.05	01.09.09	01.09.14
Neuzulassung ab	01.01.93	01.01.97	01.01.01	01.01.06	01.01.11	01.01.15
<b>PKW mit Benzinmotor</b>						
CO	3.160	2.200	2.300	1.000	1.000	1.000
HC + NOx	1.130	500				
NOx			150	80	60	60
HC			200	100	100	100
PM					5*	5*
<b>PKW mit Dieselmotor</b>						
CO	3.160	1.000	640	500	500	500
HC + NOx	1.130	700 / 900*	560	300	230	170
NOx			500	250	180	80
HC						
PM	180	80 / 100*	50	25	5	5
* mit Direkteinspritzung						

Quelle: eigene Zusammenstellung.

### **Entwicklung bei den PKW-Neuzulassungen**

Die jüngere Entwicklung der bei den Neuzulassungen erreichten Schadstoffstandards ist in den nachfolgenden Abbildungen nach Daten des Kraftfahrtbundesamtes dargestellt. Für die Jahre ab 2005 werden, getrennt nach Antriebsart, die Emissionsklassen EURO 4 und folgende von den weniger anspruchsvollen Emissionsklassen unterschieden. Während 2005 noch eine erkennbare Anzahl neuer PKW den EURO 4 Standard nicht erfüllt haben, handelt es sich in 2010 dabei nur mehr um eine Restgröße. Für EURO 5, den für neue Typen erst ab 01.09.2009 und für alle Neuzulassungen ab 01.01.2011 verbindlichen Standard, sind bereits 2008 marginale Anteile festzustellen und bis 2010 ein Einschwenken des Großteils der Neuzulassungen.

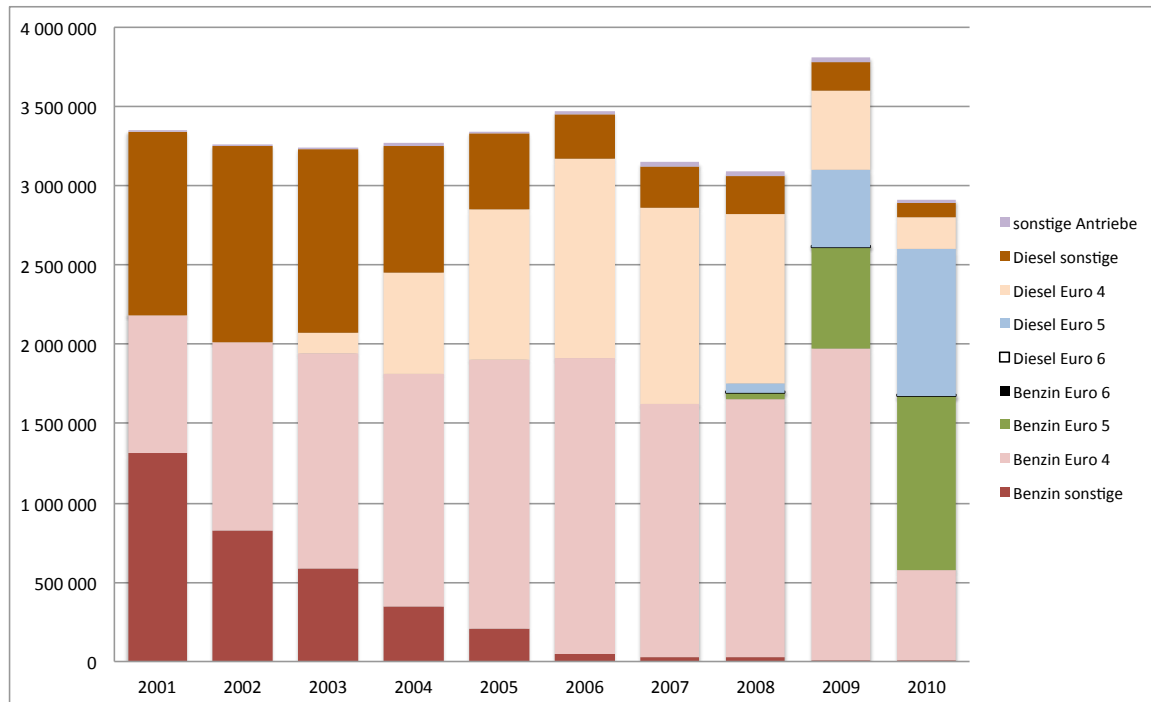
Während die Darstellung der absoluten Zahlen in *Abbildung 3* durch die Sonderentwicklung in 2009 (überdurchschnittliche Neuzulassungszahlen, insbesondere gestützt auf kleinere Benzinfahrzeuge infolge der Umweltprämie) geprägt ist, zeigt die Entwicklung der prozentualen Aufgliederung in *Abbildung 4* einen glatteren Verlauf. Von einer den Vorschriften entsprechenden Fortsetzung der Entwicklung im laufenden Jahr kann ausgegangen werden, wie die zuletzt für August 2011 vorliegenden Angaben des Kraftfahrtbundesamtes belegen.

<sup>1</sup> EFTA = European Free Trade Association.

Danach haben in diesem Monat 97,8 % der Neuzulassungen den Standard EURO 5 erfüllt und weitere 0,3 % den Standard EURO 6: KBA (2011c).

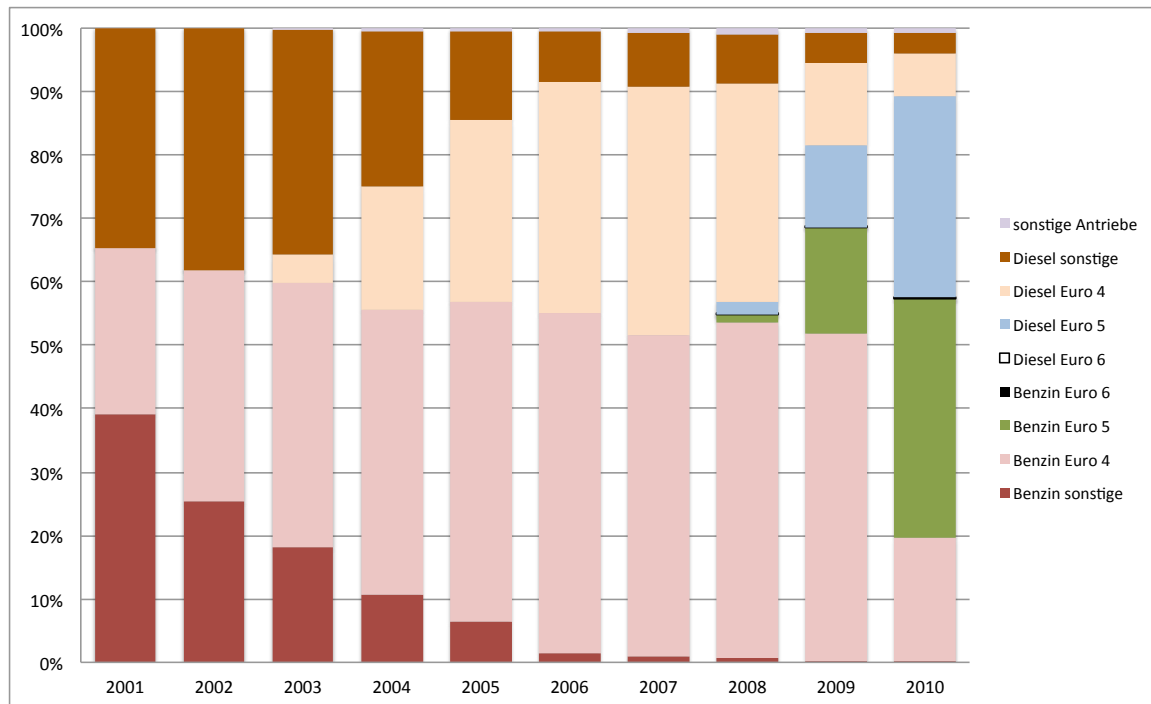
Für die weitere Entwicklung kann angenommen werden, dass auch EURO 6 schrittweise zunehmend greift, wobei die damit verbundene weitere Absenkung der Emissionen eher beschränkt ist und sich weitgehend auf die Stickoxidemissionen von Diesel-PKW konzentrieren wird.

**Abbildung 3 Anzahl der Neuzulassungen von PKW nach Antrieb und ausgewählten Emissionsklassen**



Quelle: eigene Darstellung auf Grundlage von Daten des KBA; ab 2005: KBA (2011b, Tabelle 2); davor: KBA (o.J.).



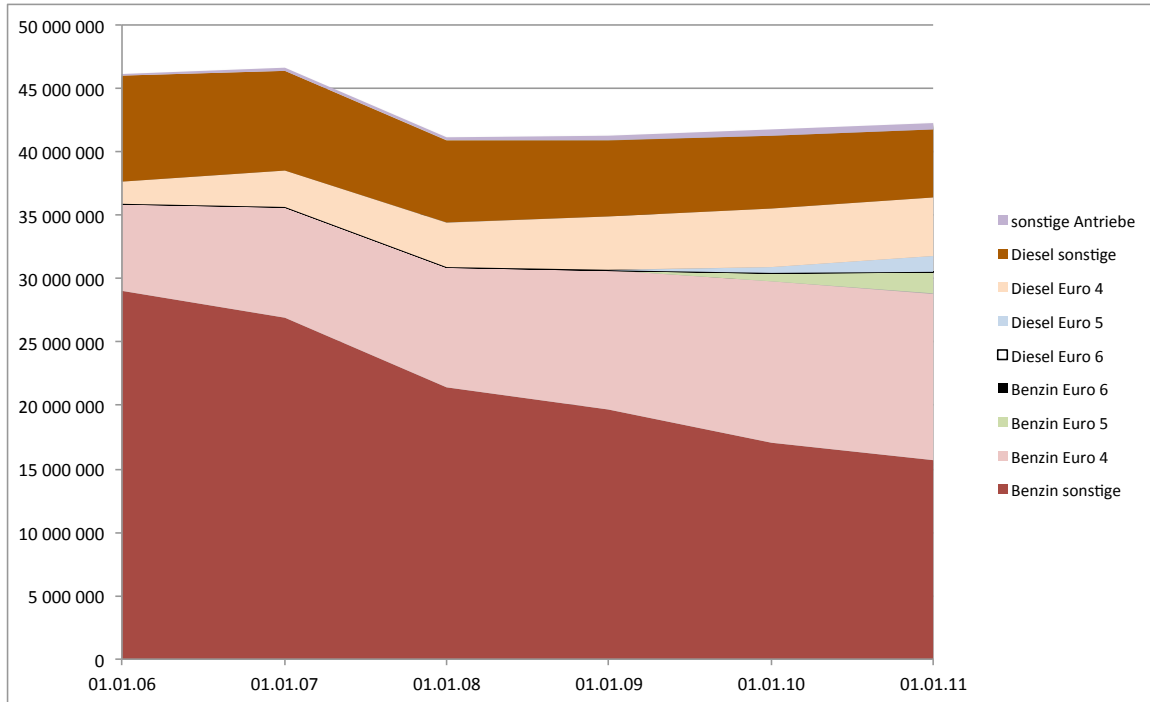
**Abbildung 4** Verteilung der Neuzulassungen der PKW nach Antrieb und ausgewählten Emissionsklassen

Quelle: eigene Darstellung auf Grundlage von Daten des KBA; ab 2005: KBA (2011b, Tabelle 2); davor: KBA (o.J.).

