

Programm Lebensgrundlage Umwelt  
und ihre Sicherung (BWPLUS)

**Ermittlung der Feinstaubemissionen in Baden-Württemberg  
und Betrachtung möglicher Minderungsmaßnahmen**

**Schlussbericht**

von

Thomas Pregger und Rainer Friedrich

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER)  
Universität Stuttgart, Heßbrühlstraße 49a, D-70565 Stuttgart

Die Arbeiten des Programms "Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung" werden  
mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert

Förderkennzeichen: BWE 20005

April 2003



**INHALTSVERZEICHNIS**

<b>1</b>	<b>Einleitung und Zielsetzung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Ermittlung der Feinstaubemissionen im Jahr 1998 in Baden-Württemberg</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Vorgehensweise und Datengrundlage zur Emissionsermittlung</b>	<b>3</b>
2.1.1	Quellgruppen und Methodik der Emissionsermittlung	3
2.1.2	Sektor Verkehr	5
2.1.3	Sektor genehmigungsbedürftige Anlagen	20
2.1.4	Sektor nicht genehmigungsbedürftige Feuerungen	22
2.1.5	Sektor sonstige Prozesse, nicht genehmigungsbedürftig	23
2.1.6	Inhaltsstoffe emittierter Stäube	26
<b>2.2</b>	<b>Ergebnisse der Emissionsermittlung für das Jahr 1998</b>	<b>29</b>
2.2.1	Gesamtsituation in Baden-Württemberg	29
2.2.2	Emissionen des Verkehrs	30
2.2.3	Emissionen der genehmigungsbedürftigen Anlagen	32
2.2.4	Emissionen der nicht genehmigungsbedürftigen Feuerungen	36
2.2.5	Emissionen der sonstigen Prozesse, nicht genehmigungsbedürftig	36
2.2.6	Sektorübergreifende Darstellung der relevanten Quellgruppen 1998	37
2.2.7	Emissionen ausgewählter Inhaltsstoffe	39
2.2.8	Unsicherheiten und Kenntnislücken	41
<b>3</b>	<b>Entwicklung einer Projektion in das Jahr 2010</b>	<b>44</b>
<b>3.1</b>	<b>Methodik des Trendszenarios</b>	<b>44</b>
3.1.1	Projektion von Aktivitätsdaten	45
3.1.2	Projektion von Emissionsfaktoren	47
<b>3.2</b>	<b>Ergebnisse des Trendszenarios für das Jahr 2010</b>	<b>51</b>
3.2.1	Gesamtsituation in Baden-Württemberg	51
3.2.2	Sektorübergreifende Darstellung der relevanten Quellgruppen 2010	53
<b>4</b>	<b>Betrachtung möglicher Minderungsmaßnahmen</b>	<b>55</b>
<b>4.1</b>	<b>Darstellung technischer Maßnahmen und ihrer Wirksamkeit</b>	<b>55</b>
4.1.1	Mobile Quellen - primäre Maßnahmen	56
4.1.2	Mobile Quellen - sekundäre Maßnahmen	59
4.1.3	Stationäre Quellen - primäre Maßnahmen	61
4.1.4	Stationäre Quellen - sekundäre Maßnahmen	63
<b>4.2</b>	<b>Weitergehende Minderungspotenziale in Baden-Württemberg</b>	<b>65</b>
4.2.1	Annahmen und Randbedingungen für Minderungsszenarien	66
4.2.2	Ergebnisse der Minderungsszenarien	71
<b>4.3</b>	<b>Empfehlungen für eine zukünftige Minderungsstrategie</b>	<b>75</b>
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>80</b>
<b>6</b>	<b>Literatur</b>	<b>84</b>
<b>7</b>	<b>Anhang</b>	<b>93</b>

**ABBILDUNGSVERZEICHNIS**

Abb. 2-1: Ergebnisse der Emissionsberechnung für PM, PM <sub>10</sub> und PM <sub>2,5</sub> in Baden-Württemberg 1998 in fünf Sektoren zusammengefasst.....	29
Abb. 2-2: PM-, PM <sub>10</sub> - und PM <sub>2,5</sub> -Emissionen des Straßenverkehrs in Baden-Württemberg 1998.....	30
Abb. 2-3: PM-, PM <sub>10</sub> - und PM <sub>2,5</sub> -Emissionen des sonstigen Verkehrs und sonstiger Fahrzeuge und mobiler Geräte in Baden-Württemberg 1998 .....	32
Abb. 2-4: PM-, PM <sub>10</sub> - und PM <sub>2,5</sub> -Emissionen der genehmigungsbedürftigen Anlagen in Baden-Württemberg 1996 für verschiedene Verfahrensarten/Anlagentypen .....	34
Abb. 2-5: PM-, PM <sub>10</sub> - und PM <sub>2,5</sub> -Emissionen der genehmigungsbedürftigen Anlagen in Baden-Württemberg 1996 für verschiedene Abgasreinigungen.....	35
Abb. 2-6: PM-, PM <sub>10</sub> - und PM <sub>2,5</sub> -Emissionen der Kleinf Feuerungen in Baden-Württemberg 1998.....	36
Abb. 2-7: PM-, PM <sub>10</sub> - und PM <sub>2,5</sub> -Emissionen der sonstigen Prozesse, nicht genehmigungsbedürftig in Baden-Württemberg 1998.....	37
Abb. 3-1: Ergebnisse der Trendprojektion – prozentuale Veränderung der PM <sub>10</sub> -Emissionen in Baden-Württemberg bis zum Jahr 2010 .....	52
Abb. 3-2: Ergebnisse der Trendprojektion – absolute Veränderung der PM <sub>10</sub> -Emissionen in Baden-Württemberg bis zum Jahr 2010 .....	52
Abb. 4-1: Wirksamkeit primärer Maßnahmen bei Dieselmotoren im Straßenverkehr (ausgewählte Angaben aus verschiedenen Datenquellen) .....	58
Abb. 4-2: Minderungsraten von sekundären Maßnahmen bezüglich EURO 2-Dieselmotoren (ausgewählte Angaben aus verschiedenen Datenquellen) .....	60
Abb. 4-3: Wirksamkeit von Brennstoffsubstitutionen bei öffentlichen Kraftwerken (UBA, 2001b) und Haushaltsfeuerungen (PFEIFFER et al., 2000).....	62
Abb. 4-4: Abscheideraten stationärer Entstaubungssysteme für PM <sub>2,5</sub> aus (EPA, 1995) .....	64
Abb. 4-5: Abgasreinigungssysteme bei genehmigungsbedürftigen Anlagen im Jahr 1996 – Großfeuerungen BImSchV-Nr. 01.01.....	68
Abb. 4-6: Abgasreinigungssysteme bei genehmigungsbedürftigen Anlagen im Jahr 1996 – Feuerungen BImSchV-Nr. 01.02 und indirekte Prozessfeuerungen.....	69
Abb. 4-7: Minderungspotenziale in Baden-Württemberg für mobile Quellen in % Minderung aller anthropogenen Emissionen im Jahr 2010 (ohne Staubaufwirbelung im Verkehr) .....	72

Abb. 4-8: Minderungspotenziale in Baden-Württemberg für die Nachrüstung von KFZ mit DPF (90 % Minderung) für verschiedene Fahrzeugkonzepte in Mg PM <sub>10</sub> .....	72
Abb. 4-9: Minderungspotenziale in Baden-Württemberg für stationäre Quellen in % Minderung aller anthropogenen Emissionen im Jahr 2010 (ohne Staubaufwirbelung im Verkehr) .....	74
Abb. 4-10: Minderungspotenziale in Baden-Württemberg für den Verkehr und genehmigungsbedürftige Anlagen in % Minderung aller anthropogenen Emissionen im Jahr 2010 (ohne Staubaufwirbelung im Verkehr) .....	77

### **TABELLENVERZEICHNIS**

Tab. 2-1: Emissionsfaktoren (EF) und Feinstaubanteile für verschiedene Fahrzeugarten, Diesel- und Ottomotoren .....	7
Tab. 2-2: Emissionsfaktoren (EF) und Feinstaubanteile für den Reifen- und Bremsenabrieb im Straßenverkehr .....	8
Tab. 2-3: Annahmewerte für den Staubgehalt (sL) auf öffentlichen befestigten Straßen aus (EPA, 2002) in g/m <sup>2</sup> .....	11
Tab. 2-4: Unterschiedliche Modellkonstanten für Gleichung (2) aus (EPA, 2002) und (VENKATRAM, 2000) .....	12
Tab. 2-5: Mittlere Gewichte verschiedener Fahrzeugkategorien in Deutschland .....	14
Tab. 2-6: Fahrleistungen, W und sL in Baden-Württemberg im Jahr 1998 .....	14
Tab. 2-7: Feinstaubanteile für die Emissionen des Straßenverkehrs .....	16
Tab. 2-8: Emissionsfaktoren (EF) für den Flugverkehr aus (BUWAL, 2000a) abgeleitet .....	17
Tab. 2-9: Emissionsfaktoren (EF) und Feinstaubanteile für den Abrieb im Bahn- und Flugverkehr .....	18
Tab. 2-10: Emissionsfaktoren (EF) für die Abgasemissionen der sonstigen Fahrzeuge und mobilen Geräte .....	19
Tab. 2-11: Emissionsfaktoren (EF) und PM <sub>10</sub> -Anteile für den Abrieb durch sonstige Fahrzeuge und mobile Geräte aus (BUWAL, 2001) .....	20
Tab. 2-12: Zusammengefasste Gruppen unterschiedlicher Abgasreinigungen in den Emissionserklärungen .....	21
Tab. 2-13: Zusammengefasste Gruppen unterschiedlicher Verfahrensarten/Anlagentypen in den Emissionserklärungen .....	22

Tab. 2-14: Emissionsfaktoren (EF) für die Kleinf Feuerungen aus (PFEIFFER et al., 2000) und verwendete Feinstaubanteile.....	23
Tab. 2-15: Emissionsfaktoren (EF) und Feinstaubanteile für sonstige Prozesse, nicht genehmigungsbedürftig.....	25
Tab. 2-16: Größenspezifische Anteile beispielhaft für Pb und Cd in % der Staubemissionen aus industriellen Prozessen aus (BRANDL et al., 2000) .....	26
Tab. 2-17: PM <sub>10</sub> -Emissionen durch die Aufwirbelung von Straßenstaub in Baden-Württemberg 1998.....	31
Tab. 2-18: PM-, PM <sub>10</sub> - und PM <sub>2,5</sub> -Emissionen der genehmigungsbedürftigen Anlagen in Baden-Württemberg 1996 .....	33
Tab. 2-19: Emissionen der genehmigungsbedürftigen Anlagen in Baden-Württemberg 1996 getrennt in energie- und prozessbedingt.....	34
Tab. 2-20: Relevante Quellgruppen bezüglich PM <sub>2,5</sub> in Baden-Württemberg 1998/1996.....	38
Tab. 2-21: Emissionen ausgewählter Schwermetalle als Staubinhaltsstoffe in Baden-Württemberg 1998.....	39
Tab. 2-22: Emissionen organischer Verbindungen in Baden-Württemberg 1998.....	40
Tab. 2-23: PAK, PCDD/F-Emissionen aus dem Straßenverkehr in Baden-Württemberg 1998, berechnet mit Emissionsfaktoren aus verschiedenen Quellen.....	40
Tab. 2-24: Gegenüberstellung der ermittelten Emissionsdaten für Gesamtstaub im Jahr 1998 mit Ergebnissen aus (UMEG, 2001) .....	43
Tab. 3-1: Ergebnisse der Projektion - PM, PM <sub>10</sub> und PM <sub>2,5</sub> -Emissionen in Baden-Württemberg im Jahr 2010.....	53
Tab. 3-2: Relevante Quellgruppen bezüglich PM <sub>2,5</sub> in Baden-Württemberg 2010 .....	54
Tab. 4-1: Fallannahmen für mobile Quellen.....	67
Tab. 4-2: Fallannahmen für stationäre Quellen .....	70
Tab. 7-1: Feinstaubanteile der Emissionen aus genehmigungsbedürftigen Anlagen nach Verfahrensart/Anlagentyp und Abgasreinigung (Abschätzungen basierend auf Literaturlauswertungen) .....	93
Tab. 7-2: Einzelergebnisse der Emissionsermittlung für den Straßenverkehr in Baden-Württemberg 1998.....	94
Tab. 7-3: Einzelergebnisse der Emissionsermittlung für den sonstigen Verkehr und sonstige Fahrzeuge und mobile Geräte in Baden-Württemberg 1998.....	95

Tab. 7-4: Einzelergebnisse der Emissionsermittlung für genehmigungsbedürftige Feuerungsanlagen (1. Obergruppe 4. BImSchV und Müllverbrennung) in Baden-Württemberg 1996.....	96
Tab. 7-5: Einzelergebnisse der Emissionsermittlung für genehmigungsbedürftige Produktionsprozesse in Baden-Württemberg 1996 nach BImSchV-Nr. ....	97
Tab. 7-6: Einzelergebnisse der Emissionsermittlung für Kleinf Feuerungen in Baden-Württemberg 1998.....	100
Tab. 7-7: Einzelergebnisse der Emissionsermittlung für sonstige Prozesse, nicht genehmigungsbedürftig in Baden-Württemberg 1998.....	100
Tab. 7-8: Verwendete Emissionsfaktoren für die Abschätzung der Emissionen organischer Verbindungen.....	101
Tab. 7-9: Verwendete Anteile an den Staubemissionen für die Abschätzung der Emissionen ausgewählter Elemente .....	101
Tab. 7-10: Trendfaktoren (TF) und Datenquellen (Prognose oder Aktivitätszeitreihe Vergangenheit) für die Projektion von Aktivitäten von 1998 nach 2010.....	103
Tab. 7-11: Trendfaktoren (TF) und Annahmen für die Projektion von Emissionsfaktoren von 1998 nach 2010 .....	106

### **ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS**

AGR	Abgasreinigung
As	Arsen
BaP	Benzo(a)pyren
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
Cd	Cadmium
CNG	komprimiertes Erdgas (compressed natural gas)
CO	Kohlenmonoxid
Cr	Chrom
CRT	Continuously Regenerating Technology Partikelfiltersystem Fa. Johnson Matthey
DME	Dimethylether
DOC	Diesel-Oxidationskatalysator
DPF	Dieselpartikelfilter
DPX	Katalysierter Partikelfilter Fa. Engelhard
DTV	Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (average daily traffic volume)
EF	Emissionsfaktor

EnEV	Energieeinsparverordnung
EPA	Environmental Protection Agency (US Umweltschutzbehörde)
EST-Guss	Eisen-, Stahl-, Temperguss
FAP	Filtre à particules, Partikelfiltersystem Fa. PSA Peugeot Citroën
HC	Kohlenwasserstoffe (hydrocarbons)
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
KFZ	Kraftfahrzeug
KRAD	Krafträder
LKW	Lastkraftwagen
LN	Landwirtschaftliche Nutzfläche
LNF	Leichte Nutzfahrzeuge
LNG	flüssiges Erdgas (liquified natural gas)
LPG	flüssiges Erdölgas (liquified petroleum gas)
LTO	Landing & Take-Off (Lande- und Startzyklus)
NE-Metalle	Nichteisenmetalle
NMVOG	Flüchtige organische Kohlenwasserstoffe außer Methan
NO <sub>x</sub>	Stickstoffoxide
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
Pb	Blei
PCDD/F	Polychlorierte Dibenzodioxine/-furane
PKW	Personenkraftwagen
PM	Particulate matter, Masse Gesamtstaub
PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub>	Masse der Partikel, die einen gröbenselektierenden Lufteinlass passieren, der für einen aerodynamischen Durchmesser von 10 µm bzw. 2,5 µm eine Abscheidewirksamkeit von 50 % aufweist.
RME	Rapsölmethylester
SCR	Selektive katalytische Reduktion
SCRT	Kombination von Partikelfilter (CRT) und SCR
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid
SZ	Sattelzugmaschinen
T95	Destillationstemperatur, bei der 95 % des Diesels verdampfen
TA Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
TCDD	Tetrachlordibenzo-p-dioxin
TEQ	Toxizitätsäquivalente zu 2,3,7,8-TCDD
TF	Trendfaktor



# 1 Einleitung und Zielsetzung

Erkenntnisse aus der Wirkungsforschung weisen darauf hin, dass atmosphärische Feinstäube in erheblich stärkerem Maße gesundheitsbeeinträchtigende Wirkungen haben, als dies noch in den 80er und zu Beginn der 90er Jahre angenommen wurde. Epidemiologische Studien zeigen, dass auch Staubkonzentrationen, wie sie zur Zeit in Baden-Württemberg gemessen werden, einen erheblichen Einfluss auf die menschliche Gesundheit haben und zur Entstehung von Atemwegserkrankungen und Herz-/Kreislauferkrankungen beitragen können. In einigen Studien wurde ein konsistenter und signifikanter Zusammenhang zwischen atmosphärischer Staubkonzentration und der Sterblichkeit in der jeweils betroffenen Bevölkerung festgestellt (s. PETERS et al., 1998).

Im April 1999 erfolgte die Verabschiedung der 1. Tochterrichtlinie zur EU-Luftqualitäts-Rahmenrichtlinie (99/30/EG), die aufgrund dieser wirkungsseitigen Erkenntnisse für  $PM_{10}$  sehr niedrige Immissionsgrenzwerte festlegt. Diese ab 2005 bzw. 2010 geltenden Grenzwerte von  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  bzw. voraussichtlich  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  im Jahresmittel und insbesondere die Grenzwerte für das Tagesmittel werden auch in Baden-Württemberg derzeit mancherorts überschritten. Weitere Maßnahmen zur Minderung der Partikelemissionen sind folglich notwendig. Zur Entwicklung einer Minderungsstrategie ist es zunächst erforderlich, die Quellen der Partikel zu identifizieren. Dabei ist es nicht ausreichend, die Emissionen nur insgesamt zu erfassen oder Ergebnisse bestehender Emissionsinventare zu übernehmen. Vielmehr müssen Emissionsbeiträge und technologische Spezifikationen der Quellen auf detaillierter Ebene ermittelt bzw. untersucht werden, um geeignete Minderungsmaßnahmen identifizieren zu können.

In der ersten Phase dieses Projekts wurden daher ausgehend von bisher in Baden-Württemberg vorgenommenen Arbeiten und in Abstimmung mit dem Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit (UMEG) und dem Statistischen Landesamt (STALA) die Grundlagen für eine differenzierte Aufstellung des Quellen- und Emissionsinventars für primäre anthropogene Stäube in Baden-Württemberg geschaffen. Unter Stäuben werden in diesem Zusammenhang sowohl feste als auch flüssige Partikelbestandteile verstanden. Umfangreiche Recherchen und Datenauswertungen lieferten neue Erkenntnisse zu den spezifischen Emissionen der betrachteten Quellgruppen und den jeweiligen Feinstaubanteilen. Diese Basisdaten wurden für eine Quantifizierung der Emissionen von  $PM_{10}$  und erstmals auch  $PM_{2,5}$  in Baden-Württemberg im Jahr 1998 verwendet. Für relevante Prozesse, deren Emissionen bislang nicht quantifiziert werden konnten, wurden Methoden für eine erste Emis-

sionsabschätzung für Baden-Württemberg erarbeitet. Insbesondere zur Aufwirbelung von Straßenstaub wurde der Stand des Wissens zusammengestellt. Des Weiteren sind verfügbare Informationen über Inhaltsstoffe von emittierten Stäuben zusammengetragen und die Relevanz von Quellgruppen als Emittenten ausgewählter Elemente und Verbindungen untersucht worden.

In weiteren Arbeiten wurde eine Trendprojektion der Emissionen als Referenzszenario für das Jahr 2010 entwickelt. Als Grundlage des Trendszenarios dienten die ermittelten Emissionen für das Jahr 1998. Die resultierende Emissionsdatenbasis für 2010 beinhaltet differenzierte Daten einzelner Quellgruppen und schafft die Voraussetzung für die Betrachtung von weitergehenden Minderungspotenzialen in Baden-Württemberg.

In der zweiten Projektphase erfolgte schwerpunktmäßig die Betrachtung technischer Möglichkeiten zur Emissionsminderung. Die Emissionsdatenbasis ist unterdessen bei Vorliegen neuer Erkenntnisse und Basisdaten laufend aktualisiert und erweitert worden. Zunächst wurden technische Minderungsoptionen hinsichtlich ihrer korngroßen-selektiven Wirksamkeit untersucht. Neben einer umfangreichen Auswertung von Literaturquellen wurden Hersteller von Abgasreinigungsanlagen befragt. Aus den möglichen Optionen erfolgte die Auswahl von Maßnahmen, die insbesondere bezüglich  $PM_{2,5}$  wirksam sind und sich auch zur Minderung der emittierten Partikelanzahl eignen. Diese Anforderung ergibt sich aus Erkenntnissen der Wirkungsforschung, dass die in hoher Anzahlkonzentration und mit geringer Masse in Abgasen vorhandenen Partikel im Nanometerbereich bzw. die ultrafeinen Partikel  $< 0,1 \mu m$  Durchmesser für die epidemiologisch beobachteten Gesundheitseffekte insbesondere verantwortlich sein könnten.

Für wesentliche Emittentengruppen wurden schließlich ausgehend von den Emissionsdaten des Referenzszenarios 2010 über die Entwicklung eines Minderungsszenarios Minderungspotenziale abgeschätzt und verschiedene Maßnahmen vergleichend gegenübergestellt. Daraus lässt sich eine wirksame Minderungsstrategie ableiten, die auch schon bis zum Jahr 2010 wesentliche Emissionsminderungen erreichen kann. Im Rahmen dieses Schlussberichts werden die Ergebnisse des Projekts dargestellt und die verwendeten Datengrundlagen dokumentiert.

## **2 Ermittlung der Feinstaubemissionen im Jahr 1998 in Baden-Württemberg**

Die Darstellung der Feinstaubemissionen in Baden-Württemberg erfolgt für einzelne Prozesse/Quellgruppen, um ein möglichst differenziertes Bild der Emittentenstruktur zu bekommen. Hierbei werden auch erste Emissionsabschätzungen für Prozesse entwickelt, die bislang in Emissionsinventaren nicht berücksichtigt werden konnten. Da im Rahmen des Projekts keine eigenen Emissionsmessungen vorgenommen wurden, war die systematische Zusammenstellung verfügbarer Daten zu Quellstärken und Spezifikationen der verursachenden Prozesse die Grundlage für die Entwicklung von Methoden zur Berechnung der Jahresemissionen. Diese Arbeiten haben insbesondere hinsichtlich der Feinstaubanteile neue Erkenntnisse geliefert. Nach wie vor bestehen für einige Prozesse erhebliche Kenntnislücken oder eine ungenügende Datenbasis, so dass sich vielfach Forschungsbedarf erkennen lässt. Im Rahmen der angestrebten Verbesserungen der Emissionsberechnung für Baden-Württemberg wurden die Ergebnisse bei Projekttreffen den Arbeiten des UMEG und des STALA gegenübergestellt und Unterschiede bei den Vorgehensweisen diskutiert.

### **2.1 Vorgehensweise und Datengrundlage zur Emissionsermittlung**

#### **2.1.1 Quellgruppen und Methodik der Emissionsermittlung**

Bei der Darstellung der Emissionssituation in Baden-Württemberg hinsichtlich primärer Stäube können die nachstehenden Quellgruppen unterschieden und betrachtet werden:

##### **Verkehr**

- Diesel- und Ottomotoren des Straßenverkehrs
- Reifen- und Bremsenabrieb des Straßenverkehrs
- Aufwirbelung von Straßenstaub
- sonstiger Verkehr (ziviler und militärischer Flugverkehr, Bahn- und Schiffsverkehr)
- sonstige Fahrzeuge und mobile Geräte (in der Land-, Forst-, Bauwirtschaft, Industrie und beim Militär)

### **Genehmigungsbedürftige Anlagen**

- Öffentliche Kraft- und Fernheizwerke (einschließlich Müllverbrennung)
- Industrielle Kraft- und Heizwerke
- Produktionsprozesse (inkl. Prozessfeuerungen):

Baustoffe, mineralische Produkte: Schotter, Bauschuttzubereitung, Ziegel, Zement, Kalk, Gips, Beton und Mörtel, Keramik, Feuerfestprodukte, Glas, Glasfasern, Asphaltmischgut, Bitumendachbahnen u. a.

Metallerzeugung und -verarbeitung: Herstellung von Stahl, Aluminium, EST-Guss, NE-Metallguss, Ferro-Legierungen, Verzinken, Lackieren, Strahlen und sonstige Oberflächenbehandlung

Chemische Produkte: Anorganische Grundstoffe, Raffinationsprodukte aus Erdöl, Chemiefasern, Kunststoffe, Farben und Lacke, Carbide, Seifen, Säuren, Gummi, Düngemittel u. a.

Nahrungsmittel: Räuchereien, Mahlen von Getreide, Röstereien, Herstellung von Pflanzenöl, Malz, Bier u. a.

Sonstige Produkte: Spanplatten, Holzfaserplatten, Zellstoff, Papier, Druckwaren, Aufbereitung von Kohlen u. a.

- Sonstige Prozesse:  
Krematorien, Motorenprüfstände, Abfallsortierung, Umschlagprozesse in genehmigungsbedürftigen Anlagen

### **Nicht genehmigungsbedürftige Feuerungsanlagen (Kleinf Feuerungen)**

- Kleinf Feuerungen der Haushalte und Kleinverbraucher (einschließlich Militär)
- Kleinf Feuerungen der Industrie

### **Sonstige Prozesse, nicht genehmigungsbedürftig**

- nicht genehmigungsbedürftiger Umschlag staubender Güter
- Sonstige nicht nach dem BImSchG genehmigungsbedürftige Produktionsprozesse, wie Schreinereien, Prozesse in der Landwirtschaft und im Baugewerbe, Tierhaltung, Steinbrüche, Salzgewinnung
- Sonstige anthropogene Prozesse, wie Feuerwerke und das Rauchen von Tabak

Nicht betrachtet wurden in diesem Projekt natürliche Staubemissionen, wie etwa Blütenstaub oder Bodenerosionen.

Die Ermittlung der Feinstaubemissionen erfolgt außer für genehmigungsbedürftige Anlagen mittels Berechnungen für einzelne Prozesse bzw. emissionsverursachende Aktivitäten mit Hilfe von spezifischen Kenngrößen (Emissionsfaktoren und Feinstaubanteile). Emissionsfaktoren (EF) für Gesamtstaub (PM) werden mit der jeweils zugehörigen Aktivität (A) und, zur Ermittlung der Feinstaubemissionen ( $PM_{10}$  und  $PM_{2,5}$ ), mit durchschnittlichen Feinstaubanteilen (FA) in Abgasen der betrachteten Prozesse multipliziert. Die Emission  $E_{ij}$  der Staubfraktion i einer Quellgruppe j ergibt sich zu:

$$(1) \quad E_{ij} = EF_j * A_j * FA_{ij}$$

Die Verknüpfung dieser prozessspezifischen Kennwerte erfolgt je nach Detailliertheit und Struktur der vorliegenden Daten auf unterschiedlichen Ebenen und mit verschiedenen Methoden. Für die Betrachtung der industriellen Prozesse können zudem die dem Land vorliegenden Emissionserklärungen von Betreibern genehmigungsbedürftiger Feuerungs- und Produktionsanlagen in Baden-Württemberg verwendet werden, in denen die Gesamtstaubemissionen (PM) der erfassten Einzelanlagen direkt angegeben sind. Diese Erklärungen wurden zuletzt für das Jahr 1996 entsprechend den Vorgaben der 11. BImSchV (Emissionserklärungsverordnung) erhoben und vom UMEG aufbereitet (UMEG, 1999a). Für das Jahr 2000 sind die Emissionserklärungen mittlerweile erhoben, die Aufbereitung der Daten war jedoch innerhalb der Projektlaufzeit noch nicht beendet. Den unterschiedlichen Prozessen werden zur Abschätzung der  $PM_{10}$ - und  $PM_{2,5}$ -Emissionen typische Feinstaubanteile zugeordnet. Dies erfolgt differenziert nach Verfahrensarten/Anlagentypen und Abgasreinigungen.

### 2.1.2 Sektor Verkehr

Im Sektor Verkehr dominieren die Emissionen des Straßenverkehrs. Hier sind neben den Abgasemissionen aus Diesel- und Ottomotoren auch Abriebprozesse wie Reifen- und Bremsenabrieb und die Aufwirbelung von Straßenstaub infolge der Verkehrsbewegungen zu berücksichtigen. Der Kupplungsabrieb im Straßenverkehr bleibt unberücksichtigt, da dieser weitgehend im Gehäuse verbleibt und nur in geringem Maße als flugfähiger Staub emittiert wird. Weitere Emissionen im Sektor Verkehr entstehen durch den sonstigen Verkehr, wie Bahn-, Schiffs- und Flugverkehr, und sonstige Fahrzeuge und mobile Geräte.

