

**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Stickoxide, Partikel und Kohlendioxid: Grenzwerte, Konflikte und Handlungsmöglichkeiten kommunaler Luftreinhaltung im Verkehrsbereich

Informationen und Empfehlungen für Mitarbeiter deutscher Kommunen

ENTWURF

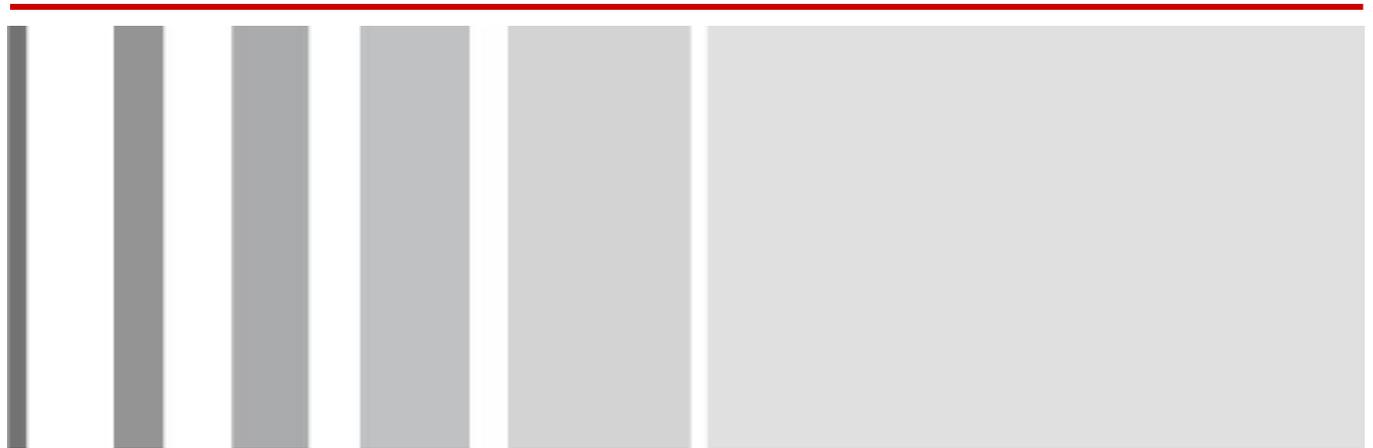
Bearbeiter



TU Dresden
Lehrstuhl für Verkehrsökologie

Udo Becker
Elke Clarus
Wolfram Schmidt
Matthias Winter

Stand Dresden, 12.10.2009





Inhaltsverzeichnis

0	Das Wichtigste in Kürze	5
1	Einleitung, Aufgabenstellung und Vorgehen	9
2	Ausgewählte Aspekte verkehrlicher Luftreinhaltung	12
2.1	Partikel/ Feinstäube aller Größenklassen.....	12
2.2	Stickstoffdioxid (NO ₂) und Stickoxide (NO _x)	16
2.3	Treibhauswirkungen des Verkehrs (CO ₂ und andere).....	21
2.4	Verkehrliche Aspekte	27
2.5	Fahrzeugtechnik.....	32
2.6	Emissionsmodellierung	52
2.7	Zeitliche Entwicklung der Emissionen	66
2.8	Wechselwirkungen zwischen den Aspekten.....	71
3	Kommunale Handlungsmöglichkeiten	76
3.1	Die verkehrsökologische Tautologie.....	77
3.2	Maßnahmenübersicht.....	81
4	Empfehlungen und Vorgehensvorschlag	89
5	Literatur.....	97





0 Das Wichtigste in Kürze

Die ab dem 1.1.2010 geltenden erweiterten Luftqualitätsgrenzwerte stellen die deutschen Städte vor allem in verkehrlich belasteten Gebieten vor Probleme. Zum einen haben die Kommunen sicherzustellen, dass die Immissionsgrenzwerte eingehalten werden, zum anderen stehen den Kommunen aber nur eine Reihe politisch oftmals strittiger und in der Wirkung häufig begrenzter Maßnahmen zur Verfügung. Wie können die (Groß-) Städte darauf reagieren? Der folgende Text versucht, den Mitarbeitern der Kommunen Hilfen für die Beantwortung dieser Fragen zu geben, und zwar sowohl bezüglich der Luftqualitätsgrenzwerte, aber auch bezüglich der Klimaschutzbemühungen.

Zunächst kann festgehalten werden, dass der Verkehrsbereich zukünftig den Schwerpunkt von Maßnahmen zu Klimaschutz und Luftreinhaltung bilden muss. Die wesentlichen urbanen Problemfelder werden durch den Verkehr bestimmt, wobei bei den relevanten Luftschadstoffe Fahrzeuge mit Dieselmotoren die Hauptemittenten darstellen.

In der Vergangenheit war die Reduktion von Verkehrsemissionen vorrangig als Frage der Weiterentwicklung der Fahrzeugtechnik interpretiert worden. Auch künftig wird und muss die technische Entwicklung einen positiven Beitrag zur Verbesserung der Luftqualität leisten, aber festzuhalten ist, dass sich die Probleme (vor allem die NO₂-Probleme) nicht automatisch, allein durch fahrzeugseitige Verbesserungen, entschärfen lassen. *Technik allein reicht nicht aus.* Zwar wirken die Euro 5 - und Euro 6 - Konzepte, aber wohl nur mit Verzögerung, und sie unterliegen Unwägbarkeiten. Die NO₂-Emissionen werden also im Fall ohne zusätzliche Maßnahmen erst zwischen 2015 und 2020 auf Werte sinken, die auch an hochbelasteten Verkehrsmessstellen eine Einhaltung der Grenzwerte ermöglichen. Die Kommunen müssen also *jetzt* zwingend zusätzliche Maßnahmen entwickeln und umsetzen.

Dabei sind neue Fahrzeuge und Fahrzeugkonzepte (Hybrid-, Elektro- oder Gasfahrzeuge) hilfreich, nützlich, förderungswert und auch (innerhalb genau festzulegender Anwendungsbereiche) umweltentlastend, sie spielen aber wegen ihres heute und in den nächsten zehn Jahren vernachlässigbaren Anteils am Fahrzeugbestand (auch im Jahr 2020!) keine nennenswerte Rolle für die Problemlösung. Zu viel hängt außerdem von den Rahmenbedingungen (z.B. der Energieerzeugung oder der Fahrleistungsentwicklung usw.) ab: Nur dann, wenn der organisatorische, finanzielle und rechtliche Rahmen richtig gesetzt würde, könnten diese Konzepte sinnvolle Reduktionspotentiale erschließen.



Da die technischen Weiterentwicklungen allein für die Problemlösung nicht ausreichen, sind grundsätzliche Änderungen von Verkehrsverhalten und Verkehrssystemen unumgänglich. Eine Verbesserung der Raumordnung, weniger Zersiedelung, eine multifunktionale Stadt der kurzen Wege und ein anderes Mobilitätsverhalten der Bevölkerung weisen die höchsten Reduktionspotentiale auf, wirken aber vor allem langfristig.

Rad- und Fußgängerverkehr spielen für die Sicherung der Mobilität künftig eine entscheidende Rolle: Sie stützen die veränderte Raumordnung und sind vergleichsweise günstig. Allerdings bedürfen gerade sie einer Veränderung der Rahmenbedingungen und eines langen Atems. Verbesserungen von Bus und Bahn (Öffentlicher Verkehr ÖV) stehen oft im Mittelpunkt der Luftreinhalteplänen, können aber kontraproduktive Wirkungen aufweisen, wenn sie nicht von einer flankierenden De-attraktivierung im MIV begleitet werden.

Deshalb muss die De-attraktivierung des motorisierten Individualverkehrs (MIV) immer einbezogen werden, denn ohne grundsätzliche Veränderungen dort bleiben alle anderen Ansätze Stückwerk. Dazu ist die klare Trennung von Mobilität und Verkehr notwendig, sonst ist eine solche Strategie nicht kommunizierbar. Kommunikationstechnisch ist also nicht die Reduktion des MIV, sondern vor allem die Garantierung von Mobilität in den Vordergrund zu stellen, was die Reduktion von Verkehrskosten und Verkehrsleistungen und Verkehrsaufwänden dann erst ermöglicht. Langfristig liegen gerade diese Ansätze im echten Interesse der Wirtschaft und der Verkehrsteilnehmer, denn sie eröffnen Raum für alternative Konzepte und Lösungen (denn Mobilität steht nicht zur Disposition), senken Steuern, Gesundheits-, Schadensreparatur- und Lohnnebenkosten, reduzieren die sozialen Verwerfungen (!) und sind ökonomisch effizient.

Als Fazit bleibt festzuhalten, dass die Kommunen jetzt nicht-technische Maßnahmen im Verkehr umsetzen müssen. Zur Reduktion der Treibhausgase und der Luftschadstoffe sind geeignete Push-&-Pull-Pakete zu bilden, deren Wirkungen in einem laufenden „monitoring“ zu verfolgen sind.

Eine Übersicht mit denkbaren Maßnahmengruppen zur Erreichung der Luftqualitäts- und Klimaschutzziele wurde erarbeitet, die zur Entwicklung spezifischer Pakete genutzt werden kann. Dabei zeigt sich etwa, dass viele der in den Kommunen umgesetzten Verkehrsverflüssigungsmaßnahmen kontraproduktive (also emissionserhöhende) Wirkungen haben und haben müssen, da sie eben Nachfrageerhöhungen auslösen. (Auch) deshalb wird empfohlen, künftig verstärkt die verkehrsökologische Tautologie zur dynamischen Abschätzung der Maßnahmewirkungen und zur Identifikation geeigneter Maßnahmenpakete einzusetzen.



Mit welchen Strategien können die Großstädte nun versuchen, die verschiedenen Zwänge und Probleme aufzugreifen? Aus unserer Sicht kann natürlich mit dem vorhandenen Instrumentarium weitergearbeitet werden, wobei es vor allem auf die Ernsthaftigkeit und den politischen Nachdruck für die Maßnahmenumsetzung ankommt. Die von uns entwickelten Strategien A (gebremster Einsatz der traditionellen Instrumente) und B (engagierter Einsatz der traditionellen Instrumente) unterscheiden sich nicht so sehr in ihren Bestandteilen, sondern vor allem in der Ernsthaftigkeit der Umsetzung. Die „Konflikte scheuende“ Strategie A tut dabei anfangs niemandem richtig weh, verfehlt damit aber sowohl die Luftreinhalte- als auch die Klimaschutzziele. Sie führt also in der Folge zu vermehrten rechtlichen Klagen der Bevölkerung, Vertragsverletzungsverfahren, (ineffizienten) Sofortmaßnahmen und langfristig zu einem sich gegenseitig blockierenden Zustand mit Unzufriedenheit auf allen Seiten. Strategie A löst also keines der kommunalen Probleme und kann nicht wirklich empfohlen werden. Die engagierte Strategie B dagegen hat am Anfang Konflikte ausdiskutieren und Überzeugungsarbeit zu leisten, wird damit dann aber allmählich auch die Luftreinhaltegrenzwerte einhalten können: zwar später als eigentlich vorgeschrieben, aber immerhin. Sie kann deshalb - bei geeigneter politischer Unterstützung – dann empfohlen werden, wenn damit auch Rahmenbedingungen (im Sinne der diskutierten Attraktivierung/De-attraktivierung) verändert werden. Leider kann diese Strategie keinen nennenswerten Beitrag zur Minderung der Treibhausgasemissionen des Verkehrs leisten.

Um auch heute noch nicht diskutierte, weitergehende Ansätze aufnehmen und bewerten zu können, werden deshalb auch die Strategien C bis E erarbeitet. Strategie C („Blaue Zone“) unterstellt dabei eine deutliche Verschärfung der Umweltzonen, so dass in dieser Zone nur Fahrzeuge der saubersten Fahrzeugnorm betrieben werden dürfen. Sie erfordert eine Verschärfung der aktuellen Rechtslage und ist also nur gemeinsam mit den anderen Großstädten erreichbar. Mit dieser Strategie C werden die Stickstoffdioxid- bzw. Partikelgrenzwerte eingehalten, aber auch hier wird kein CO₂-Reduktionsbeitrag erreicht. Strategie D geht noch drastischer vor und verbietet den Betrieb von Dieselmotoren in den Städten. Diese Strategie ist aus heutiger Sicht unrealistisch, aber sie belegt, dass damit sehr große Luftschadstoffreduktionen erreichbar sind. In dieser Strategie würden Immissionsgrenzwerte kein Problem mehr darstellen, aber auch hier würde kein Beitrag zur Erreichung der CO₂- Reduktionsziele geleistet.



Deshalb wurde letztlich Strategie E entwickelt, in der ausschließlich ein vollkommen neu konzipiertes „Stadttauto“ in die Stadt einfahren darf. Diese Strategie würde eine Änderung der Rechtslage und des Verständnisses von „Auto in Städten“ erfordern. Längerfristig sollten nur noch umweltschonende, kleine, leichte, saubere und effiziente Fahrzeuge in Städten fahren dürfen. Ein solches Stadtfahrzeug könnte ggf. eine maximale Leermasse von 200 bis 300 kg mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 59 km/h und Euro 6 – Abgasgrenzwerten kombinieren; dafür stünden Elektrofahrzeuge oder Hybridfahrzeuge oder andere Ansätze zur Verfügung (solche Fahrzeuge existieren bereits). Aus heutiger Sicht erscheint Strategie E utopisch, aber hier werden alle Luftqualitätsziele erreicht, und es wird ein signifikanter Beitrag zur CO₂-Reduktion im Verkehr erreicht. Aus unserer Sicht wäre also Strategie E sinnvoll, denn

- sie löst die Luftreinhalteprobleme im Stadtverkehr,
- sie löst weitgehend die Klimaschutzprobleme im Stadtverkehr,
- sie verringert das Lärmproblem deutlich,
- sie senkt die Unfallzahlen, vor allem bei Getöteten und Verletzten,
- sie verringert die Flächeninanspruchnahme durch Verkehr deutlich,
- sie erleichtert Innovation und Arbeitsplatzergänzung,
- sie ist im wohlverstandenen Interesse der Wirtschaft,
- sie schont die finanziellen Möglichkeiten der Städte,
- sie harmonisiert mit Rad-, Fußgänger- und Öffentlichem Verkehr und
- sie kann soziale Verwerfungen reduzieren.

Letztlich ist zu konstatieren, dass sich die Kommunen heute in einer Zwickmühle befinden: Einerseits sind sie für die Einhaltung der Luftqualitätsstandards verantwortlich, andererseits verfügen sie realistischere über nur wenig wirkungsvolle und politisch durchsetzbare Mittel dazu. Dieser Zustand ist eigentlich nicht hinnehmbar. Die deshalb heute bevorzugten „eher vorsichtigen“ Maßnahmen dürften zu einer Reihe von Klagen betroffener Bürger führen, die von den Städten langfristig nicht gewonnen werden können. Von daher sollten dringend übergeordnete Weichenstellungen erfolgen, die das den Städten zur Verfügung stehende Instrumentarium erweitern und überhaupt erst für die Verringerung der Probleme tauglich machen.



1 Einleitung, Aufgabenstellung und Vorgehen

Zunächst werden Rahmenbedingungen und Aufgabe der Arbeit erläutert.

- (1) Die Städte Deutschlands stehen im Bereich Luftreinhaltung und Verkehr vor großen Herausforderungen: Zum einen gelten ab dem Jahr 2010 erweiterte bindende Luftqualitätsgrenzwerte, und die gesetzlichen Regelungen zur Luftreinhaltung lassen eigentlich keinen Spielraum für Überschreitungen mehr zu. Zum zweiten ist aber in der Realität mit Überschreitungen der neuen Luftqualitätsgrenzwerte besonders in städtischen, verkehrlich geprägten Gebieten zu rechnen. Die Einhaltung der dann geltenden Luftqualitätsgrenzwerten für PM₁₀ und PM_{2,5}, vor allem aber für NO₂ wird wohl kaum zu gewährleisten sein.
- (2) Deshalb stellt sich die Frage, wie denn die Kommunen darauf reagieren können. Ist die Situation wirklich so dramatisch, oder kann sie mit „normalen, bewährten Maßnahmen“ nicht auch gemeistert werden? Wird vielleicht die ständige Verbesserung der fahrzeugtechnischen Parameter, vor allem der Abgasreinigung, das Problem von selbst lösen? Wie groß ist eigentlich der Gestaltungsspielraum der Städte, was können sie eigentlich aus eigener Kraft umsetzen, und reicht das wiederum zur Beseitigung der Probleme aus? Müssen vielleicht auf Bundes- oder Landesebene neue Spielräume, z. B. neue Kompetenzen und neue rechtliche Möglichkeiten, geschaffen werden? Besteht dafür in Bevölkerung und Politik auch eine gewisse Akzeptanz? Der folgende Text versucht, den Mitarbeitern der Kommunen Hilfen für die Beantwortung dieser Fragen zu geben.
- (3) Dabei ist zusätzlich zu beachten, dass Stickoxide und Partikel nicht die einzigen Problemfelder sind, denen man sich im Verkehrsbereich zu widmen hat. Zusätzlich ist aus kommunaler Sicht vor allem auch die Problematik der (i. a. unzureichenden) Finanzmittel zur Unterhaltung der Verkehrsinfrastruktur anzusprechen, und Sicherheits- bzw. Lärmfragen kommen hinzu. Langfristig dürfte sich die Klimaschutzproblematik als Zentralproblem darstellen. Vor allem die Aufgabe, die Treibhausgasemissionen des Verkehrs in den Industrieländern zum Jahr 2050 um ca. 80 % reduzieren zu müssen, ist ohne Veränderungen der derzeitigen Verhaltensweisen und Verkehrssysteme nicht lösbar. Gelingt es umgekehrt aber, Lösungen zu entwickeln, die die Mobilität der Einwohner mit „nur noch einem Fünftel der fossilen Energie“ sicherzustellen, dann dürften sich auch die anderen Problembereiche deutlich entschärfen. Von daher sehen wir die CO₂-Problematik als langfristiges Kernproblem, zumal in den Jahren nach der UN-Klimakonferenz 2009 in Kopenhagen deutliche Reduktionsziele auch im Verkehrsbereich formuliert werden dürften, für die wiederum die Kommunen die Hauptsorge tragen dürften.



- (4) Der Lehrstuhl für Verkehrsökologie der TU Dresden wurde von einigen deutschen Städten beauftragt, hierzu eine Kurzanalyse vorzulegen. Diese Analyse soll zum einen nochmals die Situation verdeutlichen, zum anderen aber auch Vorgehens- und Handlungsmöglichkeiten der Städte ausloten. Die Ausrichtung der Analyse soll dabei so erfolgen, dass strategische Empfehlungen gegeben werden, wie sich die Mitarbeiter der Städte bzw. der verantwortlichen Ämter positionieren können bzw. welche nächsten Schritte zielführend erscheinen. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Frage, ob die Städte für die Lösung der Probleme überhaupt mit den erforderlichen Möglichkeiten, Ressourcen und Kompetenzen ausgestattet sind.
- (5) Das vorliegende Papier wurde als erstes, strategisches Rahmenpapier konzipiert. Auf konkrete und quantitativ belegte Einzel-Maßnahmenempfehlungen muss in diesem überschaubaren Rahmen zwangsläufig verzichtet werden (für die Kurzanalyse standen drei Monate zur Verfügung). Für konkrete Situationen in konkreten Städten müssen immer konkrete Einzelplanungen und spezielle Wirkungsabschätzungen erstellt werden. Die im folgenden angegebenen Größenordnungsmäßigen Einschätzungen sind vor allem qualitativer Art und können keine Einzelfallberechnung ersetzen. Die hier gemachten Aussagen sollen lediglich die Wirkungsrichtungen und die Größenordnungen verdeutlichen.
- (6) Die Analyse geht dabei so vor, dass zunächst die Hintergründe aus Sicht der Luftreinhaltung, der (technischen) Fahrzeugentwicklung, der Verkehrsentwicklung und der (politischen) Situation beschrieben werden. Diese Befunde dürften in den meisten Fällen bekannt sein. Dennoch werden Sie zusammengefasst, denn aus der Gesamtsicht ergeben sich bereits bestimmte Folgerungen für sinnvolle und weniger sinnvolle Vorgehensweisen. Im dritten Kapitel werden die sich ergebenden Wechselwirkungen diskutiert, vor allem solche, die sich im Rahmen einer Umsetzung aus den Interessen der verschiedenen (politischen und anderen) Beteiligten ergeben. Hierbei wird auf die „Verkehrsökologische Tautologie“ verwiesen, mit der die Abschätzungen komplexer Reaktionen von Luftreinhaltemaßnahmen umfassend und systematisch erfolgen kann. Es wird empfohlen, verstärkt diese Tautologie einzusetzen, um solche „Luftreinhaltemaßnahmen“ vorab identifizieren zu können, die möglicherweise keinen positiven bzw. sogar einen kontraproduktiven Effekt auslösen dürften.
- (7) Im letzten Teil der Arbeit werden schließlich Empfehlungen und Vorgehensweisen abgeleitet. Diese Praxisempfehlungen müssen aufgrund der verschiedenen Ausgangssituationen der Städte zunächst strategischer Natur bleiben; dabei werden allerdings technische Aspekte, politik-psychologische Aspekte, ökologische Aspekte und verwaltungstechnische Aspekte kombiniert. Letztlich obliegt es jeder Kommune selbst, einen eigenen Weg zur Einhaltung der Anforderungen vor dem Hintergrund demonstrativ erklärter Verkehrsansprüche, vieler Wahltermine, von Gesetzesforderungen, Gerichtsurteilen und Anwohnerklagen zu finden. Die vorliegende Analyse diskutiert dazu die erwartete „typische“



Wirksamkeit der bekannten heutigen Ansätze in zwei Ausprägungen (eher zögerlich und stark engagiert) und entwickelt drei weiterführende Ansätze. Insgesamt ergeben sich so fünf Strategien:

- A. Gebremste Tradition
- B. Engagierte Tradition
- C. Blaue Zone (Super-Umweltzone, Umweltzone Plus)
- D. Verbot aller Dieselfahrzeuge in der Stadt
- E. Stadtauto

(8) Da wir davon ausgehen, dass manche Leser bestimmte Einzelaspekte besonders vertiefen wollen, haben wir die einzelnen Kapitel möglichst so formuliert, dass sie auch alleingegenommen verständlich sind. Wir ermuntern also jede Leserin und jeden Leser, die sie jeweils interessierenden Kapitel zuerst zu lesen und dann weiterzublättern. Wer nur an den Empfehlungen für die Kommunen interessiert ist, möge bitte direkt zum vierten Kapitel springen. Ganz generell gilt, dass wir im Rahmen der hier relevanten Fragen teilweise vereinfachend bzw. überdeutlich formuliert haben und dass wir immer wieder auch unsere Erwartungen bezüglich der künftigen Entwicklung zum Ausdruck bringen. Damit verlassen wir – bewusst – den Rahmen einer „neutralen“ wissenschaftlichen Formulierung, können aber dem strategischen Charakter der Analyse besser Rechnung tragen.



2 Ausgewählte Aspekte verkehrlicher Luftreinhaltung

- (1) In diesem Kapitel werden die verschiedenen Zugänge und Problemfelder beleuchtet. Dabei werden zunächst die Problembereiche Feinstaub, Stickoxide und Treibhausgase und anschließend die verkehrlichen bzw. fahrzeugtechnischen Rahmenbedingungen bzw. Entwicklungen beschreiben. Aussagen zu Wechselwirkungen schließen sich an.
- (2) Die relevanten Anforderungen an die Luftqualität ergeben sich vor allem aus der Richtlinie 2008/50/EG, die die bisher gültigen Rechtsakte (RL 1999/30/EG, 2000/69/EG und 2002/3/EG sowie 1997/101/EG) ersetzt und u.a. für Stickstoffdioxid (NO₂), Stickoxide (NO_x), Partikel (PM₁₀ und PM_{2,5}) Schwefeldioxid (SO₂), Kohlenmonoxid (CO), Benzol und Ozon Immissionsgrenzwerte und entsprechende Alarmschwellen festlegt. Bezogen auf CO₂ sind die letztlich kommenden Anforderungen an den Verkehr noch unklar, derzeit werden wiederum vor allem technische Mindeststandards (g CO₂ je km) diskutiert. Die relevanten Anforderungen aus verkehrlicher Sicht ergeben sich vor allem aus der zukünftig wiederum erwarteten internationalen bzw. nationalen Verkehrszunahme.

2.1 Partikel/ Feinstäube aller Größenklassen

In diesem Abschnitt werden Hintergründe, maximal zulässige Immissionskonzentrationen und Emissionsfaktoren für Partikel zusammengestellt.

- (1) Die Partikelemissionen des Verkehrs werden im wesentlichen durch folgende Prozesse bestimmt:
 - a. direkte Freisetzung von Primärpartikeln aus der Verbrennung von Kraft- und Schmierstoffen,
 - b. Entstehung von Sekundärpartikeln in der Umgebungsluft aus gasförmigen Emissionen wie Stickstoffdioxid und Schwefeloxiden,
 - c. Abrieb von Partikeln durch mechanische Prozesse bspw. an Bremsen, Kupplungen sowie zwischen Reifen und Fahrbahn und
 - d. Aufwirbelung von Bodenmaterial sowie von auf der Fahrbahn und in ihrem Umfeld abgelagerten Partikeln.



- e. Im Schienenverkehr (auch Straßen-, U- und S-Bahnen) sind zusätzlich die Emissionen der Sandungssysteme, mit denen Quarzsand zur Unterstützung der Traktion zwischen Rad und Schiene eingebracht wird zu berücksichtigen¹.
- (2) Für konkrete Untersuchungsorte variieren die Anteile dieser Emissionen an den Gesamtemissionen des Verkehrs erheblich, maßgebliche Parameter sind beispielsweise die Emissionsfaktoren der Einzelfahrzeuge, das lokale Fahrmuster², Zustand und Oberflächenmaterial der Fahrbahn, Fahrzeuganzahl bzw. -folge und Flottenzusammensetzung sowie klimatische Faktoren³.
- (3) Bei Partikel bzw. Feinstäuben aller Größenklassen verfügen wir über umfangreiche Erfahrungen und Daten in allen Kommunen, aber auch zukünftig wird dieser Problembereich nichts von seiner Aktualität verlieren, denn es sind Erweiterungen bzw. Ergänzungen zu erwarten. Heutige Emissions- und Immissionsgrenzwerte beziehen sich ausschließlich auf die Masse der Partikel. Dabei werden unterschiedliche Größenklassen berücksichtigt - in der EU bisher PM₁₀ und ab 1. Januar 2010 zusätzlich PM_{2,5}.
- (4) Weiterhin ist zu erwarten, dass in zukünftigen Richtlinien auch die Anzahl der Partikel begrenzt werden wird. In die Verhandlungen um zukünftige Emissionsgrenzwerte von Pkw haben solche Überlegungen bereits Eingang gefunden. Längerfristig ist weiterhin davon auszugehen, dass an Stelle des komplexen Summenparameters „Partikel“, der heute neben unterschiedlichen Größenklassen und Strukturen auch ein sehr breites Spektrum verschiedener Inhaltsstoffe mit uneinheitlichen Wirkmechanismen umfasst, andere im Emissions- und Immissionsrecht zu berücksichtigende Parameter treten werden.

Immissionsgrenzwerte für Partikel

- (1) Für PM₁₀ bleiben die bisherigen, nach Richtlinie 1999/30/EG geltenden Immissionsgrenzwerte und zulässigen Überschreitungstage unverändert (vgl. Tabelle 1). Zusätzlich wurden für Kommunen, die auf Grund ungünstiger Ausbreitungsbedingungen die geltenden Grenzwerte nicht einhalten können, die Fristen zur Einhaltung der Grenzwerte bis zum Juni 2011 (drei Jahre nach Inkrafttreten der Richtlinie) verlängert. Eine Fristverlängerung ist jedoch nur in den Fällen möglich, in denen auf lokaler Ebene ein Luftreinhalteplan erstellt wurde und alle erforderlichen Maßnahmen zur Verringerung der Immissionsbelastung ergriffen wurden: Vor allem letztere Anforderung bewerten wir als kritisch, hierüber sind Diskussionen zu erwarten.

¹ Der Quarzsand wird in der Rad-Schiene-Paarung z. T. stark zerkleinert und durch Aufwirbelungsprozesse in die Umgebungsluft eingebracht.

² Bestimmt durch Geschwindigkeitsniveau und -gradient.

³ Bspw. Niederschläge und Luftfeuchte.



Grenzwert			
Mittelungszeitraum	Zielwert	Zulässige Überschreitungen	Frist für die Einhaltung des Grenzwertes
Kalenderjahr	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	keine	01.01.2005
24-Stunden-Mittelwert	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	35 im Kalenderjahr	01.01.2005

Tabelle 1: Immissionsgrenzwerte der Richtlinie 2008/50/EG für PM₁₀

(2) Mit der Richtlinie 2008/50/EG wurden auch für PM_{2,5} nationale Ziele, Verpflichtungen in Bezug auf die Expositionskonzentration sowie Zielwerte für das Kalenderjahr gültig. Bis zum Jahr 2015 muss damit eine Expositionskonzentration von 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ verpflichtend unterschritten werden. Bis zum 1. Januar 2010 sollte ein Zielwert für den Jahresmittelwert von 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ erreicht werden, dieser wird zum 1. Januar 2015 verbindlicher Grenzwert und bis zum 1. Januar 2020 auf 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ abgesenkt (vgl. Tabelle 2).

Zielwert			
Mittelungszeitraum	Zielwert	Zeitpunkt zu dem der Zielwert erreicht werden sollte	
Kalenderjahr	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1. Januar 2010	
Grenzwert			
Mittelungszeitraum	Grenzwert	Toleranzmarge	Frist für die Einhaltung des Grenzwertes
<i>Stufe I</i>			
Kalenderjahr	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ am 11. Juni 2008, Reduzierung ab 1.1.2009 bis 1.1.2015 um je 5/7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1. Januar 2015
<i>Stufe II</i>			
Kalenderjahr	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$		1. Januar 2020*
* vorbehaltlich der Ergebnisse einer geplanten Revision der Ergebnisse der Einhaltung der Jahresgrenzwerte im Jahr 2013			

Tabelle 2: Immissionsgrenz- und Zielwerte der Richtlinie 2008/50/EG für PM_{2,5}

(3) Die Richtlinie gibt darüber hinaus zur Stärkung des Gesundheitsschutzes der Stadtbevölkerung eine Methodik zur Ermittlung nationaler Reduktionsziele für die PM_{2,5}-Exposition vor. Sie zielt vor allem auf eine Verminderung der PM_{2,5}-Immissionskonzentration im städtischen Hintergrund, nationale Ziele zur Reduzierung der Exposition ergeben sich dabei auf der Basis eines AEI⁴ (Average Exposure Indicator) der anhand von Messungen an Messstationen für den städtischen Hintergrund in Gebieten und Ballungsräumen des gesamten Hoheitsgebiets eines Mitgliedsstaates ermittelt wird (vgl. Tabelle 3). Referenzjahr für die Ermittlung der Reduktionsziele ist das Jahr 2010.

⁴ Der AEI sollte dabei als gleitender Jahresmittelwert der Konzentrationen für drei aufeinander folgende Kalenderjahre berechnet werden und basiert auf dem Durchschnittswert aller gemäß Anhang V Abschnitt B der Richtlinie eingereichten Probenahmestellen.



Ziel für die Verringerung der Exposition gegenüber dem AEI 2010		Jahr in dem das Ziel für die Verringerung der Exposition erreicht werden sollte
Anfangskonzentration in $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Reduktionsziel in %	2020
$\leq 8,5$	0%	
$>8,5 - <13$	10%	
$=13 - <18$	15%	
$=18 - <22$	20%	
≥ 22	Alle angemessenen Maßnahmen, um das Ziel von $18\mu\text{g}/\text{m}^3$ zu erreichen	

Tabelle 3: Nationale Ziele für die Verringerung der Expositionskonzentration für $\text{PM}_{2,5}$ nach Richtlinie 2008/50/EG

- (4) Die gesundheitlichen Wirkungen von Partikeln korrelieren allerdings eher mit ihrer Partikeloberfläche und der Partikelanzahl als mit der Partikelmasse [GSF_2003], darüber hinaus wird ein Teil ihrer Wirkung maßgeblich durch ihre stoffliche Zusammensetzung bestimmt. Wir gehen deshalb davon aus, dass sich die Städte schon heute darauf einstellen können, dass zukünftig im Sinne eines konsequenten Gesundheitsschutzes die Luftqualitätskriterien um entsprechende Parameter ergänzt werden. Da bereits heute alle Maßnahmen zur Reduktion der Partikelbelastung mit dem Ziel der Reduktion negativer gesundheitlicher Effekte erfolgen (sollten), sind alle Minderungsmaßnahmen immer hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die stoffliche Zusammensetzung sowie auf Struktur und Anzahl der Partikel hin zu überprüfen und zu bewerten. Dies gilt auch für die heutige Planung und nicht erst in einer fernen Zukunft: Jede „Luftreinhaltungspolitik“ hat diese Prämissen zu berücksichtigen.

Emissionsgrenzwerte für Partikel

- (1) Für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge wird nach Verordnung 2007/715/EG die Emissionsgesetzgebung spätestens ab der Euro 6-Norm einen Anzahlgrenzwert für Partikel beinhalten, dieser ist bis spätestens zum Inkrafttreten der Euro 6-Norm festgelegt.
- (2) Aus unserer Sicht wird damit das Problemfeld der Partikel/Stäube aller Größenklassen nichts von seiner Aktualität verlieren; Verringerungen der Emissionen und Immissionen dürften neue, zusätzliche Anforderungen entgegenstehen. Aus gesundheitlicher Sicht deuten die Befunde auch zukünftig auf Handlungsbedarf hin. Unter den derzeit geltenden Rahmenbedingungen bzw. Zukunftserwartungen sind die geltenden oder zu erwartenden Anforderungen nicht erfüllbar; zu den notwendigen und erwartbaren technischen Verbesserungen muss ggf. auch eine grundsätzliche andere Verkehrsgestaltung hinzukommen.



Partikel									
Fahrzeug		Bezugs- masse [kg]	EURO 5 [g/km]		EURO 6			EURO 7	
Klasse	Gruppe		RM	[g/km]	[#/km]	[g/km]	[#/km]	[g/km]	[#/km]
			Otto	Diesel	Otto	Diesel	alle	alle	alle
			V. (EG) Nr.715/2007		V. (EG) Nr.715/2007				
			gültig ab 01.09.2009		gültig ab 01.09.2014				
Pkw	-	alle	0,005	0,005	0,005	0,005	(3)	(2)	(4)
Leichte Nutz- fahr- zeuge	I	bis 1305	0,005	0,005	0,005	0,005	(3)	(2)	(4)
			gültig ab 01.09.2010		gültig ab 01.09.2015				
	II	>1305 bis 1760	0,005	0,005	0,005	0,005	(3)	(2)	(4)
	III	>1760	0,005	0,005	0,005	0,005	(3)	(2)	(4)
Schwe- re Nutz- fahr- zeuge			[g/kWh]		[g/kWh]		[#/km]		
			R. 1999/96/EG		KOM(2007) 851 ⁽¹⁾				
			gültig ab 2008/09		gültig ab 2013/14				
		Prüfzyklus	ESC	ETC	ESC	ETC	(3)	(2)	(4)
		alle	0,02	0,03	0,01	0,01			

(1) Vorschlag für Euro 6-Verordnung der Europäischen Kommission (Stand: 21.12.2007)
(2) Keine weiter Verschärfung gegenüber Grenzwertstufe EURO 6 [UBA_08/2008]
(3) Festlegung spätestens zum Inkrafttreten der EURO 6-Norm
(4) Vollständiger Ersatz des Massegrenzwertes durch Anzahlgrenzwert, Festlegung steht aus

Tabelle 4: Entwicklung der Partikel-Emissionsgrenzwerte für Pkw, LNF und SNF, nach 2007/715/EG, 1999/96/EG, KOM(2007)851

2.2 Stickstoffdioxid (NO₂) und Stickoxide (NO_x)

In diesem Abschnitt werden Hintergründe, maximal zulässige Immissionskonzentrationen und Emissionsfaktoren für Stickoxide zusammengestellt. Zusätzlich wird abgeschätzt, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass an verkehrsnahen Immissionsmessstellen der (ab 2010 geltende) NO₂-Grenzwert überschritten wird. 2008 betrug diese Wahrscheinlichkeit knapp über 50 %.

Immissionsgrenzwerte für Stickstoffdioxid

- (1) Mit dem 1. Januar 2010 treten nach der Richtlinie 2008/50/EG für NO₂ zwei neue Immissionsgrenzwerte in Kraft: ein Grenzwert für das Jahresmittel von 40 µg/m³ und ein Stundenmittelwert von 200 µg/m³, der maximal 18 mal im Jahr überschritten werden darf (vgl. Tabelle 5). Wie auch bei PM₁₀ eröffnet die Richtlinie den Kommunen, die die geltenden Grenzwerte nicht einhalten können, die Möglichkeit einer Fristverlängerung um fünf Jahre nach Inkrafttreten der Richtlinie, also bis zum 1. Januar 2015. Auch hier ist eine Fristverlängerung jedoch nur in den Fällen möglich, in denen auf lokaler Ebene ein Luftreinhalteplan er-



stellt wurde und plausibel gemacht wird, wie die Einhaltung der Grenzwerte bis spätestens zum Ende der neuen Frist erreicht werden soll.

Grenzwert			
Mittelungszeitraum	Zielwert	Zulässige Überschreitungen	Frist für die Einhaltung des Grenzwertes
Kalenderjahr	40 µg/m ³	keine	01.01.2010
Stunden-Mittelwert	200 µg/m ³	18 im Kalenderjahr	01.01.2010

Tabelle 5: Immissionsgrenzwerte der Richtlinie 2008/50/EG für NO₂

Emissionsgrenzwerte für Stickoxid

- (1) Für Stickstoffdioxid aus dem Verkehrsbereich bestehen keine gesonderten Emissionsgrenzwerte. Die Höhe der Emissionen an NO₂ ist lediglich indirekt, als Teil des Summenparameters für Stickoxide (NO_x) limitiert. Die aktuellen NO_x-Emissionsgrenzwerte für Pkw, leichte Nutzfahrzeuge und schwere Nutzfahrzeuge sind in der Verordnung (EG) Nr.715/2007 sowie der Richtlinie 1999/96/EG bzw. im Kommissionsvorschlag KOM(2007) 851 vom 21. Dezember 2007 festgelegt (vgl. Tabelle 6). Es wird erwartet, dass über die Euro 6-Norm hinaus zukünftig lediglich die Grenzwerte für Dieselmotoren denen von Otto-Motoren angepasst werden.