### Entwicklung im PKW-Bestand

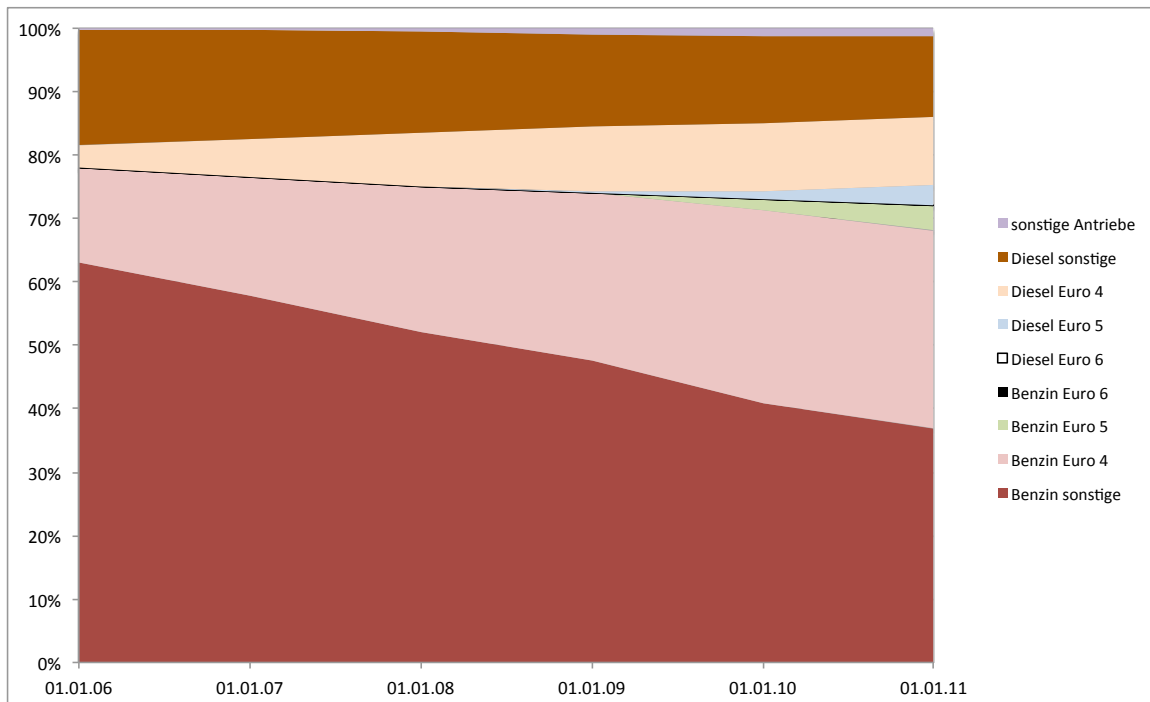
Hinsichtlich der Entwicklung im gesamten Fahrzeugbestand wirken sich die Veränderungen bei den Neuzulassungen naturgemäß in einer zeitlich deutlich gestreckten Form aus (entsprechend der lediglich schrittweisen Erneuerung des Fahrzeugparks mit einer Jahresrate um die acht Prozent). Die in der nachfolgenden *Abbildung 5* dargestellte Entwicklung bei den absoluten Zahlen ist allerdings durch ein statistisches Artefakt gekennzeichnet: Tatsächlich gab es im Jahr 2007 keine bedeutsame Reduktion der PKW-Flotte, vielmehr wurde die Berichterstattung ab 01.01.2008 auf die tatsächlich im Verkehr befindlichen Fahrzeuge beschränkt, ohne die früher einbezogenen lediglich vorübergehend abgemeldeten Fahrzeuge. Entsprechend zeigt auch die nachfolgende *Abbildung 6* der Verteilung nach Emissionsklassen nahezu lineare Übergänge auf die fortgeschriebenen, anspruchsvolleren Emissionsklassen. Deutlich wird jedoch, wie beträchtlich der Zeitverzug zwischen der Einführung neuer Emissionsnormen bei den Neuzulassungen und der Dominanz dieser Standards im Bestand ist. Umgekehrt ist daraus aber auch abzuleiten, dass auch in Zukunft noch bedeutende Veränderungen durch die schrittweise Ausschleifung der Fahrzeuge mit Emissionsstandards schlechter als EURO 4 und den Übergang auf zunehmende Flottenanteile zu erwarten sind, die den Standards EURO 5 und EURO 6 genügen.

**Abbildung 5 Bestand an PKW nach Antrieb und ausgewählten Emissionsklassen**



Quelle: eigene Darstellung auf Grundlage von Daten des KBA (2011b, Tabelle 2).

**Abbildung 6 Verteilung des Bestands an PKW nach Antrieb und ausgewählten Emissionsklassen**



Quelle: eigene Darstellung auf Grundlage von Daten des KBA (2011b, Tabelle 2).

### Entwicklung nach Schadstofffraktionen

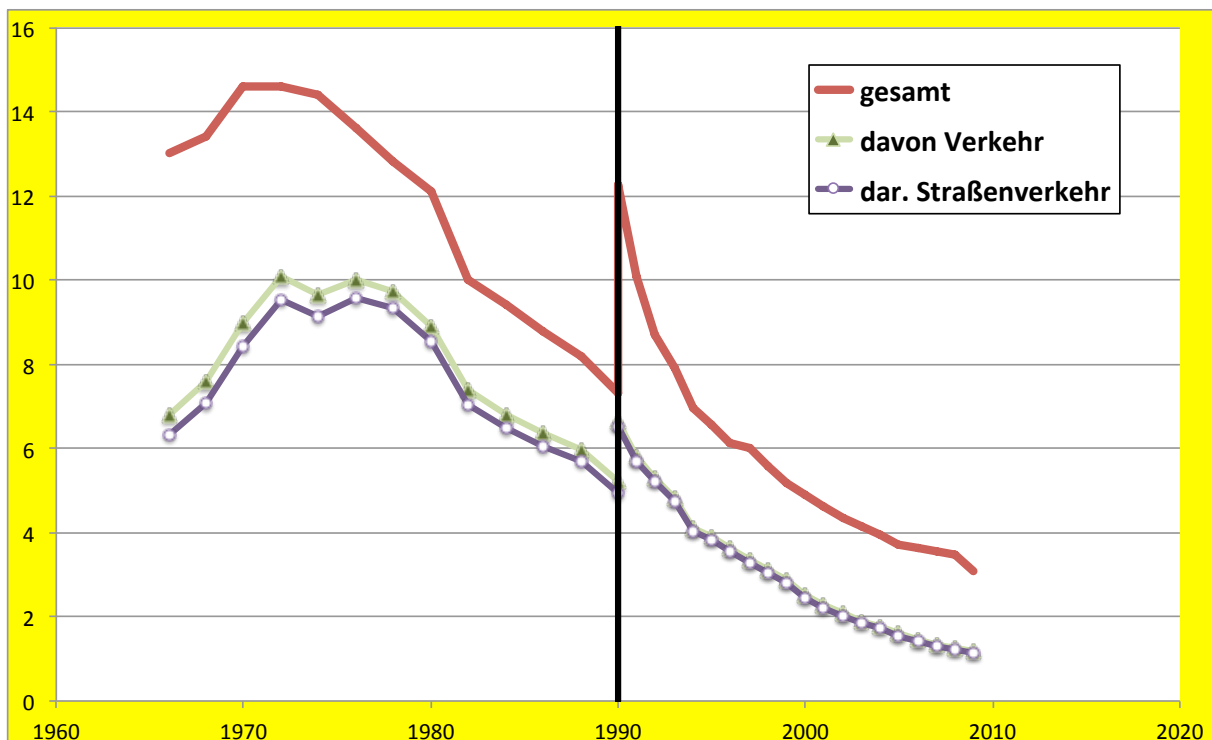
Die Entwicklung der Emissionen in den hier maßgeblichen Schadstofffraktionen wird in den nachfolgenden Abbildungen auf der Grundlage von Daten des Umweltbundesamtes beschrieben (insb. UBA 2011a), für das frühere Bundesgebiet bis 1990 und ab 1990 für Deutschland.

#### Kohlenmonoxid (CO),

Bei Kohlenmonoxid (CO), *Abbildung 7*, zeigt sich ein Maximum in den 1970er Jahren des letzten Jahrhunderts, bei damals – und noch längere Zeit danach – dominanter Beteiligung des Verkehrs, sehr weitgehend des Straßenverkehrs. Nach der zwischenzeitlichen (durch die Veränderung des Gebietsstands bedingten) Unterbrechung wurde der deutliche Minde- rungstrend wieder aufgenommen, der maßgeblich durch den Straßenverkehr getrieben wurde. Mittlerweile sind die Emissionen aus dem Straßenverkehr um etwa 90 Prozent vermin- dert worden; der Straßenverkehr macht damit aktuell nur mehr etwa ein Drittel der Emis- sionen aus, da sich die Emissionen aus anderen Quellen nur vergleichsweise unwesentlich verändert haben.

Bei einer Fortsetzung der bisherigen degressiven Entwicklung sollten die straßenverkehrs- bedingten CO-Emissionen künftig keine ernsthaften Probleme verursachen.

