

Future Diesel

**Abgasgesetzgebung Pkw, leichte Nfz und Lkw –
Fortschreibung der Grenzwerte bei Dieselfahrzeugen**

Umweltbundesamt, Berlin

Juli 2003

Future Diesel

**Abgasgesetzgebung Pkw, leichte Nfz und Lkw –
Fortschreibung der Grenzwerte bei Dieselfahrzeugen**

0.	Zusammenfassung.....	5
1.	Einführung.....	9
2.	Abgasgesetzgebung – Vergleich USA, Japan und Europa.....	10
2.1	Diesel-Pkw	11
2.2	Nutzfahrzeugmotoren	14
2.3	Consent Decree in den USA.....	17
2.4	Folgerungen.....	17
3.	Gesundheitliche und ökologische Begründung für eine weitere Verschärfung der Abgasgrenzwerte	18
3.1	Immissionssituation und EU-Emissionsminderungsziele	18
3.2	Nationale Immissionsminderungsziele.....	21
3.3	Wirkung von NOx-Emissionen.....	22
3.4	Wirkung von Diesel-Abgas, Auswirkung des Einsatzes von Partikelfiltern.....	22
3.5	Klimawirkung von Dieselpartikeln	29
3.6	Entwicklung des Fahrzeugbestandes und der Fahrleistungen.....	30
3.7	Entwicklung der Schadstoffemissionen des Straßenverkehrs	33
3.7.1	Neue Erkenntnisse zu den Emissionsfaktoren von Nutzfahrzeugen.....	33
3.7.2	NOx-Emissionen	35
3.7.3	Partikelemissionen.....	37
3.8	Folgerungen.....	39
4.	Emissionsminderungspotential bei Dieselmotoren.....	41
4.1	NOx-Emissionsminderung (Pkw, Nutzfahrzeuge).....	42
4.2	Partikelemissionsminderung	49
4.2.1	Diesel-Pkw	49
4.2.2	Direkteinspritzende Ottomotoren (GDI, FSI)	52
4.2.3	Nutzfahrzeugmotoren	53
4.3	Grenzwerte für Nutzfahrzeugmotoren in den USA ab 2007	54
4.4	Kosten der Emissionsminderung.....	55
4.4.1	Diesel-Pkw	55
4.4.2	Nutzfahrzeugmotoren	56
4.5	Folgerungen.....	58

5.	Methodisches Vorgehen bei der Begrenzung der Partikelemissionen	60
5.1	Particle Measurement Programme (PMP).....	63
5.2	Erreichbare Messgenauigkeit der Gravimetrie.....	65
5.3	Folgerungen.....	67
6.	Vorschläge für eine zukünftige Abgasgesetzgebung	68
6.1	Pkw und leichte Nutzfahrzeuge	68
6.2	Nutzfahrzeugmotoren	71
7.	Quellen:	75

0. Zusammenfassung

Die europäische Abgasgesetzgebung hat mit Verabschiedung der Grenzwertstufen bis einschließlich EURO 4 für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge sowie EURO V für Nutzfahrzeugmotoren entscheidende Fortschritte erreicht. Die Notwendigkeit einer Fortschreibung der Abgasgrenzwerte besteht in erster Linie für Fahrzeuge mit Dieselmotoren.

Artikel 3 der Richtlinie 98/69/EG (Pkw, leichte Nutzfahrzeuge), der gemeinsame Standpunkt des Rates zur Richtlinie 99/96/EG (Nutzfahrzeugmotoren) sowie die Schlussfolgerungen des Umweltrates vom 18./19.12.2000 zur Auswertung des Auto-Öl-Programms II enthalten entsprechende an die Kommission gerichtete Aufträge. Die Kommission hat in einer Note vom 11.02.2003 zum Thema „Concept of Enhanced Environmentally Friendly vehicles (EEV) for light vehicles“ erklärt, dass sie sich nunmehr mit einer Fortschreibung der Abgasgrenzwerte für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge befassen werde.

In Deutschland hat sich der Anteil der Diesel-Pkw an den Neuzulassungen in den vergangenen Jahren mehr als verdoppelt. Er hat inzwischen fast 40 % erreicht. Die Entwicklung der Partikelemissionen zeigt, dass der stark steigende Anteil der Diesel-Pkw bis 2020 zu einer Erhöhung der Partikelemissionen aus Pkw um den Faktor 2,3 und damit zu einer Erhöhung der Partikelemissionen des Straßenverkehrs gegenüber den früheren Annahmen um den Faktor 1,6 führt. An verkehrsnahen Immissionsmessstellen ist keine der bisherigen Senkung der Abgasgrenzwerte entsprechende Minderung der Feinstaub-Immissionen erkennbar. Hier besteht ein Handlungsbedarf.

Im Hinblick auf die Luftreinhaltung wird zur Zeit das Problem der Feinstaubemissionen diskutiert. Die Weltgesundheitsorganisation, die EU-Kommission sowie der National Research Council und die Umweltbehörde der USA stellen die Feinstäube als eine der gegenwärtig vorrangigen umwelthygienischen Schwerpunktthemen in Europa und USA heraus. Auch gibt es Hinweise auf kanzerogene Wirkungen. Aus Gründen des Gesundheitsschutzes ist für den Dieselmotor die technisch mögliche Partikelminderung von weit über 90 % zu fordern.

In Deutschland versterben pro Jahr insgesamt ca. 800 000 Menschen (alle Todesursachen). Nach einem Gutachten von Prof. Wichmann, GSF Neuherberg, sind von diesen Todesfällen ca. 1 bis 2 % den Kfz-Abgasen aus Dieselfahrzeugen als vorzeitige Todesfälle zuzuordnen. Durch die Reduktion der Partikelemissionen als Maßnahme zur Gefahrenabwehr, zum Beispiel durch Partikelfilter, ließe sich zum überwiegenden Teil verhindern, dass diese Personen vorzeitig versterben. Der Einsatz von Partikelfiltern lässt damit gegenüber der gegenwärtigen Situation eine mittlere Verlängerung der Lebenserwartung aller Menschen in Deutschland um 1 bis 3 Monate erwarten.

Bezüglich der NO_x-Emissionen haben moderne Diesel-Pkw im Vergleich zum „Benziner“ einen erheblichen Nachteil. Sie emittieren acht bis zehnmal mehr Stickoxide, die u. a. zur Bildung des gesundheitsschädlichen Sommersmogs beitragen. Der NO_x-Grenzwert EURO 4 für Diesel-Pkw ist etwa dreimal so hoch wie derjenige für Otto-Pkw.

Elektronische Einspritzsysteme in Schweren Nutzfahrzeugen – eingeführt ab der Grenzwertstufe EURO II – ermöglichen unterschiedliche Einspritzstrategien in den verschiedenen Bereichen des Motorkennfeldes. Neuere Untersuchungen haben gezeigt, dass EURO II-Motoren außerhalb des im gesetzlichen Prüfzyklus gefahrenen Kennfeldbereiches vielfach gezielt auf den spezifischen Verbrauch hin optimiert werden. Dies bewirkt dann im Gegenzug einen erheblichen Anstieg der Stickoxid-Emissionen. Die Folge: Für das Jahr 2003 liegt der mittlere NO_x-Emissionsfaktor der

Schweren Nutzfahrzeuge um etwa 40% höher als bisher angenommen wurde, was einer zusätzlichen Deckungslücke in der Größenordnung von 115.000 t NO_x im Jahr 2010 entspricht.

Die Richtlinie 1999/96/EG über Maßnahmen gegen die Emissionen von Nutzfahrzeugmotoren sieht eine Grenzwertstufe EURO V mit einem NO_x-Grenzwert von 2,0 g/kWh vor, der ab 2008 für die Erteilung der Betriebserlaubnis für neue Motortypen gilt. Im Rahmen der Berechnungen zum Maßnahmenplan der Bundesregierung zur Einhaltung der NEC-Richtlinie 2001/81/EG hat sich eine weitere Halbierung dieses Grenzwertes auf 1,0 g/kWh als notwendige Maßnahme mit dem absolut höchsten NO_x-Minderungspotential erwiesen. Dies ist bei der Überprüfung des EURO V-Grenzwertes durch die EU-Kommission zu berücksichtigen, zumal in anderen europäischen Ländern ähnliche Verhältnisse vorliegen. Dieser Anpassung muss eine weitere Senkung des NO_x-Grenzwertes für Nfz-Motoren auf 0,5 g/kWh ab 2010 folgen.

In den vergangenen Jahren wurden die Partikelemissionen von Dieselmotoren in Pkw und Nutzfahrzeugen durch motorische Maßnahmen, d.h. durch die Verbesserung der Verbrennung, bereits erheblich gemindert. Zur knappen Einhaltung der ab 2005 für die Typprüfung gültigen EURO 4/EURO IV-Grenzwerte für Diesel-Pkw und für Nutzfahrzeugmotoren kommen- abhängig vom heutigen Ausgangszustand - weitere motorische Maßnahmen in Betracht, die eine Partikelemissionsminderung in der Größenordnung von 30 bis 50 % bewirken können. Eine weitergehende Partikelminderung ist dagegen nach heutigem Stand nur durch eine Abgas-Nachbehandlung, d.h. durch den Partikelfilter möglich. Die nachgewiesenen Minderungsraten liegen bezüglich der Partikelmasse weit über 90 % und bezüglich der Partikelzahl werden 99,999 % erreicht. Dies wurde für eine Reihe verschiedener Partikelfilter-Systeme nachgewiesen.

Für Diesel-Pkw wird das Inkrafttreten der EURO 4-Grenzwerte ab 2005 nur teilweise zum Einsatz der Partikelfiltertechnik führen. Laut Veröffentlichungen der deutschen Pkw-Hersteller werden kleine und mittlere Diesel-Pkw mit Schaltgetriebe ohne Partikelfilter auskommen, während von mittleren Diesel-Pkw mit Automatikgetriebe an aufwärts und bei schwereren Diesel-Pkw vermutlich Partikelfilter erforderlich sind.

Die Firma Toyota erprobt seit März 2002 die Kombination von NO_x-Speicherkatalysator und Partikelfilter unter der Bezeichnung DPNR im Feldeinsatz in mehreren europäischen Ländern und plant die Serieneinführung in der zweiten Jahreshälfte 2003. Welche Emissionswerte mit der endgültigen Auslegung des DPNR-Systems für den europäischen Markt erreicht werden, stand im Juni 2003 noch nicht fest. Das UBA geht davon aus, dass das DPNR-System das technische Potential bietet, die in diesem Bericht vorgeschlagenen Grenzwerte einzuhalten.

International hat der PSA Peugeot Citroën-Konzern im Jahr 2001 ca. 135.000 Fahrzeuge mit serienmäßigem Partikelfilter (sog. FAP-Technologie) verkauft, im Jahr 2002 waren es bereits rund 270.000 Exemplare. 2004/2005 wird bei PSA mit rund 1 Mio. Zulassungen von Fahrzeugen mit FAP-Technologie gerechnet.

Im Mai 2003 wurden insgesamt 14 Pkw-Typen mit Partikelfilter von französischen und italienischen Herstellern angeboten. Für weitere 20 Pkw-Typen, auch von deutschen Herstellern, wurde die Einführung des Partikelfilters für den Herbst 2003 oder für Anfang 2004 angekündigt.

Die FAP-Technologie definiert damit den Stand der Technik und die Möglichkeit, auf dieser Basis Grenzwerte zu setzen. Bei fast allen Herstellern von Diesel-Pkw sind Partikelfiltersysteme serienreif oder fast serienreif. Diese Filtersysteme unterscheiden sich weniger hinsichtlich der problemlos erreichbaren hohen Abscheiderate, als vielmehr hinsichtlich des Regenerationsverfahrens des Filters.

Auch für Nutzfahrzeuge ist die Partikelfiltertechnik verfügbar. Bereits Anfang der 90er Jahre wurde sieben verschiedene Systeme mit Abscheideraten bis über 90 % an 1.100 Stadtbussen im Rahmen des Rußfilter-Großversuchs des BMU in Deutschland erfolgreich erprobt. In der Schweiz sind zahlreiche Partikelfiltersysteme nach ausführlichen Eignungstests seitens der Behörden (BUWAL, SUVA) für die Ausrüstung von Baumaschinen anerkannt worden und werden aufgrund eines Obligatoriums auf Baustellen eingesetzt. Heute laufen in Deutschland nach Angaben des VdV über 5.000 Stadtbusse mit Partikelfiltersystemen. Weltweit laufen mehr als 50.000 Nutzfahrzeuge mit Partikelfiltersystemen, in Kalifornien ist die Ausrüstung von 900.000 Dieselfahrzeugen im Rahmen eines Programms mit Fördermitteln in Höhe von 100 Mio. US\$ beschlossen worden.

Aus heutiger Sicht ist fraglich, ob die seitens der europäischen Umweltminister bei der Verabschiedung der Richtlinie 99/96/EG erklärte Absicht, mit den EURO IV- und EURO V-Grenzwerten für Nutzfahrzeugmotoren die Partikelfiltertechnik durchzusetzen, erfüllt wird.

Eine Fortschreibung der Partikelgrenzwerte über EURO 4 für Pkw und EURO IV/V für Nutzfahrzeugmotoren hinaus ist aus Gründen der Abwehr von Gesundheitsgefahren notwendig und technisch machbar.

Eine weitere Herabsetzung der massenbezogenen Partikelgrenzwerte um den Faktor 10 reicht prinzipiell aus, um das Ziel des Gesundheitsschutzes zu erreichen, wenn dafür effektive Partikelfilter oder gleichwertige Techniken mit einer hohen Minderungsrate über den gesamten Größenbereich der Partikel einschließlich der Nano-Partikel zum Einsatz kommen. Um Zielverfehlungen in Form von technischen Entwicklungen, die hauptsächlich auf die Minderung der Masse hin optimiert sind, zu verhindern, ist als flankierende Maßnahme zur Begrenzung der Partikelmasse eine Begrenzung der Partikelzahl notwendig.

Mit dem Ziel, die Eignung der massenbezogenen Partikelbegrenzung für die Zukunft zu überprüfen und eine Methode der Partikelbegrenzung mit besserem Wirkungsbezug vorzuschlagen, wurde im Jahr 2001 auf Ebene der ECE-GRPE eine Expertengruppe „Particle Measurement Programme (PMP)“ gegründet. Zum Zeitpunkt dieses Berichtes (Juni 2003) war die Phase II des Projektes weitgehend abgeschlossen, und es zeichnet sich ab, zu welchem Ergebnis und zu welchen konkreten Vorschlägen die Arbeitsgruppe kommen wird. Neben einer verbesserten gravimetrischen Methode (US 2007) steht mit dem CPC (Condensation Particle Counter) ein System zur Verfügung, mit dem zeitaufgelöst die Partikelzahl (genauer: die Partikelkonzentration in $1/\text{cm}^3$) im wirkungsrelevanten Größenbereich entsprechend den Anforderungen einer Typprüfung gemessen werden kann.

Aus den vorstehenden Ausführungen sind folgende Vorschläge für eine Fortschreibung der Abgasgrenzwerte für Pkw als Stufe EURO 5 und für eine Anpassung der Stufe EURO V für Nutzfahrzeugmotoren abzuleiten:

Der Partikelgrenzwert EURO 5 für Pkw (vorläufig nur massenbezogen) sollte gegenüber dem EURO 4-Grenzwert mit 0,0025 g/km einer Emissionsminderung von 90 % entsprechen. Der NO_x-Grenzwert für Diesel-Pkw sollte mit 0,08 g/km demjenigen für Otto-Pkw der Stufe EURO 4 entsprechen.

Für Nutzfahrzeugmotoren ist als Anpassung der Stufe EURO V ab 2008 ebenfalls die weitere Minderung der Partikelemission bis auf Partikelfilter-Niveau mit der selben Begründung wie bei Diesel-Pkw erforderlich. Da die Partikelgrenzwerte EURO IV/V von 0,02 g/kWh im ESC und 0,03 g/kWh im ETC auch ohne Partikelfilter eingehalten werden können, ist die mit Partikelfilter sicher erreichbare Emissionsminderungsrate von 90 % auf diese Werte anzuwenden. Dies ergibt

0,002 g/kWh im ESC und 0,003 g/kWh im ETC. Im Hinblick auf die NO_x-Emissionen sollte der NO_x-Grenzwert der Stufe EURO V von 2,0 auf 1,0 g/kWh halbiert und eine weitere Senkung auf 0,5 g/kWh ab 2010 erfolgen.

Zusätzlich sollte die Gesamtzahl der emittierten Partikel im gesundheitlich relevanten Größenbereich sowohl für Pkw als auch für Nutzfahrzeugmotoren begrenzt werden. Die PMP-Gruppe wird Richtlinien-Annexes zur genauen Definition des verbesserten gravimetrischen Verfahrens und des CPC-Verfahrens bis Ende 2003 vorschlagen. Damit wäre - neben der Minderung der Masse - vor allem eine Minderung der gesundheitlich relevanten ultrafeinen Partikel gewährleistet. Für die gravimetrische Bestimmung der Partikelemission auf niedrigem Niveau steht das in den USA für den Einsatz ab 2007 definierte Messverfahren grundsätzlich zur Verfügung. Untersuchungen der Automobilindustrie belegen die Verfügbarkeit und die hohe Genauigkeit dieses verbesserten Massemessverfahrens.

Die Mehrkosten für EURO 5-Konzepte bei Diesel-Pkw und die geeigneten Kombinationen von Maßnahmen zur Erfüllung der vorgenannten Grenzwerte sind gegenüber der EURO 4-Technik im Bereich von 200 € bis 400 € pro Fahrzeug anzusetzen. Im Fall der Nutzfahrzeugmotoren werden die Mehrkosten für eine über die verabschiedete Stufe EURO V hinausgehende Emissionsminderung und die dafür notwendigen Abgasnachbehandlungssysteme, die im wesentlichen eine weitere Optimierung der für EURO V erforderlichen Systeme darstellen, zu vernachlässigen sein. Die Gesamtkosten werden gegenüber einem EURO III-Motor je nach Motorengröße zwischen 1.500 € und 3.000 € liegen.

Fazit:

Die Fortschreibung der Emissionsgrenzwerte für Pkw, leichte Nutzfahrzeuge und Nutzfahrzeugmotoren wird national und international gefordert. In den USA und in Japan wird bereits an Umsetzungskonzepten gearbeitet.

Die gesundheitlichen und ökologischen Wirkungen von Partikeln und NO_x-Emissionen machen eine deutliche Senkung der Grenzwerte erforderlich.

Technische Minderungsmaßnahmen für ein fortschrittliches Emissionsniveau stehen schon jetzt zur Verfügung. Die Minderungskosten pro Fahrzeug/Motor sind im Verhältnis zum bewirkten Effekt gering und verhältnismäßig. Messverfahren zur eindeutigen Überprüfung der Grenzwerte stehen zur Verfügung.

1. Einführung

Die europäische Abgasgesetzgebung hat mit Verabschiedung der Grenzwertstufen bis einschließlich EURO 4 für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge sowie EURO V für Nutzfahrzeugmotoren entscheidende Fortschritte erreicht. Für Pkw mit Ottomotor (äußere Gemischbildung) ist eine über EURO 4 hinausgehende Grenzwertstufe aller Voraussicht nach nicht erforderlich. Die Notwendigkeit einer Fortschreibung der Abgasgrenzwerte besteht in erster Linie für Dieselmotoren.

Artikel 3 der Richtlinie 98/69/EG (Pkw, leichte Nutzfahrzeuge) enthält dazu folgenden, an die Kommission gerichteten Auftrag:

„The Commission shall submit proposals after December 31, 1999 on regulations to be effective after 2005, i.a. taking account of:

- *Recent research in health effects of particulates*
- *Particulate emissions of GDI engines*
- *Availability of aftertreatment systems, i.e. traps*
- *Improvement of measurement procedures for fine particulates“*

Weiterhin sagt die Richtlinie 99/96/EG (Nutzfahrzeugmotoren) in Artikel 7 folgendes aus:

“The Commission shall submit proposals no later than 12 months after entry into force, i.a. taking account of:

- *Development of emission control technology and aftertreatment technology*
- *Improvements of measurement procedures for very low PM levels*

Schließlich enthalten die Schlussfolgerungen des Umweltrates vom 18./19.12.2000 zur Auswertung des Auto-Öl-Programms II folgenden Text:

“In line with the conclusions of the Commission's report, and in order to give clear and early guidance to all stakeholders, the Council invites the Commission to:

- *Make continued efforts to significantly reduce nano-particulate emissions, and in particular devise a new measuring procedure for private cars, light duty vehicles and heavy duty vehicles taking into account the results of recent studies into the health effects of nano-particulate emissions.*
- *The Council invites the Commission to give consideration to the need to bring the provisions on limit values for diesel engines – for example, on emissions of nitrogen oxides – closer to the provisions for petrol engines.”*

In einer Umfrage vom Juni 2002 (Call for Evidence) hat die Europäische Kommission (DG Enterprise) um Beiträge zur Frage der Realisierbarkeit eines NO_x-Grenzwertes von 2,0 g/kWh in der Stufe EURO V für Nutzfahrzeugmotoren gebeten und dabei auch auf eine mögliche weitere Herabsetzung dieses Grenzwertes zum gleichen oder einem späteren Zeitpunkt hingewiesen [1].

Die Kommission hat in einer Note vom 11.02.2003 zum Thema „Concept of Enhanced Environmentally Friendly vehicles (EEV) for light vehicles“ erklärt, dass sie sich nunmehr mit einer Fortschreibung der Abgasgrenzwerte für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge befassen werde.

Der Schwerpunkt der weiteren notwendigen Entwicklung liegt damit eindeutig bei NO_x und Partikeln. Die CO₂- und HC-Emissionen werden deshalb in den folgenden Ausführungen nur am Rande betrachtet.

Im Memorandum zu schwefelfreien Kraftstoffen vom Juni 1999 hat die Bundesregierung bereits verdeutlicht, dass eine weitere Reduzierung der Partikelemissionen der Pkw über Euro 4 hinaus erforderlich ist. Deutschland hat im Umweltministerrat am 04.03.2003 die auf dem Deutsch/Französischen Umweltrat am 27.02.2003 beschlossene gemeinsame Initiative für strengere Emissionsgrenzwerte bei Pkw und Lkw mit Dieselmotor vorgestellt. In bilateralen Arbeitsgruppensitzungen sollen konkrete Vorschläge erarbeitet werden. Die Auto- und die Mineralölindustrie werden beteiligt. Die EU-Kommission hat im März 2003 eine Umfrage bei den Mitgliedstaaten gestartet, mit der die jeweiligen Positionen hinsichtlich der Einführung von EEV-Werten (Enhanced Environmentally Friendly Vehicles) für Pkw abgefragt werden. EEV-Werte sind indikative Grenzwerte, die Grundlage einer steuerlichen Förderung sein können. Es handelt sich nicht um allgemeingültige Grenzwerte für die Typprüfung oder die Zulassung von Fahrzeugen.

Die Bundesregierung hat in ihrer Stellungnahme erklärt:

„Deutschland ist der Auffassung, dass rechtzeitig Standards zur weiteren Senkung von NO_x- und Partikelemissionen für Diesel-Pkw festgelegt werden und ab 2010 obligatorisch in Kraft treten sollten und vorher Grundlage einer steuerlichen Förderung entsprechend der bisherigen Praxis sein können.

Deutschland hält auch eine weitere Verschärfung der Grenzwerte zu Nutzfahrzeugmotoren (RL 88/77/EWG) für erforderlich.“

Auch auf Fragen der Kraftstoffqualität wird im Folgenden nicht näher eingegangen, da in dem hier diskutierten Zeitrahmen von der Verfügbarkeit schwefelfreier Qualität (≤ 10 ppm Schwefel) auszugehen ist.

Insgesamt orientieren sich die folgenden Ausführungen insbesondere an der Situation in Deutschland, die jedoch in ähnlicher Weise auch in anderen europäischen Ländern gegeben sein wird.

2. Abgasgesetzgebung – Vergleich USA, Japan und Europa

Ein Vergleich der Abgasgesetzgebung erfordert nicht nur die Betrachtung der weltweit verschiedenen Grenzwerte. Vielmehr sind alle für das Anforderungsniveau insgesamt relevanten Randbedingungen einzubeziehen, soweit zutreffend, z.B. unterschiedliche Testzyklen, die Kombination verschiedener Grenzwertsätze mit unterschiedlichen Dauerhaltbarkeitsanforderungen, phase-in von Grenzwerten, Begrenzung der off cycle – Emissionen, Anforderungen bezüglich der Übereinstimmung der Produktion, der Dauerhaltbarkeit, der periodischen Überwachung, der Feldüberwachung, der on board Diagnose etc.

Für die Tier 2 Grenzwerte gibt es z.B. auf U.S. Bundesebene im Fall der Pkw und leichten Nutzfahrzeuge ein phase-in zwischen 2004 und 2007, im Fall der schwereren leichten Nutzfahrzeuge in den Jahren 2008 und 2009. Die Fahrzeuge können in acht unterschiedlichen Emissionsklassen (bins) zertifiziert werden.

Im Fall der ab 2007 für Nutzfahrzeugmotoren vorgesehenen Grenzwerte gibt es auf U.S. Bundesebene ein phase-in zwischen 2007 und 2010, mit unterschiedlichen Erfüllungsgraden für die verkauften Motoren je nach Motorenart (Otto, Diesel) und Schadstoffart [2].

Diese unterschiedlichen Anforderungen sind nicht ohne weiteres gegeneinander abzuwägen, weshalb der folgende Vergleich sich auf die aus den Grenzwerten qualitativ abzuleitende Tendenz speziell bei NO_x und Partikeln beschränkt.

2.1 Diesel-Pkw

Im Vergleich mit den zeitgleichen US - Grenzwerten sind die NO_x-Grenzwerte für Diesel-Pkw nach EURO 3 ca. um 35 % niedriger und für EURO 4 um den Faktor 6 höher. Dies gilt bezüglich der US-weiten Tier 2- Standards, Bin 5. Der japanische Grenzwert des Jahres 2002 liegt etwa um 40 % unter dem EURO 4-Grenzwert, ab 2005 liegt der japanische Grenzwert ebenfalls ca. um 40% niedriger als der EURO 4-Grenzwert. (**Abb. 1**)

Der Partikelgrenzwert nach EURO 3 liegt etwa 20 % niedriger und der EURO 4-Grenzwert um den Faktor 4 über den US - amerikanischen Partikelgrenzwerten Tier 2/Bin 5, während der japanische Grenzwert des Jahres 2002 etwa dem EURO 3-Grenzwert entspricht. (**Abb. 2**). Ab 2005 unterschreitet der japanische Grenzwert den EURO 4-Grenzwert etwa um 45 %.

Aus den Forschungsvorhaben zur Feldüberwachung liegen Vergleichsmessungen von Diesel-Pkw in verschiedenen Testzyklen vor [28]. Der Vergleich zwischen den NO_x-Emissionen von EURO 3-Diesel-Pkw im heute gültigen Neuen Europäischen Fahrzyklus und im US-FTP ist in **Abb. 3** dargestellt, der Vergleich der Partikelemissionen in **Abb. 4**. Zwangsläufig handelt es sich ausschließlich um Pkw europäischer Auslegung, besonders niedrig emittierende Typen sind in diesem Fahrzeugkollektiv noch nicht enthalten. Die Korrelation zeigt, dass die Ergebnisse aus beiden Zyklen sowohl für NO_x als auch für Partikel in erster Näherung fast gleich ausfallen. Unter Einbeziehung aller sonstigen unterschiedlichen Randbedingungen, deren Auswirkung auf das Anforderungsniveau nicht genau quantifizierbar ist, können die US-Grenzwerte und die europäischen Grenzwerte in gleicher Dimension direkt verglichen werden.

Die scharfen amerikanischen Grenzwerte sind, abgesehen von den umweltbezogenen politischen Vorgaben, auch vor dem Hintergrund zu verstehen, dass Diesel-Pkw in den USA zur Zeit nur einen geringen Marktanteil in der Größenordnung von 1 bis 2 % haben, d.h. es waren bisher weder aus politischer Sicht besondere Rücksichten auf diese Technik notwendig noch wurden diese von den Herstellern gefordert, da sie mit Ausnahme von VW in den USA gar keine Dieselmotoren anbieten. Es zeichnet sich jedoch eine mögliche Trendwende ab, da Pkw und leichte Nutzfahrzeuge mit Dieselmotor aus Gründen der Energieeinsparung neuerdings auch in den USA attraktiv erscheinen. Ein den europäischen Verhältnissen entsprechender hoher Marktanteil und damit Bestandsanteil von 40 % wird als Zielvorstellung in die Energieszenarien eingebracht.

Die Abwägung der möglichen Energieeinsparung gegenüber steigenden Partikelemissionen, deren Minderung ebenfalls eine hohe politische Priorität hat, bleibt jedoch abzuwarten. Vom politischen Ansatz her sind die amerikanischen Grenzwerte in stärkerem Maße „technology forcing“ als die europäischen Grenzwerte.