Stickoxide (NO _x)							
Fahrzeug		Bezugsmasse [kg]	EURO 5 [g/km]		EURO 6 [g/km]		EURO 7 [g/km]
Klasse	Gruppe	RM	Otto	Diesel	Otto	Diesel	
			V. (EG) Nr.715/2007		V. (EG) Nr.715/2007		
			gültig ab 01.09.2009		gültig ab 01.09.2014		
Pkw	-	alle	0,060	0,180	0,060	0,080	(2)
Leichte Nutzfahrzeuge	I	bis 1305	0,060	0,180	0,060	0,080	(2)
			gültig ab 01.09.2010		gültig ab 01.09.2015		
	II	>1305 bis 1760	0,075	0,235	0,075	0,105	(2)
III	>1760	0,082	0,280	0,082	0,125		
Schwere Nutzfahrzeuge			[g/kWh]		[g/kWh]		
			R. 1999/96/EG		KOM(2007) 851 ⁽¹⁾		
			gültig ab 2008/09		gültig ab 2013/14		
		Prüfzyklus	ESC	ETC	ESC	ETC	
		alle	2,0	2,0	0,4	0,4	

(1) Vorschlag für Euro 6-Verordnung der Europäischen Kommission (Stand: 21.12.2007)
 (2) Angleichung der Diesel- an die Otto-Grenzwerte der Grenzwertstufe EURO 6

Tabelle 6: Entwicklung der NO_x-Emissionsgrenzwerte für Pkw, LNF und SNF, nach 2007/715/EG, 1999/96/EG, KOM(2007)851



- (2) Von entscheidender Bedeutung für alle Luftreinhaltanstrengungen ist hierbei, dass keinesfalls die im Typprüfzyklus gemessenen Emissionen mit den tatsächlich produzierten Emissionen der Fahrzeuge in der Realität gleichgesetzt werden. Die Emissionsmengen eines Fahrzeugs im Typprüfzyklus und die Emissionsmengen desselben Fahrzeugs im Realbetrieb können große Unterschiede aufweisen, da zum einen die Fahrbedingungen unterschiedlich sind, zum anderen aber auch die Spezifikation bzw. Prüfvorbereitung durch die Hersteller gänzlich andere Betriebsweisen und darausfolgend Emissionen ergeben („dual mapping“ sei nur als Beispiel genannt). Das bedeutet, dass selbst dann, wenn die Grenzwerte im Prüfzyklus eines neuen Motors deutlich unter den Werten eines älteren Motors liegen, im Realbetrieb höhere Emissionen auch durch den neuen Motor (im Vergleich zum alten Motor) möglich sind.

Höhe der NO₂-Immissionsbelastungen an Verkehrsmessstellen

- (1) Derzeit werden an vielen verkehrsnahen Immissionsstandorten in Deutschland die Grenzwerte für PM und NO₂ überschritten. Dies ist auch für 2010 zu erwarten. Vor allem ab dem 1.1.2010 ist deshalb damit zu rechnen, dass sich der Schwerpunkt der Debatte von PM zu NO₂ verlagern wird.
- (2) Die derzeitige NO₂-Belastungssituation zeigt Tabelle 7. Von den ca. 420 Immissionsmessstandorten, die aus den verschiedenen (Länder-) Messnetzen vom Umweltbundesamt kontinuierlich beobachtet wurden, werden derzeit etwa 40 % (169 Messstandorte) als „verkehrsnaher Immissionsort“ („Verkehrsstandorte“) charakterisiert. Im Jahr 2008 (letztes vollständiges Berichtsjahr) wiesen von diesen Verkehrsstandorten mehr als die Hälfte (ca. 52 %, 88 Stationen) einen oder mehrere NO₂-Grenzwertüberschreitungen auf. Die Stationen zeigen ganz eindeutig den dominierenden Einfluss des Verkehrs: Nur eine einzige Station (Limburg) überschritt als „Nicht-Verkehrsstandort“ den Grenzwert; alle anderen Überschreitungen liegen an verkehrsnahen Immissionsmessorten. Die Messorte mit Grenzwertüberschreitungen lagen dabei praktisch ausnahmslos in größeren Städten bzw. Stadttagglomerationen mit den bekannten Schwerpunkten in Bayern, Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen, aber über fast alle Bundesländer (außer Thüringen) verteilt.



	Zahl der Mess-Stationen	davon städtisches Gebiet Verkehr	davon mit NO ₂ -Jahresmittelwert-Überschreitungen
Brandenburg	25	8	2
Berlin	15	6	5
Baden-Württemberg	55	22	15
Bayern	52	26	10
Bremen	8	3	2
Hessen	33	12	10
Hamburg	18	5	4
Mecklenburg-Vorpommern	11	4	1
Niedersachsen	28	10	6
Nordrhein-Westfalen	53	21	17
Rheinland-Pfalz	31	18	5
Schleswig-Holstein	11	6	4
Saarland	9	1	1
Sachsen	24	10	4
Sachsen-Anhalt	25	9	2
Thüringen	22	8	0
Deutschland	420	169	88

Tabelle 7: Zahl der UBA-Messstationen mit Überschreitungen der NO₂ - Grenzwerte im Jahr 2008

- (3) Damit kann auch erwartet werden, dass in einer großen Anzahl von Städten auch 2009, vor allem aber dann 2010 mit Grenzwertüberschreitungen zu rechnen ist. Die Erfahrungen der vergangenen Jahre zeigen, dass aus Sicht der betroffenen Bürger zunehmend auch der Rechtsweg beschritten werden dürfte. Damit aber steht zu befürchten, dass relativ bald innerhalb des Jahres 2010, spätestens aber nach dem 31.12.2010 Klagen über unzulässig hohe Immissionsmesswerte erhoben werden. Aus Sicht der Kommunen gilt es, dafür vorbereitet zu sein. Darzulegen wird unseres Erachtens insbesondere zu sein, dass und wie ernsthaft an der Verbesserung der Lage gearbeitet wird.
- (4) In der Vergangenheit haben eine Reihe von Kommunen bzw. Regionen bereits umfangreich reagiert: Viele Städte/Regionen entwickelten Maßnahmen und Planungen, die sich z.B. in Umweltzonen manifestierten. Die Vielzahl der Maßnahmen etwa in den Luftreinhalteplänen beeindruckt, wobei die konkreten Formulierungen oftmals das Ergebnis von Abwägungsprozessen und politischen Weichenstellungen darstellen dürfte. Bei genauer Prüfung der Pläne und der daraufhin umgesetzten Maßnahmen fallen drei Aspekte auf:
- a. Zum einen sind die Planungen oftmals als Sammlung zu verstehen: Alles das, was in den Kommunen sowieso geplant oder umgesetzt worden war, wurde aufgelistet (teilweise auch noch Jahre zurückgehend, ein besonderes Beispiel stellt etwa der Luftreinhalte- und Aktionsplan für Dres-



den aus dem Jahr 2008 dar, in dem u. a. Maßnahmen aus den Jahren 1990 (!) als Beleg für die aktuelle Luftreinhaltungspolitik der Stadt aufgezählt werden). Die Sammlung der Maßnahmen umfasste oftmals auch Maßnahmen, die erkennbar ohne signifikanten Effekt bleiben mussten (etwa den Aufruf an die Bauunternehmen, bei Sandablagerungen an Baustellen möglichst wenig Staub zu verursachen, Straßenwäsche usw.). Eine Reihe von Maßnahmen dürfte eher einen kontraproduktiven Effekt gehabt haben, weil damit zwar statische Reduktionseffekte erwartet wurden, die dynamische Reaktion der Verkehrsteilnehmer aber eine Verkehrs- und auch eine Emissionszunahme realistischer erscheinen lassen (sog. „Konzepte zur Vermeidung von Haltevorgängen an Lichtsignalanlagen“ dürften in den meisten Fällen eine Attraktivierung des motorisierten Individualverkehrs (MIV) mit anschließender Emissionserhöhung zur Folge gehabt haben).

- b. Zum zweiten könnte es sein, dass nicht überall (in allen Dienststellen) mit der gleichen Hartnäckigkeit an der Umsetzung der Maßnahmen gearbeitet worden ist. Es gibt Kommunen, in der z. B. für die Umsetzung der Maßnahmen keinerlei Budget bereitgestellt wurde; alle Maßnahmen seien „im laufenden Betrieb aus dem laufenden Etat“ zu realisieren. Dass damit bei der bekannten Finanzmittelknappheit in den Kommunen eine nur sehr allmähliche, eventuell auch nur scheinbare Umsetzung der Maßnahmen einhergehen könnte, liegt auf der Hand.
- c. Zum dritten drängt sich der Eindruck auf, dass in speziellen Fällen (etwa bei großem Widerstand der verkehrlichen Interessenvertreter oder des Stadtrates oder der Kommunalaufsicht) die Aufstellung eines solchen Planes zumindest teilweise als Nachweis für das eigene Handeln verstanden wurde. Hierbei sind in Einzelfällen auch kuriose Entwicklungen beobachtet worden, in Dresden etwa wurde der Plan einer Umweltzone vom Baubürgermeister bzw. den zuständigen Gremien verworfen, weil selbst bei Einrichtung einer größeren Umweltzone die Einhaltung u. a. der gesetzlichen Werte nicht möglich geworden wäre. Zwar war unstrittig, dass man sich mit der Maßnahme in Richtung „Einhaltung der Grenzwerte“ bewegt hätte, aber in Rücksprache mit den zuständigen Landesbehörden entschied man sich dann, gleich ganz auf die diskutierte Maßnahme zu verzichten, weil man damit keinen vollständigen Erfolg erzielen kann⁵.

(5) Um nicht missverstanden zu werden: Ganz sicher ist die überwiegende Zahl der Planungen zur Einhaltung der Luftqualitäts Grenzwerte von hoher fachlicher

⁵ Nur am Rande sei erwähnt, dass dies auch in der Bevölkerung zu Unverständnis und dynamisch zu gesellschaftlichem Fehlverhalten führen kann: Wenn das Beispiel Schule machen würde, dass man besser gar nichts tut, wenn man eine gesetzliche Regelung nicht vollständig erfüllen kann, sind „kreative Reaktionen“ der Bevölkerung vorprogrammiert.



Kompetenz und dem ehrlichen Anliegen geprägt, rasch deutliche Emissionsreduktionen zu erzielen. Der Verkehrssektor ist allerdings vor allem von dynamischen Reaktionen vieler Nutzer geprägt, und auch aus politischer Sicht ist nicht alles realisierbar, was zur Reduktion der Emissionen beitragen könnte. Der zwangsläufig entstehende Kompromiss ist also immer konfliktbeladen; möglicherweise wird bei der Kompromissuche auch oft auf Zeit gespielt, vielleicht in der Hoffnung, die Fahrzeugtechnik werde rasch so große Fortschritte machen, dass sich das Problem von selbst erledigt (siehe dazu auch Kapitel 2.5).

2.3 Treibhauswirkungen des Verkehrs (CO₂ und andere)

In diesem Abschnitt werden Hintergründe und Anforderungen an die Reduktion des fossilen Energieverbrauchs im Verkehr zusammengestellt. Es bleibt festzuhalten, dass ohne jede Frage die Fahrzeuge des motorisierten Individualverkehrs (MIV) kleiner, leichter, sparsamer, sauberer und effizienter hergestellt und betrieben werden müssen. Parallel ist die Reduktion der insgesamt zurückgelegten Fahrzeugkilometer geboten.

- (1) Der Verkehrssektor weist mit Blick auf das Kyoto-Protokoll die schlechteste Entwicklung aller Emissionsbereiche auf und gefährdet die Erreichung der dortigen Ziele insgesamt. Während andere Sektoren ihre CO₂-Emissionen im gleichen Zeitraum reduzierten, stiegen die CO₂-Emissionen aus dem Verkehrsbereich der EU im Zeitraum von 1990 bis 2005 um 32 % [TE_10/2007]. Direkt (nur Kraftstoffverbrennung) ist der Verkehr damit für ca. 19 % (Bezugsjahr 2006) der gesamten anthropogenen CO₂-Emissionen der EU verantwortlich, wobei indirekte Emissionen, Vorläuferketten sowie die Emissionen von Seeschiffen und Flugzeugen außerhalb der Ländergrenzen hinzuzunehmen wären [UBA_2006].
- (2) Bereits im Rahmen der Arbeiten zur ersten bzw. zweiten Klimaschutz- Enquete-Kommission des deutschen Bundestages war durchgängig als Ziel formuliert worden, dass bis zum Jahr 2050 die Treibhausgas-Emissionen (THG) der Industrieländer um größenordnungsmäßig 80 % (bzw. auch 80 bis 90 %) zu reduzieren seien. Der Verkehrsbereich ist dabei selbstverständlich einbezogen. Der Wissenschaftliche Beirat „Globale Umweltveränderungen“ hat Anfang September 2009 dies noch mal bestätigt: Bis etwa 2050 haben sich die Industrieländer etwa auf eine Tonne CO₂ je Person und Jahr einzustellen. Diesem Wert entsprechen ca. 400 Liter Erdöl, für alle Verwendungsbereiche.
- (3) Für den Verkehrsbereich (in Städten, aber auch für Fernverkehr, Flugzeuge und Schiffe) übersetzt sich dies in drastische Reduktionen des fossilen Energieverbrauchs im Verkehr: Während heute im Durchschnitt über 1000 Liter Kraftstoff je Person und Jahr für Verkehr verbraucht werden, könnten dies künf-



tig noch größenordnungsmäßig 100 Liter, vielleicht 150 Liter sein: Dies aber würde eine andere Verkehrswelt, andere Fahrzeuge, andere Landnutzungen und Stadtstrukturen und andere Verhaltensweisen der Bevölkerung unumgänglich bedingen

- (4) Im August 2007 hat das Bundeskabinett Eckpunkte für ein integriertes Energie- und Klimaprogramm beschlossen. Im Gesamtziel wird angestrebt, den CO₂-Ausstoß in Deutschland bis 2020 um 40 Prozent zu senken. Entsprechende Maßnahmen betreffen alle Verursacherbereiche, auch im Verkehrsbereich bestehen beträchtliche Minderungspotentiale. In wiefern Kommunen dazu herangezogen werden dürften, ist derzeit völlig unklar: Langfristig ist aber auch hier davon auszugehen, dass CO₂-Emissionen kontingentiert werden und damit auch Verkehrsnutzern nur noch ein bestimmtes CO₂-Kontingent zugestanden werden wird. Für die Städte würde dies gravierende Änderungen mit sich bringen.
- (5) Zur Reduktion der Fahrzeugemissionen (in g/km) von Treibhausgasen wurde in der EU auf „freiwillige Selbstverpflichtungen“ gesetzt, die aber leider (zu hören ist auch: „wie vorhersehbar“) nicht eingehalten wurden. Nun plant die Europäische Kommission, die durchschnittlichen CO₂-Emissionen neuer Pkw in der EU bis 2015 auf 120 g CO₂/km zu reduzieren⁶, wobei hierzu auch Biokraftstoffe, verbesserte Reifen und verschiedene andere Maßnahmen mit in Summe 10 g CO₂/km angerechnet werden, sodass am Fahrzeug selbst ein Ziel von 130 g CO₂/km erreicht werden soll. Der für ein konkretes Fahrzeug zulässige CO₂-Emissionwert in g/km im Neuen Europäischen Fahrzyklus NEFZ wird dabei in Abhängigkeit der Fahrzeugmasse berechnet (siehe Abbildung 1).

⁶ Die Autoindustrie muss den Durchschnitts-Grenzwert 130 Gramm CO₂ pro Kilometer für Neuwagen 2015 voll erreichen. 2012 müssen 65 Prozent der Neuwagen eines Herstellers das Ziel erreichen. 2013 sollen es 75 Prozent sein und 2014 dann 80 Prozent.

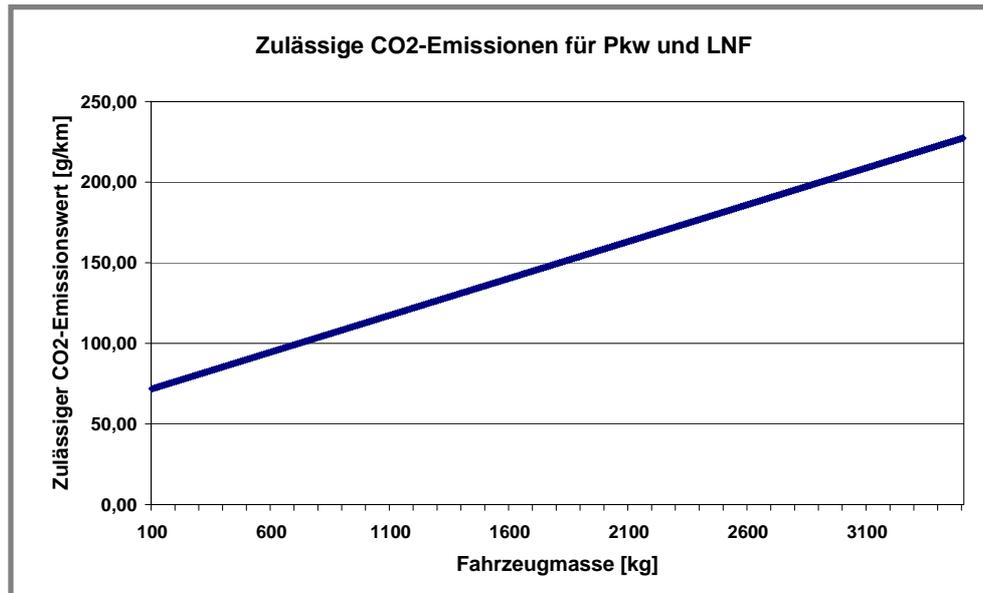


Abbildung 1: CO₂-Grenzwert für Neuwagen nach [VEG_443/2009]

- (6) Jeder Hersteller, der in der Summe seiner Neuzulassungen je Jahr höhere spezifische Emissionen hat als die Summe der maximal erlaubten Emissionswerte, hat je überschrittenem Gramm CO₂ je Kilometer einen Strafbetrag an die Kommission zu entrichten. Von 2012 bis 2018 beträgt der Strafbetrag 5 Euro für ein Gramm CO₂ zuviel, 15 Euro für zwei Gramm CO₂ zuviel, 25 Euro für drei Gramm CO₂ zuviel, 95 Euro für jedes weitere Gramm zuviel. Ab 2019 ist eine Strafe von 95 Euro bereits ab dem ersten Gramm fällig [VEG_443/2009].
- (7) Dass diese Grenzwertsetzung in Abhängigkeit von der Masse erfolgt, ist aus ökonomischer und ökologischer Sicht in keiner Weise nachvollziehbar. Diese von der Fahrzeugmasse abhängigen CO₂-Emissionswerte dürften bei den Fahrzeugherstellern dazu führen, dass betriebswirtschaftliche Überlegungen oftmals nicht mit Klimaschutzpolitisch sinnvollen Fahrzeugen übereinstimmen [UBA_08/2008]. Konkret bedeutet dies, dass alle Maßnahmen am Fahrzeug, die zu einer Veränderung der Fahrzeugmasse führen gleichzeitig den zulässigen CO₂-Emissionswert dieses Fahrzeugs und damit verbunden die Höhe möglicher Strafzahlungen beeinflussen. Aus Sicht des Herstellers sind diese Veränderungen einzupreisen, bestehende Minderungsoptionen und Fahrzeugkonzepte sind unter betriebswirtschaftlichem Blickwinkel zu bewerten, damit werden gewichtssteigernde Maßnahmen relativ günstiger, Leichtbaumaßnahmen hingegen teurer. Das UBA nennt dafür das folgende Beispiel:

„Z. B. könnte ein Pkw mittlerer Größe durch die Maßnahme „5 % Gewichtsreduktion“ ca. 70 kg leichter werden⁷. Der gemäß Vorschlag für diesen Pkw maximal erlaubte Emissionswert sänke zugleich um 3,2 g/km. Erwägt der Hersteller Leichtbaumaßnahmen, wird er den Kos-

⁷ Das durchschnittliche Leergewicht aller 2006 in Deutschland neu zugelassenen Pkw liegt nach eigenen Berechnungen bei ca. 1.392 kg.



tensatz für die Strafzahlung einkalkulieren. Er wird solche Maßnahmen nur dann realisieren, wenn sie zusätzlich diese Strafzahlungen aufwiegen. Für 2012 liegt der Kostensatz bei 20 €/gCO₂/km). Daraus ergäbe sich für den Hersteller eine zusätzliche Belastung von 64 €, die er zu den Kosten der technischen Maßnahme von 80 € addieren müsste⁷. Eine Gewichtsreduktion um 5 % „kostet“ den Hersteller 2012 in diesem Beispiel ca. 144 €“ [UBA_08/2008]. Damit aber wird der eigentlich grundsätzlich zu gehende Weg des sog. Downsizing (leichtere, weniger schnelle, weniger starke Fahrzeuge) nur noch erschwert.

- (8) Neben den direkten, dem Kraftstoffverbrauch proportionalen Treibhausgasemissionen sind für Klimaschutzanstrengungen auch alle Emissionen aus Bereitstellung, Instandhaltung und Recycling von Fahrzeugen, notwendigen Prozessen und Verkehrsinfrastrukturen dem Verkehrsbereich zuzuordnen. „Top-down-Analysen“ [Borken_2008] der Energie und Stoffflüsse im Verkehrsbereich zeigen, dass diese Emissionen bisher deutlich unterschätzt wurden und für heutige Pkw mit zusätzlich ca. 50 % ihrer direkten⁸ Treibhausgasemissionen einzubeziehen sind. Mit abnehmendem Kraftstoffverbrauch der Fahrzeuge werden diese indirekten Emissionen sowohl absolut⁹ als auch relativ¹⁰ weiter an Bedeutung gewinnen. Insgesamt bedeutet dies: Die für Herstellung, Betrieb und Entsorgung von Fahrzeugen insgesamt aufzuwendenden fossilen Energien sind um Größenordnungen zu hoch. Um die Verbräuche deutlich zu senken, müssen die Fahrzeuge leichter, kleiner, sparsamer, sauberer und effizienter werden: und es sind die Fahrleistungen insgesamt zu reduzieren.
- (9) Die bisherige Klimaschutzdiskussion konzentriert sich im Verkehrsbereich fast ausschließlich auf CO₂. Mit zunehmender Verbreitung biogener Kraftstoffe sind auch Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) sowie im Flugverkehr Wasserdampf- und NO_x-Emissionen zu berücksichtigen. Die Diskussion um die Bedeutung vom Verkehr emittierter Partikel¹¹ sowie die Ozonvorläufersubstanzen für das Treibhauspotential verkehrlicher Emissionen ist vergleichsweise neu; sie wird bisher fast ausschließlich von Wissenschaftlern geführt. Künftig ist auch auf kommunaler Ebene dazu eine Debatte zu erwarten. Insbesondere dann, wenn Treibhauswirkungen von Verkehrsträgern sowie entsprechende Minderungsmaßnahmen für kurz- und mittelfristige Zeithorizonte¹² bewertet werden, sind die Partikelemissionen und die Ozonbildung zwingend einzubeziehen, sie können für kurze Zeithorizonte die Treibhauswirkungen des Verkehrs dominieren (vgl. [Berntsen_12/2008]).

⁸ Nur Emissionen aus der Kraftstoffverbrennung

⁹ Bspw. in Folge erhöhten Herstellungsaufwands für Leichtbau, Hybridisierung etc.

¹⁰ Sinkender Kraftstoffverbrauch führt zu einer Erhöhung des prozentualen Anteils aller anderen Emissionen.

¹¹ Von Bedeutung sind hier in erster Linie black carbon (Ruß) mit seinem sehr hohen positiven Treibhauspotential und Schwefeldioxid mit seiner kühlenden Wirkung.

¹² kurzfristig - Zeithorizont von wenigen Jahren; mittelfristig – wenige Jahrzehnte

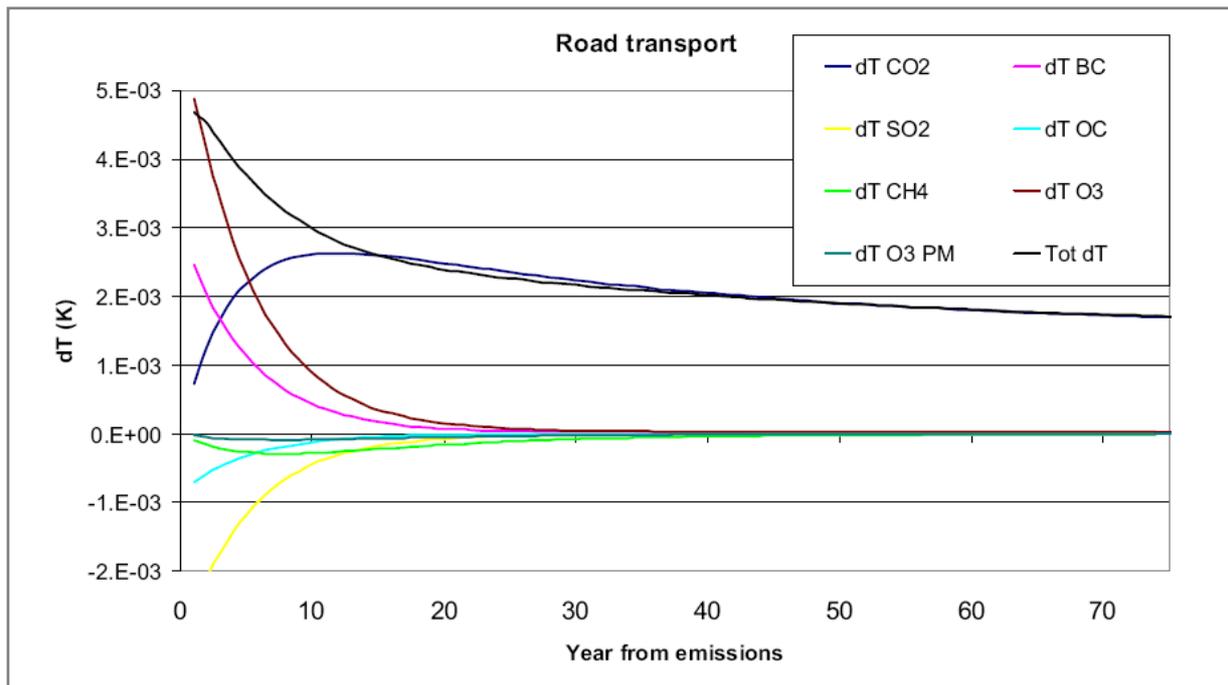


Abbildung 2: Veränderung der globalen Durchschnittstemperatur über der Zeit und Beiträge ausgewählter Emissionen nach einem Einjahres-Emissionsimpuls in Höhe der globalen Emissionen des Straßenverkehrs [Berntsen_12/2008]

(10) Die Abbildung zeigt den zeitlichen Verlauf des Treibhauseffekts, der durch die Emissionen eines (!) Jahres des globalen Straßenverkehrs insgesamt und langfristig verursacht wird¹³. Es werden sowohl der Gesamteffekt als auch die Effekte der Treibhausgase (CO_2 , SO_2 , CH_4 , Ozon, Ruß (BC) und organischer Kohlenstoff (OC)) einzeln dargestellt. Die dunkelblaue Kurve zeigt den Temperaturverlauf, der durch CO_2 alleine verursacht würde, die schwarze Kurve zeigt den Gesamteffekt. Aus der Abbildung lassen sich folgende Aussagen ableiten:

- In den ersten Jahren ist der Gesamteffekt deutlich größer als der CO_2 -bedingte Treibhauseffekt.
- Durch den Straßenverkehr werden sowohl kühlende als auch erwärmend wirkende Substanzen freigesetzt.
- Bei Betrachtung der Emissionen nur eines Jahres (Darstellung in der Abbildung) wird die Erwärmung während der ersten Jahre deutlich durch den Effekt kurzlebiger Treibhausgase wie Ozon und Ruß dominiert.

¹³ Kurven oberhalb 0E+00K stehen für eine Temperaturerhöhung, Werte unterhalb 0E+00K für einen kühlenden Effekt.



- d. Werden alle bisherigen Emissionen des Straßenverkehrs zeitlich überlagert, ergibt sich für das Jahr 2009 bei Vernachlässigung der Aerosole eine Unterschätzung des Treibhauseffekts von ca. 20 %.
- (11) Damit aber kann bezogen auf alle Anstrengungen zur Minderung von CO₂-Emissionen derzeit geschlossen werden, dass sich die fast ausschließlich auf die Emissionen von Fahrzeugen im Typprüfzyklus bezogenen Grenzwerte von 120 g/km bzw. 130 g/km aus allen genannten Gründen und Wirkungsrichtungen ohne durchschlagende Wirkung in der Praxis bleiben werden, zumal die Fahrleistung nirgendwo begrenzt oder einbezogen wird. Langfristig löst dieser Ansatz die Probleme also nicht, sondern verschiebt sie und verschärft sie nur. Gefordert sind aber drastische Senkungen bzw. Veränderungen der Konzepte; die aktuellen Bemühungen werden dies nicht erreichen können. Wir rechnen deshalb damit, dass die Fehlentwicklungen zu gegebener Zeit offenkundig und politisch relevant werden. Dann würden einerseits plötzlich durchgreifende Maßnahmen möglich werden, diese müssten andererseits aber auch sofort und drastisch umgesetzt werden müssen. Dies wird auch den CO₂-Ausstoss des städtischen Verkehrs betreffen.
- (12) Würde das geschehen, dann würde CO₂ in einem noch festzulegenden Bereich und unter noch erst zu erahnenden Rahmenbedingungen kontingentiert werden, etwa je Einwohner und Jahr oder je Stadt und Jahr. Diese Kontingente könnten selbstverständlich auch gehandelt werden. Dennoch ist davon auszugehen, dass sich für eine Stadt dann gänzlich andere Raumstrukturen, Modal-Split-Ergebnisse, Verkehrsverhaltensweisen, Fahrzeuge und Infrastrukturen ergeben wird. Zur Erleichterung der Anpassung schlagen wir deshalb vor, schon heute darauf Bezug zu nehmen.
- (13) In den weiteren Abschnitten dieser Analyse werden wir deshalb dem Problem der Luftreinhaltung Priorität einräumen, das Problemfeld CO₂ aber immer im Auge behalten. Lösungen, die die Verkehrsemissionen auf ein verträgliches Maß senken sollen, müssen auch bezogen auf CO₂ zielführend sein. Glücklicherweise sind beide Zielstellungen kompatibel, was dem einen Bereich hilft, dürfte auch dem anderen Bereich nicht schaden können. Allerdings steht damit die uns allen lieb gewordene Struktur des Verkehrs insgesamt zur Disposition, auf die im folgenden Abschnitt eingegangen wird.



2.4 Verkehrliche Aspekte

In der Vergangenheit wuchsen Verkehrsmengen und Fahrleistungen stetig an, und auch Prognosen der Fachministerien gehen von weiteren Steigerungen aus. Diese Planungsgrundlage halten wir aus vielerlei Gründen für falsch, wir gehen langfristig von sinkenden Fahrleistungen aus, was Luftreinhalteanstrengungen teilweise erleichtern dürfte. Die Reduktionen reichen aber nicht aus, um autonom die Einhaltung der Immissionsgrenzwerte zu sichern.

Deshalb sind neben Technikanstrengungen deutliche Verringerungen der Fahrleistungen notwendig. Das Ziel, die Fahrleistungen zu senken, wird in Medien, Bevölkerung und Politik aber mit „Mobilitätsverzicht“ gleichgesetzt.

Dem ist nicht so. Mobilität und Verkehr sind zwei grundsätzlich zu trennende Begriffe. Mobilität steht für Bedürfnisse der Menschen, Verkehr steht für die Umsetzung durch Instrumente wie z. B. Fahrzeuge. Man kann „viel Mobilität mit wenig Verkehr haben“ oder eben auch „Viel Verkehr für wenig Mobilität“. Zur Erleichterung der Kommunikation von Luftreinhalteanstrengungen wird gefordert, künftig immer zwischen Mobilität (dem Ziel) und „Verkehr (dem Instrument) zu unterscheiden. Alle Maßnahmevorschläge sind so zu kommunizieren, dass Ängste und Widerstände der Bevölkerung minimiert werden: „Wir sichern Ihre Mobilität, auch langfristig: Und dazu ist übrigens der Verkehr zu reduzieren, das ist auch im Interesse der Wirtschaft und der Bevölkerung.“

- (1) Maßnahmen im Verkehrsbereich sind sensibel. Bei allen Maßnahmen zur Verringerung der Verkehrsemissionen sind die „verkehrlichen Interessen“ der Beteiligten mit zu berücksichtigen. Jede Maßnahme, die irgendwie in das Verkehrsverhalten oder in die Verkehrsroutinen der Einwohner eingreift, wird sicherlich immer von einigen oder allen Betroffenen zunächst als „Begrenzung ihrer Mobilität“ interpretiert und folgerichtig abgelehnt werden. Deshalb ist bei Luftreinhaltemaßnahmen im Verkehr besondere Vorsicht geboten, denn selbst juristisch wird oftmals mit den „unabweisbaren Mobilitätsbedürfnissen“ argumentiert, gegen die Luftreinhaltemaßnahmen abzuwägen seien: Ganz so, als bestünde hier ein Widerspruch, man könne nur das eine oder das andere haben. Stattdessen ist strenggenommen das Gegenteil der Fall: Langfristig und dynamisch ist eine befriedigende Deckung der (Mobilitäts-) Bedürfnisse der Bevölkerung nur bei lebenswerten Umweltbedingungen möglich, und erst wenn die Bedürfnisse „angenehm“ und effizient (in der Nähe) befriedigt werden können, kann Verkehr so gestaltet werden, dass keine Umweltgefahren mehr davon ausgehen.



- (2) Derzeit wird aber sowohl in der Verwaltung, in Ministerien, in Gerichten und in weiten Teilen der Bevölkerung davon ausgegangen, dass Verkehr und Mobilität das selbe seien und dass Verkehr in keinem Falle beschränkt, reduziert, verteuert oder sonst wie de-attraktiviert werden dürfte, weil dies dem „Einsperren der Bevölkerung“ gleichkäme. In dieser Argumentation werden aber „Mobilitätsbedürfnissen“ mit „Verkehr“ gleichgesetzt.
- (3) Eine solche Gleichsetzung ist sachlich falsch, denn es handelt sich bei Verkehr und Mobilität um zwei völlig verschiedene Begriffe. Stattdessen kann man das Begriffspaar „Mobilität/Verkehr“ eher mit den Begriffspaaren „Output/Input“, „Ertrag/Aufwand“ oder „Nutzen/Kosten“ gleichsetzen: Mobilität bzw. Output bzw. Ertrag bzw. Nutzen ist das, was wir von unseren Handlungen an Positivem erhoffen. „Verkehr“ bzw. „Input“ oder „Aufwand“ oder „Kosten“ sind die Bereiche, die wir zwar für das Erreichen des Positiven aufwenden müssen, die wir aber reduzieren bzw. minimieren wollen.

Deshalb sollte in allen Vorschlägen, Dokumenten und Maßnahmen immer eine saubere Trennung zwischen beiden Begriffen erfolgen: „Verkehr“ ist etwas anderes als „Mobilität“. Die Mobilitätsbedürfnisse der Einwohner (das sind: Ortsveränderungen zur Deckung der Bedürfnisse von Menschen, etwa der Einkauf von Lebensmitteln, der Besuch des Arztes, der Besuch von Freunden, Aufsuchen der Arbeitsstelle, von Apotheken usw.) sind tatsächlich nicht diskutabel: Hier geht es um den menschlichen Aspekt, und Städte haben dafür zu sorgen, dass die Mobilitätsbedürfnisse von Menschen abgedeckt werden. Städte sollen allerdings auch ermöglichen, dass diese effizient umgesetzt werden. Geht man auf die Seite der Fahrzeuge, also auf die Instrumente für Mobilität über, dann sollen die dort eingesetzten Ressourcen, Energiemengen, Flächen, Umweltbelastungen etc. minimal gehalten werden, „Verkehr ist das Instrument und soll minimiert werden“. Der Begriff „Verkehr“ steht also nur für die Umsetzungsseite, für die Instrumente; er umfasst Fahrzeuge, Straßen, Schienen, Lichtsignalanlagen, Benzin, Abgase usw. Über allen Luftreinhalte- bzw. Klimaschutzkonzepten sollte deshalb stehen, dass damit die Mobilität nicht gefährdet wird, sondern sogar langfristig gesichert wird. Dazu ist „übrigens“ eine Reduktion des Verkehrs und der Verkehrsaufwände für alle sinnvoll und erwünscht.

- (4) Generell ist es möglich, Städte so zu bauen und zu organisieren, dass viel Mobilität mit wenig Verkehr möglich ist (nahräumliche Nutzenmischung, Rad- und Fußverkehrsattraktivierung, ÖV-Systeme, viele Bedürfnisse in der Nähe abdeckbar). Dies wäre klima- und luftqualitätsfreundlich. Es ist aber auch möglich, Städte dispers, weitläufig, funktionsgetrennt usw. zu gestalten (Los Angeles, Perth); dann sind für jedes Mobilitätsbedürfnis große Entfernungen, Ressourcen, Kosten, Umweltbelastungen zu tragen. Richtig verstanden sichert jedes Verkehrs-Reduktionsszenario Mobilität: denn künftig werden sich die Rahmen-



bedingungen für schnellen, weiten Verkehr verteuern bzw. verschlechtern. Städte, die dann Mobilitätsbedürfnisse in der Nähe befriedigen könne (noch dazu ohne Erdöl, billig, leise, sicher und in sauberer Luft) sind dann im Vorteil.