Abbildung 7 CO-Emissionen in Deutschland in Mio. t



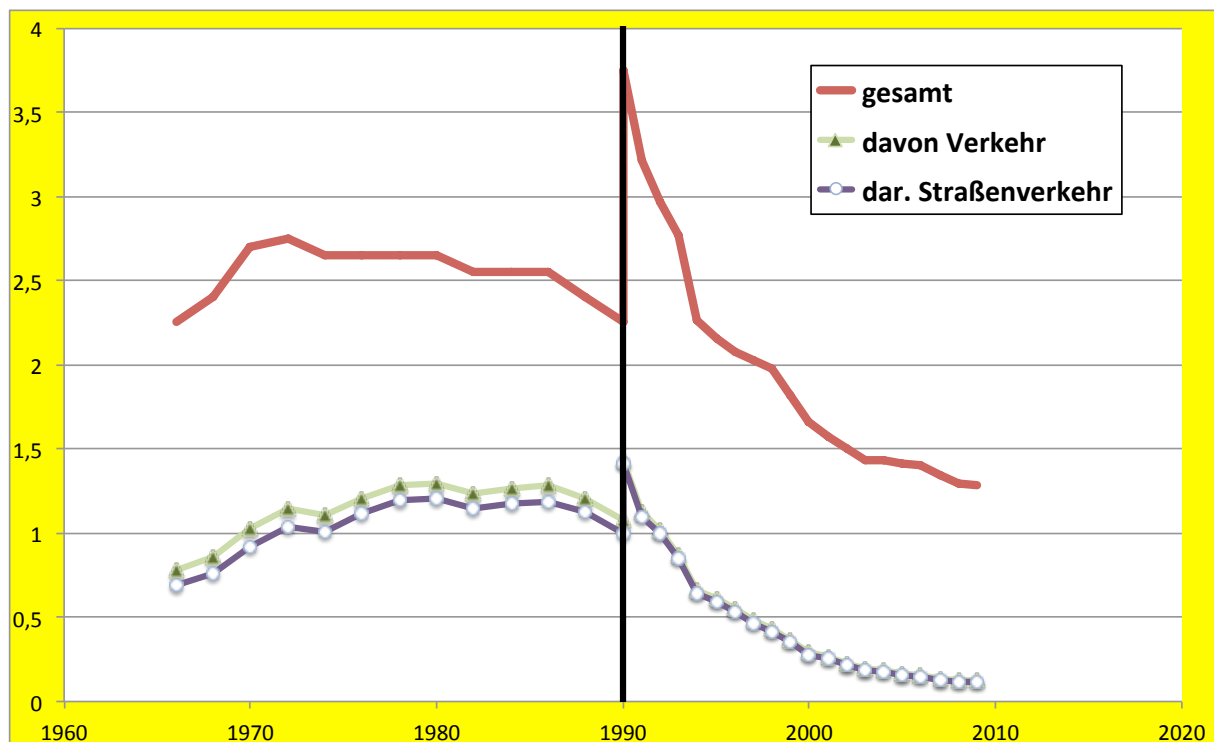
Quelle: eigene Darstellung auf Grundlage von Daten des Umweltbundesamtes (2011a).

### Flüchtige Kohlenwasserstoffe (NMVOC, non methane volatile organic compounds)

Bei den (flüchtigen) Kohlenwasserstoffen, *Abbildung 8*, zeigt sich im Ergebnis ein ähnliches Bild: Nach einem breiteren Maximum, das sich bis in die 1980er Jahre hinzog, bei etwa hälftiger Beteiligung des Straßenverkehrs, wurde eine Reduktionstendenz eingeleitet. Nach der analogen zwischenzeitlichen deutlichen Ausweitung im Rahmen der Einbeziehung der ehemaligen DDR erfolgte insbesondere im Straßenverkehr eine deutliche Abnahme. Die Emissionsmengen wurden auf ein sehr geringes, im Vergleich zu anderen Emittenten weitgehend bedeutungsloses Niveau heruntergeführt.

Bei einer Fortsetzung der bisherigen degressiven Entwicklung sollten auch die straßenverkehrsbedingten Kohlenwasserstoff-Emissionen künftig keine ernsthaften Probleme verursachen.

**Abbildung 8 HC (NMVOC) – Emissionen in Deutschland in Mio. t**



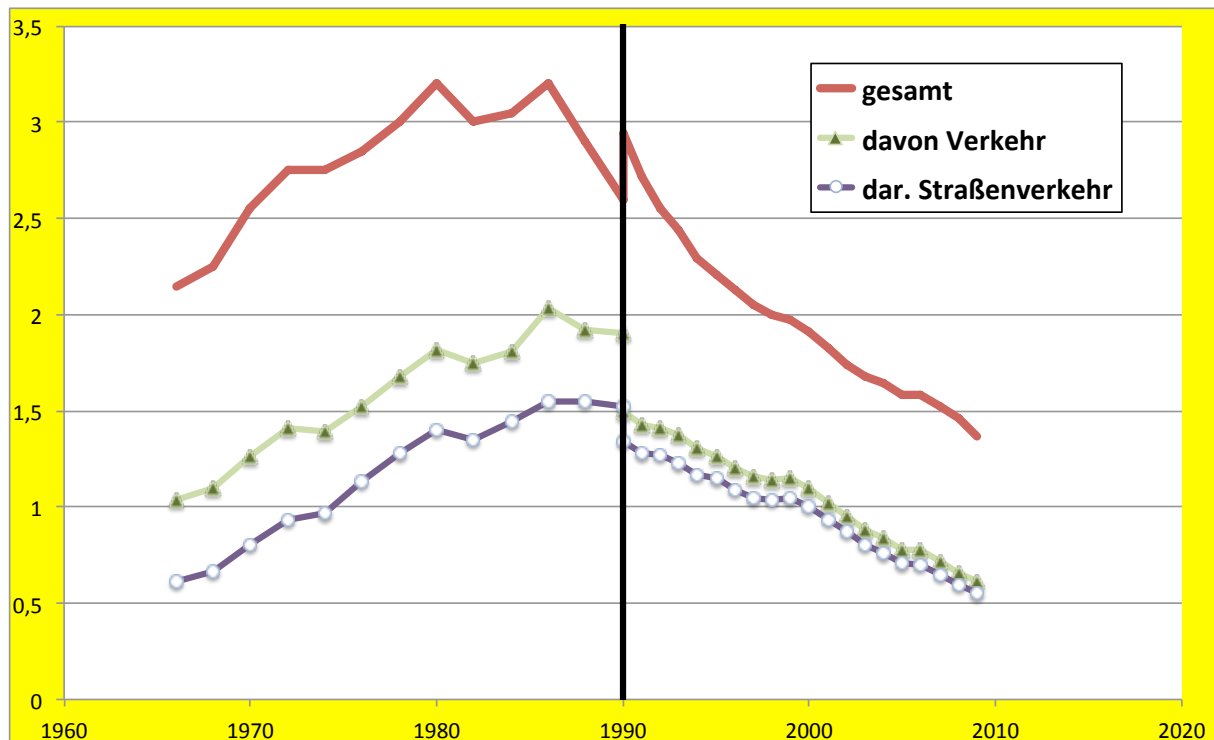
Quelle: eigene Darstellung auf Grundlage der Daten von: Umweltbundesamt (2011a); bis 1990(1) früheres Bundesgebiet, Daten des Umweltbundesamtes nach DIW, Verkehr in Zahlen (verschiedene Ausgaben).

### Stickoxide (NO<sub>x</sub>)

Bei den Stickoxiden, *Abbildung 9*, stellt sich die Entwicklung nicht ganz so günstig dar. Dort hat die Abnahme der verkehrsbedingten Emissionen erst etwa 1990 eingesetzt; sie beträgt mittlerweile rd. 60 Prozent, womit der Verkehr – weitgehend der Straßenverkehr – aber immer noch zu rd. 40 Prozent an den gesamten Emissionen beteiligt ist. Wie die nachfolgende *Tabelle 3* zeigt, sind daran allerdings die PKW nach einer Absenkung um drei Viertel zwischen 1990 und 2009 nur mehr zu knapp 40 Prozent beteiligt, sie machen also rd. 15 Prozent der aktuell verbliebenen NO<sub>x</sub>-Emissionen aus. Weitere rd. 2 Prozent der Gesamtemissi-

onen entfallen auf die leichten Nutzfahrzeuge, deren Emissionen erst nach 2005 abgesenkt werden konnten.

**Abbildung 9** NO<sub>x</sub>-Emissionen in Deutschland (als NO<sub>2</sub>) in Mio. t



Quelle: eigene Darstellung auf Grundlage der Daten von: Umweltbundesamt (2011a); bis 1990(1) früheres Bundesgebiet, Daten des Umweltbundesamtes nach DIW, Verkehr in Zahlen (verschiedene Ausgaben).

**Tabelle 4** Stickoxid-Emissionen aus dem Straßenverkehr, Gg NO<sub>2</sub>

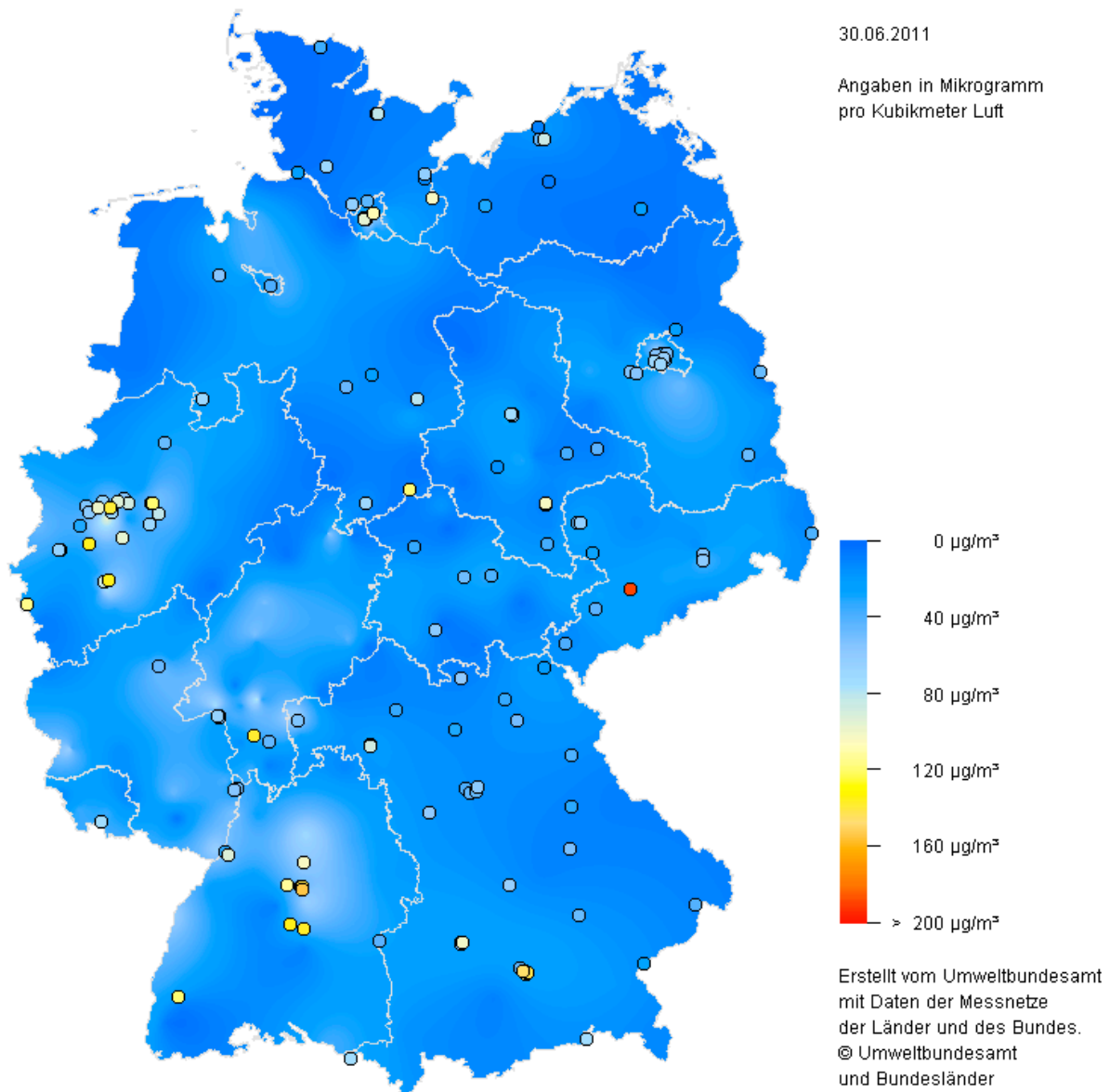
	1990	1995	2000	2005	2009
1 A 3 b i Passagierfahrzeuge	820,25	507,65	292,75	230,88	206,65
1 A 3 b ii Leichte Nutzfahrzeuge	29,27	30,77	36,62	38,70	34,12
1 A 3 b iii Schwere Nutzfahrzeuge	489,58	605,45	671,35	434,14	310,65
1 A 3 b iv Motorisierte Zweiräder	2,34	2,69	3,31	3,31	2,78

