

# Bewertung der Umwelteffizienz moderner Autoantriebe – auf dem Weg vom Diesel-Pkw-Boom zu Elektroautos

Eckard Helmers

Eingegangen: 15. Februar 2010/Akzeptiert: 7. September 2010/Online veröffentlicht: 28. September 2010  
© Springer-Verlag 2010

**Zusammenfassung** Der motorisierte Verkehr ist eine der größten Quellen von CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie dominierender NO<sub>x</sub>-Emittent. Gegenwärtig stehen technische Weichenstellungen bevor. Die in Deutschland und Europa entwickelten Technologien wie auch Emissionsgrenzwerte werden zudem in globalem Rahmen exportiert. Der seit Mitte der 1990er-Jahre von EU-Kommission und europäischer Autoindustrie betriebene Diesel-Pkw-Boom wird deshalb auf seine Umweltwirkungen hin untersucht und Kriterien hierzu werden entwickelt. Die behauptete CO<sub>2</sub>-Reduktion bei den deutschen Verkehrsemissionen der vergangenen Jahre wird kritisch hinterfragt. Der rußbedingte Strahlungsantrieb wird der Klimawirkung von Diesel-Pkw-Emissionen hinzugerechnet. Die mit dem Diesel-Pkw-Boom seit 1997 zusätzlich auf die Straßen gebrachten Diesel-Pkw ohne Partikelfilter bewirken eine Erwärmung der Atmosphäre. Eine Diskrepanz zwischen Modell- und Messdaten wird bei den Stickstoffoxiden festgestellt. Trotz ehrgeiziger nationaler Reduktionsziele für Stickstoffoxide werden diese durch den Diesel-Pkw-Boom zusätzlich freigesetzt. Vor diesem Hintergrund wird die Umwelteffizienz von Elektroautos betrachtet. Direkte und indirekte Emissionen (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>) von Pkw mit Verbrennungsmotor einerseits und von Elektro-Pkw andererseits werden berechnet und verglichen. Die CO<sub>2</sub>-Ökobilanzierung ergibt Vorteile für den Betrieb von Elektroautos im Vergleich zu Fahrzeugen mit Benzinmotor bereits mit heutigem Strommix.

**Schlüsselwörter** CO<sub>2</sub> · Diesel · Dieselboom · Elektromobilität · Feinstaub · Mobilität · NO<sub>x</sub> · Ruß · SO<sub>2</sub> · Stickstoffoxide · Strahlungsantrieb · Umwelteffizienz · Verkehrsemissionen

**Assessment of the environmental sustainability of modern vehicle drives – on the way from Diesel car boom to electric vehicles**

**Abstract** Motorized traffic is among the biggest CO<sub>2</sub>-emitting sources and is additionally dominating NO<sub>x</sub> emission. Engine technology shifts are approaching, while automobiles developed in Germany and Europe are exported worldwide together with the European emission thresholds for cars. The Diesel car boom induced by EU commission, national EU governments and car industry is accordingly analyzed for sustainability and its effects on environment. German CO<sub>2</sub> emission reduction numbers by motorized traffic, as claimed by the government, are questioned. Radiative forcing by soot (black carbon) Diesel car emissions is added on the CO<sub>2</sub> emissions by fuel combustion. Diesel cars without particle filters are found to cause an atmospheric warming. Modelled and measured NO<sub>x</sub> emission data are assessed to mismatch considerably. In spite of an ambitious national NO<sub>x</sub> reduction plan there is excess NO<sub>x</sub> emission by the German and European Diesel car boom. In this context environmental sustainability of battery electric vehicles (BEV) is investigated. Direct (by car) and indirect (by power plant) emissions (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>) of cars with internal combustion engines (ICE) and BEVs, respectively, are calculated and compared. CO<sub>2</sub>-ecoanalysis revealed advantages for BEVs even operated with current German electricity mix based on around 15 % renewable sources.

---

Verantwortliche Herausgeber: Martin Pehnt · Eckard Helmers

E. Helmers (✉)  
Umweltcampus Birkenfeld der FH Trier,  
Fachbereich Umweltplanung/Umwelttechnik,  
Postfach 1380, 55761 Birkenfeld, Deutschland  
E-Mail: e.helmers@umwelt-campus.de

**Keywords** Battery electric vehicle (BEV) · Black carbon · CO<sub>2</sub> · Diesel · Ecoanalysis · Electromobility · Fine dust · Internal combustion engine (ICE) · Mobility · NO<sub>x</sub> · Radiative forcing · SO<sub>2</sub> · Sustainability · Traffic emissions

## 1 Einleitung

### 1.1 Bedeutung des Verkehrs im Emissionsgeschehen

Der Verkehr ist eine der dominierenden CO<sub>2</sub>-Quellen. In Deutschland werden etwa 19 % (Bezugsjahr 2005, SRU 2008) der gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den Verkehr verursacht, entsprechend einem Anteil von einem Fünftel am Primärenergieverbrauch, wobei sich dieser Anteil innerhalb der vergangenen 50 Jahre in etwa verdoppelt hat (AG Energiebilanzen 2008). Für andere Länder wie Österreich werden über 30 % angegeben (Meyer und Wessely 2009). Der stark ansteigende Trend bei CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Verkehr stellt ein internationales Phänomen dar (Meyer und Wessely 2009). An den direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen des gesamten Verkehrsbereichs hat der Straßenverkehr einen Anteil von 85 %, der Pkw-Verkehr von 60 % (BMU 2010). EU-weit soll der Verkehr für etwa ein Viertel der Treibhausgasemissionen verantwortlich sein. Weltweit werden 26 % des Energieverbrauchs für Transportzwecke aufgewendet oder 23 % der energiebezogenen Treibhausgasemissionen (IPCC 2007a). Im Transportsektor stellt der Straßenverkehr weltweit einen Anteil von 74 % (IPCC 2007b). Somit kommt dem Pkw eine zentrale Bedeutung bei der Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen zu.

In Europa wird der Verkehr weiter anwachsen: der Personenverkehr von 2007 bis 2020 um voraussichtlich 9 % sowie der Güterverkehr in dieser Zeit um 28 % (ProgTrans 2009). Global sind die Wachstumsperspektiven des Verkehrs für Unternehmen euphorisierend, im Hinblick auf die Umweltqualität jedoch problematisch: Die Zahl der Autos stieg weltweit in den vergangenen 50 Jahren mindestens viermal so schnell wie die Zahl der Menschen (Helmers 2009a). Am schnellsten nimmt die Automobilität wohl in den asiatischen Ländern zu, allen voran in China. Dort hat sich die Zahl der Pkw je 1000 Einwohner nach verschiedenen Quellen im vergangenen Jahrzehnt von 12 auf 60 verfünffacht. Der Gesamtfahrzeugbestand Chinas stieg allein im Jahr 2009 um 10 % gegenüber 2008. Jeden Monat kamen während des Jahres 2009 in China 1,1 Mio. Fahrzeuge hinzu, doppelt so viele wie noch 2008 (Beijing traffic management bureau 2009). Auch weitere große Schwellenländer wie Indien und Brasilien verzeichnen ein erhebliches Wachstum.

Weltweit gibt es derzeit insgesamt etwa 700–800 Mio. Autos, im Jahr 2020 kann die Milliardengrenze überschritten werden (Helmers 2009a). Dieser Zuwachs stellt eine enorme Belastung für Klima, Umwelt und Gesundheit dar, regional wie global.

Auf Basis der genannten Zahlen müsste der motorisierte Verkehr weit mehr im Fokus von Optimierungsbestrebungen stehen. Leider werden bislang alle graduellen Erfolge von der Steigerung der Verkehrsintensität aufgezehrt. Abseits der auf Emissionsbilanzen fokussierten Diskussion gibt es weitere Gründe, den Verkehr prioritär zu betrachten: Kraftfahrzeuge entlassen ihre Verbrennungsprodukte unmittelbar in den Lebensbereich von Menschen. Der Abstand zwischen Auspuff und menschlichen Atemwegsorganen beträgt teilweise nur wenige Meter.

In den vergangenen Jahren erfolgte eine technische Diversifizierung im Pkw-Bereich (benzinbetriebene, dieselbetriebene, strombetriebene Kraftfahrzeuge). Ähnlich wie die Stromerzeugung könnte die Individualmobilität heute auf neuen, wesentlich emissionsärmeren und umweltfreundlicheren Techniken basieren.

Nicht nur Autos, sondern auch Grenzwerte werden exportiert: EU-Grenzwerte mit ihren unterschiedlichen Ansprüchen an benzinbetriebene und Diesel-Pkw wurden von asiatischen Ländern übernommen. Einer der größten Wachstumsmärkte im Automobilssektor ist Indien. Für Indien erhoffen sich Hersteller einen Anstieg des Anteils von Diesel-Pkw von 29 % (2005) auf 50 % (2015). Es ist davon auszugehen, dass dieser Zuwachs auf der Basis der Euro-3-Pkw-Grenzwerte erfolgt, also ohne Partikelfilter. Nach den hier vorgestellten Daten ist zu erwarten, dass die menschliche Gesundheit vor Ort und die atmosphärische Wärmebilanz daraus Schaden nehmen werden. Darüber hinaus wird der Wartungszustand der Abgasreinigungsanlagen von Kfz in Schwellenländern nicht wie in Deutschland kontinuierlich überprüft, wodurch zusätzliche Umweltbelastungen zu erwarten sind.

### 1.2 Der europäische Diesel-Pkw-Boom

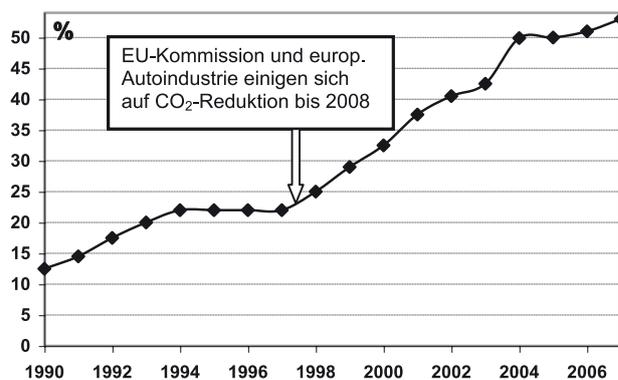
Die vorliegende Veröffentlichung geht von der These aus, dass Maßnahmen zur Abschwächung der klimatischen Erwärmung in sich effizient und wirksam sein müssen und keine bloße Bilanzleistung darstellen dürfen. Dies wird dadurch erschwert, dass die Erderwärmung von einer Reihe von Ursachen und Substanzen angetrieben wird. Demgegenüber fokussiert das Kyoto-Protokoll auf CO<sub>2</sub> und einige weitere Treibhausgase, während bodennahes Ozon und Ruß nicht geregelt wurden. Hier haben sich die Kyoto-Protokollstaaten ein System geschaffen, das für sie handhabbar, weil übersichtlich ist. In diesem System können sie agieren und Bilanzfolge erzielen (z. B. UBA 2009a). Dieser Ansatz soll nicht grundsätzlich kritisiert werden, allerdings liegt der Schluss nahe, dass die allgemeine Fokussierung auf CO<sub>2</sub> hier seine Ursache hat. Aus der in der Wissenschaft zunehmend artikulierten Bedeutung von Ruß als atmosphärischem Erwärmungsfaktor resultieren Anfragen an die klimahygienische Effizienz des Diesel-Pkw-Booms. Darüber

hinaus wird als eigentliche Triebkraft für den europäischen Diesel-Pkw-Boom vermutet, dass die Mineralölindustrie einen neuen Absatzmarkt für die über Jahrzehnte weggebrochenen Heizölverkäufe in Europa benötigte (Kacsóh 2010). Das sogenannte Mitteldestillat der Rohölfraction lässt sich in Form von Heizöl aber auch als Dieseltreibstoff vermarkten.