NOx-Grenzwerte für Diesel-Pkw in g/km

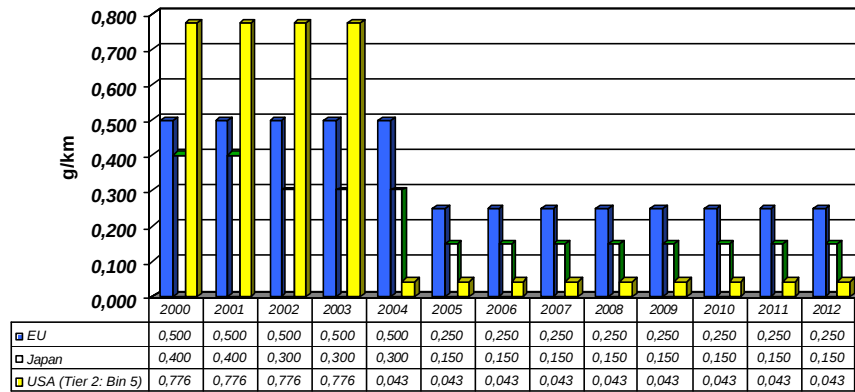


Abb. 1

PM-Grenzwerte für Diesel-Pkw in g/km

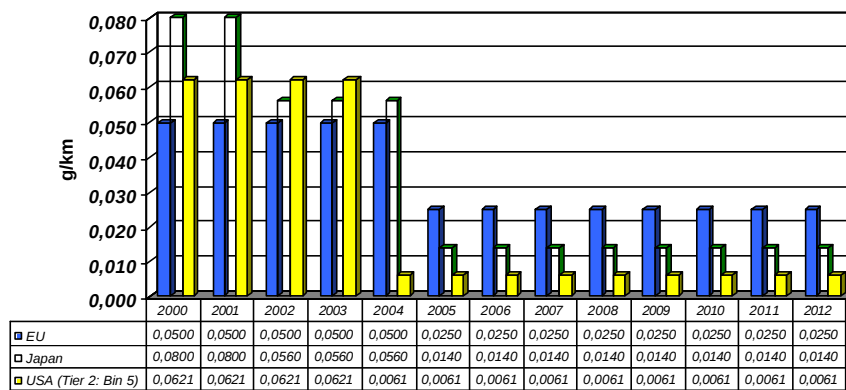


Abb. 2

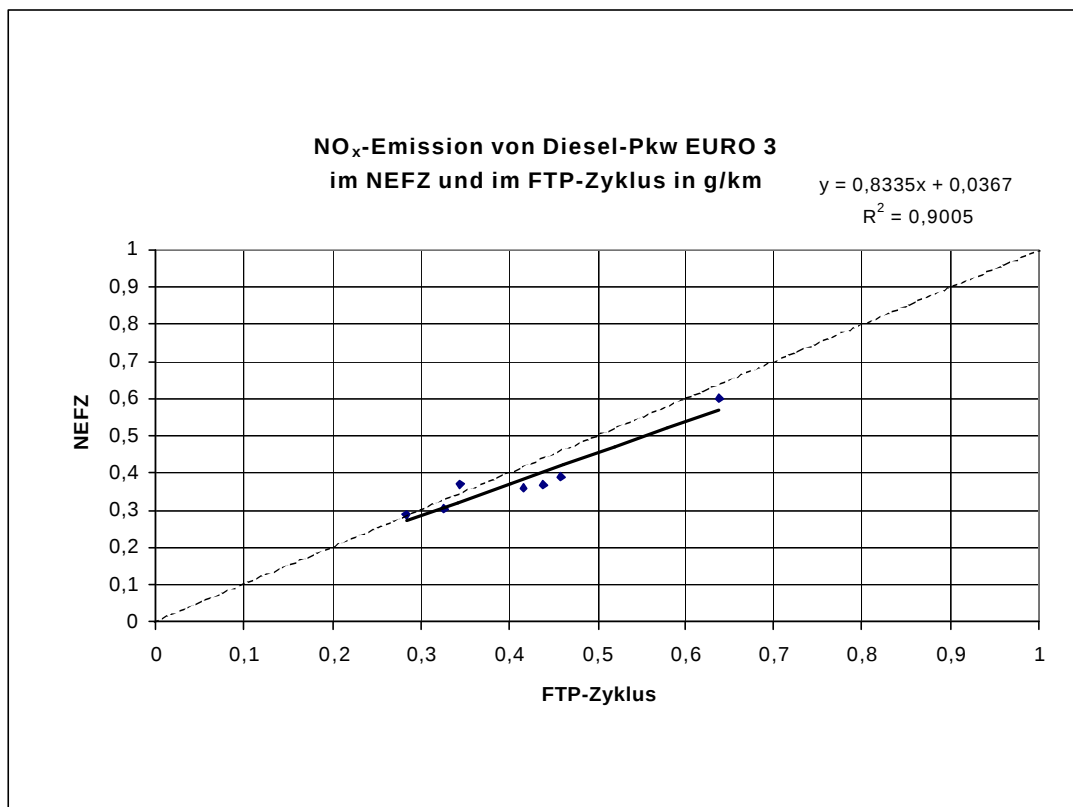


Abb. 3

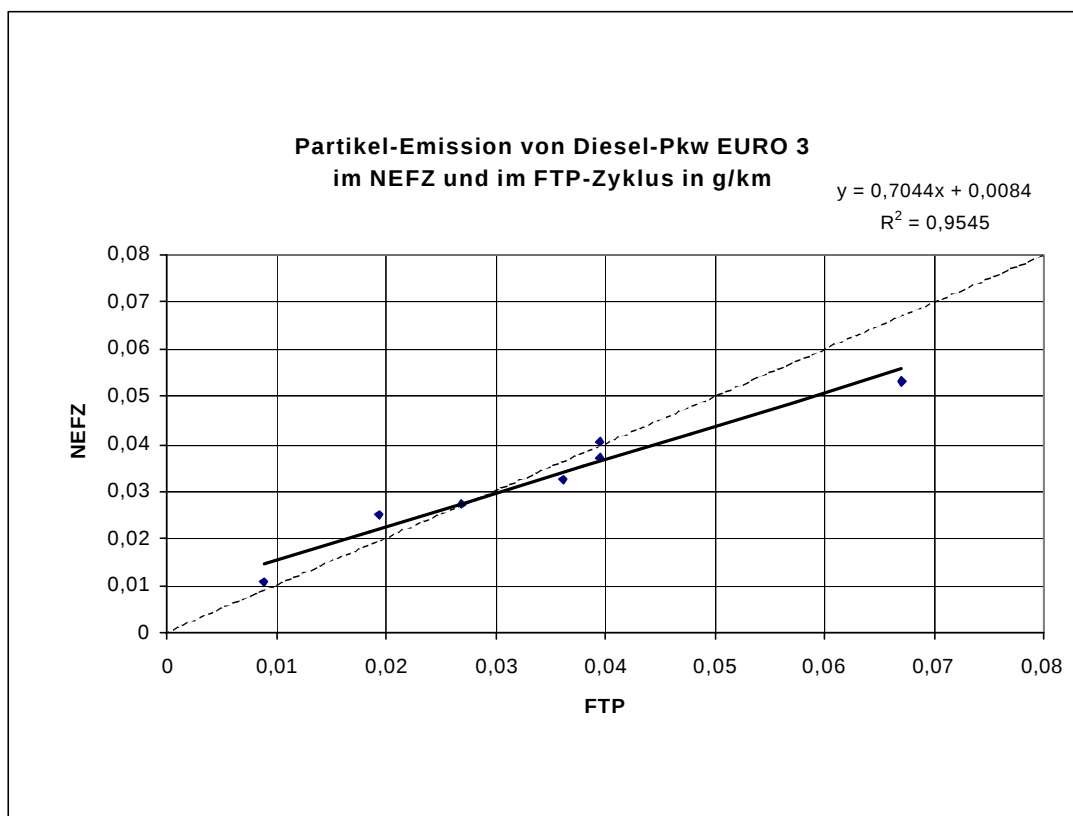


Abb. 4

2.2 Nutzfahrzeugmotoren

Bei den Abgasgrenzwerten für Nutzfahrzeugmotoren ergibt sich teilweise ein anderes Bild.

Während der NO_x-Grenzwert nach EURO IV etwas höher ist, als der zeitgleiche US-Grenzwert, ist der EURO V-Grenzwert gegenüber dem dann drastisch gesenkten US-Grenzwert um den Faktor 8 höher (**Abb. 5**).

Der heutige EURO III-Grenzwert für Partikel ist dagegen um etwa 20 % höher als der zeitgleiche US-Grenzwert. Mit Inkrafttreten des EURO IV/V-Grenzwertes unterschreitet dieser den US-Grenzwert für einen Zeitraum von 2 Jahren etwa um 75 %, während durch den ab 2007 beabsichtigten US-Grenzwert die Verhältnisse umgekehrt werden. Dann ist der EURO IV/V-Grenzwert um den Faktor 2 höher als der US-Grenzwert (**Abb. 6**).

Die im Frühjahr 2003 verabschiedeten japanischen Grenzwerte für den Zeitraum ab 2005 liegen in der Zukunft ab 2007 bezüglich NO_x um den Faktor 7,5 und bezüglich der Partikel um den Faktor 2 über dem jeweiligen amerikanischen Grenzwert und damit etwa auf dem Niveau von EURO V (**Abb. 5 und 6**).

Vergleichsmessungen von Nutzfahrzeugmotoren in unterschiedlichen Testzyklen liegen aus den sog. Validierungsuntersuchungen im Rahmen der Entwicklung eines weltweit harmonisierten Prüfverfahrens (WHDC, Arbeitsgruppe der ECE-GRPE) vor [29]. Es handelt sich um Ergebnisse von acht Motoren, die in den USA, Japan und Europa vermessen wurden und die z.T. mit Partikelfilter ausgestattet waren. Bezüglich der NO_x-Emissionen zeigt **Abb. 7** hauptsächlich, dass das NO_x-Niveau aller Motoren im Bereich um 5,0 g/kWh etwa gleich war, so dass der Zusammenhang zwischen den Ergebnissen im US-FTP und im europäischen ETC nicht über einen größeren Bereich im Sinn einer Korrelation betrachtet werden kann. Bezüglich der Partikelemission der untersuchten Motoren wird ein erheblich größerer Bereich abgedeckt (**Abb. 8**). Die lineare Korrelation lässt erkennen, dass die Partikelemission im FTP etwa 20% höher ausfiel als im ETC. Allerdings ist auch diese Aussage aufgrund der relativ geringen Motorenzahl und der überwiegend europäischen Auslegung der Motoren mit einem Vorbehalt zu versehen. Im Kollektiv ist nur ein Motor mit Auslegung für den US-Markt enthalten. Auf der Basis der vorliegenden wenigen Daten und unter Einbeziehung aller sonstigen unterschiedlichen Randbedingungen, deren Auswirkung auf das Anforderungsniveau nicht genau quantifizierbar ist, gilt deshalb auch für Nutzfahrzeugmotoren, dass die US-Grenzwerte und die europäischen Grenzwerte in gleicher Dimension direkt verglichen werden können.

NOx-Grenzwerte für Nfz-Motoren in g/kWh

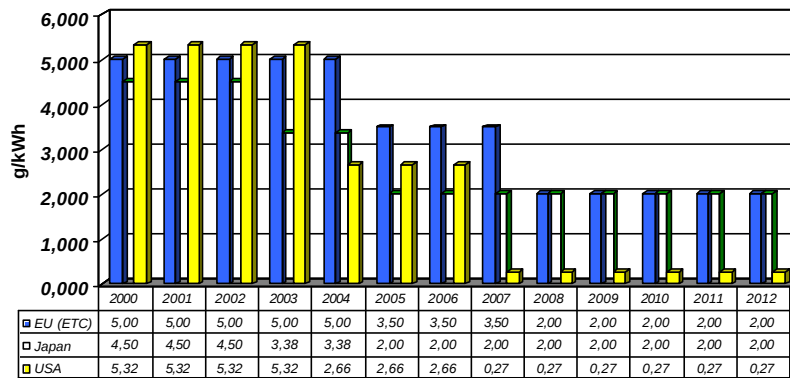


Abb. 5

PM-Grenzwerte für Nfz-Motoren in g/kWh

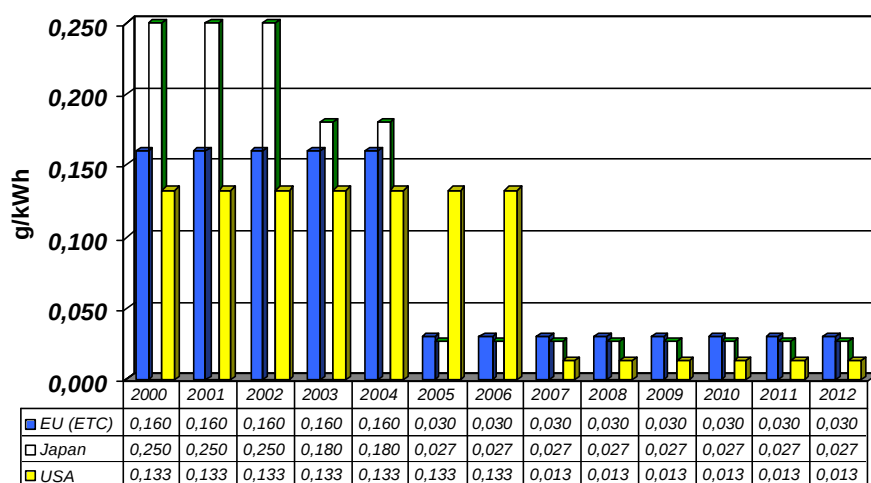


Abb. 6

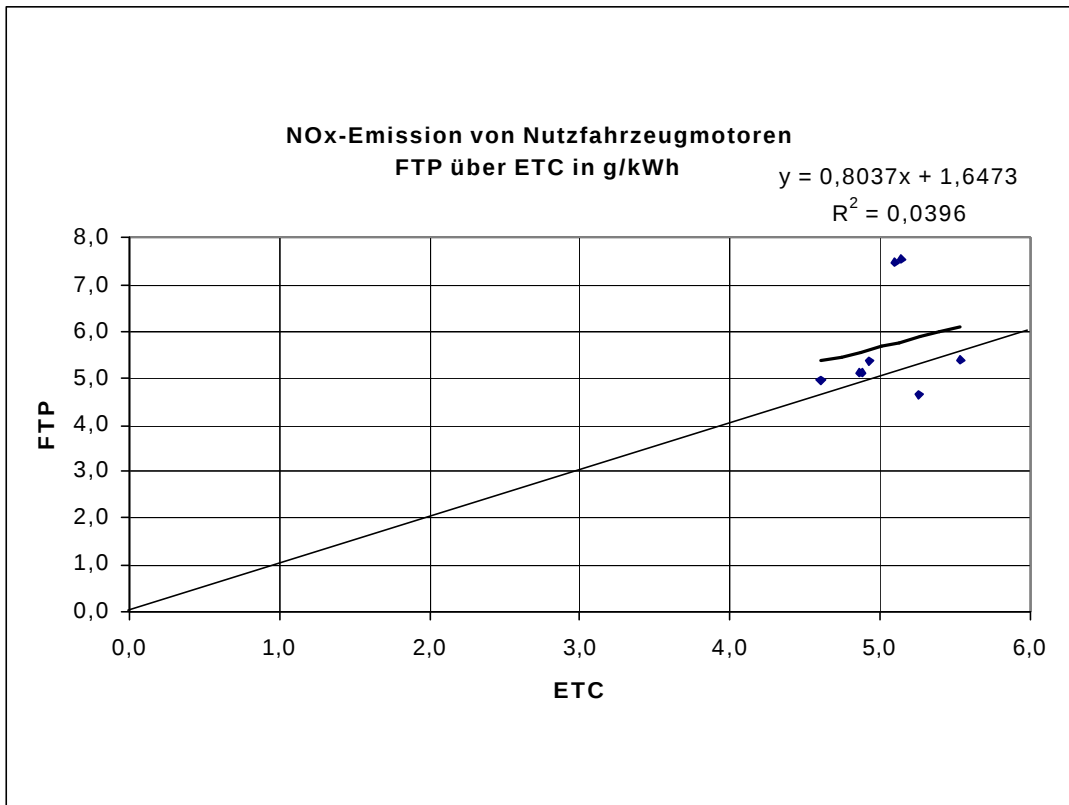


Abb. 7

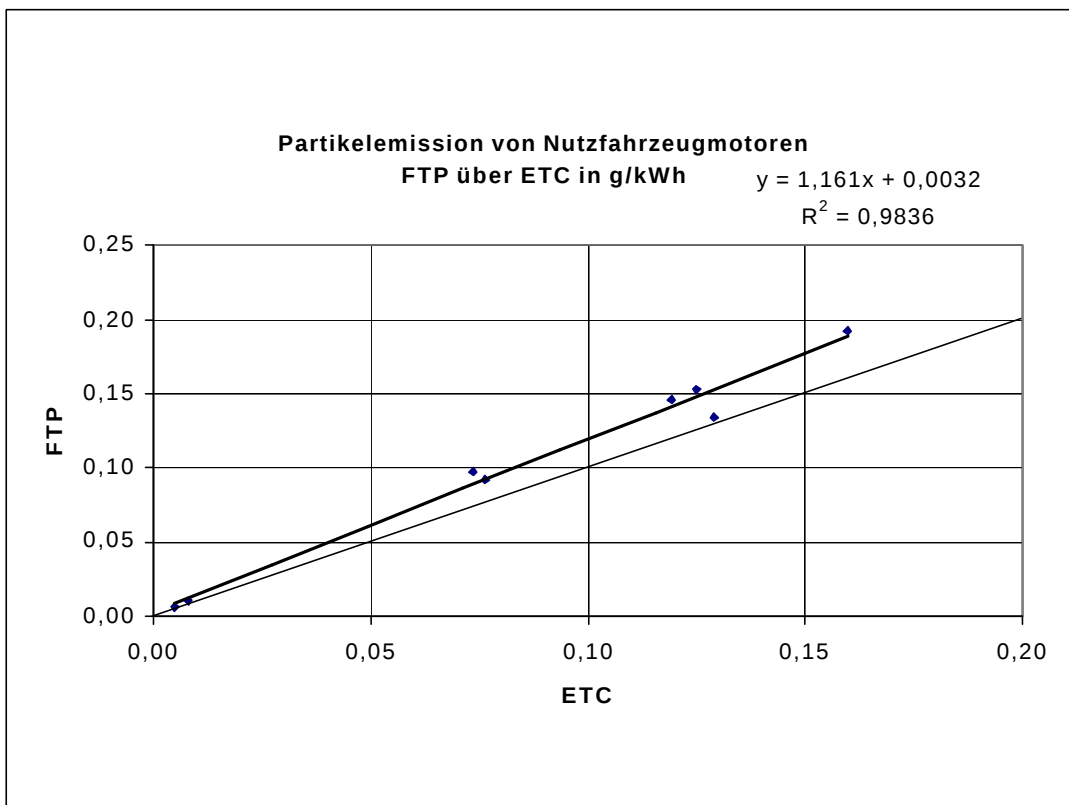


Abb. 8

2.3 *Consent Decree in den USA*

Von 1993 bis 1998 wurden von sieben Herstellern (Caterpillar Inc., Mack Trucks Inc. / Renault Vehicules Industries, Volvo Truck Corporation, Cummins Engine Company, Detroit Diesel Corporation, Navistar International Transportation Corp.), die zusammen 95% des amerikanischen Nutzfahrzeugmarktes abdecken, Dieselmotoren ausgeliefert, in deren elektronischer Motorsteuerung ein „cycle-beating“ implementiert war. Dies hatte zur Folge, dass im normalen (Highway-) Betrieb die Stickoxid-Emissionen um bis zu einem Faktor 3 über den entsprechenden gesetzlichen Grenzwerten lagen.

Diese Vorgänge führten zu dem sog. Consent Decree vom Oktober 1998, einem Abkommen zwischen der US EPA und den betroffenen Herstellern. Neben direkten Strafzahlungen in Höhe von 83,4 Mill. US\$ verpflichtete sich die Industrie zu Maßnahmen, die Kosten von insgesamt mehr als 1 Mrd. US\$ verursachen. Es handelt sich dabei einerseits um die Entwicklung und den Austausch der Steuerungs-Software der vom cycle-beating betroffenen Motoren (1,3 Mill. Stück) und die Nachrüstungen zur Emissionsminderung an anderen älteren Motoren (Kosten insgesamt > 850 Mill. US\$), andererseits um die Finanzierung von Forschungsprojekten, die zu weiteren Emissionsminderungen über die gesetzlichen Anforderungen hinaus führen (109,5 Mill. US\$).

Eine sehr umfangreiche Dokumentation der EPA über den Consent Decree und alle damit zusammenhängenden Aktivitäten ist im Internet unter der Adresse

<http://www.epa.gov/oeca/ore/aed/diesel> verfügbar.

2.4 *Folgerungen*

Bei den Diesel-Pkw sind die zukünftigen amerikanischen Grenzwerte erheblich schärfer als die japanischen und europäischen Grenzwerte. Für Nutzfahrzeugmotoren gilt dies ebenfalls ab 2007.

Eine internationale Harmonisierung der Anforderungen und Grenzwerte steckt allerdings erst in den Anfängen. Der vorstehende Vergleich hat mehr informativen Charakter, die weitere Entwicklung auf EU-Ebene muss sich primär an der Situation in Europa orientieren.

Fazit:

Die Forderung nach der Fortschreibung der EU-Richtlinien für Pkw und Lkw beruhen auf einem breiten internationalen Konsens. Sie basiert auf nationalen und im Rahmen der EU erhobenen Forderungen. Sowohl für Diesel-Pkw als auch für Nutzfahrzeugmotoren drückt sich in den zukünftigen Grenzwerten für NO_x und Partikel weltweit die politische Absicht aus, das Emissionsniveau drastisch zu senken. Daraus ergibt sich der indirekte Zwang zu einer effektiven Abgasnachbehandlung sowohl für NO_x als auch für Partikel.

3. Gesundheitliche und ökologische Begründung für eine weitere Verschärfung der Abgasgrenzwerte

Im Folgenden werden die quantitativen Emissions- und Immissionsminderungsziele und weitere qualitativen Anforderungen aus Umweltsicht der Entwicklung der Schadstoffemissionen des Straßenverkehrs gegenüber gestellt.

3.1 Immissionssituation und EU-Emissionsminderungsziele

Im Hinblick auf die Luftreinhaltung wird zur Zeit insbesondere in westlichen Ländern das Problem der Feinstaubemissionen diskutiert. Die Weltgesundheitsorganisation, die EU-Kommission sowie der National Research Council und die Umweltbehörde der USA stellen die Feinstäube als eines der gegenwärtig vorrangigen umwelthygienischen Schwerpunktthemen in Europa und den USA heraus.

Der Länderausschuss für Immissionsschutz geht davon aus, dass der Straßenverkehr mit ca. 45 % bis 65 % an den in Verkehrsnähe auftretenden PM 10 –Spitzenbelastungen beteiligt ist. In Städten geht ein Drittel der PM 10 -Masse auf Sekundäraerosole zurück, die aus dem Ferntransport stammen. Eine weiterreichende Quellenzuordnung der Schwebstaub – Fraktionen an der PM 10 –Fraktion ist mit Vorsicht zu betrachten. Der Massenanteil der PM 2,5 -Fraktion betrug in der Innenstadt Frankfurts Ende der 90er-Jahre schätzungsweise zwei Drittel der PM 10 -Fraktion und dürfte sich nach vorsichtigen Schätzungen von einem Jahresmittel von 77 µg pro Kubikmeter im Jahr 1978 auf 22 µg pro Kubikmeter im Jahre 1998 verringert haben [3].

In Deutschland wird die Größenverteilung von Partikeln seit 1991 in Erfurt gemessen. Dabei wird der Größenbereich von 0,01 µm bis 2,5 µm abgedeckt. Der zeitliche Trend der Partikelanzahl und der Massenkonzentration ist in **Abb. 9** angegeben. Die Gesamtpartikelzahl (0,01 µm bis 2,5 µm) blieb nach einem deutlichen Anstieg seit 1995/96 in etwa stabil. Das gleiche gilt für ultrafeine Partikel (0,01 µm bis 0,1 µm), deren Konzentration seitdem in einem Bereich zwischen 14 000 und 20 000 Partikeln pro cm³ liegt, mit einem 24 h-Maximum von 50.000 Partikeln pro cm³. Die Fraktion der kleinsten Partikel (0,01 µm bis 0,03 µm) nahm hingegen weiter zu. Im Gegensatz dazu nahm der Anteil an PM 2,5 während der Beobachtungszeit deutlich ab [3].

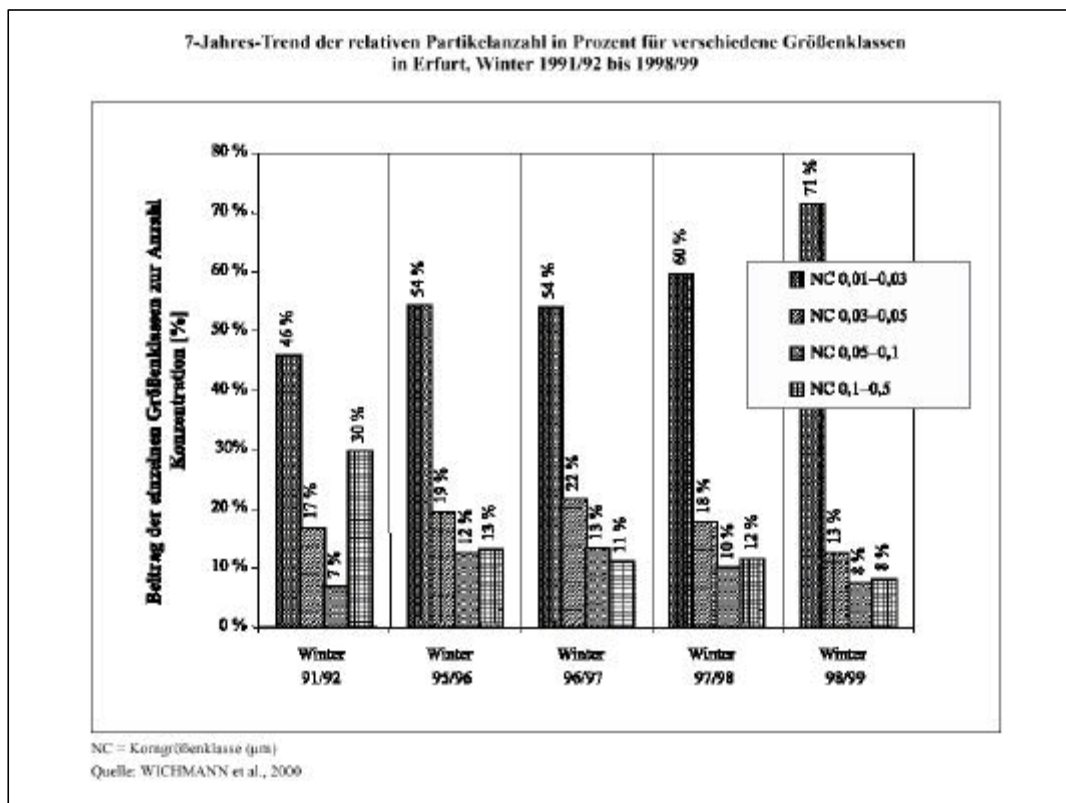


Abb. 9

Eine Überschreitung der ab 2005 geltenden Grenzwerte der 22. BImSchV für PM 10 wird insbesondere für Straßenmesspunkte erwartet. Im Jahr 2001 wurde z.B. in Berlin der 24-Stunden-Grenzwert von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (35 Überschreitungen zulässig) an den drei PM 10-Straßenmeßstationen zwischen 50 und 60 mal überschritten. Die Jahresmittelwerte lagen an den drei Stationen jeweils bei $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$, womit der ab 2005 geltende Jahresmittelwert von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ knapp eingehalten wurde. Der ab 2010 geltende, verschärfte Grenzwert von $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wurde dagegen deutlich überschritten [30].

Staubherkunftsanalysen [31] zeigten, dass etwas mehr als die Hälfte der an Straßen gemessenen PM 10-Konzentration vom direkten Verkehr, der an der Station vorbei fährt, verursacht wird. Dieser Verkehrsbeitrag lässt sich aufteilen in den Beitrag der Dieselabgasemissionen mit einem Anteil von etwa 40%, Reifenabrieb von 7 – 25% und Aufwirbelung/Straßenabrieb von 40 – 53 % [32; 33].

Über den verkehrsbedingten Anteil an der PM 10-Hintergrundbelastung existieren dagegen kaum Angaben.

Die Konzentration von elementarem Kohlenstoff (EC) liegt an den Berliner Hintergrundstationen ohne direkten Verkehrseinfluss im Jahresmittel zwischen 2 und $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [30, 31]. EC wird im Schwebstaub stellvertretend für Dieselruß gemessen, stammt aber auch aus anderen Verbrennungsprozessen, von denen der Hausbrand die wichtigste Quelle darstellt. Geht man vereinfachend davon aus, dass im Sommer der Einfluss dieser Quellen vernachlässigbar ist, dann werden etwa 75% der städtischen EC-Hintergrundkonzentration, also $1,5 - 2,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durch

den Verkehr verursacht¹. Da Dieselrußpartikel in erster Näherung aus 50% EC bestehen, ergibt sich damit ein verkehrsbedingter Hintergrundbeitrag zur PM 10-Immission an Straßen von 3-4 µg/m³, also circa 10% des in Berlin gemessenen Jahresmittelwertes der Straßenmessstationen. Damit verursachen Dieselrußemissionen etwa 30% der PM 10-Immission.

Doch nicht nur die Rußpartikel aus Dieselaabgasen tragen zur PM 10-Immission bei, sondern auch die aus NO gebildeten Nitrate. Der LAI geht davon aus, dass die verkehrsbedingten Nitrate ca. 10 – 15% zur PM 10-Belastung beitragen [34]. Sie dürfen daher bei der Diskussion um die Partikelbelastungen durch Dieselaabgase nicht vernachlässigt werden.

Die bisherigen Erfahrungen zeigen, dass die Werte für die Partikelanzahl über 4 Zehner-Potenzen variieren. Das Konzentrationsmaximum an einer Verkehrsmessstelle in Dresden [35] lag im Bereich des Partikeldurchmessers von 20 – 50 nm mit einem Jahresmittelwert von 5.800 cm⁻³ und einem relativen Anteil an der Partikelanzahl (Messbereich: 3 – 800 nm) von 35,5%. Die Anzahlkonzentration im gesamten Messbereich betrug im Mittel von April 2001 bis März 2002 16.330 cm⁻³. Wichmann fand in Erfurt in Straßennähe für den Größenbereich 10 bis 500 nm im Mittel über 3 Jahre mit einer Konzentration 17.900 cm⁻³ vergleichbare Werte. Das Maximum seiner Verteilung lag im Intervall 10 – 30 nm.

In einer ersten Schätzung kommt der LAI-Bericht [35] zu dem Schluß, dass der Beitrag der Kfz-Emissionen für das Durchmesserintervall 5 bis 50 nm etwa 50% beträgt. Die Anzahlkonzentration wird damit stärker von Dieselemissionen beeinflusst als die Partikelmassenkonzentration. Aus Gründen des Gesundheitsschutzes sollte sowohl die Masse der Dieselpartikel im Abgas als auch deren Anzahl weiter reduziert werden.

Die verkehrsbedingten Stickoxidemissionen in Deutschland werden nach den aktuellen Rechenszenarien im Jahr 2015 um 72 % niedriger liegen als 1987, eine weitere signifikante Reduktion ist in den Folgejahren jedoch nicht mehr zu erwarten. Nach diesen Berechnungen ist eine Unterschreitung der Empfehlungswerte der WHO (Jahresmittelwert: 40 mg/m³) an verkehrsreichen Straßen zwar wahrscheinlich, aber nicht sicher. Gegenüber heutigen Prognosen könnten sich dann Probleme ergeben, wenn zukünftig ein überproportionaler Anteil der Fahrleistung von Otto-Pkw durch Diesel-Pkw (d.h. erheblich mehr als 40 %) mit deutlich höheren Stickoxidemissionen ohne weitergehende Minderung über EURO IV hinaus ersetzt wird.

Ein wichtiger Anlass für eine weitergehende NO_x-Minderung im Verkehrsbereich ist die Richtlinie über nationale Emissionshöchstmengen (National Emission Ceilings, NEC-Richtlinie 2001/81/EG vom 23.10.2001) zur Begrenzung der jährlichen Emissionsfrachten von SO₂, NO_x, NH₃ und NMVOC in den Mitgliedsstaaten bis zum Jahr 2010. Nach Artikel 6 der Richtlinie war der EU-Kommission bis zum Ende des Jahres 2002 ein nationales Programm zur Einhaltung der NECs vorzulegen. Bei den Kraftfahrzeugemissionen wurden alle verabschiedeten EG-Richtlinien einschließlich beschlossener Verschärfungen sowie Verbesserungen der Kraftstoffqualität bis 2010 berücksichtigt. Nach den neuesten Berechnungen sind in Deutschland zur Einhaltung der nationalen Emissionshöchstmenge für NO_x bis 2010, die 1051 kt beträgt, 190 kt NO_x zu vermindern, außerdem sind 35 kt NH₃ und 197 kt NMVOC bei allen Quellen insgesamt zu vermindern, bei SO₂ wird die nationale Emissionshöchstmenge im Referenzszenario bereits eingehalten. Ohne weitere Maßnahmen produzieren alle Quellen in

¹ Abgeleitet aus den Kenngrößen des Winter- und Sommerhalbjahres der EC-Immissionsbelastung an der städtischen Hintergrundstation Nansenstraße von 4,6 und 3,5 µg/m³ [2, S. 99]

Deutschland im Jahr 2010 nach den bisher vorliegenden Berechnungen eine Gesamtmasse von 1241 kt NO_x, wovon allein rund 534 kt auf den Straßenverkehr und 736 kt auf den Verkehr (Straßenverkehr plus übriger Verkehr) entfallen [5].

3.2 Nationale Immissionsminderungsziele

Unter den von Kraftfahrzeugen emittierten Schadstoffen, die ein kanzerogenes Risiko bedeuten, sind die Rußpartikel (hier der EC-Gehalt der Partikel), Benzol und Benzo(a)pyren die wichtigsten. Von besonderer Bedeutung sind die Emissionsminderungsziele bezüglich der mit Partikelimmissionen und mit Staubimmissionen aus allen Quellen in Verbindung stehenden Humantoxizität und die Unterschreitung eines zusätzlichen inhalatorischen Krebsrisikos von 1:2.500 (kurzfristig) und 1:5.000 (langfristig) in Ballungsräumen. Dies erfordert als Zwischenschritt auf dem Weg zur Minimierung gegenüber dem Stand von 1988 bis 2005 eine Minderung von über 90 % und bis 2020 eine Minderung über 99 % (**Abb. 10**) und damit die Unterschreitung einer Immissionskonzentration für EC aus allen Quellen von 0,8 µg/m³. Dieses nationale Ziel geht damit wesentlich weiter als die im Rahmen der europäischen Luftqualitäts-Richtlinie 1999/30/EG vorgesehenen PM₁₀ –Grenzwerte von 40 µg/m³ ab 2005 und 20 µg/m³ ab 2010.