## **Straßenverkehr - Abgase, Reifen- und Bremsenabrieb**

Zur Berechnung der Partikelemissionen des Straßenverkehrs müssen Aktivitätsdaten in Form von Fahrleistungen für verschiedene Straßenklassen, Fahrzeugkategorien und Minderungskonzepte vorliegen. Die Aktivitätsdaten können größtenteils über Auswertungen von Verkehrszählungen ermittelt werden (s. WICKERT, 2001). Bei den Fahrleistungen für Flächenquellen innerorts und Kreis- und Gemeindestraßen außerorts erfolgt ein Abgleich mit den Ergebnissen aus kleinräumigen Untersuchungen des UMEG zur Erstellung des Emissionskatasters Baden-Württemberg (UMEG, 2001). Es werden die folgenden Fahrzeugkategorien unterschieden:

- Personenkraftwagen (PKW)
- Krafträder (KRAD)
- leichte Nutzfahrzeuge (LNF)
- Lastkraftwagen (LKW) ohne Anhänger
- Lastkraftwagen (LKW) mit Anhänger
- Busse
- Sattelzüge (SZ)

Für die Ermittlung der Abgasemissionen der Dieselmotoren im Straßenverkehr werden die detaillierten Emissionsfaktoren aus dem "Handbuch der Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs" verwendet. Diese Datenbank wurde von der schweizerischen INFRAS GmbH im Auftrag des BUWAL und des UBA entwickelt (INFRAS, 1995 und 2000) und liegt seit 1999 in der aktualisierten Version 1.2 vor (UBA, 1999a). Die Partikelemissionen aus Ottomotoren sind im Handbuch nicht berücksichtigt. Zur Darstellung der Emissionen aus Ottomotoren mit Katalysator werden Messdaten aus zahlreichen neueren Messprojekten ausgewertet (z. B. NORBECK et al., 1998a; NORBECK et al., 1998b; ACEA, 1999; ACEA, 2002; CONCAWE, 1998; MOHR, 2000) und mittlere Emissionsfaktoren für PKW und LNF abgeleitet. Auch für den Anteil der Staubfraktionen  $PM_{10}$  und  $PM_{2,5}$  in Abgasen von Kraftfahrzeugen im Straßenverkehr werden ausgehend von Messdaten aus (NORBECK et al., 1998a) und (NORBECK et al., 1998b) erste Anhaltswerte ermittelt. Die Emissionsabschätzung für PKW und LNF ohne Katalysator erfolgt mit einem Emissionsfaktor aus (GARBEN, 1996). Für die 2-Takt- und 4-Takt-Krafträder liegen geschätzte Emissionsfaktoren aus (MAYER, 1998) und eine Abschätzung des Feinstaubanteils aus (LÜKEWILLE et al., 2001) vor. In der nachfolgenden Tabelle sind die resultierenden Emissionsfaktoren und Feinstaubanteile der Diesel- und Ottomotoren für verschiedene Fahrzeugarten wiedergegeben.

Tab. 2-1: Emissionsfaktoren (EF) und Feinstaubanteile für verschiedene Fahrzeugarten, Diesel- und Ottomotoren

	EF PM	Einheit	PM <sub>10</sub> -Anteil	PM <sub>2,5</sub> -Anteil
<b>Ottomotoren (Warmbetrieb)</b>				
LNF mit geregelter Katalysator	5,1	mg/km	0,90	0,84
LNF mit ungeregelter Katalysator	9,4	mg/km	0,95	0,89
LNF ohne Katalysator	25,0	mg/km	0,95	0,89
PKW mit geregelter Katalysator	4,6	mg/km	0,91	0,86
PKW mit ungeregelter Katalysator	8,2	mg/km	0,96	0,90
PKW ohne Katalysator	25,0	mg/km	0,96	0,90
KRAD 4-Takt	10,6	mg/km	0,96	0,90
KRAD 2-Takt	60	mg/km	0,99	0,85
<b>Dieselmotoren (Warmbetrieb und Kaltstart)</b>				
PKW	56 - 110	mg/km	0,99	0,95
LNF	107 - 213	mg/km	0,99	0,95
SNF (LKW, SZ, Bus)	290 - 690	mg/km	0,99	0,95
Kaltstart, PKW, < 1986	333	mg/Start	0,99	0,95
Kaltstart, PKW, 1986-1994	100 - 139	mg/Start	0,99	0,95
Kaltstart, PKW, EURO 2	83	mg/Start	0,99	0,95
Kaltstart, LNF, < 1986	990	mg/Start	0,99	0,95
Kaltstart, LNF, 1986-1994	216	mg/Start	0,99	0,95
Kaltstart, LNF, EURO 1	189	mg/Start	0,99	0,95
Kaltstart, LNF, EURO 2	148	mg/Start	0,99	0,95

Für die Quantifizierung des Reifenabriebs im Straßenverkehr liegen Emissionsfaktoren aus einer in Berlin durchgeführten Untersuchung vor (GEBBE et al., 1998). Diese Daten wurden mittels Profiltiefenmessungen für unterschiedliche Fahrzeugkategorien, Leistungs-, Gewichtsklassen und Antriebsarten ermittelt. Da nicht der gesamte Abrieb als flugfähiger Staub in die Atmosphäre gelangt, sondern ein grober Anteil direkt auf der Straßenoberfläche oder am Straßenrand deponiert wird, erfolgt analog RIVM (2001) die Annahme, dass nur etwa 75 % des Abriebs als Partikelemission anfällt. Angaben zu den PM<sub>10</sub>-Emissionen durch Reifenabrieb liegen aus Untersuchungen von RAUTERBERG-WULFF (1998) vor. Diese Daten wurden durch Straßenmessungen in Berlin bestimmt. Für Fahrsituationen außerorts liegen keine Messdaten vor. Für den PM<sub>2,5</sub>-Anteil werden Annahmen aus (LÜKEWILLE et al., 2001) übernommen.

Für die Ermittlung der Emissionen durch Bremsenabrieb existieren neben Ergebnissen aus den Straßenmessungen von RAUTERBERG-WULFF (1998) neuere Messdaten aus Prüfstandsmessungen in den USA (GARG et al., 2000). In dieser Studie wurden mehrere marktgängige Bremsbeläge eingesetzt und die Emissionen jeweils gröbenselektiv

bestimmt. Gegenüber den Straßenmessungen von RAUTERBERG-WULFF wurden höhere  $PM_{2,5}$ -Anteile festgestellt. Hinsichtlich der  $PM_{10}$ -Emissionen liefern beide Studien vergleichbare Ergebnisse. GARG et al. (2000) bestimmten den Anteil des flugfähigen Staubs auf im Mittel 30 % des Abriebs. Tabelle 2-2 fasst die aus diesen Erkenntnissen abgeleiteten Kennwerte für den Reifen- und Bremsenabrieb zusammen.

Tab. 2-2: Emissionsfaktoren (EF) und Feinstaubanteile für den Reifen- und Bremsenabrieb im Straßenverkehr

	EF PM in mg/km	$PM_{10}$ -Anteil	$PM_{2,5}$ -Anteil
<b>Reifenabrieb</b>			
PKW (4 Reifen)	39,6	0,15	0,008
KRAD (2 Reifen)	19,8	0,15	0,008
LNF (4,6 Reifen)	80,4	0,15	0,008
SNF (6,7 Reifen)	404,5	0,08	0,004
<b>Bremsenabrieb</b>			
PKW und KRAD	3,4	0,86	0,63
LNF	5,2	0,86	0,63
SNF	8,8	0,86	0,63

### **Straßenverkehr – Aufwirbelung von Straßenstaub**

Die Aufwirbelung von Straßenstaub konnte bei der Ermittlung von Staubemissionen in Baden-Württemberg bislang nicht berücksichtigt werden. Die Vorgehensweise und Datenbasis zur Entwicklung einer ersten Emissionsabschätzung sollen deshalb ausführlicher dargestellt werden. Umfangreiche Arbeiten zur Untersuchung der Mechanismen der Staubentstehung und zur Entwicklung einer Quantifizierung der Emissionen fanden in der Vergangenheit vor allem in den USA statt. In Deutschland werden erst seit etwa drei Jahren erste Messprojekte zur Untersuchung der Aufwirbelung von Straßenstaub durchgeführt. Erste Ergebnisse aus diesen Messprojekten liegen vor, grundlegend neue methodische Ansätze zur Quantifizierung der Emissionen gibt es aber bislang nicht. Im Folgenden sollen zunächst die Ergebnisse der Arbeiten in den USA zusammengefasst und die Methode der US EPA vorgestellt und diskutiert werden. Diese Methode wird so modifiziert und mit verfügbaren Daten an die Verhältnisse in Deutschland angepasst, dass eine erste grobe Abschätzung der Emissionen durch Straßenstaub in Baden-Württemberg möglich wird. Parallel werden mit Emissionsfaktoren aus (HÜGLIN et al., 2000), (BUWAL, 2001) und (IIASA, 2002), die zum Teil auch von den Arbeiten der EPA abgeleitet worden sind, und Emissionsfaktoren aus Messungen der



Partikelaufrirbelung hinter einem Testfahrzeug aus (FITZ & BUFALINO, 2002) Abschätzungen vorgenommen und den ermittelten Emissionen gegenübergestellt.

Bei gewöhnlichen Verkehrssituationen (kein Streusplitt, keine Fahrbahnverschmutzungen) ist zu erwarten, dass auf der Straßenoberfläche ein Gleichgewicht zwischen Staubdeposition, Staubentstehung und –aufwirbelung entsteht, so dass sich bei konstanten Verkehrsströmen ein relativ konstanter Staubgehalt auf trockenen Fahrbahnoberflächen einstellt. Nach EPA (2002) ist die Lage bzw. der Staubgehalt bei diesem Gleichgewicht abhängig von

- der mittleren Geschwindigkeit und dem mittleren Gewicht der Fahrzeuge,
- dem durchschnittlichen Verkehrsvolumen (DTV),
- der Anzahl und dem jeweiligen Verkehrsvolumen der Fahrspuren,
- dem LKW-Anteil am Verkehr,
- der Anwesenheit von Bordsteinkanten, Parkspuren, Regenwasserabflüssen und einbiegenden Seitenstraßen,
- dem Vorhandensein von bedeutenden Staubquellen in der Straßenumgebung (z. B. Landwirtschaft, Baustellen, Umschlagplätze, etc.).

Atmosphärischer Straßenstaub kann aus sehr unterschiedlichen Quellen stammen. Neben einem unbekanntem Anteil direkt emittierten relativ feinen Straßenabriebs, handelt es sich um auf der Straßenoberfläche deponierte, dort durch Fahrzeugbewegungen zerkleinerte und aufgewirbelte Stäube des Verkehrs (Abgas, Reifen-, Bremsen-, Straßenabrieb), atmosphärische Depositionen, Partikel aus der Zerkleinerung von Erosionen aus der unmittelbaren Straßenumgebung und von auf die Fahrbahn aufgebrachtem Material (z. B. Streugut, Verschmutzungen).

Es ist zu erwarten, dass die Aufwirbelung von Straßenstaub in Deutschland generell eine geringere Bedeutung hat als in den USA, da einerseits bedingt durch einen im Mittel höheren Vegetations- und Befestigungsgrad in Straßenumgebungen geringere Einträge an mineralischem Material entstehen. Des Weiteren hat die relative Luftfeuchtigkeit einen großen Einfluss auf die Staubneigung von auf der Straßenoberfläche liegendem Material. Da es in ariden und semi-ariden Gebieten relativ häufig zu Fahrbahnverschmutzungen bei im Mittel relativ geringen Luftfeuchtigkeiten kommt, sind oftmals hohe und deutlich sichtbare Staubemissionen zu beobachten. Demgegenüber ist in Deutschland die Staubbelastung auf den Fahrbahnoberflächen weitaus geringer und die mittlere Luftfeuchtigkeit höher. Die dennoch messbaren verhältnismäßig hohen ver-

kehrbedingten Emissionen mineralischen Materials in Straßennähe könnten zu einem großen Anteil durch Straßenabrieb verursacht sein.

Von der US EPA wurde ein Ansatz zur Bestimmung der gesamten Emissionen des Straßenverkehrs (Abgas, Reifen-, Bremsenabrieb und Staubaufwirbelung) ausgehend von mit der Staubentstehung korrelierenden Parametern entwickelt (EPA, 1993 bzw. aktualisierte Version EPA, 2002). Der Ansatz basiert auf einer Auswertung von 65 Messungen in den USA, die den Verkehrsbeitrag an den Staubbelastungen in Straßennähe durch Messungen der Konzentrationen größtenteils mit der Aufwind-Abwind-Methode ermittelten. Parallel wurden jeweils die Verkehrszusammensetzung, die Verkehrssituation und die Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche untersucht und mit den Konzentrationen in Beziehung gesetzt. Als Parameter mit einer signifikanten Korrelation zur Staubentstehung wurden folgende Messgrößen bestimmt:

- Staubgehalt  $PM_{75}$  (Partikel  $< 75 \mu m$ ) auf der Fahrbahnoberfläche in  $g/m^2$
- mittleres Gewicht der Fahrzeugflotte

Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit der Fahrzeuge und den Staubemissionen konnte bei den zugrundeliegenden Messungen nicht festgestellt werden. Unter Verwendung der oben genannten Parameter kann nach EPA ein mittlerer Emissionsfaktor für die Gesamtemissionen des Straßenverkehrs auf einer befestigten Straße (Asphalt, Beton) mit der folgenden empirischen Gleichung dargestellt werden:

$$(2) \quad EF = k * (sL)^p * (W)^b$$

mit EF = Emissionsfaktor Staub in  $g/km$

k = Faktor zur Darstellung der interessierenden Staubfraktion:

für  $PM_{30}$  (PM):  $k = 2,94 g/km$ ; für  $PM_{10}$ :  $k = 0,56 g/km$ ; für  $PM_{2,5}$ :  $k = 0,135 g/km$

sL = Beladung der Fahrbahnoberfläche mit Staub  $< 75 \mu m$  Durchmesser ( $PM_{75}$ ) in  $g/m^2$

W = durchschnittliches Gewicht der Fahrzeuge in US short tons

p, b = empirische Modellkonstanten, nach (EPA, 2002):  $p = 0,65$  und  $b = 1,5$

Die EPA geht davon aus, dass die Emissionen des Straßenverkehrs in den USA insgesamt zu einem Großteil auf die Aufwirbelung von auf der Straßenoberfläche deponierten Stäuben zurückzuführen ist. Dieser vereinfachte Ansatz eignet sich nach Darstellung der EPA weder zur Herleitung von gewichtsspezifischen Emissionsfaktoren noch

können damit unterschiedliche Fahrzeuggeschwindigkeiten betrachtet werden. Die Anwendung des Ansatzes gibt lediglich einen Anhaltswert für eine gesamte Fahrzeugflotte, die eine bestimmte Straße passiert. Das Modell wird von der EPA als gesichert bewertet, sofern gesicherte ortsspezifische Daten (sL, W) zu einer Abschätzung zur Verfügung stehen. Das Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) liegt bei 0,75. Der k-Faktor für  $PM_{2,5}$  basiert auf nur wenigen Messdaten.

Die wesentlichen Randbedingungen der Messungen in den USA waren:

- Staubbeladung ( $PM_{7,5}$ ) der Fahrbahnen: 0,02 bis 400 g/m<sup>2</sup>
- mittlere Fahrzeuggewichte: 1,8 bis 38 Mg (2 bis 42 US short tons)
- mittlere Fahrzeuggeschwindigkeiten: 16 bis 88 km/h
- ebene Straßenlage, flüssiger Verkehr (kein Stop & Go)

Für diese Bereiche kann nach EPA (2002) Gleichung (2) brauchbare Ergebnisse liefern. Sofern für die Parameter sL und W keine gesicherten ortsspezifischen Daten vorliegen, können laut EPA anhand der in Tabelle 2-3 wiedergegebenen Mittelwerte aus Messungen in den USA erste grobe Abschätzungen vorgenommen werden. Wie der Wertebereich für normale Fahrbahnverhältnisse deutlich macht, sind diese Angaben nur für eine erste orientierende Betrachtung geeignet.

Tab. 2-3: Annahmewerte für den Staubgehalt (sL) auf öffentlichen befestigten Straßen aus (EPA, 2002) in g/m<sup>2</sup>

	<b>Geringe Verkehrsbelastung &lt; 5.000 Fzg/Tag</b>	<b>Hohe Verkehrsbelastung &gt; 5.000 Fzg/Tag</b>
Normale Fahrbahnverhältnisse	0,4 (0,054 – 6,8)	0,1 (0,01 – 1,0)
Bei Fahrbahnverschmutzungen oder aufgebrachtem Streugut	3,0	0,5

Nach VENKATRAM (2000) besitzt das rein statistische Modell der EPA bedeutende Schwächen, wodurch es auch für die Ermittlung von Emissionsfaktoren einer Fahrzeugflotte in einem größeren Betrachtungsraum fragwürdig erscheint. Eine Analyse des Modells hinsichtlich der Differenzen zwischen den gemessenen Basisdaten und den sich aus dem Modell ergebenden Emissionsfaktoren zeigt, dass bei einer Anwendung der Gleichung (2) in 60 % der Fälle ein Emissionsfaktor berechnet wird, der gegenüber dem tatsächlichen um den Faktor 2 zu hoch oder zu tief liegt. Erklärt wird die Unsicherheit des Modells insbesondere durch die folgenden Schwachpunkte:

- Es werden keine mechanistischen Grundlagen berücksichtigt. Die Variablen Staubgehalt der Straße und mittleres Fahrzeuggewicht können nur ungenügend die Varianz der gemessenen Emissionsfaktoren wiedergeben.
- Der Ansatz und die einfließenden empirischen Faktoren sind vom zur Modellentwicklung verwendeten gemessenen Basisdatensatz abhängig. Bei einer Veränderung der Basisdaten ändern sich die Konstanten der Modellgleichung erheblich.
- Die Richtigkeit des Modells wird bestimmt von den verwendeten Methoden zur Emissionsmessung, die erhebliche Unsicherheiten besitzen.

Aus der Abhängigkeit des Modells von den verwendeten empirischen Basisdaten resultiert eine hohe Unsicherheit. Zudem sind die Randbedingungen der Messungen so gewählt, dass sowohl die Staubbeladung als auch das mittlere Gewicht der Fahrzeuge auf deutschen Straßen demgegenüber am unteren Rand der Wertebereiche liegen. VENKATRAM (2000) zeigt, dass durch das EPA-Modell der mittlere Emissionsfaktor für  $PM_{10}$  im üblichen Bereich der Staubbeladung auf Innerorts- und Außerortsstraßen in den USA ( $sL < 4 \text{ g/m}^2$ ) um bis zu 100 % und darüber überschätzt wird, wenn die gesamten 65 Messdaten der EPA mit einem  $sL$  zwischen 0,02 und  $400 \text{ g/m}^2$  zur Entwicklung von empirischen Konstanten Verwendung finden und nicht nur die 37 Messdaten im Bereich von 0,02 bis  $4 \text{ g/m}^2$ . Staubbeladungen von bis zu  $400 \text{ g/m}^2$  stellen insbesondere für deutsche Verhältnisse viel zu hohe Werte dar. Die tatsächliche Staubbeladung auf öffentlichen Straßen in Deutschland dürfte in der Regel unter  $1 \text{ g/m}^2$  liegen. Nachfolgende Tabelle gibt die Modellkonstanten wieder, die einerseits nach EPA aus den gesamten 65 amerikanischen Datensätzen und andererseits nach VENKATRAM aus den Untersuchungen mit Staubbeladungen  $< 4 \text{ g/m}^2$  resultieren. Die sich ergebenden Unterschiede bei der Emissionsermittlung sind erheblich.

Tab. 2-4: Unterschiedliche Modellkonstanten für Gleichung (2) aus (EPA, 2002) und (VENKATRAM, 2000)

Anzahl Messdaten	Staubgehalt $< 75 \mu\text{m}$ ( $\text{g/m}^2$ )	k ( $\text{g/Fzg-km}$ ) für $PM_{10}$	p	b	Bestimmtheitsmaß $R^2$
65	0,02 bis 400	0,56	0,65	1,50	0,75
37	0,02 bis 4	0,18	0,52	2,14	0,66

Seit der Erarbeitung des theoretischen Modells der EPA sind zahlreiche Untersuchungen getätigt worden, die auf diese empirische Gleichung Bezug nehmen. So sind beispielsweise von COWHERD & KUYKENDAL (1997) Messungen an verschiedenen Straßen in den USA vorgenommen worden, um einerseits gemessene Emissionsfaktoren

ren mit für die untersuchten Straßenabschnitte berechneten gegenüberzustellen und andererseits eine Überprüfung der  $PM_{2,5}$ -Anteile an den Emissionen vorzunehmen. Die Vergleiche ergaben eine gute Übereinstimmung der Mess- zu den Rechenwerten, sofern die Straßenoberfläche einen trockenen Zustand aufwies und während der Messungen eine für die Berechnung der Emissionen ausreichende Windgeschwindigkeit quer zur Fahrbahn herrschte. Sofern diese Bedingungen nicht gegeben waren, traten sehr große Unterschiede zwischen Messungen und Berechnungen auf, die eine eingeschränkte Anwendbarkeit des EPA-Modells erkennen ließen. Die Messungen zeigten einen mittleren  $PM_{2,5}$ -Anteil an den  $PM_{10}$ -Emissionen von etwa 25 %. Als weiteres Ergebnis der Studie von COWHERD & KUYKENDAL ergab sich, dass die Staubbelastung der Straßenoberflächen meist unter dem Mittelwert der EPA von  $0,4 \text{ g/m}^2$  für Straßen mit geringen Verkehrsstärken lagen. Die beobachteten  $PM_{75}$ -Beladungen stellten Werte zwischen  $0,01$  und  $0,18 \text{ g/m}^2$ , mit einem Mittel von  $0,08 \text{ g/m}^2$  dar.

In ersten Untersuchungen in Deutschland sind für stark befahrene Innerortsstraßen in Berlin und Leipzig Messungen zur Ermittlung der Staubbelastung der Straßenoberflächen und des Verkehrsbeitrages zur Staubkonzentration am Straßenrand vorgenommen worden (RAUTERBERG-WULFF, 2000; DÜRING & LOHMEYER, 2001). Aus diesen Studien ergaben sich hinsichtlich der Staubbelastung ( $PM_{75}$ ) mittlere Werte von  $0,16$  bzw.  $0,21 \text{ g/m}^2$  für normale Fahrbahnverhältnisse und  $0,38$  für eine beschädigte Straße. Parallel wurden mittlere Verkehrsbeiträge an den Staubimmissionen ( $PM_{10}$ ) in Straßennähe ermittelt. Mit diesen Daten und Angaben zum Verkehrsfluss wurden Emissionsfaktoren für die Gesamtemissionen des Verkehrs ermittelt und den Faktoren aus modifizierten EPA-Modellen gegenübergestellt. Im Ergebnis zeigte sich, dass die ursprüngliche EPA-Gleichung die Emissionen des Verkehrs stark überschätzte, wohingegen die modifizierten Gleichungen relativ gute Übereinstimmungen mit den modellierten Daten erzielten. Die Unsicherheiten dieser Betrachtungen sind insgesamt hoch. Zudem wurde teilweise in Straßenschluchten gemessen, wo die freie Anströmung der Messorte nicht gewährleistet ist. Weitere Untersuchungen der Emissionen durch die Aufwirbelung von Straßenstaub und der Bedeutung von Einflussfaktoren wie Straßenbelag und Regenereignisse sind in Deutschland erforderlich, um eine bessere Datenbasis insbesondere für Außerortsstraßen und Autobahnen zu bekommen. Ein neues Projekt des Ingenieurbüros Lohmeyer in Zusammenarbeit mit der UMEG und im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg hat hier einen Anfang gemacht und zeigt einerseits die hohe Relevanz des Abrieb- und Aufwirbelungsanteils im Straßenverkehr und andererseits die Notwendigkeit eines verbesserten Modells zur Emissionsberechnung für deutsche Verhältnisse (DÜRING et al., 2003).

Trotz der hohen Unsicherheiten der EPA-Gleichung und der geringen Datenbasis zur Darstellung der deutschen Verhältnisse wird versucht, in einem ersten Ansatz die Emissionen durch die Aufwirbelung von Straßenstaub abzuschätzen. Mit den Modellkonstanten von VENKATRAM (2000) kann ausgehend von der EPA-Gleichung (2) eine modifizierte Gleichung erstellt werden, die weitaus geeigneter erscheint als die Originalgleichung. Zudem wird analog DÜRING & LOHMEYER (2001) mit einem Korrekturfaktor von 0,8 multipliziert, um die Gleichung an deutsche Straßenverhältnisse anzupassen. Für die Anwendung werden zunächst Werte für die Modellparameter ermittelt. In Tabelle 2-5 sind die aus Bestandsdaten und zulässigen Gesamtgewichten aus (KBA, 1998) und Faktoren für die Ermittlung der tatsächlichen Fahrzeuggewichte bei angenommener halber Zuladung aus (RAUTERBERG-WULFF, 2000) abgeleiteten mittleren Fahrzeuggewichte dargestellt. In Tabelle 2-6 sind die verwendeten Daten für das mittlere Gewicht der Fahrzeugflotten (W), den PM<sub>75</sub>-Staubgehalt auf der Straßenoberfläche (sL) und die zugeordneten Fahrleistungen der Fahrzeugflotten für die verschiedenen Straßenklassen wiedergegeben.

Tab. 2-5: Mittlere Gewichte verschiedener Fahrzeugkategorien in Deutschland

	<b>Gewicht in Mg</b>
LNF	1,97
LKW ohne Anhänger	8,17
LKW mit Anhänger	11,81
Motorrad	0,30 *
Kleinkraftrad, Mofa	0,18 *
PKW	1,18
Bus	10,43
Sattelzug	11,61

\* geschätzt

Tab. 2-6: Fahrleistungen, W und sL in Baden-Württemberg im Jahr 1998

	<b>Mio Fzg-km</b>	<b>W in Mg</b>	<b>sL in g/m<sup>2</sup></b>
Autobahnen	19.060	2,51	0,03
Innerorts	25.196	1,45	0,18
Bundesstraßen	16.328	1,83	0,06
Landesstraßen	12.385	1,65	0,10
Kreisstraßen	5.068	1,56	0,10
Gemeindestraßen	3.051	1,71	0,10

Für die Winterzeit werden keine separaten Betrachtungen vorgenommen, da für deutsche Verhältnisse keine Angaben zu den größenspezifischen Emissionen durch Auftrag von Streugut vorliegen. Es gibt Hinweise, dass in diesen Fällen verstärkt  $PM_{10}$ -Emissionen auftreten (s. RAUTERBERG-WULFF, 1998). Inwiefern sich die  $PM_{2,5}$ -Emissionen erhöhen ist unklar. Zudem können nicht ohne weiteres die winterlichen Straßenverhältnisse in Baden-Württemberg in einem Modell abgebildet werden. Es wird deshalb vereinfachend von ganzjährig normalen Fahrbahnverhältnissen ausgegangen. Zum Einfluss der Luftfeuchtigkeit machen die Ausführungen der EPA keine Angaben, der Einfluss von Regen wird nur in Bezug auf die Gesamtemission des Verkehrs berücksichtigt. Zur Berücksichtigung von Regentagen wird in dieser Arbeit nur den regenfreien Tagen eine Emission infolge von Straßenstaub zugeordnet. Für Baden-Württemberg wird ein Jahresanteil der Tage mit Niederschlag von 40 % angenommen.