- (5) Im Gegensatz zu der beschreibenden Maxime „Sicherung der Mobilität mit weniger Verkehr“ setzen weite Teile der Gesellschaft und der Verwaltung immer noch auf die Attraktivierung von Verkehr, auf schnellere Strukturen, mehr Parkplätze, Grüne Wellen, Zersiedelung usw. Damit steigen zwingend die einzusetzenden Ressourcen und Aufwände, also auch Fahrzeugkilometer, Energieverbräuche, CO₂-Emissionen, Lärm und Abgasemissionen. Diese negativen Folgeerscheinungen versucht die traditionelle Argumentationslinie mit technischen Verbesserungen zu bekämpfen; in vielen Planungen der Länder bzw. auch im Bundesverkehrswegeplan lautet die Maxime „Verkehr soll und muss und wird wachsen, aber die Technik soll dafür sorgen, dass die Umweltbelastung sinkt!“. Diese Strategie hatte zu Beginn der Umweltschutzbemühungen Sinn, ist aber langfristig zum Scheitern verurteilt, denn die technischen Reduktionsbemühungen werden langfristig immer teurer, schwieriger, ineffizienter und aufwändiger. Dennoch muss sich Luftreinhaltung-, Lärminderungs- und Klimaschutzpolitik mit diesem „Verkehrswachstumsdogma“ auseinander setzen.
- (6) Für die Praxis lassen sich daraus zwei Schlussfolgerungen ziehen:
- a. Die Vorgaben verkehrsplanerischer bzw. verkehrspolitischer Institutionen gehen oftmals von Verkehrswachstum aus. Diese Vorgaben sind unter den aktuellen Bedingungen (Energiepreise, Demographie, Steuereinnahmen, usw.) zu hinterfragen bzw. es ist dafür Sorge zu tragen, dass keine Entscheidungen fallen, die diese Verkehrszunahme erst ermöglichen oder noch verstärken (Ausbau von Straßeninfrastruktur, um „für die Zukunft gerüstet zu sein“, sorgt erst dafür, dass Verkehr zunimmt, der dann auch diese Infrastruktur benötigt).
 - b. Parallel sind Instrumente zu entwickeln, die die zu erwartende Fokussierung auf effiziente und damit kurze (Nah-) Mobilität aufnehmen bzw. fördern. Alle Maßnahmen in Umweltplanungen sind zu begrüßen, die die nahen, langsameren, umweltfreundlicheren Verhaltensweisen und Verkehrsmittel attraktivieren, die energieaufwändigeren, umweltbelastenden Verhaltensweisen und Fahrzeuge aber de-attraktivieren.
- (7) Selbstverständlich ist es nicht möglich, im Rahmen dieser Analyse eine Prognose der künftigen Verkehrsentwicklungen in Städten zu geben. Die folgenden Gedankensplitter sollen aber die Möglichkeit bieten, eigene Gedanken und Arbeiten anzustoßen:



- a. Im BMVBS wird derzeit, siehe etwa die Verkehrsverflechtungsprognose 2025 [BMVBS/2008]¹⁴, weiter davon ausgegangen, dass Verkehr wachsen wird. Angenommen wird dort ein Wachstum für die Verkehrsleistung des Personenverkehrs bis 2025 um 17,9 %, für die des Güterverkehrs um 74 %. Dazu wurde angenommen, dass in jedem Jahr bis 2025 die realen Haushaltseinkommen um 1,8 %, die realen Kosten des Verkehrs aber nur um 1 % ansteigen. Der Erdölpreis wird in einem Rahmen zwischen ca. 35 US\$ je Barrel und 40 US\$ je Barrel gesehen. Unter diesen Annahmen (Bevölkerungszahl sinkt von 2004 bis 2025 nur um insgesamt 1 %, Erdöl halbiert sich im Preis von heute bis 2025, alle verdienen im Jahr 2025 45 % mehr als heute, aber die Verkehrsnutzerkosten steigen in diesem Zeitraum nur um 23 %) ergibt sich dann natürlich auch das beschriebene Wachstum.
- b. Eine Vielzahl anderer Arbeiten unterstellt demgegenüber vollkommen andere Zukunftsentwicklungen. Dies betrifft zum Beispiel die demographische Entwicklung (hier können die Städte die Entwicklung selbst am besten einschätzen), zum zweiten die Entwicklung der Erdölpreise (in den Prognosen etwa der Internationalen Energieagentur werden etwa Werte von 150 bis 200 US\$ je Barrel genannt), die Entwicklung der Haushaltseinkommen, die Entwicklung der Steuerquote, die Entwicklung der frei verfügbaren Haushaltseinkommen (Steuererhöhungen ab 2009, Gesundheitskosten usw.) und andere Größen. Bereits daraus ergibt sich ein anderes Gesamtbild.
- c. Schließlich sind auch noch derzeit wenig sichere Ergebnisse einzubeziehen: Es ist etwa (siehe Flugverkehr) zu erwarten, dass auch im Verkehr irgendwann Emissionszertifikate zu bezahlen sind bzw. für THG-Emissionen andere Kontingentierungen bzw. Preiserhöhungen eintreten. Es ist zu erwarten, dass das Budget für Straßenbaumaßnahmen langfristig sinken muss; allein die Sicherung des Unterhaltungsaufwandes dürfte große Probleme verursachen. Es ist davon auszugehen, dass bei einer alternden Bevölkerung die Steuereinnahmen sinken und weniger Mittel für Verkehr bereitgestellt werden. Es ist davon auszugehen, dass die Gesundheitskosten steigen und damit weniger für Verkehr verfügbar wird. Es ist davon auszugehen, dass auch im Verkehr Nutzerfinanzierungen in größerem Umfang realisiert werden. All dies wird die Verkehrsleistung insgesamt senken (bitte beachten: Die Mobilität ist sicherzustellen!); also werden damit automatisch alle Maßnahmen sinnvoller und zielführender, die nahräumliche, umweltfreundliche und langsame Verkehrsträger bevorzugen.
- d. Zweifellos ist auch die technische Entwicklung der Fahrzeuge dabei einzubeziehen; sie prägt das Umfeld. Dazu wird auch auf Kapitel 2.5 verwiesen.

¹⁴ Nähere Informationen sind auf der Internetseite des BMVBS unter <http://www.bmv.de/Verkehr/Mobilitaet-und-Technologie-,3018/Verkehrsprognose-2025.htm> erhältlich. Dort ist die Kurzfassung der „Verkehrsprognose 2025“ verfügbar; die Langfassung ist bei der Clearingstelle der DLR unter <http://daten.clearingstelle-verkehr.de/220/> erreichbar.



Allerdings ist derzeit keine Entwicklung absehbar (siehe dazu auch unten), die auf technischem Weg so durchschlagend wäre, dass die obigen Entwicklungen sich umkehren würden. Wie noch detailliert aufgezeigt wird, dürften alle diese wichtigen und förderungswürdigen technischen Verbesserungen nur ausreichen, die Gesamtentwicklungen abzumildern, aber nicht umzukehren.

- (8) Zu betonen ist nochmals, dass sich diese Tendenzen in den Kommunen unterschiedlich auswirken werden: Stuttgart ist beispielsweise anderen Entwicklungen unterworfen als Leipzig oder Magdeburg oder Dresden. Während Einwohnerzahl und Verkehrsleistung im Großraum Stuttgart noch steigen dürften, zeigen beispielsweise die Zahlenangaben für Ostdeutschland seit etwa der Jahrtausendwende deutlich sinkende Verkehrsmengen. Dies wird auch in den entsprechenden Erhebungen (Mobilität in Deutschland MiD des BMVBS bzw. System repräsentativer Verkehrsbefragungen SrV der TU Dresden und vieler deutscher Städte) als Trend bundesweit bestätigt.
- (9) Als Folgerung für die hier relevanten Fragen bleibt festzuhalten, dass die deutsche Gesellschaft bei Verkehrs- bzw. Mobilitätsfragen üblicherweise sehr sensibel reagiert. Dies muss in den Institutionen mitbedacht werden. Zukünftig wird es vor allem auf die folgenden Punkte ankommen:
- a. Zu keinem Zeitpunkt sollte als primäres Ziel des Handelns explizit die Einflussnahme auf den Verkehr bzw. die Reduktion des Verkehrs als Ziel in den Vordergrund gestellt werden. Stattdessen ist es im allgemeinen zielführender, zunächst den gegebenen Anlass (Umweltschäden bzw. Verbesserungen der Umweltsituation) primär zu kommunizieren.
 - b. Dann aber ist auf die durchgängige und strikte Trennung von Mobilität von Verkehr immer und überall zu achten. Die Bedeutung dieser sauberen Trennung darf nicht unterschätzt werden; kommunikativ ist die Trennung aber leicht durchsetzbar. Als günstig haben sich etwa folgende Formulierungen erwiesen

„Man kann eine Stadt mit viel Verkehr und wenig Mobilität haben, denken Sie etwa an Los Angeles: Für jedes Bedürfnis fahren Sie dort weit und lange. Man kann aber auch eine Stadt mit vielen befriedigten Mobilitätsbedürfnissen und wenig Verkehr haben, wenn nämlich alles in der Nähe ist und leicht und nah und zeitsparend erreichbar ist. Im zweiten Fall ist übrigens auch die Luft sauberer, und Sie sparen Geld! Ihre Mobilität werden wir Ihnen erhalten, sogar erleichtern, aber den Verkehr, der dazu benötigt wird, den wollen wir reduzieren.“
 - c. Strategisch kann sich die Verwaltung der Stadt damit auf die Position zurückziehen, dass die in jedem Fall Garant von Mobilität für die Bevölkerung sein will: Übrigens für alle Einwohner, und übrigens so, dass für alle



Mobilitätsbedürfnisse weniger Verkehr (Verkehrsaufwand) notwendig ist. Verkürzt könnte formuliert werden: „Bedürfnisgerechte Mobilität (für alle) mit weniger Verkehr“.

- d. Exakt diese Entwicklung hin zu weniger Verkehr (ergo zu geringeren Verkehrskosten) liegt eigentlich im ureigenen Interesse der Wirtschaft und der Einwohner, denn man spart dabei zweifach Geld: Einmal bei den Ressourcen (geringere Tankstellenrechnung), zum zweiten bei den Umweltschäden (geringere Steuerlast, niedrigere Krankenkassenbeiträge, Gesundheitskosten, usw.).
- e. Bezogen auf die künftige Entwicklung gehen Verkehrsministerien und andere Behörden oftmals noch von drastischen Zunahmen der Verkehrsmenge aus (wie könnten sie anders: Das prägte ihre Erfahrungen in der Vergangenheit). Solche Zunahmen mag es vereinzelt geben, zur Regel werden sie nicht werden. Stattdessen werden in allen plausiblen, dynamischen Szenarien (stark wachsende vielleicht Regionen ausgenommen) die Erdölpreise, die demographische Entwicklung, die Entwicklung der Steuereinnahmen, die Ausgaben der Haushalte für Gesundheit, die Raumstrukturen und andere Entwicklungen dafür sorgen, dass die gefahrenen Personenkilometer zurückgehen werden. In den Verkehrserhebungen sind diese Rückgänge übrigens spätestens seit Mitte dieses Jahrzehnts deutlich erkennbar.

2.5 Fahrzeugtechnik

Im folgenden werden die verschiedenen technischen Möglichkeiten zur Reduktion der Kraftstoffverbräuche und der Emissionen diskutiert.

Es bleibt festzuhalten, dass die künftigen Fahrzeuge des motorisierten Individualverkehrs (MIV) ohne jede Frage geringe spezifische Emissionen aufweisen können und werden. Die Bestandumschichtung erfolgt aber so, dass die Problematik zu hoher Luftschadstoffkonzentrationen zumindest in den nächsten fünf Jahren nicht gelöst werden kann. Fahrzeugtechnik allein reicht zur Lösung der hier diskutierten Probleme *nicht* aus; verkehrliche und verkehrsverhaltensbeeinflussende Maßnahmen müssen hinzukommen.

Elektro-, Hybrid- und andere Fahrzeuge sind zweifellos sinnvoll; ihnen allen wird allerdings aus technischen Gründen, wegen des höheren Preises und wegen den bescheidenen Bestandanteilen (unter 1 %) ebenfalls keine praktische Bedeutung für die Problemlösung zugemessen.

Insgesamt ist festzuhalten, dass technische Entwicklungen sinnvoll sind, die hier relevante Problematik aber nicht allein lösen können.



- (1) Erledigen sich die diskutierten Probleme nicht vielleicht von alleine? Reicht es Vielleicht aus, einfach auf die technische Weiterentwicklung der Fahrzeuge zu warten? In der Vergangenheit hat sich die Technik-Strategie als zielführend erwiesen; durch technische Weiterentwicklungen von Kraftstoffen, Motoren, Einspritzsystemen und Abgasnachbehandlungssystemen sind in den vergangenen Jahrzehnten bei Neuwagen sowohl mit Benzin- und Dieselmotoren als auch bei Erd- und Flüssiggasfahrzeugen teilweise deutliche Emissionsreduktionen erreicht und anspruchsvollere Emissionsstandards eingehalten worden. Dieser Befund betrifft alle on-road Fahrzeugkategorien sowie alle limitierten Luftschadstoffe mit Ausnahme von Stickstoffdioxid und von Partikeln aus Aufwirbelungsprozessen. Im folgenden Abschnitt sind deshalb die technischen Aspekte und Entwicklungsmöglichkeiten der Fahrzeuge zu diskutieren.
- (2) Diese Diskussion erfolgt vor allem deshalb, weil die technischen Emissionsparameter der Fahrzeuge derzeit weitgehend die Debatten zur Reduktion der Luftbelastung des Verkehrs prägen. Dahinter verbirgt sich (auch) die Hoffnung, dass das bisherige Verhaltens- und Entwicklungsmodell ohne Anpassungen weitergeführt werden kann, wenn es gelingt, durch technische Hilfsmittel bzw. Verbesserungen Fahrzeuge zu produzieren, die zum einen zwar alle heute beliebten Eigenschaften aufweisen (Höchstgeschwindigkeiten über 200 km/h, Motorisierungen über 100 kW, Gewichte im Bereich von 2 Tonnen, usw.), zum anderen aber praktisch ohne Emissionen und mit deutlich verringerten Kraftstoffverbräuchen auskommen. Wer in Kommunen über Luftreinhaltung diskutiert, muss deshalb auch über technische Details informiert sein.
- (3) Pauschal lässt sich also festhalten, dass die obige Hoffnung in der Vergangenheit durchaus in weiten Bereichen erfüllt werden konnte (z. B. beim geregelten Katalysator für Benzin-Fahrzeuge), dass dies aber insgesamt nicht ausreichen kann und wird. Schon aus physikalischen Gründen muss diese Hoffnung also enttäuscht werden: Fahrzeuge, die für Geschwindigkeiten über 200 km/h ausgelegt werden und 5 Sitzplätze plus Gepäckraum aufweisen wollen, benötigen eine bestimmte Motorgröße, ein bestimmtes Fahrzeuggewicht und adäquat dimensionierte Nebenanlagen und Bremsen ergo allein aus physikalischen Gründen eine bestimmte Kraftstoff- (Energie-) Menge. Gerade die CO₂-Problematik wird also hier langfristig sogar zum entscheidenden Kriterium: „Downsizing“ ist als Strategie langfristig unumgänglich.
- (4) Im Zentrum des folgenden Abschnitts stehen deshalb technische Minderungsoptionen am Fahrzeug sowie die Potentiale zukünftiger Kraftstoffe. Dabei werden der Stand und die zu erwartenden Entwicklungen in der Fahrzeugflotte für die kommenden Jahre (Zeithorizont etwa von 2010 bis 2020) skizziert. Die Diskussion erfolgt getrennt nach Antriebssystem (Verbrennungsmotor, Hybridantrieb, elektrischer Antrieb), eingesetzten Kraftstoffen (Diesel, Benzin, Erd- und Flüssiggas etc.) und verfügbaren Technologien zur Abgasnachbehandlung.



- (5) Bei der Bewertung der jeweiligen Minderungsstrategien ist generell zu beachten, dass manche der Maßnahmen auf alle Ziele einen positiven Einfluss haben, manche aber auch nur sektorspezifische Erfolge versprechen. So dürften beispielsweise einige der genannten Maßnahmen zwar deutliche Reduktionen der Partikelmasse, aber keine Minderung der Partikelanzahl und somit ggf. keine der Massereduktion adäquate Minderung der gesundheitlichen Partikelwirkungen erreichen können: Dies wäre dann also nur teilweise oder wenig zielführend.
- (6) Zu betonen ist noch, dass von Seiten der kommunalen Verwaltung zwar die technische Debatte aufgenommen werden muss, dass man sich aber keinesfalls darauf konzentrieren soll bzw. darauf einengen lassen soll. Im Rahmen der Luftreinhaltung bestehen durch andere Ansätze mindestens ebenso wirkungsvolle Einflussmöglichkeiten auf die Emissionshöhen und die zeitlichen/räumlichen Emissionsverteilungen etwa durch verkehrsplanerische, verkehrsorganisatorische und verkehrsverhaltensbeeinflussende Maßnahmen.

Fahrzeugbestand

- (1) Im deutschen Fahrzeugbestand sind heute sehr unterschiedliche Fahrzeug- und Antriebskonzepte vertreten. Sie unterscheiden sich mit Blick auf die mit ihrem Einsatz und ihrer Produktion verbundenen stofflichen und energetischen Aufwendung sowie hinsichtlich der genutzten Kraftstoffe und erforderlichen Infrastrukturen z. T. erheblich. Als Beispiele seien an dieser Stelle der Einsatz von Leichtbauwerkstoffen, Batterien und elektrische Antriebskomponenten in Hybridfahrzeugen oder der Einsatz von Biokraftstoffen oder Erdgas als Energieträger genannt.
- (2) Aus ökologischer Sicht führt dies dazu, dass dabei teilweise bedeutende stoffliche, zeitliche und räumliche Emissionsverlagerungen auftreten. Diese Emissionsverlagerungen (in die Vorkette, ins Kraftwerk, ins Ausland, in die Aluminiumhütte usw.) sind in Bewertungen zwingend zu berücksichtigen. Insbesondere mit Bezug auf die global wirkenden Emissionen klimaverändernder Stoffe ist deshalb der gesamte Lebensweg der Fahrzeuge, die für ihren Betrieb erforderliche Infrastruktur sowie die Bereitstellungskette der Kraftstoffe in Bilanzen und Bewertungen einzubeziehen.
- (3) Am 31.12.2008 waren in Deutschland 49,6 Millionen Kraftfahrzeuge zugelassen. Die Gesamtzulassungen verteilten sich wie folgt [KBA_01/2009]:
 - a. Pkw: 83,3 Prozent bzw. 41,3 Mio. Fahrzeuge:
 - 11,5 Millionen Pkw Kompaktklasse
 - 8,2 Millionen Pkw Kleinwagen
 - 8,3 Millionen Mittelklassewagen



- b. Nutzfahrzeuge¹⁵: 9,3 Prozent bzw. 4,3 Millionen Fahrzeuge, davon ca.
 - 75 270 Busse
 - 2 350 000 Lastkraftwagen
 - 177 000 Sattelzugmaschinen

- c. Krafträder 7,5 Prozent bzw. 3,7 Mio.

Das Gros aller zugelassenen Fahrzeuge (71 %) ist mit Ottomotoren ausgestattet, der Dieselanteil lag bei 29 %.

Analysiert man die Fahrzeuge mit alternativen Antrieben genauer, so zeigt sich sofort der eigentlich verschwindend geringe Anteil dieser Fahrzeuge. Insgesamt lag der Anteil aller Fahrzeuge mit alternativen Antrieben in Deutschland unter einem Prozent:

- a. Gasantrieb (Erdgas- bzw. Flüssiggas):
 - 367.000 Pkw, 1530 Busse, 18.669 Lkw, 126 Zugmaschinen
- b. Hybridfahrzeuge: 22.330 Pkw, 82 Busse, 69 Lkw, 75 Zugmaschinen
- c. Elektrofahrzeuge: 1.452 Pkw, 92 Busse, 872 Lkw, 147 Zugmaschinen
- d. Wasserstofffahrzeuge: 200 Pkw

Dieselfahrzeuge

- (1) Der Anteil der Dieselfahrzeuge an den in Deutschland für den Straßenverkehr zugelassenen Fahrzeugen lag zum 1. Januar 2009 in Summe bei fast 29 %. Im einzelnen waren

- 24,9 % der Pkw
- 98 % der Busse
- 93 % der Nutzfahrzeuge und
- nahezu 100 % der Sattelzugmaschinen

mit Dieselmotoren ausgestattet. Die Statistik der Dieselfahrzeuge zeigt sowohl bei den Nutzfahrzeugen als auch bei den Pkw zunehmende Zulassungszahlen¹⁶ gegenüber dem Vorjahr [KBA_01/2009a]. Das Gros der Dieselfahrzeuge wird mit Dieselmotoren mit einem Biodieselanteil von derzeit 5,65 Massenprozent¹⁷ betrieben. Darüber hinaus wurden 1,2 Mio. t reiner Biodiesel und 0,4 Mio. t Pflanzenöl vorwiegend in Dieselmotoren von Nutzfahrzeugen genutzt [AEE_2009].

- (2) Problemschadstoffe heutiger Dieselfahrzeuge mit Bezug zur Luftqualität sind vorrangig Partikel aller Größen und Massen, Stickoxide und Stickstoffdioxid. Während sowohl bei den direkten Partikel- (masse-) Emissionen als auch bei den Stickoxidemissionen in den vergangenen Jahren mit der Einführung neuer Grenzwertstufen deutliche Minderungen erreicht wurden, stiegen sowohl das

¹⁵ Summe aller als Lkw zugelassenen Fahrzeuge (Pkw, Kleintransporter, Baufahrzeuge, Sattelzugmaschinen etc.)

¹⁶ Pkw +244.385, Nutzfahrzeuge +23.294, Busse +107

¹⁷ Primärkraftstoffverbrauch in Deutschland: fossiler Diesel 28,3 Mio.t, Biodieselbeimischung 1,6 Mio.t [AEE_2009]



NO₂/NO-Verhältnis als auch die absoluten NO₂-Emissionen von Dieselfahrzeugen mit der Einführung katalytischer Abgasnachbehandlung¹⁸ deutlich an. Dieser Effekte war teilweise motortechnisch gewollt, um die Grenzwerte der anderen Schadstoffe einhalten zu können, teilweise werden die Abgasnachbehandlungssysteme so ausgelegt, dass die NO₂-Emissionen sich so entwickelten. Bei Dieselfahrzeugen ohne Abgasnachbehandlung wird ein NO₂-Anteil in den NO_x-Emissionen von ca. 3-8 % gemessen, bei heutigen Pkw mit katalytischer Abgasnachbehandlung¹⁹ liegt der NO₂-Anteil zwischen 30 % und 70 %, wobei starke Streuungen zwischen den Werten einer Emissionsklasse sichtbar werden. Die folgende Abbildung 3 zeigt die Verhältnisse für Pkw, Abbildung 4 zeigt sie für Schwere Nutzfahrzeuge [IFEU_2007; EMPA_2007; UBA_AT_2008].

- (3) Bei Pkw werden die höchsten NO₂-Anteile mit im Mittel 70 % (Innerortszyklus mit Warmstart) bzw. 40 % (Innerortszyklus mit Kaltstart) bei Fahrzeugen mit kontinuierlich arbeitenden Partikelfiltern gemessen (CRT-Systeme). Diese Werte sind, um es vorsichtig auszudrücken, überraschend hoch. Nutzfahrzeuge und Busse bis Euro 4 sind nur in wenigen Einzelfällen mit Oxidationskatalysatoren ausgestattet. Sie weisen entsprechend, solange keine katalytisch beschichteten Abgasnachbehandlungssysteme²⁰ integriert werden, keine erhöhten NO₂-Anteile auf. Bei Nutzung von Oxidationskatalysatoren, katalytisch beschichteten Partikelfilter oder etwa von PM-Katalysatoren werden wie auch bei Pkw signifikant erhöhte NO₂/NO-Verhältnisse gemessen. Der NO₂-Anteil steigt hier i. d. R. ebenfalls auf Werte von 40 % bis 60 %. Bei geringer Motorlast werden für schwere Nutzfahrzeuge die höchsten NO₂-Anteile beobachtet, diese liegen z. T. deutlich über den im Innerortszyklus ermittelten Werten (vgl. Abbildung 4, rechte Seite). In entsprechenden Fahrsituationen können folglich gegenüber dem Testzyklus stark erhöhte Emissionen auftreten [IFEU_2007].

¹⁸ Oxidationskatalysator und katalytisch beschichtete Partikelfiltersysteme führen unter Sauerstoffüberschuss generell zur verstärkten Bildung von NO₂.

¹⁹ Ab EURO I (1993) wurden die ersten Oxidationskatalysatoren in Diesel Pkw eingesetzt, ab EURO III sind sie fast flächendeckend mit Oxidationskatalysatoren ausgestattet.

²⁰ Bspw. Oxidationskatalysatoren und Partikelfilter

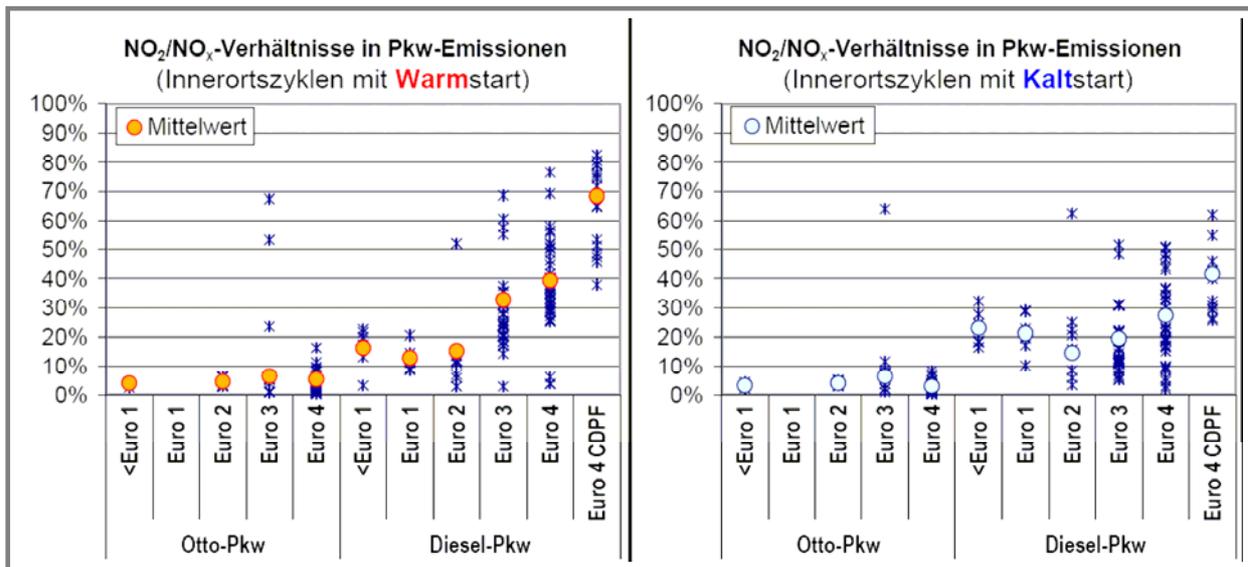


Abbildung 3: Gemessene NO_2/NO Verhältnisse für Pkw in städtischen Fahrsituationen [IFEU 2007]

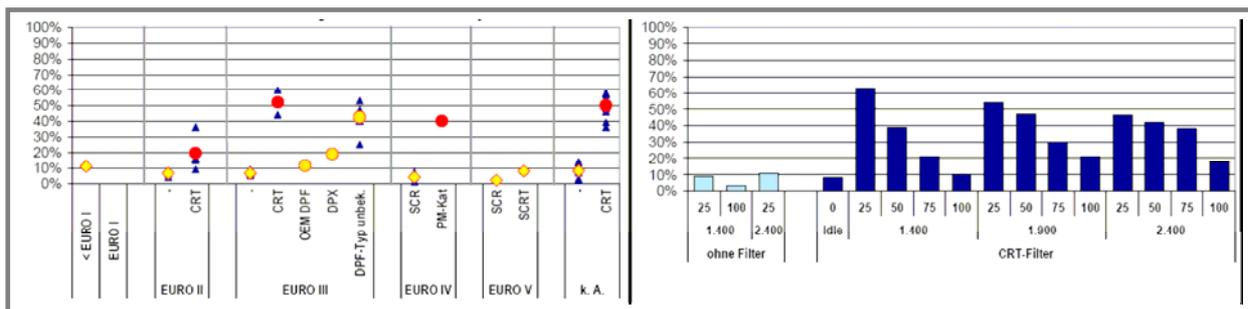


Abbildung 4: Im Innerorts-Testzyklus (links) sowie für ein SNF EURO II mit und ohne DPF in den einzelnen Teststufen des ESC gemessene NO_2/NO Verhältnisse

- (4) Mit Einführung der Grenzwertstufe Euro 5 und höher werden die direkten Partikel- (-masse-) Emissionen der Dieselfahrzeuge weiter reduziert, die Durchdringung der Flotte mit serienmäßig eingebauten Partikelfiltern wird weiter zunehmen. Mit der Grenzwertstufe Euro 6 werden für Pkw allerdings keine weiteren Minderungsquoten vorgegeben. im Nutzfahrzeugbereich erfolgt eine weitere Verschärfung der Grenzwerte vor allem im European Transient Cycle (ETC), der die dynamischen Belastungen widerspiegelt (vgl. Tabelle 4).
- (5) Hervorzuheben ist noch, dass ab der Grenzwertstufe Euro 6 für Abgaspartikel zusätzlich zum bestehenden massebezogenen Emissionswert erstmals ein Anzahlgrenzwert eingeführt wird. Dieser wird nach heutigem Kenntnisstand dann (ebenfalls) nur noch von Fahrzeugen mit Partikelfilter einzuhalten sein. Die zu erwartenden Auswirkungen von Partikelfiltern auf die Partikel- und Stickoxidemissionen werden nachfolgend diskutiert.



- (6) Sowohl für Pkw als auch für leichte und schwere Nutzfahrzeuge geben die Grenzwertstufen Euro 5 und Euro 6 weitere deutliche Reduktionen der im NEFZ zulässigen Stickoxidemissionen vor (vgl. Tabelle 6), für NO₂ wird es nach bisherigem Stand in keiner der beiden Grenzwertstufen einen Grenzwert geben.
- (7) Die Höhe des NO₂/NO Verhältnisses im Abgas wird weitgehend durch die eingesetzten Emissionsminderungs- bzw. Abgasnachbehandlungsstrategien zur Einhaltung der NO_x-Grenzwerte bestimmt. Für die Einhaltung der Grenzwertstufe Euro 5 werden von den Herstellern unterschiedliche Strategien²¹ verfolgt, mit Inkrafttreten der Euro 6 Abgasnorm wird i. a. davon ausgegangen, dass für leichte und schwere Nutzfahrzeuge der anspruchsvolle Grenzwert nur noch mit Hilfe von Stickstoffminderungssystemen²² eingehalten werden kann.
- (8) Thermodynamisch bedingt erreichen Dieselmotoren höhere Wirkungsgrade und entsprechend geringere Verbräuche als Ottomotoren. Ohne zielgerichtete Schadstoffminderungsmaßnahmen emittieren sie relativ zu vergleichbaren Ottomotoren jedoch etwa 8- bis 10-mal mehr Stickstoffoxide sowie bis zu 1000fach mehr Partikel [UBA_2003]. Emissionsmessungen an vergleichbaren Otto- und Diesel-Pkw²³ in städtischen Fahrzyklen resultieren in ca. 70facher Partikelmasse und etwa 50facher Partikelanzahl bei den Dieselfahrzeugen [EMPA_2007]. Bei SNF²⁴ werden im Teillastbereich um den Faktor zwei bis sechs höhere NO₂/NO-Verhältnisse gemessen als bei Vollast, die höchsten Anteile werden bei mittleren Drehzahlen erreicht [IFEU_2007].
- (9) Dieselfahrzeuge werden mit Luftüberschuss ($\lambda > 1$) betrieben, der Einsatz von Drei-Wege-Katalysatoren wie in Ottofahrzeugen ist deshalb hier nicht möglich. Zur Emissionsminderung kommen deshalb sowohl innermotorische Maßnahmen²⁵ als auch Abgasnachbehandlungssysteme zum Einsatz. Die wichtigste Strategie zur Verminderung der Stickoxidemissionen²⁶ von Dieselmotoren ist die Absenkung der Spitztemperatur der Verbrennung durch Abgasrückführung. Beispiele für alternative Maßnahmen zur Absenkung der Spitztemperatur sind die gezielte Einspritzung von Wasser in den Brennraum bzw. der Eintrag von im Kraftstoff emulgiertem Wasser (Diesel-Wasser-Emulsionen) sowie Common Rail Systeme, verbunden mit kennfeldgesteuerter Mehrfachein-

²¹ Im Bereich der leichten und schweren Nutzfahrzeuge werden von den Herstellern im wesentlichen zwei Strategien zur Einhaltung der Euro 5-Grenzwerte eingesetzt: eine Kombination aus Partikelfilter und Stickoxidreduktion mit Hilfe eines Reduktionsmittels (i.d.R. auf der Basis von Harnstoff) und eine Kombination aus Abgasrückführung und Partikelfilter. Im Pkw-Bereich wird eine Verbesserung der Einspritzung (Einspritzverlauf und -druck sowie -strahl), bei größeren Fahrzeuge z.T. in Kombination mit Speicherkatalysatoren verfolgt.

²² Die beiden von den Herstellern favorisierten Stickstoffminderungssysteme sind Speicherkatalysatoren und Minderungssysteme auf der Basis von Harnstoff, wobei auch Kombinationen dieser beiden Systeme zum Einsatz kommen können.

²³ Beide Fahrzeugtypen waren mit serienmäßigen Schadstoffminderungsmaßnahmen ausgestattet.

²⁴ Unabhängig davon ob die SNF mit CRT-Filter ausgestattet sind oder nicht.

²⁵ Ihr Ziel ist die Absenkung der Motorrohmissionen.

²⁶ (Gemeint sind die Emissionen direkt nach der Verbrennung und vor jeder Nachbehandlung)



spritzung. Prinzipbedingt führen alle diese Maßnahmen zu schlechteren thermodynamischen Wirkungsgraden, zu entsprechenden Kraftstoffmehrverbräuchen und höheren PM- und H_mC_n -Rohemissionen; die Partikelanzahlemissionen bleiben hingegen weitgehend unbeeinflusst.

- (10) Damit entsteht an dieser Stelle ein (kleiner) Zielkonflikt zwischen den Zielen der CO_2 -Reduktion einerseits und der Reduktion der Luftschadstoffe andererseits, der von Herstellerseite auch häufiger thematisiert wird. Bei Dieselmotoren ist generell ein gegenläufiges Verhalten von Stickoxid- und Partikelemissionen gegeben. Motorwirkungsgrad und Stickoxidemissionen steigen mit steigender Temperatur im Brennraum, parallel sinken c. p. die Partikelemissionen. Aus diesem gegenläufigen Verhalten von Stickoxidemissionen und Kraftstoffverbrauch gegenüber den Partikelemissionen ergeben sich entsprechende Grenzen der Wirksamkeit innermotorischer Maßnahmen für die gleichzeitige Senkung von CO_2 -, Partikel- und Stickoxidemissionen: Ja, motortechnisch kann man geringere Luftschadstoffrohmissionen mit einem gewissen Kraftstoffmehrverbrauch und entsprechend höheren CO_2 -Emissionen erkaufen. Dieser „Widerspruch“ wurde auch im Rahmen der Beratungen bei der Einführung der Luftqualitätsstandards in Brüssel formuliert, und es ist damit zu rechnen, dass die Städte auch im Rahmen der Luftreinhalteplanung hiermit konfrontiert werden.
- (11) Bei der Diskussion dieses (kleinen) Zielkonflikts ist zu beachten,
- dass es sich erstens um geringe Kraftstoffmehrverbräuche und -emissionen handelt, üblich sind wenige Prozentpunkte und
 - dass sich diese Kraftstoffmehrverbräuche leicht durch eine geringfügig andere Fahrzeugauslegung kompensieren lassen: Eine Gewichtsreduktion, ein Vermeiden unnötig höher Leistungsspitzen, der Verzicht auf Höchstgeschwindigkeiten oder Nebenaggregate bewirken üblicherweise höhere Kraftstoffeinsparungen als die innermotorischen Kraftstoffmehrverbräuche.
 - Zudem kann man auf die oben beschriebene innermotorische NO_x -Reduktionsstrategie verzichten, wenn sowieso Abgasnachbehandlungssysteme eingebaut werden sollen. Zwingen etwa andere Gründe dazu, in jedem Fall Abgasnachbehandlungssysteme einzubauen, dann kann man „ruhig“ innermotorisch hohe Stickoxidemissionen in Kauf nehmen und hält damit sowohl den Verbrauch als auch die CO_2 -Emissionen klein. Zusätzlich sind dann allerdings eben die Nachbehandlungssysteme vorzusehen und zu betreiben, wobei auch dort wiederum ein gewisser Energiebedarf auftreten dürfte.

Zusammenfassend kann also festgestellt werden, dass der beschriebene Zielkonflikt auf verschiedenen Ebenen existiert, aber nur von geringer Wirkung ist. Zudem ist es leicht möglich, zu Minimierungen beider Zielgrößen zu kommen.



Hierzu liegt auch eine Stellungnahme des Wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung Globale Umweltwirkungen mit Redaktionsschluss 09.07.2009 vor [WBGU_2009].

- (12) Die Nutzung zeitgemäßer Abgasnachbehandlungstechnologien wie Partikelfiltern und Stickoxidminderungssystemen bietet generell die Chance, den beschriebenen Zielkonflikt zwischen Verbrauch bzw. Partikelmasse und Stickoxidemissionen zu verringern oder zu umgehen. Sie ermöglichen die Einhaltung anspruchsvoller Emissionsgrenzwerte bei gleichzeitiger (in gewissem Rahmen möglicher) Verbrauchsoptimierung²⁷. Der Rahmen für die Systemoptimierung wird durch die Motorrohmissionen, die Effizienz der Abgasminderungssysteme und die einzuhaltenden Grenzwerte vorgegeben.
- (13) Zusammenfassend ist nach derzeitigem Erkenntnisstand davon auszugehen, dass die Emissionsanforderungen der Grenzwertstufen Euro 5 und Euro 6 bei Nutzung konventioneller Dieselmotoren nur mit Hilfe von Abgasnachbehandlungssystemen eingehalten werden können.

Benzinfahrzeuge

- (1) Der Anteil der Benzinfahrzeuge an den in Deutschland für den Straßenverkehr zugelassenen Fahrzeugen lag zum 1. Januar 2009 in Summe bei fast 71 %:
- 74,1 % der Pkw
 - 6,1 % der Nutzfahrzeuge und
 - 2,1 % der Sattelzugmaschinen
- sind Benzinfahrzeuge [KBA_01/2009a]. Das Gros dieser Fahrzeuge wird mit Benzin mit einem Ethanolanteil von derzeit 3 Massenprozenten²⁸ betrieben. Darüber hinaus wurden 9.000 t Bioethanol mit 70-90 % Anteil Ethanol (sog. E85) vorwiegend in Pkw mit Ottomotoren genutzt [AEE_2009]. Die Anzahl der Benzin Pkw ist gegenwärtig rückläufig, es finden Verschiebungen²⁹ hin zu Dieselfahrzeugen, LPG- und Erdgas-Fahrzeugen statt.
- (2) Diese Entwicklung mag sich zukünftig noch fortsetzen; eine Reihe vorliegender Prognosen geht von weiter steigenden Dieselanteilen aus. Allerdings zeigt die Entwicklung der letzten Jahre und Monate eine gewisse Abschwächung des Trends, und die derzeit und künftig sichtbar erhöhten Preise für Dieselmotoren (im Vergleich zu Vergasermotoren) werden sich auch auswirken. Langfristig ist deshalb tendenziell doch von einer gewissen Stabilisierung des Benzin- bzw. Dieselanteils auszugehen.

²⁷ Der Kraftstoffverbrauch liegt jedoch in jedem Fall über jenem, der von wirkungsgradoptimierten Motoren ohne jegliche Emissionsvorgaben erreicht wird.

²⁸ Primärkraftstoffverbrauch in Deutschland: fossiles Benzin 20,0 Mio. t, Ethanolbeimischung 0,6 Mio. t [AEE_2009]

²⁹ Vergleich der Zulassungszahlen 1. Januar 2009 mit denen des gleichen Vorjahreszeitpunktes: Benzin -266.189, Diesel +244.385, LPG +144.361, Erdgas +10.130 Fahrzeuge.

- (3) Problemschadstoffe heutiger Benzinfahrzeuge sind vorrangig die Emissionen an Partikeln aus Abrieb, Aufwirbelung und abrasiven Prozessen sowie ihre Emissionen an flüchtigen organischen Verbindungen (NMHC)³⁰. Insbesondere bei hoher Motorlast können Ottofahrzeuge darüber hinaus Partikelanzahlen in ähnlicher Größenordnung wie Dieselfahrzeuge emittieren (vgl. Abbildung 5) [CONCAWE_2004; EMPA_2007]. Luftreinhaltepolitik muss deshalb insbesondere die hohen Leistungsspitzen abfangen: Städtischer Verkehr soll möglichst gleichmäßig und homogen über möglichst kurze Distanzen führen. Mit Blick auf die gesundheitlichen Effekte von Partikeln und den Fahrleistungsanteil der Otto-Pkw innerorts sind deshalb auch die Partikelanzahlemissionen (PA) der Fahrzeuge mit Ottomotoren zu berücksichtigen.