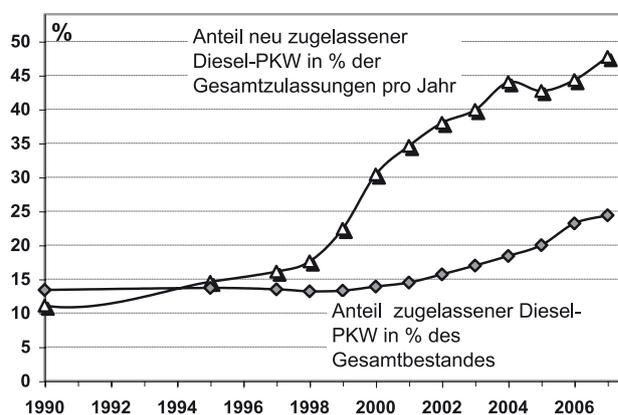
Eine weitere These dieser Arbeit ist, dass Maßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Minimierung nicht zu (gravierenden) Umweltbelastungen an andere Stelle führen dürfen. Genau dies geschieht jedoch durch den europäischen Diesel-Pkw-Boom, wie hier belegt wird. Der europäische Diesel-Pkw-Boom stellt einen massiven Technologiewandel dar, dessen Ursachen und Umweltwirkungen zu hinterfragen sind (Helmers 2009a). Der enorme Zuwachs an Diesel-Pkw auf europäischer Ebene (Abb. 1) wurde offenbar durch eine Übereinkunft zwischen EU-Kommission und ACEA (European Automobile Manufacturers Association) im Jahre 1997 initiiert: Die CO<sub>2</sub>-Emission aller neuen Pkw sollte von 187 g/km (Basis 1995) um 25 % auf 140 g/km im Jahr 2008 reduziert werden. Als Folge brachten die Automobilhersteller gezielt Diesel-Pkw auf den Markt. Die Umsetzung dieser Strategie erfolgte in den einzelnen EU-Ländern mit sehr unterschiedlicher Konsequenz: Die Anteile der Diesel-Pkw an den Neuzulassungen reichen von 27,1 % in Irland bis hin zu 77,2 % in Luxemburg. Eine Reihe von Ländern (Spanien, Frankreich, Norwegen, Belgien und Luxemburg) weist Dieselflottenanteile über 70 % auf. Deutschland befindet sich mit zuletzt rund 50 % im Mittelfeld (Abb. 2). Im Jahr 2009 erfolgte in Deutschland ein Einbruch beim Diesel-Pkw-Anteil, weil die Regierung mit der Abwrackprämie den Kauf kleiner Autos förderte. Bei kleinen Autos macht sich der Mehrpreis der Dieselflottenanteile stärker bemerkbar.

Ebenfalls unterschiedlich ist die Geschwindigkeit der „Verdieselung“ in den einzelnen europäischen Ländern. An der Spitze steht wohl Norwegen: Dort stieg der Neuwagenanteil von Diesel-Pkw innerhalb von vier Jahren (2003–2007) von gut 20 auf 74,4 % (ACEA 2004, 2008). Ursache ist offenbar eine direkte Subventionierung von Dieselneuwagen (VDI 2009) sowie eine steuerliche Begünstigung auf der Basis der CO<sub>2</sub>-Emissionen (www.gtai.de 2007). Es ist davon auszugehen, dass die Höhe staatlicher Subventionen als wichtigste Triebkraft hinter dem unterschiedlichen Dieselflottenanteil in den einzelnen europäischen Ländern steht. Im Durchschnitt stieg der Dieselanteil am Neuwagenverkauf in den europäischen Ländern bis zum Jahr 2007 auf über 50 % (Abb. 1).

Von den rund 218 Mio. Pkw in 18 europäischen Ländern waren im Jahr 2007 bereits 31,4 % Diesel-Pkw (ACEA 2008), also rund 68 Mio. Die Zahl der Autos hat in der EU um rund 2 % pro Jahr zugenommen. Es lässt sich abschätzen, dass seit dem Startschuss der EU-Kommission für den Dieselboom in den Jahren 1998 bis Ende 2007 rund 41 Mio. Diesel-Pkw mehr auf Europas Straßen gebracht wurden,



**Abb. 1** Anteil zugelassener Diesel-Pkw an neu zugelassenen Autos in Europa (Quelle: ACEA, 2008)



**Abb. 2** Diesel-Pkw-Boom in Deutschland (Quelle: Kraftfahrtbundesamt 2008b)

als es unter Beibehaltung des vorherigen Anteils gewesen wären (Abb. 1). Da EURO-4-Grenzwerte erst ab 2005 verbindlich waren, dürfte ein Großteil der 41 Mio. zusätzlicher Diesel-Pkw keinen Partikelfilter aufweisen. Allerdings sind bei den meisten Diesel-Pkw Partikelfilter nicht einmal zur Einhaltung der EURO-4-Grenzwert von 25 mg Rußpartikeln/km erforderlich. Einzelne Hersteller statten jedoch ihre Diesel-Pkw seit Jahren auf freiwilliger Basis mit Dieselpartikelfiltern (DPF) aus. Laut dem Europäischen Umweltamt (EEA 2010) entsprachen im Jahr 2007 22,3 % aller zugelassenen Diesel-Pkw der Abgasnorm EURO-4.

Am 1.1.2008 gab es in Deutschland 41,2 Mio. Pkw, davon 10 Mio. oder 24,4 % mit Dieselmotor (Kraftfahrtbundesamt 2008a). Bis 1998 betrug der Dieselanteil im langjährigen Mittel 13–14 % (Abb. 2). Hiernach lässt sich abschätzen, dass durch den Diesel-Pkw-Boom von 1998 bis zum 1.1.2008 rund 4,2 bis 4,5 Mio. Dieselaufbauten zusätzlich auf deutsche Straßen gelangt sind. Am 1.1.2008 waren laut Kraftfahrtbundesamt 32,1 % aller Pkw in Deutschland nach EURO-4 eingestuft.

### 1.3 Hintergrund und Fragen zur Nachhaltigkeit

Die Frage der Umwelteffizienz von Kraftfahrzeugen wird bis hin zur wissenschaftlichen Betrachtung heute manchmal allein auf den Parameter CO<sub>2</sub> reduziert. Sogar der noch stärkere Begriff „Ganzheitlichkeit“ kann in der Literatur auf CO<sub>2</sub> bezogen gefunden werden (Schubert und Sonntag 2009). Die aktuelle Fokussierung der Umweltwissenschaften auf den einzelnen Parameter CO<sub>2</sub> folgt der öffentlichen Diskussion. Die Allgegenwart des Themas „CO<sub>2</sub>“ wird auch durch eine Vielzahl staatlich finanzierter CO<sub>2</sub>-Studien verursacht. Dringende lufthygienische Probleme geraten dadurch aus dem Blickfeld.

Seit Mitte der 1990er-Jahre werden Diesel-Pkw mit verschiedenen Maßnahmen gefördert, da sie effizienter seien und die CO<sub>2</sub>-Emissionen verringerten. Offensichtlich als Folge der Priorisierung von CO<sub>2</sub> wurden auf EU-Ebene die Grenzwerte zweier wichtiger Emissionsparameter (NO<sub>x</sub>, Feinstaub) für Diesel-Pkw deutlich oberhalb derjenigen von benzinbetriebenen Pkw angesetzt. Millionen zusätzlich verkaufter Diesel-Pkw führen deshalb zu höheren Emissionen von NO<sub>x</sub> und Feinstaub als nach dem Stand der Technik erforderlich. Im Rahmen der Umweltüberwachung wurde dieses Problem möglicherweise als vernachlässigbar eingestuft, da Rechenmodelle insgesamt einen starken Rückgang dieser Emissionen voraussagten. In der Realität jedoch entwickelte sich die Immissionsituation offenbar anders. Angesichts der enormen Vielfalt an Messdaten wird hier nur ein repräsentativer Ausschnitt präsentiert werden können. Quantitative Aussagen können nur im Rahmen öffentlich geförderter, komplexer Studien getätigt werden. Dies gilt umso mehr für das Thema der atmosphärischen Wärmebilanz. Der Autor meint jedoch wichtige Trends aufzeigen zu können.

Es soll betont werden, dass nachhaltige Mobilität wesentlich über die Frage der Antriebstechniken hinausgeht. Nicht nur in Deutschland gibt es eine umfassende Forschung dazu. Dennoch blieben bisherige Versuche zur Nachhaltigkeitssteigerung (weniger individuelle Mobilität mit dem Auto, mehr Gütertransport auf Schiene und Wasserweg, Entkoppelung von Wirtschafts- und Mobilitätswachstum), so unentbehrlich sie sind, im Ansatz stecken, oder die Verhältnisse entwickelten sich zum Schlechteren (Pastowski 2007). Die meist wirtschaftspolitischen Gründe dafür sind in der Forschung aufgearbeitet worden, zusammengetragen etwa im Standardwerk „Verkehrspolitik“ von Schöllner et al. (2007). Während die gesellschaftlichen Mobilitätsstrukturen schwer veränderbar scheinen, ist die Realisierbarkeit eines Technologiewandels innerhalb weniger Jahre am Beispiel des Diesel-Pkw-Booms und anderer Trends offenkundig (Helmers 2009a).

Anders als der Dieselautoboom, der die CO<sub>2</sub>-Emissionen und parallel dazu den Energieverbrauch von Pkw effektiv

nicht oder nur in geringem Maße reduzierte, können Elektroautos im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren weit effizienter betrieben werden: Eine Synopse des Energieverbrauchs von Autos mit Verbrennungsmotoren und von Elektroautos ergibt, dass Elektroautos mit etwa 15 kWh/100 km nur rund ein Fünftel der Energie benötigen, die im Vergleich dazu in Form von Benzin oder Diesel durchschnittlich aufzuwenden ist (McKay 2009). Ein ähnliches Bild ergibt sich aus dem Vergleich der WTW-Energieeffizienzen (WTW: well to wheel) verschiedener Antriebe: Während die WTW-Effizienz von diesel- und benzinbetriebenen Pkw nach einem Jahrhundert Optimierung bei 13–19 % liegt, kann sie beim Elektroauto 90 % erreichen. Betrachtet man allerdings den Betrieb von Elektroautos unter ungünstigsten Umständen (z. B. große Stromverluste beim Laden), kann die Gesamteffizienz auf 35 % sinken (Helmers 2009a).

Elektromobilität lässt deshalb auf eine erhebliche Effizienzsteigerung und Emissionsreduktion im Verkehrssektor hoffen. Es ist keine weitere ähnlich vielversprechende Antriebstechnik für Autos kommerziell verfügbar. Der Begriff „Elektroauto“ bezeichnet in dieser Veröffentlichung batteriebetriebene Fahrzeuge (BEV), jedoch keine Brennstoffzellen-Fahrzeuge (FCV).

Würden batteriebetriebene Elektroautos nicht nur in der Forschung, sondern auch auf der Ebene des Verbrauchers staatlich gefördert, wäre sogar ein gewisser Mobilitätswandel denkbar: Die begrenzte Reichweite eines Elektroautos könnte ein Anreiz zu besserer Planung und effizienterer Nutzung sein. Auf dem Weg dahin muss die Umwelteffizienz der verschiedenen Motortechnologien umfassender betrachtet werden. Es geht darum, ob tatsächlich eine Entlastung der atmosphärischen Wärmebilanz stattfindet und ob es zu zusätzlichen Emissionen anderer Schadstoffe kommt. Ohne tatsächlichen klimahygienischen Vorteil oder mit zusätzlichen toxischen Emissionen fehlt es an Nachhaltigkeit im Sinne der Umwelteffizienz. Insbesondere die Alternative „Elektromobilität“ ist auf der Basis des bisher erreichten zu prüfen. Hierzu soll im Folgenden ein Beitrag geleistet werden.

## 2 Tatsächliche CO<sub>2</sub>-Reduktion durch den Diesel-Pkw-Boom

Die deutsche Bundesregierung veröffentlicht einen deutlichen Rückgang der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Verkehrs im Zeitraum seit 1999 (BMU 2010). Das Bundesumweltministerium führt aus: „Die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Pkw-Verkehrs haben von 1999 bis 2006 um rund 12 % abgenommen. Ursachen dafür sind: Geringerer Verbrauch der Neufahrzeuge, dämpfende Effekte auf Fahrleistung und Fahrverhalten durch höhere Kraftstoffpreise (Produktpreise, Mineralöl- und Ökosteuern) und konjunkturelle Einflüsse“ (BMU 2010).