Minderungsziele			
Problembereich	generelles Ziel	kurz-/mittelfristige Maßnahme bzw. Zielvorgabe	Langfristziel bzw. angestrebte Reduktionsraten
Humantoxizität	zusätzliches inhalatorisches Krebsrisiko im Ballungsraum auf das Niveau des ländlichen Raumes	in Ballungsräumen bis 2005 (a, c): Risiko 1 : 2.500 d.h. Minderung um 90 % gegenüber 1988	in Ballungsräumen bis 2020 (a, c): Risiko 1 : 5.000 d.h. Minderung um 99 % gegenüber 1988
	starke Senkung des Mortalitäts- und Morbiditätsrisikos durch Feinstäube	PM ₁₀ (JMW) (d): ab 2005: 40 µg/m³ ab 2010: 20 µg/m³	PM ₁₀ (JMW): ? µg/m ³
	Reduktion der toxikologischen Belastung		NO ₂ (JMW) [WHO]: 40 µg/m ³
Quellen: a: SRU 1994, b: SRU 1996, c: UBA 1997, d: EU 1999, e: UN-ECE 1999, f: BMU 1998; g: EU-Kioto 1998; h: Enquete 1990 IFEU 8/2000			

Abb. 10

3.3 Wirkung von NO_x-Emissionen

Stickoxide sind sowohl direkt als auch indirekt wirkende Luftverunreinigungen. Stickstoffdioxid (NO₂) ist ein Reizgas mit oxidierenden Eigenschaften. Es kann zu einer Zunahme von Atemwegserkrankungen führen. Da NO₂ zusammen mit Kohlenwasserstoffen an der Ozonbildung beteiligt ist, muss die Emission von Stickoxiden nicht nur wegen ihrer direkten Wirkung, sondern auch wegen ihres Beitrags zur Ozonbildung vermindert werden. Stickoxide sind Mitverursacher des Waldsterbens. In versauerten Böden werden Nährstoffe schneller aufgeschlossen und damit ausgewaschen. Es kommt zur Freisetzung toxischer Kationen (Aluminium), die Wurzeln angreifen. Als Folge werden die Organismen mit Nährstoffen fehlversorgt; der Wasserhaushalt wird gestört. Gleichzeitig werden dem Boden wichtige Strukturelemente entzogen; die Bodenstruktur degradiert. Die metabolische Aktivität der Bodenorganismen wird herabgesetzt, was Auswirkungen auf die Humusbildung hat. Über diese Wirkmechanismen trägt die Versauerung zum Waldsterben bei. Bei der Versauerung von Oberflächengewässern kommt es zu einer Verringerung des pH-Wertes. Davon sind vor allem Gewässer mit geringer chemischer Pufferkapazität betroffen. Die Folge sind abnehmende Fischbestände und eine geminderte Vielfalt anderer Wasserorganismen, da sich nur säuretolerante Lebewesen auf diese Bedingungen einstellen können. Für die Beurteilung der Versauerung wurde ein Bewertungssystem entwickelt, das die Sensibilität der Arten gegenüber pH-Erniedrigungen und seiner Begleiterscheinungen widerspiegeln

Ferner tragen Stickoxidemissionen zur Überernährung (Eutrophierung) von Nord- und Ostsee bei. In Gewässern resultiert aus dem vermehrten Pflanzenwachstum eine erhöhte Sauerstoffzehrung. Zusätzlich entsteht mehr abgestorbene Biomasse, die im Gewässer absinkt und zu sauerstoffarmen und -freien Zonen führt, in denen sich Faulschlamm bildet. In der Folge bricht das Ökosystem in seiner bisherigen, mit Selbstreinigungsmechanismen versehenen Form, zusammen.

3.4 Wirkung von Diesel-Abgas, Auswirkung des Einsatzes von Partikelfiltern

Partikel, deren wichtigste Quelle Kfz mit Dieselmotor sind, werden in dem Umweltgutachten 2002 des Rates von Sachverständigen für Umweltfragen als das derzeit wichtigste Problem der Luftverschmutzung angesehen [3]. Der Anteil der Dieselmotoremissionen an partikelförmigem Kohlenstoff wird in Deutschland auf durchschnittlich 84 % geschätzt. In Städten liegt dieser Wert über 90 %. Der Partikeldurchmesser der meisten Dieseldieselrußpartikel umfasst den Größenbereich von 0,02 µm bis 0,5 µm.

Es kann als gesichert gelten, dass inhalierbarer und lungengängiger Schwebstaub, gemessen als Partikelmasse PM 10 und PM 2,5, sowohl bei Kurzzeitexpositionen als auch bei Langzeitexpositionen adverse Einflüsse auf die Morbidität und Mortalität durch Atemwegserkrankungen und Herz-Kreislauf-Erkrankungen hervorrufen kann. Darüber hinaus wird die Gesamtsterblichkeit und damit die Lebenserwartung beeinträchtigt. Es gibt ernst zu nehmende Hinweise, dass diese Effekte auch durch ultrafeine Partikel (PM 0,1) ausgelöst werden. Aus den vorliegenden Untersuchungen zur gesundheitlichen Relevanz der Feinstäube ergibt sich die Notwendigkeit, die Feinstaub-Emission zu minimieren und die Immissionsbelastung zu begrenzen [3]. Die Kanzerogenität – bezüglich des Lungenkrebsrisikos – von Dieseldieselruß konnte im Tierversuch nachgewiesen werden. Auch die Belege für eine Kanzerogenität beim Menschen haben in den letzten Jahren zugenommen.

Ein relativer Anstieg der Sterblichkeit, von Krankenhausaufnahmen aufgrund von Atemwegserkrankungen, Angaben zum Gebrauch von Bronchodilatoren, Husten und Symptomen der unteren Atemwege und Veränderungen der Lungenfunktion (Peak Expiratory Flow, PEF) kann mit einem gemessenen Anstieg von PM 10 oder PM 2,5 assoziiert werden. Zur Illustration ist in **Abb. 11** eine Schätzung dafür abgegeben, wie sich eine drei Tage anhaltende Episode mit täglichen Konzentrationen von 50 und 100 µg/m³ PM 10 in einer Bevölkerung von 1 Million Personen auswirken kann.

Der aktuelle Stand der Erkenntnisse zur Partikelwirkung wurde vom Health Effects Institute (HEI) im April 2002 veröffentlicht (**Abb. 12**). Der grundsätzliche Zusammenhang zwischen erhöhten Partikelkonzentrationen in der Umgebungsluft und bestimmten Krankheitsbildern bis hin zu einer erhöhten Mortalität wird bestätigt. Es besteht weiterer Forschungsbedarf bezüglich der wirkungsrelevanten Partikeleigenschaften, der biologischen Mechanismen der Partikelwirkung und der Empfindlichkeit bestimmter Risikogruppen.

Geschätzte Zahl von Personen (in einer Bevölkerung von 1 Million) mit Gesundheitseffekten während einer Periode von 3 Tagen und erhöhten Schwebstaubkonzentrationen		
Indikator für Gesundheitseffekte	Anzahl der Personen, nach einer 3-tägigen Episode von PM ₁₀	
	50 µg/m³	100 µg/m³
Zahl der Todesfälle	4	8
Zahl der Krankenhausaufnahmen aufgrund respiratorischer Probleme	3	6
Personen-Tage mit Gebrauch von Bronchodilatoren	5 100	10 200
Personen-Tage mit Symptomverschlechterung (Husten und Symptome der unteren Atemwege gemeinsam)	6 000	12 000

Quelle: WHO, 1996 und 2000

Abb. 11

UNDERSTANDING THE HEALTH EFFECTS OF COMPONENTS OF THE PARTICULATE MATTER MIX: PROGRESS AND NEXT STEPS (HEI, April 2002)

..... Epidemiologic studies over the last decade have reported associations between short-term increases in exposure to PM and increases in morbidity and mortality, particularly among those people with respiratory or cardiovascular disease. Recent studies funded by HEI and other agencies have corroborated and extended the associations found in the earlier studies. The recent epidemiologic studies and studies of controlled exposure to PM in humans and other species have begun to provide information about critical issues in PM research:

[A] the size and chemical composition of particles that may cause harmful human health effects,

[B] the potential biologic mechanisms of PM effects that underlie the epidemiologic associations previously reported

[C] the groups of people that may be particularly sensitive to the effects of PM.

Nevertheless, to inform future regulatory discussions on control strategies, a systematic research effort is required to develop a better understanding of the health effects of different components of the PM mixture and the mechanisms of PM effects.

Abb. 12

Die U.S. EPA hat im Jahr 2002 zur Wirkung von Diesel-Abgas folgendes festgestellt [6, 7]:
„Emissions from heavy-duty vehicles contribute significantly to a number of serious air pollution problems. Ground-level ozone, particulate matter (PM), nitrogen oxides (NOx), sulfur oxides (SOx), and volatile organic compounds (VOCs) adversely affect public health, contributing to premature mortality, aggravation of respiratory and cardiovascular disease, decreases in lung function and increased respiratory symptoms changes to lung tissues and structures, altered respiratory defense mechanisms, and chronic bronchitis. In addition diesel exhaust PM, especially from older engines, has been found recently by U.S.EPA as likely to be a cause of increased risk of lung cancer and respiratory disease.“

In einem Gutachten [23] wurde die gesundheitliche Auswirkung des Einsatzes von Partikelfiltern in Deutschland untersucht. Das Gutachten von Prof. Wichmann, GSF Neuherberg, vom Juni 2003 kommt zu folgendem Ergebnis:

„Nach Aussage eine Arbeitsgruppe der WHO hat der Wissensstand in den letzten Jahren deutlich zugenommen, der den Zusammenhang zwischen der Exposition gegenüber der Immission feiner Partikel (PM_{2,5}) und gesundheitlichen Auswirkungen belegt. Die Arbeitsgruppe empfiehlt, PM_{2,5} als Indikator für gesundheitliche Effekte durch Partikel in Europa zu verwenden, zusätzlich zu PM₁₀, das neben feinen auch grobe Partikel enthält (WHO 2003).

Der Kenntnisstand über die Belastung der Bevölkerung in Deutschland durch PM_{2,5} ist wegen weitgehend fehlender Messungen rudimentär. Es stehen jedoch Daten für PM₁₀ zur Verfügung, die es näherungsweise gestatten, hieraus die PM_{2,5}-Immission abzuschätzen. Danach beträgt die mittlere PM₁₀-Konzentration in Deutschland ca. 25 µg/m³, und unter der Annahme eines

Umrechnungsfaktors von 0,6 ergibt sich hieraus eine mittlere $PM_{2.5}$ -Konzentration von $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Lambrecht et al. (1999) haben eine Abschätzung des Beitrags von Kfz-Abgasen zur PM_{10} -Immission in Deutschland vorgenommen. Dieser Anteil beträgt für die Hintergrundbelastung in der Stadt 5,5 und auf dem Land 2,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM_{10} . Hieraus berechnet sich ein Mittelwert von ca. 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM_{10} . Da die Partikel der Kfz-Abgase einen Durchmesser unter 2,5 μm haben, verursachen sie eine Immissionsbelastung von ebenfalls ca. 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ $PM_{2.5}$. Ferner beträgt der Massenanteil der Diesel-Pkw und Lkw an den Dieselrußabgasen mehr als 90%. Deshalb erscheint die Annahme berechtigt, dass die Partikelmasse des $PM_{2.5}$ -Kfz-Abgases nahezu vollständig aus Dieselfahrzeugen stammt. Dennoch wird nur ein Minderungspotential von 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ $PM_{2.5}$ für das Standardmodell des Gutachtens zugrunde gelegt, um eine konservative Abschätzung zu erhalten.

Zur Risikoabschätzung werden epidemiologische Daten benötigt, die eine Aussage über den Zusammenhang zwischen der Langzeitexposition gegenüber Partikeln und dem Gesundheitszustand der Bevölkerung erlauben. Hierzu liegen mehrere Studien vor, die signifikante Expositions-Wirkungs-Beziehungen liefern.

Für quantitative Abschätzungen am besten geeignet ist die neue Studie der American Cancer Society (ACS) von Pope et al. (2002), die einen linearen Zusammenhang zwischen der Exposition gegenüber $PM_{2.5}$ und der Sterblichkeit für alle Todesursachen, der Sterblichkeit an Atemwegs- und Herz-Kreislauf-Erkrankungen sowie an Lungenkrebs aufgezeigt hat. Für Partikel mit einem Durchmesser größer als 2,5 μm wurde kein signifikanter Zusammenhang gefunden.

Diese Studie wird auch von der WHO im Weltgesundheitsbericht 2002 verwendet. Dabei geht man davon aus, dass die gefundene lineare Expositions-Wirkungs-Beziehung im Bereich zwischen 7,5 und 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ $PM_{2.5}$ gültig ist.

Die Angaben zur Mortalität in Deutschland, die für die Risikoberechnung benötigt werden, sind der aktuell verfügbaren Todesursachenstatistik entnommen (Statistisches Bundesamt 2003).

Im Gutachten wird als Standardmodell der Ansatz des Weltgesundheitsberichts 2002 mit den Mortalitätsdaten und Immissionsabschätzungen aus Deutschland verknüpft. Ferner werden in einer Sensitivitätsanalyse mehrere Alternativszenarien untersucht.

Ergebnisse

1. Die derzeitige mittlere Belastung der deutschen Bevölkerung durch Partikel beträgt ca. 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM_{10} und ca. 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ $PM_{2.5}$. Es wird angenommen, dass das Minderungspotential durch den Einsatz von Partikelfiltern bei Dieselfahrzeugen ca. 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ $PM_{2.5}$ ausmacht.
2. Legt man die Modellbetrachtungen des Weltgesundheitsberichts 2002 zugrunde, dann besteht oberhalb von 7,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ $PM_{2.5}$ eine lineare Expositions-Wirkungs-Beziehung für die Zunahme der Sterblichkeit mit zunehmender Partikelbelastung.
3. In Deutschland versterben pro Jahr insgesamt ca. 800.000 Menschen (alle Todesursachen).
4. Von diesen Todesfällen sind ca. 1 bis 2% den Kfz-Abgasen aus Dieselfahrzeugen zuzuordnen. Das entspricht ca. 10.000 bis 19.000 Todesfällen pro Jahr. Etwa 8.000 bis

17.000 dieser Todesfälle betreffen Personen mit Atemwegs- und Herz-Kreislauf-Erkrankungen und ca. 1.100 bis 2.200 der Todesfälle betreffen Personen mit Lungenkrebs.

- 5. Durch den Einsatz von Partikelfiltern ließe sich zum überwiegenden Teil verhindern, dass diese Zahl von Personen vorzeitig verstirbt.*
- 6. Da es sich bei Atemwegs- und Herz-Kreislauf-Erkrankungen und beim Lungenkrebs um Krankheiten handelt, die in einem relativ hohen Lebensalter zum Tode führen, ist die Verkürzung der Lebenserwartung des Einzelnen durch diese Krankheiten deutlich kleiner als bei Todesursachen, die früher im Leben auftreten. Daher ist die Betrachtung der Lebenserwartung sinnvoller als die Betrachtung der Mortalität.*
- 7. Berechnet man vereinfacht die Auswirkungen auf die Lebenserwartung, dann lässt der großflächige Einsatz von Partikelfiltern gegenüber der gegenwärtigen Situation eine mittlere Verlängerung der Lebenserwartung um 1 bis 3 Monate erwarten.*
- 8. In der kürzlich für die Schweiz, Österreich und Frankreich vorgelegten Dreiländerstudie wurde angegeben, dass ca. 6 % der Todesfälle dieser Länder auf die Partikelbelastung zurückzuführen seien, und davon ca. die Hälfte auf Partikel aus dem Kraftfahrzeugverkehr (Künzli et al. 2000). Der Unterschied zur hier für Deutschland vorgelegten Abschätzung beruht darin, dass zwischenzeitlich eine wichtige neue epidemiologische Studie erschienen ist (Pope et al. 2002) und modifizierte konservativere Modellannahmen verwendet wurden (in Anlehnung an den WHO Weltgesundheitsbericht 2002).*
- 9. Die in diesem Gutachten vorgelegte Abschätzung stützt sich auf signifikante, epidemiologisch belegte Risikoerhöhungen sowie anerkannte Berechnungsverfahren und ist daher wissenschaftlich belastbar. Dennoch ist es unbefriedigend, dass bisher für Deutschland - im Gegensatz zu anderen Ländern - kein detailliertes Health Impact Assessment zum Gesundheitsrisiko durch Partikel durchgeführt wurde. Dieses würde deutlich genauere und detailliertere Aussagen liefern, als es derzeit auf Grund vereinfachter Modellannahmen möglich ist.*

Diskussion

Die ermittelten Zahlenangaben enthalten zahlreiche vereinfachende Annahmen und Unsicherheiten. Es handelt sich aber tendenziell um konservative Aussagen, d.h. eher um eine Unterschätzung als eine Überschätzung der tatsächlichen Auswirkungen der Partikelbelastungen auf die Gesundheit des Menschen.

Folgende Gesichtspunkte sind zu beachten:

- Es wird angenommen, dass das toxische Potential aller feinen Partikel gleich groß ist. Tatsächlich gibt es Hinweise, dass von Partikeln aus Kfz-Abgasen ein höheres Risiko als von anderen Partikeln ausgeht.*
- Es werden nur die städtischen und ländlichen Hintergrundbelastungen betrachtet, nicht aber die verkehrsnahen Belastungen, da hierfür keine ausreichenden Angaben über die Zahl Exponierter vorliegen.*
- Es wird angenommen, dass der überwiegende Massenanteil der feinen Partikel der Kfz-Abgase aus Dieselfahrzeugen stammt.*

- *Es wird angenommen, dass es möglich ist, mit Partikelfiltern die Emission des überwiegenden Massenanteils der feinen Partikel aus Abgasen von Dieselfahrzeugen zu verhindern.*
- *Es wird auch mit anderen technischen Verfahren möglich sein, die Partikelemission aus dem Kfz-Verkehr zu verringern und dadurch das gesundheitliche Risiko zu verkleinern. Es ist nicht Gegenstand des Gutachtens, den Erfolg dieser Maßnahmen zu bewerten.*
- *Bei den vorgelegten Abschätzungen wird einzig die Partikelmasse betrachtet. Die Partikelanzahl konnte nicht berücksichtigt werden, da keine Langzeitstudien vorliegen, bei denen die Partikelanzahl in unterschiedlich belasteten Regionen gemessen wurde.*
- *Bei der hier vorgenommenen Abschätzung des Potentials zur Verringerung der Sterblichkeit bzw. zur Verlängerung der Lebenserwartung durch den Einsatz von Partikelfiltern ist nicht berücksichtigt worden, dass beim Wegfall eines Risikos die relative Bedeutung anderer Risiken etwas zunimmt. Dadurch ist zu erwarten, dass der berechnete gesundheitliche Vorteil nicht vollständig realisiert würde. Diese geringe Verkleinerung der Realisierung dürfte aber vernachlässigbar sein. Ferner ist zu berücksichtigen, dass der Vorteil niedrigerer Partikelbelastungen sich voraussichtlich nicht sofort vollständig auswirken würde sondern mit einer Verzögerung von mehreren Jahren einträte (Künzli et al. 2000).*
- *Im Zusammenhang mit Studien zu Kurzzeiteffekten wurden teilweise Korrekturen der ursprünglich publizierten Effektschätzer erforderlich. Das betrifft nicht die hier verwendeten Langzeitstudien.“*

Wie oben ausgeführt, ist die Betrachtung der Auswirkung von Dieselaabgas auf die Lebenserwartung plausibler als die Betrachtung der durch Dieselaabgase bedingten Mortalität. Demnach lässt der Einsatz von Partikelfiltern gegenüber der gegenwärtigen Situation eine mittlere Verlängerung der Lebenserwartung um 1 bis 3 Monate erwarten. Demgegenüber sind die Aussagen darüber, wie viele Todesfälle den Abgasen aus Dieselfahrzeugen zuzuordnen sind, mit Vorsicht zu interpretieren. Die den Kfz-Abgasen zugeordnete Verkürzung der Lebenserwartung ließe sich durch wirksame Partikelfilter weitgehend verhindern. Bei der Frage, ob sich auch die genannte Zahl von durch Dieselaabgas bedingten Todesfällen verhindern ließe muss jedoch berücksichtigt werden, dass im eigentlichen Sinne nicht Todesfälle verhindert werden, sondern deren vorzeitiges Auftreten aufgrund der verkürzten Lebenserwartung. Wie viele vorzeitige Todesfälle durch den Einsatz von Partikelfiltern verhindert werden könnten, lässt sich zwar nach bestimmten Konventionen theoretisch berechnen, aber nicht ohne die Gefahr der Fehlinterpretation darstellen. Daher ist die Darstellung über gewinnbare Lebenszeit besser kommunizierbar.

Ein bereits 1998 von der Fraunhofer-Gesellschaft, Hannover, gemeinsam mit dem ifeu-Institut durchgeführter und auf unit-risk-Faktoren basierender Vergleich zwischen Otto- und Dieselmotoren zeigt: Die krebserzeugende Potenz von Dieselmotorabgasen ist bei heutigen Modellen mindestens um den Faktor 10 höher als diejenige von Ottomotorabgasen (**Abb. 13**). Diese Aussagen wurden in neueren Untersuchungen aus Schweden bestätigt [8] (**Abb. 14**).

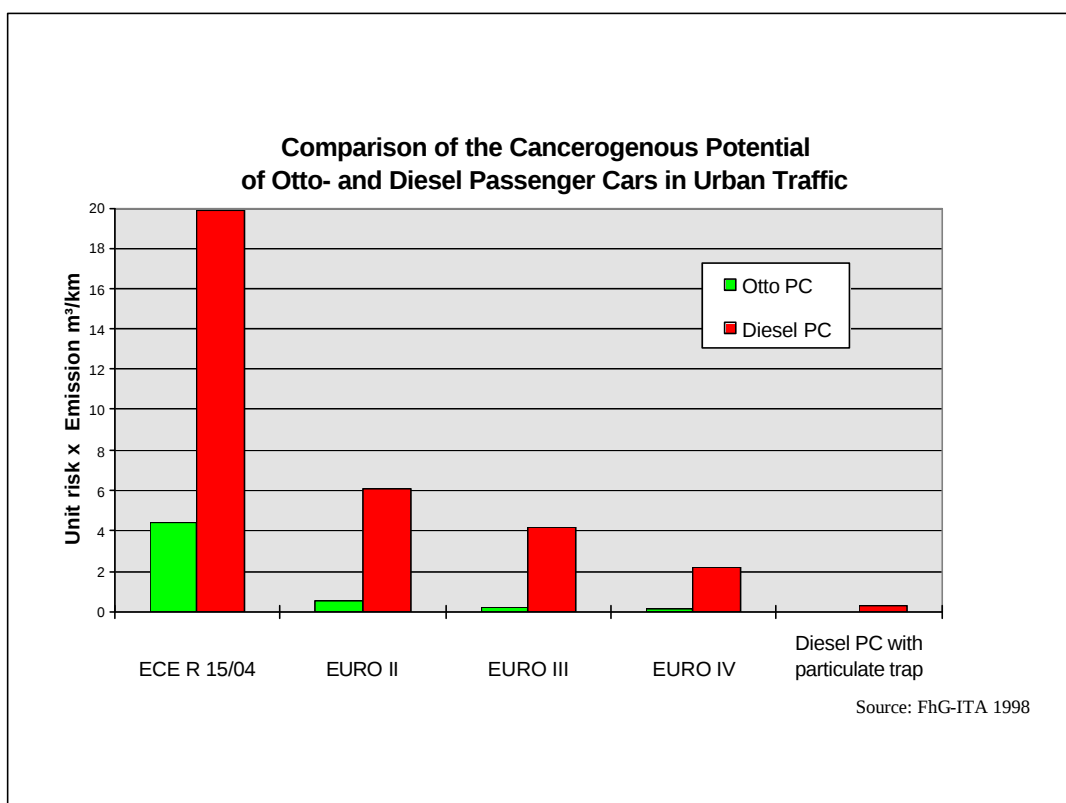


Abb. 13

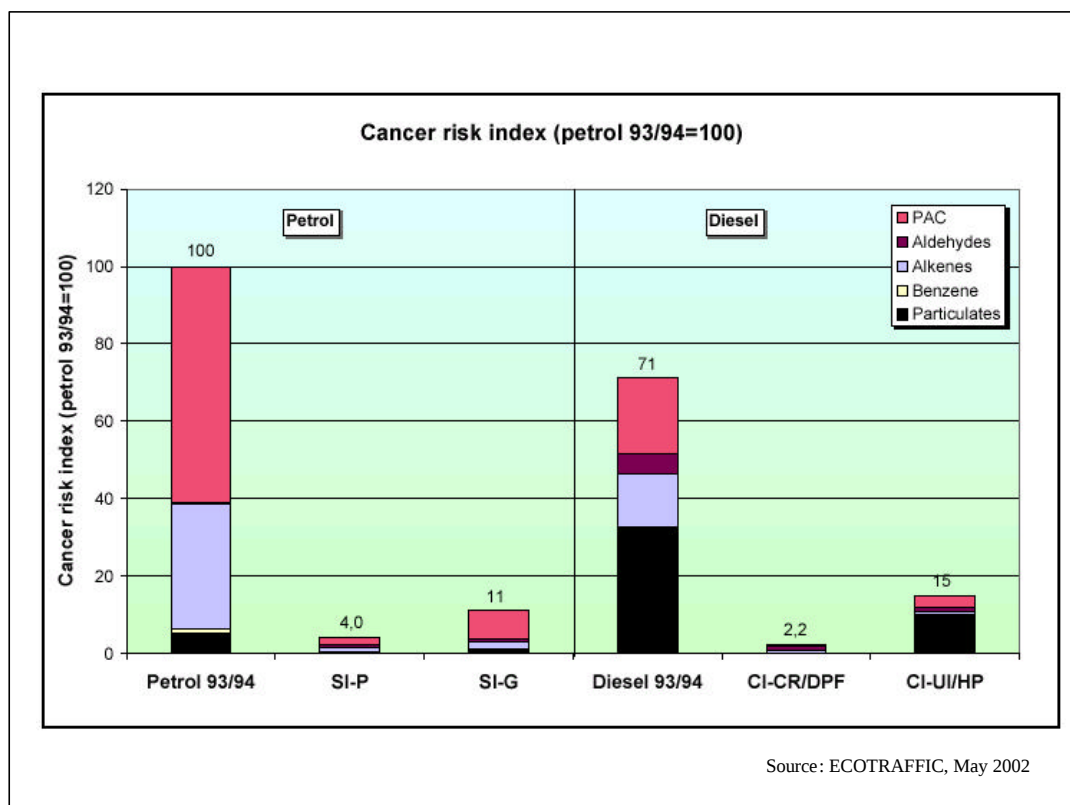


Abb. 14

Dieses Problem kann der Partikelfilter lösen. Durch den Einsatz von effizienten Filtern verringert sich der Abstand zwischen Diesel- und Ottomotoren hinsichtlich der gesundheitlichen Wirkungen ihrer Abgase soweit, dass kein signifikanter Unterschied vorhanden ist. Insgesamt kann mit dem Filter das Niveau der Partikelkonzentration der Umgebungsluft erreicht werden.

3.5 Klimawirkung von Dieselpartikeln

Ein Artikel des Klimaforschers Mark Z. Jacobson, Stanford University, [26] befasst sich mit der Klimawirksamkeit von Diesel- und Benzinfahrzeugen. Die Klimawirksamkeit von Dieselpartikeln sei so hoch, dass der Effekt durch den geringeren Verbrauch und damit den geringeren CO₂-Emissionen von Diesel- gegenüber Benzinfahrzeugen überkompensiert würde.

In diesem Artikel wird ein sehr umfangreiches Modell für die Klimawirkung vorgestellt, das mehrere neue direkte und indirekte Effekte durch Rußpartikel erstmals quantifiziert. Ein interessanter Effekt ist beispielsweise folgender: Wenn ein Rußpartikel Licht absorbiert und dadurch die umliegende Luft erwärmt, so sinkt dort die relative Luftfeuchte. Dadurch schrumpfen eventuell vorhandene Aerosolpartikel aus Salzlösungen und damit deren Fähigkeit, durch die Albedo den Klimaantrieb zu reduzieren. In dem Artikel werden insgesamt 12 Mechanismen für die Klimawirksamkeit von Ruß beschrieben, die allesamt in dem Klimamodell berücksichtigt werden. Die Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass Dieselaautos - entgegen landläufiger Meinung – die Erdatmosphäre noch viel stärker aufheizen als ein Benzinfahrzeug.

Ein wichtiger Punkt ist, dass für Rußpartikel (black carbon, BC) eine wesentlich kürzere Aufenthaltszeit in der Atmosphäre angesetzt wird als beispielsweise für CO₂ und CH₄, so dass Maßnahmen zur Rußminderung viel schneller zu einer Minderung der Klimawirkung führen würden. Deshalb ist die Wirksamkeit dieser Minderungsmaßnahmen, wenn man einen Zeithorizont von 5 Jahren betrachtet, für Rußpartikel sehr hoch, selbst wenn sie nicht den größten Anteil der anthropogenen Erwärmung ausmachen.

Nach den Annahmen, die M. Jacobson in seinem Klimamodell verwendet, erwärmt Ruß 360.000 – 840.000 mal effektiver die Atmosphäre wie die gleiche Masse CO₂. Demnach heizen Dieselfahrzeuge, die den EURO 3 Standard erfüllen, die Atmosphäre während der nächsten 100 Jahre stärker auf als Benzinfahrzeuge. Umgekehrt bedeutet das, dass ein Diesel-Pkw bei einem Rußanteil an der Partikelemission von 80 %, wie er für Fahrzeuge ohne Partikelfilter typisch ist, einen Emissionswert für Partikel von 0,0015 g/km unterschreiten muss, um einen Vorteil gegenüber den Benzinfahrzeugen bezüglich der Klimawirksamkeit zu haben. Dies ist ein Wert, der deutlich unter dem EURO 4 Grenzwert (0,025 g/km) liegt und der mit Partikelfilter sicher eingehalten werden kann.

Feichter et al.[24] unterstützen die Aussage von M. Jacobson, dass Aerosole einen hohen Einfluss auf das Klima haben und Rußpartikel einen positiven, d.h. erwärmenden Strahlungseinfluss ausüben. Sie kritisieren jedoch unter anderem, dass mit Jacobsons Modell nur über 5 Jahre integriert wurde, während für eine aussagekräftige Klimasimulation jedoch eine Integration über viele Jahre notwendig sei.

Dass eine Reduzierung der BC-Emissionen der beste Weg ist, die globale Erwärmung aufzuhalten, ist laut Sato et al. [25] eher unwahrscheinlich. Sie begründen diese Aussage u.a. damit, dass gleichzeitig mit einer Reduzierung der Ruß-Emissionen auch OC (Organic

Compound)- und Sulfat-Aerosole reduziert werden, die wiederum eine abkühlende Wirkung haben, so dass der Netto-Effekt sehr gering einzuschätzen sei.

Der wissenschaftliche Erkenntnisstand zur Klimawirkung ist bei allen Aerosolen sehr komplex, und es wirkt eine Vielfalt von Effekten. Im 3. IPCC-Sachstandsbericht wird der Strahlungsantrieb, der als Maß für die Störung der Strahlungsbilanz dient, für BC mit $+0,2 \text{ W/m}^2$ angegeben und liegt damit höher als beispielsweise für N_2O . Es ist zu beachten, dass im 2. IPCC-Bericht der Wert noch bei $+0,1 \text{ W/m}^2$ lag, also jetzt nach oben korrigiert wurde. Andere Wissenschaftler wie beispielsweise Jacobson [26], Hansen und Sato [27] gehen davon aus, dass der Strahlungsantrieb wahrscheinlich bei $+0,5 \text{ W/m}^2$ und höher liegt.

Unter den Klimaforschern besteht weitgehend Einigkeit darüber, dass Dieseleruß einen erwärmenden Strahlungsantrieb aufweist, auch wenn die Quantifizierung noch im Detail diskutiert werden muss. Damit ist die Erwärmung der Atmosphäre durch Dieseleruß wahrscheinlich ein zusätzliches Argument für eine Fortschreibung der Partikelgrenzwerte.

3.6 Entwicklung des Fahrzeugbestandes und der Fahrleistungen

Das wesentliche Instrument zur Beurteilung der zukünftigen Entwicklung der Schadstoffemissionen des Verkehrs und der daraus abzuleitenden Maßnahmen in Hinblick auf die Erfüllung der Umweltqualitätsziele ist das Rechenmodell TREMOD. Im Oktober 2001 wurden mit der Version 2.1 wesentliche Annahmen gegenüber den früheren Berechnungen (letzter Stand August 2000, Version 2.0) aktualisiert, die insbesondere die Bestandsentwicklung und den steigenden Fahrleistungsanteil von Diesel-Pkw in Deutschland betreffen.