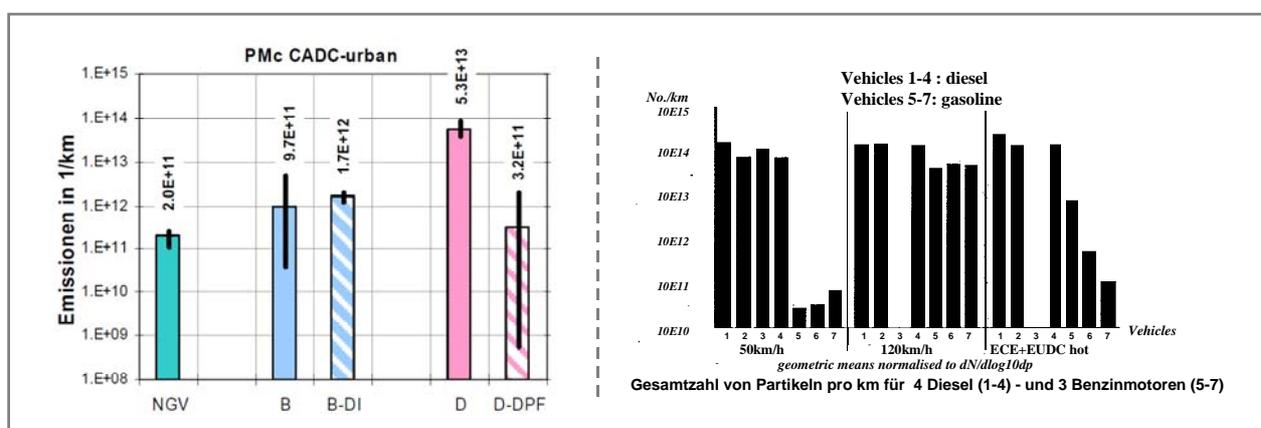


Abbildung 5: Partikelanzahlemissionen unterschiedlicher Pkw Antriebskonzepte im realitätsnahen ARTEMIS-Fahrzyklus sowie in unterschiedlichen Lastzuständen (CADC urban) [EMPA_2007; CONCAWE_2004]

- (4) Während Otto-Pkw der Grenzwertstufen Euro 0 und Euro 1 im Innerortszyklus mit Warmstart noch NO₂-Emissionen in der Größenordnung von ca. 30-40 % (bezogen auf vergleichbare Dieselfahrzeuge) zeigten, verursachen moderne Otto-Pkw der Grenzwertstufen Euro 3 und Euro 4 nur noch Emissionen in der Größenordnung von 1-2 % (wiederum relativ zu vergleichbaren Dieselfahrzeugen). Im Mittel weisen Benzin-Pkw nur etwa ein Zehntel der Stickoxidemissionen vergleichbarer Dieselfahrzeuge auf. Die NO₂/NO-Verhältnisse liegen für alle Emissionsklassen bei etwa 0,05 [IFEU_2007; EMPA_2007]. Vereinfacht lässt sich deshalb folgern, dass sich das hier behandelte NO₂-Problem vorrangig auf Dieselfahrzeuge zurückführen lässt; dort ist anzusetzen.
- (5) Die Flotte der Benzinfahrzeuge setzt sich zu fast 90 % aus Pkw zusammen, und der Anteil der Benzin-Pkw an der Fahrleistung aller Benzinfahrzeuge liegt deutlich über 90 %. Für die dieses Fahrzeugsegment bestimmenden Pkw wird

³⁰ Hohe VOC Emissionen treten insbesondere während des Kaltstarts auf, können jedoch auch bei hoher Motorlast auftreten (of-Cycle-Emissionen).



es mit der Einführung der Grenzwertstufe Euro 6 keine weitere Verschärfung der Grenzwerte für Stickoxid- und Partikelemissionen geben. Durch die weitere Durchdringung der Flotte mit direkteinspritzenden Fahrzeugen wird es jedoch zu einer signifikanten Erhöhung der Kohlenwasserstoffemissionen (HC) im Innerortszyklus kommen. Bei den für die Ozonbildung relevanten Nichtmethan-Kohlenwasserstoff-Emissionen (NMHC) wird es dabei nicht zu einer Veränderung gegenüber herkömmlichen Saugmotoren kommen. [EMPA_2007, KBA_01/2009a].

- (6) Mit der Grenzwertstufe Euro 6 wird für Abgaspartikel zusätzlich zum bestehenden massebezogenen Emissionswert erstmals für alle Fahrzeugklassen ein Anzahlgrenzwert eingeführt werden. Es wird unterstellt, dass dieser Grenzwert durch Otto-Pkw bei entsprechender Auslegung auch ohne zusätzliche Partikelminderungssysteme eingehalten werden wird.
- (7) Das Gros der heute im Markt verfügbaren Benzinfahrzeuge wird bei stöchiometrischem Luft-Kraftstoffverhältnis ($\lambda=1$) betrieben und ist mit Drei-Wege-Katalysatoren zur Minderung der H_mC_n -, CO- und NO_x -Emissionen ausgestattet. Entsprechende (geringe) Verbrauchsnachteile werden auch hier zugunsten niedriger Abgaswerte hingenommen. Die H_mC_n -Emissionen von Benzinfahrzeugen bestehen zu ca. 75 % aus für die Ozonbildung relevanten Nichtmethan-Kohlenwasserstoffen (NMHC). Sie liegen in allen Fahrzyklen deutlich unter denen vergleichbarer Dieselfahrzeuge, sind jedoch innerorts höher als die von Erdgasfahrzeugen. Die NO_x -Emissionen der Benzinfahrzeuge mit $\lambda=1$ liegen ebenfalls unter denen der Dieselfahrzeuge, NO_2 -Emissionen treten bei diesen Fahrzeugen prinzipbedingt³¹ nicht auf [EMPA_2007; KolkeR_2005].
- (8) Nennenswerte direkteinspritzende Benzinmotoren sind seit 1997 im Markt verfügbar, wegen ihrer Effizienz-, Leistungs- und Emissionsparameter ist von einer weiteren Zunahme ihres Anteils auszugehen. Da ihr Betrieb mit Luftüberschuss ($\lambda > 1$) erfolgt kann die Abgasnachbehandlung nicht mehr mit Drei-Wege-Katalysatoren erfolgen. Zur Stickoxidminderung werden deshalb Abgasrückführung im Teillastbereich sowie NO_x -Speicherkatalysatoren bzw. beides zusammen eingesetzt. Alle Strategien führen auch hier wiederum zu geringen Kraftstoffmehrerbräuchen³². Der Einsatz von Speicherkatalysatoren ermöglicht auch im Kaltstartbereich eine deutliche Absenkung der NO_x - und NO_2 -Emissionen. Moderne direkteinspritzende Benzinmotoren führen abweichend von den Resultaten früherer Untersuchungen nicht mehr zu den gegenüber Benzinmotoren mit Saugrohreinspritzung signifikant erhöhten Partikelanzahl-emissionen [EMPA_2007; SRU_2005; KolkeR_2005].

³¹ Bei Benzin- und Erdgasfahrzeugen mit stöchiometrischem Luft-Kraftstoff-Verhältnis tritt eine Katalysatorbedingte NO_2 -Erhöhung nicht auf, weil die Abgasnachbehandlung nicht unter Sauerstoffüberschuss sondern bei $\lambda=1$ abläuft.

³² Verbrauchsvorteile gegenüber saugrohreinspritzenden Motoren ergeben sich insbesondere durch den Wegfall der Drosselklappenverluste sowie durch verminderte Wandwärmeverluste.

Erdgas-, Flüssiggas- und Biogasfahrzeuge

(1) In diesem Abschnitt werden alle mono- und bivalenten Fahrzeuge, die in Deutschland für den Betrieb mit Erdgas, LPG oder Biogas zugelassen sind, übergreifend betrachtet. Der Anteil dieser Fahrzeuge an den in Deutschland für den Straßenverkehr zugelassenen Fahrzeugen lag zum 1. Januar 2009 in Summe bei knapp 1 %; wobei der überwiegende Teil der Fahrzeuge mit Flüssiggas (LPG) betrieben wird. Abbildung 2 verdeutlicht die unterschiedliche Dynamik in den Fahrzeugflotten. Die höchsten Fahrzeugzahlen und auch die größten Zuwächse sind bei LPG-Pkw zu beobachten, bei den Bussen sowie bei den Nutzfahrzeugen dominiert gegenwärtig Erdgas.

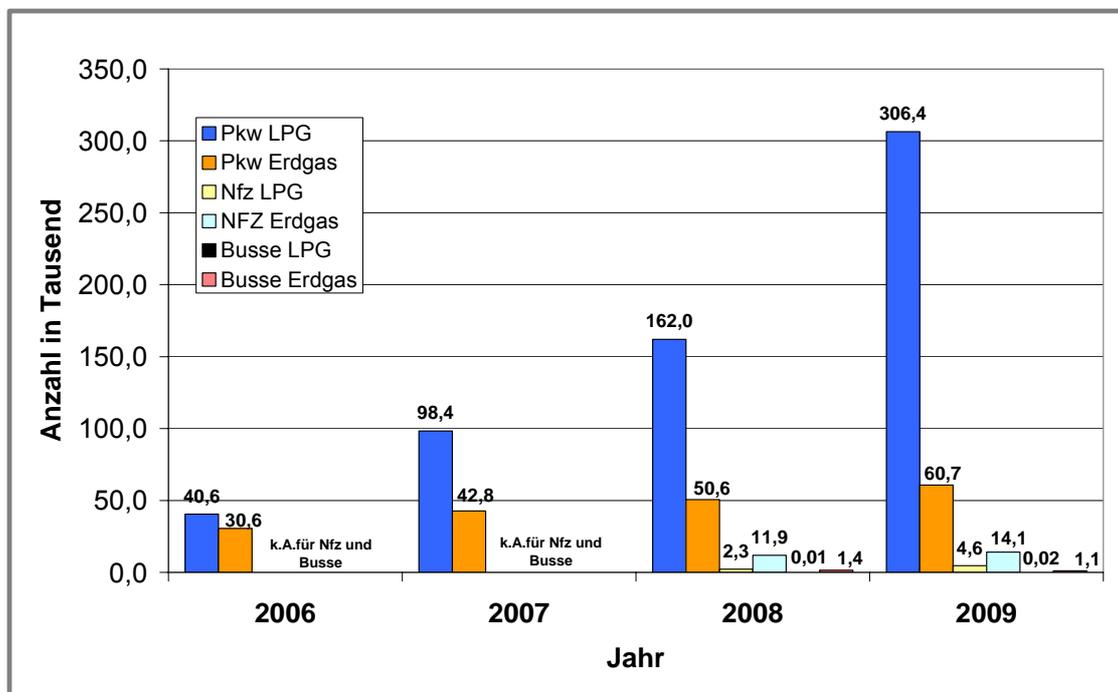


Abbildung 6: Zulassungszahlen für mono- und bivalente Fahrzeuge mit gasförmigen Kraftstoffen. Eigene Darstellung, Daten [KBA_01/2009a]

(2) Sowohl Erdgas- als auch LPG- Fahrzeuge zahlen bis (vermutlich) 2018 nur einem ermäßigten Energiesteuersatz³³. Bezogen auf einen Liter Kraftstoff betragen die Steuern nur etwa 25 % des Dieselwertes bzw. ca. 20 % des Wertes für Benzin. Biomethan (Biogas) ist bis mindestens 2009 vollständig von der Energiesteuer befreit und wird in Zukunft mit dem selben Steuersatz wie Erdgas beaufschlagt. Insbesondere für Vielfahrer führen diese ermäßigten Steuersätze zu

³³ früher Mineralölsteuer

einer i. d. R. schnellen Amortisation³⁴ gasgetriebener Fahrzeuge (vgl. Abbildung 5).

- (3) Bei Bussen haben sich eine Reihe von Unternehmen des öffentlichen Verkehrs (ÖV) für Erdgas entschieden. Ausgehend von der Palette der im Markt verfügbaren Fahrzeuge und der lokal vorhandenen, für die Schnellbetankung geeigneten Betankungsinfrastruktur wird unterstellt, dass diese Entwicklung auch mittelfristig Bestand haben wird. Bei den Nutzfahrzeugen beschränkt sich die Nutzung gasförmiger Kraftstoffe gegenwärtig fast vollständig auf Fahrzeuge mit einer zulässigen Zuladung von unter zwei Tonnen. Erdgas dominiert dieses Segment heute mit ca. 14.000 Fahrzeugen gegenüber ca. 4.600 LPG Fahrzeugen, die Zuwachsraten gegenüber dem Vorjahr (Erdgas 18 %; LPG fast 100 %) deuten aber auf eine mittelfristig zu erwartende Dominanz der LPG Fahrzeuge auch in diesem Segment hin.
- (4) Ottomotoren mit gasförmigen Kraftstoffen zeichnen sich generell durch eine sehr homogene Gemischaufbereitung und dadurch bedingt durch einen sehr gleichmäßigen Verbrennungsverlauf sowie entsprechend geringe Geräuschemissionen aus. Bei Erdgasbussen sind die Vorbeifahrgeräusche bspw. gegenüber vergleichbaren Dieselbussen um 3-6 dB(A) vermindert. Die homogene Gemischaufbereitung führt zu einer nahezu rußfreien Verbrennung. Partikelmasse- und Partikelanzahl-Emissionen von Gasfahrzeugen liegen innerorts unter denen von Benzinfahrzeugen und etwa auf dem Niveau von Dieselfahrzeugen mit geschlossenen Partikelfiltern (vgl. Abbildung 7) [EMPA_2007; v.LingeJ_2003]. Beim Einsatz gasförmiger Kraftstoffe findet darüber hinaus keine Kondensation des Kraftstoffs an kalten Motorteilen statt, was die Kaltstartemissionen verringert.

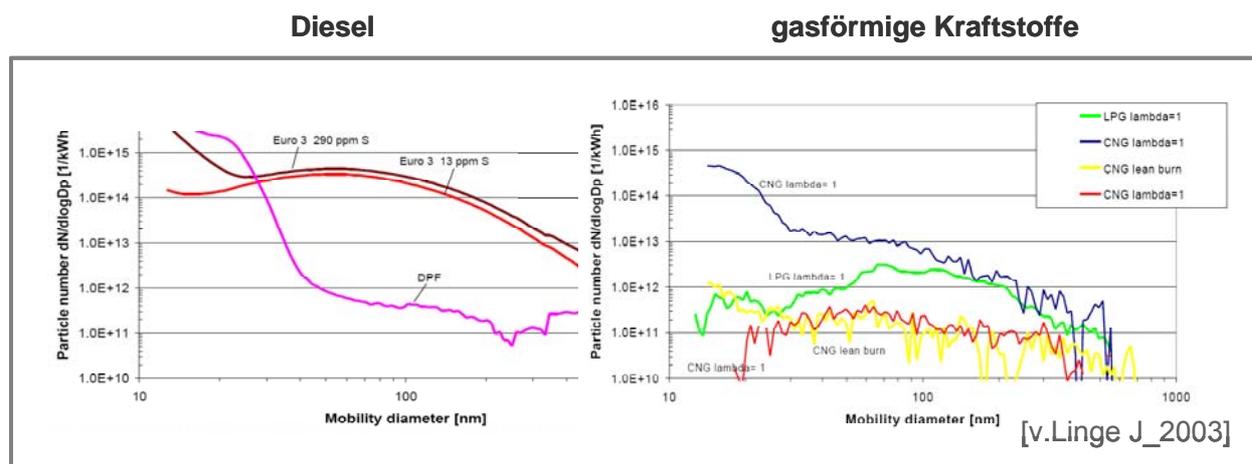


Abbildung 7: Vergleich der Partikelanzahlemissionen von Diesel und gasförmigen Kraftstoffen in Nutzfahrzeugmotoren [v.Linge J_2003]

³⁴ Die Amortisationszeit wird neben der Fahrleistung auch durch regionale Förderungen und Beschaffungszuschüsse sowie insbesondere bei gewerblichen Anwendungen durch betriebliche Rahmenbedingungen bestimmt.

- (5) Das Gros der heute im Markt verfügbaren Gasfahrzeuge wird bei stöchiometrischem Luft-Kraftstoffverhältnis ($\lambda=1$) betrieben und ist mit Drei-Wege-Katalysatoren zur Minderung der H_mC_n -, CO- und NO_x -Emissionen ausgestattet. Entsprechende Verbrauchsnachteile werden auch hier zugunsten niedriger Abgaswerte hingenommen. Die H_mC_n -Emissionen von Erdgasfahrzeugen bestehen zu ca. 85 % aus für die Ozonbildung nicht relevantem Methan, die verbleibenden NMHC liegen innerorts³⁵ deutlich unter denen von Dieselfahrzeugen und auch unter denen vergleichbarer Benzinfahrzeuge. Die NO_x -Emissionen der Gasfahrzeuge mit $\lambda=1$ liegen ebenfalls unter denen der Benzin- und Dieselfahrzeuge, NO_2 -Emissionen treten bei diesen Fahrzeugen prinzipbedingt³⁶ nicht auf [EMPA_2007; IFEU_2004]. Aus Umweltsicht stellen diese Fahrzeuge also prinzipiell sinnvolle Möglichkeiten für die Minderung der Luftbelastung aus dem städtischen Verkehr bereit.

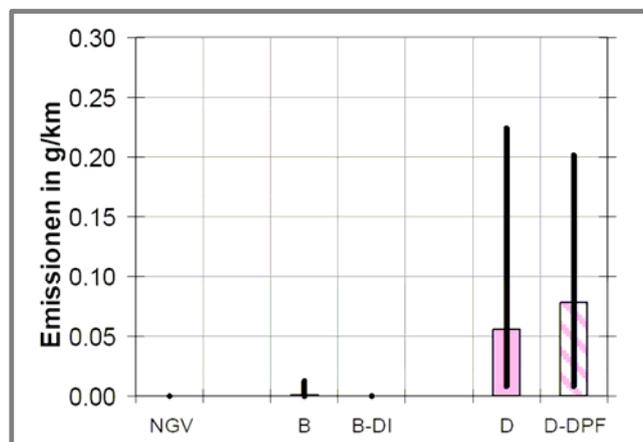


Abbildung 8: NMHC-Emissionen von Erdgas (NGV), Benzin- und Dieselfahrzeugen im realitätsnahen ARTEMIS „urban“ Fahrzyklus [EMPA_2007]

- (6) Werden Gasfahrzeuge als Magermotoren oder als direkteinspritzende Gasmotoren³⁷ mit Luftüberschuss betrieben ($\lambda>1$), dann können sie zwar höhere Wirkungsgrade (vgl. Kapitel **Benzinfahrzeuge**) als Motoren im stöchiometrischen Betrieb erreichen, müssen dann aber auf Drei-Wege-Katalysatoren zur Abgasnachbehandlung verzichten. Niedrige NO_x -Emissionen werden bei Magermotoren nur beim Betrieb des Motors nahe der oberen Laufgrenze (für LPG bspw. ca. $\lambda=1,6$) erreicht. Auch daraus können sich im realen Betrieb entsprechende Kraftstoffmehrverbräuche ergeben. Magermotoren werden zur Minderung der

³⁵ Im Autobahnzyklus werden deutlich erhöhte PA- und NMHC- Emissionen gemessen. Ursache ist der Einsatz nicht ausgereifter Technologien

³⁶ Bei Benzin- und Erdgasfahrzeugen mit stöchiometrischem Luft-Kraftstoff-Verhältnis tritt eine Katalysatorbedingte NO_2 -Erhöhung nicht auf, weil die Abgasnachbehandlung nicht unter Sauerstoffüberschuss sondern bei $\lambda=1$ abläuft.

³⁷ Immer mehr Hersteller bringen direkteinspritzende Gasmotoren in den Markt.

H_mC_n -Emissionen mit Oxidationskatalysatoren ausgestattet. Im Unterschied zu stöchiometrisch arbeitenden Motoren sind deshalb bei diesen Motoren prinzipbedingt erhöhte NO_2 -Emissionen zu erwarten³⁸. Für CNG-Busse wurden in einem Screening bisheriger Messreihen unterschiedlicher Prüflabors NO_2 -Anteile zwischen 6 - 25 % und damit deutlich niedrigere Werte als bei Dieselmotoren mit CRT-Filter gefunden [IFEU_2004].

- (7) Bei den CO_2 -Emissionen ist festzuhalten, dass LPG-optimierte Fahrzeuge gegenüber Benzinern etwa 5-10 % geringere THG-Emissionen aufweisen³⁹. Im Vergleich zu Dieselfahrzeugen liegen die LPG-Fahrzeuge aber noch etwas schlechter; insgesamt kann man sie also einigermaßen gut zwischen Benzin-Pkw und Diesel-Pkw einordnen. Die aus der Nutzung von LPG in Bussen resultierenden kumulierten THG-Emissionen sind in Abbildung 9 dargestellt. Der gegenüber Dieseln um ca. 17 % höhere Wert ist Folge des geringeren Wirkungsgrades.

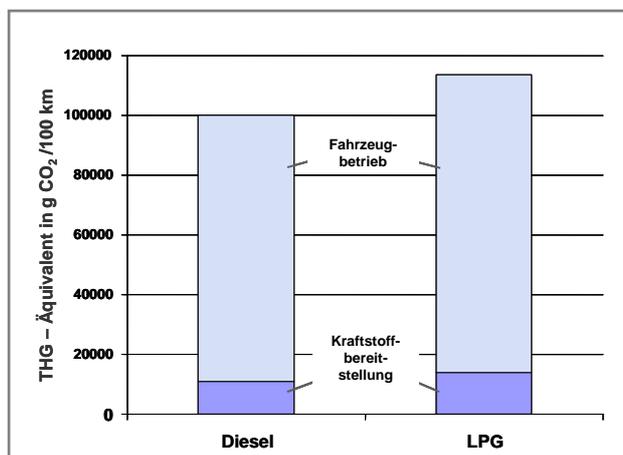


Abbildung 9: Vergleich des Treibhauspotenzials von LPG und Diesel für Stadtlinienbusse [eigene Berechnungen]

- (8) Ein anderes Bild ergibt sich bei der Klimaschädlichkeit der gasbetriebenen Fahrzeuge: Hier öffnet sich weiter Spielraum für Fehlinterpretationen, denn die Treibhausgasemissionen von Erdgasfahrzeugen werden vor allem durch den Bereitstellungspfad⁴⁰ des eingesetzten Erdgases beeinflusst. Unter Berücksichtigung der gesamten Prozesskette können die THG-Emissionen für den derzeitigen günstigen EU-Mix⁴¹ um bis zu 30 Prozent unter denen von Benzin liegen,

³⁸ Das NO_2/NO -Verhältnis wird u.A. durch Aktivität und Auslegung der eingesetzten Katalysatoren sowie in gewissem Umfang durch Raumgeschwindigkeit und AGR-Raten im jeweiligen Lastpunkt bestimmt.

³⁹ Für die Bewertung der Alternative ist zu beachten, dass LPG als Koppelprodukt der Erdgasbereitstellung bilanziert werden kann.

⁴⁰ Eine dominante Rolle in den Bereitstellungsemissionen spielt der Transport des Erdgases verbunden mit entfernungsabhängigen Leitungsverlusten. Für die Zukunft ist von zunehmenden Transportentfernungen und entsprechend höheren Leitungsverlusten auszugehen.

⁴¹ Bei Förderung und Transport von Erdgas in der EU kommt es verglichen mit Erdgas z.B. aus Russland zu deutlich geringeren THG-Emissionen.



gegenüber Dieselfahrzeugen bestehen kaum oder keine Vorteile. Im Fall von Ferntransporten über Erdgasleitungen ergeben sich entsprechend deutlich höhere THG-Emissionen⁴² [SRU_2005; BöhmerT_1999]. Hier ist besondere Vorsicht angeraten: bei Vergleichsrechnungen hängt viel davon ab, welche Bezugsquellen, Annahmen und Randbedingungen die Autoren jeweils zugrunde legen.

- (9) In Abbildung 10 werden die kumulierten THG Emissionen unterschiedlicher Fahrzeugkonzepte und Erdgaspfade gegenübergestellt. Die Abbildung verdeutlicht, dass die direkte Verwendung von Erdgas zu höheren THG-Minderungen als die Nutzung anderer auf Erdgas basierender Treibstoffe (z.B. Methanol, DME) führt [KolkeR_2005].

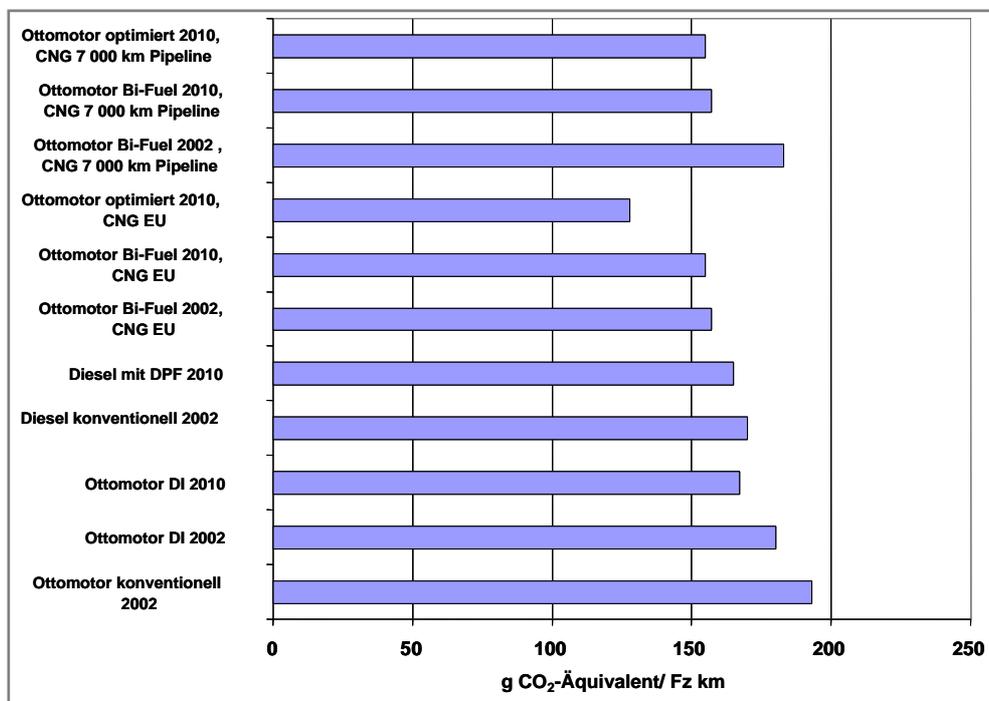


Abbildung 10: Vergleich der kumulierten THG-Emissionen von mit Erdgas bzw. mit konventionellen Kraftstoffen betriebenen Fahrzeugen (Well-to-Wheel-Analyse) [CONCAWE_2004]

- (10) Ob und wie weit die Kommunen aus Klimaschutzgründen Gasfahrzeuge fördern und die Umstellung darauf vorantreiben sollen, hängt vor allem von den Rahmenbedingungen ab. Erdgas könnte in Fahrzeugen Verwendung finden, Erdgas kann aber auch etwa in der Stromerzeugung in Kraftwerken Kohle ersetzen. Bezogen auf die THG-Emissionen ist der Ersatz von Kohle durch Erdgas bei der Stromerzeugung deutlich wirkungsvoller und damit effizienter als im

⁴² Relativierend muss angemerkt werden, dass Messungen des Wuppertal Instituts an russischen Erdgasleitungen deutlich geringere Verluste als in älteren Studien angenommen ergaben [WI_2005].



Verkehrswesen: Die Verwendung in Kraftwerken führt zu THG-Minderungen, die um etwa den Faktor 10 über den Minderungen bei Ersatz von Benzin durch Erdgas liegen [CONCAWE_2004]. Von daher sind hier Detailuntersuchungen angeraten.

Hybridfahrzeuge

- (1) In Deutschland waren am 1. Januar 2009 insgesamt 1.600 Hybridfahrzeuge zugelassen, und zwar 1452 Pkw, 82 Busse, 69 Nutzfahrzeuge, 147 Zugmaschinen und 979 Krafträder [KBA_01/2009a]. Trotz hoher Zuwachsraten entspricht dies nur ca. 35 ppm aller Fahrzeuge. Von daher spielt das Segment für Praxisüberlegungen eigentlich keine Rolle.
- (2) Hybridfahrzeuge sind Fahrzeuge, deren Antrieb mit mindestens zwei unterschiedlichen Energiewandlern und in der Regel zwei unterschiedlichen Speichern erfolgt. Sie versuchen, die positiven Eigenschaften etwa von Verbrennungsmotoren und Elektroantrieben in einem Antriebssystem zu vereinen⁴³.
- (3) Der Verbrennungsmotor in Hybridfahrzeugen wird bei gleichen Fahrsituationen der Regel in anderen, günstigeren Kennfeldbereichen betrieben. Vom Hersteller können dabei Systemoptimierungen bspw. mit dem Ziel von Kraftstoffverbrauchsreduktionen, Emissionsminderungen oder der Minimierung der über die Nutzungsdauer kumulierten Fahrzeugkosten vorgenommen werden. Die Schwerpunkte der Optimierung werden sich an den Anforderungen im Markt⁴⁴, am Kraftstoffpreis, an den gesetzlichen Rahmenbedingungen sowie bspw. an der Zyklenfestigkeit der eingesetzten Batterien orientieren. Quantitative, für alle Hybridfahrzeuge zu erwartende Emissionsminderungen sind deshalb nicht ableitbar. In der Regel können sich so qualitative Minderungen bei allen limitierten Schadstoffen ergeben.
- (4) Hybridfahrzeuge werden heute vorrangig mit dem Ziel gefördert, Antriebsenergie einzusparen und entsprechende Reduktionen bei den Schadstoff- und Treibhausgasemissionen zu erreichen. Heutige Hybrid-Pkw können gegenüber vergleichbaren konventionellen Pkw unter für den Hybrid günstigen Rahmenbedingungen (Stop & Go, bergige Topographie, häufiges Beschleunigen und Bremsen) signifikante Verbrauchsvorteile erzielen [WingerA_2003]. Bei gleichmäßiger Fahrt und auf langen Strecken sowie im Drittmix ergeben sich in der Regel keine signifikanten Verbrauchsvorteile⁴⁵. Damit bieten sich für den Hybridantrieb vor allem innerstädtische Anwendungen mit hoher Laufleistung und hohen Stop & Go Anteilen an, beispielsweise der Einsatz in Stadtbussen oder

⁴³ Zunehmend werden vor allem im Nutzfahrzeugbereich auch andere Antriebe wie bspw. Verbrennungsmotoren und hydraulische Speicher miteinander kombiniert.

⁴⁴ bspw. Amortisationszeit der Fahrzeuge, Wiederverkaufs- bzw. Restwert der Fahrzeuge, Zahlungsbereitschaft für die Ersatzbeschaffung von Komponenten etc.

⁴⁵ Diese Aussage gilt unter der Prämisse der im folgenden Absatz zum Vergleich mit konventionellen Fahrzeugen unterstellten Bedingungen für einen fairen Vergleich der Antriebskonzepte.



für Verteilerverkehre. Hier wurden in der Praxis Verbrauchsreduktionen⁴⁶ gegenüber ebenfalls optimierten konventionellen Fahrzeugen von ca. 10 %⁴⁷ sowie ein besserer Fahrkomfort erzielt. Sie können daher – langfristig – durchaus eine Rolle im Stadtverkehr übernehmen, müssten dafür dann aber für andere Rahmenbedingungen (klein, leicht, langsam, nah) konzipiert werden. Der Ersatz der heute häufiger anzutreffenden „Renn-Reise-Gelände-Limousinen“ mit über 2 Tonnen Leermasse, Höchstgeschwindigkeiten über 200 km/h und 200-300 kW Motorleistung usw. durch Hybridfahrzeuge führt das Konzept eigentlich ad absurdum.

(5) Beim Vergleich von Hybridfahrzeugen mit konventionellen Fahrzeugen sind generell einige wichtige Zusammenhänge zu berücksichtigen:

- Hybridfahrzeuge sind in Folge der Masse der Batterie (und der elektrischen Komponenten) bzw. der hydraulischen Zusatzkomponenten i. a. schwerer als vergleichbare konventionelle Fahrzeuge.
- Um diesen Nachteil⁴⁸ auszugleichen werden verstärkt Leichtbaumodule⁴⁹ im Fahrzeug verbaut, die jedoch auch bei konventionellen Fahrzeugen eingesetzt werden könnten und auch dort entsprechende Masse- und Verbrauchsvorteile nach sich ziehen würden. Es ist i. a. nicht zielführend, einen durchschnittlichen Benzin-Pkw aus dem Bestand mit einem dieser speziell entwickelten und technologisch weit vorseilenden Fahrzeuge direkt zu vergleichen. Sinnvoll wäre ein Vergleich eines Hybrid-Fahrzeuges mit etwa einem Benzin-Pkw, bei dem zwar auf den zweiten Antrieb verzichtet wurde, der aber ansonsten ähnlich hochstehende Technologiekonzepte einsetzt.
- Einen erheblichen Beitrag zu den Verbrauchsreduktionen⁵⁰ von Hybridfahrzeugen leistet die Start-Stop-Automatik. Auch sie kann aber problemlos auch in konventionellen Fahrzeugen eingesetzt werden (Startergenerator bspw. im „Honda Insight“) und führt dort zu Verbrauchsreduktionen in gleicher Höhe.
- Insgesamt kann festgestellt werden, dass mit gleichem finanziellem Aufwand bei konventionellen Otto- und Dieselmotoren eine Reihe wirksamer Optimierungen vorgenommen und i. a. höhere Verbrauch- und Emissionsminderungen erzielt werden können [KolkeR_2005].
- Ginge es also darum, mit möglichst wenig Kapitaleinsatz im Bestand der Fahrzeuge einen größeren Umweltentlastungseffekt erreichen zu müssen, dann würde eine technische Weiterentwicklung des typischen „Durchschnittsfahrzeugs“ einen größeren Emissionsminderungseffekt erzielen als nur an der Spit-

⁴⁶ Vergleich zu einem optimierten Vergleichsbus gleicher Größe, Mittlung über mehrere Fahrer, bergige Linie mit innerstädtischem und ländlichem Anteil

⁴⁷ Durch weitere Optimierungen des Antriebsstrangs, der Einbindung der Nebenverbraucher und der Nutzung der Batterie erscheinen zusätzliche Einsparungen von ca. 5% bis 10% denkbar.

⁴⁸ Die Fahrzeugmasse spiegelt sich unmittelbar im Verbrauch wieder.

⁴⁹ Leichtbau ist in der Regel in der Herstellung kosten- und energieintensiver; es sei denn, es wird konsequentes Downsizing betrieben

⁵⁰ In der Stadt ca. 7 – 9 % [WingerA_2003]



zengruppe der Fahrzeuge anzusetzen. Spielt das eingesetzte Geld keine Rolle (mag bei einzelnen Personen durchaus vorkommen), dann kann natürlich auch ein Hybridfahrzeug zur Umweltentlastung beitragen.

Elektrofahrzeuge

- (1) Am 1. Januar 2009 waren in Deutschland 23.294 Elektrofahrzeuge (22.330 Pkw, 92 Busse, 872 Nutzfahrzeuge, 176 Krafträder und 75 Zugmaschinen) zugelassen. In Summe stehen die Elektrofahrzeuge damit für ca. 0,05 % des Fahrzeugbestandes. In den kommenden Jahren werden die Fahrzeuge vermutlich besser an die Alltagsbedingungen angepasst werden; gleichzeitig wird die Produktpalette erweitert werden.
- (2) Die verstärkte Einführung von Elektrofahrzeugen ist politisch derzeit erwünscht und wird durch entsprechende Forschungs- und Förderprogramme auf europäischer, Bundes- und Länderebene (vgl. Klimaschutzprogramm der Bundesregierung etc.) sowie im Rahmen kommunaler Initiativen vorangetrieben. Abseits dieser Initiativen und Programme sind als Basis für eine breite Marktdurchdringung eine Reihe technologischer und wirtschaftlicher Voraussetzungen zu schaffen; Stichworte hierzu sind etwa Leistungsdichte, Zykluswechselfestigkeit und Masse der erforderlichen Batterien mit entsprechenden Implikationen für die Fahrzeugreichweite, die Anschaffungs- und Kilometerkosten, für Wiederverkaufswerte, Ersatzinvestitionen etc.
- (3) Selbstverständlich besitzen Elektrofahrzeuge aller Art (man denke etwa an Straßenbahnen und Züge!) eine Reihe von Vorteilen; auf diesem Wege können Emissionen etwa in Kraftwerke weit außerhalb der Städte verlagert werden. Allerdings ist der Aspekt der Energiespeicherung kritisch zu sehen; wie auch schon Anfang der 90-er Jahre des vergangenen Jahrhunderts steht also auch hier zu befürchten, dass die Hoffnung auf die „endgültige Lösung aller Verkehrsprobleme“ einmal mehr vertagt werden muss (zu verweisen wäre auf die Debatten über Methanolfahrzeuge ca. 1986, den Elektroauto-Großversuch der Bundesregierung 1993, dem weltweiten Boom der Brennstoffzellenfahrzeuge 1998-2002, dem Hybridboom seit 2005 usw.). Der Ersatz einer der heute üblicher gewordenen „Renn-Reise-Gelände-Limousinen“ mit um 2 Tonnen Leermasse, Höchstgeschwindigkeiten über 200 km/h, 200–300 kW Leistung usw. durch Elektrofahrzeuge wäre allerdings wiederum kontraproduktiv und führt das Konzept strenggenommen ad absurdum.
- (4) Elektrofahrzeuge sind nicht emissionsfrei. Ihre Nutzung resultiert sowohl in direkten Geräuschemissionen als auch in der Freisetzung von Partikeln aus Abrieb und Aufwirbelung. Darüber hinaus werden die dem Fahrzeugantrieb zuzuordnenden Emissionen räumlich, stofflich und zeitlich in Kraftwerke sowie in die Herstellung der Speicher und elektrischen Antriebskomponenten verlagert. Die THG-Bilanz wird entsprechend durch den nationalen Strommix bzw. bei Insel-



lösungen durch die Herkunft des genutzten Stroms bestimmt. Je nach genutzten Speichern (Pb-, NiMH-, Li-Ion-, Batterien, Ultrakondensatoren etc.) entstehen bei der Herstellung sowie beim Recycling weitere toxische Emissionen in wirkungsrelevantem Umfang [RydhCJ_2001].