Für die Quantifizierung der Aufwirbelung von Straßenstaub werden von den mit dem empirischen Ansatz errechneten Gesamtemissionen der KFZ unter Annahme von ganzjährig normalen und trockenen Fahrbahnverhältnissen die berechneten direkten Emissionen durch Abgase, Reifen- und Bremsenabrieb abgezogen. Da sich diese Emissionen der Fahrzeugflotten in den USA und in Deutschland unterscheiden und über andere Methoden ermittelt werden, ist diese Vorgehensweise mit großen Unsicherheiten behaftet. Sie liefert jedoch eine erste Vorstellung von der Größenordnung der Emissionen, die von den Aufwirbelungsprozessen zu erwarten sind. Die Emissionen auf befestigten Straßen ergeben sich dann für verschiedene Staubfraktionen und Straßenklassen jeweils mit Gleichung (3):

$$(3) \quad E_{\text{Aufwirb}} = (EF_{\text{Gesamt}} * A - E_{\text{Abgas}} - E_{\text{Abrieb}}) * (1 - r)$$

mit  $E_{\text{Aufwirb}}$  = Emission durch Aufwirbelung in Mg/a

$EF_{\text{Gesamt}}$  = mittlerer Emissionsfaktor aus EPA-Formel in g/Fzg-km

$E_{\text{Abgas}}$  = Emission durch Abgase in Mg/a

$E_{\text{Abrieb}}$  = Emission durch Reifen- und Bremsenabrieb in Mg/a

A = Aktivität in Fzg-km/a

r = Anteil Tage pro Jahr mit Niederschlag

Einen wesentlichen Einfluss auf die lufthygienische Relevanz der Emissionen besitzt die Größenverteilung der Stäube. Entsprechend der anzusetzenden k-Faktoren für Gleichung (2) schlägt die EPA einen  $PM_{10}$ -Anteil bei den gesamten KFZ-Emissionen von 20 % und einen  $PM_{2,5}$ -Anteil von 5 % vor. Diese Anteile sind jedoch dadurch bedingt, dass die EPA die Aufwirbelung als dominierende Staubquelle des KFZ-Verkehrs ansieht und liegen dementsprechend niedrig. Ausgehend von verfügbaren Messdaten (z. B. HÜGLIN et al., 2000; RAUTERBERG-WULFF, 2000; BUWAL, 2001) und den Feinstaubanteilen der berechneten Emissionen durch Abgas und Abrieb sind für die Abschätzung die nachfolgenden Anteile abgeleitet worden.

Tab. 2-7: Feinstaubanteile für die Emissionen des Straßenverkehrs

	$PM_{10}$ -Anteil	$PM_{2,5}$ -Anteil	$PM_{2,5}/PM_{10}$
Staubemissionen durch KFZ insgesamt (Abgas, Reifen-, Bremsenabrieb und Staubaufwirbelung)	0,48	0,26	0,55

### Sonstiger Verkehr

Unter dem sonstigen Verkehr werden Flug-, Bahn- und Schiffsverkehr verstanden. Für die Ermittlung der Emissionen aus dem Flugverkehr können Emissionsfaktoren des BUWAL verwendet werden, die im Rahmen einer Offroad-Studie für die Schweiz ermittelt wurden (BUWAL, 2000a). Hierbei werden nur die Start- und Landevorgänge bis zu einer Höhe von 1.000 m (LTO-Zyklen) betrachtet. Insgesamt stehen nur wenige Angaben zu den Partikelemissionen von Flugzeugen zur Verfügung. Im Gegensatz zu gasförmigen Luftverunreinigungen wie  $NO_x$  und HC sind kaum flugzeug- und triebwerksbezogene Angaben zu den Partikelemissionen zu finden. Neben den Daten des BUWAL liegen mittlere Emissionsfaktoren für LTO-Zyklen in Deutschland aus (HÜTTIG et al., 1994) vor.

Für die Betrachtung der LTO-Zyklen wird der Kraftstoffverbrauch ausgehend von den jährlichen Flugbewegungen in Baden-Württemberg differenziert nach den unterschiedlichen Flugzeug- und Triebwerkstypen ermittelt. Die verwendeten Flugbewegungsdaten stellen die jährliche Summe aller Starts und Landungen, disaggregiert nach Flugzeugtypen dar. Die einzelnen LTO-Teilzyklen (Approach, Taxi, Take-Off, Climb Out) werden getrennt bilanziert, wobei für die Teilzyklen Approach, Take-Off und Climb Out die standardisierten Zyklus-Dauern und für den Teilzyklus Taxi flughafenspezifische Zyklusdauern Verwendung finden. Durch eine Zuordnung der einzelnen Flugzeugtypen zu entsprechenden Triebwerkstypen kann mittels eines detaillierten Emis-



sionsmodells der entsprechende Kraftstoffverbrauch bestimmt werden. Dieses Modell (s. auch FRIEDRICH et al., 2001) beinhaltet insgesamt 792 Flugzeugtypen und 296 verschiedene Triebwerke mit jeweils für die Teilzyklen spezifischen Verbrauchsfaktoren aus (ICAO, 1999). Sind keine entsprechenden Daten vorhanden, wie etwa beim Verbrauch der Turbopropmaschinen, Maschinen mit Kolbenmotoren und Helikoptern, wird auf mittlere Verbrauchs- und Emissionsfaktoren für einen gesamten LTO-Zyklus zurückgegriffen, die aus (BUWAL, 1996) und (BUWAL, 2000a) abgeleitet werden.

In Baden-Württemberg hat die Aktivität des Flughafens Stuttgart die größte Bedeutung. Der militärische Flugverkehr wird über statistische Angaben zum Kraftstoffverbrauch (MWV, 2000) betrachtet. Auch für diese Aktivitäten liegt ein mittlerer Emissionsfaktor aus (BUWAL, 2000a) vor. Die  $PM_{10}$ - und  $PM_{2,5}$ -Anteile werden für den Flugverkehr analog (TNO, 2001) mit 100 % angenommen. Tabelle 2-8 gibt die Emissionsfaktoren für den Flugverkehr bezogen auf den Treibstoffverbrauch wieder.

Tab. 2-8: Emissionsfaktoren (EF) für den Flugverkehr aus (BUWAL, 2000a) abgeleitet

	EF $PM_{10}$	Einheit
Luftverkehr zivil, LTO – Helikopter	0,99	kg/Mg Treibstoff
Luftverkehr zivil, LTO – Turboprop	0,37	kg/Mg Treibstoff
Luftverkehr zivil, LTO – Turbojet	0,90	kg/Mg Treibstoff
Luftverkehr zivil, LTO – Kolbenmotoren	0,06	kg/Mg Treibstoff
Luftverkehr militärisch gesamt	0,32	kg/Mg Treibstoff

Die Gesamtstaubemissionen aus Bahn- und Schiffsverkehr werden vom Emissionskatalog Baden-Württemberg (UMEG, 2001) übernommen. Diesen Daten liegen detaillierte Analysen der Aktivitäten der Dieseltraktion der Bahn und des Schiffsverkehrs auf Rhein, Neckar und Bodensee zugrunde. Aus den Ergebnissen des UMEG ergibt sich ein mittlerer Emissionsfaktor von 2,2 kg/Mg Diesel für den Schiffsverkehr und 1,7 kg/Mg Diesel für den Schienenverkehr. Die Feinstaubanteile im Bahn- und Schiffsverkehr werden analog TNO (2001) mit 95 % für  $PM_{10}$  und 90 % für  $PM_{2,5}$  angenommen. Neue gröbenselektive Messdaten für Partikelemissionen aus Dieselloks existieren aus einem Messprojekt der WTZ Roßlau im Auftrag des UBA (PITTERMANN, 2002). Diese Daten zeigen etwas höhere  $PM_{2,5}$ -Anteile bezogen auf  $PM_{10}$  von etwa 98 %. Auch das EU-Projekt ARTEMIS (Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems) lässt neue Erkenntnisse zu diesen Quellgruppen erwarten. In dem bis Mitte 2003 laufenden Projekt werden im Straßenverkehr wie auch im Flug-, Schiffs- und Bahnverkehr Emissionsmessungen vorgenommen (s. [www.trl.co.uk/artemis](http://www.trl.co.uk/artemis)).

Des Weiteren sind für Abrieb- und Aufwirbelungsprozesse im Bahn- und Flugverkehr in (BUWAL, 2001) und (CARBOTECH, 2000) Emissionsfaktoren genannt und Emissionsabschätzungen für PM und PM<sub>10</sub> in der Schweiz vorgenommen worden. Die Daten sind Schätzwerte, die nicht auf Messungen beruhen. Über Informationen zum Verschleiß in verschiedenen Sektoren sind ausgehend von Materialverlusten Emissionsfaktoren abgeleitet und hierbei keine Unterscheidung zwischen Abrieb und flugfähigem Staub gemacht worden. In ersten Prüfstandsmessungen in der Schweiz sind die Emissionen durch Bremsvorgänge im Schienenverkehr näher untersucht worden (HELDSTAB, 2002). Hier ist der Anteil der flugfähigen Partikel am Abrieb auf 44 bis 72 % und der PM<sub>10</sub>-Anteil auf etwa 32 % der PM-Emissionen bestimmt worden. Aus diesen Informationen kann ein Datensatz zur groben Abschätzung der Abriebemissionen des sonstigen Verkehr erstellt werden (Tabelle 2-9). Hierbei ist berücksichtigt, dass nur ein Teil des Abriebs flugfähigen Staub verursacht. Die PM<sub>2,5</sub>-Anteile werden für den Bahnverkehr ausgehend von Angaben aus (EPA, 1995) für mechanisch erzeugte Stäube und für den Flugverkehr wie bei den Prozessen im Straßenverkehr abgeschätzt.

Tab. 2-9: Emissionsfaktoren (EF) und Feinstaubanteile für den Abrieb im Bahn- und Flugverkehr

	EF PM	Einheit	PM <sub>10</sub> -Anteil	PM <sub>2,5</sub> -Anteil
Bahnverkehr Schienenabrieb	2,75	g/km Fahrleistung	0,50	0,15
Bahnverkehr Radabrieb	0,63	g/km Fahrleistung	0,50	0,15
Bahnverkehr Fahrleitungsabrieb	0,08	g/km Fahrleistung	1,00	0,15
Bahnverkehr Bremsenabrieb	6,03	g/km Fahrleistung	0,32	0,15
Flugverkehr Reifenabrieb	0,13	kg/LTO	0,30	0,02
Flugverkehr Bremsenabrieb	0,00003	kg/LTO	0,86	0,63
Flugverkehr Pistenabrieb	0,73	kg/LTO	0,19	0,05

### Sonstige Fahrzeuge und mobile Geräte

Für die Emittentengruppe der sonstigen Fahrzeuge und mobilen Geräte stehen nur relativ wenige Messdaten zur Verfügung (s. z. B. BUWAL, 1994 und 1996). Abschätzungen erfolgen mittels Brennstoffindizes aus (UBA, 1989) für das Militär und (BUWAL, 1996) bzw. (BUWAL, 2001) für die Fahrzeuge in der Landwirtschaft (einschließlich Forstwirtschaft), Bauwirtschaft und der Industrie. Informationen zum jährlichen Kraftstoffverbrauch werden in Statistiken gegeben (MWV, 2000; STALA, 2000a). Für die Maschinen in der Landwirtschaft wird die Statistik zu den Anträgen auf Gasölverbilligung genutzt (MLR-BW, 2001). Für Baumaschinen und Industriefahrzeuge wurde im Rahmen der Erstellung des Emissionskatasters Baden-Württemberg (UMEG, 2001) eine Me-

thodik zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs entwickelt. Ausgehend von der schweizerischen Offroadstudie (BUWAL, 1996) wurden Bestandsdaten mittels sekundärstatistischer Größen auf Baden-Württemberg übertragen und spezifische Kennwerte, wie Lastfaktoren, Einsatzzeiten und spezifischer Verbrauch übernommen. Der resultierende Kraftstoffverbrauch wird für diese Studie verwendet, ebenso der im Rahmen der Katastererstellung über die Bundeswehrverwaltung ermittelte Verbrauch des Militärs. Für die Feinstaubanteile liegen keine spezifischen Daten vor. Vereinfachend werden Schätzwerte für Dieselmotoren aus (TNO, 2001) von 95 % für  $PM_{10}$  und 90 % für  $PM_{2,5}$  angenommen. Für die Ottomotoren werden Feinstaubanteile aus dem Straßenverkehr übernommen. In der folgenden Tabelle sind die verwendeten Emissionsfaktoren wiedergegeben. Diese Daten sind um den Faktor vier bis fünf höher im Vergleich zum Straßenverkehr.

Tab. 2-10: Emissionsfaktoren (EF) für die Abgasemissionen der sonstigen Fahrzeuge und mobilen Geräte

	<b>EF PM in kg/Mg Kraftstoff</b>
Sonst. Fahrzeuge Land- & Forstwirtschaft – Dieselmotoren	6,91
Sonst. Fahrzeuge Baumaschinen – Dieselmotoren	6,60
Sonst. Fahrzeuge Industrie – Dieselmotoren	6,32
Sonst. Fahrzeuge Militär – Dieselmotoren	4,26
Sonst. Fahrzeuge allgemein - Ottomotoren	1,39

Auch für Abrieb- und Aufwirbelungsprozesse beim Betrieb sonstiger Fahrzeuge und mobiler Geräte sind in (BUWAL, 2001) Emissionsfaktoren dargestellt und Emissionsabschätzungen für die Schweiz vorgenommen worden. Hier wird ebenfalls nicht zwischen Abrieb und flugfähigem Staub unterschieden, so dass für Reifen- und Bremsenabrieb als Näherung die Verhältnisse aus dem Straßenverkehr angenommen werden. Die Abriebemissionen in der Landwirtschaft werden über die landwirtschaftliche Nutzfläche (LN) abgeschätzt. Für Baumaschinen, industrielle und militärische Fahrzeuge können Emissionen lediglich über die Verhältnisse der Abgasemissionen in der Schweiz und in Baden-Württemberg als grobe Schätzung aus Ergebnissen des BUWAL (2001) abgeleitet werden. Die Feinstaubanteile werden aus dem Straßenverkehr übernommen. Tabelle 2-11 gibt die Emissionsfaktoren aus (BUWAL, 2001) wieder.

Tab. 2-11: Emissionsfaktoren (EF) und PM<sub>10</sub>-Anteile für den Abrieb durch sonstige Fahrzeuge und mobile Geräte aus (BUWAL, 2001)

	EF Abrieb	Einheit	PM <sub>10</sub> -Anteil
Sonst. Fahrzeuge Baumaschinen – Reifenabrieb	29,3	g/h	0,10
Sonst. Fahrzeuge Baumaschinen – Fahrwerkabrieb	50,0	g/h	0,10
Sonst. Fahrzeuge Baumaschinen – Schaufelabrieb	75,0	g/h	0,10
Sonst. Fahrzeuge Landwirtschaft – Reifenabrieb	304,4	g/ha LN	0,09
Sonst. Fahrzeuge Landwirtschaft – Bremsabrieb	15,1	g/ha LN	1,00
Sonst. Fahrzeuge Landwirtschaft – Staubaufwirbelung	8,2	g/ha LN	0,15
Sonst. Fahrzeuge Industrie – Reifenabrieb	3,8	g/h	0,10
Sonst. Fahrzeuge Industrie – Bremsabrieb	0,1	g/h	1,00
Sonst. Fahrzeuge Industrie – Staubaufwirbelung	7,4	g/h	0,19
Sonst. Fahrzeuge Militär – Reifenabrieb	1,2	g/h	0,10
Sonst. Fahrzeuge Militär – Bremsabrieb	0,01	g/h	1,00
Sonst. Fahrzeuge Militär – Staubaufwirbelung	211,3	g/h	0,19

### 2.1.3 Sektor genehmigungsbedürftige Anlagen

Als Basis für die Darstellung der Emissionssituation bei den genehmigungsbedürftigen Anlagen werden die Emissionserklärungen der Betreiber für das Jahr 1996 genutzt. Mit den dort gemachten detaillierten Angaben zu den Staubemissionen (PM) können Betrachtungen der Quellen beispielsweise nach Branchen, Verfahrensarten, Anlagentypen und installierten Abgasreinigungen erfolgen.

Eine Abschätzung der PM<sub>10</sub>- und PM<sub>2,5</sub>-Emissionen kann ausgehend von diesen Daten auf verschiedene Weise erfolgen. Einerseits können branchen- bzw. prozessspezifische Feinstaubanteile aus verfügbaren Studien und Messprojekten ermittelt und zugeordnet werden. Diese Vorgehensweise erfolgt üblicherweise, wenn keine detailliertere Betrachtung möglich ist, beispielsweise für die Ermittlung der deutschlandweiten Emissionssituation oder in europäischen Studien. Hierbei können unterschiedliche technologische Spezifikationen, welche die Emissionen wesentlich bedingen, kaum berücksichtigt werden. Insbesondere Unterscheidungen zwischen mechanisch und thermisch erzeugten Partikeln sind dadurch kaum möglich. Mit den detaillierten Angaben in den Emissionserklärungen können solche weitergehenden Betrachtungen gemacht und die Unsicherheiten der Emissionsdaten dieses Sektors deutlich gemindert werden.

Zur Ermittlung der PM<sub>10</sub>- und PM<sub>2,5</sub>-Emissionen werden verfügbare Messdaten aus neueren Messprojekten in Deutschland (z. B. DREISEIDLER et al., 2001; EHRlich et

al., 1999; SPORENBERG, 1999; BRANDL et al., 2000; LFUG-SN, 1999) und Studien aus Europa und den USA (z. B. EPA, 1995; LÜKEWILLE et al., 2001; TNO, 2001; IIASA, 2002; BUWAL, 2001; WIESER et al., 2001) zusammengestellt und bezüglich Verfahrensarten/Anlagentypen und Abgasreinigungssystemen spezifiziert. Die Emissionserklärungen von 1996 weisen insgesamt 280 verschiedene Verfahrensarten/Anlagentypen und 276 unterschiedliche Abgasreinigungssysteme aus. Die insgesamt auftretenden Kombinationen dieser Kategorien können durch die Gesamtheit der verfügbaren Feinstaub-Emissionsmessdaten nicht abgebildet werden, weshalb die Kategorien zu den in den nachstehenden Tabellen wiedergegebenen Gruppen zusammengefasst werden. Daraus ergeben sich ca. 70 verschiedene Kombinationen, zu denen  $PM_{10}$ - und  $PM_{2,5}$ -Anteile zugeordnet werden können. Da anlagenspezifische Messdaten sehr stark von den Betriebsbedingungen der Anlagen abhängen und die Anzahl und Qualität der für die Kombinationen jeweils verfügbaren Messdaten sehr unterschiedlich ist, liefert auch diese Vorgehensweise lediglich Anhaltswerte, die einer weiteren Diskussion und Überprüfung bedürfen. Die resultierenden Feinstaubanteile für die Emissionsabschätzung sind in Tabelle 7-1 im Anhang dokumentiert.

Die Ergebnisse geben die Emissionen für das Jahr 1996 wieder. Eine Fortschreibung der Emissionen ins Jahr 1998 ist in (UMEG, 2001) erfolgt. Hierzu wurden bei den Betreibern Veränderungen bei den Emissionsquellen recherchiert. Unter Verwendung dieser Informationen des UMEG zur Fortschreibung und der in dieser Arbeit ermittelten durchschnittlichen Feinstaubanteile je Obergruppe der 4. BImSchV werden für  $PM_{10}$  und  $PM_{2,5}$  Emissionen für das Jahr 1998 abgeleitet.

Tab. 2-12: Zusammengefasste Gruppen unterschiedlicher Abgasreinigungen in den Emissionserklärungen

<b>AGR-Nr.</b>	<b>Bezeichnung</b>
1	Keine Abgasreinigung
2	Zyklone, Multizyklone
3	Gewebefilter
4	Wäscher
5	Elektrofilter
6	Sonstige (z. B. Adsorber, Oxidationsverfahren)

Tab. 2-13: Zusammengefasste Gruppen unterschiedlicher Verfahrensarten/Anlagentypen in den Emissionserklärungen

Art-Nr.	Bezeichnung
1	Feuerung fest
2	Feuerung flüssig
3	Feuerung gasförmig
4	Feuerung gemischt
5	Brennkraftmaschinen (Dieselmotoren)
6	Wärmebehandeln - Schmelzen, Warmhalten, Härten u. a.
7	Wärmebehandeln - Gießen, Walzen
8	Wärmebehandeln - Glühen, Trocknen, Kalzinieren, Rösten u. a.
9	sonstige industrielle Prozesse *
10	Aufwirbelung (Fördern, Verladen und Abfüllen, Lagern)
11	Abrieb (Schleifen, Strahlen u. a.)
12	sonstige mechanische Prozesse **

\* verschiedene chemische Prozesse und Oberflächenbehandlungen

\*\* Anlagen zum Vereinigen von Stoffen und Fest/Flüssig-Trennverfahren

#### 2.1.4 Sektor nicht genehmigungsbedürftige Feuerungen

Bei den Kleinf Feuerungen gibt es einige neuere Informationen insbesondere zum Emissionsverhalten von Holzfeuerungen, die auch Angaben zu den Feinstaubanteilen umfassen (s. z. B. BAUMBACH et al., 1999; SPITZER et al., 1998; WIESER & GAEGAUF, 2000; WIESER et al., 2001; MOHN, 2000; PFEIFFER et al., 2000; EHRLICH et al., 1999). Vor allem bei den Kohlefeuerungen gibt es aber noch große Unsicherheiten und dementsprechend sehr unterschiedliche Angaben in der Literatur, sowohl zu den Gesamtstaubemissionen als auch den Feinstaubanteilen. Für die Berechnung der Emissionen in Baden-Württemberg werden Emissionsfaktoren für Gesamtstaub aus (PFEIFFER et al., 2000) verwendet. In diesem Forschungsbericht sind im Auftrag des UBA umfangreiche Analysen des Anlagenbestandes und der anlagen- und brennstoffspezifischen Emissionen aus Kleinf Feuerungen in Deutschland vorgenommen und mittlere Emissionsfaktoren für alte und neue Bundesländer abgeleitet worden. Sofern keine größen-spezifischen Messdaten aus den oben genannten Messprojekten vorliegen, werden Feinstaubanteile aus (IIASA, 2002), (TNO, 2001) und (AEAT, 2001) verwendet.

Eine Unterscheidung der Emissionen aus Haushalten und Kleinverbrauchern (einschließlich Militär) wird durch ein am IER entwickeltes Berechnungsmodell vorgenommen (BLANK et al., 1999). Die Ermittlung des Brennstoffverbrauchs erfolgt ausgehend von der Energiebilanz Baden-Württemberg (STALA, 2000a). Abweichend von der

amtlichen Statistik wird der Holzverbrauch von Haushalten und Kleinverbrauchern aus DREISEIDLER & BAUMBACH (1999) übernommen. Die Verbrauchsangabe in der Energiebilanz liegt deutlich niedriger als das Ergebnis dieser Studie, da die Statistik nur die kommerziell gehandelte Holzmenge erfasst. Des Weiteren werden die nicht genehmigungsbedürftigen Feuerungsanlagen in der Industrie mittels Energieverbrauchsdaten des STALA (2001a) berücksichtigt. Die Emissionsfaktoren und Feinstaubanteile werden von den Kleinf Feuerungen der Kleinverbraucher übernommen. In der Tabelle 2-14 sind die verwendeten brennstoffspezifischen Emissionsfaktoren und Feinstaubanteile wiedergegeben.

Tab. 2-14: Emissionsfaktoren (EF) für die Kleinf Feuerungen aus (PFEIFFER et al., 2000) und verwendete Feinstaubanteile

	EF PM in kg/TJ	PM <sub>10</sub> -Anteil	PM <sub>2,5</sub> -Anteil
Haushalte – Steinkohlekoks	14	0,67	0,44
Haushalte – Steinkohle	257	0,50	0,25
Haushalte – Braunkohle	115	0,90	0,82
Haushalte – Heizöl EL	1,5	1,00	0,94
Haushalte – Gase	0,03	1,00	1,00
Haushalte – Holz	42	0,98	0,94
Kleinverbraucher/Industrie – Steinkohlekoks	12	0,79	0,46
Kleinverbraucher/Industrie – Steinkohle	278	0,50	0,25
Kleinverbraucher/Industrie – Braunkohle	130	0,90	0,50
Kleinverbraucher/Industrie – Heizöl S	38	0,83	0,67
Kleinverbraucher/Industrie – Heizöl EL	1,7	1,00	0,77
Kleinverbraucher/Industrie – Gase	0,03	1,00	1,00
Kleinverbraucher/Industrie – Holz	44	0,93	0,80

### 2.1.5 Sektor sonstige Prozesse, nicht genehmigungsbedürftig

Neben den industriellen Produktionsprozessen gibt es zahlreiche weitere Aktivitäten in nicht unter die Emissionserklärungspflicht fallenden Anlagen oder in Bereichen, die nicht über das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) geregelt werden. Nicht für alle diese Quellgruppen können derzeit Emissionen abgeschätzt werden.

Bei der Salzgewinnung, die nicht dem BImSchG unterliegt, werden die Emissionen mit Hilfe eines Emissionsfaktors nach UBA (2001a) abgeschätzt, der mit starken Unsicherheiten behaftet ist. Es gibt bislang keine gröbenselektiven Messdaten zu diesen Emissionsquellen.

Mit Emissionsfaktoren aus unterschiedlichen Literaturquellen (BRANDL et al., 2000; TAKAI et al., 1998; IIASA, 2002) können für verschiedene Tierhaltungen die Emissionen mechanisch erzeugter Stäube abgeschätzt werden. In diesen Studien finden sich auch Anhaltswerte für die Anteile an  $PM_{10}$  und  $PM_{2,5}$ . Für die genehmigungsbedürftigen Tierhaltungen (4. BImSchV-Nr. 07.01) wurden in den Emissionserklärungen keine Angaben zu diesen Emissionen gemacht, so dass hier kein Abgleich erfolgen muss. Die Aktivitäten in Baden-Württemberg werden in Form der Viehbestandszahlen berücksichtigt (STBA, 1998 und 2000a). Hierbei werden tierartspezifische Anteile der Außenhaltung aus (FREIBAUER & KALTSCHMITT, 2001) abgezogen und somit entsprechend der Definition der Emissionsfaktoren nur für die Stallhaltungen Emissionen angegeben. Weitere betrachtete Quellen in der Landwirtschaft sind das Ernten und Trocknen von Getreide, die jedoch nur eine untergeordnete Rolle spielen. Die Emissionsfaktoren hierzu kommen aus (EPA, 1995).

Weitere Angaben zu Prozessemissionen aus nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen werden aus (UMEG, 2001) übernommen. Hier wurden in kleinräumigen Untersuchungen die  $PM$ - und  $PM_{10}$ -Emissionen aus Schreinereien, dem Baugewerbe (Asphalteinrichtungen, Beton- und Mörtelherstellung) und aus Steinbrüchen (Umschlag und Sprengen) bestimmt. Bezüglich  $PM_{2,5}$  können die Anteile nur grob abgeschätzt werden.

Der Güterumschlag ist weitgehend als Teilprozess in industriellen Herstellungsprozessen in den Emissionserklärungen mit erfasst. Dieses Erkenntnis liefert die Betrachtung der Emissionen genehmigungsbedürftiger Anlagen nach Verfahrensart/Anlagentyp. Für den Umschlag von Getreide geben die Emissionserklärungen die Emissionssituation nur unvollständig wieder, da nur Getreideannahmestellen mit einer Umschlagleistung von über 400 Mg/Tag genehmigungsbedürftig sind. Nach MLR-BW (1999) haben etwa 6 % der insgesamt 350 Annahmestellen in Baden-Württemberg Kapazitäten über 150 Mg/h, während der Schwerpunkt der Erfassungsanlagen bei 30 bis 80 Mg/h liegt. Eine Abschätzung der umgeschlagenen Mengen in nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen erfolgt anhand eines Abgleichs des in den Emissionserklärungen genannten gehandhabten Getreides und der anhand von Produktions- und Einfuhrzahlen aus (STBA, 2000a) und (STALA, 1992-2000) ermittelten Gesamtaktivität in Baden-Württemberg im Jahr 1998. Hieraus kann die resultierende Menge für den nicht genehmigungsbedürftigen Umschlag nur grob abgeschätzt werden. Für die spezifischen Emissionen des Getreideumschlags werden Angaben des UBA (1999b) verwendet. Der  $PM_{10}$ -Anteil liegt demnach bei etwa 30 %. Der  $PM_{2,5}$ -Anteil wird in Anlehnung an TNO (2001) und IIASA (2002) mit 5 % angenommen. Es wird von einem einfachen Umschlag



der Gütermengen ausgegangen. Darüber hinaus ist der Umschlag in den Binnenhäfen gesondert zu betrachten. Hierfür werden Ergebnisse detaillierter Untersuchungen aus (UMEG, 2001) übernommen.

Als weitere emissionsrelevante Aktivitäten sind das Rauchen von Tabak und Feuerwerke berücksichtigt. Eine erste Abschätzung der Emissionen erfolgt mittels eines Emissionsfaktors für die beim Rauchen in die Umwelt gelangende Staubmenge aus (PHILLIPS et al., 1999) und eines auf die Einwohnerzahl bezogenen Emissionsfaktors für Feuerwerke aus (BUWAL, 2000b). Partikel im Zigarettenrauch besitzen nach PHILLIPS et al. (1999) generell Durchmesser kleiner 1 µm. Für Feuerwerke werden mangels Messdaten Feinstaubanteile angenommen. In Tabelle 2-15 sind die insgesamt in diesem Sektor für Abschätzungen verwendeten Emissionsfaktoren und Feinstaubanteile zusammengestellt.