Im Folgenden wird der Vergleich der „neuen“ mit den „alten“ TREMOD-Berechnungen dargestellt. Auch bei den neuen Berechnungen handelt es sich um insgesamt konservative Annahmen, d.h. es werden statistische Daten aus offiziellen Quellen verwendet und nur bereits beschlossene Maßnahmen einbezogen (**Abb. 15**). Der zukünftige Bestandsanteil von Diesel-Pkw mit Partikelfilter wird entsprechend den bisher verabschiedeten Richtlinien mit 10 % angenommen.

Der stark steigende Anteil von Diesel-Pkw an den Neuzulassungen und damit im Bestand und an den Pkw-Fahrleistungen spielt bei der Neuberechnung die wichtigste Rolle. In Deutschland hat sich der Anteil der Diesel-Pkw an den Neuzulassungen in den vergangenen Jahren mehr als verdoppelt. Er hat inzwischen nahezu 40 % erreicht, siehe **Abb. 16**.

Motortechnisch haben sich hier vor allem sparsame direkteinspritzende und mit Turbolader ausgerüstete Motoren durchgesetzt, die mittlerweile bei den Diesel-Pkw einen Zulassungsanteil von weit über 90 % erreicht haben. Um der bereits eingetretenen Entwicklung Rechnung zu tragen, wird ein Anstieg des Fahrleistungsanteils der Diesel-Pkw an den Pkw-Fahrleistungen bis 2010 auf 29 % und bis 2020 auf 36 % anstelle der früher angenommenen 14 % eingesetzt (**Abb. 17 und 18**). Damit ergibt sich eine Verschiebung der Fahrleistungsanteile von Otto-Pkw zu Diesel-Pkw, wobei der Anstieg der gesamten Fahrleistungen der Pkw gegenüber früheren Annahmen geringer ausfällt. Die Fahrleistung von Nutzfahrzeugen (sonstige Kfz) bleibt gegenüber früheren Annahmen fast unverändert und die Fahrleistung des Straßenverkehrs insgesamt wird etwas geringer.

Die in diesem Bericht zur Diskussion stehende Fortschreibung der Abgasgrenzwerte für Diesel-Pkw über EURO 4 hinaus und die Anpassung für Nutzfahrzeugmotoren Stufe EURO V ist dementsprechend in die neuen Berechnungen nicht einbezogen.

Vorbemerkungen zu den Berechnungen mit dem Modell TREMOD:

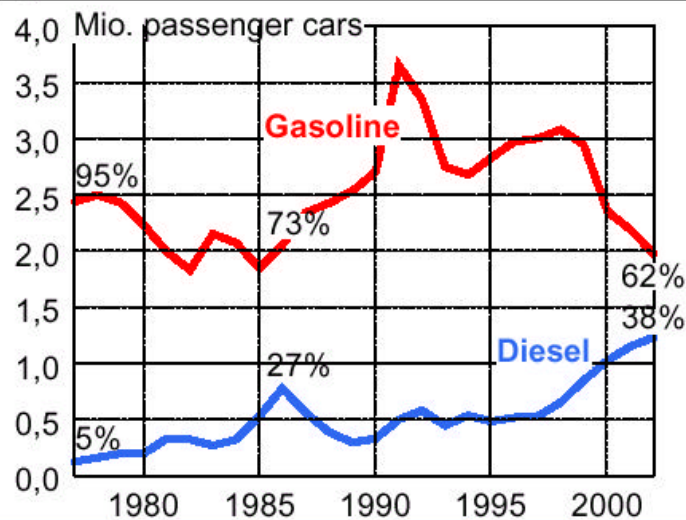
Die neuen Berechnungen beziehen sich auf die Version 2.1 von TREMOD vom 31.10.2001. Aufbauend auf der Version 2.0 vom August 2000 und dem dazu angefertigten Bericht (UFOPLAN Nr. 298 45 105) wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Aktualisierung der **Fahr- und Verkehrsleistungsdaten** für den Pkw- und den schweren Nutzfahrzeugverkehr für die Jahre 1998 bis 2000 aufgrund der DIW-Fahrleistungsberechnungen /ViZ 2000/ und der Verkehrsanalysen des ifo Instituts vom Herbst 2000.
- Aktualisierung der **Kraftstoffverbrauchsdaten** 1999 und 2000 anhand der aktuellen Statistiken des MWV.
- Aktualisierung der Kraftfahrzeug-**Bestandsdaten** und Neuzulassungen für 1999 und 2000,
- Anpassung der Berechnungen 1998 - 2000 an die **Energiebilanz**.
- Aktualisierung des Basisszenarios bis 2020 aufgrund der aktuellen **Verkehrsprognose 2015** für die Bundesverkehrswegeplanung.
- Anpassung der Annahmen für die Fortschreibung der **Flottenzusammensetzung** bis 2000, insbesondere des Fahrleistungsanteils der Diesel-Pkw. **[Konservative Annahmen zum Einsatz von Partikelfiltern.]**
- Neuberechnung der **CO₂-Szenarien** für den Straßenverkehr. Hierbei wurden die aktuellen Daten des KBA, der ACEA und anderer berücksichtigt.
- Berücksichtigung der jetzt geplanten Einführung und damit des Einflusses von schwefelfreiem Kraftstoff (10 ppm) auf die Emissionen (insbesondere NO_x) in den Szenarien (noch zu tun!).
- Aktualisierung der Szenarien für den **Schienen-, Luft- und Schiffsverkehr** anhand des „Verkehrsberichts 2015“.

Quelle: ifeu 10/2001, (UFOPLAN Nr. 298 45 105)

Abb. 15

New registrations of passenger cars Germany



European Status



Abb. 16

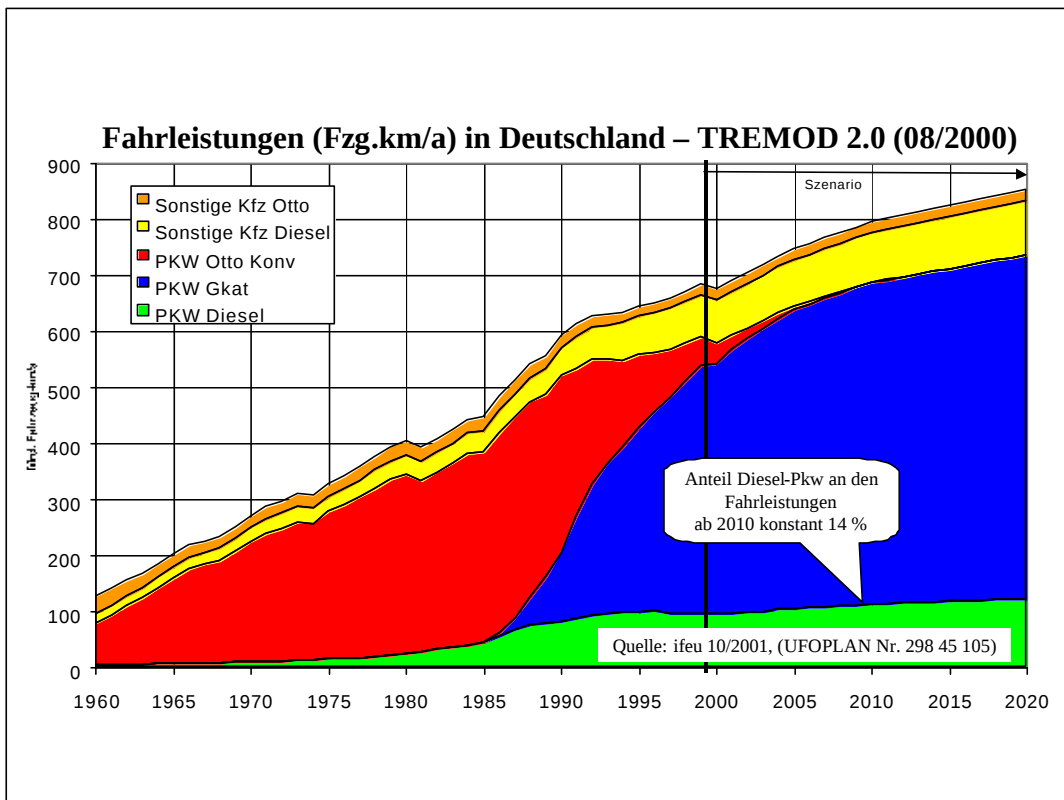


Abb. 17

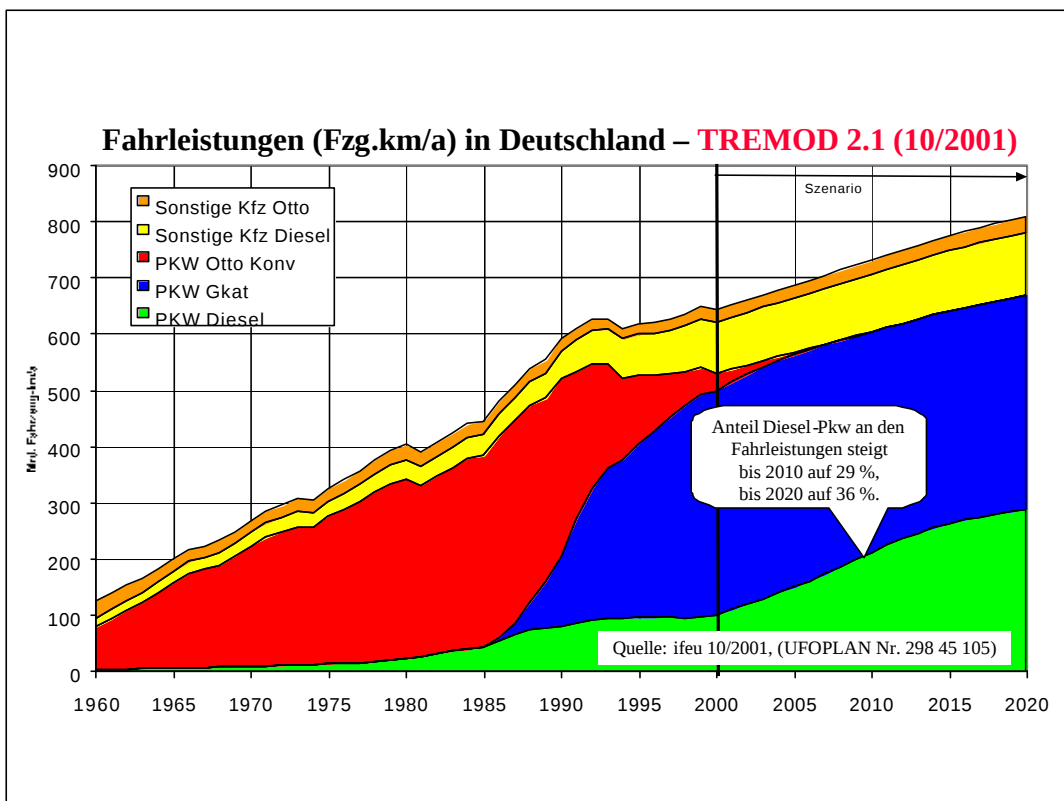


Abb. 18

3.7 Entwicklung der Schadstoffemissionen des Straßenverkehrs

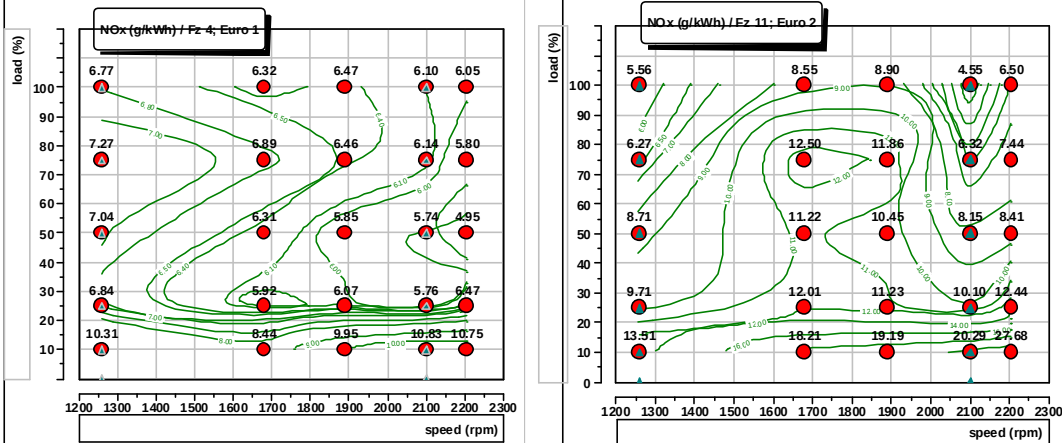
Im Folgenden wird der Vergleich der „neuen“ mit den „alten“ TREMOD-Berechnungen dargestellt.

3.7.1 Neue Erkenntnisse zu den Emissionsfaktoren von Nutzfahrzeugen

Die Emissionsfaktoren für Nutzfahrzeugmotoren wurden bisher - basierend auf den Messergebnissen an EURO 0- und EURO I- Motoren - entsprechend den prozentualen Grenzwertsenkungen der folgenden Grenzwertstufen EURO II bis EURO V fortgeschrieben. Neuere Untersuchungen zeigen jedoch, dass die tatsächlich erreichte Senkung des Emissionsniveaus der neueren Motorenkonzepte im Betrieb wahrscheinlich weit hinter den früheren Annahmen zurückbleiben. Elektronische Einspritzsysteme in Schweren Nutzfahrzeugen – eingeführt ab der Grenzwertstufe EURO II – ermöglichen unterschiedliche Einspritzstrategien in den verschiedenen Bereichen des Motorkennfeldes. Neuere Untersuchungen haben gezeigt, dass EURO II-Motoren außerhalb des im gesetzlichen Prüfzyklus gefahrenen Kennfeldbereiches vielfach gezielt auf den spezifischen Verbrauch hin optimiert werden. Dies bewirkt dann im Gegenzug einen erheblichen Anstieg der Stickoxid-Emissionen. Die NO_x -Emissionsfaktoren für Schwere Nutzfahrzeuge müssen daher deutlich nach oben korrigiert werden.

Nutzfahrzeugmotoren der Grenzwertstufe EURO II werden im Rahmen der Typprüfung bezüglich ihrer Schadstoffemissionen im sogenannten 13-Stufen-Test geprüft. An 13 festgelegten Messpunkten im Motorkennfeld wird jeweils die Schadstoffemission gemessen und mit bestimmten Wichtungsfaktoren zu einem Gesamtergebnis verrechnet, das dann unterhalb des jeweiligen Grenzwertes liegen muss. In Deutschland, Österreich, der Schweiz und den Niederlanden wurden in den vergangenen vier Jahren das Emissionsverhalten von zahlreichen Nutzfahrzeugmotoren auf Motorprüfständen untersucht. Um die Emissionen unter realen Fahrbedingungen beurteilen zu können, wurden Messungen auch außerhalb der Typprüfpunkte durchgeführt. Ein Beispiel für zwei vergleichbare Motoren (EURO I: 230kW/ 2100min⁻¹ und EURO II: 230kW/ 2100min⁻¹) des selben Herstellers ist in der **Abb. 19** in einem NO_x -Kennfeld mit entsprechend interpolierten Iso-Linien dargestellt. Bei den Drehzahlen $n=1260\text{min}^{-1}$ und $n=2100\text{min}^{-1}$ liegen 10 der 13 Messpunkte aus dem 13-Stufen-Test. Bei den restlichen 3 Messpunkten handelt es sich um Messungen bei Leerlaufdrehzahl. Bei dem EURO I-Motor ist zunächst ein relativ gleichmäßiges Emissionsverhalten zu erkennen, bei dem EURO II-Motor sieht man hingegen, dass zwischen den relevanten Prüfdrehzahlen erheblich höhere NO_x -Emissionen auftreten.

Nfz-Motoren: Vergleich eines EURO 1- und eines EURO 2-Kennfeldes für NO_x



Source:
RWTHÜV 2002

Abb. 19

Hier zeigt sich das Potential der elektronischen Regelung von modernen Dieselmotoren. Bei EURO II-Motoren lässt sich im mittleren Drehzahlbereich zwischen den Typprüfpunkten eine Optimierung des Kraftstoffverbrauchs um wenige Prozent erzielen, wobei aber erheblich höhere Stickoxid-Emissionen in Kauf genommen werden, die das Niveau der benachbarten Prüfpunkte und des Grenzwertes deutlich übersteigen.

Im Rahmen der Arbeiten für das neue Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA 2.0) wird ein Grossteil der Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs neu berechnet. S. Hausberger, TU Graz, hat in diesem Zusammenhang die Emissionsfaktoren der Schwere Nutzfahrzeuge auf der Grundlage der neuen Messdaten neu berechnet [4]. Das ifeu, Heidelberg, das im Auftrag des UBA das Modell TREMOD (Daten und Rechenmodell: Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland) erstellt hat, hat diese neuen Emissionsfaktoren der Schwere Nutzfahrzeuge in das Modell TREMOD 3.0 eingebunden und die Emissionen des Nutzfahrzeugverkehrs in einer vorläufigen Version neu berechnet.

Obwohl im Jahr 2010 der Anteil der EURO II-Nutzfahrzeuge an der Fahrleistung nur noch 13 % beträgt, liegen die Mehremissionen von NO_x bei knapp 50 %. Die Ursache dafür ist, dass die neuen mittleren Emissionsfaktoren nicht nur für EURO II-Nutzfahrzeuge, sondern auch für EURO III-Nutzfahrzeuge deutlich höher liegen, als die bisher auf der Basis von Angaben der Nutzfahrzeug-Industrie entwickelten Emissionsfaktoren.

Drei Punkte sollten bei der Bewertung der vorläufigen Ergebnisse berücksichtigt werden:

1. Wegen der Neudefinition der Fahrzeugschichten im HBEFA 2.0 musste das ifeu in TREMOD die Bestands- und Fahrleistungsgewichtung anpassen. Eine differenzierte Bestandsabfrage beim KBA wird demnächst im Rahmen der TREMOD-Arbeiten für die BASt durchgeführt. Diese

Daten standen jedoch kurzfristig nicht zur Verfügung. Aus diesem Grund wurde eine Statistik des KBA verwendet, die die Neuzulassungen der Lkw und Sattelzugmaschinen in hoher Differenzierung nach Größenklassen in einer Zeitreihe von 1970 bis 2001 ausweist. Erst mit einer umfassenden Aktualisierung kann die Gesamtberechnung auf Basis der differenzierten KBA-Bestandsdaten entsprechend der neuen Struktur durchgeführt werden. Es sind hierdurch jedoch keine signifikanten Änderungen zu erwarten.

2. Die Berechnungen enthalten noch keine Korrektur unter Berücksichtigung der Energiebilanz. Wegen der unterschiedlichen Energieverbräuche zwischen „neu“ und „alt“ ist keine mit TREMOD 3.0 konsistente Gesamtberechnung des Straßenverkehrs möglich, da z. Zt. noch kein sinnvoller Energiebilanzabgleich durchgeführt werden kann. Dies ist erst möglich, wenn eine Berechnung mit allen neuen Faktoren (Pkw, Leichte Nutzfahrzeuge, motorisierte Zweiräder, ...) des HBEFA 2.0 durchgeführt wurde. Da die Schweren Nutzfahrzeuge nach den neuen Emissionsfaktoren im Durchschnitt einige Prozent weniger Kraftstoff verbrauchen als bisher angenommen wurde, könnte die Korrektur unter Berücksichtigung der Energiebilanz einen geringeren Anstieg der Gesamtmenge an Schadstoffemissionen der Schweren Nutzfahrzeuge zur Folge haben.

3. Die Emissionsfaktoren der Schweren Nutzfahrzeuge für die Emissionsklasse EURO III basieren aufgrund des großen Aufwandes und der hohen Kosten der Messprogramme bisher auf den Messungen von nur 4 verschiedenen Motortypen. Für die EURO IV- und EURO V-Fahrzeuge wurden wie bisher die Emissionsfaktoren in Anlehnung an die Grenzwertabsenkung festgelegt. Da die Flotte der Schweren Nutzfahrzeuge im Jahr 2010 zu 80% aus EURO III, IV und V-Fahrzeugen besteht, deren tatsächliches Emissionsverhalten erst in den nächsten Jahren messtechnisch untersucht werden kann, ist die Prognose mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Wie groß diese Unsicherheit ist, kann zur Zeit nicht quantifiziert werden. Eine abschließende Einschätzung kann erst dann getroffen werden, wenn Messdaten der Motorkennfelder in repräsentativem Maße vorliegen. Ergebnisse für weitere EURO III-Motoren aus laufenden Projekten werden frühestens im Herbst 2003 erwartet.

3.7.2 NO_x-Emissionen

Die Entwicklung der NO_x-Emissionen und der Vergleich zwischen neuer und alter Berechnung ist in den folgenden Abbildungen dargestellt (**Abb. 21 und 22**). Aus **Abb. 22** wird deutlich, dass in der Zukunft die NO_x-Emissionen aus Nutzfahrzeugen („Sonstige Kfz Diesel“) den relativ größten Anteil an den verkehrsbedingten NO_x-Emissionen haben werden.

Aufgrund der neuen Emissionsfaktoren kommt es zu erheblich höheren NO_x-Emissionen der Schweren Nutzfahrzeuge. In der **Abb. 20** ist die Entwicklung der NO_x-Emissionen der Schweren Nutzfahrzeuge in Deutschland in den Jahren 1995 bis 2010 nach dem derzeitigen Kenntnisstand dargestellt. Bis zum Jahr 1996 liegen die NO_x-Emissionen der Schweren Nutzfahrzeuge mit dem vorläufigen Datensatz des HBEFA 2.0 um etwa 20 % höher als bisher im Rahmen des HBEFA 1.2 angenommen wurde. Etwa ab 1996 – dem Zeitpunkt der Einführung der EURO II-Grenzwerte für Schwere Nutzfahrzeuge – nimmt die Abweichung weiter zu. Obwohl im Jahr 2010 der Anteil der EURO II- Nutzfahrzeuge an der Fahrleistung nur noch 13% beträgt, liegen die Mehremissionen bei knapp 50%. Grund hierfür ist, dass die mittleren Emissionsfaktoren nicht nur für EURO II- Nutzfahrzeuge, sondern auch für EURO III- Nutzfahrzeuge deutlich höher liegen als bisher angenommen wurde.

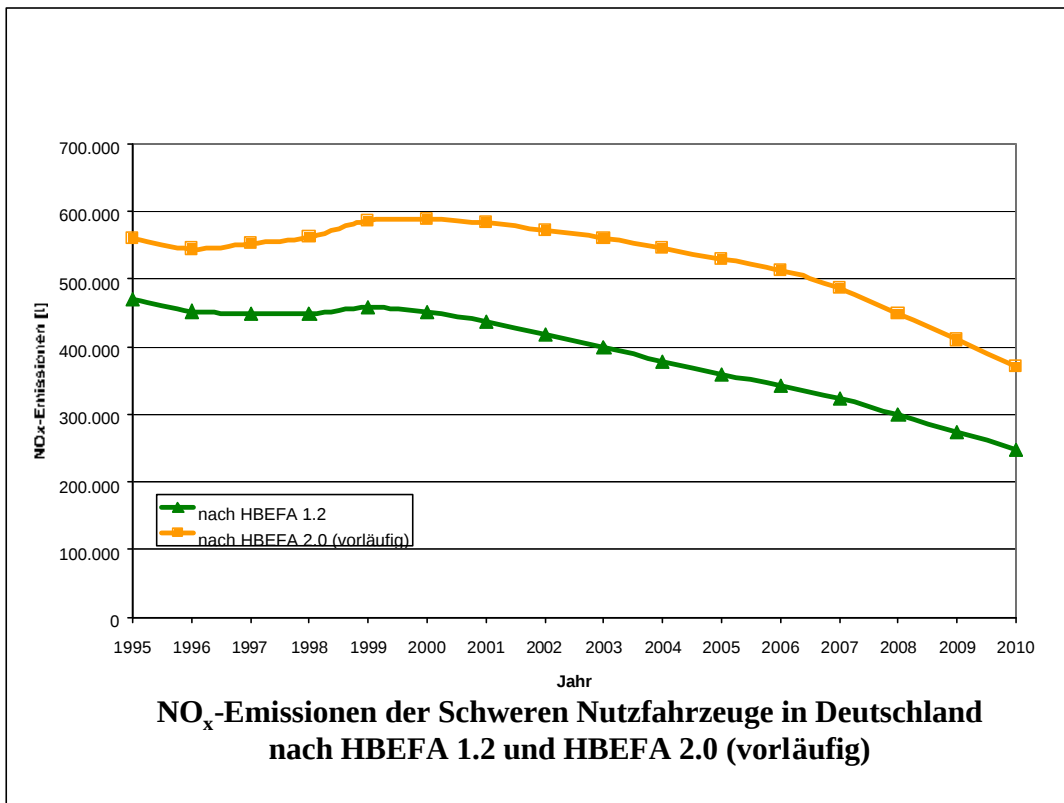


Abb. 20

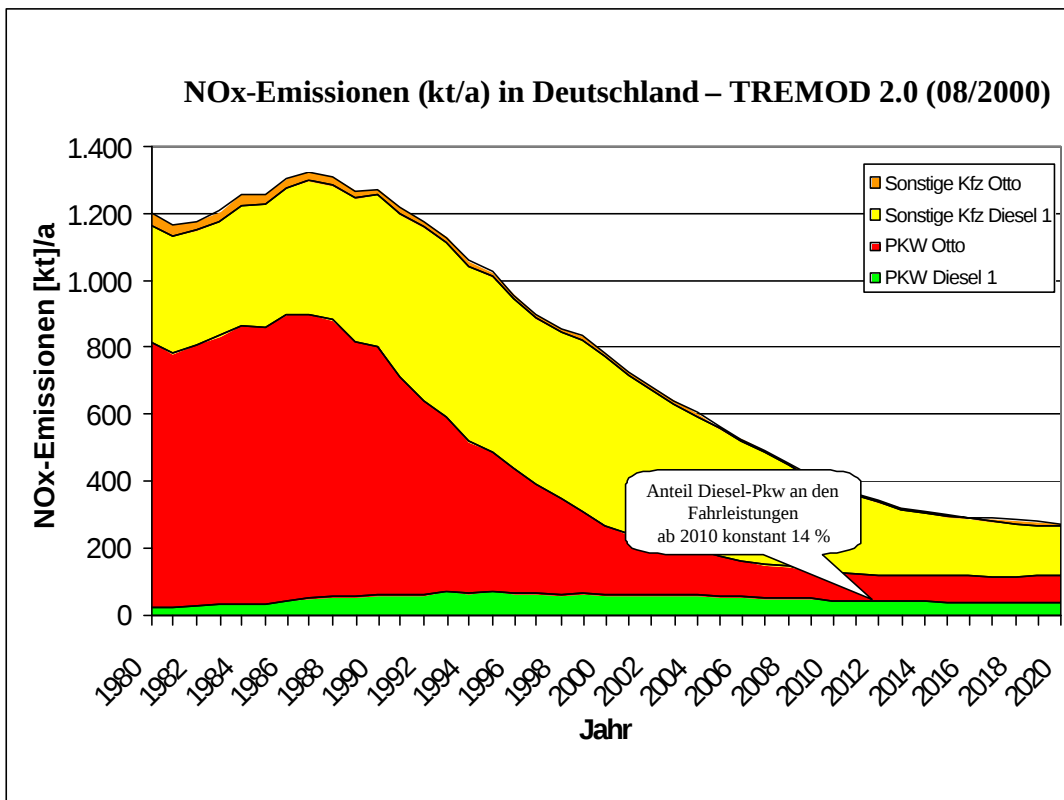


Abb. 21

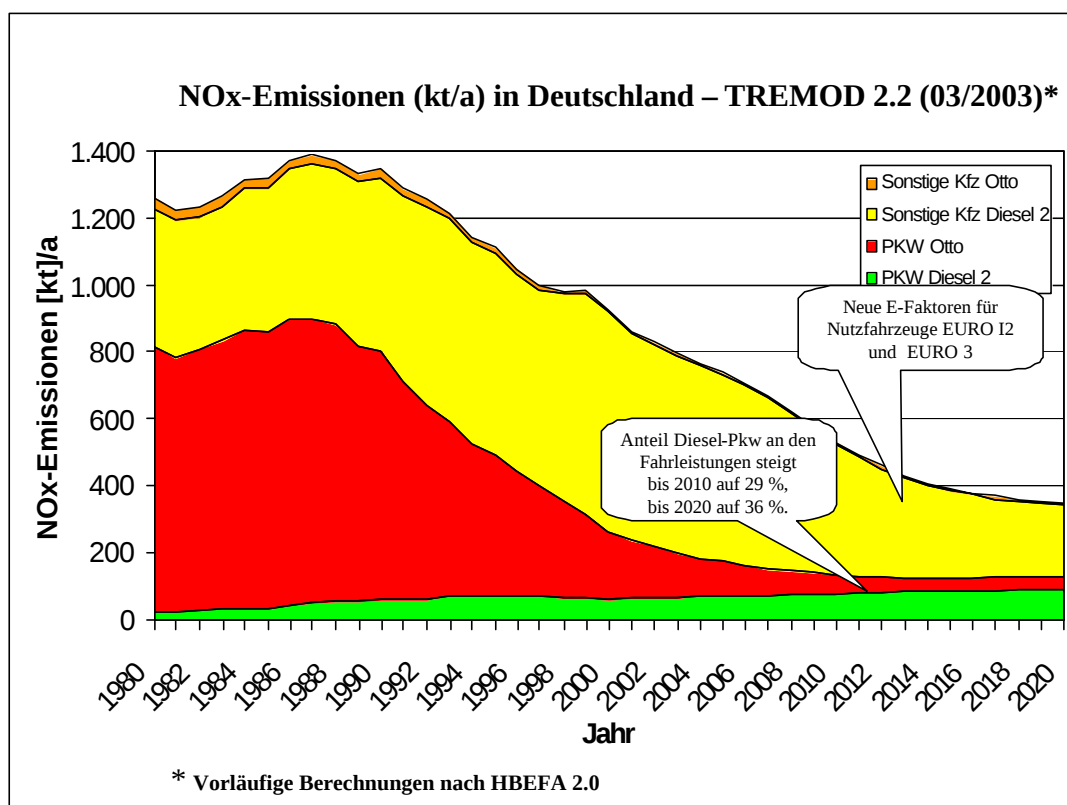


Abb. 22

Aufgrund der vorläufigen TREMOD-Berechnungen mit den neuen Emissionsfaktoren für Schwere Nutzfahrzeuge kann trotz gewisser Unsicherheiten davon ausgegangen werden, dass die absoluten Stickoxidemissionen der Schwere Nutzfahrzeuge im Jahr 2010 bis rund 370.000 t liegen und damit eine zusätzliche Deckungslücke bei der Erfüllung der Emissionsminderungsverpflichtung der NEC-Richtlinie (vgl. Kap. 3.1) in der Größenordnung von 115.000 t NO_x besteht. Diese Mehremission muss mittels weiterer Maßnahmen ausgeglichen werden, damit die Verpflichtungen aus der NEC-Richtlinie erfüllt werden können.

Wenn man davon ausgeht, dass für Nutzfahrzeugmotoren anstelle des in der Richtlinie 1999/96 EG zur Überprüfung vorgesehenen NO_x-Grenzwertes von 2,0 g/kWh ein Grenzwert von 1,0 g/kWh ab 2008/2009 technisch machbar ist und im Zuge einer Anpassung der Stufe EURO V eingeführt wird, und dass dem entsprechende Nutzfahrzeugmotoren bedingt durch steuerliche Anreize und die Lkw-Maut in Deutschland so frühzeitig in den Markt kommen, dass ihr Anteil bei den Neuzulassungen im Jahr 2008 bereits 100 % beträgt, so errechnet sich eine NO_x-Minderung von 36 kt für das Jahr 2010. Diese Maßnahme würde damit im Vergleich mit allen anderen im Rahmen des Maßnahmenplans zur Erfüllung der NEC-Richtlinie 2001/81/EG betrachteten Maßnahmen aller stationären und mobilen Quellen den absolut höchsten Minderungsbeitrag liefern.

3.7.3 Partikelemissionen

Die Entwicklung der Partikelemissionen und der Vergleich zwischen neuer und alter Berechnung zeigt, dass der stark steigende Anteil der Diesel-Pkw bis 2020 zu einer Erhöhung der Partikelemissionen aus Pkw um den Faktor 2,3 und damit zu einer Erhöhung der Partikel-

emissionen des Straßenverkehrs gegenüber den früheren Annahmen um den Faktor 1,6 führt (**Abb. 23 und 24**). Die früher berechnete Minderungsrate der Partikelemissionen des Straßenverkehrs bis 2020 gegenüber Mitte der 90er Jahre reduziert sich damit von 86 % auf 77 %. Hier besteht eindeutig ein Handlungsbedarf. Dieser wird durch den steigenden Diesel-Pkw-Anteil deutlich verstärkt.