- (5) Insgesamt erwarten wir, auch wegen den finanziellen Interventionen staatlicherseits, eine weitere Zunahme des Bestandes an Elektrofahrzeugen, der aber vermutlich die 1 %-Grenze nicht überschreiten dürfte. Nochmals: Trotz aller technischen und finanziellen Anstrengungen von Wirtschaft und Staat erwarten wir unter aktuellen Rahmenbedingungen nicht, dass der Fahrzeugbestand etwa im Jahr 2020 über 1 Million Fahrzeugen liegt. Von daher spielt das Elektro-Segment für die Lösung der hier vorliegenden Probleme nur eine sehr überschaubare Rolle.
- (6) Ein anderes Bild zeigt sich aber, wenn man die Rahmenbedingungen für den Einsatz der Elektrofahrzeuge grundsätzlich verschieben würde, und zwar weg von Fahrzeugen heutiger Prägung zu ganz anderen, kleineren und umweltfreundlichen Konzepten. Gelänge es etwa, die gesamten Entwicklungsforderungen der Automobilwirtschaft in eine stadtverträglichere Richtung zu lenken, dann würden sich die Einsatzspielräume für Elektrofahrzeuge deutlich vergrößern und man könnte aus Sicht einer Kommune einen nennenswerten Beitrag zur Lösung der Probleme erwarten. Gesucht wäre dann ein Fahrzeugtyp, der anders konstruiert wäre als die derzeitigen Pkw. Für ein solches „Stadtauto“ könnten z. B. die folgenden Entwicklungsvorgaben gemacht werden:
- Fahrzeugleermasse: ca. 200-300 kg
 - Auslegung: Zwei Personen plus zwei Kinder-/Notsitze/Gepäck
 - Reichweite: ca. 60-80 km je Tag
 - Höchstgeschwindigkeit: maximal 59 km/h, nicht BAB-tauglich
 - Betrieb vorrangig dort, wo normale Pkw nicht fahren dürfen
 - Motorisierung: ca. 5-10 kW

Ein solcher Ansatz ist heute schwer vorstellbar (und lässt sich sicher auch nicht kurzfristig umsetzen). Langfristig ist allerdings unstrittig, dass diese Entwicklungen kommen werden und müssen. Ob dies aus ökonomischen oder ökologischen Gründen forciert wird, mag dahingestellt bleiben. Erleichtert würde ein solcher Umstieg z. B. durch attraktivere Elektrofahrzeuge, durch Preissignale oder – wie hier angenommen – durch die Sperrung der Städte für andere Fahrzeuge. Exakt dies schlagen wir hiermit vor: Langfristig dürfen in Städten nur die so definierten Stadtautos verkehren. Wird ein Elektrofahrzeug dagegen als Ersatz der heutigen (schweren) Pkw entwickelt, oder wird es vor allem als modischer Zweit- oder Drittwagen für Technikverliebte oder Trendsetter propagiert, dann sind die Vorteile des Konzeptes nicht wirklich erkennbar.

- (7) Ganz allgemein ist bei Elektrofahrzeugen zu betonen, dass immer noch bzw. sogar verstärkt gilt: Trotz aller Innovationen bleibt für eine breite Akzeptanz von



Elektrofahrzeugen im Markt ein deutlicher technologischer Durchbruch bei der Speicherentwicklung sowie bei der Reduktion der damit einhergehenden Kosten die Grundvoraussetzung. Technische Entwicklungen sind sinnvoll, sie reichen aber für die hier zu untersuchende Problematik nicht aus.

- (8) Fasst man alle in Kapitel 2.5 „Fahrzeugtechnik“ dargestellten Wirkungen zusammen, so zeigt sich zum einen, dass auch zukünftig der technischen Entwicklung große Bedeutung zukommt: Sie ist notwendig, möglich und zielführend. Ebenso deutlich zeigt sich aber, dass die Lösung der hier zu untersuchenden Umweltprobleme mit technischen Verbesserungen allein nicht erreicht werden kann. Veränderungen des Verkehrsverhaltens, des Verkehrsangebotes und der Raumordnung/Raumnutzung müssen hinzukommen.

2.6 Emissionsmodellierung

In diesem Abschnitt werden Vorgehensweise und Datenanforderungen an die Emissionsmodellierung beschrieben. In allen Phasen der vergleichsweise komplexen Emissionsmodellierung bestehen Unsicherheiten bzw. Spielräume für den Modellersteller, die sich in drastisch unterschiedlichen bzw. manipulierten Ergebnissen niederschlagen können. Deshalb sind alle Annahmen und Ergebnisse immer im Detail offen zu legen und zu diskutieren. Besonders genau sind erstens die genaue Ermittlung der Verkehrssituationen (vor allem der Stop&Go-Anteile) und zweitens die Verkehrszusammensetzung (welche Fahrzeugflotte fährt wo wieviel?) zu ermitteln.

- (1) Sollen in einer Kommune Maßnahmen zur Verringerung der Emissionen des Verkehrs umgesetzt werden, so ist – selbstverständlich – auch eine Modellierung bzw. Abschätzung der Wirkung der Maßnahme auf die Emissionen notwendig. Die Beurteilung der Tauglichkeit der Maßnahme wird im allgemeinen auf dieser Wirkungsabschätzung basieren. Oberstes Ziel muss es deshalb sein, die Auswirkungen einer Maßnahmen auf den Verkehr möglichst genau zu beschreiben und dann aussagekräftige und zutreffende Reduktionswirkungen möglichst korrekt vorherzusagen. Damit aber kommt der Modellierung bzw. der Wirkungsabschätzung große Bedeutung zu. Ein Abschnitt innerhalb des zweiten Kapitels muss sich deshalb mit den Rahmenbedingungen, Ergebnissen, Fallstricken und Schwierigkeiten der Schätzung der Emissionsreduktion durch Maßnahmen im Verkehr beschäftigen.
- (2) Eine solche Emissionsabschätzung/Emissionsmodellierung muss die Emissionen der Fahrzeuge möglichst genau nachbilden, benötigt also zum einen Verkehrsdaten (die können etwa aus einer Planungssoftware wie VISUM o. ä.



kommen) und Emissionsfaktoren. Wesentliches Werkzeug dabei ist das Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA), das derzeit in der Version 3.0 (betaVersion) getestet wird. Mit der Veröffentlichung einer freigegebenen Version wird erst Anfang 2010 gerechnet, wobei einige durchaus grundsätzliche Unterschiede zur Version 2.1 zu erwarten sind, insbesondere was die NO_2 -Emissionsfaktoren angeht (die werden teilweise deutlich höher liegen als derzeit). Die folgenden Betrachtungen beziehen sich vorrangig aber noch auf die derzeit gültige Version HBEFA 2.1. Nachfolgend sollen nun prinzipielle Aspekte der Emissionsmodellierung sowie Hinweise und potenzielle Fehlerquellen erläutert werden.

- (3) Bei der Modellierung der Emissionen des Straßenverkehrs werden die Emissionen im warmen Betriebszustand (Motoremissionen (g/km) und Emissionen aus Abrieb und Aufwirbelung (ebenfalls in g/km)) mit einem Startzuschlag (in g/Startvorgang), den Verdampfungsemissionen nach Motorabstellen (in g/Abstellvorgang) und den Verdampfungsemissionen durch Tankatmung (in g/Tag und Fahrzeug) zusammengeführt. Die verschiedenen Emissionsarten tragen zu unterschiedlichen Anteilen an der Gesamtemissionsbilanz bei und haben sehr spezifische Anforderungen an die Eingangsdaten. Im Rahmen der Erstellung von Emissionskatastern oder Luftreinhalteplänen werden die sie dementsprechend mit einem unterschiedlichen Detaillierungsgrad und Raumbezug berücksichtigt.
- (4) Als Startzuschläge werden die Emissionen bezeichnet, die entstehen, wenn der Motor bei Fahrtbeginn noch nicht seine Betriebstemperatur erreicht hat und demzufolge z.B. die Abgasreinigungskomponenten noch nicht ihren vollen Wirkungsgrad erzielen. Bei kaltem Motor liegen diese Startzuschläge - insbesondere bei Kohlenwasserstoffemissionen - um ein Vielfaches über dem Niveau der Emissionen im warmen Betriebszustand. Die Kaltstartzuschläge werden i. a. auf den ersten 5 Kilometer einer Fahrt emittiert, wobei die Höhe exponential abnimmt. Der Kaltstartzuschlag ist demnach vor allem abhängig von der Differenz zwischen Motortemperatur bei Fahrtbeginn und Motorbetriebstemperatur, d.h. zum einen von der Umgebungstemperatur und zum anderen von der Standzeit des Fahrzeugs nach dem letzten Abstellvorgang mit heißem Motor.
- (5) In HBEFA werden die Startzuschläge in g/Startvorgang unter einer Vielzahl unterschiedlicher Optionen zur Definition der Randbedingungen (Umgebungstemperatur, Standzeitverteilung, Fahrtweitenverteilung) ausgewiesen. Für die Modellierung der Kaltstartemissionen ist es jedoch sehr schwer, diese Randbedingungen für einen Streckenabschnitt plausibel zu bestimmen. Aus diesem Grunde werden die Kaltstartemissionen für Katasterzwecke in der Regel häufig als Flächenemissionsquelle berechnet.
- (6) Unter Verdampfungsemissionen werden Emissionen flüchtiger Kohlenwasserstoffe verstanden, die nach Motorabstellen oder Tankatmung entstehen. Motor-



abstellemissionen werden im HBEFA in (g/Abstellvorgang) ausgewiesen und sind abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen Motor und Umgebung. Tankatmungsemissionen entstehen beim abgestellten Fahrzeug auf Grund der Temperaturschwankungen der Umgebung und der sich daran anpassenden Tanktemperatur. Sowohl Motorabstellemissionen als auch Tankatmungsemissionen treten also bei abgestellten Fahrzeugen auf und werden in der Regel als Flächenemissionen für Parkplätze oder Wohngebiete oder als Punktemissionsquelle bspw. für Parkhäuser berechnet.

- (7) Den größten Anteil an den Gesamtemissionen – zumindest bei Stickoxiden und Partikeln – haben die Emissionen im warmen Betriebszustand (warme Emissionen). Die Emissionsfaktoren der motorbedingten Emissionen liegen sehr detailliert in HBEFA streckenspezifisch in g/km vor. PM₁₀-Emissionen beinhalten neben den motorbedingten Emissionen jedoch zusätzlich Emissionen aus Abrieb- und Aufwirbelungsprozessen. Diese Emissionsfaktoren sind nicht in HBEFA enthalten, sondern werden i. a. gesondert erhoben [TUD_2004].
- (8) Die Mehrheit der verkehrsbezogenen Maßnahmen im Rahmen der Luftreinhalteplanung richtet sich direkt oder indirekt auf die Einflussgrößen der warmen Emissionen. Aus diesem Grunde sind im Folgenden die wesentlichen Einflussgrößen bzgl. Relevanz, Datenlage sowie Unsicherheiten näher erläutert.
- (9) Prinzipiell berechnen sich die streckenspezifische Emissionen E_i im warmen Betriebszustand wie folgt:

$$E_i \text{ [g]} = \text{Fahrzeuganzahl} * \text{Streckenlänge [km]} * \text{Flottenemissionsfaktor [g/km]}$$

- (10) Die Erhebung der Fahrzeuganzahl kann manuell (z.B. Handzählungen), automatisch (z.B. Induktionsschleifen) oder über Modelle (z.B. VISUM) erfolgen. Sie ist relativ plausibel und soll deshalb – ebenso wie die Streckenlänge nicht weiter erläutert werden. Weitaus schwieriger und mit ungleich größeren Unsicherheiten verbunden ist die Ermittlung eines repräsentativen streckenspezifischen Flottenemissionsfaktors. Für die motorbedingten Emissionsfaktoren in HBEFA sind dafür folgende Einflussgrößen relevant und werden in den folgenden Abschnitten detailliert erläutert:
- Verkehrszusammensetzung (Anteil der Fahrzeugkategorie am Gesamtverkehr)
 - Flottenzusammensetzung (Fahrleistungsanteil der Fahrzeugschichten innerhalb der Fahrzeugkategorie)
 - Fahrverhalten (Verkehrssituation nach HBEFA)
 - Längsneigungsklasse (Straßenlängsneigung)
 - Straßenzustand (für die Modellierung von PM₁₀-Emissionen aus Abrieb und Aufwirbelung)



Verkehrszusammensetzung / Flottenzusammensetzung

(1) In der Praxis erfolgt die Angabe der Verkehrsstärke zumeist als Gesamt-Kfz-Verkehrsmenge (DTV) in Verbindung mit dem Schwerverkehrsanteil SV. Diese Angaben sind jedoch für die Emissionsabschätzung unzureichend, da sich sowohl der Leicht- als auch der Schwerverkehr aus mehreren Fahrzeugkategorien mit ganz unterschiedlichen Emissionsverhalten zusammensetzt. Dabei unterscheidet HBEFA folgende Fahrzeugkategorien:

- Pkw
- Kraftrad (KR)
- leichte Nutzfahrzeuge (LNF / Lkw<3,5t)
- schwere Nutzfahrzeuge (SNF / Lkw, Lastzug, Sattelzug)
- Linienbus (LBus)
- Reisebus (RBus)

Jede dieser Kategorien setzt sich wiederum aus einzelnen Fahrzeugschichten zusammen. Wesentliche Gliederungskriterien sind dabei Antriebsart, Abgasreinigungskonzept sowie Hubraumklasse bzw. Fahrzeuggewicht.

(2) Für jede dieser Fahrzeugschichten ist in HBEFA ein Emissionsfaktor für definierte Randbedingungen enthalten. Zur Berechnung eines repräsentativen Emissionsfaktors pro Fahrzeugkategorie müssen diese z. T. sehr unterschiedlich hohen Emissionsfaktoren der einzelnen Schichten entsprechend ihres Fahrleistungsanteils innerhalb der Kategorie gewichtet werden. Die Aufteilung der Gesamtfahrleistung einer Fahrzeugkategorie auf die Fahrzeugschichten wird als Flottenzusammensetzung bezeichnet. Dies hat mit Augenmaß zu erfolgen, da hier eine erste größere Fehlerquelle besteht.

(3) Die Flottenzusammensetzung hängt zunächst von der Straßenlage ab. So haben z. B. Diesel-Pkw auf Autobahnen einen höheren Fahrleistungsanteil als innerorts, während 2-Takt-Pkw aus DDR-Produktion auf Innerortsstraßen noch einen messbaren Fahrleistungsanteil haben, auf Autobahnen hingegen fast nicht mehr anzutreffen sind. Dementsprechend liegen in HBEFA für jede Fahrzeugkategorie Fahrleistungsanteile der Schichten auf Innerorts- und Außerortsstraßen sowie für Autobahnen vor.

(4) Auf Grund des gesetzlich geregelten Inkrafttretens verschiedenen Euro-Normen und der begrenzten Lebensdauer eines Fahrzeugs unterliegt die Flottenzusammensetzung einer starken zeitlichen Veränderung. Die Darstellungen in Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigen den Innerortsfahrleistungsanteil der einzelnen Pkw-Schichten als Mittelwert für Deutschland für das Jahr 2009. Wie stark dieser zeitliche Einfluss ist, zeigt am Beispiel der Bestandsanteile der Pkw-Schichten die Abbildung 13. Diese Darstellung spiegelt die Flottenzusammensetzung entsprechend der aktuellen HBEFA-Version 2.1 wider. Die derzeitige Version weist demnach noch keine Fahrzeuge der Euro 5-Norm aus, ob-



wohl der Euro 5-Anteil an Pkw-Neuzulassungen bereits im Jahre 2008 über 3 % betrug⁵¹.

- (5) Der dritte wesentliche Einfluss auf die Flottenzusammensetzung liegt in der Untersuchungsregion. Wurde in der ersten HBEFA-Version aus dem Jahre 1995 mit der regionalen Unterscheidung nach Deutschland-Ost und Deutschland-West noch der unterschiedlichen Flottenzusammensetzung - die vor allem in dem sehr unterschiedlich hohen Anteil DDR-2-Takt-Fahrzeugen begründet lag - Rechnung getragen, so wurde diese Differenzierung bereits in der zweiten Version 1999 nicht mehr vorgenommen. Dass die regionalen Abweichungen zum bundesdeutschen Durchschnitt relativ groß sein können, zeigt beispielhaft der Bestandsanteil an Diesel-Pkw nach deutschen Bundesländern in Abbildung 14. Danach liegen in allen fünf neuen Bundesländern die Diesel-Anteile deutlich unter dem bundesdeutschen Durchschnitt – Sachsen weist mit 17 % im Bundesvergleich sogar den geringsten Anteil auf. Der reale Bestandsanteil beträgt im Bundesdurchschnitt 25 %, im HBEFA wurden für das Jahr 2008 sogar 29 % prognostiziert. In Anbetracht der dargestellten Unterschiede in der Höhe der Emissionsfaktoren zwischen diesel- und benzingetriebenen Fahrzeugen sind diese regionalen Abweichungen vom Bundesdurchschnitt nicht zu vernachlässigen.
- (6) Für die Emissionsmodellierung sollte deshalb immer mit einer regionalspezifischen, dem realen Fahrzeugbestand des Bezugsjahres entsprechenden Flottenzusammensetzung gerechnet werden. Die Emissionsfaktoren (im folgenden EFA genannt) unterscheiden sich deutlich.

⁵¹ KBA-Statistik / Neuzulassungen im Jahre 2008 nach Emissionen und Kraftstoffen

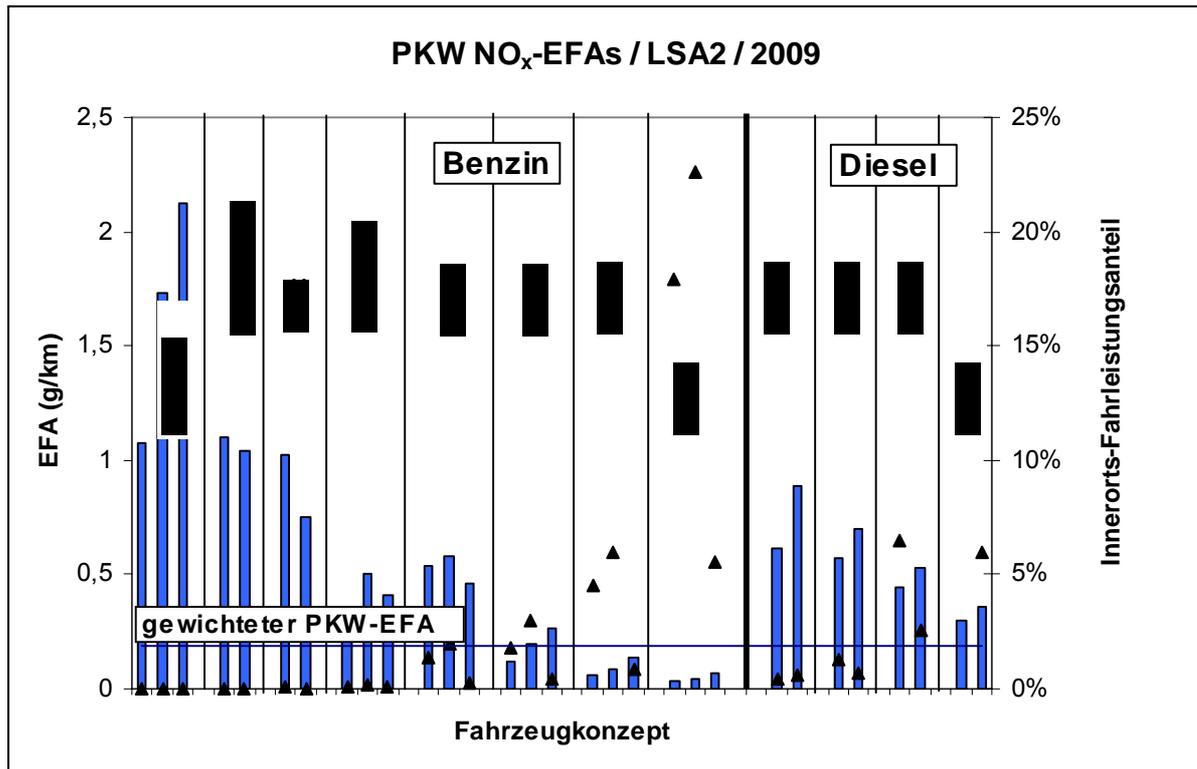


Abbildung 11: NO_x-Emissionsfaktoren (EFA) für Pkw nach Schichten

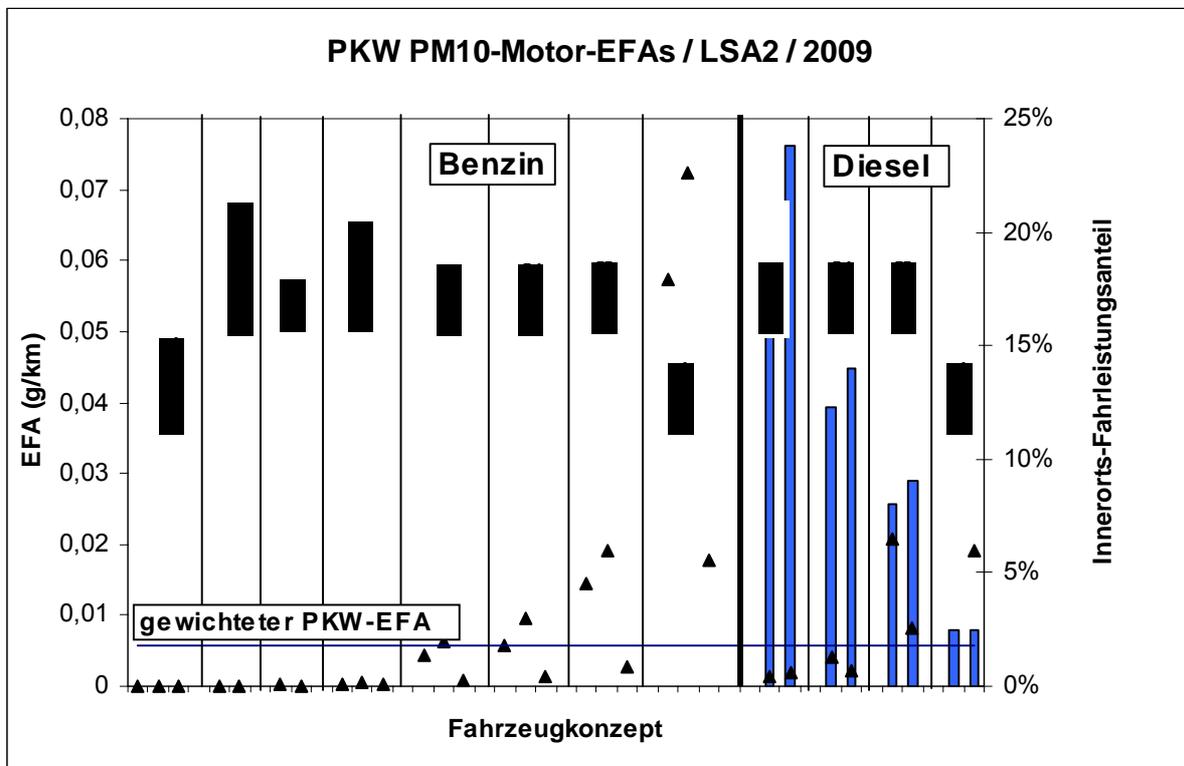


Abbildung 12: PM₁₀-Emissionsfaktoren (EFA) (Motor) Pkw nach Schichten

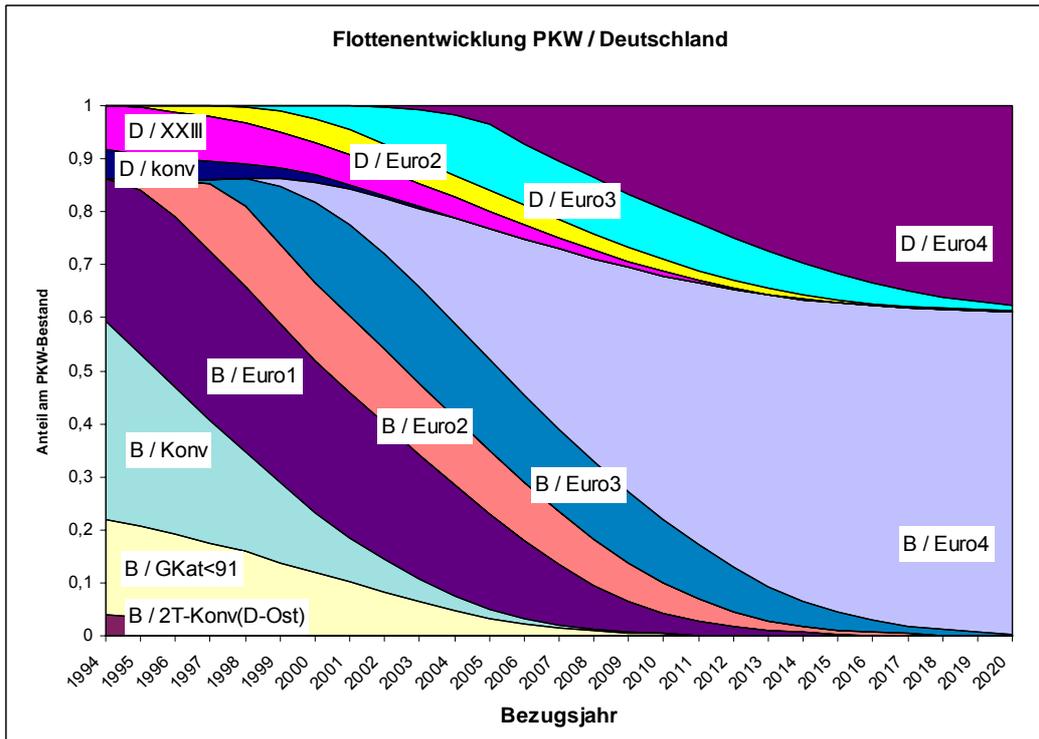


Abbildung 13: Flottenentwicklung Pkw / Deutschland nach HBEFA 2.1

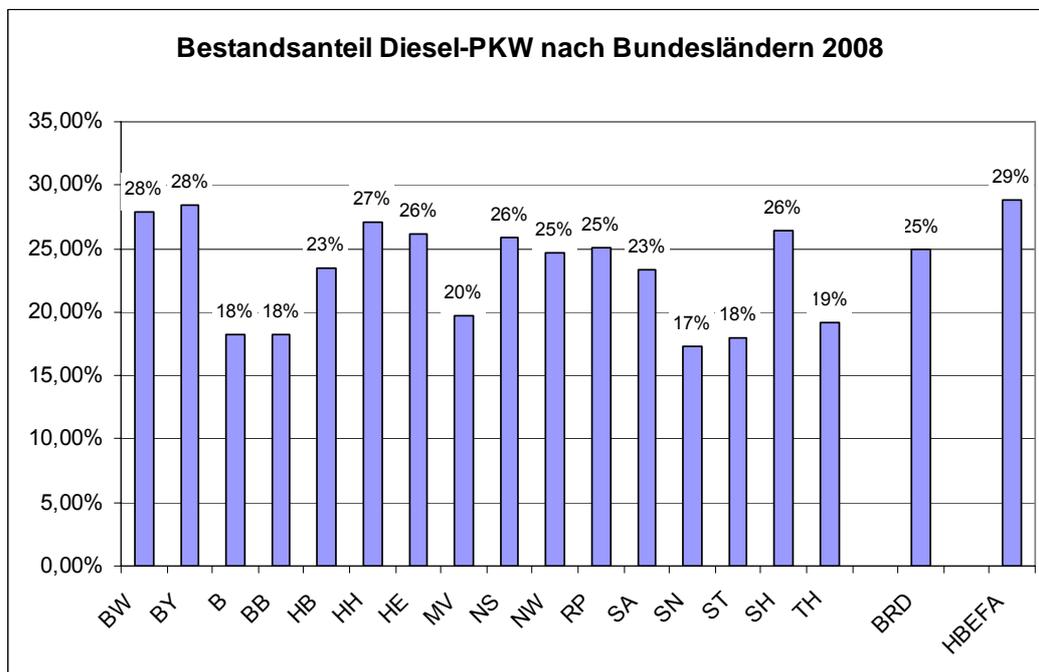


Abbildung 14: Bestandsanteil Diesel-Pkw nach Bundesländern (KBA-Statistik)

(7) In Abbildung 15 sowie Abbildung 16 sind die PM₁₀- bzw. NO_x-Emissionsfaktoren verschiedener Fahrzeugkategorien beispielhaft für die Innerortsverkehrssituation LSA2 dargestellt. Darin sind deutlich die großen Unterschiede im Emissionsniveau der einzelnen Fahrzeugkategorien vor allem zwischen Leicht- und Schwerverkehrskategorien aber auch innerhalb dieser zu



sehen. So sind z.B. die Emissionsfaktoren der Linienbusse um den Faktor 20 bei motorbedingtem PM₁₀ sowie um den Faktor 50 bei NO_x höher als die der Kategorie Pkw.

(8) Aus diesem Grunde hat die Verkehrszusammensetzung einen sehr großen Einfluss auf den Gesamt-Emissionsfaktor. In Abbildung 17 sowie Abbildung 18 ist dieser Einfluss graphisch dargestellt. Demnach erhöht sich bei einer Verkehrszusammensetzung von 99 % Pkw und 1 % Schwere Nutzfahrzeuge der Gesamt-Emissionsfaktor um ca.12 % bei PM₁₀ bzw. ca.40 % bei NO_x gegenüber 100 % Pkw-Verkehr.

(9) Für die Emissionsmodellierung sollte deshalb immer auf eine möglichst genaue Erhebung der Verkehrszusammensetzung geachtet werden.

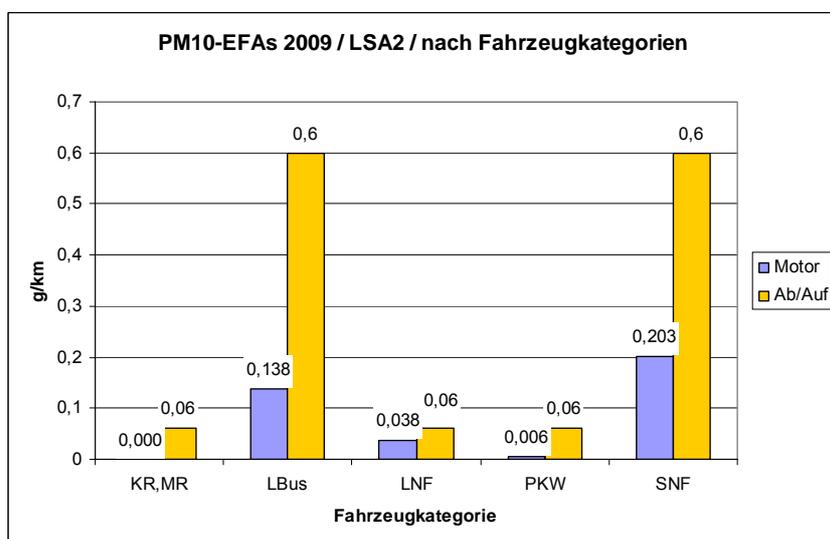


Abbildung 15: PM₁₀-Emissionsfaktoren (EFA) nach Fahrzeugkategorien

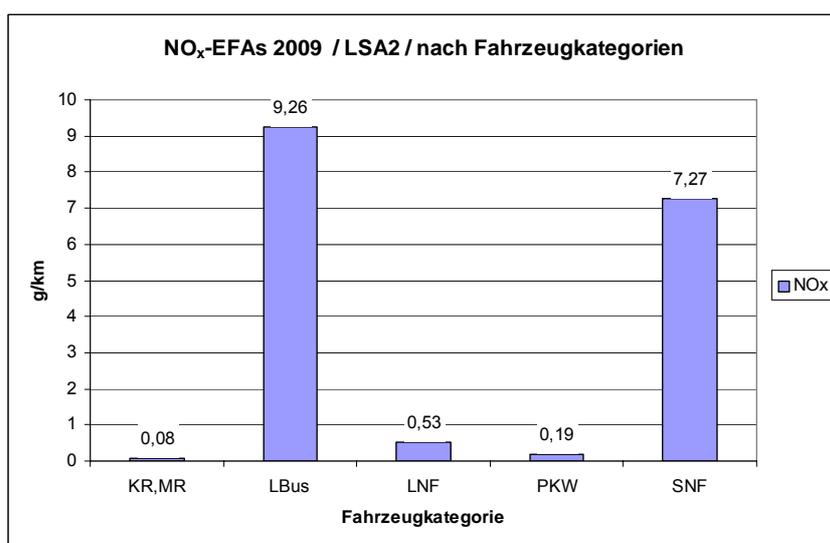


Abbildung 16: NO_x-Emissionsfaktoren (EFA) nach Fahrzeugkategorien

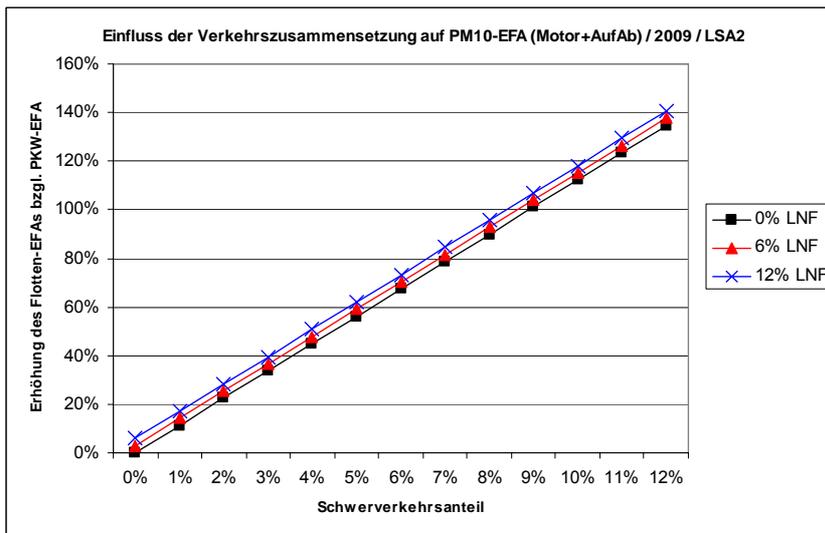


Abbildung 17: Einfluss der Verkehrszusammensetzung auf PM₁₀-Emissionsfaktoren

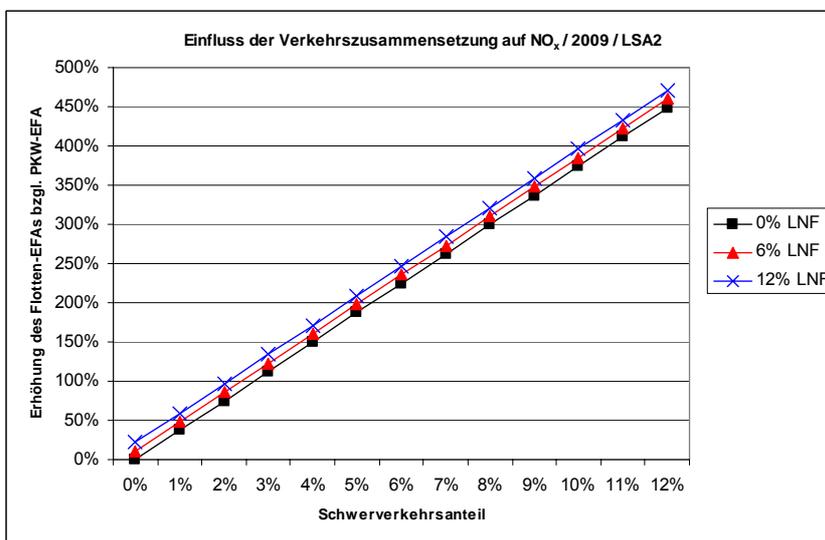


Abbildung 18.: Einfluss der Verkehrszusammensetzung auf NO_x-Emissionsfaktoren

(10) Zu beachten ist allerdings, dass sich die Darstellung für PM₁₀ in Abbildung 17 auf die Gesamt-PM₁₀-Emissionen bezieht, d.h. die Summe der Faktoren für motorbedingte Emissionen und Emissionen aus Abrieb und Aufwirbelung. Da wie in Abbildung 12 dargestellt bei benzingetriebenen Pkw-Schichten in HBEFA keine motorbedingten PM₁₀-Emissionen berücksichtigt werden, diese jedoch innerorts einen Fahrleistungsanteil von ca. 70 % aufweisen ist der gewichtete Pkw-Emissionsfaktor für motorbedingtes PM₁₀ relativ gering. Da die Emissionen für Abrieb und Aufwirbelung nicht von der Antriebsart oder vom Abgasreinigungskonzept sondern vielmehr von der Fahrzeuggröße abhängen, liegen die Emissionsfaktoren dafür nicht schichtfein, sondern lediglich getrennt nach Leicht- und Schwerverkehrskategorien vor. Somit emittiert auch jeder Pkw, unabhängig von der Antriebsart, PM₁₀ aus Abrieb und Aufwirbelung. Der gewichtete Pkw-Emissionsfaktor ist deshalb um den Faktor 10 höher als der Motoremissionsfaktor. Aus diesem Grunde ist auch der Einfluss der



LNF auf den Gesamtemissionsfaktor in Abbildung 17 mit 6 % Erhöhung bei 12 % Fahrleistungsanteil relativ gering. Bei einer ausschließlichen Betrachtung der motorbedingten Emissionen würde sich bei diesem LNF-Fahrleistungsanteil der Gesamtemissionsfaktor um ca. 70 % erhöhen.

Verkehrssituation

- (1) Weiterhin hängt das Emissionsniveau stark vom Fahrverhalten ab, das in HBEFA durch verschiedene Verkehrssituationen beschrieben wird. Während die Verkehrssituationen auf Autobahnen im Wesentlichen über das Tempolimit definiert werden, basieren die Innerorts- und Landstraßensituationen auf Fahrmustern, die in einer Untersuchung im realen Straßenverkehr ermittelt wurden [Heusch/Boesefeldt_1994]. Die Fahrmuster werden dabei durch die Größen Reisegeschwindigkeit, Standanteil, Anteil Konstantfahrt sowie „v mal b-Wert“ ($v \cdot b$, Produkt aus Geschwindigkeit und Beschleunigung) unter Angabe der Perzentile zur statistischen Beschreibung der Mittelwerte definiert. Nach dieser Untersuchung wird das Innerortsfahrverhalten etwa durch sieben verschiedene Fahrmuster beschrieben (siehe Tabelle 8).

Fahrmuster (FM) für Stadtstraßen

	FM 1	FM 2	FM 3	FM 4	FM 5	FM 7
Konstantfahrt (%)	31,8	23,3	36,6	26,2	52,2	46,2
Stand (%)	5,3	32,5	13,5	15,3	0,6	0,7
Reisegeschwindigkeit (km/h)	18,6	19,9	32	37,5	46,2	58,4
V mal b-Wert (m^2/s^3)	-0,32	-0,28	-0,16	0,16	0,55	-0,83

Tabelle 8: Fahrverhaltenskennwerte Basis-Fahrmuster

- (2) Zur weiteren Differenzierung des Innerortsfahrverhaltens wurden in HBEFA auf der Basis dieser sieben Innerorts-Fahrmuster durch Linearkombinationen zehn Innerorts-Verkehrssituationen gebildet. Die Charakterisierung der Verkehrssituation erfolgt in HBEFA dabei zunächst über eine verbale Beschreibung wie z.B. „Hauptverkehrsstraße vorfahrtberechtigt“ (HVS) oder „Hauptverkehrsstraße mit Lichtsignalanlage“ (LSA) sowie einem Grad der Beeinträchtigung des Verkehrsflusses (schwache / mittlere /starke Störungen). Von den Fahrverhaltenskennwerten der zu Grunde liegenden Fahrmuster wird in HBEFA lediglich die Reisegeschwindigkeit angegeben (siehe Tabelle 9).
- (3) Die Wahl der „richtigen“ Verkehrssituation ist unter diesen Angaben schwierig, für das Gesamtergebnis aber entscheidend. Hier liegt die Fehlerquelle für gro-



ße Abweichungen, und hier besteht die Gefahr von Falschzuordnungen bzw. Manipulationsversuchen. Für die Emissionen ist vor allem das Beschleunigungsverhalten („v mal b“ - Wert bzw. Standanteil) wichtig, die Reisegeschwindigkeit ist demgegenüber relativ unwichtig. Allerdings wird in den Emissionsmodellierungen in aller Regel auf die Reisegeschwindigkeit (dies ist der Mittelwert der gefahrenen Geschwindigkeiten; zuweilen wird sogar die Maximalgeschwindigkeit verwendet!) abgehoben. Der Fehler daraus kann beträchtlich sein.