Tab. 2-15: Emissionsfaktoren (EF) und Feinstaubanteile für sonstige Prozesse, nicht genehmigungsbedürftig

	<b>EF PM</b>	<b>Einheit</b>	<b>PM<sub>10</sub>-Anteil</b>	<b>PM<sub>2,5</sub>-Anteil</b>
Umschlag Getreide nicht gen.-bed.	0,063	kg/Mg	0,30	0,06
Feuerwerke	0,035	kg/Einwohner	0,90	0,60
Rauchen von Tabak	0,000008	kg/Stück	1,00	1,00
Ernten von Getreide	292	kg/1000 km <sup>2</sup>	0,40	0,10
Trocknen von Getreide	0,075	kg/Mg	0,53	0,41
Tierhaltung Legehennen	0,019	kg/(a Tier)	0,33	0,03
Tierhaltung Masthühner	0,032	kg/(a Tier)	0,58	0,09
Tierhaltung Schweine	0,649	kg/(a Tier)	0,45	0,08
Tierhaltung Rinder	0,960	kg/(a Tier)	0,45	0,10
Tierhaltung Schafe	0,120	kg/(a Tier)	0,40	0,12
Tierhaltung Pferde	1,200	kg/(a Tier)	0,40	0,12
Tierhaltung Mastenten und Gänse	0,134	kg/(a Tier)	0,58	0,09
Tierhaltung Truthähne	0,153	kg/(a Tier)	0,58	0,09
Gewinnung von Salz	0,085	kg/Mg	0,09	0,05

### 2.1.6 Inhaltsstoffe emittierter Stäube

Ausgehend von verfügbaren Daten zur chemischen Zusammensetzung von Staubemissionen erfolgt eine Betrachtung von ausgewählten Inhaltsstoffen. Es wird erwartet, dass die chemische Zusammensetzung je nach Partikelfraktion unterschiedlich ist, da kleinere Partikel eine größere spezifische Oberfläche und stärkere Bindungskräfte an den Grenzflächen haben und die Bildungsmechanismen von sehr kleinen gegenüber größeren Partikeln unterschiedlich sind. Größenselektive Untersuchungen einzelner Inhaltsstoffe von Staubemissionen wurden in der Vergangenheit jedoch nur wenig vorgenommen. Neuere Untersuchungen des TÜV Süddeutschland (BRANDL et al., 2000) liefern Elementgehalte für die Fraktionen PM, PM<sub>10</sub> und PM<sub>2,5</sub> aus einigen industriellen Prozessen (s. Tabelle 2-16). Wenige größenspezifische Daten gibt es zudem in der Datenbank SPECIATE der US EPA (EPA, 2000). Diese Datenbasis gilt als zum Teil veraltet und unvollständig, eine Übertragbarkeit auf deutsche Verhältnisse ist zudem fraglich. Aus den vorliegenden größenspezifischen Daten lässt sich aber kein genereller Trend zur Aufkonzentrierung in den kleineren Fraktionen für die im Folgenden betrachteten Elemente ableiten. Für organische Verbindungen liegen keine größenselektiven Daten vor. Die in der Fachliteratur veröffentlichten Daten geben Inhaltsstoffe des Gesamtstaubs wieder.

Tab. 2-16: Größenspezifische Anteile beispielhaft für Pb und Cd in % der Staubemissionen aus industriellen Prozessen aus (BRANDL et al., 2000)

	Anteil Pb in %			Anteil Cd in %		
	PM	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2,5</sub>	PM	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2,5</sub>
Zementherstellung, Lepolofen, Elektrofilter	0,067	0,071	0,066	0,011	0,009	0,009
Zementherstellung, Klinkerkühlung, Elektrofilter	0,021	0,016	0,017	0,011	0,005	0,007
Zementherstellung, Drehrohrofen, Direktbetrieb, Elektrofilter	0,087	0,053	0,077	0,026	0,011	0,018
Zementherstellung, Drehrohrofen, Verbundbetrieb, Elektrofilter	0,035	0,025	0,028	0,006	0,003	0,004
Eisengießerei, Kupolofen, Gewebefilter	0,239	0,218	0,166	0,016	0,015	0,013
Eisengießerei, Induktionsofen, Gewebefilter	0,367	0,250	0,900	0,333	0,200	0,700
Eisengießerei, Kupolofen mit Zyklon, Venturiwäscher	0,146	0,134	0,142	0,014	0,006	0,010
Eisengießerei, Auspacktrommel mit Gussstrecke, Gewebefilter	0,048	0,100	0,037	0,013	0,030	0,012
Flachglasherstellung, mit Erdgas, Elektrofilter	0,056	0,044	0,046	0,020	0,012	0,013
Behälterglasherstellung mit Erdgas, Elektrofilter	0,578	0,644	0,538	0,013	0,008	0,009
Behälterglasherstellung mit Erdgas, Gewebefilter	0,500	0,250	0,500	0,750	0,250	0,500
Siliziumherstellung, Niederschachtöfen, Gewebefilter	0,031	0,040	0,031	0,038	0,040	0,031

Hinsichtlich der toxikologischen Wirkung von Inhaltsstoffen ist zudem eine Unterscheidung in lösliche und nicht lösliche Anteile relevant. So besteht nach COSTANTINI (2000) beispielsweise eine Korrelation zwischen gelösten und damit biologisch verfügbaren Eisenionen aus Stäuben und messbaren biologischen Effekten, während sich zwischen dem Gesamtgehalt an Eisen und den biologischen Effekten keine Korrelation nachweisen lässt. Es sind derzeit jedoch keine Daten verfügbar, die eine Unterscheidung einzelner Staubinhaltsstoffe nach löslichen und nicht löslichen Anteilen angeben.

Es werden im Folgenden als ausgewählte Inhaltsstoffe der Staubemissionen die Elemente Blei (Pb), Cadmium (Cd), Arsen (As) und Chrom (Cr) und als toxische organische Verbindungen polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), Benzo(a)pyren (BaP) und Dioxine/Furane (PCDD/F) betrachtet. Zur Gruppe der PAK gehören mehr als hundert verschiedene Verbindungen. Von diesen wird in Messungen stets nur eine mehr oder weniger große Auswahl erfasst (IFEU, 1998). Es muss deshalb davon ausgegangen werden, dass die verfügbaren Angaben zu den PAK-Emissionen aus unterschiedlichen Studien keinen einheitlichen Bezug haben. In Arbeiten, die weniger die Dokumentation von Messprogrammen, sondern z. B. die ökologische Bewertung komplexer Systeme zum Gegenstand haben, wird meist nur BaP als Leitsubstanz ausgewiesen (IFEU, 1998). Für die Kleinf Feuerungen der Haushalte und Kleinverbraucher wird analog AK EK (2001) die Summe von 21 Substanzen ausgewiesen.

Eine Abschätzung der Emissionen der ausgewählten Inhaltsstoffe kann für einen Großteil der betrachteten Prozesse vorgenommen werden. Elemente werden über prozessspezifische Anteile ausgehend von den ermittelten Gesamtstaubemissionen abgeschätzt. Für die betrachteten organischen Verbindungen gibt es kaum entsprechende Angaben zu Anteilen in emittierten Stäuben. Der unter atmosphärischen Bedingungen als Aerosolbestandteil vorliegende Stoffanteil ist je nach Verbindung sehr unterschiedlich. Insbesondere bei den Dioxinen gibt es auch Einzelverbindungen, die überwiegend in der Gasphase beobachtet werden können (HARRISON & VAN GRIEKEN, 1998). Die emissionsseitige Erfassung der organischen Verbindungen als Aerosolbestandteil ist durch ihre stoffspezifische Flüchtigkeit eingeschränkt. Insbesondere bei Messungen an thermischen Anlagen können sie in Abhängigkeit von der Messtemperatur in unbekanntem Anteil die Filtermedien passieren. In der Literatur werden jedoch Emissionsfaktoren für diese Verbindungen genannt, die für eine Abschätzung der Emissionen unabhängig von den Staubemissionen genutzt werden können.

Insgesamt finden sich relativ viele Literaturquellen mit Informationen zu Inhaltsstoffen emittierter Partikel. Für Baden-Württemberg ist zudem mit einer Studie zur Emission krebserzeugender Stoffe (LFU-BW, 2000) eine für diese Fragestellung nutzbare Datenbasis geschaffen worden. Hieraus werden insbesondere Ergebnisse für den Straßenverkehr übernommen. Für die Darstellung der Emissionen aus Dieselmotoren im Straßenverkehr werden auch Angaben aus (WIEDMANN et al., 2000) verwendet. Die Emissionen aus genehmigungsbedürftigen Prozessen werden mit den Daten aus den Emissionserklärungen dargestellt bzw. zum Teil aus (LFU-BW, 2000) übernommen. In den Emissionserklärungen finden sich allerdings nur vereinzelt Angaben zu einzelnen Elementen und organischen Verbindungen, so dass die Emissionssituation nur unvollständig abgebildet wird. Die Emissionen von Elementen aus genehmigungsbedürftigen Feuerungen werden deshalb wie bei den Kleinf Feuerungen über den Brennstoffeinsatz und brennstoffspezifische Anteile abgeschätzt. Die Unsicherheiten bei den Ergebnissen sind insgesamt hoch. Insbesondere die Datenbasis für organische Verbindungen ist klein, und die verfügbaren Werte haben eine große Streubreite. In den Tabellen 7-8 und 7-9 im Anhang sind die für Berechnungen verwendeten Anteile bzw. Emissionsfaktoren und die jeweiligen Literaturquellen zusammengestellt.

## 2.2 Ergebnisse der Emissionsermittlung für das Jahr 1998

Aus den verfügbaren Basisdaten werden die Jahresemissionen primärer Stäube in Baden-Württemberg im Jahr 1998 ermittelt und im Folgenden zur Identifizierung der relevanten Quellen dargestellt. Ergebnisse der Betrachtung ausgewählter Inhaltsstoffe sind im Kapitel 2.2.7 dargestellt. In den Tabellen 7-2 bis 7-7 im Anhang sind detaillierte Ergebnisse wiedergegeben, die eine genauere Identifizierung der Quellen ermöglichen.

### 2.2.1 Gesamtsituation in Baden-Württemberg

Insgesamt errechnen sich für Baden-Württemberg (ohne die Staubaufwirbelung im Verkehr) Jahresemissionen von etwa 25,6 Gg PM und 15,3 Gg PM<sub>10</sub>. Der PM<sub>10</sub>-Anteil an der Gesamtstaubemission liegt somit insgesamt bei etwa 60 %. Die Abschätzung für PM<sub>2,5</sub> ergibt eine Jahresmenge von etwa 11,1 Gg, entsprechend 43 % des Gesamtstaubs. Die Abbildung 2-1 gibt die Ergebnisse in fünf Sektoren zusammengefasst und nach den PM<sub>2,5</sub>-Emissionen geordnet wieder. Da für die Staubaufwirbelung im Verkehr nur eine sehr unsichere Angabe gemacht werden kann, werden diese Emissionen in Kapitel 2.2.2 separat dargestellt und auch wegen der Vergleichbarkeit mit anderen Studien nicht in dieser summarischen Darstellung der Emissionen berücksichtigt.

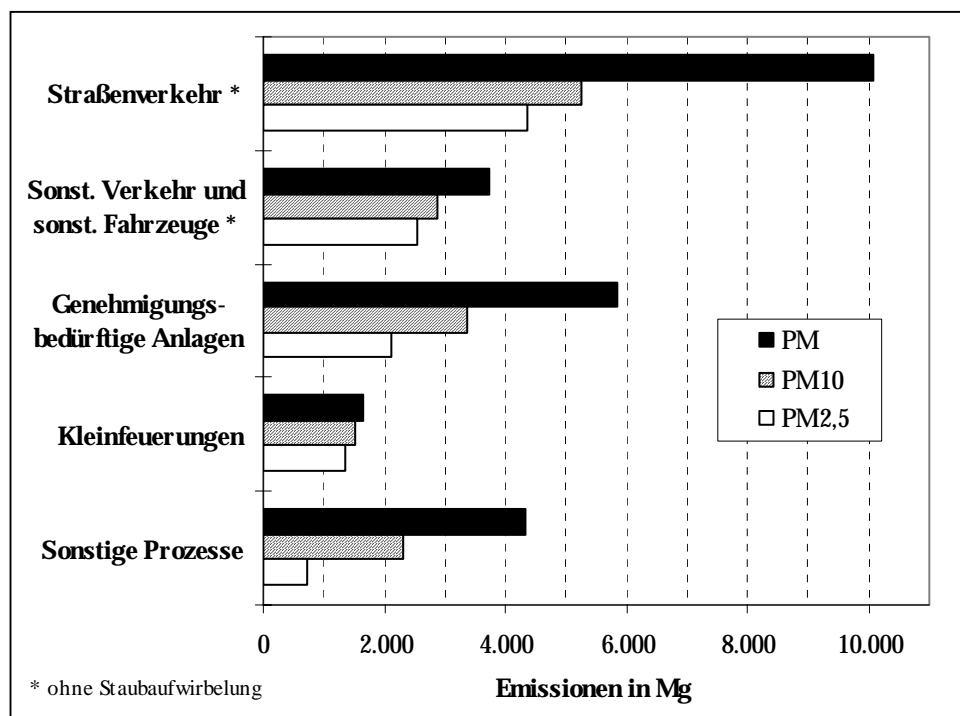


Abb. 2-1: Ergebnisse der Emissionsberechnung für PM, PM<sub>10</sub> und PM<sub>2,5</sub> in Baden-Württemberg 1998 in fünf Sektoren zusammengefasst

Die aggregierten Ergebnisse weisen vor allem den Verkehr und die genehmigungsbedürftigen Anlagen als wesentliche Verursacherbereiche der Feinstaubemissionen aus. Durch eine weitergehende Disaggregation der Emissionsdaten werden die relevanten Quellgruppen deutlich. Bei den nachfolgenden Abbildungen sind die Emissionen ebenfalls nach  $PM_{2,5}$  geordnet.

### 2.2.2 Emissionen des Verkehrs

Im Sektor Verkehr werden Feinstaubemissionen vor allem durch den Straßenverkehr verursacht. In Abbildung 2-2 sind die Partikelemissionen aus dem Straßenverkehr unterteilt nach Quellgruppen bzw. der Partikelentstehung wiedergegeben. Die abgeschätzten Emissionen infolge der Aufwirbelung von Straßenstaub sind ebenfalls dargestellt. Es wird deutlich, dass die Feinstäube des Straßenverkehrs überwiegend aus Dieselmotoren stammen. Hierbei haben die schweren Nutzfahrzeuge (SNF) einen Anteil von etwa 60 %. Die Emissionen der Dieselmotoren sind in Tabelle 7-2 nach Straßenkategorien unterteilt wiedergegeben. Die Abriebprozesse im Straßenverkehr verursachen nur geringe  $PM_{2,5}$ -Emissionen.

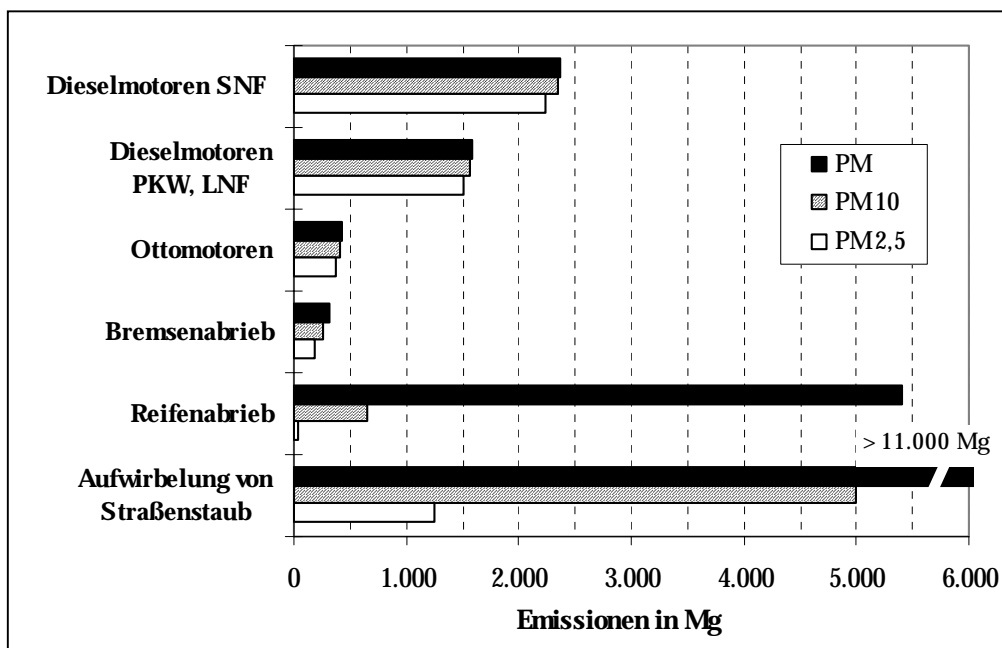


Abb. 2-2:  $PM$ -,  $PM_{10}$ - und  $PM_{2,5}$ -Emissionen des Straßenverkehrs in Baden-Württemberg 1998

Die Abschätzung für die Aufwirbelung von Straßenstaub mit Hilfe eines modifizierten Modells der US EPA ergibt hohe PM<sub>10</sub>-Emissionen, die bei 33 % der Emissionen aller anderen anthropogenen Quellen liegen und die Größenordnung der Auspuffemissionen des Straßenverkehrs haben. Der Straßenstaub führt möglicherweise auch zu bedeutenden PM<sub>2,5</sub>-Emissionen. Ausgehend vom derzeitigen Kenntnisstand ist der Staubaufwirbelung somit ein relevanter Beitrag zur Emissionssituation in Baden-Württemberg zuzuordnen.

Tabelle 2-17 stellt der Abschätzung für PM<sub>10</sub> durch Straßenstaub Ergebnisse gegenüber, die mit Emissionsfaktoren aus der Literatur und den gleichen Fahrleistungsdaten ermittelt werden können. Die Daten der zwei Schweizer Studien liefern ähnliche Ergebnisse wie das verwendete Modell. Der Emissionsfaktor aus (FITZ & BUFALINO, 2002) wurde über Messungen der Partikelaufwirbelung hinter einem Testfahrzeug ermittelt und liefert ebenfalls ein Ergebnis in der gleichen Größenordnung. Die IIASA versucht einen Emissionsfaktor nur für den direkten Straßenabrieb abzuschätzen.

Tab. 2-17: PM<sub>10</sub>-Emissionen durch die Aufwirbelung von Straßenstaub in Baden-Württemberg 1998

	PM <sub>10</sub> in Gg
Abschätzung mit modifizierter EPA-Gleichung	5,0
mit Emissionsfaktor aus (BUWAL, 2001)	5,1
mit Emissionsfaktor aus (HÜGLIN et al., 2000)	4,9
mit Emissionsfaktor aus (FITZ & BUFALINO, 2002)	7,4
mit Emissionsfaktor aus (IIASA, 2002) *	0,8

\* nur Straßenabrieb

Abbildung 2-3 gibt die Emissionen des sonstigen Verkehrs und sonstiger Fahrzeuge und mobiler Geräte wieder. Hohe Emissionen verursachen vor allem die Dieselmotoren in der Landwirtschaft und Baumaschinen. Auch für diese Quellgruppen können neben den dargestellten Abgasemissionen die Emissionen durch Abrieb und Aufwirbelungen abgeschätzt werden. Die Ergebnisse zeigen gegenüber den Abgasen relativ geringe Emissionsbeiträge, im Gegensatz zur Situation im Straßenverkehr.

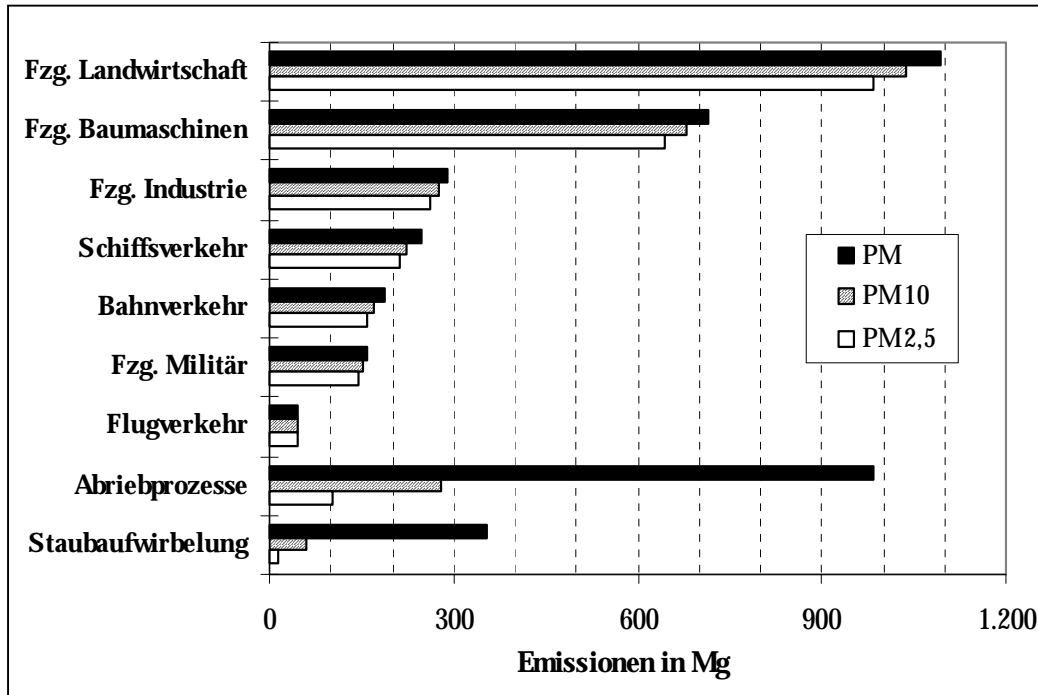


Abb. 2-3: PM-, PM<sub>10</sub>- und PM<sub>2,5</sub>-Emissionen des sonstigen Verkehrs und sonstiger Fahrzeuge und mobiler Geräte in Baden-Württemberg 1998

### 2.2.3 Emissionen der genehmigungsbedürftigen Anlagen

Die mit auf Verfahrensart/Anlagentyp und Abgasreinigung bezogenen Feinstaubanteilen ermittelten Ergebnisse für die genehmigungsbedürftigen Anlagen im Jahr 1996 sind in den Tabellen 7-4 und 7-5 im Anhang detailliert nach BImSchV-Nr. wiedergegeben. In Tabelle 2-18 sind die Ergebnisse zusammengefasst in Obergruppen der 4. BImSchV aufgeführt. Die Feinstaubemissionen kommen vor allem aus Anlagen der 1. und 2. Obergruppe der 4. BImSchV. Die 3. Obergruppe (Metallindustrie) ist in Baden-Württemberg gegenüber dem bundesweiten Quelleninventar insgesamt unterrepräsentiert, beinhaltet jedoch ebenfalls einzelne Quellgruppen mit hohen Partikelemissionen. Die Fortschreibung der Emissionen der UMEG für das Jahr 1998 ergab in der Summe eine Gesamtstaubemission von ca. 5,9 Gg (UMEG, 2001). Die Ergebnisse der mit durchschnittlichen Feinstaubanteilen je Obergruppe der 4. BImSchV vorgenommenen Ermittlung der Feinstaubemissionen im Jahr 1998 ist ebenfalls in Tabelle 2-18 wiedergegeben.



Tab. 2-18: PM-, PM<sub>10</sub>- und PM<sub>2,5</sub>-Emissionen der genehmigungsbedürftigen Anlagen in Baden-Württemberg 1996

Quellgruppe	PM in Mg	PM <sub>10</sub> in Mg	PM <sub>2,5</sub> in Mg
01: Wärmeerzeugung, Bergbau, Energie	1.531	1.066	838
02: Steine u. Erden, Glas, Keramik, Baustoffe	2.996	1.416	699
03: Stahl, Eisen u. sonstige Metalle einschl. Verarbeitung	295	238	146
04: Chemische Erzeugnisse, Arzneimittel, Mineralölraffination u. -weiterverarbeitung	381	243	188
05: Oberflächenbehandlung mit org. Stoffen, Herstellung von bahnenförmigen Materialien aus Kunststoffen, sonst. Verarbeitung von Harzen u. Kunststoffen	155	117	80
06: Holz, Zellstoff	171	136	94
07: Nahrungs-, Genuss- u. Futtermittel, landwirt. Erzeugn.	222	147	97
08: Verwertung, Beseitigung von Abfällen u. sonst. Stoffen	25	17	11
09: Lagerung, Be- u. Entladung v. Stoffen u. Zubereitungen	335	140	70
10: Sonstiges	40	32	26
<b>Summe für 1996</b>	<b>6.151</b>	<b>3.552</b>	<b>2.248</b>
<b>Summe abgeleitet für 1998</b>	<b>5.837</b>	<b>3.361</b>	<b>2.122</b>

In den nachfolgenden Abbildungen 2-4 und 2-5 sind die Ergebnisse nach Verfahrensart/Anlagentyp bzw. Abgasreinigung unterteilt wiedergegeben. Bedingt durch den Detaillierungsgrad der Emissionserklärungen liegen die Feinstaubemissionen weitaus differenzierter nach diesen technologischen Spezifikationen unterteilt vor als dies hier darstellbar ist. Die ermittelten detaillierten Daten sind eine wesentliche Basis für die Betrachtung der Minderungspotenziale bei den industriellen Quellen.

Eine Unterscheidung der Emissionen nach den in Tabelle 2-13 genannten Gruppen der Verfahrensarten/Anlagentypen zeigt, dass einerseits Feststoff- und gemischte Feuerungen, aufgrund der hohen Aktivität aber auch mechanische Prozesse große Anteile an den PM<sub>2,5</sub>-Emissionen haben. Ebenso haben die sonstigen industriellen Quellen relevante Emissionsanteile. Aus den detaillierten Daten wird deutlich, dass eine Betrachtung der genehmigungsbedürftigen Anlagen und eine Zuordnung von prozessspezifischen Feinstaubanteilen nur nach BImSchV-Nummern bzw. Branchen erhebliche Fehler produzieren kann, sofern die Verfahrensart/der Anlagentyp nicht berücksichtigt werden. So stammen beispielsweise bei den Großfeuerungen (BImSchV-Nr. 01.01) die angegebenen Gesamtstaubemissionen zu etwa 40 % nicht aus den Feuerungen, sondern aus dem Umschlag von Steinkohle oder anderen mechanischen Prozessen und sind

dementsprechend anders zu bewerten. In Tabelle 2-19 sind die Emissionen aus Feuerungsanlagen getrennt von den prozessbedingten Emissionen dargestellt.