Die vorstehend genannte Zahl entstammt Modellen wie TREMOD (Transport Emissions Estimation Model), welche aufwendige Berechnungen auf der Basis von Datenbanken erfordern. Hierbei werden bestimmte Lastzustände und Fahrleistungen angenommen. Es ist Außenstehenden nicht möglich, solche Modelle nachzurechnen, zumal sie als Eigentum des für die Entwicklung zuständigen Unternehmens betrachtet werden. Kritisch können lediglich die Plausibilität diskutiert und Trends verglichen werden. Von den Autoren des TREMOD wird betont, dass dieses Modell anhand realer Messungen mehrfach positiv validiert sei (Höpfner et al. 2004). Eine gewisse Unterschätzung von  $\text{NO}_x$ - und  $\text{CO}_2$ -Emissionen wird selbst angemerkt (Höpfner et al. 2004).

Für den Zeitraum von 1999 bis 2006 bilanziert TREMOD einen Anstieg der gesamten Fahrleistung des Straßenverkehrs um rund 9%, der hauptsächlich durch die Zunahme der neuen Diesel-Pkw getragen wird (Höpfner et al. 2004). Dies reflektiert den Boom bei den Diesel-Pkw-Neufahrzeugen. Tatsächlich ist die durchschnittliche  $\text{CO}_2$ -Emission aller Neufahrzeuge in diesem Zeitraum um rund 9% von 189 auf 173 g  $\text{CO}_2/\text{km}$  gesunken (BUND 2007; nach Daten aus dem Kraftfahrtbundesamt). Die Zunahme der Verkehrsleistung dieser Fahrzeuge und die gleichzeitig behauptete Abnahme der  $\text{CO}_2$ -Emissionen des Pkw-Verkehrs zwischen 1999 bis 2006 um rund 12% würde einen erheblichen Emissionsvorteil im Betrieb von Diesel-Pkw voraussetzen. Neu zugelassene Diesel-Pkw hatten im Jahr 1999 dagegen nur um 10,5% niedrigere  $\text{CO}_2$ -Emissionen als die im gleichen Jahr neu zugelassenen benzinbetriebenen Pkw (Abb. 3). Seitdem bewegen sich die  $\text{CO}_2$ -Emissionen beider Motor-techniken aufeinander zu, um im Jahr 2006 schließlich nahezu Gleichstand zu erreichen (Abb. 3). In anderen Staaten Europas ergibt sich ein ähnliches Bild. Angesichts der zusätzlichen, hauptsächlich von neuen Diesel-Pkw getragenen Fahrleistung erstaunt vor diesem Hintergrund der für Deutschland berechnete  $\text{CO}_2$ -Emissionsrückgang aus dem Verkehr von 12%.

Das deutsche Bundesumweltministerium kommentiert den Verbrauchsanstieg der Diesel-Pkw distanzierend: „Die Herstellerstrategie ‚Niedrigerer Verbrauch durch motorische Verbesserungen und einen höheren Dieselabsatz‘ ging nur bedingt auf.“ (BMU 2010). Dabei generiert die Bundesregierung den Diesel-Pkw-Boom größtenteils selbst durch die um rund 20 Ct./L niedrigere Mineralölsteuer auf Dieselmotoren, obwohl dieser literbezogen rund 13% höhere  $\text{CO}_2$ -Emissionen mit sich bringt als Benzin. Das zweitwichtigste staatliche Element der Dieselförderung besteht in weniger anspruchsvollen Emissionsgrenzen für toxische Emissionen von Diesel-Pkw, was es der Autoindustrie ermöglicht, preislich konkurrenzfähige, jedoch emissionstechnisch veraltete Fahrzeuge anzubieten.

Die genannten Emissionsmodelle basieren auf genormten Testzyklen für Kraftfahrzeuge. Der derzeit gängige neue

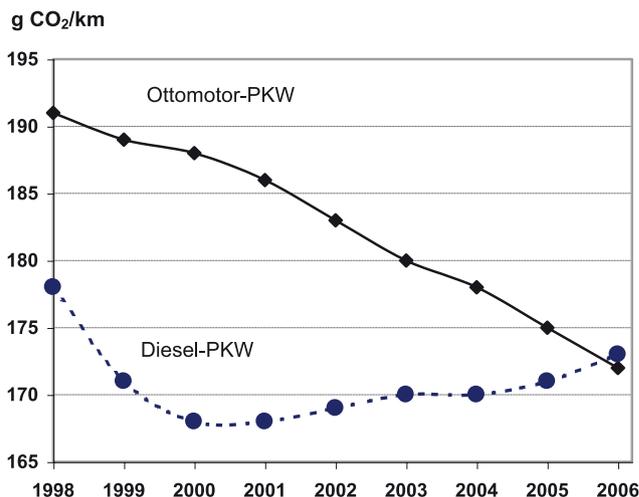


Abb. 3  $\text{CO}_2$ -Emissionen in Deutschland neu zugelassener Pkw (BUND 2007, nach Daten aus dem Kraftfahrtbundesamt)

europäische Fahrzyklus (NEFZ) sieht hierbei Geschwindigkeiten von maximal 120 km/h vor; verbrauchserhöhende Sonderausstattungen wie Klimaanlage werden nicht berücksichtigt. Entsprechend liegt der Realverbrauch von Pkw in Einzelfällen um bis zu 60% über dem Normverbrauch (s. u.). Laut einer Statistik über den Realverbrauch von Neuwagen übersteigt dieser im Mittel um 17% (benzinbetriebene Pkw) bzw. um 24% (Diesel-Pkw) den tabellierten Normverbrauch (Helmers 2009a). Besonders in Deutschland mit seinen hohen Geschwindigkeiten auf den Autobahnen führt dies zu deutlich unterschätzten Emissionsbilanzen (Luhmann 2009). Tatsächlich verdoppelt sich der sogenannte  $\text{CO}_2$ -Normverbrauch eines Fahrzeugs bis zu einer Geschwindigkeit von 180 km/h, was auf deutschen Autobahnen durchaus als Dauergeschwindigkeit zu beobachten ist (Helmers 2009a). Durch die Einstellung der amtlichen Erfassung der auf deutschen Autobahnen gefahrenen Geschwindigkeiten im Jahr 1996 ist keine quantitative Einschätzung möglich. Laut Umfragen fahren jedoch 36% aller Autofahrer auf der Autobahn 130–150 km/h, 17% fahren 150–170 km/h sowie 8%, also etwa jeder siebte, fährt schneller als 170 km/h (Helmers 2009a). Eine deutliche Unterschätzung der  $\text{CO}_2$ -Emissionen ist also die Folge, wenn die genormten Verbrauchszahlen zugrunde gelegt werden. Letztere bilden in Deutschland jedoch auch eine Grundlage bei der Berechnung der nationalen  $\text{CO}_2$ -Minderungsziele. Über die marktuntypischen Fahrzeugkonfigurationen und realitätsfernen Geschwindigkeitsprofile hinaus wird bei der Ermittlung des Normverbrauchs zum Teil auf Sonderkraftstoffe („Prüfdiesel“) zurückgegriffen, die an den Tankstellen nicht angeboten werden. Insgesamt ist festzustellen, dass insbesondere wegen der hohen Geschwindigkeiten auf den deutschen Autobahnen möglicherweise in keinem anderen

**Tab. 1** Verbrauchsdaten des VW Passat mit verschiedenen Motoren (Stand: März 2009)

VW Passat, Motorversion/ Benzin-, CNG-, Dieselbetrieb	1,4 L TSI 150 PS Ecofuel im Benzinbetrieb	1,4 L TSI 150 PS Ecofuel im Erdgasbetrieb (CNG)	2 L 143 PS Blue- TDI mit Partikelfilter (ohne DeNO <sub>x</sub> -Filter)
Verbrauch	6,8 L/100 km	4,4 kg/100 km	5,8 L/100 km
Kraftstoff	Benzin	Erdgas	Diesel
CO <sub>2</sub> g/km	157	119	152

Land die bilanzierten und die realen Emissionen so sehr divergieren wie in Deutschland. Dieses betrifft CO<sub>2</sub>- wie auch toxische Emissionen.

Es gibt weitere Faktoren, die die erwähnten Emissionsbilanzen gerade für Diesel-Pkw schönen: So ist das sogenannte „Chiptuning“ von Diesel-Pkw heutzutage üblich geworden, sogar von den Fahrzeugherstellern selbst als Sonderausstattung angeboten. Hierbei kann die Motorleistung um typischerweise 30 % ansteigen. Anzunehmen ist, dass diese Mehrleistung auch eingefordert wird, wodurch Verbrauch und Emissionen entsprechend zunehmen (Helmers 2009a).

Hinzu kommt, dass das Downsizing von Benzinmotoren den früheren CO<sub>2</sub>-Emissionsvorteil von Dieselmotoren weitgehend beseitigt (Tab. 1). Diesel- und moderne benzinbetriebene Fahrzeuge vergleichbarer Leistung haben nahezu identische CO<sub>2</sub>-Emissionen, die allerdings durch den alternativen Gasantrieb unterschritten werden (Tab. 1). Während die CO<sub>2</sub>-Emissionen von analogen benzinbetriebenen und Diesel-Pkw also das gleiche Niveau erreicht haben, weisen Dieselsonversionen noch immer die weit höheren Stickoxid- und Rußemissionen auf (s. u.). Vor diesem Hintergrund erstaunt erneut die staatliche Doppelförderung von Diesel-Pkw durch Bevorzugung bei Mineralölsteuer und weniger anspruchsvolle Emissionsvorgaben.

### 3 Toxische Emissionen des Verkehrs: Stickstoffoxide

Die deutsche Bundesregierung publiziert in ihren Emissionsprognosen auch eine starke und kontinuierliche Abnahme der Belastung durch verkehrsemitierte Schadstoffe wie Partikel, NO<sub>x</sub>, CO und HC (Kohlenwasserstoffe) (BMU 2007). Doch viele dieser Zahlen basieren nicht auf Messungen, sondern ebenfalls auf Modellrechnungen.

Zentrales Modell für die Vorhersage von Verkehrsemissionen in Deutschland ist wiederum „TREMOD“, welches zum Beispiel für das Jahr 2004 eine Verringerung der Stickstoffoxidemissionen um rund 70 % auf knapp ein Drittel des Ausgangswertes von 1990 nennt (Höpfner et al. 2004). In der Realität gingen dagegen beispielsweise die NO<sub>x</sub>-Messwerte an Hauptverkehrsstraßen in Bayern zwischen 1990

und 2003 nur um rund ein Drittel zurück, aktuell stagnieren sie (Rabl und Scholz 2005). NO<sub>x</sub>-Messungen an Hauptverkehrsstraßen in Nordrhein-Westfalen zwischen 1990 und 2007 weisen einen Rückgang um rund 45 % bei Stagnation der Werte seit dem Jahr 2000 aus (Kurtenbach et al. 2008). Manche Institutionen dokumentieren oder messen lediglich NO<sub>2</sub>-Werte, wobei diese tendenziell an verkehrsbelasteten Standorten seit 1990 ebenfalls nicht mehr zurückgingen. Insgesamt hat es den Anschein, als ob sich die rund 70 %ige NO<sub>x</sub>-Reduktion des TREMOD-Modells zwischen 1990 und 2010 nicht (annähernd) in den Messdaten widerspiegelt. Dies kontrastiert mit der Tatsache, dass die TREMOD-Trends Eingang in eine Vielzahl von Publikationen deutscher Institutionen gefunden haben. Oft ist es dabei kaum möglich, zwischen derartigen Emissionsmodellen und tatsächlichen Messdaten zu unterscheiden.

Auch andere Länder müssen Emissionsbilanzen aufstellen. Im Gegensatz zum behaupteten massiven NO<sub>x</sub>-Rückgang des deutschen TREMOD ist augenfällig, dass etwa das österreichische Umweltbundesamt von nahezu einer Stagnation der NO<sub>x</sub>-Verkehrsemissionen zwischen 1990 und 2007 ausgeht (Ö-UBA 2009). In Österreich ist der Verkehr mit 64,3 % ebenso wie in Deutschland der größte NO<sub>x</sub>-Emittent, allerdings bei höherem Dieselflottenanteil als in Deutschland.

Deutschland hat nicht nur das Kyoto-Protokoll unterzeichnet, sondern im Jahr 2004 auch das Multikomponentenprotokoll (Bestandteil der Genfer Luftreinhaltekonvention), welches zu drastischen Emissionsreduktionen verpflichtet. Unter anderem sind hiernach die Stickstoffoxidemissionen von 2000 bis 2010 um rund 60 % zu reduzieren (BMU 2005a). Vor diesem Hintergrund verblüfft die staatliche Unterstützung für die Diesel-Pkw-Technik, welche Stickstoffoxidemissionen erheblich ansteigen lässt, wie aufgrund der unterschiedlichen Emissionsgrenzwerte für diesel- und benzinbetriebene Pkw (Helmers 2009b) von vornherein zu erwarten.