- (4) Ein Vergleich der Abbildung 19 bzw. Abbildung 20 dargestellten Emissionsfaktoren nach ausgewählten Verkehrssituationen zeigt, dass z. B. die Innerortsverkehrssituationen „Nebenstraße/dichte Bebauung“ und „Stadtkern“ mit 19 bzw. 20 km/h nahezu die gleichen Reisegeschwindigkeiten aufweisen, auf Grund des unterschiedlichen Standanteils der zu Grunde liegenden Fahrmuster jedoch zum Teil deutlich unterschiedliche Emissionsfaktoren haben.

HBEFA-Verkehrssituation	Fahrmusterkombination	Geschwindigkeit (km/h)
HVS 1	FM 7	58
HVS 2	FM 5	46
HVS 3	0,5*FM 3 + 0,5*FM 5	39
HVS 4	FM 3	32
LSA 1	0,5*FM 3 + 0,5*FM 5	39
LSA 2	0,33*FM 2 + 0,67*FM 3	28
LSA 3	0,67*FM 2 + 0,33*FM 3	24
Kern Stadt	FM 2	20
Nebenstraße dicht bebaut	FM 1	19
Nebenstraße locker bebaut	FM 3	32
Stop & Go	FM 11	5

Tabelle 9: Innerorts Verkehrssituationen nach HBEFA 2.1

- (5) Eine zweite sehr große Unsicherheit ist mit dem Umgang des Stop&Go-Anteils verbunden. Die Verkehrssituation Stop&Go unterliegt im HBEFA einer strengen multikriteriellen Definition und ist sehr strikt auszulegen; normale Stauzustände sind keine „Stopp&Go-Zustände“ nach HBEFA! Die Emissionsfaktoren für Stop&Go, die z. T. um ein Vielfaches über denen der Regelverkehrssituationen liegen, dürfen demnach nur für Fahrtanteile angewendet werden, die dieser Definition entsprechen. Eine Abschätzung des Stop&Go-Anteils, der für beide Fahrtrichtungen, gemittelt über den gesamten Tagesgang repräsentativ sein soll, ist äußerst schwierig, auf Grund der hohen Stop&Go-Emissionsfaktoren jedoch enorm relevant für das Berechnungsergebnis.



- (6) Deshalb sollte die Ermittlung der Verkehrssituation sowie des Stop&Go-Anteils möglichst messtechnisch erfolgen. Dabei wird durch ein Messfahrzeug, das im Verkehr mitschwimmt (floating-car-Methode) das Fahrverhalten zunächst als Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm erfasst. Aus diesen Daten werden die in Tabelle 8 dargestellten Fahrverhaltenskennwerte berechnet und somit die Verkehrssituation bestimmt. Werte von mehr als wenigen Prozenten Stop&Go-Anteil nach HBEFA sollten immer Anlass zu kritischen Überprüfungen geben: Solche treten in der Realität nur im Ausnahmefall auf.
- (7) Festgehalten muss auch werden, dass die Reisegeschwindigkeit als alleiniger statistischer Wert zur Beschreibung des Fahrverhaltens unzureichend ist. Dadurch kann es bei der Ermittlung der Verkehrssituation in HBEFA zu drastischen Fehleinschätzungen kommen. Die Ermittlung der Verkehrssituation sollte deshalb möglichst messtechnisch erfolgen; besondere Vorsicht sollte bei der Verwendung der Stop&Go-Anteile walten, da dadurch das Berechnungsergebnis in weitem Rahmen manipulierbar ist.

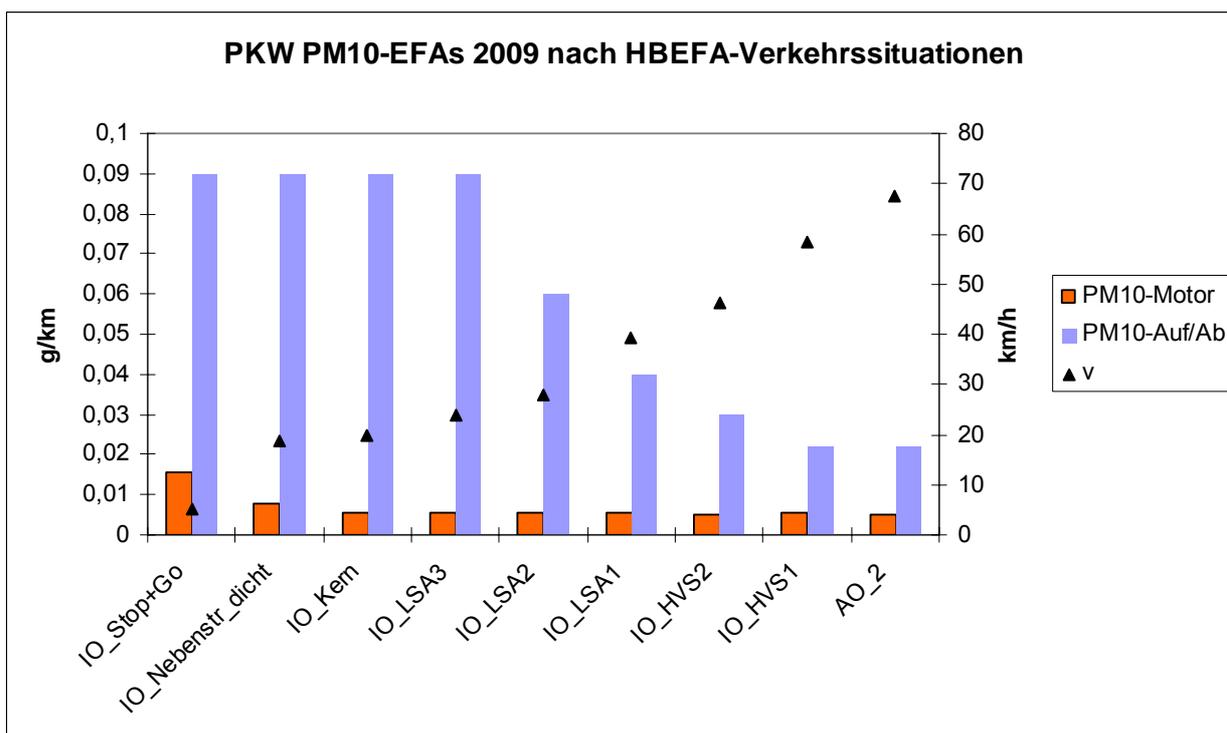
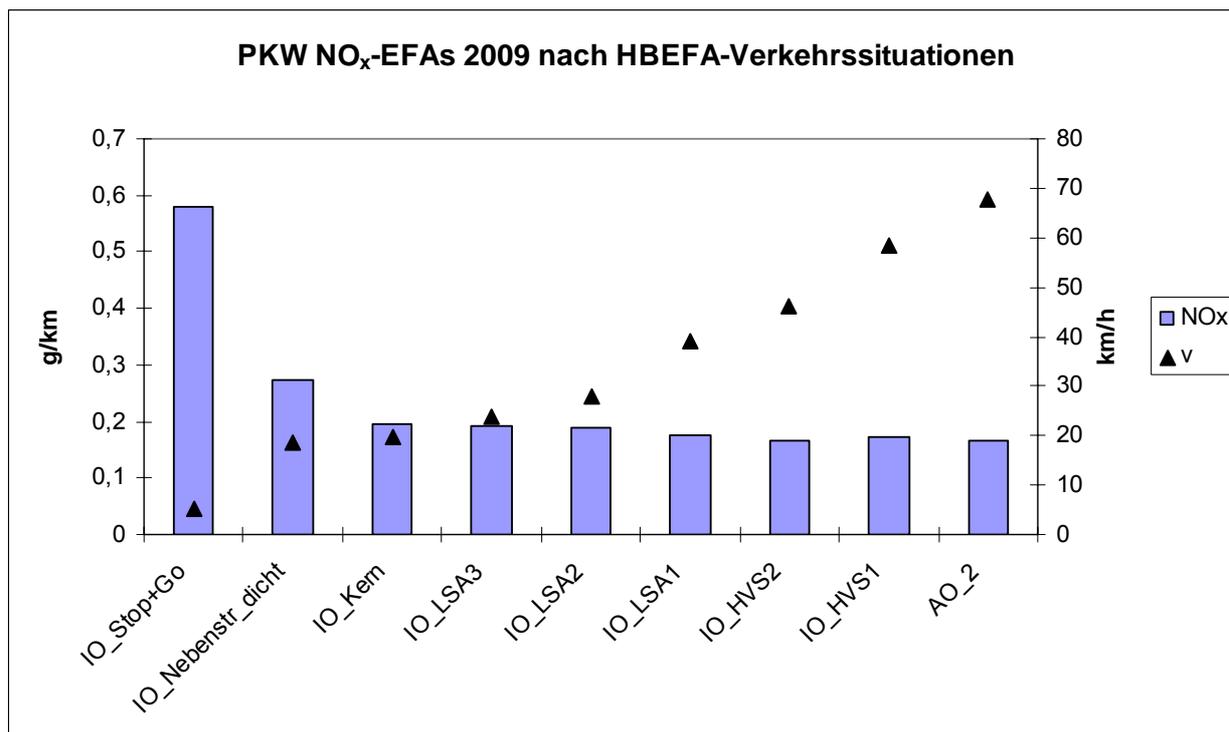


Abbildung 19: PM₁₀-EFAs Pkw nach HBEFA-Verkehrssituationen

Abbildung 20: NO_x-EFAs Pkw nach HBEFA-Verkehrssituationen

Straßenzustand

- (1) Ebenfalls von bislang oftmals völlig verkannter Bedeutung ist der Straßenzustand im betrachteten Bereich; vor allem für die PM₁₀ – Emissionen ist dies relevant. Die nicht motorbedingten PM₁₀-Emissionen umfassen die Emissionen aus Reifen-, Kupplungs-, Fahrbahn- und Bremsabrieb sowie die Emissionen aus Aufwirbelungsprozessen. Zur Modellierung dieser Emissionen aus Abrieb und Aufwirbelung liegen Emissionsfaktoren getrennt nach Leicht- und Schwerverkehrskategorien vor. Diese sind – ebenso wie die Faktoren für motorbedingte Partikelemissionen verkehrssituationsabhängig.
- (2) Darüber hinaus sind die Abrieb- und Aufwirbelungsemissionen jedoch vom Straßenzustand abhängig. Ein schlechter Fahrbahnzustand im Sinne der PM₁₀-Modellierung liegt bei überwiegend sehr rissigen oder löchrigen Fahrbahnoberflächen, verbunden mit unbefestigten oder sehr verschmutzten Nebenanlagen (Gehwege, Randstreifen, Bankette ...) vor. Dementsprechend wird der Straßenzustandswert über die Bewertung der Deckschicht, die Ausführung der Seitenstreifen sowie des Substanzwertes der Straße berechnet. Hier sind ebenfalls Einzeluntersuchungen angeraten, das sich beim derzeitigen Wissensstand der Emissionsfaktor bei einem schlechten Straßenzustandswert in einer Sprungfunktion um einen Faktor von ca. 3,6 erhöht. An dieser Stelle herrscht Forschungsbedarf.

Streckenlängsneigung

- (1) Zur Berücksichtigung des Einflusses der Streckenlängsneigung liegen in HBEFA Emissionsfaktoren für die Längsneigungsklassen 2, 4 und 6 % vor. Wie in Abbildung 21 dargestellt erhöhen sich die Emissionsfaktoren bei 6 % Steigung um z.T. über 100 %. Bei Gefälle sinkt der Emissionsfaktor zwar, jedoch nicht in gleichem Maße, wie er bei Steigung zunimmt, sodass es bei Straßen mit einer Streckenlängsneigung, auf denen der Verkehr im Tagesmittel in beiden Richtungen nahezu gleichverteilt ist zu einer generellen Erhöhung des Emissionsfaktors kommen muss. In HBEFA ist für diesen Fall der Längsneigungseinfluss für Steigung und Gefälle bereits standardmäßig gemittelt. Aufmerksamkeit ist jedoch bei Einbahnstraßen geboten, dort darf in der Emissionsmodellierung entsprechend der zugelassenen Fahrtrichtung nur der Emissionsfaktor für Steigung oder Gefälle verwendet werden.

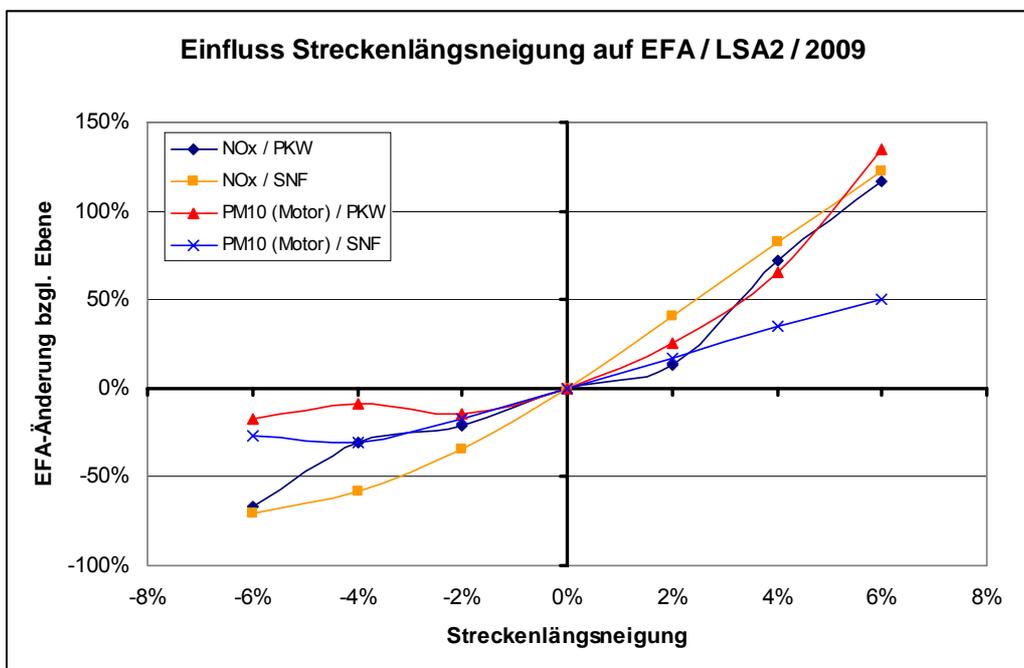


Abbildung 21: Einfluss der Streckenlängsneigung auf die Emissionsfaktoren

- (2) Wegen des relativ steilen Verlaufs der Funktionen bei Steigungen kann angenommen werden, dass bei Straßen mit einer Streckenlängsneigung über 6% zu einer weiteren überproportionalen Erhöhung des Emissionsfaktors kommen muss. Für dies Anwendungsfälle liegen jedoch in HBEFA keine Daten vor. Eventuelle Extrapolationen aus den vorhandenen Werten sind mit Unsicherheiten verbunden. Hier ist Erfahrungswissen des Bearbeiters notwendig, um größere Fehler zu vermeiden.



- (3) Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass es in allen Phasen auf genaue Eingabedaten ankommt, dass aber zur Vermeidung wirklich entgroß verzerrender Berechnungen auf zwei Punkte vorrangig zu achten ist:
1. Die genaue Ermittlung der Verkehrssituation, v. a. den sensiblen Umgang mit Stop&Go-Anteilen
 2. Eine möglichst genaue Erhebung der Verkehrszusammensetzung

2.7 Zeitliche Entwicklung der Emissionen

In diesem Abschnitt wird eine denkbare zeitliche Entwicklung der Emissionen und der Immissionen in Städten diskutiert, wobei der Schwerpunkt auf NO₂ liegt. NO₂ dürfte im Jahr 2010 und danach zu einer deutlichen Verschärfung der Luftreinhaltedebatte führen. Bestimmte Dieselfahrzeuge trugen hier zu einem deutlichen Anstieg des NO₂-Anteils im Abgas bei. Deshalb ist mit einem „Buckel“ bei den NO₂-Immissionskonzentrationen zu rechnen, dessen Höhe und zeitliche Lage sich je nach Kommune unterscheiden dürfte. Wir vermuten, dass sich die heutige Immissionskonzentration (mit geringen Abweichungen nach oben und unten) etwa bis zum Jahr 2015 fortsetzen könnte und dass ohne zusätzliche Maßnahmen mit einer grundsätzlichen Einhaltung der Grenzwerte erst kurz vor dem Jahr 2020 gerechnet werden kann.

- (1) Welche Entwicklungen werden sich nun einstellen, wenn die genannten Immissionsgrenzwerte, die technischen Fahrzeugentwicklungen und die Verkehrsentwicklung zusammentreffen? Wie werden sich alle Einzelfaktoren auf die Höhe der Immissionsmesswerte auswirken? Diese Frage ist entscheidend für die Prioritäten, die in den Kommunen für die verschiedenen Problemfelder und Maßnahmen zu erwarten sein wird. Im folgenden Abschnitt geht es deshalb um die Frage, wie sich denn der zeitliche Verlauf der Immissionen an verkehrsnahen Immissionsmessstellen bis zum Jahr 2020 darstellen könnte. Dabei sind natürlich eine Reihe von Unwägbarkeiten mit zu berücksichtigen.
- (2) Allein die bisherige Nicht-Berücksichtigung der Einführung der Euro 5/Euro 6-Fahrzeuge in den Modellierungen (und auch in den HBEFA Versionen bis 2.1) wird sich hier ebenso hilfreich auswirken wie die technischen oder verkehrsorganisatorischen Maßnahmen. Jede Prognose der Immissionsverläufe sieht sich also Einflüssen gegenüber, die nur schwer quantifizierbar sind. Deshalb sollen die einzelnen Einflussgrößen und Unsicherheiten in diesem Abschnitt diskutiert und quantitativ die Auswirkungen dieser Entwicklungen abgeschätzt werden. Es versteht sich von selbst, dass dies nur *ein* mögliches Zukunftsszenario darstellt. Der Fokus wird dabei auf NO₂ gelegt.



(3) Für die Abschätzungen zum Verlauf der Immissionskonzentrationen bis 2020 sind eine Reihe verschiedener Annahmen und Entwicklungen zu diskutieren. So müssen etwa Annahmen für die folgenden Bereiche getroffen werden:

- a. **Annahmen über die Erstzulassung neuer Fahrzeuge:** Wie viele Fahrzeuge welcher Kategorie werden wann gekauft?

Diese Annahmen lassen sich aus der Vergangenheit gut ableiten und können als relativ stabil angenommen werden. Selbstverständlich hängen sie von ökonomischen Parametern (Kaufkraftentwicklung, „Krisengefühle“) stark ab. Von daher wären eher zögerliche Neuwagenkäufe in den nächsten Jahrzehnten zu erwarten, und das mittlere Alter der Flotte stiege weiter an. Die Erfahrung zeigt aber auch, dass Fahrzeuge mit hohen Umweltstandards dann, wenn sie hergestellt und zum Kauf angeboten werden, auch oftmals vor der gesetzten Frist bereitwillig gekauft werden. Dies würde den Bestandswechsel beschleunigen. Insgesamt dürfte aber künftig von einer verlangsamten Bestandsumschichtung auszugehen sein, vor allem weil ökonomische Rahmenbedingungen knapper werden dürften und weil die Abwrackprämie zum Vorziehen von Fahrzeugkäufen vor die Bundestagswahl 2009 geführt hat.

- b. **Annahmen über die Verschrottung von Fahrzeugen:**

Teilweise wichtiger ist die Entwicklung des Ausscheidens älterer Fahrzeuge, da sie die Emissionen maßgeblich prägen. Hier besteht eine gewisse Unsicherheit, denn zum einen wirken die o. a. Faktoren („Abwrackprämie“, eventuell auch die Reform der Dienstwagenbesteuerung) auch hier und zum zweiten kann es sein, dass aus demographischen Gründen nach der Berufstätigkeit die Fahrzeughalter längere Fahrzeughaltezeiten akzeptieren. Auch hier kann in Summe erwartet werden, dass das durchschnittliche Alter der Fahrzeuge auch weiterhin noch leicht ansteigt. Diese Annahmen halten wir für noch relativ stabil.

- c. **Annahmen über die Jahresfahrleistung je Fahrzeug:**

Diese Annahmen sind oftmals entscheidend, da sie direkt und multiplikativ in die Berechnungen eingehen. Obwohl die Datensituation wenig befriedigend ist, liegen hier doch noch relativ stabile Schätzungen vor: Die Jahresfahrleistung ist (korrelierend mit dem Anstieg der Fahrzeugbestände) leicht zurückgegangen, und auch zukünftig erwarten wir eine abgeschwächte Fortsetzung der sinkenden Jahresfahrleistungen.

- d. **Annahmen über die Umsetzung der technischen Grenzwerte in den Fahrzeugen:**

Hier liegen größere Unsicherheiten bzw. Missbrauchsmöglichkeiten vor. Selbstverständlich halten sich alle Hersteller an die gesetzlichen Vorgaben; die Vorgaben betreffen allerdings nur die Typprüfung. In der Ver-



gangenheit wurde für Immissionsabschätzungen oftmals unterstellt, die realen Fahrzeugemissionen würden sich in etwa proportional zu den (nur für die Typprüfung vorgeschriebenen) Grenzwerten verhalten. Diese Annahme kann als widerlegt gelten, wie etwa die Steigerung der realen NO₂-Emissionsfaktoren bei sinkenden NO_x-Grenzwerten oder die Debatte über „dual mapping“ (Verschiedene Kennfelder bzw. Gemischaufbereitungsstrategien werden gefahren, zum einen für den Normalbetrieb, zum anderen dann, wenn die Elektronik erkannt hat, dass jetzt eine Abgasprüfung gefahren wird!) gezeigt hat. Dieser Punkt ist unsicher: Man könnte unterstellen, dass die Fahrzeughersteller „nun endlich“ alles direkt 1:1 umsetzen, oder man könnte unterstellen, dass die ökonomischen Interessen der Hersteller im Konfliktfalle zwischen „Abgassenkung“ und „Motorleistung bzw. Verkaufserfolg“ der Fahrzeuge den direkten finanziellen Erfolg höher gewichten als Umweltentlastungsmaßnahmen, zumal in Zeiten zurückgehender Gewinne.

e. Annahmen über die technischen Anstrengungen zur Reduktion nicht explizit limitierter Schadstoffe:

Derzeit sind in den gesetzlichen Emissionsgrenzwerten keine Grenzwerte etwa zu NO₂ formuliert; limitiert sind lediglich die NO_x-Emissionen. Nun muss unsicher bleiben, wie sich die EURO 5-Fahrzeuge bzw. die ab etwa 2012/2013 in den Verkehr kommenden EURO 6 - Fahrzeuge bezüglich ihrer NO₂-Emissionen verhalten. Auch hier ist die Situation von großer Unsicherheit geprägt: Manchmal wird angenommen, die Hersteller würden etwa mit SCRT-Konzepten rasche Minderungen erreichen, andere gehen von eher zögerlichen Reduktionseffekten aus, zumal viele der Konzepte noch in den frühen Phasen der Entwicklung stehen.

f. Annahmen über die Auswirkungen der technischen Fahrzeugkonzepte im Alltag:

Neue Fahrzeugkonzepte müssen oftmals über eine gewisse Laufzeit entwickelt werden, ehe sie zur technischen Reife gelangen. Dies konnte beim G-Kat ebenso wie bei Partikelfiltern o. ä. beobachtet werden. Bei der Prognose der Emissionen ist dies einzubeziehen, wir halten Annahmen darüber für vergleichsweise unsicher. Vermuten könnte man, dass die Industrie nur alltagstaugliche und langlebige Produkte verkauft; man könnte aber auch annehmen, dass dabei (Stichwort „offene Partikelfiltersystem“) auch solche Lösungen eingesetzt werden, die nach einiger Zeit nachgearbeitet oder ausgetauscht werden müssten.

(4) Insgesamt ergibt sich damit ein doch weiter Bereich für die Ergebnisse von Emissionsprognosen. Deutschlandweit hat die umfassendsten Erfahrungen mit solchen Prognosen das IFEU in Heidelberg, das auch TREMOD (ein Modell zur Abschätzung der Emissionen) in Zusammenarbeit mit UBA, BMU und den Her-



stellern bzw. Betreibern (Bahn AG, VDA, ...) entwickelt. Aus Tremod-Angaben lassen sich verschiedene Prognosen etwa über die Entwicklung bis 2020 ableiten. So hat das IFEU etwa in einem Modellfall angenommen, die EURO 5 / EURO 6 -Fahrzeuge würden keinen nennenswerten Reduktionseffekt liefern: Unter der unrealistischen Annahme, dass EURO 5 und EURO 6 keine nennenswerten Reduktionen ergeben würden, würde sich für typische innerstädtische Situationen folgender Verlauf bis 2020 ergeben (Stand: Version 2.1 für HBEFA):

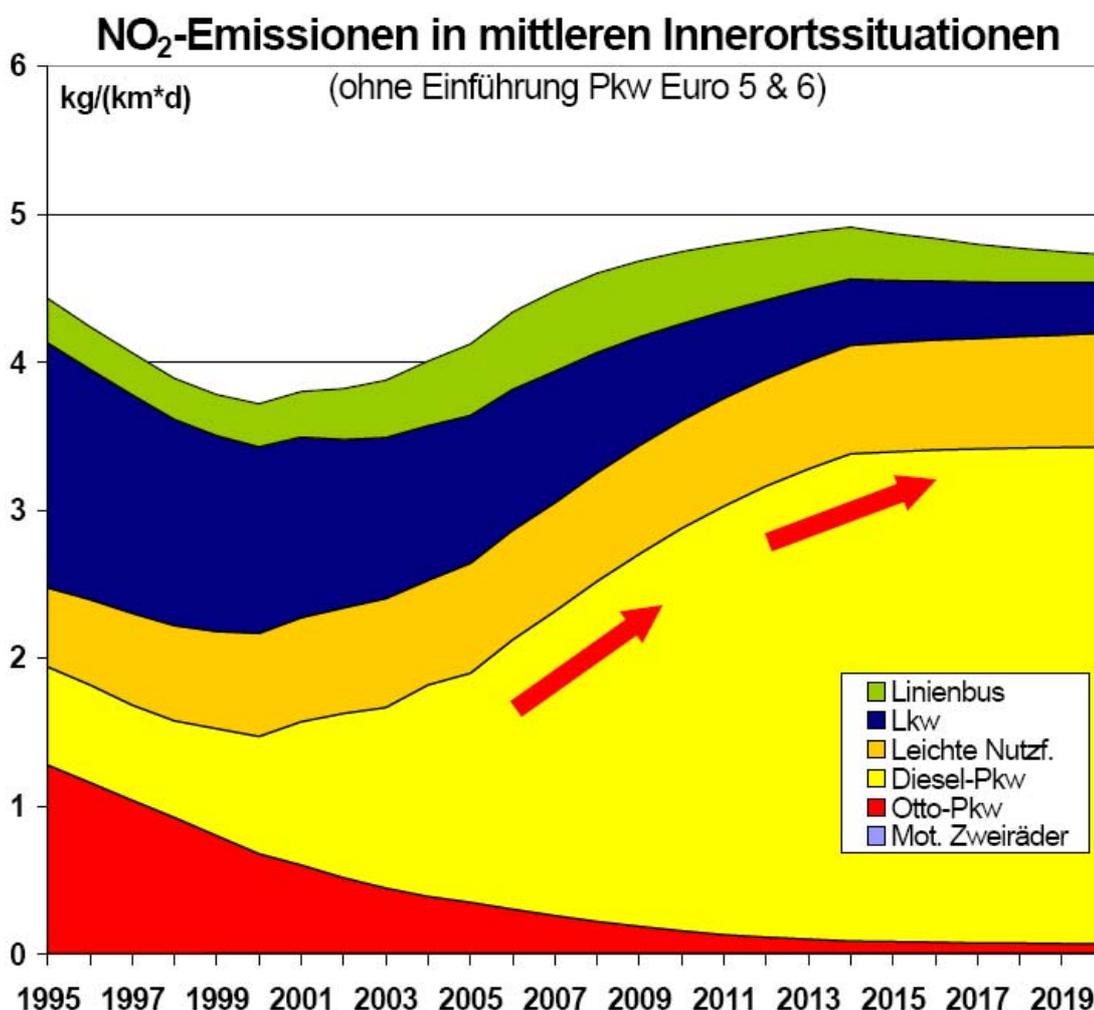


Abbildung 22: NO₂-Emissionen in mittleren Innerortssituationen nach [IFEU_2007]

- (5) Abbildung 22 zeigt, dass sich in den Kommunen unter diesen Annahmen ein Maximum („Buckel“) etwa 2014 ergeben wird. Natürlich wird sich dieser Buckel in verschiedenen Städten zu verschiedenen Zeitpunkten zeigen, natürlich hängt er auch von der Verkehrsmengen- und Fahrleistungsentwicklung ab, aber von der Existenz eines Maximums ist auszugehen. Durch die EURO 5 / Euro 6-Einführung wird der „Buckel“ nun zweifellos zum einen „nach unten gedrückt“



(tiefer zu liegen kommen) und zum zweiten „nach links gedrückt“ (früher zu liegen kommen). Nimmt man auf der anderen Seite nun aber noch an, dass die Hersteller einen gewissen Zeitverzug bis zur konstanten, praxistauglichen Reife ihrer Produkte haben bzw. (wegen der nicht-gesetzlich-geregelten Situation) die Entwicklungen verzögert angehen, dann würde sich der Buckel nochmals nach „rechts oben“ verschieben können.

(6) Aus unserer Sicht dürfte die in Abbildung 22 gezeigte Darstellung den Zusammenhang eher etwas pessimistischer darstellen als wir die Entwicklung erwarten. Wir erwarten zum einen von den EURO 5- und EURO 6-Fahrzeugen rasche und signifikante Reduktionen („Buckel“ wird nach unten gedrückt), zum anderen erwarten wir aber angesichts der wirtschaftlichen Situation (vorgezogene Verkäufe durch Abwrackprämie, wirtschaftliche Schwierigkeiten) eine verzögerte Ausmusterung der besonders NO₂-emissionsintensiven (EURO 3 u. a.) Fahrzeuge, die noch lange betrieben werden dürften. Damit wird der Verlauf der obigen Emissionskurve nach rechts unten verschoben: Die Emissionszunahmen sind nicht so hoch, aber sie bleiben länger erhalten. Aus unserer Sicht ist dies die plausibelste Variante: Es wird ein Maximum geben, dies könnte etwa um das Jahr 2015 liegen, und der Gipfel der Immissionsbelastung dürfte sich etwa in Höhe der Werte Mitte der 90-er Jahre des vergangenen Jahrhunderts bewegen.

(7) Für die Kommunen lässt sich damit festhalten:

- a. Wir haben bei verschiedenen Schadstoffen in Städten Überschreitungen, aber das NO₂-Problem dürfte die Situation nochmals verschärfen und damit auch zum Leitproblem und zum öffentlich wahrgenommenen Hauptproblem werden.
- b. Die in der Vergangenheit verkauften Dieselfahrzeuge, vor allem die nach Euro 3 bzw. Euro 4 zugelassenen, haben eine Steigerung der NO₂-Anteile im Abgas und in den Immissionen bewirkt. Diese Fahrzeuge dürften die Situation bis vielleicht 2012/2014 prägen oder vielleicht sogar noch verschärfen.
- c. Es wird allerdings nicht zu so drastischen Erhöhungen kommen wie sie nach Abbildung 22 zu befürchten wären (dort ohne Euro 5- und Euro 6-Fahrzeuge), eher im Gegenteil: Das Auftauchen neuer Konzepte wird allmählich zu einem doch spürbaren Absinken führen.
- d. Die Zeit bis zur sichtbaren „Verminderung/Lösung“ der NO₂-Problematik dürfte sich allerdings nochmals bis etwa in die Zeitspanne 2015/2020 ausdehnen: Aus unserer Sicht erwarten wir einen Höhepunkt der Messwerte gegen 2015, und es wäre für uns eine Überraschung, wenn sich – immer ohne zusätzlich umgesetzte Maßnahmen gedacht – das NO₂-Problem im Trendfall vor 2020 lösen würde.



2.8 Wechselwirkungen zwischen den Aspekten

Der folgende Abschnitt diskutiert die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Aspekten, Akteuren und Faktoren. Von besonderer Bedeutung sind die Rahmenbedingungen für die geplanten Maßnahmen: Je nach Rahmenbedingung können die Auswirkungen ganz unterschiedlich ausfallen. Generell sind Pakete von Maßnahmen zu empfehlen, die das erwünschte Verhalten attraktiver/günstiger, das unerwünschte Verhalten aber unattraktiver/teurer machen.

Alle Ansätze zur Luftreinhaltung sind primär auf Dieselfahrzeuge hin auszurichten. Da das Problem „nicht automatisch“ verschwindet, haben die Kommunen Maßnahmen umzusetzen. Dabei empfehlen wir, vor allem den ökonomischen und rechtlichen Rahmen zu verändern: Langfristig könnte es z. B. sinnvoll sein, für den Verkehr in Städten nur noch besonders kleine, leichte, saubere und effiziente „Stadtautos“ zuzulassen.

- (1) Den Abschluss des zweiten Kapitels dieser Arbeit stellt ein Beitrag dar, der sich mit den Überraschungen und Unwägbarkeiten beschäftigt, die sich in dynamischen Systemen und bei der Vielzahl der Akteure bzw. Aspekte in einem dynamischen Umfeld ergeben. Das Thema „Verkehr und Umweltschutz“ stellt ein solches Umfeld dar: Das in der Wirklichkeit eingetretene Ergebnis von Maßnahmen entspricht hier besonders oft nicht dem, was man sich zunächst als Ergebnis vorgestellt oder erhofft habe. Dies gilt vor allem im Bereich der Luftreinhaltung, denn gerade dort ist immer wieder zu beobachten, dass sich als Folge vieler gut gemeinter Maßnahmen eine Emissionserhöhung ergibt.
- (2) Das Paradebeispiel solcher Wechselwirkungen ist die traditionelle Reaktion der Kommunen und der Verkehrsplanung auf „Stauerscheinungen“. Staus, interpretiert als „mindestens ein Fahrzeug muss ungewollt anhalten“, führt im allgemeinen zu der politischen Schlussfolgerung, dass die Straßenkapazität nicht ausreicht und ergo mehr gebaut werden muss. Damit erhofft man sich letztlich, dass der Stau reduziert wird, Fahrzeuge Zeit sparen (weil mindestens ein Halt entfällt), Benzin sparen (dito), Lärm und Abgas gesenkt werden und auch die Unfallzahlen sinken. Also wird, auch aus Umweltschutzgründen, die Infrastruktur ausgebaut.
- (3) Leider ist in Marktwirtschaften die Reaktion der Bevölkerung auf ein nun schnelleres, attraktiveres, flüssigeres und damit billigeres Verkehrssystem vorhersehbar: Die Nachfrage steigt. In der Folge kommt es zu mehr, häufigeren und weiteren Fahrten: Die Fahrleistungen steigen ebenfalls. Als Erfahrungswert gilt, dass das mittlere Reisezeitbudget der Einwohner einer Stadt (durchschnittlich 60 - 70 Minuten werden täglich im Verkehr verbracht) ungefähr konstant bleibt: Wer also Halte zu reduzieren versucht, treibt die Verkehrsmenge nach



oben. Nun aber muss es garantiert in jedem System immer einen (neuen) „Ort geringster Kapazität“ geben, und es wird also wieder Stau auftreten: Auf höherem Niveau, an anderer Stelle. Unglücklicherweise sind nun aber die Fahrten im Motorisierten Individualverkehr attraktiviert worden, Radfahren, Zu-Fußgehen und die Nutzung des ÖV gingen zurück. In Summe wird damit mehr und weiter gefahren, und zwar schneller (Lärm, Unfallgefahren), mit mehr Energie und mehr Abgas. Die Maßnahme muss also i. a. kontraproduktiv wirken.

- (4) Ein anderes Beispiel sind die derzeit üblich gewordenen „Telematik- bzw. Nutzerführungskonzepte“, die auch Eingang in viele Luftreinhaltepläne o. ä. gefunden haben. Die Erwartungshypothese ist eindeutig: Angenommen wird, dass die Verkehrsteilnehmer über die tatsächliche Stausituation/Fahrroute nicht informiert seien. Stellt man Ihnen nun „optimale“ Hinweise/Empfehlungen/Routeninformationen zur Verfügung, dann unterstellt man dass sie ihr Verhalten entsprechend ändern und ohne jede weitere Reaktion oder Änderung des Verkehrsverhaltens zu ihrem Ziel fahren. Alle „sonstigen Reaktionen“ werden somit ausgeblendet.
- (5) Auch dieses Beispiel wird zuweilen kontraproduktive Wirkungen ergeben. Zum einen interessieren die Informationen viele MIV-Fahrzeugführer nicht, da sie sich nach eigener Meinung besser im Verkehr auskennen als jedes Fremdsystem. Diejenigen, die die Wegweisungen/Empfehlungen dennoch befolgen, sind oftmals ortsfremde, unsichere oder technikaffine Personenkreise. Haben Sie nun den Eindruck, dass sie durch die Telematikkonzepte keinen Nutzen hatten, ignorieren sie künftig die Hinweise wieder. Stellen Sie fest, dass Ihnen die Telematikkonzepte Vorteile bringen (individuelle Vorteile), dann wird für diese Personen Verkehr attraktiver: Mit den oben geschilderten Reaktionen hin zu längeren, weiteren, häufigeren Fahrten können messbare Emissionsminderungen realistischerweise nicht erwartet werden.
- (6) Ein drittes Beispiel betrifft die „Bevorrechtigung des ÖV an Lichtsignalanlagen“, diesmal aber in umgekehrter Wirkungsrichtung. Bestehen an Lichtsignalanlagen Kapazitätsengpässe, dann ist es immer besser, den ÖV-Fahrzeugen direkte Grünzeit (Priorität) auf Anforderung zu geben. Dies nutzt im allgemeinen mehr Menschen (wenn in Straßenbahnen 100 Personen sitzen, müssten ca. 80 Pkw des MIV in dieser einen Grünphase von wenigen Sekunden ebenfalls die Kreuzung passieren können, um gleiche Reisezeitersparnisse zu erbringen – eine unrealistische Annahme), zum anderen wird dadurch der Öffentliche Verkehr (ÖV) attraktiviert. Natürlich tritt die Nachfragesteigerung im ÖV (besserer Deckungsgrad, mehr Einnahmen, dichter Takt, noch mehr Umsteiger zum ÖV, usw. ...) auch hier auf, und sicherlich werden auch Radfahrer oder Fußgänger oder Menschen, die vorher zuhause blieben, nun graduell zum ÖV wechseln, aber es werden eben auch Fahrer aus dem MIV auf den ÖV umstei-



gen⁵². Diese umgestiegenen MIV-Fahrer stehen nun aber auch an der Lichtsignalanlage nicht mehr als Wartende im Auto: Die restlichen Pkw-Fahrer kommen deshalb tendenziell auch schneller und günstiger über die Kreuzung. Das Ergebnis ist beeindruckend:

Wird Bussen und Straßenbahnen auf Anforderung konsequent sofort „grün“ gegeben, dann wird der ÖV attraktiver, aber auch die Stauercheinungen im MIV werden geringer (wegen der Umsteiger auf den ÖV).