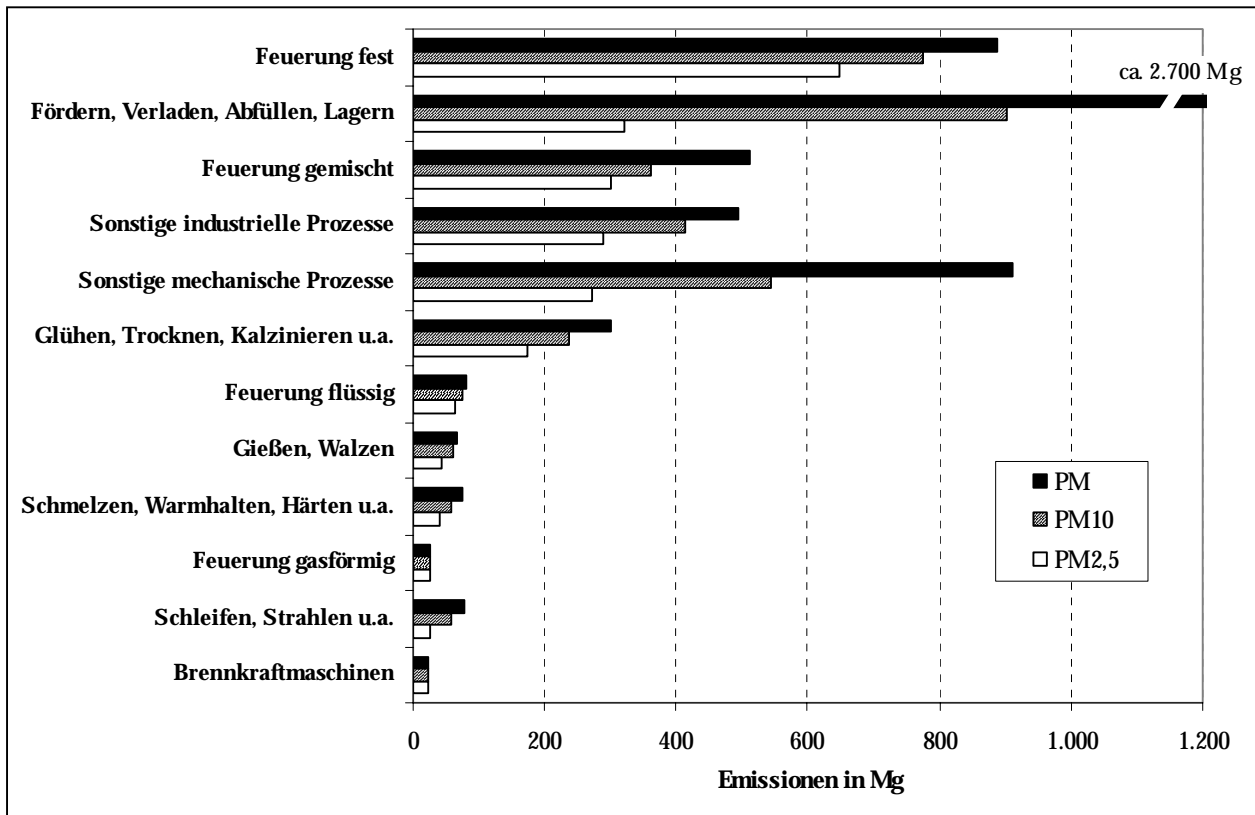


Abb. 2-4: PM-, PM<sub>10</sub>- und PM<sub>2,5</sub>-Emissionen der genehmigungsbedürftigen Anlagen in Baden-Württemberg 1996 für verschiedene Verfahrensarten/Anlagentypen

Tab. 2-19: Emissionen der genehmigungsbedürftigen Anlagen in Baden-Württemberg 1996 getrennt in energie- und prozessbedingt

Quellgruppe	PM in Mg	PM <sub>10</sub> in Mg	PM <sub>2,5</sub> in Mg
Energiebedingte Emissionen: Großfeuerungen 01.01	714	666	590
Energiebedingte Emissionen: Feuerungen 01.02/03	300	242	187
Energiebedingte Emissionen: Indirekte Prozessfeuerungen	470	348	291
Prozessbedingte Emissionen: Industrieprozesse einschließlich direkte Prozessfeuerungen	4.668	2.296	1.180
<b>Summe für 1996</b>	<b>6.151</b>	<b>3.552</b>	<b>2.248</b>

Bei einer Unterscheidung nach der installierten Abgasreinigung wird deutlich, dass die Gesamtstaubemissionen aus genehmigungsbedürftigen Anlagen fast zur Hälfte aus Prozessen ohne sekundäre Abgasreinigung kommen. Hierbei handelt es sich haupt-

sächlich um mechanische Prozesse, wie das Fördern, Abfüllen und Umschlagen von Gütern. Prozessen ohne Abgasreinigung werden jedoch auch nicht unerhebliche  $PM_{2,5}$ -Emissionen zugeordnet. Dies ist weniger auf die mechanischen Prozesse als vielmehr auf Feuerungen und sonstige industrielle Prozesse zurückzuführen (insbesondere Lackierereien, Räuchereien, Gießereien und Metall-Schmelzanlagen). Etwa 70 % der  $PM_{2,5}$ -Emissionen kommen aus Anlagen, die schon mit Gewebefilter, Elektrofilter oder Wäscher ausgerüstet sind. Bei den Emissionen aus Anlagen mit Gewebefiltern ergibt sich aufgrund der Verfahrens-/Anlagenstruktur und der Erkenntnisse aus Messdaten im Mittel ein relativ geringer  $PM_{2,5}$ -Anteil.

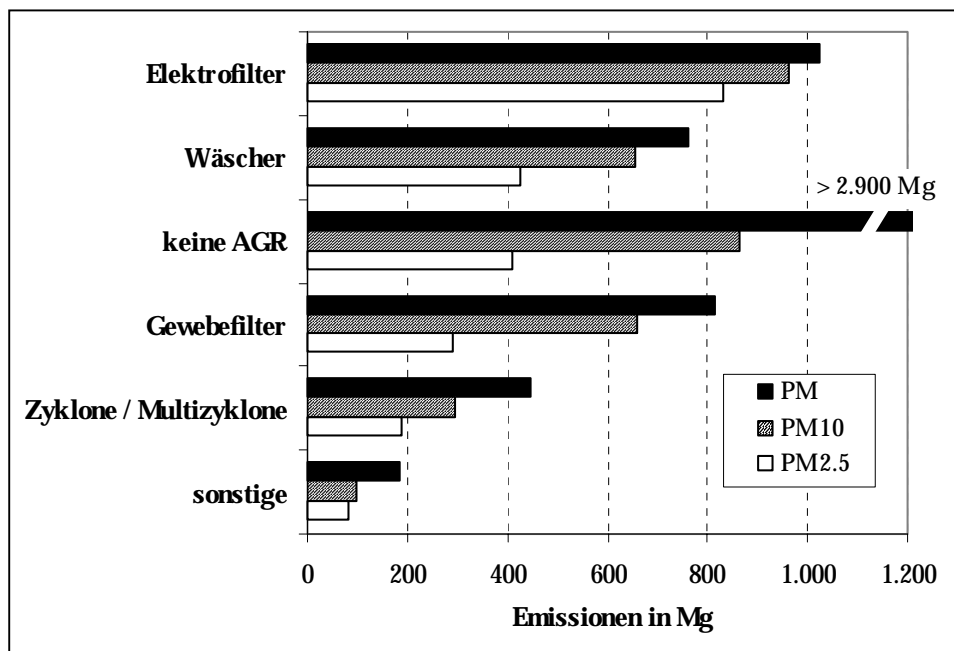


Abb. 2-5: PM-,  $PM_{10}$ - und  $PM_{2,5}$ -Emissionen der genehmigungsbedürftigen Anlagen in Baden-Württemberg 1996 für verschiedene Abgasreinigungen

Die in den Emissionserklärungen dargestellten diffusen Emissionen aus genehmigungsbedürftigen Anlagen ohne Abgasreinigung sind vor allem Emissionen aus dem Umschlag, Fördern, Verladen und Lagern von Stoffen. Interessant sind aber auch diffuse Emissionen durch nicht erfasste Abluft aus Hallenöffnungen, die je nach den emissionsverursachenden Anlagen hohe Feinstaubanteile beinhalten können. In den Emissionserklärungen 1996 konnten nach Angaben der UMEG diese Quellen zumeist nicht berücksichtigt werden (UMEG, 2003). Lediglich 0,6 % der Emissionen genehmigungsbedürftiger Anlagen sind hier als Emissionen aus Hallenöffnungen gekennzeichnet.

### 2.2.4 Emissionen der nicht genehmigungsbedürftigen Feuerungen

Abbildung 2-6 gibt die Ergebnisse der Berechnungen für Kleinf Feuerungen von Haushalten, Kleinverbrauchern und der Industrie wieder. Die Emissionen aus Gasfeuerungen sind massebezogen nur unbedeutend und werden hier nicht aufgeführt. Die Holzfeuerungen in den Haushalten verursachen den größten Emissionsanteil mit relativ hohem Feinstaubanteil. Des weiteren entstehen nicht unbedeutende Emissionen durch die Ölfeuerungen in den Haushalten aufgrund der hohen Aktivität und die Holzfeuerungen bei Kleinverbrauchern. Unter Verwendung der statistischen Angaben des STALA (2001a) erscheinen die Kleinf Feuerungsanlagen in der Industrie insgesamt als wenig bedeutend.

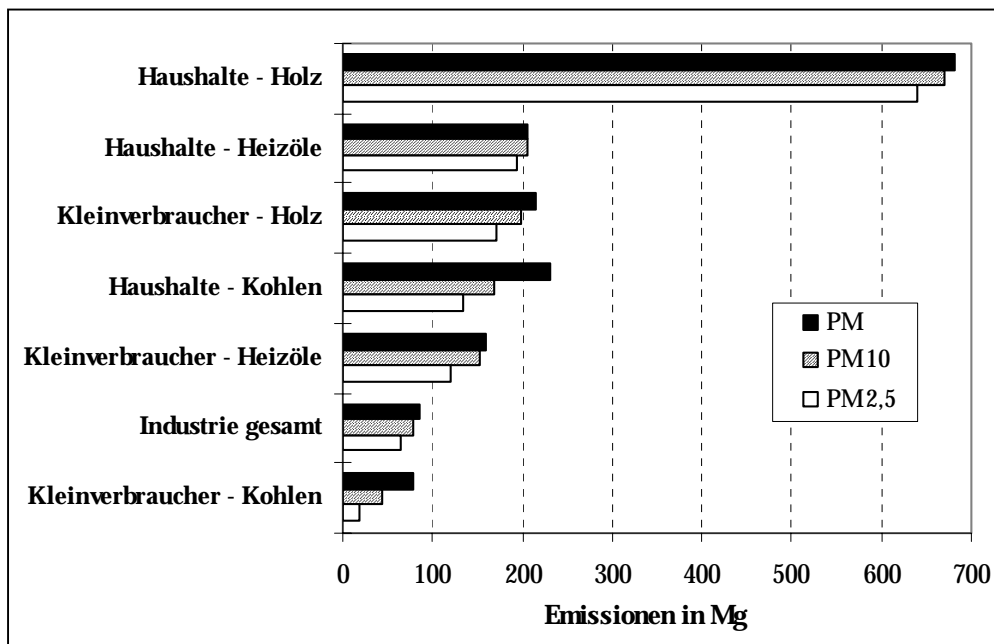


Abb. 2-6: PM-, PM<sub>10</sub>- und PM<sub>2,5</sub>-Emissionen der Kleinf Feuerungen in Baden-Württemberg 1998

### 2.2.5 Emissionen der sonstigen Prozesse, nicht genehmigungsbedürftig

In Abbildung 2-7 sind die Ergebnisse für die sonstigen Prozesse wiedergegeben. PM<sub>2,5</sub>-Emissionen entstehen bei diesen Quellen vor allem durch die thermischen Prozesse Feuerwerke und Rauchen von Tabak. Relativ hohe Gesamtstaub- und PM<sub>10</sub>-Emissionen entstehen zudem durch Tierhaltungen, Steinbrüche und Schreinereien. Ebenso wie weitere mechanische Prozesse verursachen diese Quellen nur relativ geringe PM<sub>2,5</sub>-Emissionen.

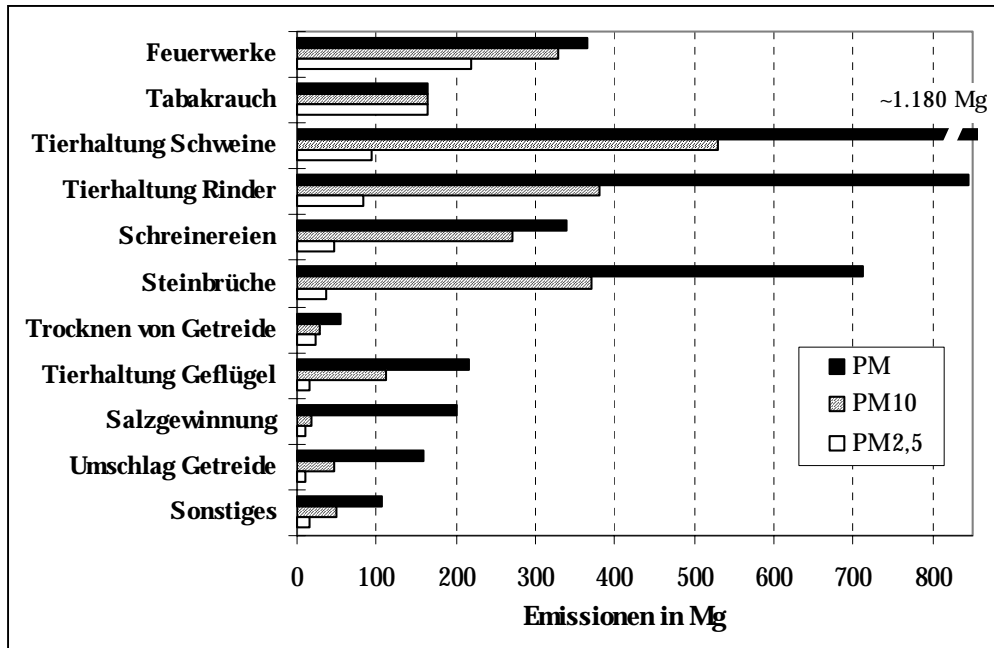


Abb. 2-7: PM-, PM<sub>10</sub>- und PM<sub>2,5</sub>-Emissionen der sonstigen Prozesse, nicht genehmigungsbedürftig in Baden-Württemberg 1998

### 2.2.6 Sektorübergreifende Darstellung der relevanten Quellgruppen 1998

In der folgenden Tabelle sind die für die Feinstaubemissionen in Baden-Württemberg bedeutendsten 35 Quellgruppen anhand ihrer PM<sub>2,5</sub>-Emissionen geordnet sektorübergreifend wiedergegeben. Die Aufwirbelung von Straßenstaub ist bei dieser Darstellung nicht mit berücksichtigt. Diese Emittentengruppen verursachten etwa 90 % der gesamten anthropogenen PM<sub>2,5</sub>-Emissionen im Jahr 1998. Bei den PM<sub>10</sub>-Emissionen sind diese Quellen zu etwa 81 %, beim Gesamtstaub nur zu etwa 63 % beteiligt. Entsprechend hoch ist der Anteil thermisch erzeugter Stäube. Die mittleren Feinstaubanteile dieser Emissionsquellen liegen bei 77 % PM<sub>10</sub> und 62 % PM<sub>2,5</sub>. Es zeigt sich wiederum die Bedeutung der Dieselmotoren des Verkehrs für die Emissionssituation insgesamt in Baden-Württemberg. Die relevantesten Quellgruppen sind die Dieselmotoren im Straßenverkehr, in der Landwirtschaft und von Baumaschinen, die Holzfeuerungen in den Haushalten, die Kohlefeuerungen in Kraftwerken und aufgrund der hohen Aktivität in Baden-Württemberg das Brechen, Mahlen und Klassieren von Gestein in genehmigungsbedürftigen Anlagen. Auch ist vermutlich die hier nicht dargestellte Aufwirbelung von Straßenstaub sehr bedeutend für die Emissionssituation.

Tab. 2-20: Relevante Quellgruppen bezüglich  $PM_{2,5}$  in Baden-Württemberg 1998/1996

Quellgruppe	PM Mg	PM <sub>10</sub> Mg	PM <sub>2,5</sub> Mg
KFZ Dieselmotoren, PKW	1.216	1.208	1.156
KFZ Dieselmotoren, LKW mit Anhänger	1.139	1.132	1.083
Sonstige Fahrzeuge Landwirtschaft, Dieselmotoren	1.029	978	926
KFZ Dieselmotoren, LKW ohne Anhänger	730	725	694
Sonstige Fahrzeuge Baumaschinen, Dieselmotoren	715	679	644
Kleinf Feuerungen Haushalte, Brennholz	682	671	639
Feuerungen Kraftwerke, Steinkohle	1.025	688	547
Brechen, Mahlen, Klassieren von Gestein	2.136	831	368
KFZ Dieselmotoren, Sattelzüge	256	255	244
Sonstige Fahrzeuge Industrie, Dieselmotoren	251	238	226
KFZ Dieselmotoren, Bus	236	234	224
Feuerwerke	364	328	219
Schiffsverkehr Dieselmotoren	248	223	211
Zementherstellung	492	359	207
KFZ Dieselmotoren, LNF	208	207	198
Kleinf Feuerungen Haushalte, Heizöl EL	206	206	193
KFZ Ottomotoren, PKW mit geregelter Kat	223	203	192
Kleinf Feuerungen Kleinverbraucher, Holz	214	199	172
Rauchen von Tabak	165	165	165
Bahnverkehr Abgasemission, Dieseltraktion	189	170	161
Verarbeitung von Erdöl, Erdölzerzeugnissen	320	193	155
Feuerungen Industrie, Holz	270	200	152
KFZ Dieselmotoren Kaltstart, PKW, LNF	160	159	152
KFZ Bremsenabrieb, PKW	240	206	151
Sonstige Fahrzeuge Militär, Dieselmotoren	156	149	141
KFZ Ottomotoren, PKW ohne Kat	131	126	118
Kleinf Feuerungen Haushalte, Braunkohle	134	120	110
Kleinf Feuerungen Kleinverbraucher, Heizöl EL	124	124	96
Tierhaltung Schweine	1.179	530	94
Eisen-, Stahlgießereien	168	138	86
Tierhaltung Rinder	844	380	84
Sonstige Fahrzeuge Landwirtschaft, Ottomotoren	63	60	56
Bahnverkehr Bremsenabrieb	369	119	55
Fabrikmäßige Papier- und Pappenherstellung	89	73	55
Lackier-/Trocknungsanlagen	100	71	55
<b>Summe relevante Prozesse in Mg</b>	<b>16.072</b>	<b>12.347</b>	<b>10.029</b>

### 2.2.7 Emissionen ausgewählter Inhaltsstoffe

In den folgenden Tabellen sind die Ergebnisse der Emissionsabschätzung für ausgewählte Inhaltsstoffe der Staubemissionen in Baden-Württemberg wiedergegeben. Die Bleiemissionen sind vor allem auf genehmigungsbedürftige Anlagen und Kleinfeuerungen mit festen Brennstoffen zurückzuführen. Beim Cadmium sind Dieselmotoren und genehmigungsbedürftige Feuerungsanlagen die wichtigsten Quellen. Die Arsenemissionen werden zu über 50 % durch genehmigungsbedürftige Feuerungen verursacht, Chrom wird hauptsächlich durch genehmigungsbedürftige Anlagen und den Abrieb im Verkehr emittiert. Auch die Aufwirbelung von Straßenstaub könnte eine wichtige Rolle bezüglich der Blei- und Chromemissionen spielen.

Tab. 2-21: Emissionen ausgewählter Schwermetalle als Staubinhaltsstoffe in Baden-Württemberg 1998

	Pb in kg	Cd in kg	As in kg	Cr in kg
KFZ Dieselmotoren	45	227	23	23
KFZ Ottomotoren	174	20	161	130
KFZ Reifenabrieb	863	49	32	162
KFZ Bremsenabrieb	15	2	3	369
KFZ Aufwirbelung von Straßenstaub	1.640	24	17	391
Sonstiger Verkehr *	46	8	41	449
Flugverkehr zivil (nur Flugbenzin)	189	k.A.	k.A.	k.A.
Sonstige Fahrzeuge und mobile Geräte *	290	67	46	98
Genehmigungsbedürftige Feuerungsanlagen	1.579	108	594	464
Genehmigungsbedürftige Prozesse	2.976	82	23	668
Kleinfeuerungen Haushalte	1.069	49	96	211
Kleinfeuerungen Kleinverbraucher, Industrie	1.123	23	70	147
Sonstige nicht gen.-bed. Prozesse	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
<b>Summe der quantifizierten Emissionen</b>	<b>10.011</b>	<b>658</b>	<b>1.106</b>	<b>3.113</b>

\* Abgase, Reifen- und Bremsenabrieb, Staubaufwirbelungen

Die Tabelle 2-22 gibt die Emissionen organischer Verbindungen der betrachteten Quellgruppen wieder. Die PAK- und BaP-Emissionen werden nach den vorliegenden Erkenntnissen überwiegend von den Holzfeuerungen der Haushalte und Kleinverbraucher verursacht. Die Emissionen aus genehmigungsbedürftigen Anlagen sind vermutlich deutlich unterschätzt, da diese Komponenten in den Emissionserklärungen zumeist nicht einzeln angegeben werden. Die Dioxinemissionen entstehen vor allem durch Brände und die Metallgewinnung und -verarbeitung.

Tab. 2-22: Emissionen organischer Verbindungen in Baden-Württemberg 1998

	PAK in kg	BaP in kg	PCDD/F in g TEQ
KFZ Dieselmotoren	12.880	327	0,09
KFZ Ottomotoren	5.020	126	0,26
KFZ Reifenabrieb	1.220	21	k.A.
KFZ Bremsenabrieb	0,5	0,2	k.A.
KFZ Aufwirbelung von Straßenstaub	k.A.	k.A.	k.A.
Sonstiger Verkehr	1.417	58	0,32
Sonstige Fahrzeuge und mobile Geräte	2.235	88	0,34
Genehmigungsbedürftige Feuerungsanlagen	93	27	0,20
Genehmigungsbedürftige Prozesse	69	20	4,26
Kleinf Feuerungen Haushalte	101.580	2.087	0,70
Kleinf Feuerungen Kleinverbraucher, Industrie	39.236	809	0,34
Sonstige nicht gen.-bed. Prozesse	k.A.	k.A.	10 *
<b>Summe der quantifizierten Emissionen</b>	<b>163.750</b>	<b>3.565</b>	<b>16,51</b>

\* Abgeschätzte Emission durch Brände im Jahr 1996 aus (LFU-BW, 2000)

Für den Straßenverkehr werden beispielhaft Emissionen unter Verwendung verschiedener Datenquellen berechnet und in der nachfolgenden Tabelle gegenübergestellt. Hier zeigt sich die große Streubreite der verfügbaren Basisdaten.

Tab. 2-23: PAK, PCDD/F-Emissionen aus dem Straßenverkehr in Baden-Württemberg 1998, berechnet mit Emissionsfaktoren aus verschiedenen Quellen

Literaturquelle	Dieselmotoren		Ottomotoren	
	PAK in kg	PCDD/F in g TEQ	PAK in kg	PCDD/F in g TEQ
HOLOUBEK, 2000	19.512	0,05	10.100	0,17
IFEU, 1998	9.603	0,19		0,33
JONES, 1993 *		35,00		0,64
NOREM, 1998 *	2.718	0,14	1.381	0,77
LUA-NRW, 1997		0,10		0,35

\* genannt in (WIEDMANN et al., 2000)



### 2.2.8 Unsicherheiten und Kenntnislücken

Für ermittelte Emissionsfaktoren und Feinstaubanteile existiert bislang in Deutschland keine differenzierte und systematisierte Bewertung. Die Verfahren für gröbenselektive Messungen sind nur zum Teil in der VDI-Richtlinie 2066 standardisiert. Für das Ergebnis beeinflussende Randbedingungen, wie etwa die Messtemperatur oder der Betriebszustand einer Anlage, gibt es keine standardisierten Vorgaben. Auch bei der Partikelmessung an Dieselmotoren besteht die Problematik hinsichtlich der Mess- und Betriebsbedingungen, die Kondensation und Partikelbildung wesentlich beeinflussen (s. z. B. LAMBRECHT & HÖPFNER, 2000). In vielen Veröffentlichungen sind zudem keine ausreichende Spezifikation der untersuchten Prozesse und Anlagen und keine Fehlerbetrachtung der Emissionsmessungen gegeben. Insbesondere bei Impaktormessungen besteht die Problematik, dass Wandverluste auftreten. Folglich liegt die Gesamtsumme über alle Staubfraktionen möglicherweise deutlich unter der in einer Gesamtstaubmessung feststellbaren Emission. Dadurch können Unterschätzungen der Staubemissionen entstehen. Die Verknüpfung von Feinstaubanteilen aus gröbenselektiven Messungen mit Gesamtstaubwerten aus anderen Messungen führt zu weiteren Unsicherheiten, ist jedoch in manchen Fällen aufgrund der Datenlage nicht zu vermeiden.

Die über umfangreiche Recherchen erstellte Datenbasis an Informationen zu Emissionsfaktoren und Feinstaubanteilen weist Lücken und Unsicherheiten auf, auch wenn in den letzten Jahren neue Messprojekte in Deutschland und anderen Ländern vorgenommen wurden. Die Übertragbarkeit von Daten aus ausländischen Studien, insbesondere der US EPA, auf deutsche Verhältnisse ist in manchen Fällen unklar und kann im Rahmen des Projekts nicht im Detail überprüft werden. Insbesondere die  $PM_{2,5}$ -Anteile stellen teilweise grobe Abschätzungen dar, die auf wenigen Messdaten beruhen. Hier sind insgesamt noch wenige Erkenntnisse vorhanden, so dass weitere gröbenselektive Emissionsmessungen in relevanten Bereichen wünschenswert sind.

Wesentliche in dieser Arbeit verwendete Daten zu Emissionen oder Emissionsfaktoren können nicht oder kaum hinsichtlich ihrer Unsicherheiten bewertet werden. So sind die Angaben der Betreiber genehmigungsbedürftiger Anlagen in den Emissionserklärungen für die über 12.500 Quellen in Baden-Württemberg im Rahmen dieser Arbeit nicht überprüfbar. Ebenso sind die Unsicherheiten nicht bekannt, die sich aus der Anwendung der Emissionsfaktoren für Dieselmotoren im Straßenverkehr aus (UBA, 1999a) ergeben. Für gasförmige Verbindungen ( $NO_x$ , NMVOC) wurde vor wenigen Jahren eine Quantifizierung dieser Unsicherheiten im Rahmen eines BWPLUS-Projekts vorgenommen (KÜHLWEIN et al., 1999). Es ergaben sich Unsicherheiten im Bereich von ca. 20 bis

30 % für die Ermittlung von Jahresemissionen in Baden-Württemberg. Für die Partikelemissionen ist aufgrund der größeren Messmethodik zur Ermittlung der Emissionsfaktoren des UBA-Handbuchs von höheren Unsicherheiten auszugehen.

Des Weiteren gibt es nach wie vor Bereiche, die vermutlich eine Emissionsrelevanz besitzen, für die derzeit aber keine fundierten Angaben zur Emissionssituation gemacht werden können. Hierunter fallen beispielsweise Bauprozesse zur Erstellung, Instandhaltung und zum Abbruch von Gebäuden und bislang nicht betrachtete Prozesse in der Landwirtschaft (z. B. Bodenbearbeitung). Für die Landwirtschaft wird derzeit im Rahmen eines weiteren BWPLUS-Projekts eine neue Datenbasis für Baden-Württemberg erarbeitet (REINHARDT et al., 2003). Diese genannten Prozesse stellen diffuse Quellen mechanisch erzeugter Partikel dar, die in der Regel relativ geringe Feinstaubanteile aufweisen. Ungeklärt ist auch die Emissionsrelevanz von thermischen Prozessen bei der Zubereitung von Nahrungsmitteln, wie etwa Braten oder Grillen. Auch für die Aufwirbelung von Straßenstaub, bei der eine hohe Relevanz für die Feinstaubemissionen vermutet wird, existieren nur mangelhafte Kenntnisse zu den Emissionsfaktoren und den die Staubentstehung maßgeblich beeinflussenden Variablen. Mit der von der US EPA abgeleiteten Methode kann nur mit großen Unsicherheiten eine erste Abschätzung der Emissionen vorgenommen werden. Noch nicht untersucht ist auch, inwieweit Straßenreinigungsfahrzeuge Emissionen durch Aufwirbelung verursachen. Bedeutend könnten auch diffuse Emissionen in der Industrie sein, die bislang nicht oder nur unvollständig in den Emissionserklärungen mit erfasst worden sind. Hier sind insbesondere ungenannte Emissionen aus Dachreitern oder Hallenöffnungen zu nennen, die je nach den verursachenden Quellen auch relativ hohe Feinstaubanteile besitzen können.

Zu den Inhaltsstoffen emittierter Stäube existiert derzeit nur eine unsichere Datenbasis. Kenntnislücken gibt es bei allen betrachteten Komponenten und insbesondere bezüglich der größenspezifischen Anteile an emittierten Partikeln. Weitgehend unbekannt sind auch die löslichen Anteile der emittierten Inhaltsstoffe. Zu den partikelgebundenen Anteilen toxischer organischer Verbindungen liegen insbesondere aus messtechnischen Gründen kaum Informationen vor. Hier sind jedoch zahlreiche Informationen zu prozessspezifischen Emissionen dieser Komponenten verfügbar.

Trotz der teilweise hohen Unsicherheiten bei den Basisdaten lässt sich mit den erarbeiteten Methoden unter Berücksichtigung des derzeitigen Kenntnisstands darstellen, welche Quellgruppen wahrscheinlich entscheidend zu den Emissionen in Baden-Württemberg beitragen und welche Quellgruppen eine untergeordnete Rolle spielen. Insgesamt ist es wünschenswert, die Datenbasis für Emissionsberechnungen auch zu-

künftig weiter zu verbessern, um Unsicherheiten bei den Aussagen zu den wesentlichen Quellen und weiterführend zu den Minderungspotenzialen bei verschiedenen Quellgruppen zu reduzieren. Die aus Emissionskatastern abgeleiteten Aussagen und ihre Unsicherheiten sind letztendlich durch die Qualität der verfügbaren quellspezifischen Kenntnisse bzw. Messdaten bedingt.