Seit dem 1. 1. 2010 gilt in der EU der von der WHO geforderte Grenzwert (Jahresmittelwert) von 40 µg NO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>. In der Schweiz beträgt der Grenzwert 30 µg NO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>. Im Jahr 2008 wurde der Wert von 40 µg NO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> an 72 von 150 verkehrsnahen Messstationen in Deutschland überschritten (UBA 2009b). In Fachkreisen ist spätestens seit 2005 bekannt, dass sich der neue EU-Grenzwert für NO<sub>2</sub> kaum wird einhalten lassen (BMU 2005b). Dennoch erfahren Diesel-Pkw weiterhin Bevorzugung bei den NO<sub>x</sub>-Emissionsgrenzen und wird die Reduktion der Stickstoffoxidemissionen auf das Niveau von benzinbetriebenen Pkw nach dem künftigen EURO-6-Standard auf die Zeit nach 2014 verschoben. Die Euro-5/6-Verordnung schreibt die Geltung der Euro-6-Grenzwerte ab dem 1. 9. 2014 für die Typengenehmigung und ab dem 1. 9. 2015 (teilweise 2016) für die Zulassung vor (Verordnung EG Nr. 715/2007 des Europäischen Parlaments und des Rats vom 20. Juni 2007).

**Tab. 2** EU-Emissionsgrenzwerte (Helmerts 2009b) und gemessene Emissionen (zusammengefasst in Jacobson et al. 2004) von Pkw, basierend auf Messdaten von 1999–2003

Schadstoff/Motor		Diesel-Pkw mit Partikelfilter (Flottenmesswerte)	EU-Grenzwerte für Diesel-Pkw EU4/EU3	Benzinbetriebener Pkw (Flottenmesswerte)	EU-Grenzwerte für benzinbetriebene Pkw EU4/EU3
NO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub> (g/km)	0,3–0,4	0,25/0,5	0,01–0,1	0,08/0,15
NO <sub>2</sub>	% NO <sub>2</sub> von NO <sub>x</sub>	13–70	N.a.	4,3–17,6	N.a.
PM	PM Feinstaub (mg/km), davon	1,5–15	25/50	0,05–2	N.a.
Ruß	% Ruß/black carbon (BC)	58*	N.a.	8**	N.a.

*Anmerkung:* Ottomotorfahrzeuge werden grundsätzlich ohne Partikelfilter gebaut.

\* Mayer (2004).

\*\* Jacobson (2007).

EURO-6-geeignete Diesel-Pkw mit sogenannten SRC-Katalysatoren (Helmerts 2009a) werden von deutschen Herstellern jedoch bereits seit einiger Zeit in die USA exportiert.

Seit langem ist auch bekannt, dass Dieselpartikelfilter deutscher Hersteller mit einem NO<sub>2</sub>-Überschuss zur Regeneration arbeiten. Dies kann auch nachgerüstete Partikelfilter betreffen. Es werden bei Fahrzeugen für den europäischen Markt bis auf einige Ausnahmen keine Maßnahmen getroffen, den NO<sub>2</sub>-Überschuss abzufangen. Obwohl bereits Millionen derart ausgestatteter Diesel-Pkw auf den Straßen fahren, werden die offenbar daraus folgenden hohen NO<sub>2</sub>-Messwerte amtlich als „überraschend“ bezeichnet (BMU 2007). Auf der anderen Seite hatte das Bundesumweltministerium bereits im September 2005 zahlreiche Experten zu einem Fachgespräch eingeladen, auf dem die erhöhten Stickstoffoxidwerte diskutiert wurden (BMU 2005b).

Vor dem Hintergrund dieser Fakten und im Hinblick auf die deutlich überhöhten NO<sub>2</sub>-Werte in deutschen Städten ist es unverständlich, dass Diesel-Pkw mit schlechterer Einstufung als EURO-6 die grüne Plakette und damit die Erlaubnis zur Einfahrt in die Umweltzonen erhalten.

Es gibt Hinweise darauf, dass verkehrsnaher Stickoxidwerte in Ländern mit den höchsten Diesel-Pkw-Anteilen wie Österreich und Frankreich Maxima unter den europäischen Stickoxidwerten erreichen (Lutz 2004; Ö-UBA 2008). Messungen an Bord von Fahrzeugen in dichtem Verkehrsgeschehen wie zum Beispiel in Rouen (Frankreich) zeigen außerdem, dass die NO<sub>2</sub>-Exposition im Inneren eines Fahrzeugs rund zehnmal höher sein kann als außerhalb (Morin 2009). Eine Stunde Aufenthalt in einem Fahrzeug innerhalb dichten Verkehrs entspräche bereits 50 % der tolerablen täglichen Exposition gegenüber PM und NO<sub>2</sub> (Morin 2009).

Den Modellierungen auf der Basis normierter Grenzwerte und theoretischer Lastzustände sind Abschätzungen aus realen Messungen entgegenzustellen. Ein aufwendiger Vergleich der Emissionen von benzinbetriebenen und Diesel-

Pkw auf der Basis realistischer Daten wurde von Jacobson et al. (2004) in den USA durchgeführt (Tab. 2).

Anhand dieser Zahlen (Tab. 2) ist ersichtlich, dass sich die realen NO<sub>x</sub>-Emissionen von diesel- und benzinbetriebenen Pkw deutlich stärker unterscheiden als die Grenzwerte. Der Grund dafür ist, dass Diesel-Pkw ihre NO<sub>x</sub>-Grenzwerte nur knapp unterschreiten, während die NO<sub>x</sub>-Emissionen von benzinbetriebenen Pkw meist deutlich unterhalb der Grenzwerte liegen. Hinzu tritt die Erkenntnis aus einer Reihe von Langzeittests, dass sich die Emissionen von Diesel-Pkw mit zunehmender Laufzeit erhöhen (veröffentlicht in der Automobilpresse – es fehlt jedoch die statistische Datenbasis, um diesen Effekt zu quantifizieren). Nach den vorliegenden Zahlen (Tab. 2) haben Diesel-Pkw 3–40-fach höhere NO<sub>x</sub>-Emissionen als benzinbetriebene Pkw, während sich die Grenzwerte nur um den Faktor 2–6 unterscheiden. Aus diesen Daten kann abgeschätzt werden, welche zusätzlichen NO<sub>x</sub>-Emissionen allein die 4,2 bis 4,5 Mio. Diesel-Pkw verursachen, die der Diesel-Pkw-Boom in Deutschland bis zum 1. 1. 2008 zusätzlich auf die Straßen gebracht hat. Jeder Diesel-Pkw emittiert im Mittel 0,295 g NO<sub>x</sub> je Fahrzeugkilometer mehr als ein benzinbetriebener Pkw. Wären statt der Diesel-Pkw anteilmäßig genauso viele benzinbetriebene Pkw unterwegs wie vor Initiierung des Dieselbooms, wären der Umwelt im Jahr 2007 rund 18,6–19,9 kt NO<sub>x</sub> erspart geblieben (angenommene Fahrleistung: 15 000 km/Jahr je Fahrzeug). TREMOD summiert rund 400 kt für die gesamten Stickstoffoxidemissionen aus dem Straßenverkehr in diesem Zeitraum (Höpfner et al. 2004). Das deutsche Umweltbundesamt bilanziert für 2007 eine NO<sub>x</sub>-Gesamtemission von 1294 kt, davon 629 kt für den Verkehr (UBA 2010). Die zusätzliche Stickstoffoxidemission durch den Diesel-Pkw-Boom macht nach diesen Zahlen für das Jahr 2007 also etwa 3–5 % der gesamten verkehrlichen NO<sub>x</sub>-Emissionen aus oder rund 1,5 % der gesamten NO<sub>x</sub>-Emissionen Deutschlands. Für das Jahr 2010 hat sich Deutschland nach Multikomponentenprotokoll und NEC-Richtlinie verpflichtet, die NO<sub>x</sub>-Emissionen auf 1051 kt zu senken (UBA 2010),

was offenbar nicht erreicht wird (die deutsche Umsetzung der NEC-Richtlinie erfolgte durch die 33. BImSchV).

Diese Zahlen unterschätzen jedoch die Wirkung der erhöhten  $\text{NO}_x$ -Emissionen der vermehrten Diesel-Pkw auf den Straßen, da neue Autos mehr gefahren werden als alte. Vor allem geht es um die erhöhten  $\text{NO}_2$ -Emissionen von Diesel-Pkw mit sich kontinuierlich regenerierendem DPF, der mit  $\text{NO}_2$ -Überschuss arbeitet. Dies hebt die  $\text{NO}_2$ -Emissionen dieser Fahrzeuge erheblich an (Tab. 2), was aus verschiedenen Gründen bedenklich ist:  $\text{NO}_2$  ist die toxikologisch kritischere Komponente, deshalb ist seit dem 1.1.2010 ein neuer EU-weiter  $\text{NO}_2$ -Grenzwert einzuhalten. Darüber hinaus ist auch der Belästigungsgrad hoch, da  $\text{NO}_2$  in den emittierten Konzentrationen chlorähnlich stechend riecht (Helmerts 2009b). Eine Zunahme des  $\text{NO}_2$ -Anteils am  $\text{NO}_x$  in den Immissionsdaten von verkehrsbelasteten Standorten scheint sich flächendeckend für Regionen mit ansteigendem Diesel-Kfz-Verkehr zu zeigen und wurde verschiedentlich berichtet (z. B. Rabl und Scholz 2005). In Frankreich erreichen Diesel-Pkw Anteile von rund 74 % am Neuwagenverkauf (ACEA 2008). Messwerte aus Paris zeigen zwischen 1995 und 2007 einen  $\text{NO}_2$ -Anstieg von 27 % (Morin 2009).

Im Ergebnis werden wir also heute mit scheinbar widersprüchlichen Befunden konfrontiert: Sinkenden  $\text{NO}_x$ -Emissionsdaten aus Modellrechnungen einerseits stehen stagnierende bis steigende  $\text{NO}_2$ -Messdaten an Verkehrsstandorten andererseits gegenüber.

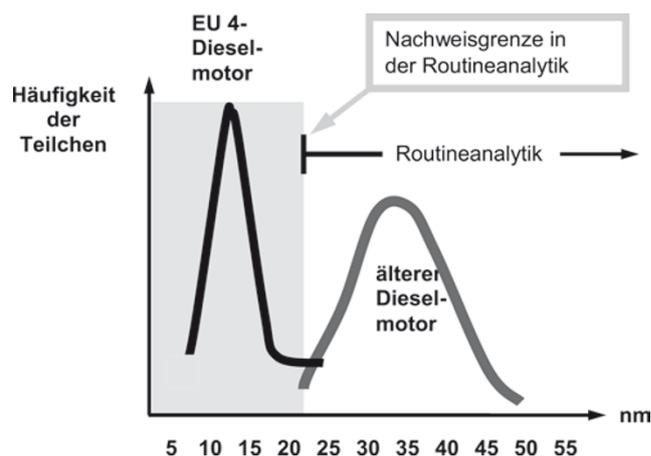
#### 4 Toxische und klimawirksame Emissionen: Feinstaub

##### 4.1 Feinstaub und Gesundheitseffekte

Zwischen benzinbetriebenen und Diesel-Pkw bestand bis zur Abgasstufe EURO-5 ein erheblicher Unterschied in der erlaubten gravimetrischen Feinstaubemission (Tab. 2). Erst mit Einführung der Abgasstufe EURO-5 (Grenzwert 5 mg/km) gerät der Diesel-Pkw in die Nähe des benzinbetriebenen, wobei letzterer im Einzelfall auch ohne Filter noch bis zu hundertfach weniger Partikelmasse emittiert. Erst bei der Direkteinspritzung am Mager-Ottomotor könnte der Partikelfilter nützlich sein, wie Messungen belegen.

Selbst bei einem Gleichstand der Emissionen wäre allerdings diejenige Technik vorzuziehen, die Emissionen erst gar nicht entstehen lässt. „End-of-the-pipe“-Ansätze (= nachgeschaltete Anlagen) führen meist zu weiteren Schwierigkeiten wie mangelnder Zuverlässigkeit, Entsorgungsproblemen und zusätzlichen Kosten. Dies wird anhand der technischen Probleme mit Dieselpartikelfiltern auf dem Markt in den vergangenen Jahren deutlich (Helmerts 2009a).