- (7) Eben diese dynamischen Reaktionen sind auch in Luftreinhalteplänen zu beachten, mehr noch: Für die langfristige Wirkung sind sie von ausschlaggebender Bedeutung. Nur deshalb kann es z. B. bei Klimaschutz und Luftreinhaltung sinnvoll sein, zusätzliche Busse selbst dann fahren zu lassen, wenn zunächst damit keine Autofahrt eingespart wird. Zwar steigen damit CO₂- und Abgas-Emissionen, aber der MIV kann dann ggf. so de-attraktiviert werden, dass sich z. B. bessere und ÖV-affinere Standortwahlen ergeben („Firma zieht an die Straßenbahn“). Daraus wiederum ergäben sich dann langfristig möglicherweise CO₂- und Abgasreduktionen.
- (8) Im obigen Beispiel sind die letztlich erreichten Abgas- und CO₂- Reduktionen deshalb unsicher, weil auch beim Einsatz zusätzlicher Busse o. ä. zunächst einmal Verkehr attraktiver wird, auch dies steigert die Nachfrage. Sinnvoll werden solche Konzepte deshalb immer dann, wenn *insgesamt* die Attraktivität von Verkehr nicht erhöht wird. Dies kann man durch sogenannte „Push-&Pull-Konzepte“ erreichen: Dort wird das attraktiviert, was man fördern, besser stellen, haben möchte (also etwa emissionsarme Fahrzeuge), und gleichzeitig wird das de-attraktiviert, verlangsamt, teurer, schlechter gestellt, was man nicht haben möchte (z.B. flächenintensive SUV-Fahrzeuge in der Innenstadt). Erst Push&Pull (auch Zuckerbrot und Peitsche, carrot and stick genannt) versetzen Luftreinhalteplanungen in die Lage, sichere Emissionsreduktionen vorhersagen zu können. Für unsere Problematik bedeutet dies, dass Konzepte zur Verringerung der Abgasemissionen, des Lärms, der CO₂- Emissionen, des Flächenverbrauchs, der Unfallzahlen usw. immer so gestaltet werden müssen, dass das erwünschte Verhalten attraktiver/günstiger, das unerwünschte Verhalten aber unattraktiver/teurer wird.
- (9) Damit kann die Gesamtattraktivität des Systems gleich gehalten werden; zwar wird manches Verhalten teurer/unattraktiver (und dafür gibt es ja Gründe, die alle einsehen können: „Alte Stinker haben in der Innenstadt bei den vielen Menschen nichts verloren!“), aber parallel wird eine attraktive Ausweichoption für alle angeboten („Aber das ist ja nicht schlimm, für Sie haben wir neue Nie-

⁵² Natürlich nur in geringem Umfang, hier geht es nur um die Wirkungsrichtungen bzw. um die Grenznutzer. Wird dieser Ansatz systemweit verfolgt, potenzieren sich aber auch die wenigen Reaktionen sehr rasch.



derflurbusse von der Stadtgrenze bis zum Stadtzentrum eingerichtet: Sie können ja umsteigen!“).

- (10) Ein zweiter, unumgänglicher Aspekt angesichts der Unsicherheit der dynamischen Wechselwirkungen in Systemen ist die Notwendigkeit, nach Umsetzung einer Maßnahme *immer* eine kontinuierliche Erfassung der Maßnahmewirkungen sicherzustellen. Der in neudeutscher Sprache hierfür verwendete Begriff lautet „monitoring“: Direkt nach Umsetzung der Maßnahme und in regelmäßigen Abständen danach ist eine Erfassung der Wirkungen sicherzustellen und der Öffentlichkeit vorzulegen.
- (11) Zum einen lassen sich durch „monitoring“ Fehlfunktionen, Schlupflöcher oder unerwartete Wirkungen besser und rasch erkennen und beseitigen. Zum zweiten aber, und es mag noch wichtiger sein, ist durch die Information der Öffentlichkeit darüber sicher zu stellen, dass die Akzeptanz der Maßnahme wächst. Eine Änderung ihres individuellen Verkehrsverhaltens stellt für viele Menschen mit habitualisiertem Verhalten (Verhalten, das der Gewohnheit folgt und nicht ständig hinterfragt wird) eine große Belastung dar; die „Kosten“ dafür werden oft als sehr hoch eingeschätzt. Durch Monitoring kann nun aber belegt werden, dass die Maßnahme wirkt und dass die gewünschten Ausweichreaktionen funktionieren. Dies hat zum Teil durchschlagende Effekte: bei der Einführung der „congestion charge“ in London wurden die Umweltentlastungs- und Verkehrsentlastungseffekte täglich erhoben und im Monatsturnus veröffentlicht. Bei der Einführung der Stockholmer Innenstadtmaut wurden die ersten Wirkungsabschätzungen am Morgen des ersten Maßnahmentages (!) vorgelegt, und die Reaktionen von Presse und Bevölkerung bestätigten dann teilweise erst im nachhinein die hochgerechneten Resultate. Hier zeigt sich besonders, dass in dynamischen Systemen Ursache und Wirkung nicht mehr zu trennen sind bzw. sich sogar teilweise drehen.
- (12) Zusammenfassend kann man damit festhalten: Der Schwerpunkt von Klimaschutz- bzw. Luftreinhalteplänen in Städten muss sich künftig auf den Verkehrsbereich verlagern, dies dürfte unstrittig sein. Dabei kann man für die hier interessierenden Fragen - bei aller Vorsicht bezüglich der denkbaren Änderung von Rahmenbedingungen - festhalten:
- Im Stadtverkehr werden auch künftig mehr Benzin-Pkw als Diesel-Pkw anzutreffen sein, wobei der Dieselanteil noch schwach steigen dürfte.
 - Bezogen auf die Reduktion der relevanten Luftschadstoffe spielen Fahrzeuge mit Dieselmotoren (Diesel-Pkw, Diesel-Lkw und Dieselbusse) die Hauptrolle. Die Anstrengungen sind hierauf zu konzentrieren. Diese drei verschiedenen Bereiche sind bei Maßnahmenpaketen ggf. durch drei getrennte „Push&Pull-Pakete“ aufzunehmen.
 - Ganz besonders die NO₂-Problematik wird sich nicht automatisch, allein durch fahrzeugseitige Verbesserungen, entschärfen. Die Euro 5 - und



Euro 6 - Konzepte wirken, aber wohl nur mit Verzögerung, und sie unterliegen Unwägbarkeiten. Die NO₂-Emissionen werden, wenn man nur Fahrzeugtechnikmaßnahmen einbezieht, einen Buckel aufweisen, von dem aus sie allmählich absinken werden. Wir gehen davon aus, dass ohne zusätzliche Maßnahmen etwa bis 2020 das Problem als gelöst betrachtet werden kann. Mit anderen Worten: Die Kommunen müssen jetzt zwingend zusätzliche Maßnahmen entwickeln und umsetzen.

- d. In der Diskussion wird oft auf neue Fahrzeuge abgehoben. Alle alternativen Fahrzeugkonzepte (Hybrid-, Elektro- oder Gasfahrzeuge) sind hilfreich, nützlich, förderungswert und auch (innerhalb genau festzulegender Anwendungsbereiche) umweltentlastend. Sie spielen allerdings bei den hier relevanten Problemen und Größenordnungen praktisch keine nennenswerte Rolle und werden leider bis zum Jahr 2020 die bestehende Situation auch nicht grundsätzlich ändern können. Wer also jetzt ausschließlich auf die Karte „neue Fahrzeugkonzepte“ setzt, verschiebt die Lösung der aktuellen Probleme um Jahre nach hinten.
- e. Alternative Fahrzeugkonzepte können in einzelnen Nischen eine positive Rolle spielen, wenn die Rahmenbedingungen (z.B. der Energieerzeugung) entsprechend gelten. Die alternativen Konzepte können allerdings langfristig, wenn die entsprechenden Rahmenbedingungen richtig eingesetzt werden, durchaus sinnvolle Anwendungen gerade im Stadtverkehr übernehmen. Angestrebt werden sollte dann aber eine grundsätzliche Änderung von Fahrzeugen des Motorisierten Individualverkehrs in Städten: Längerfristig sollte dort die Zufahrt nur noch für umweltschonende, kleine, leichte und saubere Fahrzeuge möglich sein. Wie dieses Fahrzeug angetrieben wird ist unwichtig; die Höchstgrenzen für den Ansatz sind noch detailliert festzulegen. Aus unserer Sicht könnte dies etwa sein,
 - i. eine maximale Leermasse von 200 – 300 kg,
 - ii. eine Höchstgeschwindigkeit von maximal 59 km/h
 - iii. und Euro 6 Abgasgrenzwerte

vorzugeben. Im Rahmen dieser Vorgabe dürfen die Hersteller dann alle beliebigen Konzepte entwickeln und umsetzen; dann sind sowohl Elektrofahrzeuge als auch Verbrennungsmotorkonzepte (ggf. als Hybrid) sinnvoll. Motorisierungen dieser Fahrzeuge dürften sich zwischen 5 und 10 kW bewegen, damit sind diese Fahrzeuge für Städte sicher ausreichend stark. Die sich daraus ergebende Reichweite für E-Fahrzeuge könnte vielleicht 50 bis 80 km betragen, und 2 Personen plus Gepäck (bzw. 2 Personen + 2 Notsitze) sind sicher transportierbar. Ein solches Fahrzeug würde (je nach Randbedingungen) auch die Klimaschutzproblematik im Verkehr entschärfen.



3 Kommunale Handlungsmöglichkeiten

In diesem Abschnitt werden die kommunalen Einflussmöglichkeiten zur Luftreinhaltung diskutiert. Derzeit ist es so, dass die Kommunen bei den gegebenen Rahmenbedingungen nur einen begrenzten Einfluss auf die Luftschadstoffemissionen haben; der Großteil der Kompetenzen und der relevanten Maßnahmenmöglichkeiten ist weiter oben (Land, Bund, EU) angesiedelt. Andererseits werden z. B. von europäischer oder bundespolitischer Ebene Zuständigkeiten und Verantwortlichkeiten häufig auf die kommunale Ebene verlagert. Die den Kommunen zur Verfügung stehenden Maßnahmen werden im folgenden zusammengestellt, wobei die verkehrsökologische Tautologie als Instrument genutzt und erläutert wird.

Die Abschätzung der kommunalen Einflussmöglichkeiten ergibt zunächst einmal das Ergebnis, das mit den traditionellen Maßnahmen und Kompetenzen die verbindliche Einhaltung der ab 2010 geltenden Grenzwerte nicht möglich sein wird. Die derzeit politisch präferierten und unterstützten Maßnahmen lassen z. B. die NO₂ – Grenzwerte an stark verkehrsbelasteten Straßen und Messstellen als nicht erreichbar erscheinen. Kommunale Möglichkeiten zur Reduktion der Luftschadstoffe des Verkehrs und kommunale Verantwortlichkeit klaffen also weit auseinander. Für die Einhaltung der Immissionsgrenzwerte sind die Kommunen beispielsweise direkt verantwortlich, aber die konkret zulässigen Möglichkeiten und der Widerstand von Betroffenenenseite verwehren den Kommunen weitgehend die dazu geeigneten Handlungsoptionen.

- (1) Sollen in einer Kommune Maßnahmen zur Luftreinhaltung entwickelt werden, so herrscht üblicherweise kein Mangel an Vorschlägen, vor allem von technischen Lösungsvorschlägen. Untersucht man dann den Beitrag zur Lösung der Probleme, den jeder einzelne Vorschlag erbringt, dann zeigen sich schnell, dass eine Reihe von Ansätzen keinen oder nur einen geringen Beitrag leisten können zur Reduktion der Emissionen; manche Maßnahmen sind, wie oben gezeigt wurde, sogar kontraproduktiv. Zur Abschätzung der Emissionsreduktionen ist also ein Instrument bzw. ein Modell notwendig.
- (2) Üblicherweise wird dabei so vorgegangen, dass zunächst ein Bezugsfall („Analyse“) ermittelt wird, in dem die Emissionen der vorhandenen Fahrzeuge, die Entfernungen, Fahrverläufe usw. erhoben werden. Für jeden Maßnahmenvorschlag werden sodann in diesem Datensatz die als veränderlich definierten Parameter ausgetauscht (etwa: Ersatz aller Diesel-Pkw durch Elektro-Pkw, dann werden die Emissionsfaktoren der Fahrzeuge verändert bzw. auf Null gesetzt) und alle anderen Faktoren unveränderlich gelassen werden. Man nimmt also



vereinfacht an, jede Maßnahme würde immer nur einen Parameter in der Emissionsabschätzung verändern.

- (3) Ein solches Vorgehen ist allerdings i. a. nicht zielführend, denn dabei werden dynamische Reaktionen und Veränderungen des Nutzerverhaltens ausgeklammert. Diese Reaktionen sind aber für die Berechnung der Emissionswirkung entscheidend. Um im obigen Beispiel zu bleiben: Würden alle Diesel-Pkw durch Elektrofahrzeuge ersetzt, dann würde gerade nicht alles gleich bleiben (und sich lediglich der Emissionsfaktor ändern), sondern das gesamte Verkehrsverhalten würde sich umstellen: Elektrofahrzeuge haben andere Betriebsbedingungen, manche Familien würden sich vielleicht statt des Diesel-Pkw einen Elektro-Pkw (für die Stadt) und einen Benzin-Pkw „für das Wochenende“ anschaffen, andere würden auf den Öffentlichen Verkehr umsteigen, manche Fahrt würde unterbleiben („Batterie muss erst aufladen“), Fahrtrouten würden geändert („Fahre nicht zum Supermarkt auf der grünen Wiese sondern zum Laden in der Nachbarschaft, Batterie ist schon fast leer!“) usw.
- (4) Für alle Maßnahmenabschätzungen ist es deshalb unumgänglich, die Reaktion aller Nutzer, der Firmen und Institutionen bis hin zu kreativen Innovationen und Ausweichhandlungen der Betroffenen („Umzüge“ o. ä.) einzubeziehen. Dazu muss jede Stadt ein Verfahren entwickeln bzw. einsetzen, das diese Reaktionen umfasst. Traditionelle Verkehrsplanungsmodelle („VISUM“ o. ä.) sind dazu NICHT geeignet, da dort lediglich im Rahmen der aktuellen Optionen modelliert wird und keine dynamischen Reaktionen (etwa: Änderung der Fahrtenzahl) überhaupt erfassbar ist. Ein auch didaktisch sinnvoll einsetzbares Instrument stellt dagegen die verkehrsökologische Tautologie dar.

3.1 Die verkehrsökologische Tautologie

Die verkehrsökologische Tautologie ist ein Ansatz, der die Umweltbelastung aus dem Verkehr auf fünf praxistaugliche und allgemein verständliche Einflussgrößen zurückführt. Damit ist es möglich, die in einem Gebiet innerhalb eines Zeitraums zu erwartende Umweltbelastung so abzuschätzen, dass dynamische Wirkungen erfasst werden können. Wird die Wirksamkeit einer Maßnahme aus der Maßnahmenwirkung bei einem einzelnen Faktor (z.B. dem technischen Emissionsfaktor) abgeleitet, so gehen die Auswirkungen der Nutzerreaktionen beispielsweise verloren.

Sinnvoll ist es daher, die verkehrsökologische Tautologie zum einen zur Abschätzung der tatsächlich zu erwartenden Maßnahmeneffekte zu verwenden – wobei die dynamischen Veränderungen durch eine Maßnahme bei *allen* Einflussfaktoren unbedingt einzubeziehen sind. Zum zweiten kann sie für die Ableitung denkbarer Maßnahmen zur Senkung der Umweltbelastung verwendet werden.



- (1) Die verkehrsökologische Tautologie wurde entwickelt, um systematisch und nachvollziehbar alle Möglichkeiten zu untersuchen, die Umweltbelastungen, Abgasemission, Lärmemissionen, Energieverbräuche, Klimagasemissionen usw. für einen bestimmten Raum (etwa eine Stadt) und eine bestimmte Zeit zu bestimmen. Ausgangspunkt der Tautologie ist die Aufspaltung der Umweltwirkungen in verkehrlich bekannte Grundgrößen wie die gefahrenen Fahrzeugkilometer, den Besetzungsgrad oder die Anzahl der Fahrten in einem bestimmten Raum-Zeit-Intervall. Es ergibt sich die folgende Struktur:

$$\frac{\text{Emission}}{\text{Jahr}} = \text{Einwohnerzahl} \times \frac{\text{Fahrten}}{\text{Person}} \times \frac{\text{Personenkilometer}}{\text{Fahrt}} \times \frac{\text{Fahrzeugkilometer}}{\text{Personenkilometer}} \times \frac{\text{Emission}}{\text{Fahrzeugkilometer}}$$

- (2) Mit anderen Worten: Die Umweltbelastung je Raum und Jahr ergibt sich als Produkt von fünf Faktoren, nämlich
- der Anzahl der Menschen im Untersuchungsgebiet
 - der Anzahl der motorisierten Fahrten je Person im Zeitraum
 - der Reiseweite je motorisierter Fahrt („Wie weit ist das Ziel entfernt?“)
 - dem Kehrwert des besetzungsgrades („Wie viele menschliche Fahrwünsche werden mit einem Fahrzeug gleichzeitig abgedeckt?“)
 - dem technischen Emissionsfaktor in Gramm je Fahrzeugkilometer des betreffenden motorisierten Fahrzeugs.
- (3) Zur Abschätzung der Gesamtwirkung einer Maßnahme ist nun der Einfluss der Maßnahme auf jeden Einzelfaktor offen zu legen. Dabei gilt:
- Faktor 1 (die Einwohnerzahl) kann dabei, wenn durch die Maßnahme keine Bevölkerungswirkungen aufweist, konstant gehalten werden.
 - Die Faktoren 2 bis 5 beschreiben die verkehrlichen Reaktionsmöglichkeiten: Jede Maßnahme wird im Normalfall in jeder der folgenden vier Bereiche Auswirkungen zeigen. Ansätze, die direkt auf die Anzahl der (motorisierten) Fahrten einwirken, wirken sofort in entsprechendem Umfang auf das Gesamtergebnis. Das selbe gilt für die Reiseweite und den Kehrwert des Besetzungsgrades, jeder einzelne Faktor schlägt sofort und ungefiltert auf das Endergebnis durch. Natürlich gilt dies auch für den spezifischen Emissionsfaktor, auch der Technikfaktor schlägt durch: Aber er ist nur einer von fünf Faktoren.
- (4) Wird also z. B. durch ein neues technisches Konzept (z. B. das Elektroauto) der Energieverbrauch etwa halbiert, dieses Fahrzeug aber als Zweitwagen genutzt, dann können die motorisierten Fahrten durchaus um 50 % ansteigen, die Reiseweite mag um vielleicht 30 % zunehmen (weil vorherige Fußwege durch Fahrten mit dem Elektroauto ersetzt werden o. ä.), der Besetzungsgrad nimmt um ca. 20 % ab (die Familie verfügt über ein Auto zusätzlich), sodass sich letzt-



lich ergibt (alle Zahlen sind fiktiv gewählt, bitte nicht auf reale Situationen übertragen):

$$\text{Gesamtwirkung} = 1,0 * 1,5 * 1,3 * 1,2 * 0,5 = 1,17$$

Durch die Maßnahme hätte sich in diesem Fall der gesamte Energieverbrauch insgesamt deutlich erhöht, obwohl die neuen Fahrzeuge nur halb so viel Energie verbrauchen wie die vorher vorhandenen.

(5) Für die Gesamtbewertung der Maßnahmen, die sich aus der Kombination aller Einzelauswirkungen ergibt, muss deshalb unbedingt jeder einzelne Reaktionsweg dynamisch abgeschätzt werden. Im obigen Beispiel (Ersatz von Diesel-Pkw durch Elektroautos) ist das zunächst vielleicht erwartete Ergebnis, dass die städtischen NO₂- und CO₂-Emissionen dadurch auf fast Null absinken und sonst nichts passiert, unrichtig. Stattdessen könnten sich eine Vielzahl von Reaktionen einstellen, vom Verzicht auf Fahrten bis zu Fahrgemeinschaften, vom Umstieg auf den ÖV bis zur verstärkten Nutzung von Fahrrädern, vom Ausweichen auf andere Verbrennungsmotoren bis zu völlig anderen Einkaufszielen usw., die vielleicht kontraproduktiv wirken, wenn an den Randbedingungen in der Stadt sonst nichts geändert wird.

(6) Damit sind an dieser Stelle die Rand- bzw. Rahmenbedingungen für das Handeln der Städte und der Einwohner angesprochen:

Ofdmals ist zu beobachten, dass Umgang und Gestaltung der allgemeinen Rahmenbedingungen für die Wirksamkeit einer Maßnahme wichtiger sind als die Details der Maßnahme selbst.

Wie die steuerlichen Mechanismen in einer Stadt wirken, wo sich Einkaufszentren niederlassen, wie die Einwohnerschaft zusammenhält oder eben nicht, welche Zielvorstellungen bzw. „Kultur“ in der Stadt herrscht usw. besitzt großen Einfluss auf die Maßnahmeneffekte. Dies bedeutet umgekehrt, dass jede Maßnahme im jeweiligen Kontext betrachtet werden muss.

(7) Würde – um nur ein Beispiel zu nennen – eine Stadt für die Einfahrt von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren komplett gesperrt (natürlich erst nach einer Übergangszeit!) und hätte diese Stadt in dieser Übergangszeit proaktiv die Entwicklung von Verbreitung von kleinen und leichten Stadtautos propagiert und umgesetzt, dann hätte die oben angesprochene Maßnahme „Ersatz von Pkw durch Elektroautos“ ganz andere Maßnahmeneffekte erbracht. Unter den dann ganz anderen Randbedingungen hätte man ggf. folgende Effekte beobachten können

- a. Die Einwohnerzahl steigt um vielleicht 1 %, denn die Stadt wird sicherer, leiser, attraktiver für Familien (i. a. erwünscht!)



- b. 80 % der Familien nutzen nach der Übergangszeit Elektroautos, aber 20 % kauften kein Auto mehr, sondern nutzen zur Hälfte vor allem Rad und Fuß, in der anderen Hälfte vor allem Bus und Bahn
- c. Da sich der ÖV auf wesentlich mehr Kunden einstellen kann, werden zusätzliche Busse und Straßenbahnen angeschafft: Die Zahl der Straßenbahnen nimmt um ca. 10 %, die der Busse um 5 % zu (emissionserhöhende Wirkung)
- d. Modal-Split Anteile von Rad und Fuß und ÖV nehmen insgesamt, bei allen Nutzern um jeweils 10 Prozentpunkte zu, die mittlere Reiseweite sinkt dadurch um 40 %
- e. Der Besetzungsgrad im ÖV verdoppelt sich
- f. Die Zielwahl verändert sich dramatisch: Im Mittel könnten die Entfernungen um größenordnungsmäßig 40 % sinken, vor allem innerstädtische Ziele werden angefahren.
- g. Weil es sich um kleine und leichte Elektroautos handelt, sinkt der Energieverbrauch um 80 %.

Damit aber könnte sich die *Größenordnung* der Gesamtwirkung eventuell wie folgt ergeben (alle Zahlen soll nur zur Verdeutlichung des Beispiel):

$$\text{Gesamtwirkung} = 1,01 * (0,8+0,1) * 0,6 * (1-0,1) * 0,2 = 0,10$$

Durch die geänderten Rahmenbedingungen wäre es in diesem Fall möglich gewesen, den gesamten Energieverbrauch auf etwa ein Zehntel (!) des Vorherwertes zu drücken. Sicherlich ist das Beispiel extrem gewählt, aber es zeigt doch, dass „die selbe Maßnahme“ je nach Randbedingung einmal verbrauchs- und emissionserhöhend, einmal aber deutlich reduzierend wirken kann.

- (8) Die verkehrsökologische Tautologie benennt damit auch die vier (bzw. fünf) Hauptansatzfelder zur Verringerung der Umweltwirkungen von Verkehr. Die Faktoren zwei bis vier beziehen sich vorrangig auf die Vermeidung von Verkehr; dies ist ein zentraler Ansatzpunkt. Werden weniger und/oder kürzere und/oder besser ausgelastete Fahrten unternommen, so wird die Umwelt bei sonst gleichbleibenden Bedingungen weniger belastet, ohne dass zusätzliche Kosten bspw. für technische Maßnahmen entstehen. Für eine Änderung von Zahl und Länge von Fahrten spielt die Raumordnung eine zentrale Rolle: Sollen die Menschen kürzere Wege zurücklegen, so müssen sich die Ziele, die sie erreichen wollen, in geringer Entfernung befinden; Multifunktionalität wird so plötzlich zum entscheidenden Ansatz für Luftreinhaltungspolitik. Dies aber bedeutet im Klartext, dass nicht allein die Technik einzubeziehen ist, sondern vorrangig nun Faktoren wie Raumordnung, Verkehrsverhalten, Lage von Geschäften usw.
- (9) Die verkehrsökologische Tautologie kann weiter zur Strukturierung der Maßnahmvorschläge dienen: Durch systematisches Gliedern aller denkbaren



Maßnahmen auf die fünf Einflussfaktoren hin lassen sich auch solche Maßnahmen identifizieren, die in den Traditionen verkehrlichen Untersuchungen nur ein Schattendasein führen bzw. überhaupt nicht auftauchen. Im Rahmen der Luftreinhaltung wird z. B. traditionelle der technische Ansatz präferiert; alle überlegen: „Wie lassen sich die Emissionen je km senken?“. Man könnte aber auch fragen, wie lässt sich der Besetzungsgrad der Fahrzeuge verdoppeln, oder wie kann die mittlere Reiseweite halbiert werden? Ansätze nach Faktorgruppe 2 erfassen dann alle Möglichkeiten, die Zahl der motorisierten Fahrten zu senken, sei es durch Konzepte, durch ökonomische Maßnahmen, durch Verlagerungen oder ähnliches. Ansätze der Faktorgruppe 3 zielen also vorrangig auf die Raumnutzung, aber auch auf Ausweichrouten, lebendige Stadtteile und vieles mehr. Die Faktorgruppe 4 versucht, die Auslastungen zu verbessern, und zwar in allen Verkehrsmitteln. Die Faktorengruppe 5 schließlich umfasst die technischen Einflussmöglichkeiten. Zusammengenommen stellen alle Faktoren sicher, dass eine vergleichbare und nachvollziehbare Abschätzung aller denkbaren Maßnahmen möglich wird.

3.2 *Maßnahmenübersicht*

Im folgenden wird eine kurze Übersicht über Maßnahmen zur Emissionsreduktion bei CO₂, NO_x, NO₂ und Partikeln aus dem Verkehr vorgelegt. Dabei liegt der Schwerpunkt auf Maßnahmen der kommunalen Ebene. Die prototypischen Maßnahmen werden in zehn Maßnahmengruppen eingeteilt und kurz bewertet. Liste und Bewertung stützen sich dabei vor allem auf Literaturangaben und einzelne Modellerfahrungen.

Maßnahmen, für die die Städte nur werben können bzw. für die sie auf gesetzliche oder juristische Unterstützung anderer Institutionen zurückgreifen müssten, werden ebenfalls mitgeführt, denn es ist nicht a priori ausgeschlossen, dass andere Institutionen und politische Ebenen den Wünschen und Forderungen der Kommunen nach einer Änderung der Rahmenbedingungen oder nach zusätzlichen Kompetenzen entgegen kommen könnten.

- (1) Es ist nicht Anliegen des vorliegenden Berichtes, alle Maßnahmen zur Verringerung der verkehrlichen Luftschadstoffemissionen bzw. Kraftstoffverbräuche zusammenzustellen oder zu bewerten. Dennoch soll ein Überblick über verschiedene Ansätze gegeben werden, schon um im gegebenen Einzelfall den Blick auch auf weitere Ansatzpunkte lenken zu können.
- (2) Die folgende Tabelle 10 ist dabei so gegliedert, dass wir für die in Frage kommenden Maßnahmeansätze eine oder mehrere konkrete Ausprägungen unter-



stellt haben. Wir haben dazu eine Reihe theoretischer Untersuchungen und konkreter Luftreinhaltepläne analysiert und auf bestimmte, typische Ansatzpunkte hin ausgewertet. Selbstverständlich lassen sich in jeder Kommune daneben noch viele andere Maßnahmenkonkretisierungen finden; dies muss aber Aufgabe der konkreten lokalen Luftreinhalteplanung bleiben.

- (3) Für jede der von uns ausgewählten Maßnahmen haben wir dann zunächst angeben, auf welchen der Faktoren der oben beschriebenen Verkehrsökologischen Tautologie die Maßnahme vorrangig wirkt. Eine saubere Trennung ist wegen der Vielzahl der dynamischen Nutzerreaktionen (siehe oben) nicht möglich, aber man kann die Maßnahme dem vorrangig angestrebten Ansatz zuordnen. Im Regelfall weisen die Maßnahmen einen primären Ansatzpunkt auf, der aber durchaus auf einen oder mehrere der anderen Faktoren ausstrahlen kann.
- (4) In einem weiteren Schritt haben wir sodann die groben Größenordnungen der Umsetzungs-/Einführungskosten und den zeitlichen Wirkungshorizont der Maßnahme abgeschätzt. Auch hier gilt: Unsere Einschätzung ist nur als grober Richtwert zu verstehen; selbstverständlich kann man einzelne Maßnahmen forcieren oder verlangsamen, und selbstverständlich hängen die Kosten in weitem Umfang von der Art der Umsetzung ab. Wir haben deshalb alle Angaben in nur drei Kostendimensionen (geringe, mittlere, hohe Kosten) eingeteilt. Als „Kosten“ werden dabei die Kosten der Kommune, der Wirtschaft, der Verkehrsteilnehmer und der Gesellschaft insgesamt verstanden. Es gibt dabei Maßnahmen, bei denen der Großteil der Kosten bei der Gesellschaft oder den Städten liegt (und die deshalb möglicherweise eine höhere Akzeptanz in der Bevölkerung aufweisen), und Maßnahmen, bei denen die Kosten überwiegend bei Verkehrsnutzern anfallen (und die deshalb vermutlich geringere Akzeptanz besitzen).
- (5) Den zeitlichen Wirkungshorizont der Maßnahmen haben wir ebenfalls nur in drei Dimensionen (kurz-mittel-lang) erfasst. Als Wirkungshorizont verstehen wir dabei die Zeitspanne, die vergeht, bis nach einem heute erfolgenden Umsetzungsbeschluss die Mehrheit der Maßnahmeneffekte eingetreten ist. Auch hier geht es vorrangig um die Größenordnungen bzw. die Eignung der Maßnahmen für kürzer- oder längerfristige Konzepte.
- (6) Im nächsten Schritt haben wir sodann pauschal versucht, die Maßnahmenwirkung auf die drei Bereiche CO₂-Emissionen, Stickoxid-Emissionen und Partikel-Emissionen abzuschätzen. Dieser Schritt muss der unsicherste Teil der Bewertung bleiben, denn – wie oben beschrieben – lassen sich die Reduktionen der Umweltbelastung ja nach den Rahmenbedingungen ganz unterschiedlich weit bzw. eng fassen; die Wirkungen können in weitem Rahmen streuen. Auch hier haben wir uns wieder auf drei Kategorien beschränkt; wir geben an, ob nach unserer Einschätzung eine typische, mittlere, ernstgemeinte Umsetzung einer Maßnahme einen geringen, mittleren oder hohen Reduktionseffekt haben kann. Erwarten wir für eine Maßnahme keinen Reduktionseffekt bzw. kann sie sogar



dazu führen, dass die Emissionen noch ansteigen, dann haben wir dies vermerkt. Auch diese Bewertungen können und sollen nur zur ersten Einordnung von Vorschlägen dienen.

(7) Sowohl bei der Einschätzung der Maßnahmewirkungen als auch der Kosten als auch des Zeithorizonts gingen wir von den üblichen Gegebenheiten innerhalb einer deutschen Großstadt aus. Je nach spezieller Stadtform, des Angebots an Verkehrsinfrastrukturen und nach dem (habitualisierten) Verkehrsverhalten der Einwohner mag es hier größere Unterschiede geben; dies erkennen wir auch an. In einem solchen Fall kann es also durchaus sein, dass eine von uns als wenig wirkungsvoll beschriebene Maßnahmen doch größere Umweltentlastungen bewirkt oder der umgekehrte Fall eintritt. Dies kann nur eine konkrete Modellierung (aber bitte aller statischen und dynamischen Maßnahmeeffekte) beantworten.

(8) Zur Gliederung der Maßnahmen haben wir folgende Kategorien ausgewählt:

1. Verbesserung der Raumordnung
2. Verbesserungen für nichtmotorisierte Verkehrsträger
3. Verbesserung des ÖV
4. Minderung der Emissionen im ÖV
5. Bessere Organisation des Verkehrsflusses
6. De-attraktivierung MIV
7. Zufahrtsbeschränkungen
8. Straßenunterhaltung
9. Verringerung der spezifischen Fahrzeugemissionen
10. Maßnahmen zum Management, zur Vorbildwirkung und zur Öffentlichkeitsarbeit usw.



Nr.	Maßnahme	Faktor Tautologie				Kosten	Horizont	Abschätzung des Wirkungspotentials		
		# mot Fahrten	Reiseweite	Auslastung	spez. Emissionen			CO2	NOx bzw. NO2	Partikel
1	Verbesserung der Raumordnung	x	x	x		hoch	lang	hoch	hoch	hoch
1.1	Nutzungsmischung in den Quartieren	x	x	x		hoch	mittel	hoch	hoch	hoch
1.2	(Nach-) Verdichtung, Nahbereichsattraktivierung	x	x			mittel	mittel	mittel	mittel	mittel
1.3	Dezentrale Einkaufs-, Arzt-, Behörden-, Schulsysteme usw.	x	x	x		mittel	mittel	hoch	mittel	mittel
1.4	Abbau Steuervorteile für Vielfahrer, Grundsteuerreform, usw.	x	x	x		gering	kurz	hoch	hoch	hoch
2	Verbesserungen für nichtmotorisierte Verkehrsträger	x	x			gering	mittel	hoch	hoch	hoch
2.1	Ausbau Radverkehr als Netz und System (inkl. Verleih)	x	x			gering	mittel	hoch	mittel	mittel
2.2	Attraktivierung Rad+Fuß an LSA	x	x			gering	kurz	mittel	gering	gering
2.3	Sicherheitsprogramm Rad+Fuß	x	x			gering	mittel	mittel	gering	gering
2.4	Fußgängerzonen/Fußgängerbereiche	x	x			mittel	mittel	mittel	gering	gering
2.5	Steigerung Aufenthaltsqualität in Straßen	x	x			mittel	mittel	mittel	gering	gering
3	Verbesserung des ÖV	x	x	x	x	hoch	mittel	mittel	mittel	mittel
3.1	Generelle Attraktivierung (Angebot, Komfort, Verknüpfung, Technik ...)	x	x	x		mittel	kurz	mittel	mittel	mittel
3.2	Ausbau, höhere Kapazität, neue Linien/Fahrzeuge	x	x	x		hoch	mittel	mittel	mittel	mittel
3.3	Neuansiedlungen immer ÖV-gerecht (Beispiel: Freiburg Vauban)	x	x	x		mittel	mittel	mittel	mittel	mittel
3.4	Car-Sharing an Mobil-Punkten/im öffentlichen Raum	x	x		x	gering	kurz	mittel	gering	gering
3.5	Sozialticket, gruppenspezifische Angebote	x	x			gering	kurz	gering, ggf. erhöhend	gering	gering
4	Minderung der Emissionen im ÖV	x		x	x	mittel	mittel	gering	mittel	mittel
4.1	Ersetzen von Bus durch Straßenbahn	x		x	x	mittel	mittel	gering	mittel	mittel
4.2	Ersetzen von Bus durch OBus	x		x	x	mittel	kurz	gering	mittel	mittel
4.3	Einsatz von EEV- Bussen	x			x	gering	kurz	gering	mittel	mittel
4.4	Konsequente ÖV-Priorisierung, MIV stetiger	x		x	x	gering	kurz	mittel	mittel	mittel
5	Bessere Organisation des Verkehrsflusses (stetiger, nicht schneller im MIV)			x	x	gering	kurz	gering	gering	gering
5.1	Pförtnerampeln	x	x	x	x	gering	kurz	gering	mittel	mittel
5.2	Verminderung des Verkehrs in der Innenstadt (Gebühren/Gestaltung)	x	x	x	x	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel
5.3	LKW-Leitsystem		x			gering	kurz	gering, ggf. erhöhend	gering, ggf. erhöhend	gering, ggf. erhöhend
5.4	Straßenbezogenes LKW-Fahrverbot		x			gering	kurz	gering, ggf. erhöhend	gering, ggf. erhöhend	gering, ggf. erhöhend
5.5	LKW-Durchfahrtsverbot >3,5t im gesamten Stadtgebiet, Lieferverkehr frei	x			x	gering	kurz	gering, ggf. erhöhend	gering, ggf. erhöhend	gering, ggf. erhöhend



Nr.	Maßnahme	Faktor Tautologie				Kosten	Horizont	Abschätzung des Wirkungspotentials		
		# mot Fahrten	Reiseweite	Auslastung	spez. Emissionen			CO2	NOx bzw. NO2	Partikel
6	De-attraktivierung MIV					mittel	mittel	hoch	hoch	hoch
6.1	De-attraktivierung fließender Verkehr (Tempo-30-Zonen, Verkehrsberuhigung)	x	x	x	x	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel
6.2	De-attraktivierung ruhender Verkehr (Flächen/Preise)	x	x	x		mittel	kurz	gering	gering	gering
6.3	Maut für die Zufahrt in eine Zone (Kordon)	x	x	x		mittel	kurz	mittel	mittel	mittel
6.4	Maut tageszeitabhängig für die Zufahrt in eine Zone	x	x	x		mittel	kurz	gering	gering	gering
6.5	Maut für die Zufahrt abhängig nach Euro-Norm	x	x		x	mittel	mittel	mittel	hoch	hoch
6.6	Maut fahrleistungsabhängig überall nach Euro-Norm	x	x	x	x	mittel	mittel	hoch	hoch	hoch
7	Zufahrtsbeschränkungen	x	x	x	x	mittel	kurz	hoch	hoch	hoch
7.1	Umweltzone konventionell	x	x	x	x	gering	kurz	kaum	gering	gering
7.2	Blaue Umweltzone (Einfahrt nur mit Euro 5 / Euro 6)	x	x	x	x	gering	kurz	gering	hoch	hoch
7.3	Einfahrtverbot für Dieselfahrzeuge	x	x	x	x	gering	mittel	gering	hoch	hoch
7.4	In Städten dürfen nur Stadtautos (neuer Fahrzeugtyp) fahren	x	x	x	x	hoch	lang	hoch	hoch	hoch
8	Straßenunterhaltung				x	mittel	kurz	keine	keine	hoch
8.1	Emissionssenkende Straßenoberflächen (Bau, guter Unterhalt)				x	mittel	kurz	keine	keine	hoch
8.2	Nassreinigung				x	gering	kurz	keine	keine	keine, ggf. erhöhend
8.3	Entstaubung der Tunnelabluft von Tunnelstrecken				x	gering	kurz	keine	keine	gering
9	Maßnahmen zur Verringerung der spezifischen Fahrzeugemissionen				x	hoch	lang	hoch	hoch	hoch
9.1	Effizientere, kleinere Motoren				x	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel
9.2	Leichtbau und "Downsizing"	x	x		x	mittel	lang	sehr hoch	hoch	hoch
9.3	Elektrofahrzeuge/Hybridfahrzeuge	x	x		x	hoch	mittel	mittel	hoch	hoch
9.4	Alternative Kraftstoffe (regenerativ/synthetisch)				x	hoch	mittel	mittel	mittel	mittel
9.5	Abgasnachbehandlung mindestens wie Euro 5/ Euro 6				x	mittel	mittel	gering	hoch	hoch
9.6	Fahrerassistenzsysteme zum energiesparendem Fahren	x	x	x	x	gering	kurz	mittel	gering	gering
10	Maßnahmen zum Management, zur Vorbildwirkung und zur Öffentlichkeitsarbeit usw.	x	x	x	x	gering	mittel	mittel	mittel	mittel
10.1	Öffentlichkeitsarbeit, Information	x	x	x	x	gering	mittel	mittel	mittel	gering
10.2	Betriebliches Mobilitätsmanagement	x	x	x	x	gering	kurz	mittel	gering	gering
10.3	Gewerbliches (Logistik-) Management, GVZ usw.	x	x	x	x	mittel	mittel	gering	gering	gering
10.4	Fahrzeugflotte der Stadt auf besonders emissionsarme Fahrzeuge umrüsten				x	mittel	mittel	mittel	hoch	hoch

Tabelle 10: Maßnahmenübersicht zur Luftreinhaltung, eigene Auswertung



(1) Tabelle 10 zeigt strenggenommen keine überraschenden Erkenntnisse auf:

- a. Eine Verbesserung der Raumordnung, weniger Zersiedelung, eine multifunktionale Stadt der kurzen Wege und eine andere Raumnutzung der Verkehrsteilnehmer weisen die höchsten Reduktionspotentiale auf, wirken aber nur sehr langfristig – und sind gesellschaftlich teuer. Maßnahmen in diesem Bereich bezahlen die Kosten für die (Fehl-) Entwicklungen der Vergangenheit. Sie setzen eine Veränderung der Rahmenbedingungen unmittelbar voraus.
- b. Rad und Fuß spielen für die Sicherung der Mobilität künftig eine entscheidende Rolle: Sie stützen die veränderte Raumordnung und sind vergleichsweise günstig. Allerdings bedürfen gerade sie einer Veränderung der Rahmenbedingungen und eines langen Atems.
- c. Die Verbesserung des ÖV stellt den Standardansatz zur Veränderung des Verkehrsmittelwahlverhaltens dar. Sie ist geboten und richtig, kann aber kontraproduktive Wirkungen aufweisen, wenn sie nicht von einer flankierenden De-attraktivierung im MIV begleitet wird. Hier ist ein sinnvolles Vorgehen nur möglich, wenn geeignete Push-&-Pull-Pakete geschnürt werden können. Eine Ausstattung des ÖV mit weniger umweltbelastenden Fahrzeugen ist möglich und richtig, wird aber oft als zu teuer bewertet und verschoben.
- d. Eine auf ausreichende Akzeptanz zielende Maßnahme stellt die Verstärkung des Verkehrsflusses dar. Sie besitzt Potential zur Umweltentlastung, wenn sie auf eine Reduktion der Beschleunigungsvorgänge und nicht auf eine Reduktion der Fahrzeiten abzielt. Viele der in den Kommunen umgesetzten Verkehrsverflüssigungsmaßnahmen haben sich aber als kontraproduktiv, d.h. als emissionserhöhend erwiesen: Nur dann, wenn flankierend sichergestellt ist, dass keine Nachfrageerhöhung auftreten kann, ist das Instrument als geeignet einzustufen.
- e. Die De-attraktivierung des MIV hat im Zentrum aller Konzepte zu stehen, nicht weil ideologisch dagegen vorgegangen werden soll, sondern weil die Probleme maßgeblich von dort kommen. Ohne wirkliche Erfolge auf dieser Seite müssen die anderen Ansätze Stückwerk bleiben. Langfristig liegen gerade diese Ansätze im echten Interesse der Wirtschaft und der Verkehrsteilnehmer, denn sie eröffnen Raum für alternative Konzepte und Lösungen (denn Mobilität steht nicht zur Disposition), senken Steuern, Gesundheits-, Schadensreparatur- und Lohnnebenkosten, reduzieren die sozialen Verwerfungen (!) und sind ökonomisch effizient.
- f. Dem gegenüber stellen Zufahrtsbeschränkungen ein eigentlich ineffizientes und wenig differenzierendes Instrument dar, das allerdings (siehe etwa §50 BImSchG) eine gewisse Rechtstradition und zumindest eine



gesetzliche Grundlage hat. Hier kommt es insbesondere auf die Art der Umsetzung und die gewählten Kriterien an.