In der Emissions-Prognose würden die Partikelemissionen sowie die NO_x-Emissionen der Diesel Pkw bei unveränderten Grenzwerten in der Zeit von 2002 bis 2020 stagnieren. Die Gesamtpartikelemission (Partikelmasse) ist zwar in den letzten 10 Jahren um 40 % zurückgegangen und wird wegen den Maßnahmen bei Lkw weiter zurückgehen. Es ist jedoch zweifelhaft, ob damit auch die Zahl der Ultrafeinpartikel zurückgeht.

Ultrafeinpartikel lassen sich nicht sicher über die Massenbegrenzung reduzieren, da z.B. 1.000.000 Partikel der Größe 10 Nanometer ebenso schwer sind, wie ein einziges Partikel der Größe 1 µm.

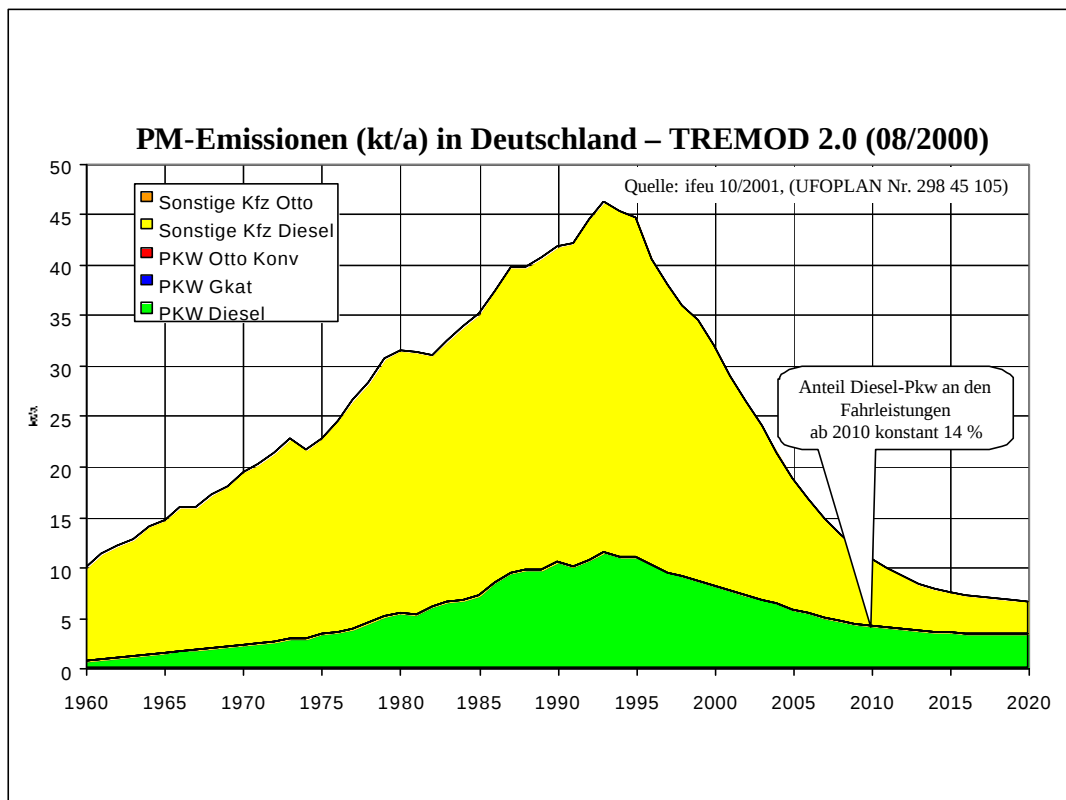


Abb. 23

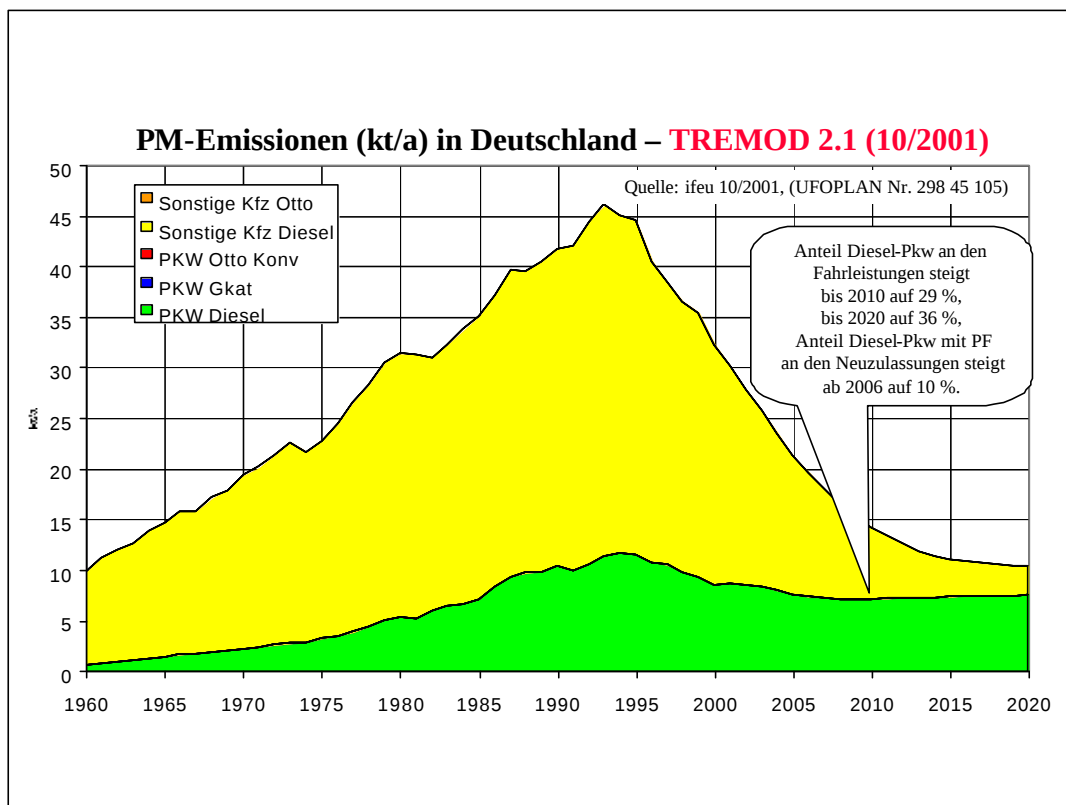


Abb. 24

3.8 Folgerungen

Die vom Rat an die EU-Kommission gerichteten Aufträge zur Fortschreibung der Abgasrichtlinien für Pkw, leichte Nutzfahrzeuge und Nutzfahrzeugmotoren wurden bereits eingangs erwähnt.

Ergänzend ergeben sich folgende gesundheitliche und ökologische Begründungen für eine Fortschreibung der Abgasrichtlinien:

Die Weltgesundheitsorganisation (WHO), der National Research Council und die EPA der USA stellen die besonderen gesundheitlichen Wirkungen der Dieselaabgase (Atemwegserkrankungen) fest. Daneben besteht der Verdacht der Kanzerogenität.

In Deutschland versterben pro Jahr insgesamt ca. 800 000 Menschen (alle Todesursachen). Von diesen Todesfällen sind ca. 1 bis 2% den Kfz-Abgasen aus Dieselfahrzeugen als vorzeitige Todesfälle zuzuordnen. Durch den Einsatz von Partikelfiltern ließe sich zum überwiegenden Teil verhindern, dass diese Personen vorzeitig versterben. Die Betrachtung der Auswirkung von Dieselaabgas auf die Lebenserwartung ist plausibler als die Betrachtung der durch Dieselaabgase bedingten Mortalität. Der Einsatz von Partikelfiltern lässt gegenüber der gegenwärtigen Situation eine mittlere Verlängerung der Lebenserwartung um 1 bis 3 Monate erwarten. Es werden im eigentlichen Sinne nicht Todesfälle verhindert, sondern deren vorzeitiges Auftreten aufgrund der verkürzten Lebenserwartung.

Die krebserzeugende Potenz von Dieselmotorabgasen ist bei heutigen Pkw-Modellen ohne Partikelfilter aufgrund der Partikelemission um den Faktor 10 höher als diejenige von Ottomotorabgasen. Wenn der Diesel-Pkw einen effektiven Partikelfilter hat, verringert sich der

Abstand zwischen Diesel- und Ottomotor hinsichtlich der gesundheitlichen Wirkungen ihrer Abgase soweit, dass es keinen signifikanten Unterschied mehr gibt. Insgesamt ist mit einem Partikelfilter im Abgas nahezu das Niveau der Partikelkonzentration in der Umgebungsluft erreichbar.

Die Thesen zur Klimawirkung des Dieselruß als Aerosol von M. Jacobson können ein zusätzliches Argument dafür sein, die Partikelgrenzwerte für Dieselfahrzeuge fortzuschreiben.

Diesel-Pkw emittieren heute im Vergleich zum „Benziner“ acht bis zehnmal mehr Stickoxide, die zur Bildung des gesundheitsschädlichen Sommersmogs beitragen.

Für Nutzfahrzeuge sind für die Zukunft keine wesentlichen Veränderungen der Bestandsentwicklung oder der Fahrleistungen gegenüber dem bisher angenommenen Trend erkennbar. Für Nutzfahrzeugmotoren ist deshalb die Anpassung der Abgasgrenzwerte EURO V und damit die weitere Minderung der Partikelemission bis auf Partikelfilter-Niveau mit der gleichen Begründung wie bei Diesel-Pkw erforderlich.

Die Richtlinie 1999/96/EG über Maßnahmen gegen die Emissionen von Nutzfahrzeugmotoren sieht eine Grenzwertstufe EURO V mit (u. a.) einem NO_x-Grenzwert von 2,0 g/kWh, der ab 2008 für die Erteilung der Betriebserlaubnis für neue Motortypen gilt. Im Rahmen der Berechnungen zum Maßnahmenplan der Bundesregierung zur Einhaltung der NEC-Richtlinie 2001/81/EG hat sich eine weitere Halbierung dieses Grenzwertes auf 1,0 g/kWh als diejenige Maßnahme mit dem absolut höchsten NO_x-Minderungspotential erwiesen. Eine weitere Senkung des Grenzwertes auf 0,5 g/kWh muss sich ab 2010 anschließen.

Diese Begründungen stehen im Einklang mit den vom Rat an die Kommission gerichteten und in der Einführung dargestellten Aufträgen zur Fortschreibung der Abgasrichtlinien für Pkw, leichte Nutzfahrzeuge und Nutzfahrzeugmotoren.

Fazit:

Die Gesundheitswirkungen aufgrund der Partikelemissionen und die Emissions- und Immissionsbelastungen ergeben sowohl Handlungsbedarf bei Partikeln als auch bei NO_x. Dabei geht es sowohl um eine mittlere Verlängerung der Lebenserwartung der Menschen um 1 bis 3 Monate durch eine effektive Partikelminderung, als auch um die Erfüllung der Verpflichtungen aus der NEC-Richtlinie bis 2010, zumal die NO_x-Emissionen der Schwere Nutzfahrzeuge der Emissionsklassen EURO II und EURO III um 50 % höher liegen, als bisher angenommen wurde, was einer zusätzlichen Deckungslücke in der Größenordnung von 115.000 t NO_x entspricht.

4. Emissionsminderungspotential bei Dieselmotoren

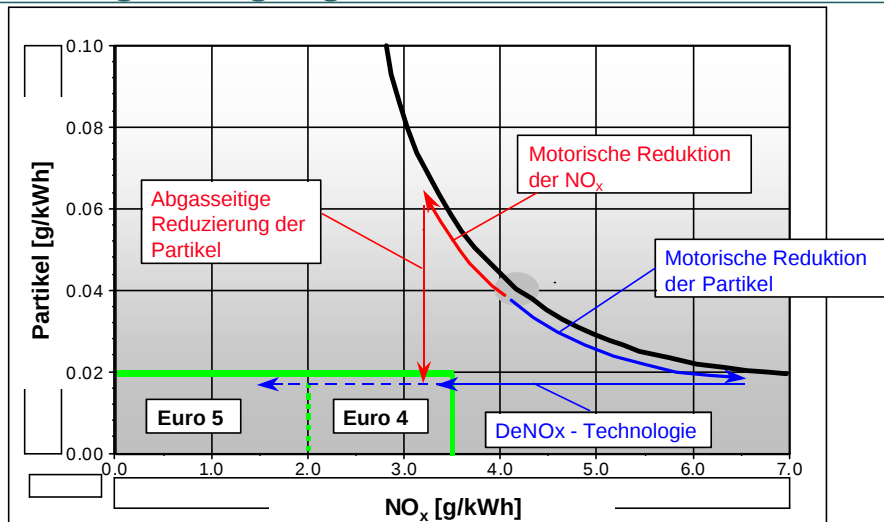
In den vergangenen Jahren wurden die Partikelemissionen von Dieselmotoren in Pkw und Nutzfahrzeugen durch motorische Maßnahmen, d.h. durch die Verbesserung der Verbrennung bereits erheblich gemindert. Einen kleinen Beitrag hierzu leistet der in Diesel-Pkw heute serienmäßig eingesetzte Oxidationskatalysator, der allerdings nur die in der gesamten Partikelmasse enthaltenen flüchtigen Bestandteile (angelagerte Kohlenwasserstoffe) mindern kann, nicht jedoch die elementaren Kohlenstoffpartikel, denen die gesundheitsgefährdende Wirkung der Partikel hauptsächlich zugeschrieben wird.

Zur knappen Einhaltung der ab 2005 für die Typprüfung gültigen EURO 4-Grenzwerte kommen sowohl für Diesel-Pkw als auch für Nutzfahrzeugmotoren abhängig vom heutigen Ausgangszustand des Motors weitere Maßnahmen zur Verbesserung der motorischen Verbrennung in Betracht, die im Einzelfall eine Partikelmassenminderung in der Größenordnung von 30 bis 50 % bewirken können. Eine drastische Partikelminderung ist dagegen nach heutigem Stand nur durch eine Abgasnachbehandlung, d.h. durch den Partikelfilter möglich. Die nachgewiesenen Minderungsraten bezogen auf die Partikelmasse liegen weit über 90 %. Damit werden die Partikelgrenzwerte EURO 4 für Pkw und EURO V für Nutzfahrzeugmotoren nicht nur knapp, sondern erheblich unterschritten.

Die motorischen Maßnahmen und die Abgasnachbehandlung zur Partikelminderung haben keinen direkten Einfluss auf die Stickoxidemission. Jedoch kann die gegenläufige Abhängigkeit der Partikelemission und der Stickoxidemission zur Optimierung des Emissionsverhaltens insgesamt ausgenutzt werden, wenn eine Abgasnachbehandlung eingesetzt wird. Partikelfilter erlauben z.B., die motorische Verbrennung auf relativ hohe Partikel-Rohemissionen abzustimmen, die der Partikelfilter beseitigt und damit gleichzeitig relativ niedrige Stickoxidemissionen zu erreichen. Allerdings wird die Ausnutzung dieses Trade-offs beim Einsatz einer Abgasnachbehandlung zur Partikelminderung oder zur NO_x-Minderung allein selten ausreichen, um damit eine zukünftige Grenzwertstufe einzuhalten.

Abb. 25 zeigt die verschiedenen Strategien zur NO_x- und Partikelemissionsminderung am Beispiel eines Nutzfahrzeugmotors.

Maßnahmen zur Erfüllung zukünftiger Abgasgrenzwerte



Research, Development and Applied Technology Automotive Catalysts

Abb. 25

4.1 NO_x-Emissionsminderung (Pkw, Nutzfahrzeuge)

Abgesehen von den dieseltypischen Partikelemissionen stellen die aufgrund des Verbrennungsverfahrens relativ hohen Stickoxidemissionen der Dieselmotoren das größte Problem dar, während die Kohlenwasserstoffemissionen prinzipbedingt auf einem niedrigen Niveau liegen und z.B. durch Oxidationskatalysatoren effektiv weiter gemindert werden können.

Einen Nachteil hat auch ein Diesel-Pkw mit Partikelfilter noch im Vergleich zum „Benziner“: Er stößt im Vergleich heutiger Neufahrzeuge acht bis zehnmal mehr Stickoxide aus, die zur Bildung des gesundheitsschädlichen Sommersmogs beitragen (**Abb. 26**). Der NO_x-Grenzwert EURO 4 für Diesel-Pkw ist etwa dreimal so hoch wie derjenige für Otto-Pkw. Im Gegensatz zu Otto-Pkw gibt es erst wenige Diesel-Pkw, die die EURO 4-Grenzwerte einhalten.

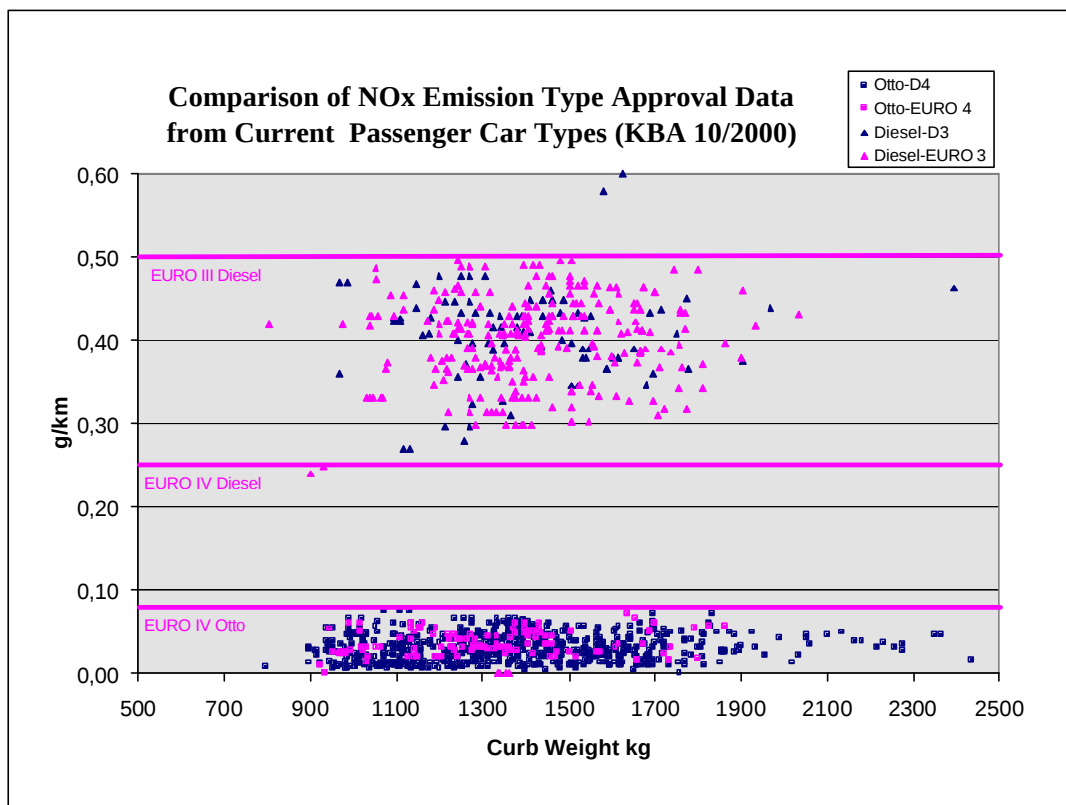
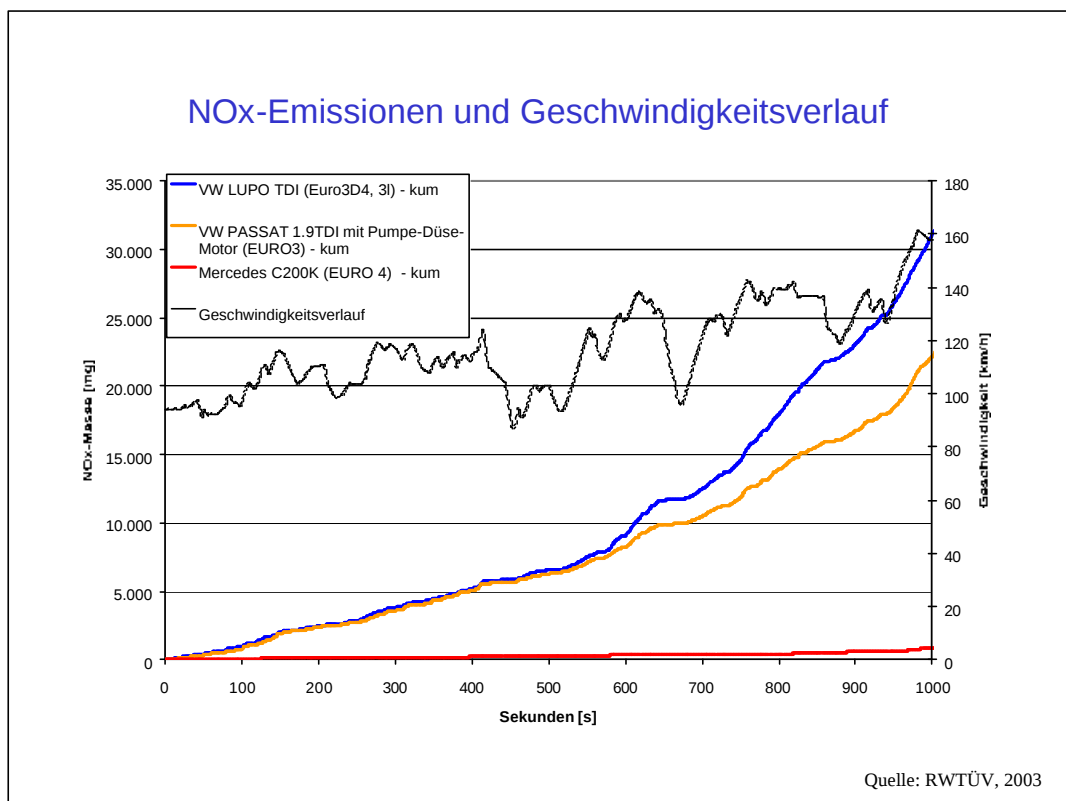


Abb. 26



Quelle: RWTÜV, 2003

Abb. 27

Abb. 27 zeigt die kumulierten NO_x-Emissionen von zwei modernen Diesel-Pkw (VW Lupo TDI, VW Passat 1.9 TDI) im Vergleich mit denjenigen eines Otto-Pkw (Mercedes C 200) in einem Autobahn-Zyklus, der bis 160 km/h reicht. Auch hier wird deutlich, dass die NO_x-Emissionen der Diesel-Pkw diejenigen des Otto-Pkw um mehr als eine Größenordnung überschreiten

Sowohl für Diesel-Pkw als auch für Nutzfahrzeugmotoren stehen prinzipiell folgende Maßnahmen zur NO_x-Minderung mit den folgenden Minderungsraten gegenüber dem heutigen Stand zur Verfügung:

Beeinflussung der motorischen Verbrennung	20 – 30 %	(bereits teilweise eingesetzt)
Abgasrückführung, elektronisch gesteuert,	20 – 50 %	(bereits teilweise eingesetzt)
NO _x -Speicherkatalysatoren	70 – 90 %	(bei GDI-Motoren eingesetzt)
Selektive Katalytische Reduktion (SCR)	70 – 95 %	

Alle genannten Maßnahmen sind weitgehend technisch fertig entwickelt und könnten, sofern die Motorenhersteller dies in der Vergangenheit rechtzeitig entschieden hätten, bereits heute in der Serienanwendung sein.

Die Beeinflussung der motorischen Verbrennung betrifft u.a. folgende Maßnahmen: Hochdruckeinspritzung und gesteuerter Einspritzverlauf, ggf. Piloteinspritzung, gezielte Auslegung von Swirl und Tumble, Vier-Ventil-Technik, Turbolader mit variabler Geometrie etc.

Die Abgasrückführung ist eine seit langem in verschiedenen Varianten eingesetzte Technik, die zukünftig mit elektronischer Steuerung und ggf. auch als gekühlte Abgasrückführung optimiert wird.

NO_x-Speicherkatalysatoren sind bisher bei Dieselmotoren noch nicht im Serieneinsatz. Es gibt sie jedoch in Serienmodellen mit direkteinspritzenden Otto-Motoren (VW FSI), deren mageres Verbrennungsverfahren dem Dieselmotor ähnlich ist. Ein Nachteil dieser Technik liegt in der regelmäßig erforderlichen Regeneration des Speicherkatalysators, wozu eine Anfeuchtung des ansonsten mageren Gemisches bis in den Bereich von $\lambda = 1$ notwendig ist. Dies führt im gesamten Betrieb zu einem Mehrverbrauch von einigen Prozent, der eher für die Betreiber von Diesel-Pkw als für die Betreiber von Nutzfahrzeugen akzeptabel ist. Die fortschreitende Entwicklung der NO_x-Speicherkatalysatoren und die inzwischen erreichten hohen Minderungsraten von über 90 % wurden für Diesel-Nutzfahrzeugmotoren von der EPA nachgewiesen [10], siehe **Abb. 28**.

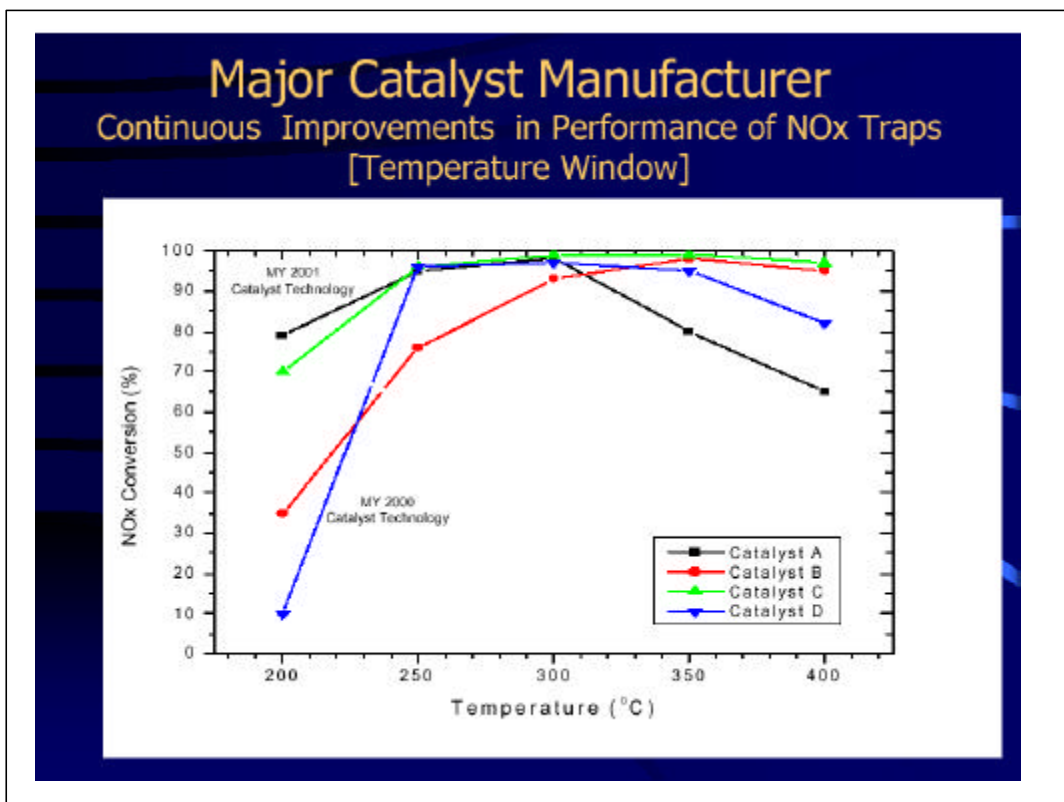


Abb. 28

Die Firma Toyota erprobt seit März 2002 die Kombination von NO_x-Speicherkatalysator und Partikelfilter unter der Bezeichnung DPNR im Feldeinsatz in mehreren europäischen Ländern und plant die Serieneinführung in der zweiten Jahreshälfte 2003. Abschließende Ergebnisse zur Dauerhaltbarkeit des DPNR-Systems aus der Felderprobung lagen im Mai 2003 noch nicht vor. Nach Angaben von Toyota reduziert das DPNR-System im Neuzustand die NO_x- und Partikelemissionen gleichermaßen um über 80 %. Mit einem gealterten DPNR-System wurden 0,13 g/km NO_x und 0,005 g/km Partikel im Neuen Europäischen Fahrzyklus mit einem Pkw der Bezugsmassenklasse 1400 kg erreicht [9]. **Abb. 29** zeigt Messergebnisse der US EPA, die im FTP tendenziell ein niedrigeres Emissionsniveau für NO_x und ein ebenfalls niedriges Emissionsniveau für Partikel ausweisen [10]. Welche Emissionswerte mit der endgültigen Auslegung des DPNR-Systems für den europäischen Markt erreicht werden, stand im Juni 2003 noch nicht fest. Veröffentlichungsfähige Typprüfwerte waren seitens der Fa. Toyota noch nicht verfügbar. Das UBA geht davon aus, dass das DPNR-System das technische Potential bietet, die im folgenden vorgeschlagenen Grenzwerte einzuhalten.

Toyota Diesel Particulate NOx Reduction (DPNR) Diesel Tested at NVFEL [System Integration]							
Test Cycle	NOx (g/mile)		PM (g/mile)		NMHC (g/mile)		Fuel [†]
	Test Results	Tier 2 Bin 5	Test Results	Tier 2 Bin 5 Std	Test Results	Tier 2 Bin 5 Std	Economy (mpg)
FTP75*	0.05	0.05	0.006	0.01	0.07	0.075	37
US06**	0.14		0.005	0.07	0.19		35
HWFET***	0.001	0.075	0.002	-	0.12	-	53
NYCC****	0.003	-	0.007	-	0.04	-	22

* Final Tier 2 FTP Bin 5 Intermediate Life (50k) standards, NMHC reported for NMOG
 ** Final Tier 2 SFTP 4k standards, US06 std is NOx + NMHC = 0.14, PM is a weighted Std
 *** Highway Fuel Economy Test NOx limit is 1.5 times the FTP standard
 **** New York City Cycle
 † Fuel economy numbers are not adjusted and so are not directly comparable to manufacturer reported City/Hwy fuel economy numbers for other vehicles

Abb. 29

Auch die Firma Peugeot hat den Serieneinsatz einer ähnlichen Technik für das Jahr 2003 angekündigt. Die so ausgerüsteten Diesel-Pkw-Modelle beider Hersteller werden die EURO 4 – Grenzwerte voraussichtlich weit unterschreiten.

Die interessanteste Technik ist nach Einschätzung des UBA die Selektive Katalytische Reduktion (SCR), da sie in geregelter Ausführung mit über 95 % die höchsten Minderungsraten ermöglicht und gleichzeitig gestattet, den Motor gegenüber der bisherigen Ausführung ohne SCR auf einen bis zu 10 % günstigeren Kraftstoffverbrauch und damit eine entsprechend geringere CO₂-Emission abzustimmen. Damit amortisiert sich die SCR bei Nutzfahrzeugen nach ein bis zwei Jahren im Betrieb und führt anschließend zu laufenden Kosteneinsparungen. Aufgrund des Platzbedarfs und der notwendigen Versorgung mit einem Reduktionsmittel (z.B. Harnstoff in wässriger Lösung) wird diese seit Jahren in Feldversuchen erfolgreich erprobte Technik eher bei Nutzfahrzeugen als bei Pkw zum Einsatz kommen. Der hohe Wirkungsgrad – auch im dynamischen Betrieb – wurde mehrfach nachgewiesen (Abb. 30).

Der Verband der europäischen Hersteller von Abgasnachbehandlungssystemen AECC hat gemeinsam mit RICARDO Consulting Engineers die Dauerhaltbarkeit eines unregulierten SCR-Systems in Kombination mit einem Partikelfiltersystem an einem Nutzfahrzeugmotor der Stufe EURO III einer forcierten Dauerhaltbarkeitsuntersuchung über 1000 Stunden unterzogen. Im Ergebnis ist festzuhalten, dass ein NO_x-Wert von 1,0 g/kWh zusammen mit einem Partikelwert unter 0,01 g/kWh im ESC und im ETC ohne wesentliche Verschlechterung problemlos eingehalten werden konnten, d.h. es wurden sowohl für NO_x als auch für Partikel bezogen auf die Masse jeweils Minderungsraten von über 85 % auf Dauer realisiert [11].