Quelle: eigene Zusammenstellung auf Grundlage von Wirtschaftskommissionen für Europa der vereinten Nationen [UNECE] (2011).

Während die Emissionsentwicklung damit auf gutem Wege ist, stellt sich die Immissionsentwicklung noch unbefriedigend dar. Hierfür beträgt der europaweit einheitliche 1-Stunden-Grenzwert  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , der nicht öfter als 18mal im Kalenderjahr überschritten werden darf. Der Grenzwert für das Jahresmittel beträgt  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Aktuelle Kartogramme des Umweltbundesamtes zu den maximalen Stundenwerten eines Werktags und zum Stundenwert der morgendlichen Verkehrsspitze eines Werktags werden nachfolgend dargestellt (siehe *Abbildung 10* und *Abbildung 11*). Sie bestätigen, dass großflächig keine Probleme bestehen, dass aber kleinräumige Verbesserungen erforderlich sind.

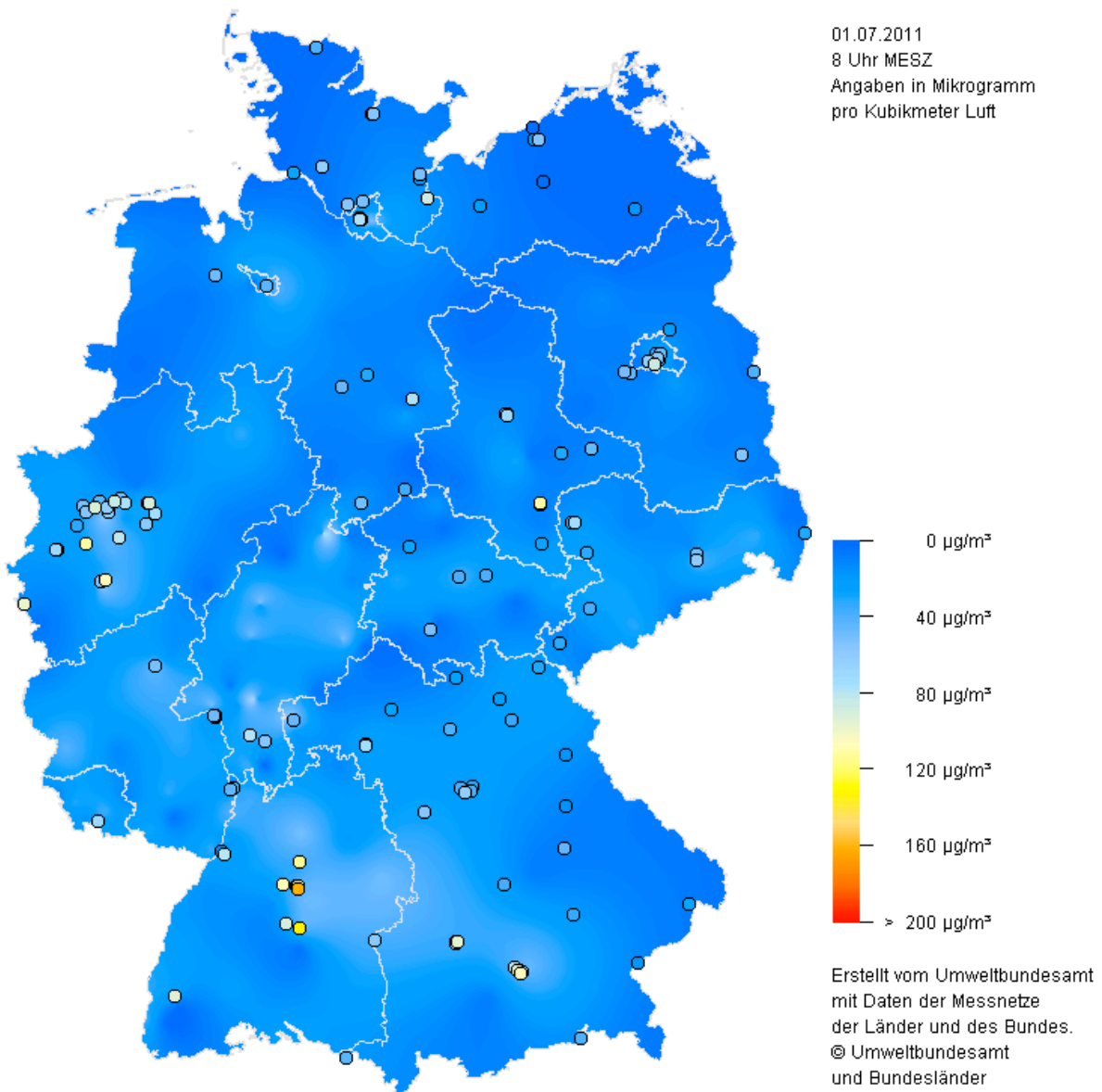
Abbildung 10

## Maximale Stundenmittelwerte der Stickstoffdioxidkonzentration



Die vom Umweltbundesamt zusammengestellten Karten und Daten zur aktuellen Immissionssituation dienen der orientierenden Information der Bevölkerung. Auf Grund der weiträumigen Betrachtung ist eine kleinräumige Interpretation nicht zulässig.

Quelle: UBA (2011c).

**Abbildung 11****Stundenmittelwerte der Stickstoffdioxidkonzentration**

Die vom Umweltbundesamt zusammengestellten Karten und Daten zur aktuellen Immissionssituation dienen der orientierenden Information der Bevölkerung. Auf Grund der weiträumigen Betrachtung ist eine kleinräumige Interpretation nicht zulässig.

Quelle: UBA (2011b).

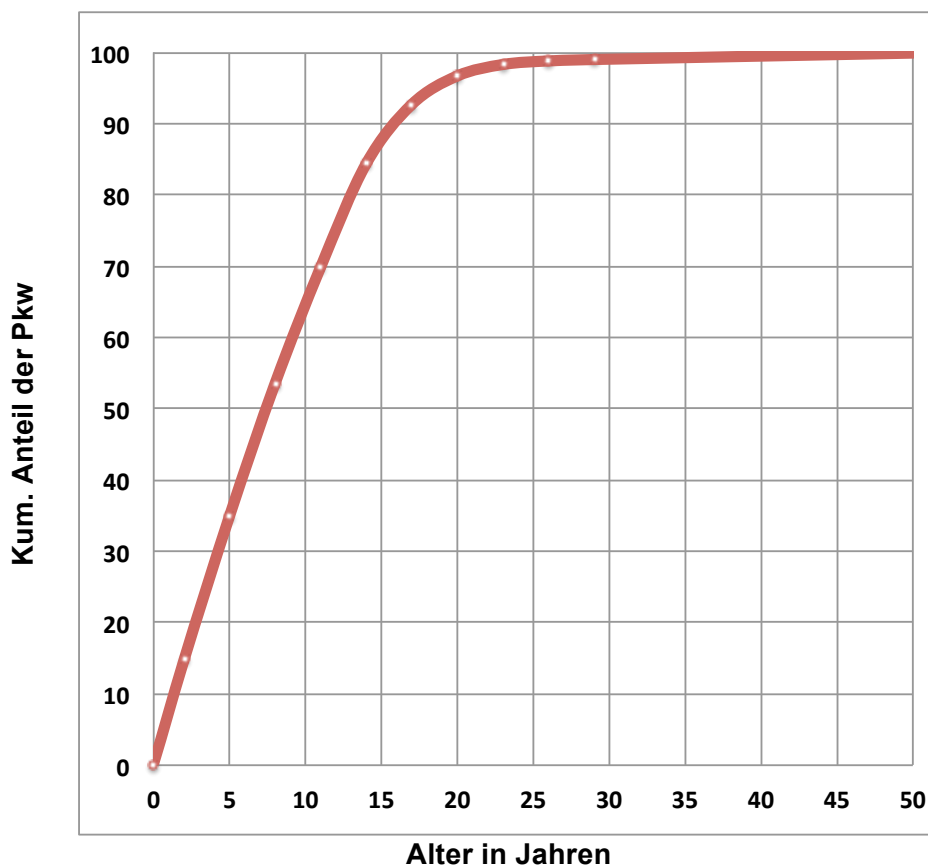
Wie der LAI-Bericht von Sept. 2010 (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionschutz 2010, S. 5) feststellt, wurden im Jahr 2009 an verkehrsnahen Messstationen, und ausschließlich dort, mehrheitlich die gültigen Jahresgrenzwerte übertreten; an einigen dieser Stationen wurde auch der Kurzzeit-Grenzwert an mehr als 18 Stunden überschritten. Als ursächlich kann dabei eindeutig der Kfz-Verkehr identifiziert werden, der den überwiegenden Teil zu diesen Belastungen beiträgt. Dabei liegen die Emissionsfaktoren für dichten und teils gestörten städtischen Verkehr höher, als es nach den Absenkungen in den zulassungsbezogenen Normwerten (EURO 3, EURO 4, EURO 5) zu erwarten gewesen wäre. Die aktuelle Ausgabe des Handbuchs für Emissionsfaktoren (European Research Group of Mobile Emission Sources [ERMES] 2010) berücksichtigt die neuen Erkenntnisse, damit führen auch die



Modellierungen von Zukunftszuständen zu teils unbefriedigenden Ergebnissen. Allerdings ist die empirische Basis für die Fahrzeuge der Emissionsstufe EURO 5 noch nicht aussagekräftig und fehlt für die Stufe EURO 6.