Anfang des Jahrzehnts war die Gesundheitsgefährdung durch Dieselpartikel ein wichtiges öffentliches Thema, in



**Abb. 4** Größenverteilung von ultrafeinen Dieselpartikeln (vereinfacht nach Su et al. 2004)

dessen Folge verschiedene Studien durchgeführt wurden. Epidemiologisch ließ sich nachweisen, dass grobe, feine und ultrafeine Partikel Auswirkungen auf die Mortalität und die Morbidität haben (Wichmann 2004). Hierbei zeigten sich die deutlichsten Effekte bei Partikeln der Größenordnungen  $\text{PM}_{10}$  und  $\text{PM}_{2,5}$ , wohl weil hier die meisten (gravimetrischen) Daten vorliegen. Aus medizinischer Sicht sind jedoch auch Partikelzahl und -oberfläche wichtige Faktoren. Die Partikeloberfläche und besonders die Partikelzahl kleinerer Teilchen nehmen bei gleichbleibender relativer Masse jedoch um Größenordnungen zu (Helmerts 2009a). Dieser Zusammenhang erfährt dadurch Brisanz, dass bislang allein die Partikelmasse Grundlage amtlicher Emissionsgrenzwerte für Pkw sind. Auf den Diesel-Pkw-Boom kann offenbar auch die zunehmende Zahl von in Verkehrsnähe gefundenen Nanopartikeln (Wichmann et al. 2000) zurückgeführt werden, denn moderne Dieselmotoren mit hohen Einspritzdrücken emittieren zunehmend mehr Nanopartikel (Su et al. 2004) (Abb. 4). Da moderne Diesel-Pkw bislang jedoch nur hinsichtlich ihrer Partikelmassenemissionen limitiert sind, kann es sein, dass eine gesundheitliche Belastung der Bevölkerung auch nach der Ausrüstung mit Partikelfiltern weiterbesteht. Belastbare epidemiologische Daten liegen derzeit offenbar nicht vor. Selbst die Erfassung der Partikelzahlen reicht bei Routinemethoden z. T. nicht unter rund 20 nm (Abb. 4). Aus diesem Grund ist anzunehmen, dass ein Teil des Gefährdungspotenzials von dieselemittierten Nanopartikeln derzeit im Rahmen von Routinemessungen nicht quantifizierbar ist. Nach dem Anstieg der  $\text{NO}_2$ -Emissionen durch DPF ist die Zunahme von Nanopartikeln eine weitere Folge der Regelungslücken des EU-Emissionsrechts, die bei der Weiterentwicklung von Dieselmotoren und der Abgasnachbehandlung ausgenutzt wurden.

Während die endgültige epidemiologische Bewertung des Diesel-Pkw-Booms noch an der mangelnden Verfüg-

barkeit von Ultrafeinstaubdaten scheitert, kann eine Bilanz im Hinblick auf den atmosphärischen Strahlungsantrieb gezogen werden. Entscheidend hierfür sind CO<sub>2</sub>-Emissionen (s. o.) sowie Rußemissionen.

#### 4.2 Feinstaub und globaler Strahlungsantrieb

Selbst mit Partikelfilter und bei Gleichstand der gravimetrischen Feinstaubemissionen erreicht ein Diesel-Pkw zunächst einmal nicht die gleiche Abgasqualität wie ein benzinbetriebenes Auto, da die Rußanteile im Dieselfeinstaub rund 7-mal höher liegen als im Feinstaub aus benzinbetriebenen Fahrzeugen (Tab. 2). Dieser „Black carbon“-Gehalt ist maßgeblich für die Wirkung auf das Klima.

Das Kyoto-Protokoll regelt leider keine Rußemissionen. In den aktuellen Gutachten des IPCC (Intergovernmental Panel of Climate Change) wird die Erwärmungswirkung von Ruß zudem lediglich am Rande erwähnt (IPCC 2007c).

Demgegenüber steht eine Anzahl von neueren Veröffentlichungen, die den weltweiten Rußemissionen einen erheblichen Anteil am globalen Strahlungsantrieb zuweisen. Jacobson (2007) summiert für „anthropogenic black carbon“, die Rußemissionen fossiler und biogener Brennstoffe, einen Anteil von 16 % des globalen Strahlungsantriebes. Eine größere Bedeutung hat lediglich CO<sub>2</sub> mit 48 % (Jacobson 2007). Durch die Wegnahme der Rußemissionen könne man jedoch netto 40 % der globalen anthropogen bedingten Erwärmung kompensieren (Jacobson 2007). Flanner et al. (2008) errechneten, dass ein Viertel der globalen Erwärmung seit 1750 durch Reduktion der Rußemissionen schnell zurückgeführt werden könnte. Ramanathan und Carmichael (2008) beziffern den Erwärmungseffekt von Ruß global auf bis zu 60 % des CO<sub>2</sub>-Effektes. Eine ausführliche Darstellung der Folgen eines Diesel-Pkw-Booms auf die atmosphärische Strahlungsbilanz haben wir Jacobson et al. (2004) zu verdanken. Diese Autoren modellierten, welche Folgen der mögliche Ersatz der US-amerikanischen benzinbetriebenen Pkw durch moderne europäische Diesel-Pkw im Hinblick auf den globalen Strahlungsantrieb hätte. Diese Modellierung (Jacobson et al. 2004; Jacobson 2007) geht von folgenden grundlegenden Fakten aus: Black Carbon (Ruß) aus der Verbrennung fossiler Stoffe besitzt das 3170-fache Treibhauspotenzial (GWP) von CO<sub>2</sub>, gemittelt aus den Daten für das GWP über 20 und über 100 Jahre (Jacobson 2007). Die Verweilzeit von CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre beträgt 30–50 Jahre, von Ruß jedoch nur 1–4 Wochen. 1 L Dieselmotorkraftstoff führt zu 13 % höheren CO<sub>2</sub>-Emissionen als 1 L Ottomotorkraftstoff.

Jacobsons Modellierung der Klimaauswirkungen angesichts des atmosphärischen Aufheizeffektes von Ruß fokussiert auf die Frage, welche CO<sub>2</sub>-Einsparung Diesel-Pkw gegenüber benzinbetriebenen Pkw bringen müssten, um eine Nettoabkühlung für die Atmosphäre zu bewirken. Obwohl

die geringere CO<sub>2</sub>-Emission von Diesel- gegenüber Benzin-Pkw in der Realität nicht notwendigerweise gegeben ist (s. o.), hat Jacobson solche Vorgaben in seinen Modellen gemacht und kommt zu folgenden Ergebnissen (Jacobson et al. 2004):

- Bei einem angenommenen 15 %igen Verbrauchsvorteil von Diesel-Pkw führt ein hypothetischer Dieselboom in den USA über 100 Jahre zur Erwärmung der Atmosphäre, auch wenn für die Partikelemissionen nur 6 mg/km angenommen werden, was unterhalb der schärfsten Abgasstandards der USA liegt (Tab. 2). Hinweis: Selbst in der Abgasstufe EURO 6 sollen ab 2014 in Europa etwa 5 mg Partikel/km erlaubt sein.
- Bei einem (unrealistisch) um 30 % niedrigeren Spritverbrauch von Diesel-Pkw gegenüber Benzin-Pkw führt ein Austausch aller Benziner in den USA gegen Diesel-Pkw ebenfalls über 100 Jahre zur Erwärmung der Atmosphäre, wenn die Rußemission oberhalb 25 mg/km liegt. Erst wenn nur noch 6 mg Ruß/km emittiert werden, erwärmte sich die Atmosphäre netto lediglich über die ersten 10 Jahre. Danach würde sie sich aufgrund der CO<sub>2</sub>-Einsparung abkühlen.

Aus diesen in Europa weitgehend unbekanntem Erkenntnissen von Jacobson et al. folgt weiterhin:

- Die Atmosphäre wird durch Diesel-Pkw selbst unter Berücksichtigung der derzeit schärfsten Partikelgrenzwerte (EURO 6) für ca. die ersten 10 Jahre stärker erwärmt.
- Effektiv gibt es heute keinen klimahygienischen Vorteil von Diesel-Pkw, da ein Verbrauchsvorteil von 30 % nicht realistisch ist.
- Wohl die meisten der rund 41 Mio. zusätzlichen Diesel-Pkw in der EU seit 1998 heizen in der Bilanz die Atmosphäre auf, da sie nicht über Partikelfilter verfügen. Aus den Zulassungsstatistiken der verschiedenen Emissionsstufen (EURO 3, EURO 4) geht nicht hervor, welche dieser Fahrzeuge über Partikelfilter verfügen (s. o.). Nach dem EU-4-Grenzwert sind 25 mg Partikel/km erlaubt, mit Partikelfilter werden effektiv 1–5 mg/km bei heutigen Neuwagen emittiert. 25 mg Ruß/km lassen sich nach den Jacobson-Daten in eine Klimawirkung von 170 g CO<sub>2</sub>/km umrechnen. Für die Partikelemissionen eines Diesel-Pkw mit Filter lässt sich im günstigen Fall (1 mg/km) eine Klimawirkung von rund 7 g CO<sub>2</sub>-Äquivalenten/km bilanzieren.

Das Schweizer Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft kommentierte diesen Sachverhalt bereits vor Jahren kritisch: „Das bedeutet, dass selbst für Dieselaautos, die der EURO-4-Norm entsprechen (Rußemission 25 mg/km) der Klimaeffekt noch immer negativ ist (d. h. erwärmend und nicht abkühlend, Ergänzung des Autors). ... Es entsteht damit die problematische Situation, dass eine Dieselförderung ... die Staaten dem Kyotoziel näher bringt, dem Klima aber schadet“ (BUWAL 2007).

Jacobson (2007) schlägt folgerichtig vor, primär die Rußemissionen zu reduzieren, denn dies hätte aufgrund der kurzen Lebenszeit dieser Partikel in der Atmosphäre den schnellsten klimakühlenden Effekt und gleichzeitig große Vorteile für Umwelt und Gesundheit. Der beste Weg dahin seien zunächst Benzin-Hybrid-Pkw, denn sie reduzieren die CO<sub>2</sub>-Emissionen und gleichzeitig die Rußemissionen am stärksten (Jacobson et al. 2004). Eine noch nachhaltigere Wirkung könnten in Zukunft Elektroautos haben.

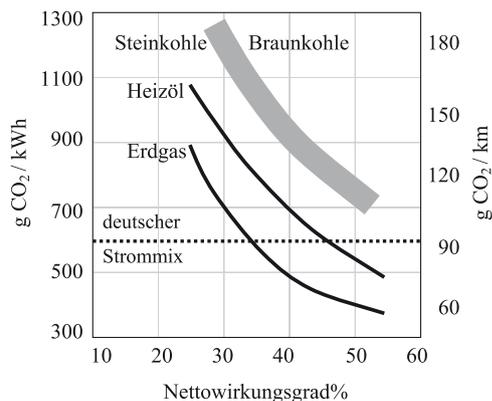
## 5 Umwelteffizienz batteriebetriebener Elektroautos

### 5.1 Indirekte CO<sub>2</sub>-Emissionen

Elektroautos werden häufig als „Nullemissionsautos“ bezeichnet. Werden sie isoliert betrachtet, entspricht dies den Tatsachen. Die Verbrennungsemissionen fehlen, es wird lediglich Schwebstaub durch Bewegung aufgewirbelt. Zudem kann es durch Bremsen zu partikulären Emissionen kommen. Da aber die Bremsenergie bei Elektroautos teilweise zurückgewonnen wird (Rekuperation), dürften auch diese Emissionen gegenüber klassischen Automobilen reduziert sein.