Dieses Ergebnis bedeutet, dass ausgehend von einem EURO III – Motor mit einer dem Grenzwert knapp entsprechenden NO_x-Emission von etwa 5 g/kWh und einer unregelmäßigen SCR-Anlage mit einer auf Dauer realisierbaren Minderungsrate von 85 % eine Emission von 0,75 g/kWh erreicht wird, d.h. ein Grenzwert von 1,0 g/kWh kann mit genügendem Sicherheitsabstand eingehalten werden, siehe **Abb. 31**.

Durch den Einsatz eines NO_x-Sensors und einer Regelung der SCR-Anlage kann die Umsatzrate auf über 95 % gesteigert werden (**Abb. 32**).

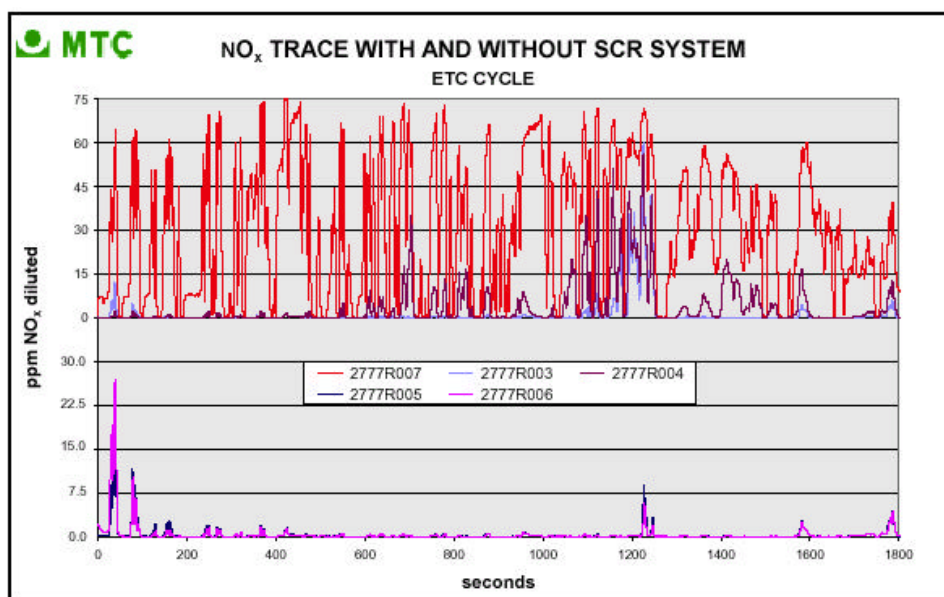


Abb. 30

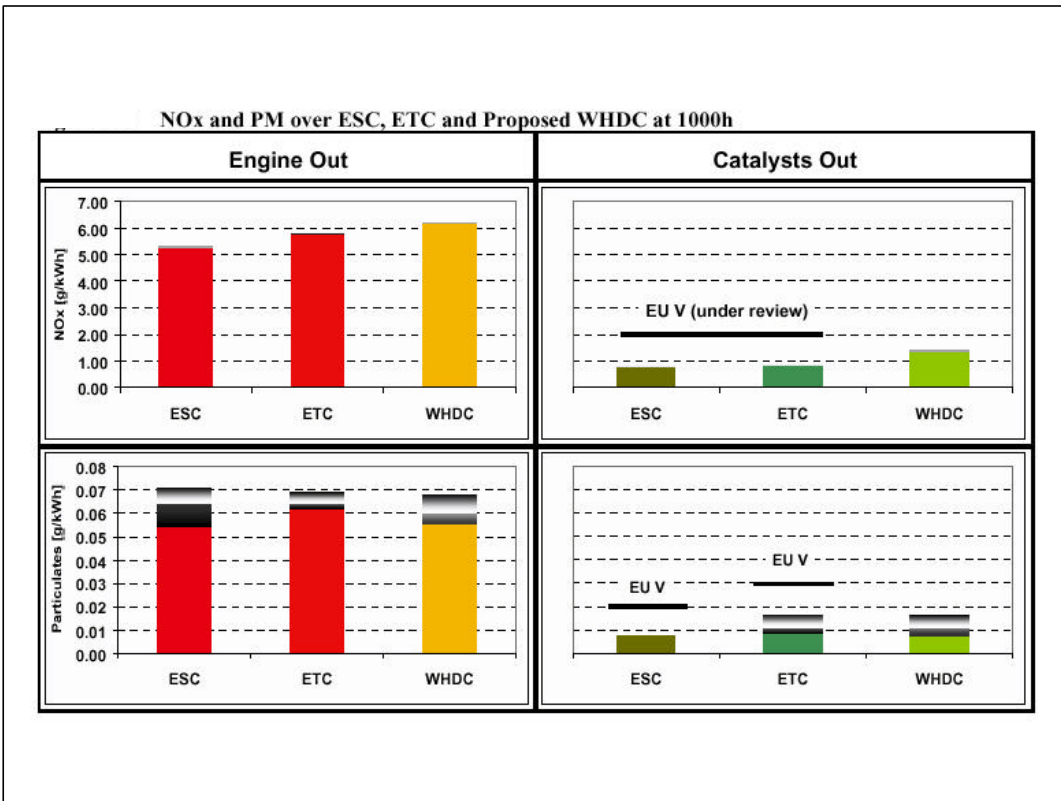


Abb. 31

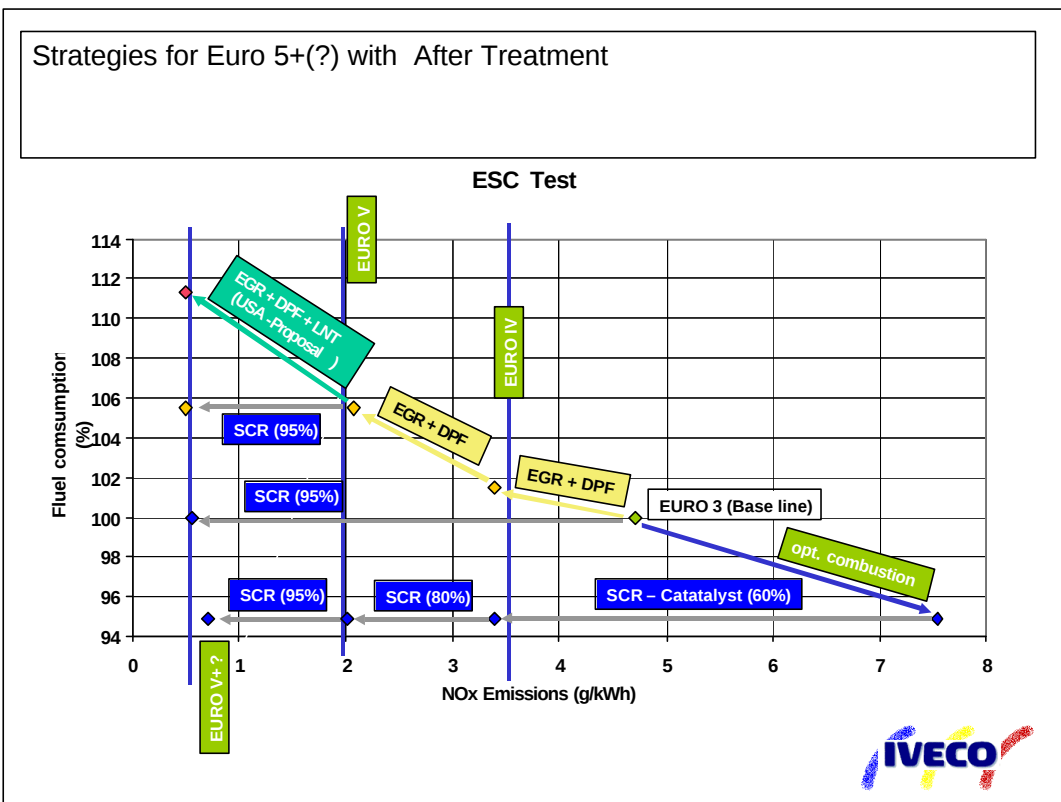


Abb. 32

4.2 Partikelemissionsminderung

Bezüglich der Partikelemissionsminderung ist die Entwicklung bei Pkw und Nutzfahrzeugen getrennt zu betrachten. Die Aussagen beziehen sich auf die üblichen Typprüfverfahren und Testzyklen bei Umgebungstemperatur. Bei einem erheblich abgesenkten Emissionsniveau kommt allerdings ein bisher kaum beachteter Gesichtspunkt zum Tragen, nämlich die Partikelemissionen bei tiefen Temperaturen. Ähnlich der Entwicklung bei Ottomotoren wird das weitere Verbesserungspotential der Dieselmotoren dann auch in diesem Bereich zu suchen sein. Das gilt möglicherweise auch bezüglich der Partikelemission von Ottomotoren.

4.2.1 Diesel-Pkw

Auch für Diesel-Pkw wird das Inkrafttreten der EURO 4-Grenzwerte ab 2005 nur teilweise zum Einsatz der Partikelfiltertechnik führen. Nach Veröffentlichungen der deutschen Pkw-Hersteller werden kleine und mittlere Diesel-Pkw mit Schaltgetriebe ohne Partikelfilter auskommen, während von mittleren Diesel-Pkw mit Automatikgetriebe an aufwärts vermutlich Partikelfilter erforderlich sind.

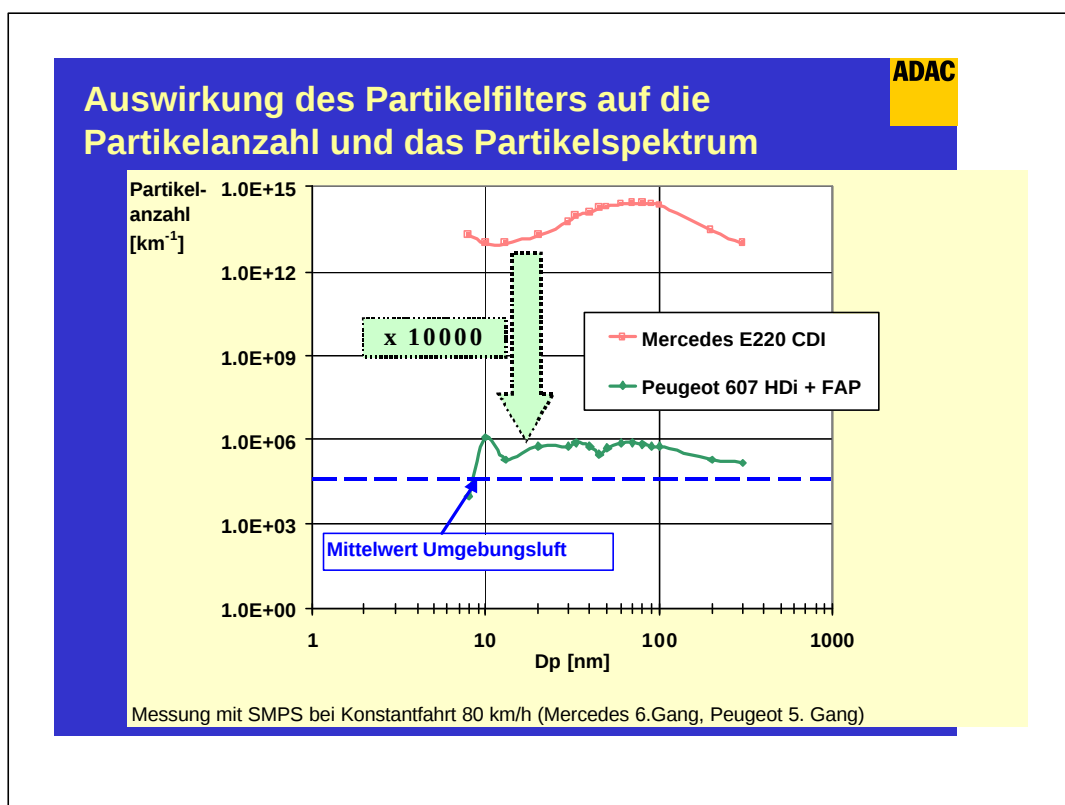


Abb. 33

Im Fall des ersten Diesel-Pkw mit serienmäßigem Partikelfilter liegt die über 80.000 km vom ADAC nachgewiesene Abscheiderate bei 99,999 %, d.h. die Partikelzahl wird um den Faktor 10.000 gemindert und die minimale restliche Partikelkonzentration im Abgas liegt auf dem Niveau der Umgebungsluft (Abb. 33). Der Peugeot 607 mit FAP weist nach Messungen des ADAC im Neuen Europäischen Fahrzyklus eine Partikelemission von 0,0010 g/km auf [12].

Für Diesel-Pkw gab und gibt es abgesehen von Einzelanfertigungen kleinerer Zulieferfirmen bisher kein relevantes Angebot für die Nachrüstung.

Das erste serienmäßige Partikelfiltersystem des PSA-Konzerns für Pkw (FAP) ist mit folgenden Stückzahlen ausgeliefert worden:

Zulassungszahlen von Peugeot-Pkw und Citroen-Pkw mit Partikelfiltersystem FAP in Deutschland (bis einschließlich 9. Juli 2002):

Deutschland	2001	2002 (1. Halbjahr)	Summe
Peugeot 307 (seit August 2001)	5.179	5.412	10.591
Peugeot 406 (seit Juli 2001)	2.758	1.881	4.639
Peugeot 607 (seit Januar 2001)	2.152	963	3.135
Citroen C5 (seit 2001)	4.596	3.815	8.211
Summe	16.686	13.893	26.576

Zulassungszahlen von Peugeot-Pkw und Citroen-Pkw mit Partikelfiltersystem FAP in Europa (bis einschließlich 9. Juli 2002):

Europa	2001	2002 (1. Halbjahr)	Summe
Peugeot 307 (seit August 2001)	31.551	58.682	90.243
Peugeot 406 (seit Juli 2001)	22.527	9.481	32.018
Peugeot 607 (seit Januar 2001)	24.254	9.973	34.227
Citroen C5 (seit 2001)	36.389	16.640	53.029
Summe	116.722	96.798	209.517

International hat der PSA Peugeot Citroën-Konzern im Jahr 2001 ca. 135.000 Fahrzeuge mit FAP-Technologie verkauft, im Jahr 2002 waren es bereits rund 270.000 Exemplare, im Frühjahr 2003 war eine Zahl von 400.000 Exemplaren erreicht. Im Jahr 2004/2005 wird bei PSA mit rund 1 Mio. Zulassungen von Fahrzeugen mit FAP-Technologie gerechnet.

Die FAP-Technologie definiert damit den Stand der Technik und die Möglichkeit, auf dieser Basis Grenzwerte zu setzen. Bei fast allen Herstellern von Diesel-Pkw sind Partikelfiltersysteme serienreif oder fast serienreif. Diese Filtersysteme unterscheiden sich weniger hinsichtlich der problemlos erreichbaren hohen Abscheiderate, als vielmehr hinsichtlich des Regenerationsverfahrens. Über den Zeitpunkt der Serieneinführung, die auch weit vor dem Inkrafttreten der EURO 4-Grenzwerte erfolgen könnte, entscheiden vermutlich weniger die technischen Gesichtspunkte, sondern vielmehr die marktstrategisch und politisch motivierten Entscheidungen der Hersteller oder der Herstellerverbände. Ein wesentlicher Anstoß könnte nach Aussagen einzelner Hersteller eine steuerliche Förderung sein.

Im Mai 2003 waren nach Angaben der Deutschen Umwelthilfe (DUH) und verschiedenen Pressemeldungen folgende Pkw-Typen mit Partikelfilter lieferbar:

Peugeot	807	HDI 2,2 l 94 KW (128 PS)
		HDI 2,0 l 79 KW (107 PS)
	607	HDI 2,2 l 89 KW (133 PS)
	406	HDI 2,2 l 89 KW (133 PS)
		HDI 2,0 l 79 KW (107 PS)
	307	HDI 2,0 l 79 KW (107 PS)
Citroën	C5	2.0 HDi FAP 79 KW (107 PS)
		2,2 HDi FAP 94 KW (130 PS)
	C8	2,0 HDi FAP 79 kW (107 PS)
		2,2 HDi FAP 94 kW (128 PS)
Fiat	Ulysse	2,0 JTD FAP 80 KW (109 PS)
		2,2 JTD FAP 94 KW (128 PS)
Lancia	Phedra	2,0 JTD FAP 80 KW (109 PS)
		2,2 JTD FAP 94 KW (128 PS)

Für eine Markteinführung im Sommer oder im Herbst 2003 zur IAA im September sind nach verschiedenen Pressemeldungen folgende Diesel-Pkw mit Partikelfilter angekündigt, die überwiegend EURO 4 einhalten:

Peugeot	Weitere zwei Modelle sind mit folgenden Motoren angekündigt:	
		1,6 l 80 KW(109 PS) FAP und EURO 4
		2,0 l 100 KW (136 PS), FAP und EURO 4
Renault	Mégane	1.9 dCi (Versionen mit 120 PS und 140 PS)
	Scénic	1.9 dCi (120 PS)
	Laguna	2.2 dCi (150 PS)
	Espace	2.2 dCi (150 PS)
	Vel Satis	2.2 dCi (150 PS)
Toyota	Avensis D-Cat	
Audi	A4	2.0 TDI, 140 PS
BMW	530d	
Ford	Focus C-Max	1.6 TDCi, 110 PS
		2.0 TDCi, 136 PS

Mercedes	C 200 CDI	125 PS
	C 220 CDI	145 PS
	E 200 CDI	
	E 220 CDI	
Opel	Vectra	1.9 DTI, 150 PS
Volkswagen	Passat	2.0 TDI, 140 PS
	Tuareg	
	Phaeton	

Die bisher von einigen Herstellern als vorläufige Angaben genannten Mehrpreise für den Partikelfilter liegen zwischen 300 € und 800 €. Es ist zu betonen, dass es sich dabei um Marktpreise handelt, und dass die realen Mehrkosten auf der Basis großer Stückzahlen in der Serienfertigung weitaus geringer sind. Je nach technischem Aufwand der unterschiedlichen Systeme liegen die echten Mehrkosten nach Auffassung des UBA im Bereich von 150 € bis 300 €. Im Fall einer serienmäßigen Ausstattung der Fahrzeuge mit Partikelfilter, wie z.B. bei Peugeot, wird kein Mehrpreis verlangt.

4.2.2 Direkteinspritzende Ottomotoren (GDI, FSI)

Direkteinspritzende Ottomotoren weisen eine dem Dieselmotor ähnliche innere Gemischbildung und in weiten Kennfeldbereichen eine ebenfalls dem Dieselmotor ähnliche magere Verbrennung auf. Deshalb kann auch eine dem Dieselmotor ähnliche Partikelemission entstehen, die bereits in mehreren Veröffentlichungen auf der Basis von Messungen nachgewiesen wurde. Da in Zukunft mit einer starken Zunahme von Pkw-Modellen mit direkteinspritzenden Ottomotoren zu rechnen ist, sind diese bei einer Fortschreibung der Partikelgrenzwerte zu berücksichtigen. Wie in der Einführung erwähnt, besteht ein entsprechender Prüfauftrag des Rates an die EU-Kommission.

Eine schwedische Untersuchung zeigt z.B., dass die Partikelemission von Pkw-Modellen mit direkteinspritzenden Ottomotoren in bestimmten Betriebszuständen auf dem Niveau von Diesel-Pkw ohne Partikelfilter liegen kann [13] (**Abb. 34**).

Bereits im Juli 1997 wurde der damals neu eingeführte Mitsubishi Carisma 1.8 GDI beim RWTÜV, Essen, bezüglich seiner Schadstoffemissionen vermessen. Die Partikelemission im Neuen Europäischen Fahrzyklus nach 91/441/EWG lag zwischen 0,0045 g/km und 0,0076 g/km, der Mittelwert betrug 0,0056 g/km. Dieser Wert liegt etwa um den Faktor 2 über dem später näher erläuterten EURO 5-Vorschlag.

Es hängt weitgehend von der Auslegung des Motors ab, ob und in welchen Kennfeldbereichen eine relevante Partikelemission entsteht. Davon hängt u. a. ab, ob bei der Typprüfung im Neuen Europäischen Fahrzyklus mit relativ niedriger Last eine relevante Partikelemission auftritt. Zumindestens in Betriebszuständen mit hoher Last und außerhalb des Typprüfzyklusses ist eine dem Diesel ähnliche Partikelemission zu erwarten.

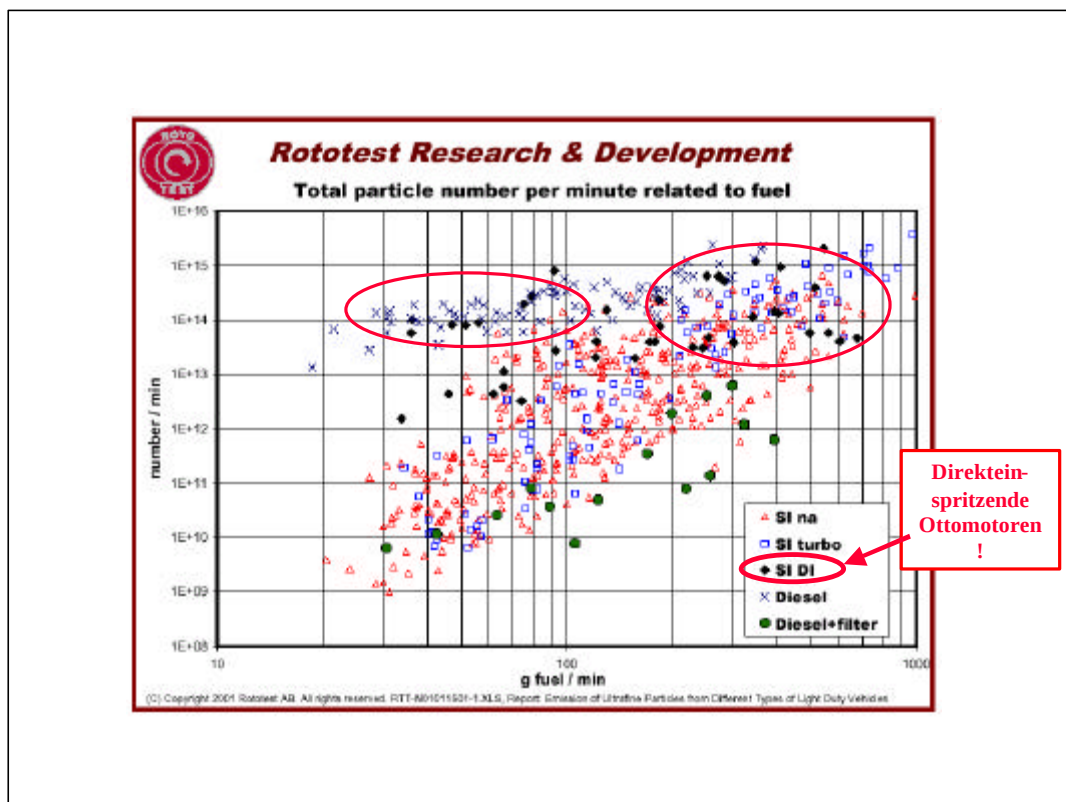


Abb. 34

Grundsätzlich ist zu fordern, dass die Partikelemission von direkteinspritzenden Ottomotoren nach denselben Verfahren und mit denselben Grenzwerten zu begrenzen ist wie bei Dieselmotoren. Es gibt keinen Grund, für einen direkteinspritzenden Ottomotor einen höheren Grenzwert zuzulassen als für einen Dieselmotor.

4.2.3 Nutzfahrzeugmotoren

Die weitere Entwicklung in Hinblick auf die zukünftigen EURO IV-Grenzwerte ist wie folgt einzuschätzen:

Für Nutzfahrzeugmotoren sind sowohl technische Lösungen mit Partikelfilter zu erwarten, die den Partikelgrenzwert weit unterschreiten, als auch technische Lösungen mit Katalysatoren zur Stickoxidminderung, die unter Ausnutzung der gegenläufigen Abhängigkeit von Partikel- und Stickoxidemission zu einer knappen Unterschreitung des Partikelgrenzwertes führen. Welche technischen Lösungen mit welchen Anteilen am Markt zu erwarten sind, ist z. Zt. noch nicht klar absehbar und wird erst ein bis zwei Jahre vor dem Inkrafttreten der EURO IV- und EURO V-Grenzwerte deutlicher zu erkennen sein, falls der frühzeitige Einsatz nicht durch Fördermaßnahmen oder andere Maßnahmen forciert wird. Bei dem erwarteten Einsatz von NO_x-SCR-Katalysatorsystemen werden auch die Euro-5-Partikelgrenzwerte motorisch eingehalten.

Aus heutiger Sicht ist fraglich, ob die seitens der europäischen Umweltminister bei der Verabschiedung der Richtlinie 99/96/EG erklärte Absicht, mit den EURO IV- und EURO V-Grenzwerten für Nutzfahrzeugmotoren die Partikelfiltertechnik durchzusetzen, erfüllt wird. Vorläufig nehmen wir an, dass der Anteil von Nutzfahrzeugen mit effektiven Partikelfiltern ab

2005 einen Anteil von ca. 30 % an den Neuzulassungen erreichen wird. Allerdings ist auch absehbar, dass abhängig vom Ausgangszustand des Motors eine Abgasrückführung in Verbindung mit einem Oxydationskatalysator zur Einhaltung von EURO V ausreichen kann. Hersteller, die derartige Lösung planen, werden die Applikation von Partikelfiltern zwangsläufig vernachlässigen, sofern es nicht rechtzeitig Signale oder Beschlüsse bezüglich einer Anpassung der EURO V-Grenzwerte zu niedrigeren Werten hin gibt.

Die Partikelfiltertechnik ist verfügbar. Bereits Anfang der 90er Jahre wurde sie an 1.100 Stadtbussen im Rahmen des Rußfilter-Großversuchs des BMU erfolgreich erprobt. In der Schweiz sind zahlreiche Partikelfiltersysteme nach ausführlichen Eignungstests seitens der Behörden (BUWAL, SUVA) für die Nachrüstung von Baumaschinen anerkannt worden und werden aufgrund eines Obligatoriums auf Baustellen eingesetzt [14].

Heute laufen in Deutschland nach Angaben des VdV ca. 5.000 Stadtbusse mit nachgerüsteten Partikelfiltersystemen. Es handelt sich dabei ganz überwiegend um ein Filtersystem, das aufgrund seines einfachen Aufbaus speziell für die Nachrüstung geeignet ist, das sog. CRT-System (Continuously Regenerating Trap). Allein die BVG in Berlin hat ca. 800 Busse nachgerüstet. Weltweit laufen mehr als 50.000 Nutzfahrzeuge mit nachgerüsteten Partikelfiltersystemen, in Kalifornien ist die Nachrüstung von 900.000 Dieselfahrzeugen im Rahmen eines Programms mit Fördermitteln von 100 Mio. US\$ beschlossen worden.

Die Partikelfiltertechnik ist für Nutzfahrzeugmotoren seit Jahren in verschiedenen Varianten (verschiedene Filtermedien in Kombination mit verschiedenen Regenerationsstrategien) verfügbar. Die Liste der in der Schweiz von den Behörden (BUWAL, SUVA) geprüften und anerkannten Partikelfiltersysteme für den Einsatz bei Baumaschinen (sog. Filterliste), deren Dieselmotoren in weiten Teilen den Dieselmotoren für Straßen-Nutzfahrzeuge entsprechen, umfasste bereits im Jahr 2000 insgesamt 36 Rußfiltersysteme von 16 Herstellern. Die weitere Entwicklung betrifft die Optimierung der Systeme für den Serieneinsatz, in Hinblick auf absolute Regenerationssicherheit, verbesserte Dauerhaltbarkeit, vergrößerte Wartungsintervalle und minimierten Abgasgegendruck.

Allerdings sind inzwischen auch Abgasnachbehandlungstechniken in der Entwicklung, die nur auf eine knappe Einhaltung des Partikelgrenzwertes EURO IV/EURO V zielen. Es handelt sich dabei um den sog. PM-Kat, der als offenporiges System („filterlose Rußminderung“) die Partikelzahl aufgrund strömungstechnischer Phänomene je nach Betriebszustand mit einem Wirkungsgrad von nur 20 % bis maximal 80 % auf einer metallischen Wabenstruktur abscheidet. Die mit echten Partikelfiltern erreichbaren hohen Abscheideraten werden mit einem PM-Kat bei weitem nicht realisiert [15].

4.3 Grenzwerte für Nutzfahrzeugmotoren in den USA ab 2007

Im Dezember 2000 kündigte die EPA die Phase 2 der Emissionsgrenzwerte für Nutzfahrzeugmotoren an, die ab dem Modelljahr 2007 mit einem phase-in bis 2010 vollständig in Kraft treten sollen. Das Gesetz wurde im Januar 2001 verabschiedet [16].

Der Partikel-Grenzwert ist 0,01 g/bhp-h in Kombination mit einem NO_x-Grenzwert von 0,2 g/bhp-h. Für die Grenzwerte gilt ein phase-in, das mit 50 % der verkauften Motoren in 2007 beginnt und mit 100 % der verkauften Motoren in 2010 endet. Auch ohne genauere Betrachtung der Korrelationen zwischen dem amerikanischen dynamischen Testzyklus und dem europäischen dynamischen Testzyklus ist folgendes festzustellen: Insbesondere der NO_x-Grenzwert liegt um

eine Größenordnung unter dem EURO V-Grenzwert (2,0 g/kWh) und auch der Partikelgrenzwert liegt etwa bei einem Drittel des EURO IV/V-Grenzwertes (0,03 g/kWh im ETC).

Bestandteil des Gesetzes ist, dass die EPA in zweijährigen Abständen einen Fortschrittsbericht über die technische Entwicklung zur Einhaltung dieser Grenzwerte veröffentlicht. Der erste Bericht in dieser Reihe liegt seit Juni 2002 vor [17]. Außerdem hat die EPA eine Expertengruppe mit 50 Mitgliedern aus Industrie, Wissenschaft, Behörden und Umweltorganisationen zur unabhängigen Berichterstattung über dieses Thema eingesetzt, die im Mai 2002 ihre Arbeit aufnahm und die im September 2002 einen ersten Berichtsentwurf vorgelegt hat [18]. Sie kommt in diesem Entwurf zu folgendem Ergebnis bezüglich der Techniken zur NO_x-Emissionsminderung und der Partikelfiltertechnik:

“The Panel found that significant progress is being made to develop NO_x adsorbers and catalyzed particulate filter systems for use in diesel engines in 2007. NO_x adsorbers and catalyzed particulate filter systems are the primary technologies being developed by engine manufacturers, vehicle manufacturers and aftertreatment manufacturers in North America, Europe and Japan for US applications in 2007. The worldwide focus on a particular technology significantly enhances its potential for success. In each case, the Panel found examples of significant progress that has occurred since the 2007 Rule was finalized in 2001.

Companies are rapidly moving beyond purely technical issues to address product development issues like fuel economy impacts and “first cost.” “First cost ” numbers are being discussed as a factor in selecting technology alternatives. Other product development issues, such as reliability, long-term durability, maintenance and fuel economy are also being addressed.”

Auch die EPA, die Konsultationen mit mehr als 20 Firmen durchgeführt hat, bestätigt aus ihrer Sicht, dass sowohl Partikelfilter als auch NO_x-Katalysatoren rechtzeitig zum Jahr 2007 für den Serieneinsatz verfügbar sein werden. Dies kommt auch durch zahlreiche Fachveröffentlichungen von den Herstellern der Motoren und der Abgasnachbehandlungssysteme sowie von Forschungsinstituten zum Ausdruck (z.B. Diesel Engine Emission Reduction Conference, San Diego, August 2002), wonach die Grundsatzuntersuchungen auf den Motorenprüfständen erfolgreich verlaufen sind und die Entwicklung nun die Phase der Serienapplikation geht.

4.4 Kosten der Emissionsminderung

Naturgemäß ist die Schätzung der Kosten für zukünftige Emissionsminderungstechniken und Abgasnachbehandlungssysteme mit Unsicherheiten behaftet, da u.a. die Stückzahlen und davon abhängig die eingesetzten Fertigungstechniken eine große Rolle spielen. Sofern es sich um prinzipiell bekannte Bauteile handelt oder um solche, die einer weiteren Optimierung unterzogen werden, ist die Kostenschätzung relativ einfach. Insgesamt gibt es nur wenige Veröffentlichungen zu diesem Thema und die Erfahrung der Vergangenheit hat gezeigt, dass selbst die optimistischen Kostenschätzungen später in der Realität meist deutlich unterboten wurden. Generell ist zu beachten, dass Angaben seitens der Industrie häufig eher als Marktpreise zu verstehen sind. In den folgenden Ausführungen werden die Herstellungskosten diskutiert.