Abgesehen von der Wirkung der künftig verschärften Grenzwerte im tatsächlichen (insbesondere im gestörten) Verkehrsablauf ist hinsichtlich der weiteren Entwicklung maßgeblich danach zu fragen, wie sich die deutlich verschärften Grenzwerte der Standards EURO 5 und EURO 6 im Fahrzeugbestand durchsetzen. Da sich auf reifen Märkten wie Deutschland die Altersstruktur der PKW-Flotte nur wenig ändert, kann dabei der aktuelle Altersaufbau auch als Indikator für die künftige Entwicklung herangezogen werden. Dieser wird in der nachfolgenden *Abbildung 12* dargestellt.

**Abbildung 12 Altersstruktur der PKW-Flotte, 01.01.2011: kumulierte Verteilung in % über dem Alter in Jahren**



Quelle: nach KBA (2011d).

Zum Jahresende 2020 kann danach bei Übertragung der aktuellen Altersstruktur unterstellt werden, dass etwa 35 Prozent der PKW-Flotte 5 Jahre und jünger sind, somit aus den Zulassungsjahren 2016-2020 stammt. Für diese Fahrzeuge kann praktisch eine Einhaltung der Emissionslimits nach der Grenzwertstufe EURO 6 angenommen werden; zusammen mit den EURO 6-Fahrzeugen der Zulassungsjahre 2015 und davor ist anzusetzen, dass etwa 40 Prozent der Flotte zum Ende 2020 EURO 6 erfüllen. Weitere 35 Prozent der Flotte können erwartungsgemäß den sechs Zulassungsjahrgängen 2010-2015 zugeordnet werden, für die sehr weitgehend die Einhaltung von EURO 5 anzunehmen ist, soweit nicht darüber hinausgehend EURO 6 eingehalten wird. Praktisch kann man demnach etwa 30 Prozent der Flotte um Jahresende 2020 als EURO 5-Fahrzeuge ansetzen. Für die verbleibenden 30 Prozent der Flotte aus den Jahren 2009 und davor ist eine deutlich überwiegende Einstufung nach

EURO 4 anzunehmen, zumal ab 2006 90 Prozent und mehr der Neuzulassungen zumindest EURO 4 eingehalten haben. In einer einfachen Abschätzung könnte man dementsprechend 20 Prozent der Flotte zum Jahresende 2020 der Emissionsstufe EURO 4 zurechnen und die restlichen 10 Prozent zu den sonstigen Emissionsklassen.

Mit dieser Entwicklung sind bedeutende weitere Abnahmen der  $\text{NO}_x$ -Emissionen zu erwarten, auch an den kritischen Belastungsschwerpunkten an städtischen Hauptverkehrsstraßen, wengleich die konkreten quantitativen Minderungen an vorliegender Stelle nicht modelliert werden können. Exemplarisch werden jedoch Angaben und Modellrechnungen zur Messstelle Gladbecker Straße in Essen aus dem LAI-Bericht von Sept. 2010 (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz, S. 13f.) berichtet: An der Messstelle verkehren täglich 41.000 Kfz, davon 5 Prozent Nutzfahrzeuge über 3,5 t, aber keine Busse; die Messstelle zählt zu den Belastungsschwerpunkten im Ruhrgebiet mit einem  $\text{NO}_2$ -Jahreswert von  $56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , davon  $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$  Hintergrundbelastung. Die örtliche verkehrsbedingte Immissionslast kann demnach als Differenz mit  $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$  abgeleitet werden; der Grenzwert von  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  wird somit allein durch die Hintergrundbelastung zu 85 Prozent sowie allein durch die verkehrsbedingte Belastung zu 55 Prozent ausgeschöpft, mithin insgesamt um 40 Prozent überschritten. Für diese Station wurden die  $\text{NO}_2$ -Minderungen folgender verkehrsbezogener Szenarien bestimmt:

- „grüne“ Umweltzone (nur noch grün plakettierte Fahrzeuge dürfen fahren) -  $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- Sperrung der Straße für Nutzfahrzeuge > 3,5 Tonnen -  $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- „grüne“ Umweltzone und Sperrung für Nutzfahrzeuge > 3,5 Tonnen -  $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- Szenario: alle Diesel-Pkw werden durch Otto-Pkw Euro 4 ersetzt -  $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- Szenario: alle Kfz haben den Emissionsstandard Euro 6/VI -  $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Abzuleiten ist daraus, dass der Schwerverkehr bei einem Verkehrsanteil von 5 Prozent an den verkehrsbedingten Immissionslasten mit etwa 40 Prozent beteiligt ist. Von den betrachteten Szenarien könnte allein ein vollständiger Übergang auf EURO 6 (im Schwerverkehr auf EURO VI) das Gesamtergebnis unter den zulässigen Grenzwert bringen und die verkehrsbedingten Lasten um mehr als drei Viertel absenken. Die relative Absenkung dürfte bei PKW ähnlich hoch sein wie beim Schwerverkehr. Für die oben skizzierte denkbare Zusammensetzung der PKW-Flotte im Jahr 2020 kann abgeschätzt werden, dass etwa die Hälfte des Effekts durch einen vollständigen Übergang auf EURO 6 erreicht würde, möglicherweise auch etwas mehr. Gewisse Unsicherheiten ergeben sich allerdings daraus, dass gegenwärtig noch keine gesicherten nach Verkehrssituation differenzierten Emissionsfaktoren für die EURO 5- und EURO 6-Fahrzeuge vorliegen.

### **Entlastungsbeitrag der Elektro-Fahrzeuge**

Der grundsätzliche Vorteil von örtlich emissionslosen Elektrofahrzeugen liegt auf der Hand. Quantitativ allerdings handelt es sich um einen bescheidenen Vorteil:

- Bereits jetzt sind die Emissionswerte herkömmlicher PKW bei den zugrunde gelegten Schadgasfraktionen  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$  und  $\text{HC}$  soweit abgesenkt, dass im Vergleich zu früheren Zeitpunkten nur mehr von Restgrößen gesprochen werden kann. Die zunächst sehr geringe Anzahl von Elektro-PKW, die im Einzelfall die geringen durch keine Emissionen ersetzen, sind zwar positiv, können insgesamt jedoch nicht zu einer relevanten Änderung der Luftqualität führen.
- Speziell bei Stickoxiden ist allerdings die örtliche Luftqualität an verkehrsbedingten Belastungsschwerpunkten noch immer vielfach deutlich verbesserungsbedürftig.

- Im weiteren Verlauf, bei zunehmender Anzahl von Elektro-PKW und zugleich weiter sinkenden Emissionswerten der herkömmlich angetriebenen PKW ist bei CO und HC ebenfalls in der Regel nicht von einem bedeutenden Einfluss der Elektro-PKW auszugehen, da es sich in jedem Fall um weitgehend unbedeutende Belastungen handelt.
- Bei den Stickoxiden sind zusätzliche Entlastungen durch den Übergang auf Elektro-PKW zwar wünschenswert, bleiben aber voraussichtlich auf absehbare Zeit im Vergleich zum Übergang auf die anspruchsvolleren Emissionsstandards bei herkömmlichen Fahrzeugen wenig relevant.

### 3. Partikel

#### ***Kritische Reflexion zur verwendeten Metrik***

Auch bei Partikeln („Feinstaub“) sind die Emissions- und die Immissionsbetrachtung zu unterscheiden; auch in diesem Feld haben wir es mit messtechnischen, berechnungs- und bewertungsseitigen Problemen zu tun.

Als ein zentral maßgeblicher Parameter werden die Anzahl und die Größe der Partikel eingeschätzt (WHO, 2006). Die Größe wird normiert durch den aerodynamischen Durchmesser angegeben. Dieser normiert nach der Sinkgeschwindigkeit einer Kugel mit der Dichte von  $1 \text{ g/cm}^3$ . Mit der Angabe der so definierten Größe der Partikel ist somit auch eine Orientierung über die Form und die Masse der einzelnen Partikel und deren zeitliches Verhalten inkludiert. Generell wird die biokritische Wirkung umso höher eingeschätzt, je geringer der aerodynamische Durchmesser ist: Je kleiner die Partikel, desto weniger Wirkung entfalten die natürlichen biologischen Barrieren. Gemessen wird hingegen in aller Regel die Gesamtmasse aller Partikel, die z.B. auf einem definierten Filterpapier nach Beaufschlagung mit einem definierten Durchsatzvolumen an Umgebungsatmosphäre gesammelt wird (Wartig Chemieberatung, o.J.).

Hätten die einzelnen Partikel eine einigermaßen gleiche Größe, könnte aus der Massenentwicklung die Anzahl abgeleitet werden. Tatsächlich jedoch streuen die aerodynamischen Durchmesser der Einzelpartikel insgesamt um etwa fünf Größenordnungen; dies bedeutet hinsichtlich der Massen und Volumina der einzelnen Partikel eine Bandbreite von etwa 15 Größenordnungen. Als maßgeblich kann ein Bereich mit einer linearen Bandbreite von etwa drei Größenordnungen angesehen werden, entsprechend volumen- und massebezogen bis etwa neun Größenordnungen. Damit streuen die Partikel in einem Größenverhältnis, wie es sich etwa zwischen einer Erdnuss und einem Einfamilienhaus darstellt. Stünden die Anteile der Partikelgrößen in einem konstanten Verhältnis wie etwa in chemischen Verbindungen die Anteile der einzelnen Elemente, könnte man aus der Gesamtmasse auf die einzelnen Teile schließen; tatsächlich aber ist auch die Zusammensetzung der gesamten Partikelmenge örtlich und zeitlich sehr variabel.