Die in diesem Projekt ermittelten Emissionsdaten für Baden-Württemberg können mit Ergebnissen aus anderen Quellen verglichen werden. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass in der Regel Unterschiede bezüglich der betrachteten Quellenstruktur und der verwendeten Basisdaten bestehen, die sich bedingt durch die vorhandenen Unsicherheiten auf die Ergebnisse stark auswirken können. In der nachfolgenden Tabelle sind die Ergebnisse für das Jahr 1998 (ohne Staubaufwirbelungen) dem 2001 veröffentlichten Emissionskataster Baden Württemberg (UMEG, 2001) gegenübergestellt. Die Jahressummen zeigen nur geringe Abweichungen, während die Ergebnisse für einzelne Quellgruppen teilweise deutlich voneinander abweichen. Die Differenzen lassen sich zumeist mit den unterschiedlichen Quelleninventaren erklären. Beim Reifen- und Bremsenabrieb im Straßenverkehr wird in dieser Studie im Gegensatz zum Emissionskataster nur von einem flugfähigen Staubanteil von 75 % bzw. 30 % des Abriebs ausgegangen. Beim sonstigen Verkehr und den sonstigen Fahrzeugen werden neben den Abgasemissionen auch die Abriebprozesse berücksichtigt. Die Produktions- und sonstigen Prozesse umfassen zusätzlich zum Emissionskataster Baden-Württemberg Tierhaltungen und weitere Prozesse in der Landwirtschaft, Feuerwerke, die Salzgewinnung und das Rauchen von Tabak.

Tab. 2-24: Gegenüberstellung der ermittelten Emissionsdaten für Gesamtstaub im Jahr 1998 mit Ergebnissen aus (UMEG, 2001)

Quellgruppen	Diese Arbeit: PM in Mg	UMEG (2001): PM in Mg
KFZ Dieselmotoren	3.944	3.815
KFZ Ottomotoren	435	k.A.
KFZ Reifenabrieb	5.397	7.383
KFZ Bremsenabrieb	308	1.250
Sonstiger Verkehr	1.079	438
Sonstige Fahrzeuge und mobile Geräte	2.649	2.217
Genehmigungsbedürftige Feuerungsanlagen	1.456	1.450
Genehmigungsbedürftige Prozesse	4.381	4.387
Nicht gen.-bed. Feuerungen (Kleinfeuerungen)	1.660	1.961
Nicht gen.-bed. Produktions- und sonstige Prozesse	4.339	1.109
<b>Summe</b>	<b>25.646</b>	<b>24.010</b>

### 3 Entwicklung einer Projektion in das Jahr 2010

Im Rahmen des Projekts wird eine Trendprojektion des Emissionsinventars in das Jahr 2010 erarbeitet. Als Grundlage dienen die ermittelten Emissionen für 1998. Die Projektion berücksichtigt derzeit zu erwartende Entwicklungen bei den Quellgruppen und stellt ein Referenzszenario für die weitergehende Betrachtung von Minderungsmaßnahmen in den verschiedenen Bereichen dar. Ausgehend davon können weitergehende Minderungspotenziale abgeleitet werden, weshalb der Projektion eine wichtige Rolle zukommt. Das Trendszenario stellt eine mögliche Entwicklung ausgehend von plausiblen Annahmen dar, ist jedoch nicht als Prognose zu werten, da lenkende politische, wirtschaftliche oder gesellschaftliche Rahmenbedingungen als Ursachen einer Entwicklung zumeist nicht berücksichtigt werden können.

#### 3.1 Methodik des Trendszenarios

Die Trendprojektion wird für prozessspezifische Aktivitäten und Emissionsfaktoren getrennt vorgenommen. Bezüglich der emissionsbestimmenden Aktivitäten werden Projektionen ausgehend von Tendaussagen zu mit den Emissionen im Zusammenhang stehenden Indikatoren entwickelt und Trendfaktoren für 2010 bestimmt. Ein Trendfaktor beschreibt das Verhältnis einer Aktivität im Jahr 2010 zur Aktivität im Basisjahr 1998. Des Weiteren werden Trendfaktoren für die prozessspezifischen Emissionsfaktoren unter Berücksichtigung von derzeit geltenden oder absehbaren gesetzlichen Regelungen und weiteren Entwicklungen bei den einzelnen Quellgruppen, wie neue Technologien und verbesserte Abgasreinigungen abgeleitet. Die Multiplikation der Emissionsdaten einer Quellgruppe für 1998 mit diesen Trendfaktoren liefert die 2010 zu erwartenden Emissionen, was die nachfolgende Gleichung veranschaulicht.

$$(4) \quad E_{2010} = E_{1998} * TF_A * TF_{EF}$$

mit  $E_{2010}$  bzw.  $E_{1998}$  = Emission im Jahr 1998 bzw. 2010 in Mg

$TF_A$  = Trendfaktor für die Aktivität

$TF_{EF}$  = Trendfaktor für den Emissionsfaktor

Bezüglich der Emissionsfaktoren liegen keine größenselektiven Informationen vor, so dass für alle betrachteten Partikelfractionen ein mittlerer Trendfaktor angegeben wird. Die Entwicklung der Vorgehensweisen zur Projektion basiert insbesondere auf Ausführungen von HOLTSMANN (1997). Die Bestimmung von Trendfaktoren soll möglichst einfach und nachvollziehbar bleiben. Die Wahl von komplexeren Projektionsmethoden liefert nicht zwangsläufig eine realitätsnähere Abbildung von emissionsbedingenden Entwicklungen und führt somit nicht unbedingt zu einer besseren Abschätzung der zukünftigen Emissionssituation (s. HOLTSMANN, 1997). Sofern für einzelne Quellgruppen fundierte und auf Baden-Württemberg übertragbare Szenarien in anderen Studien erarbeitet wurden, werden diese für das Trendszenario genutzt.

### **3.1.1 Projektion von Aktivitätsdaten**

Trendprojektionen von Produktionsmengen, Brennstoffeinsätzen, Fahrleistungen und anderen Aktivitätsdaten sind eine wesentliche Grundlage des Szenarios. Sofern die Aktivitäten mangels Daten nicht direkt projiziert werden können, werden sekundäre emissionserklärende Parameter, wie beispielsweise wirtschaftliche Basisindikatoren genutzt. Sofern keine Informationen zu den zukünftig zu erwartenden Aktivitäten in Baden-Württemberg aus anderen veröffentlichten Studien verfügbar sind, müssen diese aus statistischen Daten ermittelt werden. Hierzu ist es erforderlich, entsprechende Zeitreihen der Aktivitäten in der Vergangenheit zu ermitteln und mit Hilfe von statistischen Projektionsfunktionen oder über bekannte Prognosen von mit der Aktivitätsentwicklung korrelierenden Basisindikatoren eine Zeitreihe von zukünftigen Aktivitätsdaten zu entwickeln. Diese Extrapolation kann über einfache statistische Funktionen, wie etwa die lineare Ausgleichsgerade oder Sättigungskurven über die Annahme von Sättigungsendwerten bewerkstelligt werden. Bei dieser Vorgehensweise muss anhand der Gestalt der Zeitreihe der Vergangenheit ermittelt werden, welche Projektionsfunktion die Entwicklungen plausibel beschreiben kann. Für den Endwert im Jahr 2010 wird jeweils ein plausibler Wert ermittelt und ggf. mit Angaben aus anderen Quellen abgestimmt. Somit können bei dieser Vorgehensweise auch Aspekte berücksichtigt werden, die sich nicht aus der Statistik ableiten lassen. Dennoch werden mit diesem Ansatz Aussagen für die Zukunft vor allem ausgehend von den Ausprägungen des statistischen Merkmals Aktivität bzw. der verwendeten Basisindikatoren in der Vergangenheit ermittelt. Die genauen Zusammenhänge zwischen den zu projizierenden Größen und den eigentlichen Ursachen der Entwicklungen müssen größtenteils unberücksichtigt bleiben und werden als in der Zukunft konstant bleibend angenommen.

Für die Projektion der Aktivitäten des Straßenverkehrs wird auf Prognosen der Fahrleistungen nach IFEU (1999), HÖPFNER (2001), HOPF & VOIGT (2001) und UBA (1999a) zurückgegriffen. Des weiteren existieren Prognosen für den Verkehr aus (PROGNOS, 1999). Für den sonstigen Verkehr und die sonstigen Fahrzeuge werden zum Teil auch Trendfaktoren ausgehend von statistischen Angaben zum Kraftstoffverbrauch abgeleitet (STALA, 1992-2002; MLR-BW, 2001).

Für die Produktionsprozesse in Baden-Württemberg liegen keine Zeitreihen von branchenspezifischen Produktionsmengen vor. Für die meisten Prozesse fallen die statistischen Produktionsmengen unter Datenschutz, weshalb sie im Rahmen dieses Projekts nicht genutzt werden können (STALA, 2001c). Angaben zu den Produktionsmengen aus den Emissionserklärungen liegen nur für das Jahr 1996 vor. Aus Angaben des Statistischen Landesamtes (STALA, 2000b) werden Zeitreihen von Produktionsindizes zusammengestellt und teilweise als Trendindikatoren verwendet. Bei einigen relevanten Prozessen werden Trendfaktoren ausgehend von Aktivitätsdaten für Gesamtdeutschland ermittelt. Zur Ermittlung von Basisindikatoren erfolgt ergänzend die Auswertung von Prognosen der Wirtschaftsentwicklung und des Energiemarktes in Deutschland (z. B. PROGNOS, 1993, 1995, 1999). Für den Umschlag staubender Güter wird die Projektion anhand von Daten zur Gütereinfuhr und -produktion vorgenommen. Bei den genehmigungsbedürftigen Produktionsanlagen sind des weiteren die Veränderungen zwischen 1996 und 1998 analog UMEG (2001) berücksichtigt. Für die Tierhaltungen wird eine Projektion auf der Basis von statistischen Tierbestandszahlen ermittelt (STBA, 1991-2001).

Für die genehmigungsbedürftigen und nicht genehmigungsbedürftigen Feuerungsanlagen können Zeitreihen des Energieverbrauchs aus den Energiebilanzen (STALA, 1992-2002) gebildet werden. Für die Kleinf Feuerungen liegen darüber hinaus Prognosen von PFEIFFER et al. (2000) vor. Die Projektion für die Feuerungsprozesse erfolgt unterteilt nach Brennstoffarten. Bei den Kleinf Feuerungen mit Heizöl EL erfolgen Korrekturen der Prognosen von PFEIFFER et al. aufgrund der Bestimmungen der Energieeinsparverordnung (EnEV) 2002. Für Kraft- und Fernheizwerke werden zudem die Arbeiten von FAHL et al. (2001) berücksichtigt, in denen Szenarien für die Energiewirtschaft in Baden-Württemberg entwickelt wurden. Aus diesen Untersuchungen erscheinen Trenderaussagen ausgehend vom Szenario mit Klimaschutzziele bei moderaten Energiepreisen plausibel. In Tabelle 7-10 im Anhang sind die insgesamt verwendeten Indikatoren und Trendfaktoren zur Projektion von Aktivitätsdaten zusammengestellt.

### 3.1.2 Projektion von Emissionsfaktoren

Für die Projektion der prozessspezifischen Emissionsfaktoren werden Veränderungen durch emissionsseitige gesetzliche Reglementarien berücksichtigt und Trends beim Stand der Technik und dessen Implementierung bei den verschiedenen Quellgruppen angenommen. Insgesamt werden die nachfolgend genannten gesetzlichen Reglementarien und deren Wirkung auf die Emissionssituation in Deutschland berücksichtigt:

- EU-Richtlinie 98/69/EG, Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen (EURO 3/4 Standards für den Straßenverkehr)
- EU Richtlinie 98/70/EG, Qualität der Treibstoffe im Straßenverkehr bzw. die zweite Verordnung zur Änderung der 10. BImSchV (Verordnung über die Beschaffenheit und die Auszeichnung der Qualitäten von Kraftstoffen)
- EU Richtlinie 88/609/EWG, Emissionen aus Großfeuerungen bzw. 13. BImSchV (Großfeuerungsanlagenverordnung), Entwurf einer Novelle Dezember 2002
- Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft), novelliert Oktober 2002
- 1. BImSchV (Kleinfeuerungsanlagenverordnung)
- EU-Richtlinie 2002/51/EG, Verminderung der Schadstoffemissionen von zweirädrigen und dreirädrigen Kraftfahrzeugen bzw. 97/24/EG über bestimmte Bauteile und Merkmale von zweirädrigen oder dreirädrigen Kraftfahrzeugen
- EU Richtlinie 99/32/EG, Schwefelgehalt von bestimmten flüssigen Kraft- und Brennstoffen bzw. 3. BImSchV (Verordnung über den Schwefelgehalt bestimmter flüssiger Kraft- und Brennstoffe), novelliert Juni 2002
- EU-Richtlinie 97/68/EG, Maßnahmen bei Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte bzw. 28. BImSchV (Verordnung über Emissionsgrenzwerte für Verbrennungsmotoren)
- EU-Richtlinie 2000/25/EG, Maßnahmen bei land- u. forstwirtschaftl. Zugmaschinen
- Energieeinsparverordnung (EnEV) 2002

Im Folgenden werden die Vorgehensweisen zur Ermittlung von Trendannahmen in den einzelnen Sektoren skizziert. Die verwendeten Trendfaktoren sind in Tabelle 7-11 im Anhang zusammengefasst wiedergegeben.

Im Sektor Verkehr ergeben sich Minderungen der Emissionen vor allem infolge der Richtlinie 98/69/EG. Durch die Einführung der EURO 3- und EURO 4-Normen sind für

neue Dieselfahrzeuge nochmals deutliche Minderungen zu erwarten. Gegenüber EURO 2 wird der Partikelgrenzwert bis 2005 für PKW/LNF um ca. 75 % und für schwere Nutzfahrzeuge um über 85 % reduziert. Auch von der Begrenzung des Schwefelgehalts von Kraftstoffen durch die EU Richtlinie 98/70/EG können Auswirkungen abgeleitet werden. Im Jahr 1998 lag der Schwefelgehalt von Benzin bei etwa 60 bis 290 ppm, von Diesel bei etwa 350 ppm (TAXI, 1999). Infolge des europäischen Autoöl-Programms wurde der Schwefelgehalt europaweit für Otto- und Dieselmotoren ab 2005 auf max. 50 ppm festgelegt. Ab 2009 sollen alle Kraftstoffe schwefelfrei (< 10 ppm S) sein. Schon seit Anfang 2003 sind schwefelfreie Kraftstoffe in Deutschland flächendeckend verfügbar. Die Reduktion des Schwefelgehalts von 350 auf 10 ppm mindert die emittierte Partikelmasse aus derzeitigen Diesel-PKW um etwa 7 % (ADAC, 2001). Eine Übertragung der Anforderungen im Straßenverkehr auf die sonstigen Fahrzeuge wird diskutiert, konnte aber bislang nicht durchgesetzt werden.

Aus dem Handbuch der Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (UBA, 1999a) können für die Dieselmotoren im Straßenverkehr auf Fahrzeugkategorien bezogene Trendfaktoren für die Emissionsfaktoren abgeleitet werden. Mögliche Verbesserungen durch die Berücksichtigung der Einführung schwefelfreier Kraftstoffe und des wachsenden Bestandes an Fahrzeugen mit Partikelfilter, die in einer zukünftigen neuen Version des Handbuchs erfolgen sollen, können hier noch nicht eingearbeitet werden. Für den Kaltstart werden Faktoren aus den Annahmen zu Veränderungen bei den Kraftstoffqualitäten aus (IFEU, 1999) abgeleitet. Bei Reifen-, Bremsenabrieb und der Aufwirbelung von Straßenstaub wird keine Änderung der spezifischen Emissionen, d. h. ein Trendfaktor von 1,0 angenommen. Für PKW und LNF mit Ottomotor und Katalysator werden Minderungen infolge emissionsärmerer neuer Motoren im Fahrzeugbestand angenommen. Dies insbesondere aufgrund der Anforderungen der EURO-Normen bezüglich Kohlenwasserstoffe und Kohlenmonoxid und eines geringeren Kraftstoffverbrauchs, was sich auch auf die Partikelemissionen auswirkt. Bei Krafträdern sieht die EU-Richtlinie 2002/51/EG bzw. 97/24/EG verschärfte Grenzwerte zunächst ebenfalls für den Kraftstoffverbrauch, Kohlenwasserstoffe und Kohlenmonoxid vor. Voraussichtlich ab 2006 werden auch Partikelgrenzwerte für Neufahrzeuge eingeführt.

Bei den Dieselmotoren im Bahn- und Schiffsverkehr sind die durchschnittlichen Lebensdauern relativ hoch, die Einführung neuer Technologien verläuft entsprechend langsam. Bei den Dieselloks werden ständig Umrüstungen und Modernisierungen vorgenommen, die seit 1998 zu einer Minderung der Partikelemissionen um über 30 % geführt haben (DB, 2001). Der Schwefelgehalt des eingesetzten Diesels ist im Jahr 2002 auf



50 ppm reduziert worden. Auch für den im Schiffsverkehr eingesetzten Diesel sind geringere Schwefelgehalte zu erwarten. Für die Projektion werden Trendfaktoren für den Schiffs- und Flugverkehr aus (IFEU, 1999) verwendet.

Änderungen der Emissionsfaktoren von sonstigen Fahrzeugen und mobilen Geräten ergeben sich insbesondere durch zukünftige Emissionsgrenzwerte für neue Dieselmotoren, den Austausch von Altfahrzeugen und die Verminderung des Schwefelgehalts beim Diesel. Strengere Grenzwerte werden für die mobilen Maschinen und Geräte in der Richtlinie 97/68/EG und speziell für land- und forstwirtschaftliche Zugmaschinen in der Richtlinie 2000/25/EG in mehreren Stufen eingeführt. Dadurch sind bis zum Jahr 2010 in Abhängigkeit von der durchschnittlichen Lebensdauer auch hier deutliche Emissionsminderungen zu erwarten.

Bei den genehmigungsbedürftigen Feuerungsanlagen (Obergruppe 01 der 4. BImSchV, Wärmeerzeugung, Bergbau, Energie) sind Änderungen der spezifischen Emissionen infolge von Brennstoffsubstitutionen bereits in der Projektion der Aktivitäten (Einsatzmengen unterschiedlicher Brennstoffarten) berücksichtigt. Des Weiteren sind Auswirkungen durch die Installation von Neuanlagen und neue Emissionsgrenzwerte der novellierten 13. BImSchV und TA Luft zu berücksichtigen. Die Abschätzung der Auswirkung strengerer Emissionsgrenzwerte wird ausgehend von Angaben zur jahresmittleren Abgaskonzentration aus den Emissionserklärungen vorgenommen. Auch eine Verminderung des Schwefelgehalts eingesetzter Heizöle ist aufgrund der EU-Richtlinie 99/32/EG zu erwarten. Da bei den Großfeuerungen effektive Abgasreinigungen bestehen, ist bis zum Jahr 2010 hier nicht mit einem bedeutenden Emissionsrückgang zu rechnen. Die Trendfaktoren werden für einzelne Brennstoffe gebildet und zugeordnet.

Für die Vielzahl unterschiedlicher genehmigungsbedürftiger Produktionsprozesse werden Trends bei den spezifischen Emissionen ebenfalls primär ausgehend von einer Abschätzung der Auswirkung neuer Emissionsgrenzwerte der TA Luft auf Basis der Konzentrationsangaben in den Emissionserklärungen angesetzt. Da allerdings nur teilweise Konzentrationsangaben zu einzelnen Quellen verfügbar sind, ist die Aussagekraft der Betrachtungen eingeschränkt und können oftmals nur Annahmen zum Ersatz von Alt- durch Neuanlagen getroffen und berücksichtigt werden. Zum Teil liegen die angegebenen Konzentrationen so niedrig, dass sich durch die verschärften Grenzwerte keine Auswirkungen auf die Emissionen ergeben. Beim Umschlag wird angenommen, dass technische Verbesserungen und Veränderungen in der Ausführung der Be- und Entladevorgänge, wie z. B. die Verminderung der Fallhöhen von Gütern, entsprechend

der Anforderungen der TA Luft so umgesetzt werden, dass bis 2010 eine Reduzierung der spezifischen Emissionen um 30 % erzielt wird.

Auch bei den nicht genehmigungsbedürftigen Feuerungsanlagen werden Änderungen der spezifischen Emissionen infolge von Brennstoffsubstitutionen im Rahmen der Trendprojektion der brennstoffspezifischen Aktivitäten bereits berücksichtigt. Die novellierte Kleinf Feuerungsanlagenverordnung (1. BImSchV) legt leistungsabhängige Abgasverlustgrenzwerte für bestehende und neue öl- und gasgefeuerte Kleinf Feuerungsanlagen fest. Aufgrund dessen muss bis 2004 ein Teil des Altanlagenbestands durch neue Geräte ersetzt werden. Zudem verlangt die Energieeinsparverordnung (EnEV) den Austausch von veralteten Anlagen im Leistungsbereich von 4 bis 400 kW. Auch bei anderen Feuerungsanlagen sind Reduktionen aufgrund einer verbesserten Verbrennungstechnik zu erwarten. Geringere spezifische Emissionen können für Heizöl auch aufgrund der Minderung des Schwefelgehalts nach der EU-Richtlinie 99/32/EG angenommen werden. Zur Darstellung der Veränderungen bei den spezifischen Emissionen werden Trendfaktoren aus (PFEIFFER et al., 2000) abgeleitet. Für die Holzfeuerungen wird korrigierend angenommen, dass der projizierte starke Anstieg des Holzeinsatzes vor allem in Neuanlagen mit deutlich niedrigeren spezifischen Emissionen erfolgt. Für die Ölfeuerungen werden zudem niedrigere Trendfaktoren durch den Ersatz von Altanlagen im Leistungsbereich von 4 bis 400 kW aufgrund der Anforderungen der Energieeinsparverordnung (EnEV) angenommen.

Bei den sonstigen Prozessen werden nur beim Umschlag staubender Güter Veränderungen der spezifischen Emissionen berücksichtigt. Hier werden aufgrund von Bestrebungen zur lokalen Emissionsminderung und zum Arbeitsschutz durch verbesserte Fördertechniken, fördertechnische Hilfsmittel und Anleitungen zur Staubreduzierung im Umschlagbetrieb Emissionsminderungen von 10 % angenommen.

## 3.2 Ergebnisse des Trendszenarios für das Jahr 2010

### 3.2.1 Gesamtsituation in Baden-Württemberg

In den Abbildungen 3-1 und 3-2 sind die Veränderungen bei den Quellgruppen beispielhaft für  $PM_{10}$  sowohl prozentual als auch absolut wiedergegeben. In diesen Darstellungen ist auch die Aufwirbelung von Straßenstaub mit aufgeführt. Wesentlich geringere Emissionen im Jahr 2010 ergeben sich bei den Dieselmotoren im Straßenverkehr wegen der europaweiten neuen Abgasgrenzwerte. Aufgrund der Zunahme der Fahrleistungen resultiert bei den Abriebprozessen und der Aufwirbelung von Straßenstaub eine Zunahme der Emissionen. Reduktionen sind auch bei den Abgasemissionen der Ottomotoren, des sonstigen Verkehrs und der sonstigen Fahrzeuge aufgrund eines Rückgangs der spezifischen Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs zu erwarten. Abnehmende Emissionen bei den genehmigungsbedürftigen Anlagen resultieren vor allem aus strengeren Emissionsgrenzwerten und Neuanlagen als Ersatz für Altanlagen. Bei Kleinf Feuerungen führen Brennstoffsubstitutionen und die Implementierung von neuen Feuerungsanlagen zu geringeren Emissionen.

Insgesamt ergibt sich für Baden-Württemberg eine Emissionsreduktion für Gesamtstaub um etwa 16 %, für  $PM_{10}$  um etwa 27 % und für  $PM_{2,5}$  um 33 % gegenüber 1998, sofern die Staubaufwirbelung des Verkehrs unberücksichtigt bleibt. Wird dieser Prozess mit eingerechnet, ergibt sich eine Abnahme der Emissionen für Gesamtstaub um 6 %, für  $PM_{10}$  um 16 % und für  $PM_{2,5}$  um 28 %.

In Tabelle 3-1 sind die Ergebnisse der Projektion summarisch wiedergegeben (mit separater Darstellung der Staubaufwirbelung im Verkehr). Die letzte Spalte gibt beispielhaft die Trendfaktoren für die  $PM_{10}$ -Emissionen wieder. Es wird deutlich, dass auch im Jahr 2010 die Dieselmotoren sowohl des Straßenverkehrs als auch sonstiger Fahrzeuge und die genehmigungsbedürftigen Anlagen bedeutende Emissionen verursachen.