Durch den Wegfall der toxischen Emissionen eines Verbrennungsmotors haben Elektroautos einen enormen Vorteil besonders in Städten. Auch die Geräuschemission geht zurück. Diese Vorteile werden derzeit wenig gesehen, da die öffentliche Diskussion vom Thema „CO<sub>2</sub>“ beherrscht wird. In diesem Zusammenhang wird kritisch angemerkt, Elektroautos hätten eine hohe indirekte CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die Stromerzeugung. Die entscheidende Größe dafür ist zunächst einmal der Stromverbrauch im Betrieb. Ein Stromverbrauch von rund 15 kWh/100 km ergibt sich aus einer Marktübersicht für Elektroautos mittlerer Größe (Helmers 2009a; McKay 2009). Andere Autoren nutzen dagegen Daten aus einem Großversuch Mitte der 1990er-Jahre auf Rügen und kommen damit auf 21–24 kWh/100 km (Pehnt et al. 2009), rund 40 % mehr. Die auf Rügen eingesetzten elektrifizierten VW Golf konnten jedoch hinsichtlich ihrer Leistungsdaten bereits nicht mit den in Kalifornien eingesetzten Elektroautos der gleichen Zeit verglichen werden (Helmers 2009a). Derartige Unterschiede in den Eingangsdaten können die Ökobilanz stark verändern (s. u.).

Bei der Frage, welche Maßnahmen die großmaßstäbliche Einführung von Elektromobilität ggf. begleiten sollten, geht es zunächst um die indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen, wenn der Strom aus dem heutigen Kraftwerksmix bezogen wird. Eine Übersicht der indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen unter heutigen Bedingungen vermittelt Abb. 5. Lässt man in Deutschland Elektroautos mit Strom aus typischem Energiemix (rund 600 g CO<sub>2</sub>/kWh) fahren, werden 90 g CO<sub>2</sub> je km in den Kraftwerken fällig (Stromverbrauch 15 kWh/100 km). Dies



**Abb. 5** CO<sub>2</sub>-Emissionen fossil betriebener Kraftwerke (linke Y-Achse; nach RWTH Aachen 2008) und daraus folgend von Elektroautos bei einem Stromverbrauch von 15 kWh/100 km (rechte Y-Achse)

sind rund 40 % weniger als die sparsamsten Benziner einschließlich eines Realzuschlages von 25 % emittieren oder fast halb so viel wie der durchschnittliche Normverbrauch aller neu zugelassenen benzinbetriebenen und Diesel-Pkw in Deutschland (Abb. 3).

Selbst wenn Elektroautos mit Strom aus Braunkohle- oder Steinkohlekraftwerken betrieben würden, lägen die indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen in etwa so hoch wie bei Neuwagen des Jahres 2006 (Abb. 3 und 5). Hier fehlt allerdings der Strahlungsbilanzzuschlag (s. o.) für die Rußemissionen von Diesel-Pkw. Langfristig sollte Strom aus erneuerbaren Quellen für die Elektromobilität genutzt werden (s. u.). Aus der vorläufigen CO<sub>2</sub>-Bilanz für den Betrieb von Elektroautos mit heutigem Strom ergibt sich jedoch nicht die Notwendigkeit, bis dahin abzuwarten.

Der direkte Vergleich der CO<sub>2</sub>-Emissionen von benzinbetriebenen, von Diesel- sowie von Elektroautos aus dem Serienbau war bis heute kaum möglich. Erste Ökobilanzen verwenden, wie erwähnt, den hohen Stromverbrauch von Elektroautos der 1990er-Jahre, dem sehr niedrige Verbrauchszahlen aktueller Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor gegenübergestellt werden (Pehnt et al. 2009). Erstmals scheint ein praxisnaher Vergleich der verschiedenen Motor-techniken mit verschiedenen Versionen des Smart Fortwo möglich, der als benzinbetriebenes, als Dieselfahrzeug sowie in einer Vorserienversion als Elektrofahrzeug verfügbar ist (Tab. 3). In Tab. 3 wurden Testverbrauchswerte aus der Zeitschrift „AutoBild“ gesammelt. Bemerkenswert ist, dass diese Zeitschrift betont, man habe sich bei den Verbrauchsmessungen unter Straßenbedingungen streng an die Geschwindigkeitsvorgaben des ECE-Fahrzyklus gehalten. Diese Verbrauchsdaten werden mit dem tabellierten Normverbrauch verglichen (Tab. 3). Die CO<sub>2</sub>-Emissionen wurden dagegen aus straßennahen Daten berechnet (Tab. 3). Dieses Vorgehen ist zunächst unüblich. Wie erwähnt, liegen Normverbrauchswerte jedoch um rund 24 %, im Einzelfall sogar

**Tab. 3** Genormte und tatsächliche Emissionen: Verbrauch von fossilem Treibstoff sowie von Strom der verschiedenen Motorkonzepte des Smart Fortwo sowie korrespondierende CO<sub>2</sub>-Emissionen. Quelle der Verbrauchsdaten: AutoBild (2007–2009)

	Smart Fortwo Benziner	Smart Fortwo Diesel cdi DPF EURO 4	Smart Fortwo Diesel cdi DPF EURO 5*	Smart Fortwo ED (elektrisch)
Normverbrauch L/100 km	4,4	3,4	3,4*	–
Testverbrauch L/100 km entsprechend g CO <sub>2</sub> /km	5,7	5,5	(5,5)**	–
Testverbrauch Strom kWh/100 km	–	–	–	12
Aufschlag Strahlungsantrieb Ruß g CO <sub>2</sub> -Äquivalente/km	–	85 (entspr. 13 mg Ruß/km)	35 (entspr. 5 mg Ruß/km)	–
Summe g CO <sub>2</sub> Äquivalente/km	132	230	180	–
g CO <sub>2</sub> /km bei Kraftwerksmix Deutschland (600 g CO <sub>2</sub> /kWh)	–	–	–	71–80
g CO <sub>2</sub> /km bei erneuerbarem Strommix (30 g CO <sub>2</sub> /kWh)	–	–	–	4

\* Daimler AG 10/2009, Modelljahr 2010.

\*\* übernommen vom Messwert 2008 (EURO 4-Version).

DPF = Dieselpartikelfilter.

um 60 % (Tab. 3), unterhalb der Realdaten. Die Ergebnisse von Ökobilanzen können durch solche Abweichungen erheblich verfälscht werden.

Das Modell Smart Fortwo Diesel cdi wird als CO<sub>2</sub>-„Emissionsweltweiser“ beworben, da der Normverbrauch von 3,4 L Diesel/100 km lediglich einer CO<sub>2</sub>-Emission von 88 g/km entspricht. Tatsächlich liegt die Emission unter Straßenbedingungen mit 145 g/km um bis zu 60 % darüber. Das Fahrzeug hatte bis zum Modelljahr 2010 einen unregulierten Partikelfilter mit Emissionen von 13 mg Partikel/km (Tab. 3). Rechnet man den Strahlungsantrieb dieser Rußemissionen (Jacobson et al. 2004) als CO<sub>2</sub>-Äquivalente hinzu, resultieren 230 g CO<sub>2</sub>/km, fast dreimal mehr als in der Werbung. Das Fahrzeug des Modelljahres 2010 erfüllt EURO 5, emittiert also nur noch 5 mg Ruß/km oder weniger. Hier summieren sich, den gleichen Testverbrauch vorausgesetzt, CO<sub>2</sub>-Emissionen und CO<sub>2</sub>-äquivalente Emissionen auf 180 g/km (Tab. 3). Die enormen Unterschiede zwischen öffentlich kommunizierten Emissionen einerseits und tatsächlichen Emissionen andererseits lässt auch Teile des öffentlichen Diskurses als nicht nachhaltig (nicht zielführend) erscheinen.

Hiermit können nun die indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen der Elektroversion verglichen werden (Tab. 3): Die indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen des Elektro-Smart ED unterschreiten mit 71 g/km die direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen der aktuellen Dieselsonversion um rund 60 %, die der Benzinversion um fast 50 %. Selbst bei Strombezug aus einem Kohlekraftwerk läge die indirekte CO<sub>2</sub>-Emission des Elektro-Smart nur bei rund 108 g/km. Wegen der mit der Stromerzeugung verbundenen Feinstaubemission (Tab. 4) müssten auch dem stromtankenden Smart noch CO<sub>2</sub>-Äquivalente hinzugerechnet werden. Diese Rußanteile fallen voraussichtlich gering aus, da die Verbrennung im Kraftwerk nicht nach dem Dieselprinzip

**Tab. 4** Wichtige Schadstoffemissionen der deutschen Energiewirtschaft im Jahr 2006 (Quelle: Umweltgutachten 2008, SRU 2008) sowie daraus errechnete Schadstoffemissionen von Elektroautos bei einem Stromverbrauch von 15 kWh/100 km und im Vergleich dazu Grenzwerte für Pkw mit Verbrennungsmotor. Bruttostromerzeugung in Deutschland 2006: 636,8 Mrd. kWh (www.bdew.de)

	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	PM <sub>10</sub>
Emissionen der Energiewirtschaft in kt	281	284	11
Emissionen der Energiewirtschaft in g/kWh	0,44	0,45	0,017
Indirekte Emissionen eines Elektroautos in g/km	0,066	0,067	0,0026
Emissionsgrenzwerte für Pkw nach EURO 4 in g/km (D = Diesel, O = Ottomotor)	0,25 D 0,08 O	(0,0016)*	0,025 D – O
Emissionsgrenzwerte für Pkw nach EURO 5 in g/km (D = Diesel, B = Ottomotor)	0,18 D 0,06 O	+ 0,001–0,006**	0,005 D 0,005 O

\* „Schwefelfreier“ Kraftstoff enthält 10 ppm Schwefel oder weniger; angenommener Kraftstoffverbrauch 8 L/100 km.

\*\* Verbrennung von Schwefel aus Motoröl.

erfolgt. Eine Abschätzung auf der Basis der Daten in Tab. 4 mündet in rund 9 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente/km, womit sich insgesamt 80 g CO<sub>2</sub>/km für den Elektro-Smart ergeben. Der Aufschlag entfällt bei erneuerbarem Strombezug, der die indirekte CO<sub>2</sub>-Emission um den Faktor 20 reduzieren würde (Tab. 3).

Dies stellt keine vollständige Ökobilanz, jedoch den vielleicht wichtigsten Beitrag einer Ökobilanz dar. Eine CO<sub>2</sub>-Ökobilanz für Herstellung und Betrieb eines Elektroautos der Golf-Klasse wurde von Gauch et al. (2009) veröffentlicht und liefert die Basis für den Vergleich mit dem Smart Fortwo in Tab. 5. Gauch et al. (2009) legen für die

**Tab. 5** Ökobilanz der Treibhausgasemissionen (CO<sub>2</sub>-Äquivalente) aus dem Betrieb und der Herstellung von Elektroautos sowie Benzin-Pkw

t CO <sub>2</sub> -Äquivalente	Ottomotor Golf-Klasse*	Elektroauto Golf-Klasse*	Smart Fortwo mhd Ottomotor	Smart Fortwo elektrisch
Herstellung Fahrzeug ohne Motor/ Antrieb	3,74	3,74	(2,62)	(2,62)
Herstellung Motor/Antrieb	1,46	1,35	(1,46)	(1,35)
Herstellung Batterie	–	1,68	–	(0,56)
Betriebsemissionen nach 150 000 km	36,12	12,75	19,8**	12,0**
Summe	41,32	19,52	23,88	16,53

\* Die Literaturwerte stammen von Gauch et al. (2009) und beziehen sich auf Fahrzeuge der Golf-Klasse (EURO 4), 300 kg Batteriegewicht sowie auf 150 000 km Fahrtstrecke.

\*\* Die Betriebswerte für den Smart sind der Tab. 3 entnommen.  
In Klammern: Schätzwerte.

Stromerzeugung wie beim deutschen Strommix rund 600 g CO<sub>2</sub>/kWh zugrunde. Genaue Zahlen für CO<sub>2</sub>-Äquivalente der Herstellung des Smart Fortwo sind nicht bekannt. Auf der Basis eines um 30 % niedrigeren Fahrzeuggewichts im Vergleich zum VW Golf können jedoch 2,62 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente angenommen werden (Tab. 5). Der Smart Fortwo ED soll eine Lithiumionenbatterie von rund 100 kg Gewicht besitzen, entsprechend sind nur ein Drittel der herstellungsrelevanten Emissionen für die Batterie einzusetzen (siehe Tab. 5).