4.4.1 Diesel-Pkw

Bei Diesel-Pkw gibt es vielfältige Kombinationsmöglichkeiten verschiedener technischer Maßnahmen, um eine über EURO 4 hinausgehende Stufe EURO 5 zu erreichen.

Abb. 35 enthält eine detaillierte und eingehend recherchierte Zusammenstellung der Kosten mit möglichen Spannbreiten nach einer Veröffentlichung von Kolke [36]. Als Stufe EURO 5 wurde ein Grenzwert von 0,08 g/km für NO_x und 0,0025 g/km für Partikel unterstellt. Demnach sind für EURO 5-Konzepte und die geeigneten Kombinationen von Maßnahmen zur Erfüllung der vorgenannten Grenzwerte die Mehrkosten gegenüber der EURO 4-Technik im Bereich von 200 € bis 400 € pro Fahrzeug anzusetzen. Diese Kostenangaben werden als realistisch eingeschätzt.

Kosten der Emissionsminderung bei Diesel-Pkw										
Systemkomponente	EURO 2	EURO 4	EURO 5-Konzepte							
			PM-Filter, DeNO _x		Zeolith, DeNO _x		Zeolith, SCR		DeNO _x /PM-Filterkombination	
			min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Abgasanlage	65€	65€	65€	65€	65€	65€	65€	65€	65€	65€
Oxidationskatalysator	61€	61€	17€	17€	-€	-€	-€	-€	-€	-€
Höhere Oxidationskatalysatorbeladung	-€	18€	18€	18€	-€	-€	-€	-€	-€	-€
SCR-Katalysator einschl. Dosiereinheit	-€	-€	-€	-€	-€	-€	139€	153€	-€	-€
Partikelfiltersystem	-€	-€	153€	307€	-€	-€	-€	-€	-€	-€
Zeolith Katalysator mit Reduktionsmittel	-€	-€	-€	-€	128€	153€	128€	153€	-€	-€
DeNO _x -Katalysator	-€	-€	77€	102€	77€	102€	-€	-€	-€	-€
DeNO _x -/Partikelminderungs-Katalysator	-€	-€	-€	-€	-€	-€	-€	-€	128€	153€
Verbesserung der Brennraumgeometrie	-€	-€	-€	-€	-€	-€	-€	-€	-€	-€
Erhöhung des Einspritzdruckes (teilw. nicht quantifizierbar)	-€	-€	-€	-€	-€	-€	-€	-€	-€	-€
Verbesserte Abgasrückführung	-€	-€	36€	46€	36€	46€	46€	46€	46€	46€
Kompletter Abgasstrang	126€	145€	366€	555€	305€	367€	378€	418€	239€	264€
Kompletter Abgasstrang (mit Austauschfilter, 80.000km)					382€	459€	455€	510€	316€	356€
Mehrkosten zum Stand EURO 2	18€		240€	429€	179€	240€	252€	292€	113€	138€
Mehrkosten zum Stand EURO 4	-		221€	411€	161€	222€	234€	273€	94€	120€

Quelle: Kolke, 2003

Abb. 35

4.4.2 Nutzfahrzeugmotoren

Im Auftrag der EU-Kommission ermittelten mehrere Forschungsinstitute in einer gemeinsamen Studie, die im Jahr 2002 veröffentlicht wurde, die Kosten für verschiedene Emissionsminderungstechniken und Abgasnachbehandlungssysteme für Nutzfahrzeugmotoren [19]. Die Studie basiert auf einer Umfrage bei den Nutzfahrzeug- und Motoren-Herstellern und der Zuliefer-Industrie. Die Fragen waren auf die zur Einhaltung der zukünftigen Grenzwertstufen bis einschließlich EURO V notwendigen Techniken gerichtet. Da dieselben Techniken grundsätzlich auch zur Realisierung weitergehender Minderungsziele und Grenzwerte ohne wesentliche Mehrkosten gegenüber der EURO V-Ausführung geeignet und notwendig sind, werden die Ergebnisse der Studie hier diskutiert. Die Studie kommt u.a. zu folgendem Ergebnis:

“...These technologies (...to meet EURO 4 standards...) are likely to add between €1,000 and €7,000 to the cost of new truck engines compared with the current product, and fuel consumption is estimated to increase by about 3%, except where SCR is used on its own. Under this scenario fuel consumption is predicted to decrease by about the same amount. Based on data supplied by

component suppliers the lower range of this cost estimate could be more realistic for volume production.

The technologies required for Euro 5 are likely to add a further €1,000 to €3,500 to the cost of an engine compared with the Euro 4 product. The widespread use of SCR will result in a reduction in fuel consumption of 3 to 5% compared to current production engines.....”

Die für verschiedene Szenarien und je nach Motorengröße abgeleiteten Kosten sind in der **Abb. 36** dargestellt. Diese Angaben der Nutzfahrzeug- und Motoren-Hersteller, die beim weitestgehenden Szenario je nach Motorengröße zu Kosten zwischen ca. 4000 € und 10.000 € pro Fahrzeug führen, sind nach unserer Einschätzung und aufgrund der Interessenlage der Hersteller eher als Marktpreise zu verstehen.

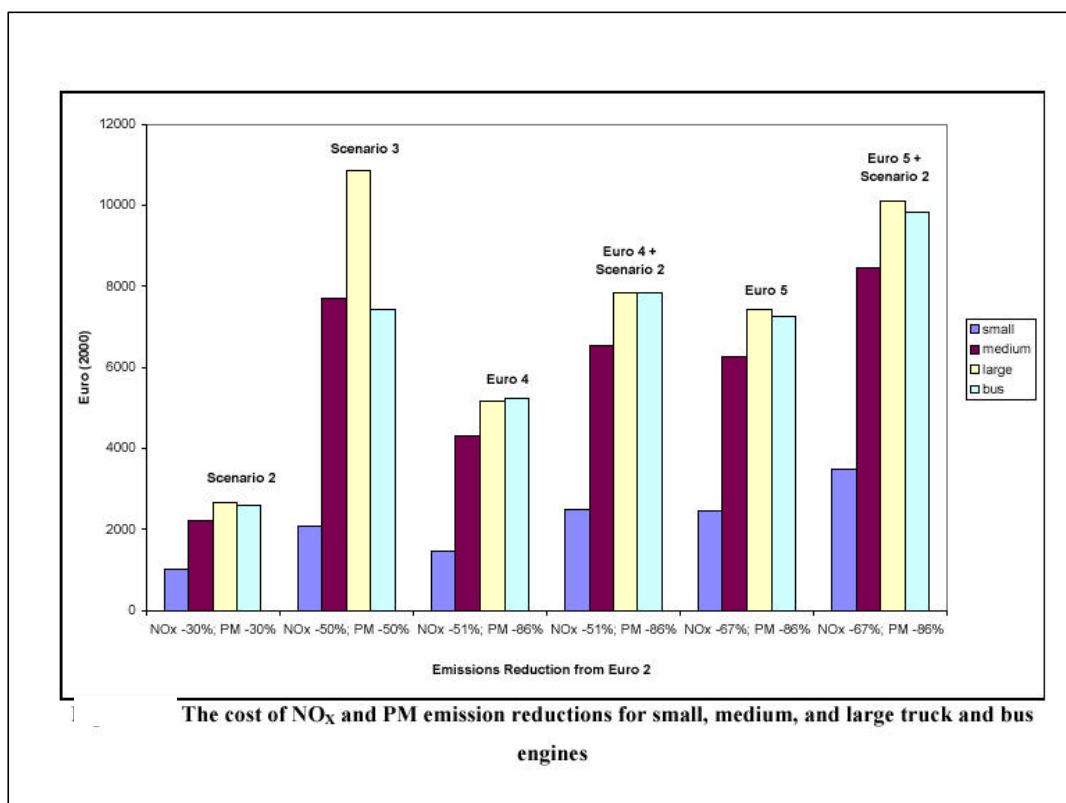


Abb. 36

Der Bericht [19] enthält in einer separaten Tabelle auch die Kosten nach Angaben der Zulieferer, die nach unserer Einschätzung und für die Serienfertigung in großen Stückzahlen realistisch sind.

Cost of individual components*

<i>Technology</i>	<i>Cost range €</i>
Diesel oxidation catalyst	290-820
Continuously regenerating filter (without oxidation catalyst)	240-650
Catalysed soot filter	880-2250
Selective catalyst reduction	340-2500
'Cleanup' oxidation catalyst	100-290

* Some of these costs are for the substrates and coatings only and do not include the cost of fitting such as stainless canning, injectors, backpressure monitors etc. Therefore it is expected that these will be significantly lower than the OEMs costs

Wir gehen deshalb davon aus, dass die Mehrkosten für eine über EURO V hinausgehende Emissionsminderung und die dafür notwendigen Abgasnachbehandlungssysteme, die im wesentlichen eine weitere Optimierung der für EURO V erforderlichen Systeme darstellen, gegenüber einem EURO III-Motor und für die Serienfertigung in großen Stückzahlen je nach Motorengröße zwischen 1.500 € und 3.000 € liegen werden.

4.5 Folgerungen

Im Rahmen der Berechnungen zum Maßnahmenplan der Bundesregierung zur Einhaltung der NEC-Richtlinie 2001/81/EG hat sich eine weitere Halbierung des EURO V-Grenzwertes für Nutzfahrzeugmotoren auf 1,0 g/kWh als diejenige Maßnahme mit dem absolut höchsten NOx-Minderungspotential erwiesen. Eine weitere Senkung auf 0,5 g/kWh sollte sich mit Inkrafttreten in 2010 anschließen. Die Entwicklung der entsprechenden Minderungstechnik ist weit fortgeschritten und diese wird rechtzeitig vor dem Jahr 2008 und dem Jahr 2010 zur Verfügung stehen.

Eine Fortschreibung der Partikelgrenzwerte in einer Stufe EURO 5 für Pkw und die Anpassung der Stufe EURO V sowie eine ab 2010 folgende Stufe für Nutzfahrzeugmotoren ist aus gesundheitlichen und ökologischen Gründen notwendig und technisch machbar, was die einzelnen Maßnahmen betrifft.

Eine wesentliche Technik zur Minderung der Partikelzahl um mehrere Größenordnungen, der Partikelfilter, ist bei Pkw in der Serienfertigung eingeführt und bei Nutzfahrzeugen für die Serieneinführung kurzfristig verfügbar. Ob die Einführung dieser effektiven Technik allein durch eine weitere Herabsetzung der massenbezogenen Grenzwerte sichergestellt werden kann, ist allerdings offen.

Bezüglich der Nutzfahrzeugmotoren ist absehbar, dass abhängig vom Ausgangszustand des Motors eine Abgasrückführung in Verbindung mit einem Oxydationskatalysator zur Einhaltung von EURO V ausreichen kann. Hersteller, die sich auf eine derartige Lösung einstellen, werden die Applikation von Partikelfiltern zwangsläufig vernachlässigen, sofern es nicht rechtzeitig Signale oder Beschlüsse bezüglich einer Anpassung der EURO V-Grenzwerte und einer nachfolgenden Grenzwertstufe zu niedrigeren Werten hin gibt.

Die Mehrkosten für EURO 5-Konzepte bei Diesel-Pkw und die geeigneten Kombinationen von Maßnahmen zur Erfüllung der vorgenannten Grenzwerte sind gegenüber der EURO 4-Technik im Bereich von 200 € bis 400 € pro Fahrzeug anzusetzen. Im Fall der Nutzfahrzeugmotoren werden die Mehrkosten für eine über die verabschiedete Stufe EURO 5 hinausgehende

Emissionsminderung und die dafür notwendigen Abgasnachbehandlungssysteme, die im wesentlichen eine weitere Optimierung der für EURO V erforderlichen Systeme darstellen, gegenüber einem EURO III-Motor je nach Motorengröße und für die Serienfertigung in großen Stückzahlen zwischen 1.500 € und 3.000 € liegen.

Die Entwicklung in den USA in Hinblick auf die ab 2007 vorgesehenen Grenzwerte zeigt sowohl nach dem Urteil von unabhängigen Experten als auch nach den Feststellungen der EPA, dass die erforderlichen Techniken aller Voraussicht nach rechtzeitig für den Serieneinsatz zur Verfügung stehen werden. Auch wenn die Kombination von zukünftigen NO_x- und Partikel-Grenzwerten sich zwischen den USA und Europa unterscheiden, so ist doch davon auszugehen, dass gleiche Techniken, nur in unterschiedlicher Abstimmung, die Anforderungen sowohl in den USA als auch in Europa erfüllen können.

Eine Studie mehrerer renommierter europäischer Forschungsinstitute im Auftrag der EU-Kommission kommt bezüglich der Nutzfahrzeugmotoren zu folgendem Ergebnis [19]:

„The technology to meet both the Euro 4 and 5 emission standards exists although no common approach emerged from the literature review or the manufacturers’ survey. The most likely solutions are EGR with DPF and DOC; SCR on its own; and SCR with DPF (with DOC), possibly with advanced turbocharging. Each has its own advantages and disadvantages. It is extremely unlikely that any EU manufacturer will used NO_x adsorbers, the regulators preferred solution in the US.

Current expectations are that SCR will be universally used to meet the Euro 5 requirements. Most manufacturers expect to use it in combination with DPF and DOC, possibly with advanced turbocharging. One manufacturer expects to use SCR on its own with no other after-treatment device. A few manufacturers expect to combine SCR with EGR, but in general EGR on heavy duty engines is likely to be only a short lived interim technology.

This study did not explicitly address the potential for further reductions in emissions beyond those mandated in the Euro 5 requirements. However, results from a recent AECC study suggest that it may be feasible with currently available technology to meet emission limits approximately half the Euro 5 limits, although there may be a fuel consumption penalty.”

Wie eingangs erwähnt, wird die Minderung der CO- und HC-Emissionen in diesen Ausführungen nicht weiter diskutiert. Sofern katalytisch wirksame Abgasnachbehandlungssysteme ähnlich wie bei Diesel-Pkw auch bei Nutzfahrzeugen zum Einsatz kommen, ist eine weitere Minderung der CO- und HC-Emissionen um mindestens eine Größenordnung quasi automatisch gegeben.

Fazit:

Eine Senkung der Partikelgrenzwerte in einer Stufe EURO 5 für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge gegenüber EURO 4 um den Faktor 10 sowie eine entsprechende Anpassung der Stufe EURO V für Nutzfahrzeugmotoren ist aus gesundheitlichen Gründen notwendig und technisch machbar, ebenso eine Senkung der NO_x-Emissionen der Diesel-Pkw auf das Niveau der Ottomotoren. Die erforderliche Minderungstechnik ist für Pkw ab 2005 realisierbar. Daher kann ab 2005 durch Anreize bei der Kfz-Steuer die Einführung unterstützt werden. Deutschland ist der Auffassung, dass entsprechend den politischen Absprachen mit Frankreich rechtzeitig Standards zur weiteren Senkung von NO_x- und Partikelemissionen für Diesel-Pkw festgelegt werden und ab 2010 obligatorisch in Kraft treten sollten. Weiterhin ist eine Anpassung des NO_x-Grenzwertes der Stufe EURO V für Nutzfahrzeugmotoren auf 1,0 g/kWh und eine weitere Senkung auf 0,5 g/kWh ab 2010 ökologisch notwendig und technisch machbar. Die Mehrkosten für ein EURO 5-Konzept liegen bei Diesel-Pkw gegenüber der EURO 4-Technik im Bereich von 200 € bis 400 € pro Fahrzeug, bei Nutzfahrzeugmotoren werden die Mehrkosten für eine über EURO V hinausgehende Emissionsminderung gegenüber einem EURO III-Motor zwischen 1.500 € und 3.000 € liegen.

5. Methodisches Vorgehen bei der Begrenzung der Partikelemissionen

In der Gesamtmasse der Partikelemission am Auspuff entsprechend der gültigen gesetzlichen Definition der Typprüfung sind hauptsächlich folgende Fraktionen enthalten (**Abb. 37**):

- Nano-Partikel (Nano-Particles, Nucleation Mode) mit einem Durchmesser unter 100 nm haben zahlenmäßig den größten Anteil, tragen wegen ihrer geringen Masse jedoch nur mit einem geringen Anteil zur gesamten Partikelmasse bei.
- Agglomerierte Partikel (Accumulation Mode) mit einem Durchmesser über 100 nm machen einen geringen Teil der Partikelzahl aus, tragen jedoch den weitaus größten Teil zur Masse bei.

Wenn man von der These ausgeht, dass jedem lungengängigen Partikel mit einem Durchmesser unter 5 µm eine spezifische Wirkung zuzuschreiben ist, dann kommt es aus Gründen des Gesundheitsschutzes auf die Minderung der Partikelzahl an, die in keinem festen Verhältnis zur Partikelmasse steht. Umgekehrt reicht zukünftig eine Minderung der Partikelmasse nicht aus, um die Partikelzahl effektiv und in gleichem Maß zu mindern. So kann z.B. heute bei gleicher Partikelzahl die Partikelmasse um den Faktor 6 variieren und ausgehend von derselben Partikelmasse die Partikelzahl um den Faktor 2, wie Vergleichsmessungen an Pkw im Auftrag von ACEA zeigen [20]. (**Abb. 38**) Es ist möglich, die Masse der Partikel durch eine Minderung der agglomerierten Partikel erheblich zu reduzieren, während gleichzeitig die große Zahl der Nano-Partikel kaum reduziert wird.

Eine weitere Herabsetzung der massenbezogenen Partikelgrenzwerte z.B. um den Faktor 10 reicht prinzipiell aus, um das Ziel des Gesundheitsschutzes zu erreichen, wenn daraufhin effektive Partikelfilter oder gleichwertige Techniken mit einer hohen Minderungsrate über den gesamten Größenbereich der Partikel einschließlich der Nano-Partikel zum Einsatz kommen. Um Zielverfehlungen in Form von technischen Entwicklungen zu verhindern, die hauptsächlich auf die Minderung der Masse hin optimiert sind, ist als flankierende Maßnahme zur Begrenzung der Partikelmasse eine Begrenzung der Partikelzahl notwendig.

Mit dieser Zielsetzung wäre es sinnvoll zu fordern, dass die Größenverteilungskurve der Partikelemission eine auf niedrigem Niveau angesetzte Grenzlinie nicht überschreiten darf, wie in **Abb. 39** schematisch dargestellt. Diese Grenzkurve müsste nicht unbedingt eine Gerade sein. Sie könnte in ihrer Form dem typischen Verlauf einer Partikelgrößenverteilung angepasst werden, um insbesondere die Zahl der Nano-Partikel effektiv zu begrenzen. Allerdings setzt eine derartige Begrenzung eine für die Typprüfung geeignete Meßmethode voraus, mit deren Hilfe die Größenverteilung oder die Partikelzahl in mehreren Größenklassen bestimmt werden kann. Derartige Meßmethoden sind bisher jedoch nur als Labormethoden im wissenschaftlichen Bereich verfügbar und können, wie das unten beschriebene Particulate Measurement Programm (PMP) der ECE-GRPE zwischenzeitlich gezeigt hat, die Anforderungen einer für die Typprüfung geeigneten Methode nicht erfüllen.

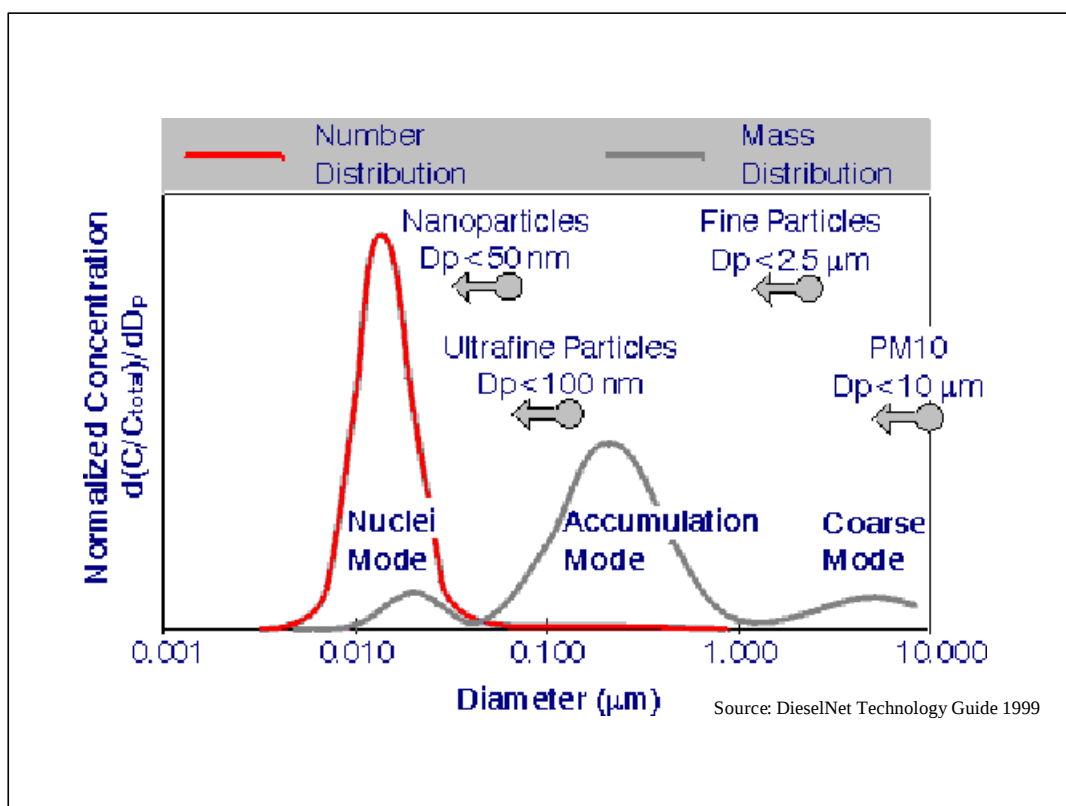


Abb. 37

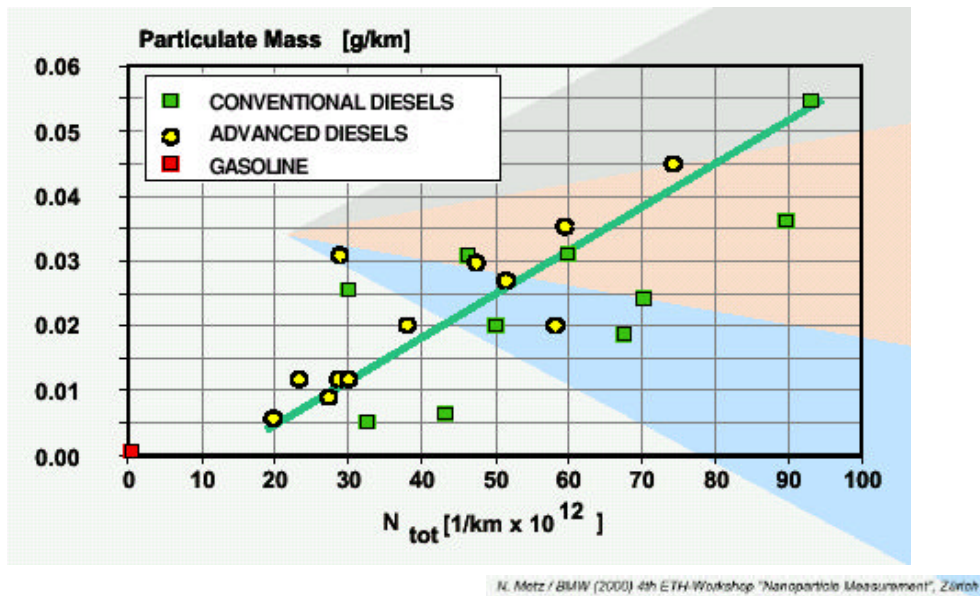


Abb. 38

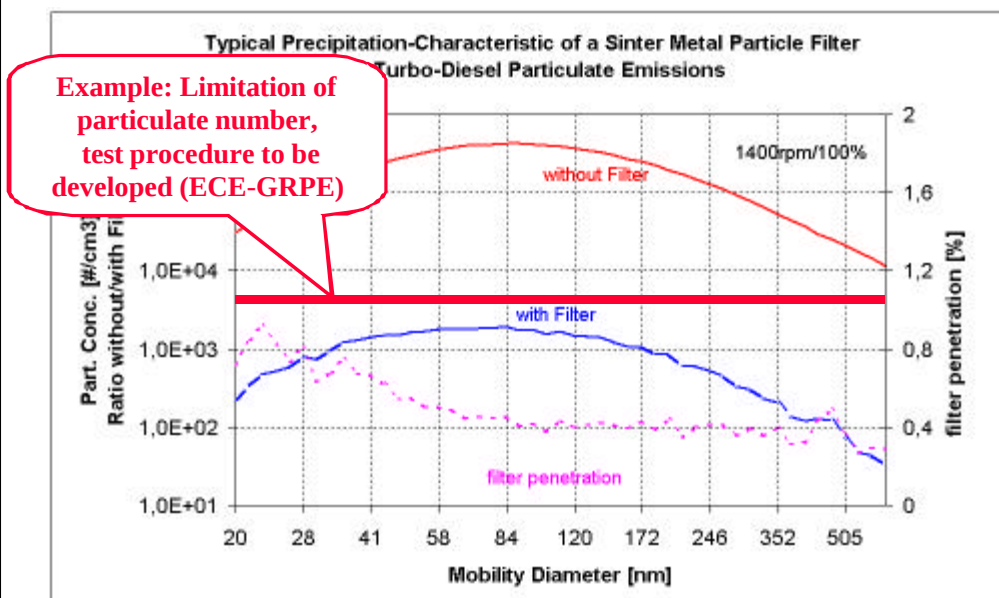


Abb. 39

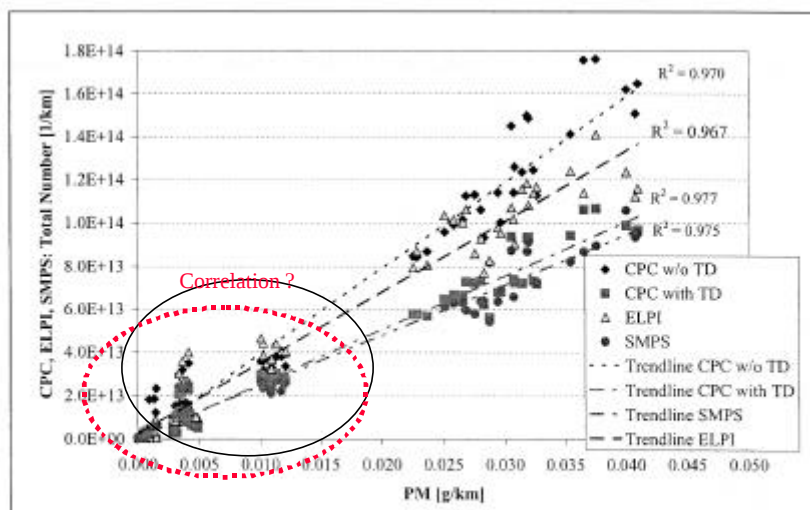


Figure 1: Correlation between CPC w/o & with TD, SMPS, ELPI and PM of all 7 gasoline and diesel vehicles for **NEDC2000 & steady state tests** in the ACEA programme II.

Source: ACEA, 2002

Abb. 40

Insbesondere im Bereich zukünftiger niedriger Partikelemissionen, auf die es hier ankommt, besteht kein zwangsläufiger oder physikalisch bedingter Zusammenhang zwischen der Partikelmasse und der Partikelzahl, wobei Abgasnachbehandlungssysteme einen zusätzlichen Einfluss auf diesen Zusammenhang haben können. **Abb 38** aus einem im Auftrag von ACEA durchgeführten Messprogramm zeigt außerdem, welchen Einfluss das verwendete Messsystem auf die Quantität und die Qualität der gemessenen Partikelemission hat [21].

Mit dem Ziel, die Eignung der massenbezogenen Partikelbegrenzung für die Zukunft zu überprüfen und eine Methode der Partikelbegrenzung mit besserem Wirkungsbezug vorzuschlagen, wurde im Jahr 2001 auf Ebene der ECE-GRPE und in Abstimmung mit der EU-Kommission eine Expertengruppe „Particle Measurement Programme (PMP)“ unter dem Vorsitz von UK und unter Mitwirkung zahlreicher Mitgliedstaaten und Verbände gegründet.

5.1 Particle Measurement Programme (PMP)

Der folgende Text beschreibt das Mandat, die Vorgehensweise und den ursprünglichen Zeitplan der PMP-Gruppe vom Mai 2001:

„ECE-GRPE PARTICLE MEASUREMENT PROGRAMME (PMP),
GRPE 42nd , 29 May – 1 June 2001

The GRPE Particulate Measurement Programme (PMP) is a collaborative programme operating under the auspices of the UNECE WP29/GRPE Group. Its focus is on the development

of a new approach to the measurement of particles in vehicle exhaust emissions, which may be used to replace or to complement the existing regulated mass based system.

In this context “system” comprises a description of the test procedures, sampling equipment and measurement instrumentation.

To assist in the setting of future limit values for light-duty vehicles and heavy-duty engines, the programme will provide data on the emissions of particles from engines employing a range of advanced technologies, and in particular from different diesel particle filters (DPF), measured using the new PMP recommended test system.

PMP is open to contributions from governments, industry and NGOs who are members of the GRPE.

Literature reviews reporting studies on the health effects and assessing instrumentation, analytical methodologies and the future of particle measurements will be undertaken under several national programmes. The relative importance of particle mass, size, number, surface area, and chemical composition on human health is yet to be decided.

Based on an initial literature study the programme will be divided into the following elements:

Phase I - development of candidate systems

Phase II - testing programme and validation of systems

Phase III - characterisation of advanced technology

TIMESCALE

The programme began in March 2001 and will end in March 2003. It is intended to:

transmit a formal proposal for a test system(s) to the UNECE in October 2002 for discussion at the January 2003 meeting of GRPE

deliver preliminary data on emission levels from advanced technology to the UNECE in December 2002 for discussion at GRPE

deliver final data on emission levels from advanced technology to the UNECE in March 2003 for discussion at GRPE.,,

Zum Zeitpunkt dieses Berichtes (Juni 2003) war die Phase II des Projektes weitgehend abgeschlossen und es zeichnete sich ab, zu welchem Ergebnis und zu welchen konkreten Vorschlägen die Arbeitsgruppe kommen würde. In einem Zwischenbericht zur GRPE im Mai 2003 wurde der Arbeitsstand wie folgt dargestellt:

“The measurement system evaluation phases of Phases I and II of the government sponsored measurement programmes are now drawing to a conclusion, with potential systems worthy of further evaluation in a round robin test identified. The work on thermodesorbers outlined in the report to the last GRPE session in January 2003 is now in its final stages.

All of the individual reports from the national programmes are nearing completion and work is currently underway on the compilation of a summary report that draws together overall conclusions and recommendations. This will be finalised in the next few weeks once all its

constituent reports are completed. The sponsoring Governments will agree its conclusions and recommendations jointly.

The large number of measurement systems assessed within the government sponsored programmes makes it difficult to summarise all the results succinctly. Therefore this progress report focuses on the results from those candidate systems that offer some potential, based on the available results. The final results will be presented in the report of the national programmes in the coming weeks.

The main national programmes came to similar conclusions regarding the best performing measurement systems.

Improvements to the filter method, adopting some of the requirements in the US 2007 procedure for heavy duty engines, has improved repeatability for the low emissions levels tested in this programme, chosen to be approximately representative of future emissions. Whilst there remain some questions to be resolved on some details of the procedure, improving the existing system appears to be the best approach.

One of the measurement systems, CVS + thermodenuder/thermodiluter + CPC, offers the advantage of counting the number of particles and so increasing the overall sensitivity of the measurement procedure. Whilst the medical evidence remains unclear over which metric is responsible for the health impacts observed, it appears prudent to further evaluate the potential of a number based system.

It is recommended that a selection of the measurement systems identified by these work programmes as potential candidate type approval measurement systems be further evaluated in a round robin test.

Based on the results currently available these are:

- Modified 2007 PM (a gravimetric filter based mass measurement system).*
- CVS + thermodiluter + CPC (a number based measurement system). “*

Mit dem CPC (Condensation Particle Counter) steht ein System zur Verfügung, mit dem zeitaufgelöst die Partikelzahl (genauer: die Partikelkonzentration in $1/\text{cm}^3$) im wirkungsrelevanten Größenbereich entsprechend den Anforderungen einer Typprüfung gemessen werden kann.