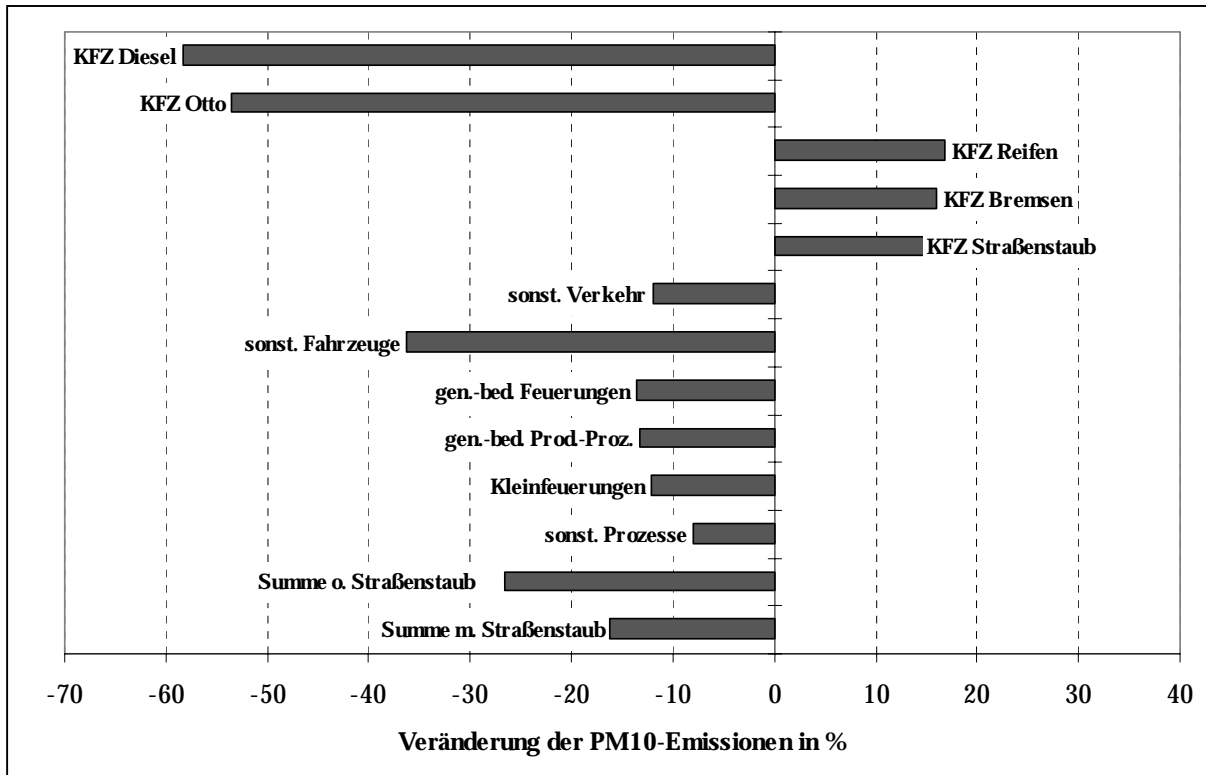


Abb. 3-1: Ergebnisse der Trendprojektion – prozentuale Veränderung der PM<sub>10</sub>-Emissionen in Baden-Württemberg bis zum Jahr 2010

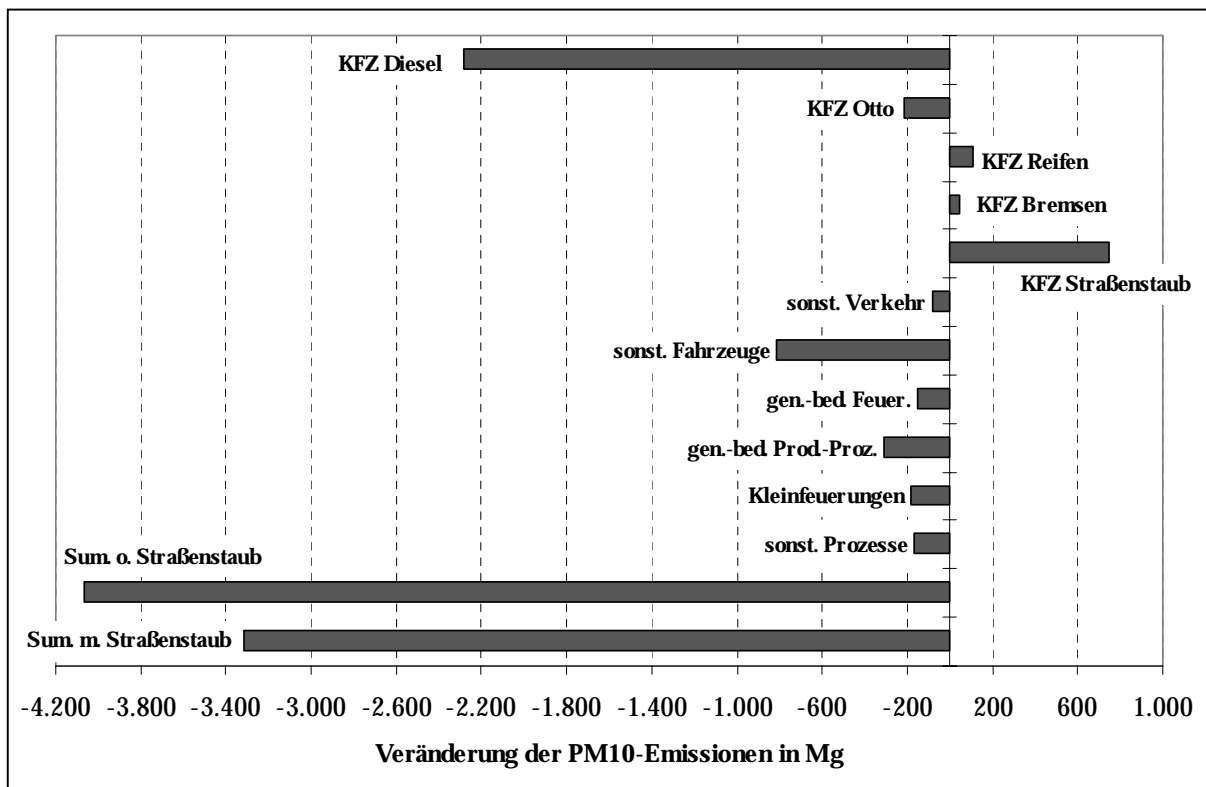


Abb. 3-2: Ergebnisse der Trendprojektion – absolute Veränderung der PM<sub>10</sub>-Emissionen in Baden-Württemberg bis zum Jahr 2010

Tab. 3-1: Ergebnisse der Projektion - PM, PM<sub>10</sub> und PM<sub>2,5</sub>-Emissionen in Baden-Württemberg im Jahr 2010

Quellgruppe	PM in Mg	PM <sub>10</sub> in Mg	PM <sub>2,5</sub> in Mg	Faktor PM <sub>10</sub> 2010/1998
KFZ Dieselmotoren	1.645	1.635	1.564	0,42
KFZ Ottomotoren	205	189	176	0,46
KFZ Reifenabrieb	6.363	756	38	1,17
KFZ Bremsenabrieb	357	307	225	1,16
Sonstiger Verkehr	1.140	605	408	0,88
Sonstige Fahrzeuge und mobile Geräte	1.964	1.429	1.301	0,64
Genehmigungsbedürftige Feuerungsanlagen	1.233	867	682	0,85
Genehmigungsbedürftige Prozesse	3.692	2.029	1.154	0,87
Kleinfeuerungen Haushalte	961	927	871	0,88
Kleinfeuerungen Kleinverbraucher/Industrie	449	413	339	0,87
Sonstige nicht gen.-bed. Prozesse	3.954	2.129	696	0,93
<b>Summe (ohne Staubaufwirbelung)</b>	<b>21.557</b>	<b>11.228</b>	<b>7.436</b>	<b>0,73</b>
KFZ Aufwirbelung von Straßenstaub	12.864	5.740	1.445	1,15
Sonst. Verkehr, sonst Fzg. Staubaufwirbelung	404	58	17	0,94

### 3.2.2 Sektorübergreifende Darstellung der relevanten Quellgruppen 2010

Tabelle 3-2 gibt analog Tabelle 2-20 die für die Feinstaubemissionen in Baden-Württemberg bedeutendsten 35 Quellgruppen anhand ihrer PM<sub>2,5</sub>-Emissionen geordnet sektorübergreifend wieder. Die Aufwirbelung von Straßenstaub ist hier wiederum nicht mit berücksichtigt. Diese Quellgruppen verursachen etwa 87 % der gesamten anthropogenen PM<sub>2,5</sub>-Emissionen, 76 % der PM<sub>10</sub>-Emissionen und nur 54 % der Gesamtstaubemissionen im Jahr 2010 (ohne Staubaufwirbelung im Verkehr). Die Feinstaubanteile liegen im Mittel bei 74 % PM<sub>10</sub> und 56 % PM<sub>2,5</sub>. Die stationären Quellgruppen sind gegenüber dem Verkehr bedeutender geworden, die Dieselmotoren des Verkehrs bleiben aber relevant für die Emissionssituation in Baden-Württemberg. Bei den relevantesten Quellgruppen hat sich gegenüber 1998 nur die Emissionshöhe geändert. Nur wenige neue Quellgruppen sind gegenüber 1998 in diese sektorübergreifende Liste am unteren Ende dazu gekommen. Die Bedeutung der schweren Nutzfahrzeuge bei den Dieselmotoremissionen des Straßenverkehrs wird deutlich kleiner. Während der Anteil dieser Fahrzeuge an den Emissionen im Jahr 1998 bei über 60 % lag, werden im Jahr 2010 nur noch etwa 36 % der Dieselmotoremissionen im Straßenverkehr durch Busse, LKW und Sattelzüge verursacht. Auch wird die Bedeutung des sonstigen Verkehrs und sonstiger Fahrzeuge gegenüber dem Straßenverkehr deutlich zunehmen.

Tab. 3-2: Relevante Quellgruppen bezüglich PM<sub>2,5</sub> in Baden-Württemberg 2010

Quellgruppe	PM Mg	PM <sub>10</sub> Mg	PM <sub>2,5</sub> Mg
KFZ Dieselmotoren, PKW	906	900	861
Kleinf Feuerungen Haushalte, Brennholz	709	697	664
Sonstige Fahrzeuge Landwirtschaft, Dieselmotoren	636	605	573
Feuerungen Kraftwerke, Steinkohle	849	570	453
Sonstige Fahrzeuge Baumaschinen, Dieselmotoren	416	395	374
Brechen, Mahlen, Klassieren von Gestein	1.625	632	280
KFZ Dieselmotoren, LKW mit Anhänger	258	257	245
Feuerwerke	372	335	223
Kleinf Feuerungen Kleinverbraucher, Holz	223	207	179
Zementherstellung	416	304	175
Rauchen von Tabak	173	173	173
KFZ Bremsenabrieb, PKW	274	235	172
Schiffsverkehr Dieselmotoren	201	181	171
KFZ Dieselmotoren, LKW ohne Anhänger	170	169	162
Kleinf Feuerungen Haushalte, Heizöl EL	167	167	157
Sonstige Fahrzeuge Industrie, Dieselmotoren	169	160	152
KFZ Ottomotoren, PKW mit gKat	164	149	141
Feuerungen Industrie, Holz	247	183	139
Sonstige Fahrzeuge Militär, Dieselmotoren	126	119	113
KFZ Dieselmotoren Kaltstart, PKW, LNF	114	113	108
Tierhaltung Schweine	1.037	467	83
Bahnverkehr Abgasemission, Dieseltraktion	95	85	81
Kleinf Feuerungen Kleinverbraucher, Heizöl EL	104	104	80
Verarbeitung von Erdöl, Erdölzerzeugnissen	158	95	76
Eisen-, Stahlgießereien	147	121	75
KFZ Dieselmotoren, LNF	75	75	72
Bahnverkehr Bremsenabrieb	428	138	64
KFZ Dieselmotoren, Sattelzüge	64	64	61
Räucheranlagen für Fleisch oder Fisch	66	63	60
Tierhaltung Rinder	577	260	58
KFZ Dieselmotoren, Bus	57	56	54
Schreinereien	347	278	49
Lackier-/Trocknungsanlagen	84	60	47
Kleinf Feuerungen Industrie, Holz	54	50	43
KFZ Bremsenabrieb, SNF	63	54	39
<b>Summe relevante Prozesse in Mg</b>	<b>11.570</b>	<b>8.520</b>	<b>6.459</b>

## 4 Betrachtung möglicher Minderungsmaßnahmen

Die emissionsseitigen Bestimmungen des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, dessen Verordnungen und der TA Luft waren bislang und sind auch zukünftig auf Gesamtstaub bezogen. In vielen Bereichen konnte in den letzten Jahrzehnten bezüglich der emittierten Gesamtstaubmassen ein hohes Minderungsniveau erreicht werden. Die in den letzten Jahren epidemiologisch festgestellte wirkungsseitige Relevanz ergibt sich jedoch für Feinstäube, die in die Lunge gelangen können, wobei die eigentlichen toxikologischen Wirkungsmechanismen noch nicht geklärt sind. Die folgenden Betrachtungen werden deshalb für  $PM_{10}$  und insbesondere  $PM_{2,5}$  vorgenommen. Da die Wirkungsforschung verstärkt Partikel im Nanometerbereich und insbesondere ultrafeine Partikel  $< 0,1 \mu\text{m}$  mit den gesundheitlichen Effekten in Zusammenhang bringt, sollten Maßnahmen auch geeignet sein, diese Partikelfraktionen wesentlich zu mindern.

In diesem Abschnitt werden Informationen zur Wirksamkeit möglicher Maßnahmen zusammengestellt und weitergehende technische Minderungspotenziale bei relevanten Quellgruppen abgeschätzt. Zur Umsetzung technischer Minderungspotenziale sind in der Regel lenkende Maßnahmen erforderlich, die z. B. den Ersatz alter Technologien beschleunigen oder eine Maßnahmenimplementierung durch Grenzwerte oder andere Instrumente fordern. Eine Betrachtung und Beurteilung solcher Maßnahmen und ihrer Auswirkungen, die von politischen Entscheidungen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen abhängen, ist nicht Gegenstand dieser Studie.

### 4.1 Darstellung technischer Maßnahmen und ihrer Wirksamkeit

Zunächst erfolgt die Zusammenstellung technischer primärer und sekundärer Minderungsoptionen und die Darstellung ihrer Wirksamkeit. Als Informationsquellen werden Angaben aus der Literatur und Expertenbefragungen (z. B. Hersteller von Abgasreinigungssystemen) genutzt. Hierbei kann nicht auf alle möglichen technischen Varianten der Optionen eingegangen werden. Vielmehr wird versucht, die Wirksamkeit verschiedener Typen von Abgasreinigungen oder Maßnahmen zur Emissionsprävention und die mittelfristige Umsetzbarkeit unter Berücksichtigung der Bedeutung der entsprechenden Quellgruppen für die Emissionssituation im Jahr 2010 zu skizzieren. Die Abgasemissionen des Verkehrs werden vor allem durch Dieselmotoren verursacht, weshalb bei der Betrachtung der mobilen Quellen hier der Schwerpunkt gelegt wird.

#### 4.1.1 Mobile Quellen - primäre Maßnahmen

Eine Modifizierung oder Substitution von Einsatzstoffen oder Technologien kann Emissionsminderungen vor allem bei der Entwicklung neuer Fahrzeuge, teilweise auch bei Altfahrzeugen erreichen. Bedeutende Emissionsminderungen sind hier bereits in den letzten Jahren aufgrund europaweiter Grenzwerte erreicht worden.

Ergebnisse von Emissionsmessungen an Dieselmotoren zeigen, dass sowohl motorische Maßnahmen als auch Modifizierungen des Dieselkraftstoffs Minderungen der Partikelmasse bewirken, hinsichtlich der emittierten Partikelanzahl in Abhängigkeit von Betriebsbedingungen und der technologischen Konzeption aber keine eindeutig positive Wirkung nachgewiesen werden kann (s. z. B. MAYER et al., 2000; ANDERSSON & WEDEKIND, 2001). Für Dieselmotoren im Straßenverkehr ist zudem zu erwarten, dass bis zum Jahr 2010 primäre Maßnahmen, wie das elektronische Motormanagement, die Hochdruckeinspritzung oder Mehrventilmotoren, zum Erreichen der EURO-Normen und auch zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs weitgehend umgesetzt sein werden und keine bedeutenden weitergehenden Minderungspotenziale mehr besitzen. Modifizierungen der Kraftstoffe durch Minderung des Schwefel- oder Aromatengehalts, die Zugabe von Additiven, Glykolether oder Wasser bzw. die Verwendung von Diesel-Wasser-Emulsionen haben eine relativ geringe Wirksamkeit (s. Abb. 4-1). Bis zum Jahr 2009 werden alle Kraftstoffe im Straßenverkehr ohnehin schwefelfrei (< 10 ppm S) sein. Die Situation entwickelt sich bei den sonstigen Fahrzeugen ähnlich, wenn auch deutlich langsamer, so dass auch hier keine bedeutenden weitergehenden Minderungspotenziale durch Modifizierungen bis zum Jahr 2010 erwartet werden.

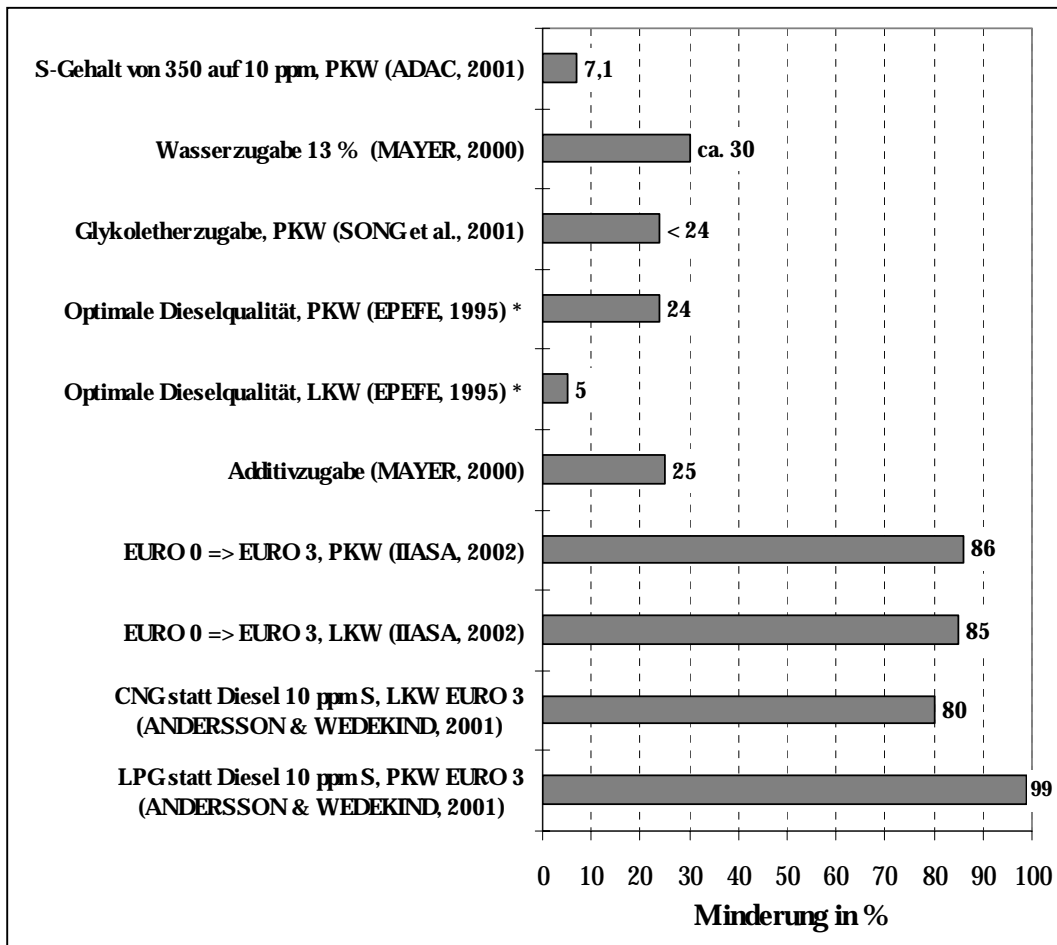
Alternative Kraftstoffe und Antriebssysteme haben langfristig ein großes Potenzial, werden aber bis zum Jahr 2010 zumeist keine große Rolle spielen, da entweder die Serienreife noch nicht erreicht ist oder keine ausreichend günstigen marktwirtschaftlichen Bedingungen zu erwarten sind. Die Substitution von Dieselkraftstoff durch Flüssiggas (LPG, LNG), komprimiertes Erdgas (CNG), Wasserstoff, Alkohole, Dimethylether (DME), Rapsölmethylester (RME) oder zum Teil auch Mischungen mit Diesel liefert teilweise eine deutliche Minderung der direkt emittierten Partikelmassen. Zumeist sind beim Einsatz dieser Kraftstoffe andere negative Umwelteffekte abzuwägen oder technische Maßnahmen zur Umstellung der Motoren bzw. der Einsatz von entsprechend geeigneten Motoren erforderlich. Emissionsminderungen können vor allem mit Gasmotoren erzielt werden. Wie sich alternative Kraftstoffe auf die Emissionen von Nanopartikeln auswirken ist noch nicht ausreichend untersucht worden (MAYER, 1998). Für Erdgasfahrzeuge ist in Untersuchungen von (ANDERSSON & WEDEKIND, 2001)



gegenüber Dieselfahrzeugen eine deutlich niedrigere Partikelanzahl im Abgas gemessen worden. Im Zeitraum bis 2010 ist für Erdgas- als Ersatz für Dieselfahrzeuge das größte Minderungspotenzial denkbar, da sowohl Serienfahrzeuge auf dem Markt als auch finanzielle Anreize durch geringe Kraftstoffkosten gegeben sind. Hier gibt es zwei Konzepte, zum einen den stöchiometrischen Betrieb mit Dreiwegekatalysator, der oft auch den Benzinbetrieb ermöglicht (Bifuel), oder das Magerkonzept mit Oxidationskatalysator. Derzeit können nur Ottomotoren zu Erdgasmotoren umgerüstet werden. Bifuel-Motoren sind meist für den Benzinbetrieb optimiert. Das Erdgastankstellennetz wird derzeit aufgrund einer Initiative der Gaswirtschaft stark ausgebaut, da bis 2006 eine flächendeckende Versorgung für die Gasnutzung im Straßenverkehr erreicht werden soll. Von 1999 bis April 2003 ist die Zahl der Erdgastankstellen in Deutschland von 110 auf 337 gestiegen. Baden-Württemberg hatte im Jahr 2002 mit 36 Anlagen das dichteste Tankstellennetz, derzeit (Stand April 2003) sind ca. 43 Tankstellen installiert (s. <http://www.erdgasfahrzeuge.de>). Aspekte der Erdgasnutzung sind zum Beispiel für Busse von DRECHSLER et al. (2000) dargestellt worden.

Alternative Antriebskonzepte der Zukunft stellen u. a. Brennstoffzellen-, Elektro- und Wasserstofffahrzeuge dar. Zu den Potenzialen dieser Technologien ist zahlreiche Literatur veröffentlicht worden. Insbesondere der Brennstoffzelle werden langfristig große Entwicklungspotenziale zugesprochen. Es wird erwartet, dass bis zum Jahr 2010 die ersten serienreifen Fahrzeuge auf dem Markt sind (WIEDMANN et al., 2000). Allerdings ist nicht abzusehen, ob ausreichend günstige steuergesetzliche und marktwirtschaftliche Bedingungen geschaffen und wettbewerbsfähige Fahrzeuge entwickelt werden können, damit sich alternative Konzepte in der Praxis dauerhaft durchsetzen. Umfangreiche Untersuchungen zu Alternativen im Straßenverkehr unter Berücksichtigung der vor- und nachgelagerten Prozesse und der Energieträgerbereitstellung sind z. B. in (KRÜGER, 2002) vorgenommen worden. Dort wird für alternative Antriebskonzepte erst etwa ab dem Jahr 2020 eine bedeutende Rolle im Straßenverkehr gesehen.

In Abbildung 4-1 ist die Wirksamkeit verschiedener primärer Maßnahmen dargestellt. Die Abbildung zeigt die relativ geringe Wirksamkeit von Kraftstoffmodifizierungen und die erheblichen Minderungen durch technologische Weiterentwicklungen in den letzten Jahren, die vor allem durch die EURO-Normen angeregt worden sind. Mit EURO 4 werden die Grenzwerte gegenüber EURO 3 nochmals um bis zu 50 % für PKW/LNF und 80 % für LKW herabgesetzt. Der Einsatz von Gasmotoren bei Nutzfahrzeugen und PKW ist sehr wirksam und ermöglicht eine deutliche Minderung der Partikelemissionen gegenüber EURO 3-Dieselmotoren.



\* Optimale gegenüber ungünstigster Kombination von Dichte, Aromatenanteil, Cetanzahl und T95

Abb. 4-1: Wirksamkeit primärer Maßnahmen bei Dieselmotoren im Straßenverkehr (ausgewählte Angaben aus verschiedenen Datenquellen)

Zu möglichen Minderungsmaßnahmen für Partikelemissionen durch mechanische Prozesse im Straßenverkehr gibt es nur wenige Informationen. Reifenabrieb verursacht nur in geringem Maße Feinstäube, im Gegensatz zum Bremsenabrieb. Eventuell eine Möglichkeit zur Minderung des Bremsenabriebs stellt der Einsatz von geschlossenen Bremssystemen für Neufahrzeuge, z. B. basierend auf der Technik der Trommelbremse dar. Allerdings sind hier keine neueren Entwicklungen mit dieser Zielsetzung bekannt. Der Einsatz von Trommelbremsen ist aufgrund der gegenüber Scheibenbremsen schlechteren Bremseigenschaften rückläufig. Eine Minderung der Aufwirbelung von Straßenstaub ist durch die Intensivierung der Straßenreinigung denkbar. Untersuchungen von FITZ (1998) zeigen, dass eine Straßenreinigung die Staubbelastung nur bei einer Erstreinigung von gewöhnlich nicht gereinigten Straßen und bei wenig befahrenen Straßen innerorts wirksam mindert. Bei viel befahrenen Hauptverkehrsstraßen konnte kein anhaltend positiver Effekt durch die Straßenreinigung festgestellt werden,

weshalb FITZ zur Erkenntnis kommt, dass die Straßenreinigung keine wirksame Maßnahme zur Minderung der  $PM_{10}$ -Emissionen darstellt. Andererseits bleibt zu untersuchen, inwieweit die Straßenreinigung selbst Emissionen verursacht und die Ausrüstung der Reinigungsfahrzeuge mit besseren Filtersystemen Emissionen mindern kann. Des Weiteren ist eine Minderung des Straßenabriebs über die zukünftige Verwendung von abriebbeständigeren Straßenbelägen denkbar. Zur Wirksamkeit dieser Maßnahme liegen keine Informationen vor.

#### **4.1.2 Mobile Quellen - sekundäre Maßnahmen**

Bei Dieselfahrzeugen stellen Katalysatoren und Partikelfilter sekundäre Minderungsoptionen dar. Oxidationskatalysatoren sind bei neuen Diesel-PKW mittlerweile Standard, erreichen aber nur eine geringe Wirksamkeit, da sie lediglich die organischen Partikelbestandteile und nicht die festen Rußpartikel oxidieren. Hinsichtlich der Partikelanzahl werden sie als wenig wirksam beschrieben (MAYER et al., 2000). Zahlreiche Untersuchungen haben gezeigt, dass Partikelfilter eine sehr effiziente und in der Praxis bewährte Lösung zur Minderung sowohl der Partikelmasse als auch der Partikelanzahl aus Dieselmotoren darstellen. Als eine Alternative zumindest für das Erreichen der EURO 4- und bei schweren Nutzfahrzeugen auch der EURO 5-Anforderungen wird der verbrennungsoptimierte, überstöchiometrische Motorbetrieb in Kombination mit einem SCR-System oder einem anderen Verfahren der Stickoxidminderung, wie DeNO<sub>x</sub>-Katalysator oder NO<sub>x</sub>-Absorber diskutiert. Diese Lösungen sind interessant aufgrund der zukünftig strengen Anforderungen an die NO<sub>x</sub>-Emissionen, haben jedoch eine gegenüber Partikelfiltern deutlich geringere Wirksamkeit bezüglich der Partikelemission.

Seit dem Jahr 2000 sind Dieselpartikelfiltersysteme bei den ersten PKW serienmäßig eingebaut und mittlerweile bei über 400.000 Fahrzeugen in Europa im Einsatz. Auch zahlreiche schwere Nutzfahrzeuge, insbesondere Busse im Linienverkehr, aber auch Gabelstapler und Baumaschinen, wurden in den letzten Jahren mit unterschiedlichen Systemen nachgerüstet. Neue schwere Nutzfahrzeuge im Straßenverkehr werden nach derzeitigem und voraussichtlichem Stand der Technik ohne Partikelfilter die ab 2005 geltenden EURO 4-Grenzwerte nicht erreichen.

In Abbildung 4-2 sind beispielhaft Angaben zur Wirksamkeit von sekundären Maßnahmen bezogen auf Dieselmotoren in EURO 2-Fahrzeugen wiedergegeben. Die dargestellten Maßnahmen für PKW und schwere Nutzfahrzeuge (SNF) umfassen Diesel-

Oxidationskatalysatoren (DOC), Dieselpartikelfiltersysteme (DPF) unterschiedlicher Hersteller und die Verbrennungsoptimierung in Kombination mit einer selektiven katalytischen Reduktion (SCR) als Entstickungsmaßnahme. Die Angaben für die SNF-Partikelfilter (CRT und DPX) sind Mindestwerte, wobei sich die EPA-Prüfung auf die Nachrüstung aller derzeitigen Motortechnologien (schwere Nutzfahrzeuge im Straßenverkehr und sonstige Fahrzeuge), die CARB-Prüfung nur auf bestimmte getestete Motoren mit einem Baujahr nach 1994 bezieht (EPA, 2001; CARB, 2002). Die dargestellten Optionen sind prinzipiell auch für Dieselmotoren im Bahn- und Schiffsverkehr und bei sonstigen Fahrzeugen und mobilen Geräten einsetzbar. Insbesondere beim Schiffsverkehr ist hierzu allerdings eine starke Reduzierung des Schwefelgehalts im Dieselmotorkraftstoff Voraussetzung.