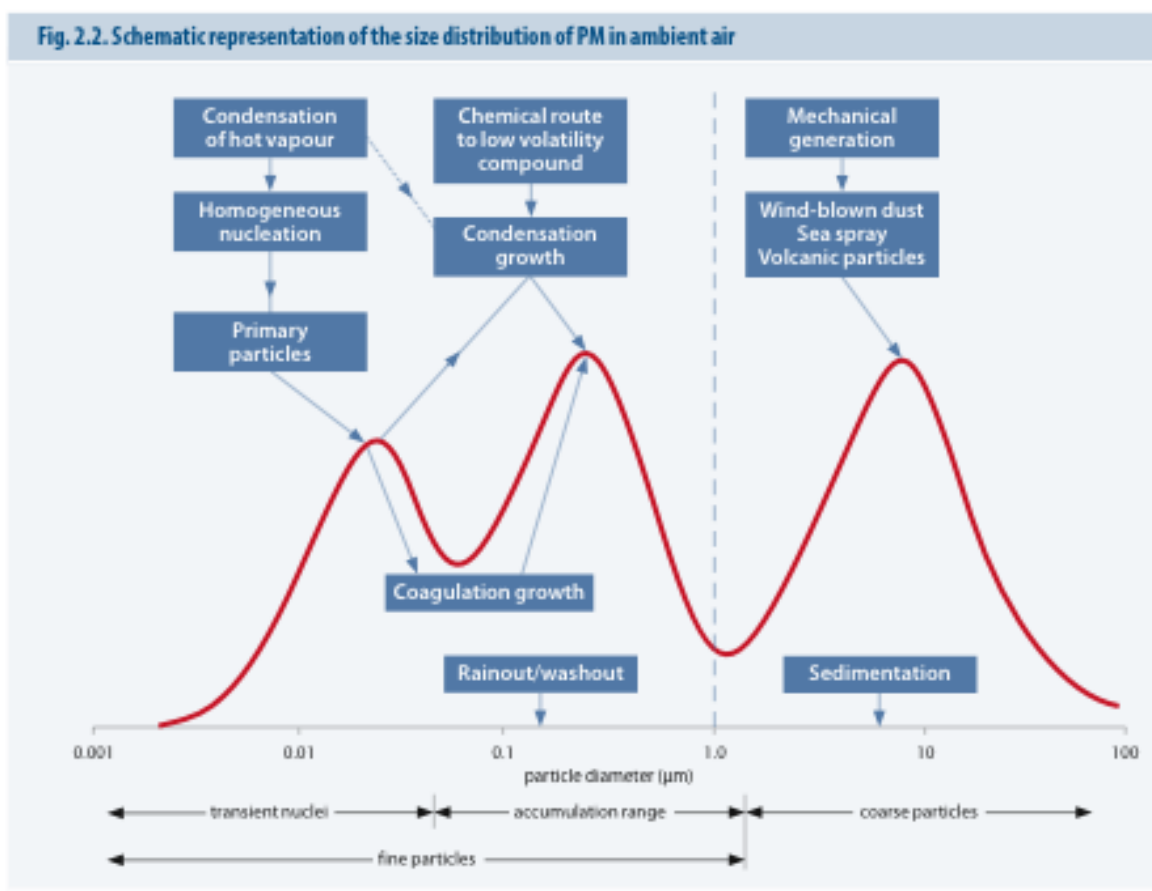
Ganz offenbar ist es höchst problematisch, die Gesamtmasse einer variablen Mischung derart ungleicher Teile als Indikator heranzuziehen, wenn die kleineren/leichteren Teilchen als die maßgeblichen anzusehen sind.

Eine genauere Analyse ergibt eine im Wesentlichen trimodale Größenverteilung, wobei die einzelnen Fraktionen je nach gewähltem Parameter eine unterschiedlich bedeutende Rolle spielen – die konkreten Verhältnisse sind selbstverständlich örtlich und zeitlich unterschied-

lich, vgl. auch die nachfolgende *Abbildung 13* (man beachte die fehlende Bezeichnung der Vertikalachse):

- Fraktion kleinerer Partikel (um etwa  $0,01\ \mu\text{m}$ ): dominiert deutlich die Anzahl der Partikel, nachrangige Bedeutung bei der gesamten Partikeloberfläche, bedeutungslos bei Gesamtvolumen und -masse der Partikel;
- Fraktion mittelgroßer Partikel (um etwa  $0,25\ \mu\text{m}$ ): nachrangig an der Anzahl, dominant bei der Partikeloberfläche und knapp zur Hälfte am Partikelvolumen beteiligt;
- Fraktion größerer Partikel (um etwa  $7\ \mu\text{m}$ ): zahlenmäßig vergleichsweise unbedeutend, aber gut zur Hälfte an Volumen (und Masse) beteiligt.

**Abbildung 13 Schematische Darstellung der Größenverteilung der Partikel in der Umgebungsluft**



Quelle: WHO (2006, p. 7).

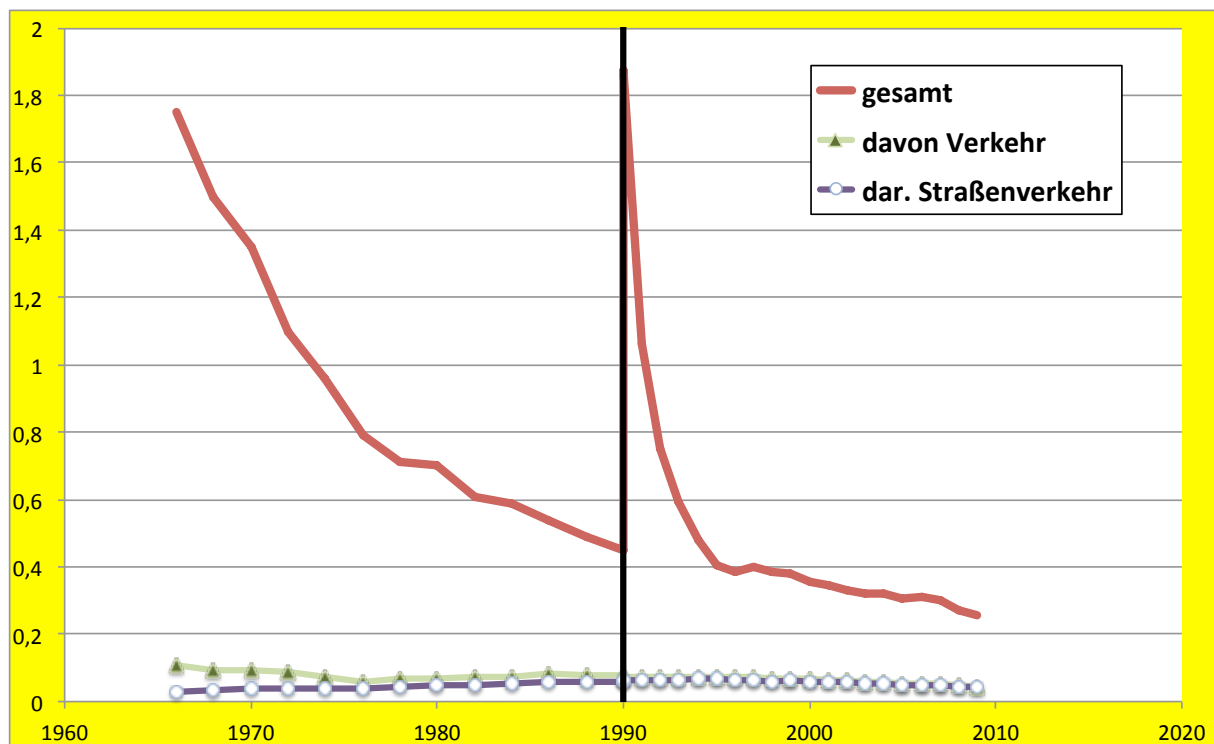
Zu der das Verwaltungshandeln in diesem Bereich bestimmenden Metrik einer schlichten Massenbetrachtung (spezifisch je km bei der Emission aus Fahrzeugen bzw. spezifisch je Kubikmeter bei der Immission) ließen sich weitere kritische Überlegungen anstellen. So ist da Absehen von der Inhaltsanalyse der Partikel (chemisch, physikalisch, toxikologisch) unter Verweis auf den messtechnischen und analytischen Aufwand zwar schon verständlich, zugleich jedoch vor dem Hintergrund der erforderlichen Aussagekraft der Messdaten keineswegs überzeugend.

An vorliegender Stelle kann allerdings dieser Diskurs nicht weiter vertieft werden, vielmehr ist an die bestehenden Regelansätze anzuschließen, allerdings nicht ohne die möglichen fundamentalen Vorbehalte angesprochen zu haben. Ohne auf die messtechnischen Konventionen und Probleme im Detail einzugehen sei freilich daran erinnert, dass nach der traditionellen Betrachtung der gesamten Staubmengen mittlerweile der Fokus und die Regulierungsansätze auf bestimmte obere Abschneidegrenzen der Korngrößen gerichtet sind. In Europa ist dies herkömmlich PM(10) mit einer Korngröße bis 10 µm, sowie zunehmend – wie in den USA – PM(2,5) mit einer Korngröße bis 2,5 µm.

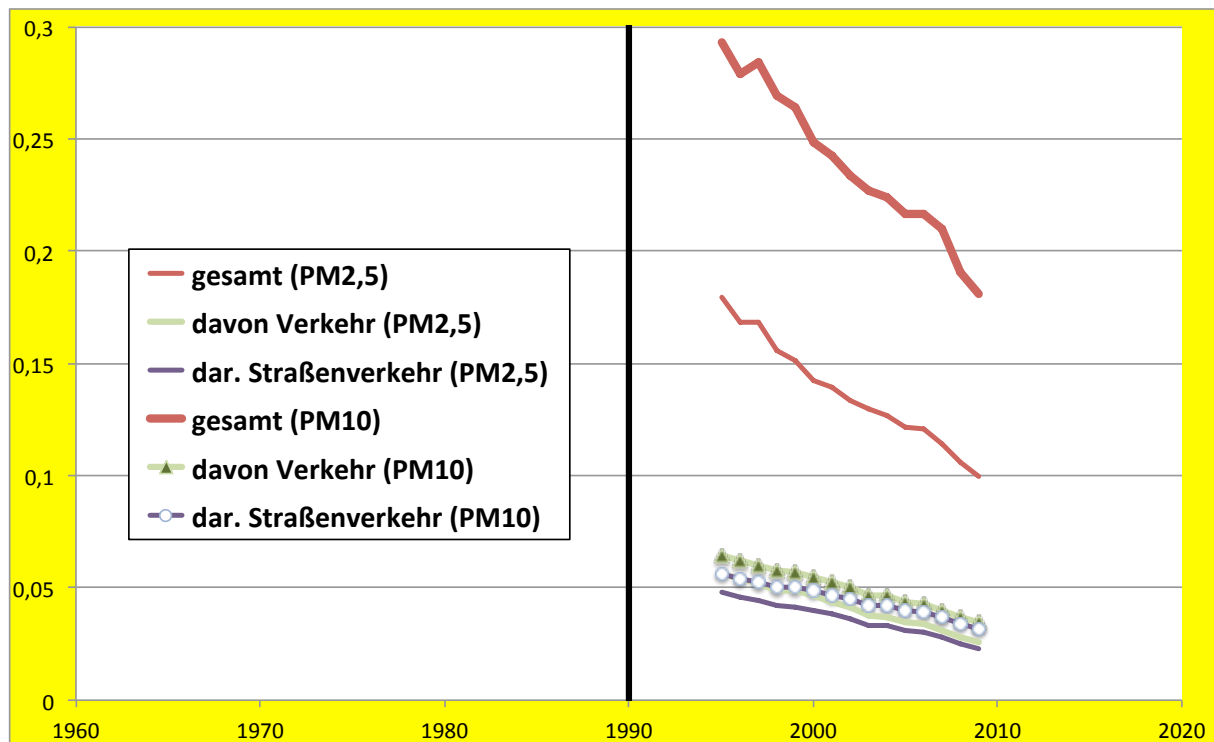
### **Entwicklung der Gesamtbelastung**

In der Gesamtbetrachtung in *Abbildung 14* werden, wieder nach Angaben des Umweltbundesamtes (UBA, 2011a), die Emissionsabsenkungen in der Vergangenheit erkennbar. Bei Gesamtstaub fällt der vereinigungsbedingte Sprung im Jahr 1990 auf, der insbesondere durch die Kraftwerks- und Beheizungsstruktur der ehemaligen DDR bedingt ist; mittlerweile konnte der für das frühere Bundesgebiet zu beobachtende Absenkungspfad für Gesamtdeutschland wieder aufgenommen werden.