Gauch et al. (2009) summieren für das Elektroauto der Golf-Klasse auf der Basis heutigen Strommixes eine CO<sub>2</sub>-Ökobilanz, die um mehr als 50 % unter der CO<sub>2</sub>-Bilanz des benzinbetriebenen Autos vergleichbarer Größe liegt (Tab. 5). Die höheren Emissionen bei der Produktion eines Elektroautos aufgrund der aufwendigen Herstellung der Lithiumbatterie werden also durch die wesentlich geringeren Emissionen beim Strombetrieb ausgeglichen. Im Vergleich dazu kommt der elektrisch betriebene Smart auf ein Drittel weniger CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Ökobilanz im Vergleich zum Smart mhd (Tab. 5). In diesem Vergleich dominieren die betriebsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen die Gesamtbilanz stark. Der Stromverbrauch eines Elektroautos der Golf-Klasse (Gauch et al. 2009) scheint im Vergleich zum Smart ED recht niedrig zu sein. Ohne die Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-äquivalenten Klimaaufschlags aus der Rußemission der Stromerzeugung läge die CO<sub>2</sub>-Betriebsbilanz des Elektro-Smart ED nach 150 000 km allerdings nur bei 10,7 t. Pehnt et al. (2009) verwenden mit bis zu 24 kWh/100 km einen doppelt so hohen Stromverbrauch für ein Elektroauto und bewerten die Ökobilanz erwartungsgemäß anders: Elektrofahrzeuge mit so hohem Stromverbrauch können bei Bezug von heutigem deutschem Strommix gegenüber modernen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor keine CO<sub>2</sub>-Emissionsvorteile mehr haben.

Die Diskrepanz der diskutierten Stromverbräuche von Elektroautos (meist zwischen 13 und 24 kWh/100 km) könnte wesentlich auf die unterschiedliche Effizienz der

verwendeten Ladeinfrastruktur zurückgehen. Ladegeräte von Vorserienfahrzeugen der Autoindustrie zeigen aktuell Verluste zwischen etwa 5 und 40 % (entnommen aus Testberichten der Automobilpresse 2010). Das bedeutet, dass zwischen 5 und 40 % des verbrauchten Stroms nicht in der Batterie des Elektrofahrzeugs ankommen. Diese Zahlen zeigen a) dass derzeitige Berechnungen zur Umwelteffizienz von Elektrofahrzeugen vorläufig sind und hinsichtlich der Ladeeinrichtungen zukünftig genormt werden sollten sowie b) dass eine Optimierung der Ladeinfrastruktur dringend erforderlich ist.

In einem weiteren Schritt wird von Pehnt et al. (2009) die Ökobilanz des Betriebs von Elektroautos im Hinblick auf Versauerungspotenziale betrachtet. Hierbei liegt ein konventionelles Ottomotorfahrzeug auf gleicher Höhe oder sogar günstiger als ein Elektroauto, wenn dieses mit deutschem Strommix (2006) betrieben wird. Dabei werden allerdings nur SO<sub>2</sub>-Emissionen bilanziert (Pehnt et al. 2009), wobei die indirekten Emissionen von Elektroautos auch nach eigener Abschätzung höher liegen (Tab. 4). Hinzu kommen Versauerungseffekte durch NO<sub>x</sub>-Emissionen, die für Benzin-Pkw und Elektroautos vergleichbare Größenordnungen haben (Tab. 4). Pehnt et al. (2009) berechnen zusätzlich ein gewichtiges Versauerungspotenzial als Folge der aufwendigen Batterieherstellung für ein Elektrofahrzeug. In solche Bilanzierungen sollte allerdings mit eingehen, dass die aus dem Leicht- und Mitteldestillat der Rohölfractionierung und -konversion (ergibt Benzin und Dieseltreibstoff) abgetrennten Schwefelanteile sich im Schweröl wiederfinden und bei dessen Verbrennung, etwa in Schiffsmotoren, dennoch der Atmosphäre zugeführt werden können.

Aufgrund der hier vorgestellten Zahlen ist fraglich, ob es sinnvoll ist, eine zunehmende Zahl von Elektroautos zukünftig mit einem höheren Anteil erneuerbarer Stromerzeugung zu verbinden, da hiermit die größten Nachhaltigkeits-effekte (Emissionsreduktionen) erzielt werden. Ein Zwang, jedes zukünftig zugelassene Elektroauto mit dem Bezug von Strom aus erneuerbaren Quellen zu koppeln, ist aus der

vorläufigen CO<sub>2</sub>-Ökobilanz (Tab. 5) jedoch nicht zu begründen. Möglicherweise könnte die geforderte Kopplung mit erneuerbarem Strombezug (Pehnt et al. 2009) sogar eine breite Elektromobilität verhindern oder verzögern, weil der Strombezug in diesem Fall an besondere Dienstleistungen geknüpft und damit möglicherweise teurer werden könnte. Der Betriebskostenvorteil von Elektroautos gegenüber Pkw mit Verbrennungsmotoren könnte jedoch ein wichtiger Kaufanreiz auf breiter Ebene zu sein, solange Elektroautos wesentlich teurer als konventionelle Pkw sind. Dies gilt insbesondere in Deutschland, wo – im Unterschied zu umliegenden Ländern – derzeit keine direkten Kaufanreize geplant sind.

## 5.2 Weitere indirekte Emissionen von Elektroautos (NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>)

Im Vorgesagten wurden die hohen Stickoxid- und Feinstaubemissionen von Diesel-Pkw kritisiert. Bezieht man Strom für Elektroautos aus heutigem Strommix, fallen diese Schadstoffe indirekt ebenso an. Ein wichtiges Element einer Ökobilanz ist deshalb ihre Quantifizierung. Hierbei werden im Folgenden nur Gesamtbilanzen vorgestellt. Großkraftwerke haben Auslasshöhen von >100 m, weswegen die Immissionswirksamkeit für die Bodenluft durch ein spezielles Modell vorhergesagt werden müsste.

Die Übersicht in Tab. 4 zeigt, dass die indirekten Emissionen eines Elektroautos bei NO<sub>x</sub> und PM<sub>10</sub> bis einschließlich EURO 5 niedriger sind als die direkten Emissionen eines Diesel-Pkw. Beim Vergleich der Emissionen von Elektroauto und benzinbetriebenen Pkw gibt es nach den Emissionsgrenzwerten einen relativen Gleichstand bei NO<sub>x</sub> und Vorteile des Elektroautos bei PM<sub>10</sub>. Die tatsächlichen Feinstaubemissionen benzinbetriebener Pkw können im Einzelfall jedoch auch hundertfach niedriger liegen (Tab. 2). Insgesamt fallen lediglich die indirekten Schwefelemissionen der Elektromobilität in diesem Vergleich höher aus, wobei die Datengrundlage beim diesel- und benzinbetriebenen Fahrzeug nicht Grenzwerte, sondern Rückstände aus dem inzwischen schwefelarmen Kraftstoff und der Verbrennung von Motoröl sind. Motoröl enthält rund 1 % Schwefel. Der Verlust an Motoröl wurde mit 0,1–0,6 mL/km angesetzt. Der Fahrzeughersteller Adam Opel GmbH (2002) gibt einen Verlust von 0,6 L/1000 km an. Unsicherheiten bestehen hinsichtlich der Frage, welcher Anteil des Motoröls auf den Boden tropft und welcher Anteil über schadhafte Dichtungen in den Verbrennungsraum gelangt. Dadurch wäre auch die Ermittlung externer Schadenskosten der Schwefelemissionen von Kfz mit Unsicherheiten behaftet. Bei der Stromerzeugung liegen die externen Schadenskosten der SO<sub>2</sub>-Emissionen auf der Höhe der Schadenskosten der NO<sub>x</sub>-Emissionen (Krewitt 2007). Zu den Zahlen in Tab. 4 ist weiterhin anzumerken, dass die Kraftwerksemis-

sionen durch moderne Abgasreinigungsverfahren weiter erheblich gesenkt werden können, insbesondere bei den NO<sub>x</sub>-Emissionen.

## 6 Externe Schadenskosten der Emissionen

Ein weiterer Ansatz im Sinne einer Ökobilanzierung besteht in der Einbeziehung der externen Kosten von Schadstoffemissionen (Krewitt 2007). Mit einem solchen Ansatz gelingt es, für diesel- und benzinbetriebene Pkw sowie auf der Basis indirekter Emissionen für Elektroautos (Tab. 4) jeweils Kosten von Gesundheitsschäden und Klimawandel abzuschätzen. Analog zu den für CO<sub>2</sub> abgeschätzten Aufwendungen (Krewitt 2007) gehen in die hier vorgestellten Zahlen auch die zusätzlichen Klimawandelkosten nach Jacobson für Rußemissionen ein (Umrechnung in CO<sub>2</sub>-Äquivalente s. o.). Den Feinstaubemissionen liegen Annahmen nach Tab. 2 und 4 zugrunde.

Aufgrund der unterschiedlichen NO<sub>x</sub>- und Feinstaubemissionen von benzinbetriebenen und Diesel-Pkw sind die Schadenskosten für benzinbetriebene Pkw (Helmers 2009a) niedriger: Insgesamt hat die Gesellschaft für einen aktuellen Diesel-Pkw (EURO 5) etwa 1,1–2,7 Ct. an externen Folgekosten je km aufzuwenden. Legt man EURO-4-Partikelgrenzwerte zugrunde, sind es 1,5–3,7 Ct./km. Mit EURO-3-Emissionen resultieren 2–4,9 Ct./km. Dies entfernt sich weit von den externen Folgekosten der Benzin-Pkw in Höhe von 1,4 Ct./km, besonders in der Hybridversion (Toyota Prius II) in Höhe von rund 0,8 Ct./km (Helmers 2009a).

Die nahezu 3 Mio. Diesel-Pkw, die bereits bis Ende 2005 zusätzlich zum langjährigen Mittel auf deutsche Straßen gebracht wurden, mussten nur einen Grenzwert von 50 mg Feinstaub je km unterschreiten (EURO 3). Die meisten verfügen nicht über einen serienmäßigen Partikelfilter. Hier summieren sich die externen Folgekosten nur für den Ruß auf 1 bis 2,5 Ct./km. Fahren 3 Mio. dieser Autos pro Jahr jeweils 15 000 km, ergibt sich eine Schadenssumme von 0,44 bis 1,1 Mrd. Euro allein infolge der Rußemissionen.

Aus den Zahlen der indirekten CO<sub>2</sub>- und toxischen Schadstoffemission von Elektrofahrzeugen (Tab. 4) können nun mögliche Umwelt- und Gesundheitsvorteile von Elektromobilität berechnet werden. Die emissionsbedingten externen Schadenskosten belaufen sich bei Elektroautos auf 0,66 Ct./km und können damit gegenüber benzinbetriebenen Pkw ohne Hybridtechnik in etwa halbiert werden (Helmers 2009a). Die Umwelt- und Gesundheitskosten von Diesel-Pkw (EURO 4) liegen einschließlich Klimafolgekosten rund viermal höher als diejenigen von Elektroautos. Es wird aber auch klar, dass die CO<sub>2</sub>-Klimafolgekosten beim Betrieb von Elektroautos mit 0,63 Ct./km dominieren (Helmers 2009a). Hieraus ergibt sich ein weiterer Ansporn zum Einsatz erneuerbarer Energiequellen.

Im Sinne einer Ökobilanz ist die numerische Gegenüberstellung der direkten Schadstoffemissionen von Verbrennungsmotor-Pkw einerseits und der indirekten Schadstoffemissionen von Elektroautos, die mit heutigem Strommix betrieben werden, zwar ein erster Schritt, jedoch unvollständig. Entscheidend ist, dass die durch die Stromproduktion verursachten Schadstoffemissionen nicht im unmittelbaren Lebensumfeld von Menschen anfallen, wie es bei Autos der Fall ist. Messungen unmittelbar im Verkehr zeigen, dass enorm hohe Feinstaub- und Stickoxidgehalte erreicht werden (Morin 2009), die insbesondere Kraftfahrer sowie weitere Personen gefährden, die als Anwohner oder Arbeitnehmer dauerhaft den Emissionen in Straßennähe ausgesetzt sind.

So unterschätzen diese oben präsentierten Zahlen erneut die positive Gesundheitswirkung von Elektroautos, weil ihre Emissionen und diejenigen von Pkw mit Verbrennungsmotoren vereinfachend gleich behandelt werden. Ökobilanzen sollten aber wesentlich auf den Menschen fokussiert sein, denn: „Verkehrsbedingte Verschmutzung wirkt sich ... direkt auf unsere Gesundheit aus. Fast 25 % der Bevölkerung in den EU-25-Mitgliedstaaten wohnen weniger als 500 Meter von einer Straße entfernt, die ein jährliches Verkehrsaufkommen von über 3 Millionen Fahrzeugen aufweist. Folglich ... gehen jährlich an die 4 Millionen Lebensjahre aufgrund der hohen Luftverschmutzung verloren“ (EEA 2007).