Der Zeitplan sieht nunmehr vor, die Richtlinien-Anhänge zu beiden Verfahren bis Ende 2003 fertig zu stellen und im Januar 2004 der GRPE vorzulegen, sowie anschließend einen Round Robin Test auf dieser Basis durchzuführen.

5.2 Erreichbare Messgenauigkeit der Gravimetrie

Bestandteil der folgenden Vorschläge ist eine Herabsetzung des Partikelgrenzwertes für Diesel-Pkw auf 0,0025 g/km und für Nutzfahrzeugmotoren auf 0,002 g/kWh im ESC sowie auf 0,003 g/kWh im ETC.

Es ist deshalb die Frage zu stellen, ob derartige Grenzwerte auf der Basis einer gegenüber dem heutigen Stand der Richtlinien verbesserten gravimetrischen Messmethode, wie sie u.a. von ACEA bzw. OICA vorgeschlagen wird, mit einer den Anforderungen eines Typprüfverfahrens genügenden Messgenauigkeit eingeführt werden könnten.

OICA kommt in einem Bericht vom Januar 2003 [22] als Beitrag zur PMP-Arbeitsgruppe der GRPE in dem Kapitel zur möglichen Genauigkeit der Partikelmessung an Pkw und Leichten Nutzfahrzeugen zu folgendem Ergebnis:

“In order to determine the limit of detection of the entire process (weighing, filter handling, loading, weighing) NEDC-blank tests (tests without vehicle) were performed by DaimlerChrysler. As a result, the LOD is estimated to be 0.025 mg. This is equivalent to approximately 1 mg/km in an NEDC which is 4 % of the Euro-IV emission limit. By further optimization steps of the gravimetric method (e.g. optimized flow, micro balance with increased accuracy) it will be possible to decrease the LOD to approximately 0.01 mg filter loading.

The mean value of all 10 tests is 0.0002 g/km with a standard deviation of 0.00015 g/km. One contribution to this relatively high standard deviation is from the decreasing “particle-source”. Compared with the Euro-IV limit of 0.025 g/km this standard deviation of 0.00015 g/km is less than 1% of that limit value. Tests with very low emission vehicles had smaller standard deviations of about 0.0001 g/km.”

Es wird also seitens der Fahrzeughersteller bestätigt, dass die Einhaltung eines Grenzwertes von 0,0025 g/km messtechnisch mit einer Standardabweichung von 0,00010 bis 0.00015 geprüft werden kann.

Der RWTÜV, Essen, kommt als federführender Technischer Dienst in einem Schreiben an das Umweltbundesamt vom 12.02.2003 zu folgendem Ergebnis:

„Auch bei Herabsetzung der Partikelgrenzwerte auf 0,0025 g/km bzw. 0,002 g/kWh / 0,003 g/kWh kann die Partikelmessung durch gravimetrisch arbeitende Bestimmungsmethoden erfolgen. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass sowohl die Auflösung als auch die Wiederholbarkeit (Test zu Test) und Reproduzierbarkeit (Labor zu Labor) nicht mehr den bislang gebräuchlichen Werten entsprechen werden. Die Varianzen aus einzelnen Messreihen können hier stark erhöhte Werte aufweisen. Darüber hinaus ist es möglich, dass, insbesondere beim Einsatz von partikelreduzierenden bzw. kohlenstoffreduzierenden Abgasnachbehandlungen, mehr lösliche als unlösliche Komponenten durch die Gravimetrie bestimmt werden. Da lösliche Anteile häufig erst in der Nachbehandlung entstehen und nicht linear abhängig von Temperaturen im zu prüfenden System sowie in der herangezogenen Messtechnik sind, ist verstärkt mit Schwankungen zwischen einzelnen Messungen zu rechnen.....“

Zusammenfassend lässt sich folgendes sagen:

- *Mittels Gravimetrie kann auch bei extrem abgesenkten Grenzwerten eine Aussage über vom Motor ausgestoßene, auf dem Filtermedium sammelbare Komponenten gewonnen werden.*
- *Wiederholbarkeit, Reproduzierbarkeit etc. werden die bislang gebräuchlichen Werte nicht mehr erreichen.*
- *Verfahrensmodifizierungen oder auch geeignete Probenvorbehandlungen ermöglichen noch deutliche Verbesserungen, bedürfen aber weiterer Untersuchungen.*
- *Bei stark partikel- bzw. kohlenstoffreduzierenden Nachbehandlungssystemen ist die Bewertung der Grenzwertunterschreitung auf Basis der heutigen Partikel-Definition weiterhin möglich. Die durch die Gravimetrie beurteilten Komponenten sind dann jedoch deutlich anderer Zusammensetzung als dies bislang der Fall war, da der emittierte Kohlenstoff so nicht mehr ausreichend nachweisbar ist.“*

5.3 Folgerungen

Die Einführung einer Begrenzung der Partikelzahl in Ergänzung zur Begrenzung der Masse hat folgenden Vorteil: Da die Masse und die Anzahl der Partikel keine hohe Korrelation aufweisen, würde das Massenkriterium die Begrenzung der „großen“ Partikel sicherstellen, während durch das Anzahlkriterium gleichzeitig die wirkungsrelevante Begrenzung der „kleinen“ Partikel erreicht würde. Das Massenkriterium könnte eventuell ohne Partikelfilter erfüllt werden, das Anzahlkriterium jedoch nicht.

Fazit:

Eine weitere Herabsetzung der massenbezogenen Partikelgrenzwerte um den Faktor 10 reicht prinzipiell aus, um das Ziel des Gesundheitsschutzes zu erreichen, wenn daraufhin effektive Partikelfilter oder gleichwertige Techniken mit einer hohen Minderungsrate über den gesamten Größenbereich der Partikel einschließlich der Nano-Partikel zum Einsatz kommen. Um Zielverfehlungen in Form von technischen Entwicklungen zu verhindern, die hauptsächlich auf die Minderung der Masse hin optimiert sind, ist als flankierende Maßnahme zur Begrenzung der Partikelmasse eine Begrenzung der Partikelzahl notwendig.

Das Messverfahren zur Begrenzung der Partikelmasse auf niedrigem Niveau (US 2007) liegt vor. Untersuchungen der Automobilindustrie belegen die Verfügbarkeit und die hohe Genauigkeit dieses verbesserten Massemessverfahrens. Das als flankierende Maßnahme notwendige Verfahren zur Begrenzung der Partikelzahl (CPC) wird bis Ende 2003 richtlinienkonform definiert sein. Eine Einführung für Pkw im Rahmen einer Grenzwertstufe EURO 5 und eine Ergänzung der Richtlinie EURO V für Nutzfahrzeugmotoren ist damit machbar.

6. Vorschläge für eine zukünftige Abgasgesetzgebung

In den Kapiteln 6.1 und 6.2 werden die Eckpunkte für die notwendige Fortschreibung der Abgasgesetzgebung für Pkw und Nutzfahrzeugmotoren angegeben. Diese beziehen sich auf die Abgasgrenzwerte. Es bleibt bei dem bisherigen Prinzip der internationalen Abgasgesetzgebung, dass Grenzwerte im Sinn von Wirkvorschriften vorgeschrieben werden und nicht die Technik. Weitere Elemente der Abgasgesetzgebung, die je nach Fahrzeug- oder Motorkategorie der Einführung oder der Fortschreibung bedürfen, sind z.B.:

- Begrenzung der Kaltstartemissionen und Emissionen bei tiefen Temperaturen (-7°C)
- Verdunstungsemissionen
- On Board Diagnose (OBD), On Board Measurement (OBM)
- Dauerhaltbarkeits-Test
- Anforderungen zur Dauerhaltbarkeit
- Begrenzung der Emissionen außerhalb des Testzyklusses (off cycle emissions)
- Feldüberwachung
- Einbeziehung von alternativen Kraftstoffen
- Diese weiteren Anforderungen werden hier nicht im Detail behandelt.

6.1 Pkw und leichte Nutzfahrzeuge

Aus den vorstehenden Ausführungen sind folgende Eckpunkte für eine Fortschreibung der Abgasgrenzwerte Stufe EURO 5 abzuleiten:

- Die Grenzwerte sollen kraftstoffneutral sein.
- Der Partikelgrenzwert (massenbezogen) ist auf Partikelfilter-Niveau zu definieren. Der Peugeot 607 mit FAP, der den Stand der Technik darstellt, weist z.B. nach Messungen des ADAC im Neuen Europäischen Fahrzyklus eine Partikelemission von $0,0010\text{ g/km}$ auf. Ein Grenzwert von $0,0025\text{ g/km}$ hätte dem gegenüber schon einen erheblichen Sicherheitsabstand und würde gegenüber dem EURO 4-Grenzwert einer Minderung von 90 % entsprechen.
- Eine Herabsetzung der massenbezogenen Partikelgrenzwerte um den Faktor 10 reicht prinzipiell aus, um das Ziel des Gesundheitsschutzes zu erreichen, wenn daraufhin effektive Partikelfilter oder gleichwertige Techniken mit einer hohen Minderungsrate über den gesamten Größenbereich der Partikel einschließlich der Nano-Partikel zum Einsatz kommen. Für die gravimetrische Bestimmung der Partikelemission auf niedrigem Niveau steht das in den USA für den Einsatz ab 2007 definierte Messverfahren zur Verfügung. Um Zielverfehlungen in Form von technischen Entwicklungen zu verhindern, die hauptsächlich auf die Minderung der Masse hin optimiert sind, ist als flankierende Maßnahme zur Begrenzung der Partikelmasse eine Begrenzung der Partikelzahl notwendig und rechtzeitig anzukündigen.

- Der NO_x-Grenzwert für Diesel-Pkw sollte auf dem Niveau von Otto-Pkw EURO 4, d.h. auf 0,08 g/km festgelegt werden. Der Summengrenzwert HC + NO_x für Diesel-Pkw entfällt.
- Eine gesonderte Betrachtung erfordert der HC-Grenzwert. Wenn man davon ausgeht, dass für Diesel-Pkw der Stufe EURO 4 der NO_x-Grenzwert 0,25 g/km und der Grenzwert HC + NO_x 0,30 g/km beträgt, so beträgt die HC-Emission eines Diesel-Pkw bei dem prinzipbedingt hohen Anteil von NO_x in der Summe HC + NO_x (80 bis 90%) etwa 0,03 bis 0,05 g/km. Eine Anwendung des HC-Grenzwertes EURO 4 für Otto-Motoren von 0,10 g/km auch auf Diesel-Motoren in der Stufe EURO 5 würde bei diesen eine effektive Verdoppelung bis Verdreifachung der HC-Emissionen zulassen, was angesichts des stark ansteigenden Fahrleistungsanteils der Diesel-Pkw aus der Sicht des Umweltschutzes kritisch zu beurteilen ist. Um dies zu verhindern, wird für Otto-Pkw und Diesel-Pkw in der Stufe EURO 5 gleichermaßen ein HC-Grenzwert von 0,05 g/km vorgesehen.
- Die Einführung dieser Grenzwerte ist ab 2005 technisch realisierbar. Nach den geltenden EU-Richtlinie ist die steuerliche Förderung der jeweils nächsten zu einem späteren Zeitpunkt in Kraft tretenden EU-Abgasgrenzwertstufe zulässig.. Deutschland ist der Auffassung, dass entsprechend den politischen Absprachen mit Frankreich rechtzeitig Standards zur weiteren Senkung von NO_x- und Partikelemissionen für Diesel-Pkw festgelegt werden und ab 2010 obligatorisch in Kraft treten sollten und vorher Grundlage einer steuerlichen Förderung entsprechend der bisherigen Praxis sein können.

Für die leichten Nutzfahrzeuge ergeben sich bei insgesamt analogem Vorgehen zusätzlich folgende Gesichtspunkte:

- Bis einschließlich EURO 4 haben die Pkw-ähnlichen leichten Nutzfahrzeuge der Klasse I dieselben Grenzwerte wie Pkw. Da es in der Klasse II der leichten Nutzfahrzeuge ebenfalls zahlreiche Pkw-ähnliche Typen gibt und da in dieser Klasse ebenfalls Otto- und Dieselmotoren vertreten sind, sollen die Pkw-Grenzwerte zukünftig auch für leichte Nutzfahrzeuge der Klasse II gelten. Lediglich für leichte Nutzfahrzeuge der Klasse III, die fast ausschließlich Dieselmotoren aufweisen und die konstruktiv eher den echten Nutzfahrzeugen als den Pkw verwandt sind, werden gegenüber Klasse II um 25 % höhere Grenzwerte für alle Schadstoffkomponenten vorgeschlagen.

Abb. 41 zeigt den EURO 5-Vorschlag für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge. Die EURO 3- und EURO 4-Grenzwerte sind zum Vergleich in **Abb. 42** dargestellt.

Vorschlag EURO 5 für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge

Inkraft-treten *	Fahrzeugklasse/-gruppe		Bezugs-masse RW (kg)	CO (g/km)	HC (g/km)	NO _x (g/km)	Partikel-masse (g/km)
	Klasse	Gruppe		Otto Diesel	Otto Diesel	Otto Diesel	
2010	Pkw	—	alle	1,0	0,050	0,08	0,0025
2010	Leichte Nutzfahrzeuge	I	RW ≤ 1305	1,0	0,050	0,08	0,0025
		II	1305 < RW ≤ 1760	1,0	0,050 —	0,08	0,0025
		III	1760 < RW	1,25	0,063 —	0,10	0,0032

* Die Einführung dieser Grenzwerte ist ab 2005 technisch realisierbar. Deutschland ist der Auffassung, dass entsprechend den politischen Absprachen mit Frankreich rechtzeitig Standards zur weiteren Senkung von NO_x- und Partikelemissionen für Diesel-Pkw festgelegt werden und ab 2010 obligatorisch in Kraft treten sollten.

Abb. 41

Abgasgrenzwerte für Pkw und für leichte Nutzfahrzeuge bis 3,5 t Gesamtgewicht (Grenzwerte für die Serienproduktion)

Euro 3 (EG-Richtlinie 98/69/EG)^{*)}

Gültig ab	Fahrzeugklasse/-gruppe		Bezugs-masse RW (kg)	CO (g/km)		HC (g/km)		NO _x (g/km)		HC + NO _x (g/km)		Partikel-masse (g/km)
	Klasse	Gruppe		Benzin	Diesel	Benzin	Diesel	Benzin	Diesel	Benzin	Diesel	
01.01.2000	Pkw	—	alle	2,3	0,64	0,20	—	0,15	0,50	—	0,56	0,05
01.01.2000	leichte	I	RW ≤ 1305	2,3	0,64	0,20	—	0,15	0,50	—	0,56	0,05
01.01.2001	Nutz-fahrzeuge	II	1305 < RW ≤ 1760	4,17	0,80	0,25	—	0,18	0,65	—	0,72	0,07
		III	1760 < RW	5,22	0,95	0,29	—	0,21	0,78	—	0,86	0,10

Euro 4 (EG-Richtlinie 98/69/EG)^{*)}

Gültig ab	Fahrzeugklasse/-gruppe		Bezugs-masse RW (kg)	CO (g/km)		HC (g/km)		NO _x (g/km)		HC + NO _x (g/km)		Partikel-masse (g/km)
	Klasse	Gruppe		Benzin	Diesel	Benzin	Diesel	Benzin	Diesel	Benzin	Diesel	
01.01.2005	Pkw	—	alle	1,0	0,50	0,10	—	0,08	0,25	—	0,30	0,025
01.01.2005	leichte	I	RW ≤ 1305	1,0	0,50	0,10	—	0,08	0,25	—	0,30	0,025
01.01.2006	Nutz-fahrzeuge	II	1305 < RW ≤ 1760	1,81	0,63	0,13	—	0,10	0,33	—	0,39	0,04
		III	1760 < RW	2,27	0,74	0,16	—	0,11	0,39	—	0,46	0,06

Abb. 42

6.2 Nutzfahrzeugmotoren

Für Nutzfahrzeugmotoren ist zur Anpassung der Abgasgrenzwerte EURO V vor allem die weitere Minderung der Partikelemission bis auf Partikelfilter-Niveau mit der gleichen Begründung wie bei Diesel-Pkw erforderlich, eine Halbierung des NO_x-Grenzwertes der Stufe EURO V auf 1,0 g/kWh als Maßnahme zur Einhaltung der NEC-Richtlinie 2001/81/EG, sowie eine weitere Senkung des NO_x-Grenzwertes auf 0,5 g/kWh ab 2010.

Die Richtlinie 1999/96 EG über Maßnahmen gegen die Emissionen von Nutzfahrzeugmotoren sieht eine Grenzwertstufe EURO V mit u. a. einem NO_x-Grenzwert von 2,0 g/kWh sowohl für den stationären als auch für den dynamischen europäischen Testzyklus vor, der ab 2008 für die Erteilung der Betriebserlaubnis für neue Motortypen und ab 2009 für das Inverkehrbringen von allen neuen Nutzfahrzeugmotoren gilt. Artikel 7 der Richtlinie enthält den Auftrag an die Kommission, bis zum 31. Dezember 2002 die verfügbare Technologie zur Einhaltung des NO_x - Grenzwertes für 2008 zu prüfen und in einem Bericht an das Europäische Parlament und an den Rat ggf. neue Vorschläge vorzulegen. Dieser Bericht soll auch Überlegungen zur weiteren Absenkung des NO_x-Grenzwertes EURO V ab 2008/2009 oder einem späteren Zeitpunkt beinhalten.

Eine weitere Herabsetzung der Grenzwerte für CO und Kohlenwasserstoffe ist nach heutigem Erkenntnisstand nicht dringlich.

Es gelten folgende Gesichtspunkte, z.T. analog zu Pkw:

- Die Grenzwerte sollen kraftstoffneutral sein.
- Eine Halbierung des NO_x-Grenzwertes der Stufe EURO V auf 1,0 g/kWh als Maßnahme zur Einhaltung der NEC-Richtlinie 2001/81/EG, sowie eine weitere Senkung des NO_x-Grenzwertes auf 0,5 g/kWh als Stufe EURO VI ab 2010 ist erforderlich.
- Die Einführung eines verschärften Partikelgrenzwertes soll als Anpassung der Stufe EURO V ab 2008 erfolgen. Der Partikelgrenzwert (massenbezogen und auf den European Stationary Cycle ESC sowie den European Transient Cycle ETC bezogen) ist auf „Partikelfilter-Niveau“ zu definieren. Da die Partikelgrenzwerte 0,02 g/kWh im ESC und gleichzeitig 0,03 g/kWh im ETC durch Einsatz einer effektiven Abgasnachbehandlung zur NO_x-Minderung und unter Ausnutzung der gegenseitigen Abhängigkeit von NO_x- und Partikelemission auch ohne Partikelfilter eingehalten werden können, wäre die mit Partikelfilter sicher erreichbare Minderungsrate von 90 % auf diese Werte für die Fortschreibung anzuwenden. Dies ergibt 0,002 g/kWh im ESC und 0,003 g/kWh im ETC.
- Eine Herabsetzung der massenbezogenen Partikelgrenzwerte um den Faktor 10 reicht prinzipiell aus, um das Ziel des Gesundheitsschutzes zu erreichen, wenn daraufhin effektive Partikelfilter oder gleichwertige Techniken mit einer hohen Minderungsrate über den gesamten Größenbereich der Partikel einschließlich der Nano-Partikel zum Einsatz kommen. Für die gravimetrische Bestimmung der Partikelemission auf niedrigem Niveau steht das in den USA für den Einsatz ab 2007 definierte Messverfahren zur Verfügung. Um Zielverfehlungen in Form von technischen Entwicklungen zu verhindern, die hauptsächlich auf die Minderung der Masse hin optimiert sind, ist als flankierende

Maßnahme zur Begrenzung der Partikelmasse eine Begrenzung der Partikelzahl notwendig und rechtzeitig anzukündigen.

- Es ist ein weltweit harmonisierter transienter Testzyklus für Nutzfahrzeugmotoren in der Entwicklung (WHDC), der zukünftig auch auf EU-Ebene zusammen mit weiteren neuen Anforderungen (z.B. Begrenzung der off-cycle Emissionen) eingeführt wird. Der Zeitpunkt ist noch offen. Bislang fehlt noch eine Datenbasis, um Grenzwerte mit Bezug auf den WHDC diskutieren zu können. Die Grenzwertvorschläge können ggf. später für den WHDC angepasst werden.
- Der European Load Response Test (ELR) ist zukünftig entbehrlich, da er ursprünglich nur als „dynamische Ergänzung“ zum stationären ESC vorgeschlagen und im Zuge eines Kompromisses gemeinsam mit dem ESC und dem dynamischen ETC eingeführt wurde. Bei sehr niedrigen Emissionswerten ermöglicht er keine Aussage.

Der Grenzwert-Vorschlag ist in **Abb. 43** dargestellt. **Abb. 44** zeigt zum Vergleich die bisher verabschiedeten Grenzwerte für Nutzfahrzeug-Motoren.

Vorschlag Abgasgrenzwerte für Nutzfahrzeug-Motoren				
(Grenzwerte für die Serienproduktion)				
	Euro V 1999/96/EG ab 2008/2009		Euro VI ab 2010	
	ESC	ETC ^{1) 2)}	ESC	ETC ^{1) 2)}
	g / kWh	g / kWh	g / kWh	g / kWh
CO	1,5	4,0	1,5	4,0
HC	0,46		0,46	
NMHC		0,55		0,55
Methan		1,1 ³⁾		1,1 ³⁾
NO_x	1,0	1,0	0,5	0,5
Partikel	0,002	0,003	0,002	0,003

¹⁾ zusätzlicher Transienten-Test für Dieselmotoren mit Abgasnachbehandlungssystem
²⁾ Für Gasmotoren nur Transient-Test
³⁾ Nur für Erdgasmotoren

Abb. 43

Abgasgrenzwerte für Nutzfahrzeug-Motoren

(Grenzwerte für die Serienproduktion)

Euro 0		Euro I	Euro II	Euro III		Euro IV/V	
88/77/EWG seit 1988/90		91/542/EWG		1999/96/EG			
		ab 1992/93	ab 1995/96	ab 2000		ab 2005/2006 bzw. 2008/2009*	
		1. Stufe	2. Stufe	ESC- und ELR-Test ¹⁾	ETC-Test ^{2) 3)}	ESC- und ELR-Test ¹⁾	ETC-Test ^{2) 3)}
g / kWh	g / kWh	g / kWh	g / kWh	g / kWh	g / kWh	g / kWh	g / kWh
CO	12,3	4,9	4,0	2,1	5,45	1,5	4,0
HC	2,6	1,23	1,1	0,66		0,46	—
NMHC	—	—	—	—	0,78		0,55
Methan	—	—	—	—	1,6 ⁴⁾		1,1 ⁴⁾
NO _x	15,8	9,0	7,0	5,0	5,0	3,5 / 2,0*)	3,5 / 2,0*)
Partikel	—	0,4	0,15	0,1	0,16 ⁵⁾	0,02	0,03 ⁵⁾
Ruß	—	—	—	0,8 m ⁻¹	—	0,5 m ⁻¹	—

¹⁾ geändertes / verschärftes Prüfverfahren für alle Dieselmotoren

²⁾ zusätzlicher Transienten-Test für Dieselmotoren mit

Abgasnachbehandlungssystem

³⁾ Für Gasmotoren nur Transient-Test

⁴⁾ Nur für Erdgasmotoren

⁵⁾ Nur für Dieselmotoren

*) Bei Euro 5 (ab 2008/09) wird nur der NO_x-Grenzwert von 3,5 auf 2,0 g/kWh herabgesetzt

Abb. 44

7. Quellen:

- [1] Call for submission of evidence on the technology potential and prospective costs of achieving the 2.0 g/kWh limit for oxides of nitrogen (NO_x) due for application from 2008, as laid down in Directive 1999/96/EC. European Commission, DG Enterprise, June 21st, 2002.
- [2] Michael P. Walsh: Global Trends in Diesel Emissions Regulation – A 2001 Update. SAE 2001-01-0183
- [3] Umweltgutachten 2002 des Rates von Sachverständigen für Umweltfragen. Unterrichtung durch die Bundesregierung. Deutscher Bundestag, 14. Wahlperiode, Drucksache 14/8792 vom 15.04.2002
- [4] Hausberger et al.: Update of the Emission Functions for Heavy Duty Vehicles in the Handbook Emission Factors for Road Traffic, 2nd Draft. Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics, Graz University of Technology, 14.10.2002
- [5] Entwurf eines nationalen Programms: Bericht der Bundesrepublik Deutschland nach Art. 6 der Richtlinie 2001/81/EG (NEC-Richtlinie) über die Emissionen von SO₂, NO_x, NH₃ und NMVOC sowie die Maßnahmen zur Einhaltung der NECs. Umweltbundesamt II 6.1, November 2002.
- [6] U.S. EPA: Health Assessment Document for Diesel Exhaust, September 2002
- [7] U.S. EPA; National-Scale Air Toxics Assessment for 1996. EPA-453/R-01-003, January 2001. Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, NC 27711.
- [8] ENVIRONMENTAL AND HEALTH IMPACT FROM MODERN CARS
A comparison between two petrol and two diesel cars with varying emission control technology. A report for the Swedish National Road Administration, Ecotrafic ERD 3 AB, Peter Ahlvik. May 2002
- [9] Fujimura, T., S. Matsushita, T. Tanaka, K. Kojima, 2002. "Development Towards Serial Production of a Diesel Passenger Car with Simultaneous Reduction System of NO_x and PM for the European Market", Proceedings of 23rd International Vienna Motor Symposium, 25-26 April 2002, VDI Verlag
- [10] Cleaner Vehicles, Cleaner Fuels & Cleaner Air. Overview of the 2007 Heavy-Duty Engine & Low Sulfur Diesel Fuel Program. U.S. EPA, Office of Transportation and Air Quality, August 2002
- [11] Searles, R A, Bosteels, Such, C H, Nicol, A J, Andersson, J D, Jemima C A:
INVESTIGATION OF THE FEASIBILITY OF ACHIEVING EURO V HEAVY-DUTY EMISSIONS LIMITS WITH ADVANCED EMISSION CONTROL SYSTEMS
(Paper Code: F02E310, FISITA 2002)
- [12] Gauss et al.: Motoren mit Diesel-Direkteinspritzung und neuer Partikelfiltertechnik, Vergleich der neuen Partikelfiltertechnik mit herkömmlicher Technologie, Dauerhaltbarkeit dieser Filtertechnik. ADAC Technik-Zentrum Landsberg, 31.08.2001.
- [13] Färnlund, Holman, Kageson: Emissions of ultrafine particles from different types of light duty vehicles. Swedish National Road Administration, Publication 2001:10, January 2001.

- [14] VERT FILTER LIST, Tested and approved Particle-Trap Systems for retrofitting Diesel engines. BUWAL Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape, Bern, Version: 17 July 2002
- [15] Jacob et al.: Nichtblockierende Lösung zur Minderung von Dieseluß für Euro IV-Nutzfahrzeugmotoren. Internationales Wiener Motorensymposium, 26. April 2002.
- [16] Control of Air Pollution from New Motor Vehicles: Heavy-Duty Engine and Vehicle Standards and Highway Diesel Fuel Sulfur Control Requirements Final Rule. EPA;40, CFR Parts 69, 80, and 86. Federal Register/Vol. 66, No.12, Thursday, January 18, 2001.
- [17] U.S.EPA,Office of Air and Radiation.Highway Diesel Progress Review . EPA420-R-02-016,June 2002.(<http://www.epa.gov/air/caaac/dieselreview.pdf>)
- [18] MEETING TECHNOLOGY CHALLENGES FOR THE 2007 HEAVY-DUTY HIGHWAY DIESEL RULE. Report of The Clean Diesel Independent Review Panel. DRAFT September 18, 2002
- [19] STUDY ON EMISSION CONTROL TECHNOLOGY FOR HEAVY-DUTY VEHICLES . FINAL REPORT, VOLUME 1, SURVEY OF FUTURE EMISSION CONTROL TECHNIQUES. CONTRACT N° ETD/00/503430
Study prepared for the European Commission – DG ENTR (Enterprise)
Joint effort by MIRA Ltd, United Kingdom, PBA, United Kingdom, LAT/AUTH, Greece, TU Graz, Austria, TNO Automotive, Netherlands, Vito, Belgium. May 2002
- [20] ACEA programme on emissions of fine particles from passenger cars. Report December 1999
- [21] ACEA programme on emissions of fine particles from passenger cars [2]. Report July 2002
- [22] Industry comments on proposed particulate measurement techniques. OICA contribution to PMP, Informal document No. 7 (45th GRPE, 13-17 January 2003,
- [23] Wichmann et al.: Forschungsbericht 203 45 161/1 "Ad-hoc-Maßnahmen zur Schadstoffminderung an Kfz, Auswirkung Partikelfilter". GSF Neuherberg, im Auftrag des Umweltbundesamtes, Juni 2003.
- In diesem Gutachten u. a. zitierte Quellen:

Ezzati et al. 2002 Selected major risk factors and global regional burden of disease. Lancet 360:1347-60

Künzli et al. 2000 Public health impact of outdoor and traffic-related air pollution: A European assessment. Lancet 356: 795-801

Lambrecht et al. 1999 Immissionsnaher Risikovergleich von Diesel- und Ottoabgasen. Bericht im Auftrag des UBA

Pope et al. 2002 Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. JAMA 287: 1132-41

Statistisches Bundesamt 2003Todesursachenstatistik www.gbe-bund.de

WHO 2002 World health report 2002 www.who.int/whr/en

WHO 2003 Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide. Report from WHO working group meeting Bonn, 13-15 January 2003. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen

Worldbank 2003 Air pollution data by region and country: The worldbank, development economics research group estimates, status 3/2003
www.worldbank.org/nipr/Atrium/index.html,

- [24] Feichter J., R. Sausen, H. Graßl, M. Fiebig : A comment on „Control of fossil-fuel particulate black carbon and organic matter, possibly the most effective method of slowing global warming“ J. Geophys. Res. accepted
- [25] Sato et al.: Proc. Natl. Acad. Sci., 100, 6319-6324 2003.
- [26] Jacobson, M.Z.: Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols, Nature, 409, 695-697, 2001.
- [27] Hansen, J.E. and M. Sato: Trends of measured climate forcing agents, Proc. Natl. Acad. Sci., 98, 14778-14783, 2001.
- [28] Forschungsbericht 200 42 101: Ermittlung gesetzlich limitierter Schadstoffemissionen von Diesel-Pkw über die Lebensdauer (Feldüberwachung Diesel-Pkw II). RWTÜV, Essen, im Auftrag des Umweltbundesamtes, 25.04.2002.
- [29] H. Steven, H.J. Stein: Summary of Test Results from EMPA, JARI and EPA WHDC Validation Programs. GRPE/WHDC/V02, 02.04.2003
- [30] Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin: Luftgütemessdaten – Jahresbericht 2001
- [31] Israël, G.W., Schlums, C., Treffeisen, R., Pesch, M.: Rußimmission in Berlin. VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 15, Nr. 152 (1996).
- [32] Lohmeyer, A., Düring, I., Lorentz, H.: Validierung von PM10-Immissionsberechnungen im Nahbereich von Strassen und Quantifizierung der Staubbildung von Strassen. im Auftrag der Senatsentwicklung für Stadtentwicklung Berlin (2001)
- [33] Rauterberg-Wulff, A.: Untersuchung über die Bedeutung der Staubaufwirbelung für die PM10-Immission an einer Hauptverkehrsstraße, TU Berlin, Fachgebiet Luftreinhaltung, im Auftrag der Senatsentwicklung für Stadtentwicklung Berlin (2000)
- [34] LAI-UA „Verkehrsimmissionen“: Minderungspotentiale verschiedener Maßnahmen für PM10/PM2,5 und NOx im Straßenverkehr. Abschlußbericht (2001)
- [35] LAI UA „Verkehrsimmissionen“, LAI UA „Luft/Überwachung“: Erste Erfahrungen der kontinuierlichen Partikelzählung im Messnetz in Straßennähe. Bericht an den LAI (2003).
- [36] Kolke, R., Bewertungsverfahren für neue Antriebe und Energieträger im Straßenverkehr, Methodik und Ergebnisse, Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg, 3. IIR Fachkonferenz Innovative Antriebstechnologien im Automobilbau, Augsburg, 31.März - 02. April 2003