**Abbildung 14 Gesamtstaub-Emission in Mio. t**



Quelle: eigene Darstellung auf Grundlage von UBA (2011a).

**Abbildung 15 PM(10) und PM(2,5) in Mio. t**

Quelle: eigene Darstellung auf Grundlage von UBA (2011a).

Für die in *Abbildung 15* dargestellten Teilmengen der inzwischen vorzugsweise betrachteten kleineren Korngrößen PM(10) und PM(2,5) liegen erst ab 1995 Daten vor; auch hier bestätigt sich der bislang weitgehend lineare Abnahmetrend. Der genauer zu betrachtende Straßenverkehr macht aktuell (2009) bei PM(10) etwa ein Sechstel aus, bei PM(2,5) ein knappes Viertel.

### **Feinstaubbelastung aus dem Straßenverkehr**

Der Straßenverkehr trägt über verschiedene Pfade zur Feinstaubbelastung bei. Zu nennen sind insbesondere:

- Primäremissionen aus dem Verbrennungsprozess der Verbrennungskraftmaschinen,
- Primäremissionen aus dem Abrieb von Reibbelägen (Bremsen, Kupplung),
- Primäremissionen aus dem Abrieb von Reifen und Straßenoberfläche, sowie
- Sekundäremissionen durch Aufwirbelung bereits sedimentierter Partikel.

Innerhalb des Straßenverkehrs sind die PKW – nach einer Abnahme um gut 60 Prozent seit 1995 – nur zu einem nachrangigen Anteil von etwa einem Achtel bei PM(10) bzw. einem knappen Fünftel bei PM(2,5) an den Feinstaubemissionen beteiligt, wie die nachfolgende Tabellierung der amtlichen Zahlen zeigt (*Tabelle 5*). Von den gesamten Feinstaubemissionen sind dies Anteilswerte im unteren einstelligen Prozentbereich.

**Tabelle 5 Primäre Partikelemissionen des Straßenverkehrs, Gg PM(10) und PM(2,5)**

Bereich	PM(10)				PM(2,5)				
	Jahr	1995	2000	2005	2009	1995	2000	2005	2009
1 A 3 b i Passagierfahrzeuge		10,85	8,76	7,78	3,97	10,85	8,76	7,78	3,97
1 A 3 b ii Leichte Nutzfahrzeuge		2,96	3,62	3,47	2,71	2,96	3,62	3,47	2,71
1 A 3 b iii Schwere Nutzfahrzeuge		24,89	17,43	9,68	5,80	24,89	17,43	9,68	5,80
1 A 3 b iv Motorisierte Zweiräder		NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE
1 A 3 b v Kraftstoffverbrennung		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1 A 3 b vi Reifen- und Bremsabrieb		11,03	12,03	12,27	12,38	5,95	6,49	6,62	6,68
1 A 3 b vii Straßenoberflächenabrieb		6,22	6,77	6,87	6,92	3,37	3,66	3,72	3,75

Summen 55,95 48,60 40,07 31,79 48,02 39,96 31,27 22,91

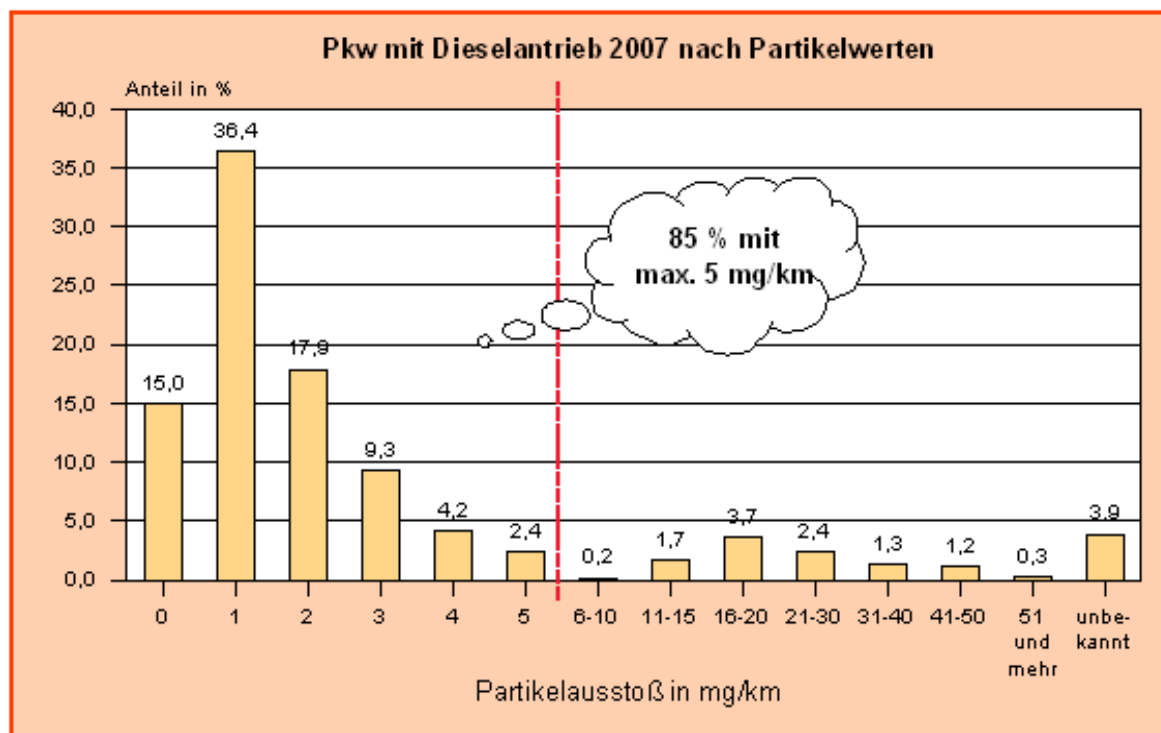
Quelle: eigene Zusammenstellung auf Grundlage von Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen [UNECE] (2006).

Hinsichtlich der adressierten verbrennungsbedingten Partikelemissionen von neuen Diesel-PKW ist die Entspannung auch gegenüber dem Stand von 2005f, zu dem das Thema hochrangig in der politischen Agenda vertreten war, weiter fortgeschritten. Wie oben im Zusammenhang mit den gesamten stofflichen Emissionen dargestellt, sind in den Emissionsregelungen nach EURO 1 bis EURO 6 auch zu den Partikelemissionen schrittweise abgesenkte Grenzwerte für neu typzugelassene und neu in Verkehr gebrachte PKW vorgesehen worden. Diese haben bei Diesel-PKW ausgehend von einem Wert von 180 mg/km in EURO 1 bis EURO 5 eine Absenkung auf 5 mg/km festgelegt. Dieser für Typprüfungen ab 01.01.2009 und für Neuzulassungen ab 01.01.2011 verbindliche Wert wurde auch davor schon zunehmend eingehalten, wie die *Abbildungen 16 und 17* des Kraftfahrtbundesamtes belegen. Bereits 2008 erfüllten etwa 90 % der neu zugelassenen PKW mit Dieselmotor den Grenzwert von 5 mg/km, wobei sich nahezu 80 % auf den Bereich bis 2 mg/km konzentrierten, mithin im Rang von bis zu rd. 1 % des seinerzeit nach EURO 1 noch zulässigen Werts.

Hinsichtlich der weiteren Entwicklung ist davon auszugehen, dass sich die PKW mit den niedrigen Emissionswerten im Flottenbestand weiter durchsetzen und in der Folge die Emissionsmengen auch weiterhin absinken.

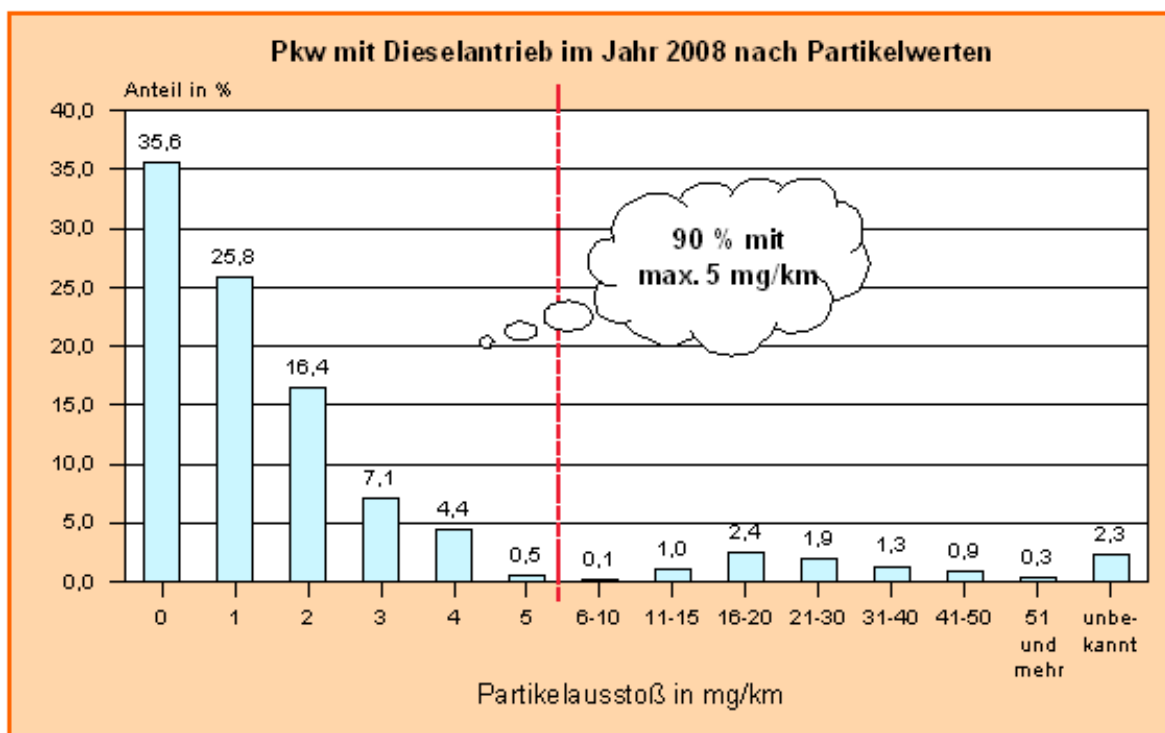


Abbildung 16 Pkw mit Dieselantrieb 2007 nach Partikelwerten



Quelle: KBA (2008).