## 7 Fazit

In der über 100-jährigen Geschichte des Automobilserienbaus hat es nur vereinzelt grundlegende Innovationen gegeben (Helmers 2009a). Die Technologie des Verbrennungsmotors auf der Basis fossiler Treibstoffe dominiert bis heute ungebrochen. Dies ist aufgrund der Umwelt- und Gesundheitskosten und angesichts der weltweit zunehmenden Automobilität zukünftig weder akzeptabel, noch ist es angesichts der schwindenden Ressourcen an fossilen Treibstoffen durchzuhalten. Der breite europäische Trend zum Diesel-Pkw hat es Regierungen und Autoindustrie erlaubt, Erfolge im Hinblick auf eine CO<sub>2</sub>-Reduktion zu errechnen. Jedoch ist nicht nur die Plausibilität einer realen CO<sub>2</sub>-Reduktion anzuzweifeln, der Diesel-Pkw-Boom hat weiterhin erhebliche zusätzliche toxische Emissionen zur Folge. Eine Abkühlung der Atmosphäre hat durch den Diesel-Pkw-Boom bis zur Einführung des Dieselpartikelfilters (DPF) nicht stattgefunden, selbst mit DPF steht sie infrage.

Mit Elektromobilität scheint jedoch die Perspektive einer erheblichen Effizienzsteigerung im Sinne eines Ressourcen-, Gesundheits- und Umweltschutzes verbunden zu sein. Elektroautos sind umso umwelteffizienter, je mehr Strom aus erneuerbaren Ressourcen getankt wird. Vor dem Jahr

2020 ist jedoch nicht mit einem erheblichen Anteil an Elektroautos bei der Zulassung von Neuwagen zu rechnen. Im Jahr 2020 werden nach heutiger Planung bereits über 30 % des Stroms aus erneuerbaren Quellen stammen. Elektromobilität braucht deshalb nicht als Hebel für mehr erneuerbare Stromerzeugung eingesetzt zu werden.

**Danksagung** Der Autor dankt László Kacsóh für seine detaillierten Anregungen und Ergänzungen zu diesem Manuskript sowie Almut B. Heinrich für über 10 Jahre inspirierende Zusammenarbeit im Rahmen der „Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung“.

## Literatur

- ACEA (2008) The automobile industry pocket guide 2008. European automobile manufacturers association (ACEA)
- AG Energiebilanzen (2008) <http://www.ag-energiebilanzen.de/view-page.php?idpage=66>. Zugegriffen: 10. 1. 2010
- Beijing traffic management bureau (2009) <http://www.bjtgl.gov.cn/publish/>
- BMU (2005a) Versauerung, Eutrophierung und Ozonsmog im Visier. Bundesministerium für Umwelt. [www.bmu.de/files/.../hintergrund\\_multikomponentenprotokoll.pdf](http://www.bmu.de/files/.../hintergrund_multikomponentenprotokoll.pdf)
- BMU (2005b). Unerwartet geringe Abnahme bzw. Zunahme der NO<sub>2</sub>-Belastung. Erste Analysen der Ursachen des Trends und Auswirkungen verschiedener Technologien auf die NO<sub>2</sub>-Emissionen von Kraftfahrzeugen. Information des BMU, Referat IG 1 3 – Gebietsbezogene Luftreinhaltung
- BMU (2007) Verkehr und Umwelt – Herausforderungen. Broschüre des deutschen Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin Bonn
- BMU (2010) Verkehr und Umwelt – Herausforderungen. Weniger Treibhausgasemissionen auf der Straße, mehr im Flugverkehr. [http://www.bmu.de/verkehr/herausforderung\\_verkehr\\_umwelt/doc/print/40764.php](http://www.bmu.de/verkehr/herausforderung_verkehr_umwelt/doc/print/40764.php)
- BUND (2007) Deutsche Autohersteller und die Reduzierung von CO<sub>2</sub> bei Neuwagen. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland, Berlin
- BUWAL (2007) Dieselförderung und Klimaschutz. Einige Fakten zum Thema. [www.bafu.admin.ch/luft/](http://www.bafu.admin.ch/luft/)
- Flanner MG, Zender CS, Hess PG, Mahowald NM, Painter TH, Ramanathan V, Rasch PJ (2008) Springtime warming and reduced snow cover from carbonaceous particles. *Atmos Chem Phys Discuss* (8):19819–19859
- EEA (2007) Pressemitteilung der Europäischen Umweltagentur EEA vom 26. 2. 2007
- EEA (2010) European Environmental Agency. Estimated share of pre Euro/conventional and Euro I–V gasoline and diesel passenger cars and light-duty vehicles. Veröffentlicht am 12. September 2009. <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/term34-estimated-share-of-pre-euro-conventional-and-euro-i-v-gasoline-and-diesel-passenger-cars-and-light-duty-vehicles>
- Gauch M, Widmer R, Notter D, Stamp A, Althaus HJ, Wäger P (2009) Life Cycle Assessment of Li-Ion batteries for electric vehicles. <http://www.cars21.com/files/news/LCApresenation.pdf>. Zugegriffen: 7. 2. 2010
- Helmers E (2009a) Bitte wenden Sie jetzt – das Auto der Zukunft. Wiley-VCH, Weinheim
- Helmers E (2009b) Partikelmessungen, Abgasgrenzwerte, Stickstoffoxide, Toxikologie und Umweltzonen. 12th ETH Conference on Combustion Generated Nanoparticles. Zürich, 23.–25. Juni 2008. UWSF – Z Umweltwiss Schadst Forsch 21:118–123
- Höpfner U, Knörr W, Lambrecht U (2004). TREMOD – Energieverbrauch und Emissionen aus dem Verkehr in Deutschland. Work-

- shop „UGR zum Thema Verkehr und Umwelt“ Statistisches Bundesamt und BMU, Berlin, 2. Juni 2004 (pdf)
- IPCC (2007a) Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. Kap 5, Transport and its infrastructure. [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data](http://www.ipcc.ch/publications_and_data)
- IPCC (2007b) Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. Technical summary. [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data](http://www.ipcc.ch/publications_and_data)
- IPCC (2007c) Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. Kap 3, Issues related to mitigation in the long-term context. [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data](http://www.ipcc.ch/publications_and_data)
- Jacobson MZ (2007) Testimony for the Hearing on Black Carbon and Global Warming. United States House of Representatives, 18. Oktober 2007. [http://www.stanford.edu/group/efmh/jacobson/101807\\_testimony.htm](http://www.stanford.edu/group/efmh/jacobson/101807_testimony.htm) (pdf)
- Jacobson MZ, Steinfeld JH, Carmichael GR, Streets DG (2004) The effect on photochemical smog of converting the U. S. fleet of gasoline vehicles to modern diesel vehicles. *Geophys Res Lett* (31) L02116
- Kacsóh L (2010) Bitte lesen Sie jetzt. Buchbesprechung. *Umweltwiss Schadst Forsch* 22:56f
- Kraftfahrtbundesamt (2008a) Pressemitteilung Nr. 4/2008
- Kraftfahrtbundesamt (2008b) [www.kba.de](http://www.kba.de)
- Krewitt W (2007) Die externen Kosten der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Vergleich zur fossilen Stromerzeugung. *Umweltwiss Schadst Forsch* 19(3):144–151
- Kurtenbach R, Becker K-H, Bruckmann P, Kleffmann J, Niedojadlo A, Wiesen P (2008) Das innerstädtische NO<sub>2</sub>-Problem: Welchen Einfluß haben direkte Verkehrsemissionen? *Mitt Umweltchem Ökotox* 14(3):69–73
- Luhmann H-J (2009) Der Verband der Automobilindustrie im Jahresbericht 2009 zur angestrebten Novellierung des europäischen NEFZ. *Wuppertal-Bull* 12:22
- Lutz M (2004) Abatement programs in urban areas and their interlinkage to European strategies. Vortrag beim Workshop on Review and Assessment of European Air Pollution Policies, Gothenburg, Sweden, 25.–27. Oktober 2004
- McKay D (2009) Sustainable Energy – without the hot air. Part II: Making the difference. [www.withouthotair.com](http://www.withouthotair.com)
- Mayer A (2004) Einführung. In: Meyer A (Hrsg) Minimierung der Partikelemissionen von Verbrennungsmotoren. Expert, Renningen, S 1–18
- Meyer I, Wessely S (2009) Fuel efficiency of the Austrian passenger vehicle fleet – analysis of trends in the technological profile and related impacts on CO<sub>2</sub> emissions. *Energy Policy* 37:3779–3789
- Morin J-P (2009) The exposition of vehicle drivers and passengers to toxic air contaminants. Vortrag, 13th ETH conference on combustion generated nanoparticles, Zürich, 22.–24. Juni 2009
- Ö-UBA (2008) Auswirkungen der NO<sub>2</sub>-Emissionen bei Diesel-Kfz auf die Immissionsbelastung. Report Rep-0135, Österr. Umweltbundesamt, Wien
- Ö-UBA (2009) Österr. Umweltbundesamt: Emissionstrends 1990–2007, Wien. [http://www.umweltbundesamt.at/umweltschutz/verkehr/auswirkungen\\_verkehr/verk\\_schadstoffe/Stickstoffoxide/](http://www.umweltbundesamt.at/umweltschutz/verkehr/auswirkungen_verkehr/verk_schadstoffe/Stickstoffoxide/)
- Pastowski A (2007) Vom ungebremsten Wachstum zur Entkoppelung von Wirtschaftswachstum und Transportleistung. Vortrag, München, 19. Oktober 2007
- Peht M, Helms H, Lambrecht U, Lauwigi C, Liebich A (2009) Umweltbewertung von Elektrofahrzeugen. Erste Ergebnisse einer umfassenden Ökobilanz. VDI-Berichte „Elektronik im Kraftfahrzeug“, im Druck
- ProgTrans (2009) European Transport Report 2007/2008. <http://www.cleaner-production.de/en/green-tech-atlas/green-tech-leitmaerke/leitmarkt-mobilitaet/>
- Rabl P, Scholz W (2005) Wechselbeziehungen zwischen Stickoxid- und Ozon-Immissionen. Datenanalysen aus Baden-Württemberg und Bayern 1990–2003. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz und Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
- Ramanathan V, Carmichael G (2008) Global and regional climate changes due to black carbon. *Nat Geosci* 1:221–227
- RWTH Aachen (2008)
- Schöllner O, Canzler W, Knie A (Hrsg) (2007) *Handbuch Verkehrspolitik*. Verlag für Sozialwissenschaften
- Schubert U, Sonntag A (2009) Klimapolitik ganzheitlich denken. Zur gesamtwirtschaftlichen Bewertung von Klimaschutzmaßnahmen. *Ökol Wirtsch* 2:47–50
- SRU (2008) Deutscher Sachverständigenrat für Umweltfragen. Umweltgutachten 2008. Umweltschutz im Zeichen des Klimawandels. Hausdruck
- Su DS, Müller J-O, Jentoft RE, Rothe D, Jacob E, Schlögel R (2004) Fullerene-like soot from EUROIV diesel engine: consequences for catalytic automotive pollution control. *Top Catal* 30/31:241–245
- UBA (2009a) Nationaler Inventarbericht zum deutschen Treibhausgasinventar 1990–2007. Umweltbundesamt, Dessau
- UBA (2009b) Hintergrund: Auch im Jahr 2008 Überschreitung der Grenzwerte für die Luftqualität. Umweltbundesamt, Dessau. <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/fpdf-1/3596.pdf>. Zugriffen: 21.1.2009
- UBA (2010) <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/>
- VDI-Nachrichten (2009) 13. 2. 2009
- Wichmann HE (2004) Positive gesundheitliche Auswirkung des Einsatzes von Partikelfiltern bei Dieselfahrzeugen – Risikoabschätzung für die Mortalität in Deutschland. *Umweltmed Forsch Prax* 9(2):85–99
- Wichmann HE, Spix C, Tuch T, Wölke G, Peters A, Heinrich J, Kreyling WG, Heyder J (2000) Daily Mortality and Fine and Ultrafine Particles in Erfurt, Germany, Part I: Role of Particle Number and Fine Mass. *HEI-Report*, Cambridge MA, 98:1–96