- g. Aus kommunaler Sicht sind Maßnahmen zur Straßenunterhaltung natürlich ausgezeichnet geeignet, hier treffen sich oftmals Zuständigkeit und Know-How. Allerdings kann den Ansätzen nur eine geringe Umweltentlastung bestätigt werden. Eine Ausnahme stellen die Reduktionen von Partikel-Emissionen aus Aufwirbelung und Abrieb dar, die tatsächlich eine Grundlage für eine tragfähige Kooperation zwischen kommunalem Umweltamt und den Straßen- (bau-) Ämtern eröffnen können.
 - h. Die Maßnahmen zur Reduktion der Fahrzeugemissionen wurden bereits oben diskutiert. Langfristig hätten diese Ansätze durchaus ein sehr hohes Potential, sie sind aber teuer (und werden immer teurer), und sie sind nur über längere Zeiträume hin wirksam. Oben wurde bereits beschreiben, warum zumindest in den nächsten zehn bis fünfzehn Jahren Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren und (weitgehend) bekannter Technik die Situation maßgeblich prägen werden. Da auch die Städte hier keine Schwerpunkte setzen können, scheidet der Ansatzpunkt für kommunale Konzepte zur Reduktion der aktuellen Grenzwertüberschreitungen weitgehend aus.
 - i. Eine Reihe „sonstiger Maßnahmen“ haben wir im letzten Gliederungspunkt zusammengetragen. Die Maßnahmen haben teilweise nur appellativen oder informierenden Charakter, sie können aber teilweise auf die Unterstützung der Betroffenen (z. B. beim Mobilitätsmanagement) zählen. Stark unterschätzt wird aus unserer Sicht die Vorbildwirkung der Stadtverwaltung (und der Dienstwagens der Bürgermeister): Würden hier glaubwürdige Akzente hin zu einem anderen Verkehrsverhalten gesetzt, hätten es viele andere Maßnahmen im Zeitverlauf deutlich leichter. Die dynamische Wirkung von Maßnahmen mit Vorbildcharakter ist konkret praktisch nicht messbar, aber sie kann entscheidend sein.
- (9) Der Vollständigkeit halber muss erwähnt werden, dass die effizienteste Maßnahme zur Reduktion der Umweltbelastung, die Maßnahme mit den größten Reduktionswirkungen, mit den gesellschaftlich geringsten Kosten und (bei geeigneter Ausgestaltung) mit den geringsten sozialen Kosten die *Einführung möglichst kostenwahrer Preissignale* bei allen Verkehrsteilnehmern wäre. Dieses Mittel wäre allen anderen vorzuziehen und hat seine Effizienz in allen konkreten Anwendungsfällen (etwa in London oder in Stockholm oder beim Zertifikatehandel ...) eindrucksvoll bewiesen. Allerdings liegt es nicht in der Hand der Kommunen, hier tätig zu werden. Aus unserer Sicht wäre es aber dringend geboten, Bund, Ländern und EU-Kommission darum zu ersuchen, hier Rahmenbedingungen und Gestaltungsspielräume zu eröffnen. Gerade dieser Tage hat die EU-Kommission dazu einen ersten Schritt getan; sie hat angekündigt, die



Bedingungen für Einführungen von City-Maut-Konzepten durch Städte erleichtern und unterstützen zu wollen⁵³.

(10) Für welche Konzepte sich eine Kommune in einer bestimmten Situation (und bei gegebenen politischen Mehrheiten) entscheidet, muss an dieser Stelle offen bleiben. Die Erfahrung der Vergangenheit zeigt, dass die Widerstände der Betroffenen oftmals deutlich artikuliert werden und dass der politische Wille, strittige Maßnahmen umsetzen, nicht überschätzt werden darf. An dieser Stelle soll und kann diese Erfahrung von uns nicht kommentiert werden, aber für die künftige Entwicklung geben wir zwei Aspekte zu bedenken:

- Zum ersten ist in den vergangenen Jahren, auch aufgrund der vom europäischen Recht vorgegebenen Möglichkeiten, ein gewisser Trend zu beobachten, Umweltentlastungen auf juristischem Wege einzufordern. Dieser Weg scheint nicht aussichtslos, wie die Urteile auch für deutsche Beispielfälle (und gegen deutsche Kommunalverwaltungen) zeigen. Wir gehen davon aus, dass gerade wegen der NO₂-Entwicklung mehr und mehr Bürger diesen Weg gehen wollen. Dann aber wird sich manche Kommune sehr drastischen und raschen Handlungserfordernissen gegenübersehen.
- Zum zweiten scheint eine gewisse Tendenz der europäischen Ebene beobachtbar, dass man die Zwänge der Kommunen zwar anerkennt und die Schwierigkeiten der Umsetzung von Luftreinhaltemaßnahmen kennt, andererseits aber auch ahnt, dass manche Luftreinhaltepläne von der Kommune vielleicht nicht ganz so ernst gemeint waren, wie sie formuliert worden waren. Mit anderen Worten: In Kommunen, in denen die Luftreinhalteanstrengungen nicht glaubwürdig dokumentiert werden können, entsteht langfristig ein gewisses Konfliktpotential, das sich z. B. in Vertragsverletzungsverfahren niederschlagen könnte.

⁵³ Die Kommission hat in Brüssel den Urban Mobility Action Plan vorgestellt, der u. a. die Einführung von City-Maut-Systemen erleichtern soll, siehe dazu COM(2009) 490 bzw. http://ec.europa.eu/transport/urban/urban_mobility/action_plan_en.htm



4 Empfehlungen und Vorgehensvorschlag

Im letzten Abschnitt werden Empfehlungen für das denkbare strategische Vorgehen in den Kommunen gegeben. Diese Empfehlungen können und sollen keine konkrete Handlungsanleitung sein, sondern sie sollen den denkbaren Spielraum für verschiedene strategische Orientierungen benennen. Dazu werden beispielhaft fünf prototypische Strategien A bis E vorgestellt und diskutiert. Für diese fünf Strategien haben wir die Auswirkungen auf die Kohlendioxid-, Stickoxid- und Partikel- Emissionen modelliert. Jede der Strategien beinhaltet bzw. bewirkt unterschiedliche Maßnahmenpakete, Konfliktsituationen und politische oder rechtliche Konsequenzen.

Hierbei ist immer der relativ hohe Grad an Unsicherheit und Unbestimmtheit zu beachten: Um die hier nur größenordnungsmäßig getroffenen Aussagen zu bestätigen (oder zu widerlegen), empfehlen wir vertiefende Untersuchungen, zum einen für alle deutschen Städte zusammen (um evtl. gemeinsam bei übergeordneten Institutionen glaubhafte Forderungen vorbringen zu können), und zum zweiten für die konkrete lokale Situation, um mit dem Stadtrat, den Bürgermeistern, den Parteien, den Betroffenen, den Lobbyverbänden und schließlich den Verkehrsnutzern in einen Dialog mit belastbaren, konkreten Zahlen treten zu können.

Sinnvoll erschiene letztlich auch eine Untersuchung (etwa zur Erstellung einer Datenbank oder einer „Erfahrungliste“), in der die tatsächlich beobachteten dynamischen Veränderungen nach Maßnahmeneinführung so aufbereitet werden, dass sie als Erfahrungsschatz für alle Städte verwendbar werden.

- (1) Die kommunalen Handlungsmöglichkeiten umfassen, wie oben gezeigt wurde, durchaus eine Reihe von Maßnahmen. Allerdings sind die Maßnahmen mit den größten Reduktionspotentialen eben gerade nicht auf lokaler Ebene angesiedelt, und zum zweiten werden selbst die verfügbaren kommunalen Maßnahmen nicht immer mit der notwendigen Stringenz und Ausdauer um- und durchgesetzt.
- (2) Im folgenden haben wir deshalb fünf typisierte, grundsätzlich unterschiedliche Vorgehensvorschläge für deutsche Großstädte bzw. einen Ballungsraum zusammengestellt und auf ihre denkbare Umweltentlastung hin untersucht. Es versteht sich von selbst, dass diese Prototypen in der von uns beschriebenen Form sicher nicht umgesetzt werden dürften; sie dienen nur der Veranschaulichung. Wir sind allerdings davon überzeugt, dass die von uns angegebenen Bandbreiten der Reduktionseffekte durchaus plausibel sind, zumal wir (manche) dynamischen Wirkungen einbezogen haben.



(3) Die Maßnahmenempfehlungen, die wir im folgenden vorschlagen, sollen immer aus vielen Einzelmaßnahmen bestehen. Damit soll erreicht werden, dass im konkreten Anwendungsfall Widerstände gegen eine forcierte Umsetzung einer Einzelmaßnahme verringert und ggf. mit einer verstärkten Umsetzung eines anderen Maßnahmenteils kompensiert werden können. Die Zusammenstellung und Gewichtung der einzelnen Bestandteile des Gesamtpakets kann nur mit politischem Fingerspitzengefühl und vor Ort erfolgen.

(4) Die fünf Prototypen lassen sich wie folgt charakterisieren:

Strategie A:

Kontinuierliches Umsetzen der heute mehrheitsfähigen Maßnahmen, aber auch nur dieser (Strategie „gebremste Tradition“).

Strategie B:

Engagierte, demonstrative und Konflikte nicht scheuende Umsetzung der schon heute in den Kommunen diskutierten Maßnahmen; Verzicht auf grundsätzlich neue Maßnahmen (Strategie „engagierte Tradition“).

Strategie C:

Umsetzung eines Maßnahmenpaketes kleinerer, bekannter Maßnahmen zusammen mit dem Durchfechten einer Leuchtturmmaßnahme, um die Dramatik der Situation zu verdeutlichen. Als Leuchtturmmaßnahme wird eine deutliche Verschärfung der Umweltzone vorgeschlagen, sodass nur noch Euro 5- bzw. Euro 6-Fahrzeuge in das gesamte Stadtgebiet („Stadtgrenze“) einfahren können (Strategie „Blaue Zone“).

Strategie D:

Konzentration auf eine Basismaßnahme, die Konflikte nicht scheut und vorrangig auf Stickoxide und Partikel abzielt. Dieser Ansatz geht etwa nach der Maxime „Das Problem sind Dieselmotoren, also dürfen keine Fahrzeuge mit Dieselmotoren in der Stadt betrieben werden!“ vor. Wir sind uns bewusst, dass dieser Ansatz nicht realistisch und in seiner Dramatik sogar kontraproduktiv sein kann, aber wir wollen damit die Größenordnung des denkbaren Umweltreduktionspotentials ausloten (Strategie „Verbot aller Dieselmotoren“).

Strategie E:

Die Strategie E stellt eine Erweiterung von Strategie C (Stickoxide und Partikel) um eine CO₂-Komponente dar. Dazu wird das oben erwähnte „Stadttauto“ in der Stadt eingeführt, andere Fahrzeuge dürfen nicht betrieben werden. Das Stadttauto erfüllt die obigen Anforderungen bzgl. Leergewicht, erfüllter Schadstoffnorm und Höchstgeschwindigkeit (maximal 59 km/h). Als Verbrauch für ein solches Fahrzeug nehmen wir im



Stadtverkehr weniger als einen Liter Benzinäquivalent an; dies bedeutet eine CO₂-Emission von etwa 20g/km⁵⁴ (Strategie „Stadttauto“).

- (5) Die fünf verschiedenen Strategien dürften sich selbstverständlich in völlig unterschiedlichen Maßnahmenpaketen, Luftreinhalteplänen, Klimaschutzkonzepten usw. niederschlagen. Wir haben für die Potentialabschätzung die Situation in den bundesdeutschen Städten des Jahres 2009 (aktuell) unterstellt und mit HBEFA 3.1. modelliert (Beta-Version). Die Flotte und die Fahrleistungsgewichtung entsprechen dem bundesdeutschen Durchschnitt. Im einzelnen unterstellten wir folgende Randbedingungen:

Strategie A:

Nach einem längeren Untersuchungs-, Bewertungs-, Abstimmungs- und Entscheidungsprozess werden in der Kommune die traditionellen Maßnahmen „verstärkt und weiterhin“ umgesetzt. Dazu gehören vor allem freiwillige Maßnahmen, zusätzliche Angebote (denn die weisen keine Akzeptanzprobleme auf), Informationen und eine „Förderung des ÖPNV“. Da die Finanzsituation der Kommune angespannt ist, müssen alle Maßnahmen aus dem laufenden Budget bestritten werden; neue ÖV-Fahrzeuge werden also nur im Rahmen der laufenden Ersatzbeschaffung finanziert. Die Maßnahmen finden weitgehend Akzeptanz und tun „niemand weh“; im übrigen hofft man auf die Lösung des Problems durch die allmähliche Durchdringung des Bestandes mit neuen Fahrzeugen.

Strategie B:

In Strategie B unterstützen Stadtrat und Bürgermeister/Bürgermeisterin ein umfassendes Gesamtpaket von Maßnahmen in engagierter Weise. Auf Zufahrtsbeschränkungen, City-Maut und ähnliche Ansätze wird verzichtet, aber CarSharing, Rad- und Fußgängersystem sowie der ÖPNV werden tatsächlich attraktiviert, wobei auch De-attraktivierungen des motorisierten Straßenverkehrs aufgenommen werden. Das Maßnahmenpaket wird sehr breit definiert, kontinuierlich überwacht und offensiv vertreten; nach einiger Zeit treffen sogar Delegationen anderer europäischer Städte in der Stadt ein, um sich am gegebenen Vorbild zu orientieren („Freiburg-Effekt“).

Strategie C:

In Strategie C wird auf Bundesebene eine Verschärfung der Regelung für Umweltzonen beschlossen und (bei Überschreiten der Grenzwerte) verpflichtend eingeführt. Diese Super-Umweltzone wird „Blaue Zone“ ge-

⁵⁴ Solche Fahrzeuge existieren bereits; hier sei etwa auf das Vorgängerfahrzeug des VW L1 verweisen, das 2002 einen Verbrauch von 0,89 l. Diesel je 100 km Autobahn aufwies. Dies entspricht ca. 23 g CO₂/km. 20 g CO₂/km sind in Städten und mit langsameren Fahrzeugen sicherlich erreichbar.



nannt; nur die Fahrzeuge mit der strengsten Abgasnorm dürfen in die Kommunen einfahren (siehe oben). Fahrleistung, Größe der Fahrzeuge, Verwendung und anderes werden nicht von der Regelung betroffen und bleiben somit unverändert.

Strategie D:

Die Strategie will die Einfahrt aller Fahrzeuge mit Dieselmotor verbieten, trifft aber auf starken Widerstand und wird lange hinausgezögert. Zur Bewertung wird unterstellt, alle Fahrzeughalter wurden die Chance nutzen, während dieser Zeit Fahrzeuge mit Benzin-Motoren als Ersatz für die Dieselfahrzeuge zu kaufen. Eine Fahrleistungsreduktion findet nicht statt, im Gegenteil: Weil schwere Nutzfahrzeuge fast nur mit Dieselmotor verfügbar sind, müssen diese durch leichte Nutzfahrzeuge mit anderen Antrieben ersetzt werden, die aber dann insgesamt weiter und häufiger fahren müssen.

Strategie E:

Strategie E übernimmt alle Maßnahmen der Strategie C („Blaue Zone“), wendet sich aber zusätzlich vor allem der Klimaschutzproblematik zu. Mit Unterstützung von EU- und Bundesbehörden wird als Reaktion auf die Forderung nach verstärkten Klimaschutzanstrengungen das Stadtauto mit Emissionen von maximal 20 g CO₂ je km durchgesetzt. Andere private MIV-Fahrzeuge dürfen in der Stadt *nicht* betrieben werden. Der Betrieb von leichten und schweren Nutzfahrzeugen bzw. Bussen unterliegt den Einschränkungen wie bei Strategie C (Euro 5/Euro 6 obligatorisch).

- (6) Die Ergebnisse unserer Abschätzungen bzw. Emissionsrechnungen lassen sich in wenigen Worten zusammenfassen (wobei nicht vergessen werden darf, dass wir in weiten Bereichen auf plausible Annahmen angewiesen waren):

Strategie A:

Durch die verzögerte Einführung und die weitgehende Attraktivierung von Verkehr können keine über den normalen Trendfall hinausgehenden Umweltentlastungseffekte erwartet werden, im Gegenteil: Telematik- und Informations- und Zielführungssysteme sowie das zusätzliche Angebot im ÖPNV (das wenig genutzt wird) sorgen ggf. sogar für zusätzliche Emissionen und Verbräuche. Die gesetzlichen Grenzwerte an Verkehrsmessstellen werden mehr oder weniger ständig überschritten, relativ rasch wurde dagegen geklagt. Nach einigem prozeduralem Hin- und Her wurde die Kommune gerichtlich dazu gezwungen, Sofortmaßnahmen für die jeweils beklagten Straßen umzusetzen. Die dann erfolgten Umleitungen verschärften das Problem an anderer Stelle, sodass dort geklagt wurde, obwohl keine konkrete Messstelle an der Straße lag (denn die



Grenzwerte sind überall einzuhalten). Die dann ständig geforderten Sofortmaßnahmen waren wenig konsistent und sorgten dafür, dass das Thema nicht konstruktiv angegangen werden konnte. Vertragsverletzungsverfahren wurden wegen dieser Kommune angestrengt und sorgten zu zusätzlichem Druck. Erst 2015 begannen die Werte sichtbar abzusinken. Die Unzufriedenheit mit der Stadtverwaltung wächst in allen Gruppen (Bevölkerung, Wirtschaft, Bundespolitik, Europäische Kommission, usw.).

Strategie B:

Das engagierte Vorgehen in Strategie B erforderte Beschlüsse in vielen Detailpunkten und erweist sich als mühsam und langwierig, letztlich aber als zielführend: Vor allem die Vorbildwirkung und die Unterstützung der Nahmobilität erwiesen sich langfristig als hilfreich. Durch diese Maßnahmen konnten in allen Teilpaketen immer auch Maßnahmen zur MIV-Deattraktivierung einbezogen werden. Dies führte dazu, dass bei dieser Strategie sogar letztlich geringere Fahrleistungen als bei reiner Einführung der Umweltzone (siehe C) beobachtet werden könnten. Durch die Konstanz der Anstrengungen und die Bündelung aller Ansätze gelang es der Stadt, in einem Atemzug mit den Städten Münster und Tübingen und Freiburg/Brsg. bzw. Zürich genannt zu werden.

Allerdings gelang es auch hier nicht, die Grenzwerte für Stickstoffdioxid in den Jahren 2010 bis 2013 einzuhalten. Wiederholten Klagen betroffener Bürger wurde vor Gericht zwar stattgegeben (die Stadt unterlag), aber die Glaubwürdigkeit der Maßnahmen rettete die Kommune weitgehend vor Sofortmaßnahmen, bis die Werte absanken.

Strategie C:

Die Strategie C setzt vor allem auf eine sogenannte „Blaue Zone“, das ist eine Umweltzone, in der nur die sauberste Fahrzeugnorm Einfahren darf. Dies sind folgende Fahrzeugtypen:

- Pkw: maximal zulässige NO₂-Emission 0,02 g/km
- Leichte Nutzfahrzeuge: max. zulässige NO₂-Emission 0,02 g/km
- Schwere Nutzfahrzeuge: max. zulässige NO₂-Emission 0,028 g/km
- Busse: Max. zulässige NO₂-Emission 0,03 g/km.

Die Anforderungen entsprechen damit etwa Euro 6 für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge bzw. Euro 5 bei den übrigen Fahrzeugen.

Strategie C war lange umstritten, aber letztlich erfolgreich: Alle Luftreinhaltungsgrenzwerte für Partikel und Stickoxide wurden irgendwann eingehalten. Wegen der langen Umsetzungsdauer gelang dies aber erst relativ spät. Klagen betroffener Bürger wurde vor Gericht zwar stattgegeben



(die Stadt unterlag), aber die Glaubwürdigkeit der Anstrengungen rettete die Kommune weitgehend vor Sofortmaßnahmen.

Strategie D:

Die Strategie will die Einfahrt aller Fahrzeuge mit Dieselmotor verbieten, traf aber auf starken Widerstand und wurde lange hinausgezögert. Die meisten Fahrzeughalter konnten deshalb auf Benzin- oder alternative Fahrzeuge umsteigen. Die Fahrleistungen stiegen insgesamt noch an, dennoch gelang es der Strategie am Ende dann doch, alle Partikel- und Stickoxidgrenzwerte einzuhalten, und zwar an allen Messstellen. Klimagasreduktionen wurden praktisch nicht erreicht.

Strategie E:

Die Strategie zielt vor allem auch auf den Energieeinsparungs- und Klimaschutzsektor: Nach einigen dramatischen Nachrichten und Beschlüssen über Klimaveränderungen wird mit Unterstützung von EU- und Bundesbehörden das Stadttauto mit Emissionen von maximal 20 g CO₂ je km umgesetzt. Andere MIV-Fahrzeuge dürfen privat nicht in der Stadt betrieben werden.

Die Strategie erreicht ihre Ziele in allen Bereichen: Sowohl Treibhausgase als auch Stickoxide oder Partikel sinken unter die maximal zulässigen Werte. Zusätzlich nimmt dieser Ansatz noch eine Reihe anderer Vorteile mit: Die Flächenbelastung aus Verkehr sinkt ebenso deutlich wie die Schwere der Unfälle im Stadtgebiet; Lärmbelastungen nehmen deutlich ab, und auch die Kosten der Wirtschaft und der Nutzer sinken deutlich (zum einen, weil weniger Ressourcen eingekauft werden müssen, zum anderen, weil neue Raumstrukturen und Innovationen die Aufwände in allen Bereichen senken).

- (7) Im einzelnen ergaben sich für die Auswirkungen der verschiedenen Szenarien die folgenden Größenordnungen (siehe Tabelle 11, Mittelwerte der Bandbreiten, auf 5 %-Werte gerundet):

Strategie	NO ₂	PM _{Motor}	PM _{A+A}	PM _{Gesamt}	CO ₂
A: Weiter so	-0%	-0%	-5%	-5%	+5%
B: Engagiert	-20% bis -40%	-20% bis -40%	-10%	-20%	-10%
C: Blaue Zone	-75%	-80%	-0%	-15%	-5%
D: Null Diesel	-90%	-90%	-30%	-40%	-5%
E: Blau+Stadttauto	-75%	-80%	-10%	-20%	-60%

Tabelle 11: Typisierte Abschätzungen der Auswirkungen der fünf Strategien auf die Umweltbelastungen (PM_{A+A} = Partikel aus Abrieb und Aufwirbelung)



(8) Zur Interpretation der Werte ist zu beachten, dass es sich nur um Größenordnungen bzw. um den Mittelwerte einer gewissen Bandbreiten handeln kann. Die werte sind so zu verstehen, dass sie auf einen gegebenen Bezugsfall und das Jahr 2009 bezogen sind: Angegeben ist also nicht, wie sich die Werte zwischen 2009 und etwa 2015 verändern könnten, sondern angegeben ist, welche Emissionen sich im Jahr 2009 einstellen würden, wenn die Strategien dann schon komplett wirksam gewesen wären.

(9) Damit kann die Wirkung der Strategien wie folgt eingeordnet werden:

Strategie A erweist sich nicht wirklich als zielführend. Man vermeidet zwar Konflikte und Weichenstellungen in der Stadt in den frühen Jahren, gerät damit aber in eigentlich nicht mehr konstruktiv steuerbare Zwangslagen in späteren Jahren.

Strategie B erscheint gangbar, mühsam und nicht erfolglos: Man erreicht Reduktionen und vermeidet Zwangslagen; der Ansatz wird sogar als erfolgreiches Modell gesehen. Nicht alle Luftqualitätsgrenzwerte werden eingehalten; dies hängt vor allem von den sonstigen Einflussgrößen ab (wachsende Städte oder Regionen wirken in Richtung auf eine schlechtere Einhaltung der Grenzwerte, schrumpfende bzw. stark alternde Großstädte wirken in Richtung auf eine erleichterte Grenzwerteinhaltung). Die CO₂- Reduktionsziele für den Verkehr werden auch nicht annähernd erreicht. Damit aber stehen der Stadt (irgendwann) Klimaschutzklagen ins Haus.

Strategie C hat mit großem Widerstand zu rechnen, erfordert eine Verschärfung der aktuellen Rechtslage und ist also nur gemeinsam mit den anderen Großstädten erreichbar. Gerichtliche Entscheidungen können diesen Weg befördern. Die Reduktionswirkung bei Stickstoffdioxid ist sehr groß, die bei Partikel ist groß: Alle Grenzwerte werden eingehalten. Die CO₂- Reduktionsziele für den Verkehr werden aber in keiner Weise erreicht; deshalb stehen der Stadt (irgendwann) Klimaschutzklagen ins Haus.

Strategie D hat mit größtem, auch rechtlichem Widerstand zu rechnen und ist aus heutiger Sicht unrealistisch. Die Ergebnisse zeigen aber, welche Reduktionen möglich erschienen: Sehr große Luftschadstoffreduktionen sind prinzipiell möglich, Immissionsgrenzwerte würden dann kein Problem mehr darstellen, egal ob in wachsenden oder schrumpfenden Regionen/Städten. Die CO₂- Reduktionsziele für den Verkehr werden auch hier in keiner Weise erreicht. Damit aber stehen der Stadt (irgendwann) Klimaschutzklagen ins Haus.

Strategie E hat mit großem Widerstand zu rechnen, erfordert eine Verschärfung der aktuellen Rechtslage und zusätzlich ein Umdenken bei Entwurfskriterien und Nutzungsbedingungen von Fahrzeugen des MIV in Städten. Aus heutiger Sicht erscheint dies unrealistisch, allerdings ist das Szenario das einzige, in dem die CO₂- Reduktionsziele für den Verkehr erreicht, teilweise sogar übertroffen werden.



- (10) Jede weitere Diskussion möglicher Szenarien vor Ort hängt von politischen Weichenstellungen ab. Wir geben aber zu bedenken, dass unseres Erachtens der Trend in Richtung „Downsizing“ und zum beschriebenen „Stadtauto zwingend“ ist. Wenn dies so wäre, dann böte das Strategie E den Vorteil, durch die schnellere Schaffung eines Fahrzeugmarktes und die Beschleunigung des downsizing-Ansatzes „en passant“ auch Minderungen der anderen ökologischen Zielgrößen zu erreichen: Nicht nur die Abgasemissionen, sondern auch Unfallzahlen, Flächenverbräuche, Lärmemissionen und andere Belastungskenngrößen würden dadurch deutlich reduziert werden.
- (11) Als Schlussergebnis ist nochmals zu betonen, dass sich derzeit die Kommunen in einer Zwickmühle befinden: Einerseits sind die Kommunen für die Einhaltung der Luftqualitätsstandards verantwortlich, andererseits verfügen sie realistischere Weise über nur wenig wirkungsvolle und politisch durchsetzbare Mittel zur Durchsetzung der Anforderungen. Dieser Zustand ist eigentlich nicht hinnehmbar. Zwangsläufig werden deshalb tendenziell eher „schwache oder wenig invasive“ Maßnahmen umgesetzt, die wenig erreichen und im gegebenen Fall dann von richterlicher Seite Zweifelsfall kritisiert werden. Wie die Ergebnisse der Szenarienabschätzungen zeigen, haben lediglich der kombinierte, engagierte Einsatz aller vorhandenen Instrumente, das (unrealistische) Verbot aller Dieselfahrzeuge, die noch zu definierende „Blaue Zone“ und das Stadtauto die Chance, die Luftreinhaltkriterien erfüllt – und lediglich das „Stadtauto“ leistet einen signifikanten Klimaschutzbeitrag. Von daher sollten dringend übergeordnete Weichenstellungen dahingehend erfolgen, wie denn das den Städten zur Verfügung stehende Instrumentarium erweitert oder vergrößert werden kann.



5 Literatur

[AEE_2009] Agentur für Erneuerbare Energien: Biokraftstoffe – Daten und Fakten 2009. aus http://www.unendlich-viel-energie.de/uploads/media/daten_fakten_biokraftstoffe_apr09.pdf

[Berntsen_12/2008] Berntsen; Fuglestvedt (CICERO): Global temperature responses to current emissions from the transport sectors. In: PNAS vol. 105 no. 49, 9.12.2008 (www.pnas.org)

[BMVBS_2008] Verkehrsverflechtungsprognose 2025: Download vom 8.10.2009 aus www.bmv.de/Verkehr/Mobilitaet-und-Technologie-,3018/Verkehrsprognose-2025.htm bzw. aus <http://daten.clearingstelle-verkehr.de/220/>

[BöhmerT_1999] BÖHMER, T., WINTER, M. (1999): Alternative Antriebe für Linienbusse. Vergleichende Studie im Rahmen des EU-Programms Jupiter-2. Dresdner Institut für Verkehr und Umwelt e.V. (DIVU). Im Auftrag der Heidelberger Straßen- und Bergbahn AG. Dresden.

[Borken_2008] Borken-Kleefeld; Cofala; Rafaj: GHG Mitigation Potentials and Costs in the Transport Sector of Annex 1 (<http://gains.iiasa.ac.at/Annex1.html>)

[CONCAWE_2004] CONCAWE, European Council for Automotive R&D, Institute for Environment and Sustainability – Joint Research Centre of the European Commission (2004): Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context. Well-to-Wheels Report. Version 1b. Ispra: IES.

[EMPA_2007] Christian Bach, Dr. Stephan Lienin: Emissionsvergleich verschiedener Antriebsarten in aktuellen Personenwagen. Untersuchung der Emissionen von aktuellen Personenwagen mit konventionellen und direkteingespritzten Benzinmotoren, Dieselmotoren mit und ohne Partikelfilter, sowie Erdgasmotoren. EMPA Materials Science and Technology. November 2007.

[GSF_2003] Wichmann: Abschätzung positiver gesundheitlicher Auswirkungen durch den Einsatz von Partikelfiltern bei Dieselfahrzeugen in Deutschland, GSF im Auftrag des BMU 2003

[Heusch/Boesefeldt_1994] Heusch; Boesefeldt: Untersuchungen des repräsentativen Fahrverhaltens von Pkw auf Stadt- und Landstraßen; Texte des Umweltbundesamtes Nr. 66/1994, Dessau 1994

[IFEU_2007] Frank Dünnebeil, Udo Lambrecht: Zukünftige Entwicklung der NO₂-Emissionen des Verkehrs und deren Auswirkung auf die NO₂-Luftbelastung in Städten in Baden-Württemberg. IFEU Heidelberg im Auftrag des Umweltministeriums Baden-Württemberg. Heidelberg, 31. Oktober 2007



[KBA_01/2009] Kraftfahrt-Bundesamt (KBA): Der Fahrzeugbestand am 1.01.2009 aus http://www.kba.de/cln_007/nn_124384/sid_1303D4A8124BA809D473F259A3DFAE45/nsc_true/DE/Presse/PressemitteilungenStatistiken/Fahrzeugbestand/fz__bestand__p_m__text.html

[KBA_01/2009a] Kraftfahrt-Bundesamt (KBA): Fahrzeugzulassungen. Bestand Emissionen, Kraftstoffe. 1.01.2009. aus http://www.kbashop.de/wcsstore/KBA/Attachment/Kostenlose_Produnkte/b_emissionen_kraftstoffe_2009.pdf

[KolkeR_2005] Kolke, R.: Vergleich der Umweltverträglichkeit neuer Technologien im Straßenverkehr. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktoringenieur (Dr.-Ing.). Magdeburg 2004.

[v.LingeJ_2003] van Ling; van Helden; Riemersma: Comparison of particle size distribution and emission from heavy-duty diesel engines and gas engines for urban buses, 12th International Scientific Symposium on Transport and Air Pollution, 16. – 18. June 2003, Avignon.

[RydhCJ_2001] Rydh Carl Johan: Environmental Assessment of Battery Systems in Life Cycle Management. Department of Environmental Inorganic Chemistry. Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden 2001.

[SRU_2005] Sachverständigenrat für Umweltfragen: Umwelt und Straßenverkehr: Hohe Mobilität - Umweltverträglicher Verkehr (SRU Sondergutachten), ISBN 3-8329-1447-1

[TE_10/2007] T&E: Regulation CO₂ emissions of new cars (background briefing 10/2007)

[TUD_2004] TU Dresden, Lehrstuhl für Verkehrsökologie: Qualifizierung des Emissionskatasters Sachsen - Partikelemissionen. Teilprojekt im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, TU Dresden, 2004

[UBA_2003] UBA: CO₂-Minderung im Verkehr. Ein Sachstandsbericht des Umweltbundesamtes - Beschreibung von Maßnahmen und Aktualisierung von Potenzialen -, 10.09.2003

[UBA_2006] UBA: THG Inventare Deutschland; erhältlich beim Umweltbundesamt in Dessau-Roßlau, verschiedene Jahrgänge

[UBA_08/2008] Herbener; Jahn; Wetzel: Technikkostenschätzung für die CO₂ Emissionsminderung bei Pkw; UBA - Studie 6.08.2008

[UBA_AT_2008] Lorenz Moosmann et. al: Auswirkungen der NO₂-Emissionen bei Diesel-Kfz auf die Immissionsbelastung. Umweltbundesamt Wien. Report REP-0135. Wien, 2008.

[VEG_443/2009] Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Perso-



nenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen. Amtsblatt der Europäischen Union. 05.06.2009. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0001:0015:DE:PDF>

[WBGU_2009] Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen: Kassensturz für den Weltklimavertrag – Der Budgetansatz. ISBN 978-3-936191-26-4, Berlin 2009

[WI_2005] Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie; Max-Planck-Institut für Chemie: Treibhausgasemissionen des russischen Erdgas-Exportpipeline-Systems. Ergebnisse und Hochrechnungen empirischer Untersuchungen in Russland. Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. 2005.

[WingerA_2003] Winger, A.: Möglichkeiten und Grenzen der Senkung des Energieaufwands beim Betrieb von Pkw mit Hybridantrieb. Dissertation an der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden. Dresden 21.05.2003.