Abbildung 17 Pkw mit Dieselantrieb 2008 nach Partikelwerten



Quelle: KBA (2008).

Die auf die verbrennungsbedingten Partikelemissionen von Diesel-PKW konzentrierten Ansätze konnten die immissionsseitige Problematik allerdings nicht unbedingt zufriedenstel-

lend lösen. Die Schwierigkeit, die immissionsseitigen Anforderungen zu erfüllen, zeigen sich beispielhaft deutlich in den südösterreichischen Städten Lienz und Klagenfurt, deren Durchgangsstraßen hohe Verkehrsbelastungen mit Schwerverkehr aufweisen.

### ***Entlastungsbeitrag der Elektro-Fahrzeuge***

Zweifelloos bieten Elektro-PKW aufgrund des Fehlens der örtlichen verbrennungsbedingten Partikelemissionen Vorteile, die allerdings im Lichte der vorstehenden Erörterung deutlich zu relativieren sind, was deren Zielbeitrag betrifft:

- Die verbrennungsbedingten Partikelemissionen sind auch bei herkömmlichen (Diesel-)PKW mittlerweile auf einen sehr stark reduzierten Wert zurückgeführt und können auch künftig als sinkend angenommen werden.
- Die höheren Partikelemissionen der Nutzfahrzeuge werden durch Elektro-PKW naturgemäß nicht adressiert.
- Die Beiträge der anderen Belastungspfade aus dem Straßenverkehr, namentlich die Emission durch Abriebe von Brems- und Kupplungsbelägen, wie auch von Reifen und Straßenoberflächen sowie die sekundäre Emission durch Aufwirbelung von bereits sedimentierten Partikeln, werden naturgemäß durch die Antriebsart nicht nennenswert modifiziert.

Dem stehen folgende Potentiale der Elektrifizierung von Antrieben gegenüber:

- Außerhalb des PKW-Bereichs kann allerdings insbesondere beim innerstädtischen öffentlichen Straßenverkehr eine örtlich begrenzt größere Relevanz angesetzt werden: An zentralen Bushaltestellen wie auch entlang von stark auch durch nicht motorisierte Verkehre geprägten intensiv genutzten Trassen sind die Entlastungen durch emissionsfreie Antriebe im Schwerverkehr hoch zu gewichten. Hier versprechen elektrische Antriebe bzw. elektrische Nutzungsphasen bei Hybridantrieb erhebliche Entlastungsbeiträge.
- Relativ bedeutendere Entlastungen verspricht eine Elektrifizierung auch bei den leichten Nutzfahrzeugen, soweit sie nicht unter das strenge Regime für PKW gebracht werden.

Grundsätzlich sind allerdings die oben angesprochenen Schwächen des Stands der Erkenntnisse hinsichtlich der Feinstaubbelastung und ihrer Folgen zu berücksichtigen, die deutliche Einschränkungen hinsichtlich der Zuverlässigkeit der Beurteilung zur Folge haben.

## Literatur

- Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz [LAI] (2010): Fortschreibung des Berichts zur Bewertung verkehrsbezogener Minderungsmaßnahmen. Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>)-Belastungen in der Bundesrepublik Deutschland. Sachstand - Ursachen - Minderungsmaßnahmen im Verkehrsbereich. Erarbeitet durch den LAI-Ausschuss „Luftqualität/Wirkungsfragen/Verkehr“. Stuttgart
- D'Angelico Acoustic Consult (2011a): Akustische Umweltaspekte der E-Mobilität. Bericht zum Projekt AUE-Mobility, gefördert durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung im Rahmen des Förderprogramms „Modellregionen Elektromobilität“. Berlin.
- D'Angelico Acoustic Consult (2011b): Presentation at the 6th WG QRTV Meeting , 17th – 19th May 2011, San Diego State University.
- Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V. [DIW Berlin]: Verkehr in Zahlen. Verschiedene Jahrgänge bis 1990. Berlin.
- Dudenhöffer, Kathrin; Hause, Lenoie (2011): Hörbare Vehikel. Experimente zur Geräuschwahrnehmung von Elektroautos durch Handicap-Gruppen. In: UNIKATE 2011, Nr. 39, S. 52-61.
- European Research Group on Mobile Emission Sources [ERMES] (2010): Handbuch für Emissionsfaktoren 3.1. Bern.
- Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH [IFEU] (2010): Fortschreibung und Erweiterung "Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030 (TREMODO, Version 5). Endbericht.
- Kraftfahrt Bundesamt [KBA] (o.J.): Statistische Mitteilungen des Kraftfahrt-Bundesamtes; Reihe 3. Verschiedene Ausgaben. Flensburg.
- Kraftfahrt Bundesamt [KBA] (2011a): Bestand an Kraftfahrzeugen nach Emissionen und Kraftstoffen. 1. Januar 2011. FZ 13. Excel-Tabelle. Flensburg.
- Kraftfahrt Bundesamt [KBA] (2011b): Neuzulassungen und Besitzumschreibungen von Kraftfahrzeugen nach Emissionen und Kraftstoffen. Jahr 2010. FZ 14. Excel-Tabelle. Flensburg.
- Kraftfahrt Bundesamt [KBA] (2011c): Neuzulassungsbarometer Personenkraftwagen im August 2011 nach ausgewählten Merkmalen (Teil 2). Flensburg. Online verfügbar unter: [http://www.KBA.de/cIn\\_031/nn\\_330190/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/MonatlicheNeuzulassungen/201108GV1monatlich/201108\\_\\_n\\_\\_barometer\\_\\_teil2\\_\\_tabelle.html](http://www.KBA.de/cIn_031/nn_330190/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/MonatlicheNeuzulassungen/201108GV1monatlich/201108__n__barometer__teil2__tabelle.html)
- Kraftfahrt Bundesamt [KBA] (2011d): Immer weniger Trabis, Statistische Mitteilungen des Kraftfahrt-Bundesamtes. Flensburg. Online verfügbar unter: [www.KBA.de/cIn\\_032/nn\\_191188/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Fahrzeugalter/2011\\_\\_b\\_\\_trabis\\_\\_pdf,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/2011\\_b\\_trabis\\_pdf.pdf](http://www.KBA.de/cIn_032/nn_191188/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Fahrzeugalter/2011__b__trabis__pdf,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/2011_b_trabis_pdf.pdf)

- Kraftfahrt Bundesamt [KBA] (2007): Dieselpartikel auf dem Prüfstand. Neuzulassungen – Emissionen, Kraftstoffe, Kurzberichte im Jahr 2007. Flensburg. Online verfügbar unter: [www.kba.de/cln\\_031/nn\\_191064/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/EmissionenKraftstoffe/2007\\_\\_n\\_\\_kraft\\_\\_dieselpartikel\\_\\_diagramm.html](http://www.kba.de/cln_031/nn_191064/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/EmissionenKraftstoffe/2007__n__kraft__dieselpartikel__diagramm.html)
- Kraftfahrt Bundesamt [KBA] (2008): Diesel auf dem Rückzug. Neuzulassungen – Emissionen, Kraftstoffe, Kurzberichte im Jahr 2008. Flensburg. Online verfügbar unter: [www.kba.de/cln\\_031/nn\\_191064/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/EmissionenKraftstoffe/2008\\_\\_n\\_\\_kraft\\_\\_diesel\\_\\_diagramm2.html](http://www.kba.de/cln_031/nn_191064/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/EmissionenKraftstoffe/2008__n__kraft__diesel__diagramm2.html)
- Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg [LUBW] (2010): NO<sub>2</sub>-Immissionsbelastung in Deutschland und Baden-Württemberg. Präsentation auf der NO<sub>2</sub>-Tagung 2010 von Dr. Werner Scholz. Online verfügbar unter: [http://www.no2-tagung2010.de/resources/NO<sub>2</sub>%20Tagung%2020100303%20HD%20Scholz.pdf](http://www.no2-tagung2010.de/resources/NO2%20Tagung%2020100303%20HD%20Scholz.pdf)
- Steven, Heinz [TÜV Nord Mobilität – RWTÜV Fahrzeug GmbH] (2005): Ermittlung der Geräuschemission von Kfz im Straßenverkehr. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes. Würselen.
- Umweltbundesamt [UBA] (2011a): Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen, 1990 - 2009 (Endstand 08.03.2011, v1.3.0). Dessau. Online verfügbar unter: [www.umweltbundesamt.de/emissionen/publikationen.htm](http://www.umweltbundesamt.de/emissionen/publikationen.htm)
- Umweltbundesamt [UBA] (2011b): Aktuelle Immissionsdaten und Ozonvorhersage; Stickstoffdioxid: Deutschlandkarte, 1-Stunden-Mittelwerte, 01.07.2011, 09:00 Uhr. Dessau. Online verfügbar unter: [www.env-it.de/umweltbundesamt/luftdaten/map.fwd?comp=NO<sub>2</sub>](http://www.env-it.de/umweltbundesamt/luftdaten/map.fwd?comp=NO2)
- Umweltbundesamt [UBA] (2011c): Aktuelle Immissionsdaten und Ozonvorhersage; Stickstoffdioxid: Deutschlandkarte, 1-Stunden-Tagesmaxima, 30.06.2011. Dessau. Online verfügbar unter: [www.env-it.de/umweltbundesamt/luftdaten/map.fwd?comp=NO<sub>2</sub>&type=1TMAX&date=20110630&time=-1&state=UB&version=v1](http://www.env-it.de/umweltbundesamt/luftdaten/map.fwd?comp=NO2&type=1TMAX&date=20110630&time=-1&state=UB&version=v1)
- Wartig Chemieberatung (o.J.): Feinstaubmessungen und Partikeluntersuchungen. M. Santen. Online verfügbar unter: <http://www.wartig.de/beraten-planen-begutachten/download/Feinstaub-Messung.pdf>
- Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen [UNECE] (2011): Berichterstattung 2011 unter dem Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverschmutzung (UN ECE-CLRTAP). Inventartabellen im New Reporting Format (NFR) 1990-2009. Online verfügbar unter: [www.umweltbundesamt.de/emissionen/publikationen.htm](http://www.umweltbundesamt.de/emissionen/publikationen.htm)
- World Health Organization [WHO] (2006): Health risks of particulate matter from long-range transboundary air pollution. publ. # E88189, p. 7. Copenhagen.