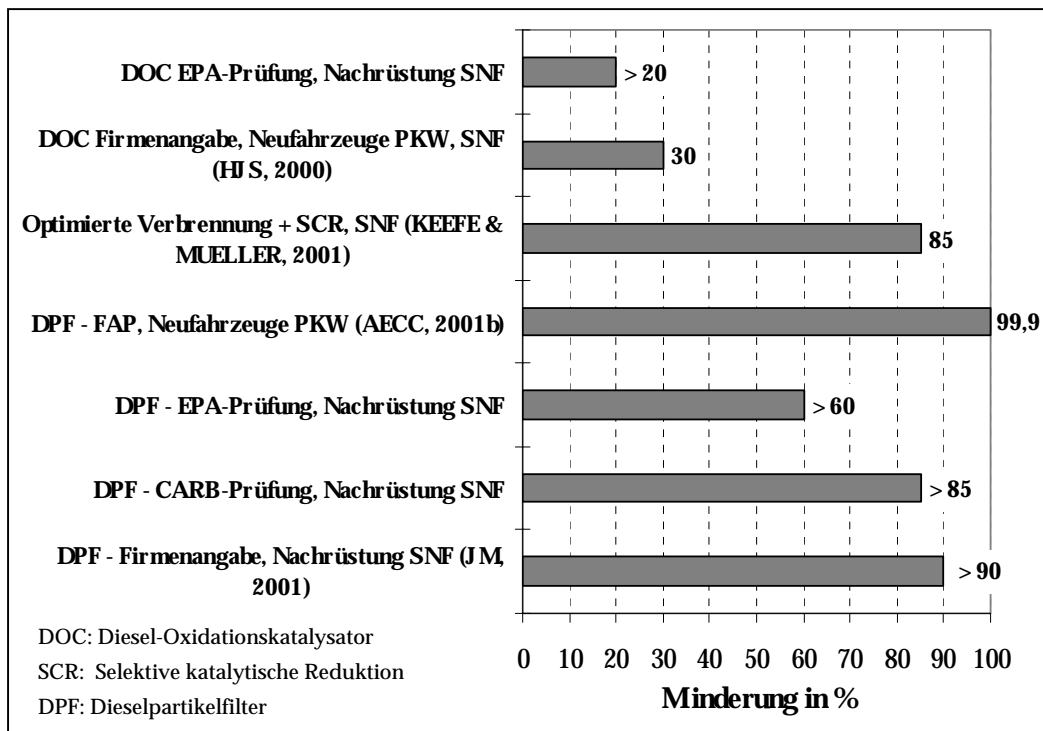


Abb. 4-2: Minderungsraten von sekundären Maßnahmen bezüglich EURO 2-Dieselmotoren (ausgewählte Angaben aus verschiedenen Datenquellen)

### 4.1.3 Stationäre Quellen - primäre Maßnahmen

Die Substitution von technologischen Verfahren bei stationären Quellen - d. h. von Anlagentypen und Verfahrensarten - kann im Rahmen eines solchen Projekts nur sehr eingeschränkt betrachtet werden. Bis zum Jahr 2010 werden sich Minderungen durch Modernisierungen im Bereich der Feuerungs- und Produktionsanlagen ergeben, die in der Projektion mit berücksichtigt sind. Hier spielen die Altersstruktur und Lebensdauer der Anlagen und der jeweilige Stand der Technik eine Rolle. Einer Beschleunigung des Technologieersatzes durch politische Weichenstellungen bzw. gesetzliche Instrumente des Umweltschutzes sind aufgrund ökonomischer Zwänge Grenzen gesetzt. Für den Zeitraum bis zum Jahr 2010 ist hierdurch insgesamt nur ein relativ geringes Minderungspotenzial zu erwarten. Die Emissionen von Industrieanlagen sind zudem zumeist durch die Wirksamkeit der Abgasreinigung bedingt, die bei Anlagen mit geringeren Prozessemissionen bzw. Rohgaskonzentrationen in der Regel entsprechend kleiner dimensioniert wird. Interessant sind technologische Weiterentwicklungen insbesondere bei den nicht genehmigungsbedürftigen Holzfeuerungen, die einen steigenden Anteil bei den Kleinf Feuerungen besitzen. Hier können Anforderungen an Neuanlagen bezüglich der Partikelemissionen den Einsatz verbesserter Feuerungstechnologien bewirken. So verursachen nach PFEIFFER et al. (2000) handbeschickte Holzfeuerungen dem Stand der Technik entsprechend weniger als 50 % der derzeitigen mittleren spezifischen Emissionen bei Holzfeuerungen. Holzpelletsheizungen können bis zu 70 % Emissionsminderung gegenüber dem derzeitigen Stand bringen. Eine wirksame Maßnahme sind auch Heizanlagen im Nahwärmeverbund, die mit einer Abgasreinigung ausgestattet werden können und zahlreiche Haushaltsfeuerungen ersetzen.

Auch die Substitution von festen Brennstoffen insbesondere durch Gase ist eine wirksame Maßnahme und bedeutet weitaus geringere Emissionen auf der Rohgasseite. Beschränkungen ergeben sich auch hier durch wirtschaftliche Aspekte, die Altersstruktur und Lebensdauer der Anlagen, da eine Brennstoffsubstitution in der Regel eine Substitution der Feuerungsanlage bedeutet. Die Maßnahme kann aber Bestandteil einer langfristigen Minderungsstrategie sein. Eine hohe Wirksamkeit ergibt sich vor allem bei älteren Anlagen mit gering wirksamer Abgasreinigung und bei den Kleinf Feuerungen, die zumeist keine Abgasreinigung besitzen. In der Abbildung 4-3 sind Angaben zu Emissionsminderungen dargestellt, die aus Emissionsfaktoren für verschiedene Feuerungsanlagen abgeleitet werden können.

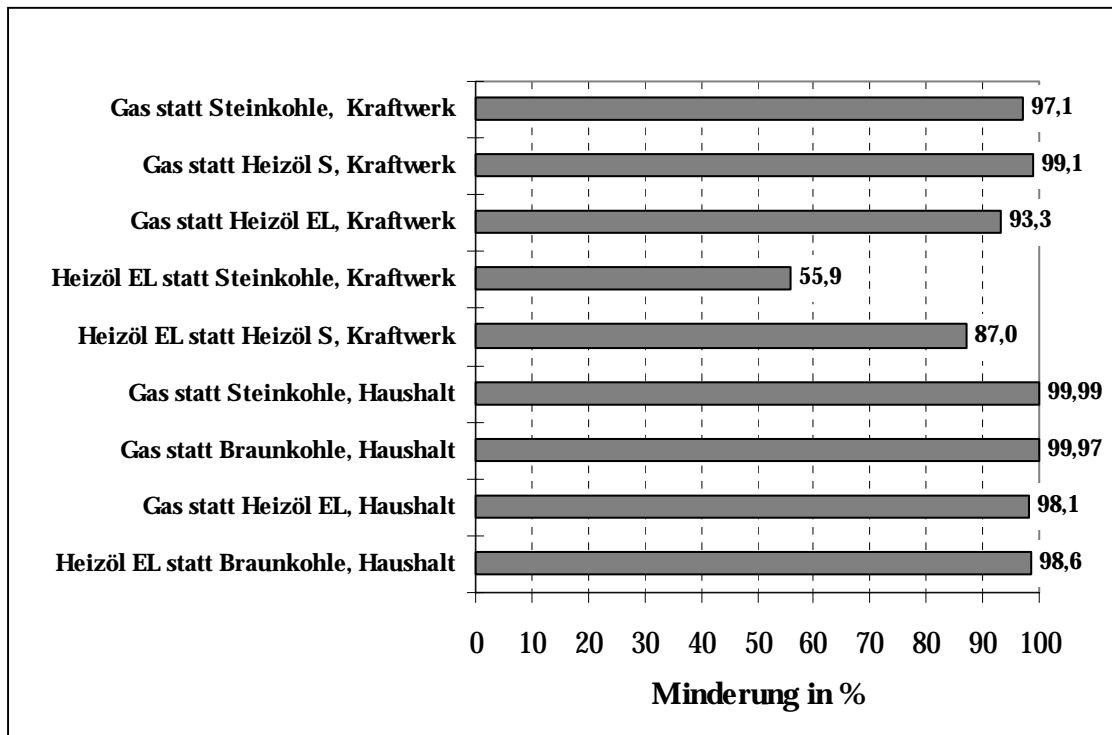


Abb. 4-3: Wirksamkeit von Brennstoffsubstitutionen bei öffentlichen Kraftwerken (UBA, 2001b) und Haushaltsfeuerungen (PFEIFFER et al., 2000)

Des Weiteren haben Brennstoffeinsparungen eine hohe Wirksamkeit, insbesondere bei Kleinf Feuerungen mit Festbrennstoffen. Es wird erwartet, dass bis 2010 das damit verbundene Minderungspotenzial zu einem großen Teil bereits ausgeschöpft sein wird. Seit Jahren gibt es bereits Anstrengungen in der Industrie, Energiesparmaßnahmen umzusetzen. Die Energieeinsparverordnung (EnEV), die den Niedrigenergiehausstandard für Neubauten zur Regel machen soll und Nachrüstungsanforderungen an Altbauten stellt, soll ebenfalls zu einer deutlichen Senkung des Energieverbrauchs führen. Weitere energiesparende Maßnahmen erscheinen aufgrund der damit verbundenen Kosten und evtl. Nutzenverluste nicht im bedeutenden Maße realisierbar.

Minderungsmaßnahmen beim Umschlag staubender Güter werden nicht vertieft betrachtet, da den entstehenden Emissionen relativ geringe Feinstaubanteile zugeordnet werden. Fundierte Emissionsmessdaten gibt es jedoch nicht, weshalb die lufthygienische Bedeutung dieser Emissionen nur sehr eingeschränkt beurteilt werden kann. Einen detaillierten Überblick über mögliche Maßnahmen geben z. B. die VDI-Richtlinie 3790 und die novellierte TA Luft. Die Emissionen lassen sich vor allem durch verfahrenstechnische Änderungen wirkungsvoll mindern, die nach EICKELPASCH (1998) bis zu 90 % Emissionsminderung bewirken können.

#### 4.1.4 Stationäre Quellen - sekundäre Maßnahmen

Bei stationären Anlagen dienen Zyklone und Multizyklone der Abscheidung grober Staubfraktionen. Auch einfache Wäscher sind bezüglich  $PM_{2,5}$  und kleinerer Fraktionen wenig effektiv. Selbst derzeitige Hochleistungswäscher sind gegenüber Nanopartikeln meist nur eingeschränkt wirksam, obwohl die Verfahren Trenngrenzen bis unter  $0,1 \mu m$  Durchmesser bei allerdings hohem Energieaufwand erreichen können (s. VDI-Richtlinie 3679). Kombinationen von Wäschern mit einer elektrostatischen Partikelaufladung können die Wirksamkeit der Verfahren erhöhen (s. z. B. LAITINEN et al., 2000).

Höhere Abscheideraten bezüglich der Feinstaubfraktion können Gewebefilter erzielen, die laut verfügbaren Literaturdaten für  $PM_{2,5}$  einen Fraktionsentstaubungsgrad von über 99 % und je nach Bauart bei  $PM_{0,1}$  noch Werte zwischen 94 % und 97 % erreichen können. Ebenso wie Gewebefilter sind auch die elektrostatischen Verfahren prinzipiell für die Feinstaubabscheidung geeignet. Die Gesamtstaub-Abscheideraten können bei einer ausreichenden Verweilzeit bzw. Dimensionierung der Anlage bei bis über 99,9 % liegen, wobei auch sehr kleine Partikel mit  $< 0,1 \mu m$  erfasst werden können. In Abbildung 4-4 sind Angaben aus (EPA, 1995) zu typischen Abscheideraten von stationären Entstaubungsanlagen bezüglich  $PM_{2,5}$  genannt.

Bezüglich der Abscheidung von Partikeln im Nanometerbereich zeigen einige Untersuchungen allerdings weitaus geringere Wirksamkeiten der derzeit in Betrieb befindlichen Filteranlagen. Als Ursachen werden vor allem die unzureichende Dimensionierung der Abscheider, der Partikeldurchtritt während der Regenerierung und im Falle der Elektrofilter die unzureichende elektrische Aufladung von Nanopartikeln diskutiert. Bei Filteranlagen besteht aufgrund von physikalischen Phänomenen die niedrigste Abscheiderate im Bereich der sogenannten Filterlücke, bei Partikeldurchmessern von etwa  $0,1$  bis  $1 \mu m$ . In diesem Größenbereich kann die Abscheiderate bei derzeitigen Elektrofiltern bezogen auf die Partikelmasse nach STRAND et al. (2002) bei nur 70 bis 80 % liegen. Die Wirksamkeit von derzeitig installierten Abgasreinigungssystemen ist oftmals durch die kostenoptimierte Auslegung der Anlagen zur Einhaltung von Gesamtstaubgrenzwerten eingeschränkt. Da die Feinfraktion den größten massebezogenen Anteil des Staubdurchgangs moderner Entstaubungsanlagen darstellt, ist anzunehmen, dass Erhöhungen der Wirksamkeit durch Nachrüstungen oder zusätzliche Maßnahmen vor allem Feinstäube wirksam mindern. So versprechen Maßnahmen zur Optimierung der Abreinigung der Filter nicht unerhebliche Emissionsminderungen (SCHMIDT & WEIß, 1998). Bei Gewebefiltern können verbesserte Filtermedien eingesetzt, bei Elektrofiltern die Aufladung der Nanopartikel über eine verbesserte elektro-

technische Ausstattung verstärkt werden. Des Weiteren ist die Ausrüstung von Anlagen mit zusätzlichen oder nachgeschalteten Modulen eine Option zur Verbesserung der Feinstaubabscheidung. Die Umwandlung eines Elektrofilters in einen Hybridfilter als Kombination von Elektro- und Gewebefilter vereinigt die Vorteile beider Abscheidemechanismen und kann auch eine wirksame Möglichkeit der Nachrüstung darstellen (ELEX, 2002).

Eine verbesserte Erfassung von Abgasen kann diffuse Emissionen wirksam mindern. Dies hat die Zielsetzung, möglichst die gesamten in einem Betrieb entstehenden Emissionen einer vorhandenen Abluftreinigung zuzuführen. Maßnahmen können z. B. strömungstechnische Verbesserungen und die Optimierung der Bauform von offenen Erfassungseinrichtungen, die Vergrößerung des Wirkbereiches von Strömungssenken oder die möglichst quellennahe Absaugung von Emissionen darstellen (BACH et al., 1999). Betrachtungen zur Wirksamkeit und Implementierung solcher Maßnahmen sind nur möglich unter Berücksichtigung von betriebsspezifischen Gegebenheiten und sofern die diffusen Anteile der Emissionen aus Industriebetrieben bekannt sind.

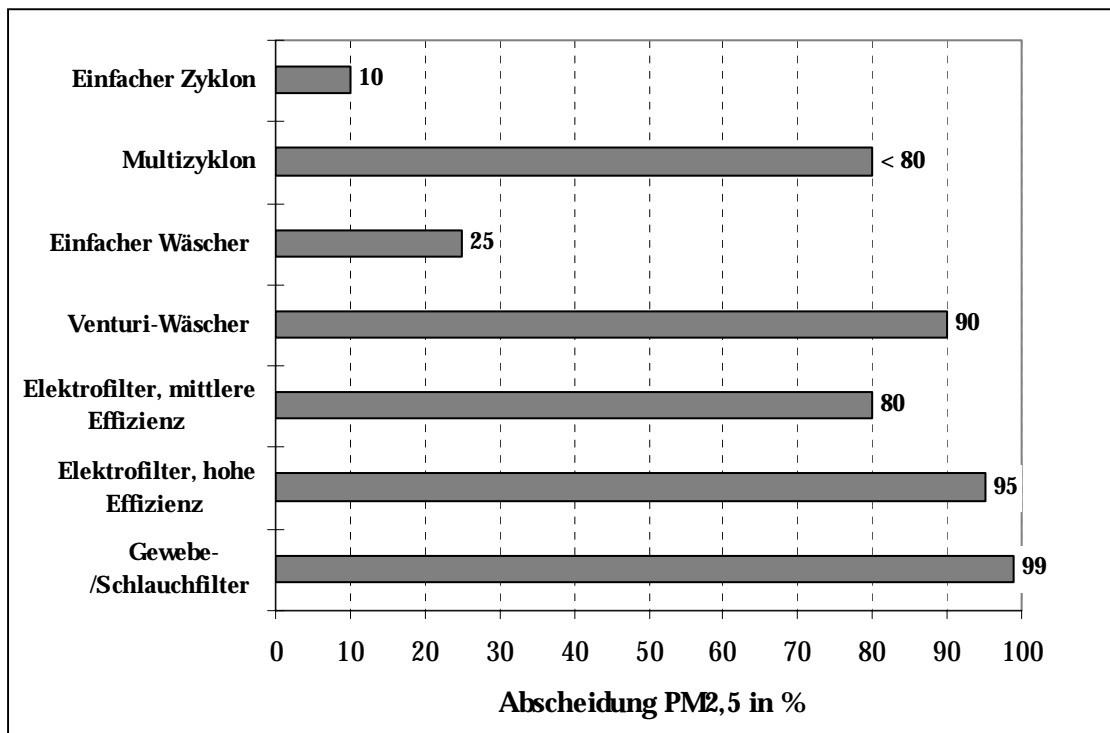


Abb. 4-4: Abscheideraten stationärer Entstaubungssysteme für PM<sub>2,5</sub> aus (EPA, 1995)



Während elektrische Staubabscheider und Schlauchfilter besonders bei Großanlagen eingesetzt werden, können für kleinere Anlagen effiziente filternde Abscheider in Form von Taschenfiltern oder Patronenfiltern zum Einsatz kommen. Der Einsatz von Filtern bei Kleinf Feuerungen wird aus Kostengründen wenig diskutiert. Bei leistungsstärkeren Anlagen < 1 MW ist aber der Einsatz von kleineren Filteranlagen durchaus denkbar (s. z. B. ECOCAST, 2002). Beim Einsatz von Gewebefiltern bei Holzfeuerungen besteht allerdings aufgrund unverbrannter organischer Verbindungen im Abgas das Problem der Brandgefahr und des Verstopfens im Anfahrbetrieb.

Vielversprechend waren Ergebnisse zum Einsatz von regenerierbaren Tiefenfiltern mit sehr hoher Wirksamkeit (99,99 % Abscheidung im unbeladenen und 99,9999 % im beladenen Zustand) bei mittleren bis großen Abgasvolumenströmen aus einem früheren BWPLUS-Projekt (FRONHÖFER & LEIBOLD, 1995). Allerdings konnten die Probleme bei der Regenerierung dieser Filter im Praxisbetrieb nicht gelöst werden, so dass die dort untersuchten und beschriebenen Systeme nicht auf den Markt gekommen sind.

## **4.2 Weitergehende Minderungspotenziale in Baden-Württemberg**

Die vorangehende Betrachtung technischer Minderungsmaßnahmen und ihrer spezifischen Wirksamkeit liefert eine Reihe von wirksamen Maßnahmen zur Feinstaubminderung. Dieselpartikelfilter, Erdgasfahrzeuge und stationäre Gewebe- und Elektrofilteranlagen entsprechend dem Stand der Technik sind weit entwickelte, verfügbare und vielfach bewährte Technologien und lassen auch mittelfristig bis zum Jahr 2010 unter Berücksichtigung des Emissionsinventars große Beiträge zur Minderung der Feinstaubemissionen in Baden-Württemberg erwarten. Insbesondere zu diesen Technologien werden im Folgenden Betrachtungen von Minderungspotenzialen erfolgen. Für weitere quellspezifisch sehr wirksame Maßnahmen wie Brennstoff- und Technologiesubstitutionen oder Energiesparmaßnahmen werden bis 2010 in Baden-Württemberg aufgrund einer eingeschränkten oder nur langsamen Umsetzbarkeit keine bedeutenden Minderungen erwartet. Beispielhaft werden hier Minderungspotenziale für Steinkohlekraftwerke, Industriefeuerungen und Kleinf Feuerungen dargestellt. Die Abschätzung von Minderungspotenzialen erfolgt ausgehend vom Referenzszenario 2010 und von erreichbaren spezifischen Minderungen im Vergleich zum Referenzfall. Für die Betrachtung werden prozessspezifische Fallannahmen getroffen, die sich aus Messdaten und anderen Informationen ableiten.

#### 4.2.1 Annahmen und Randbedingungen für Minderungsszenarien

Um die spezifische Wirksamkeit verschiedener Maßnahmenoptionen mit dem Referenzszenario der Emissionen im Jahr 2010 verknüpfen zu können, werden die Angaben zur spezifischen Minderung Emissionsfaktoren für relevante Prozesse zugeordnet. Neben den für die Emissionsermittlung verwendeten Emissionsfaktoren unter Berücksichtigung des derzeitigen Minderungsniveaus müssen erreichbare bzw. technisch mögliche Emissionsfaktoren unter Annahme einer wirksamen Minderung entsprechend dem Stand der Technik ermittelt werden. Als Minderungsszenarien werden die in den Tabellen 4-1 und 4-2 erläuterten Fallannahmen betrachtet.

Für die Einführung des Dieselpartikelfilters bei Neufahrzeugen wird ausgehend von Messdaten eine Minderung der spezifischen Emissionen der Fahrzeuge um etwa 90 % bei PKW/LNF und 70 % bei SNF gegenüber dem EURO 4-Emissionsniveau angenommen. Für schwere Nutzfahrzeuge zeigt die erste Zertifizierung eines neuen LKW mit Partikelfilter (s. AECC, 2001a), dass die zu erwartenden Emissionsfaktoren nicht so deutlich unter EURO 4 liegen werden wie bei den PKW. Der Beginn der Maßnahmenimplementierung wird im Jahr 2005 angenommen. Auch bei den sonstigen Fahrzeugen wird eine Minderung der Emissionsfaktoren der Neufahrzeuge um 90 % für möglich gehalten. Des weiteren werden Filter-Nachrüstungen für den gesamten Fahrzeugbestand ab dem Jahr 2005 betrachtet. Es wird zum einen eine Minderung der spezifischen Emissionen der Fahrzeuge um jeweils mindestens 60 % und optimistische 90 % im Realbetrieb angenommen. Ein Nachrüsten aller Altfahrzeuge wird nicht umgesetzt werden können. Eine Darstellung der erreichbaren Minderungspotenziale für einzelne Fahrzeugkonzepte kann aufzeigen, bei welchen Fahrzeuggruppen im Straßenverkehr eine Nachrüstung vor allem wirksam ist.

Verfügbare Messdaten zeigen, dass erdgasbetriebene Fahrzeuge in etwa das gleiche Emissionsniveau erreichen, wie zukünftige neue Dieselfahrzeuge mit Partikelfilter. Nach Messdaten von ANDERSSON & WEDEKIND (2001) ergibt sich insbesondere bei neuen schweren Nutzfahrzeugen eine ähnliche spezifische Minderung durch den Ersatz von EURO 4-Dieselmotoren, weshalb hier die gleichen Annahmen getroffen werden (F3). Bei den PKW/LNF wird eine separate Betrachtung der Erdgasmotoren vorgenommen und die Wirksamkeit mit 99 % Minderung gegenüber EURO 4 angesetzt (F2). Für den Bahn- und Schiffsverkehr erfolgen keine Betrachtungen, da die Emissionen relativ gering im Vergleich zum gesamten Verkehrssektor sind. Im Schiffsverkehr ist zudem der Einsatz des Partikelfilters aufgrund des Schwefelgehalts im Diesel, der hohen

Lebensdauer von Schiffsmotoren und ökonomischer Zwänge kaum bis zum Jahr 2010 umsetzbar. Bei den sonstigen Fahrzeugen werden für die Quellgruppen Landwirtschaft, Baumaschinen und Industrie Szenarienannahmen getroffen.

Tab. 4-1: Fallannahmen für mobile Quellen

Fall-Nr.	Erläuterung
F1	PKW & LNF - Neufahrzeuge mit DPF (90 % Minderung gegenüber EURO 4)
F2	PKW & LNF - Neufahrzeuge mit Erdgas (99 % Minderung gegenüber EURO 4)
F3	SNF - Neufahrzeuge mit DPF/Erdgas (70 % Minderung gegenüber EURO 4)
F4	PKW & LNF - Nachrüstung mit DPF (EURO 1, 2, 3 und ältere) (60 % Minderung)
F5	PKW & LNF - Nachrüstung mit DPF (EURO 1, 2, 3 und ältere) (90 % Minderung)
F6	SNF - Nachrüstung mit DPF (EURO 1, 2, 3 und ältere) (60 % Minderung)
F7	SNF - Nachrüstung mit DPF (EURO 1, 2, 3 und ältere) (90 % Minderung)
F8	Sonstige Fahrzeuge* - Neufahrzeuge mit DPF (90 % Minderung)
F9	Sonstige Fahrzeuge* - Nachrüstung mit DPF (gesamter Bestand) (60 % Minderung)
F10	Sonstige Fahrzeuge* - Nachrüstung mit DPF (gesamter Bestand) (90 % Minderung)

\* Fahrzeuge Landwirtschaft, Baumaschinen und Industrie

Für die genehmigungsbedürftigen Anlagen sind zwar detaillierte Informationen zu den installierten Abgasreinigungen in den Emissionserklärungen (UMEG, 1999a) vorhanden, es fehlen jedoch Informationen zur tatsächlichen Wirksamkeit der Systeme. Auch bei den Herstellern von Abgasreinigungssystemen gibt es zumeist nur geringe Kenntnisse der in der Praxis dauerhaft erreichten Wirksamkeit, insbesondere bezüglich feiner Partikel, da gröbenselektive Messungen nicht erforderlich sind. Die Quantifizierung der Minderungspotenziale erfolgt deshalb mit den nachstehenden drei Vorgehensweisen:

- Vergleich von derzeitigen Emissionsfaktoren mit rohgasseitigen Emissionsfaktoren (ohne Minderung) (z. B. aus EPA (1995); TNO (2001); IIASA (2002)) verknüpft mit Annahmen zur erreichbaren Wirksamkeit von Filteranlagen zur Ableitung des Standes der Technik.
- Vergleich von derzeitigen Emissionsfaktoren mit den niedrigsten in der Literatur dokumentierten Emissionsfaktoren (z. B. aus EPA (1995); TNO (2001); EIPPCB 2001) als Stand der Technik.
- Vergleich von derzeitigen Emissionsfaktoren mit den niedrigsten aus den Emissionserklärungen 1996 ableitbaren Emissionsfaktoren je Abgasreinigungstyp (s. Tab. 2-12) als Stand der Technik.

Ein Minderungspotenzial kann sich bei den genehmigungsbedürftigen Anlagen einerseits über die verbesserte Ausrüstung mit hoch wirksamen Abgasreinigungen und andererseits durch die Verbesserung der Wirksamkeit schon bestehender Abgasreinigungssysteme ergeben. Abb. 4-5 zeigt beispielhaft für die Großfeuerungen, dass der Einsatz des wichtigsten Energieträgers Steinkohle zu etwa 95 % in Anlagen mit Elektrofilter und zu 5 % in Anlagen mit Gewebefilter stattfindet. Dementsprechend stellen die Emissionen aus diesen Feuerungsanlagen überwiegend Staubdurchgang von Elektrofiltern dar, ein bedeutendes Minderungspotenzial kann sich nur über eine evtl. mögliche Verbesserung der Feinstaubabscheidung der bestehenden Filteranlagen ergeben. Demgegenüber ist bei den Feuerungen der BImSchV-Nr. 01.02 und den indirekten Prozessfeuerungen die Ausstattung mit hoch wirksamen Abgasreinigungen deutlich geringer (s. Abb. 4-6). Hier ergeben sich Minderungspotenziale, insbesondere bei den Feuerungen mit Holz und schwerem Heizöl, auch über den verstärkten Einsatz von Elektro- und Gewebefiltern.

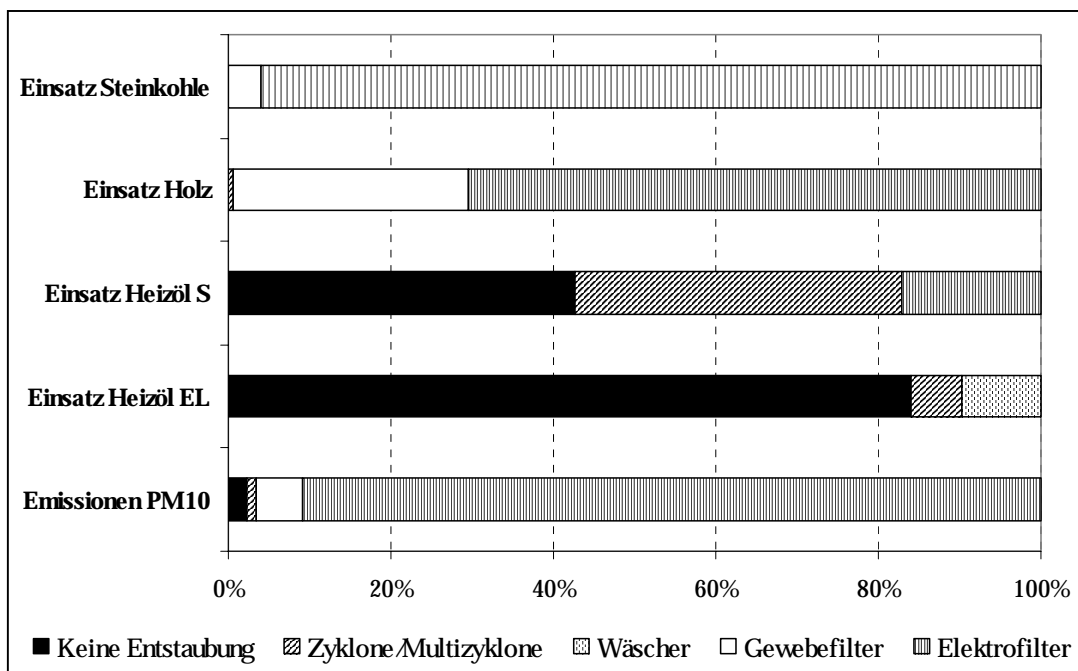


Abb. 4-5: Abgasreinigungssysteme bei genehmigungsbedürftigen Anlagen im Jahr 1996 – Großfeuerungen BImSchV-Nr. 01.01

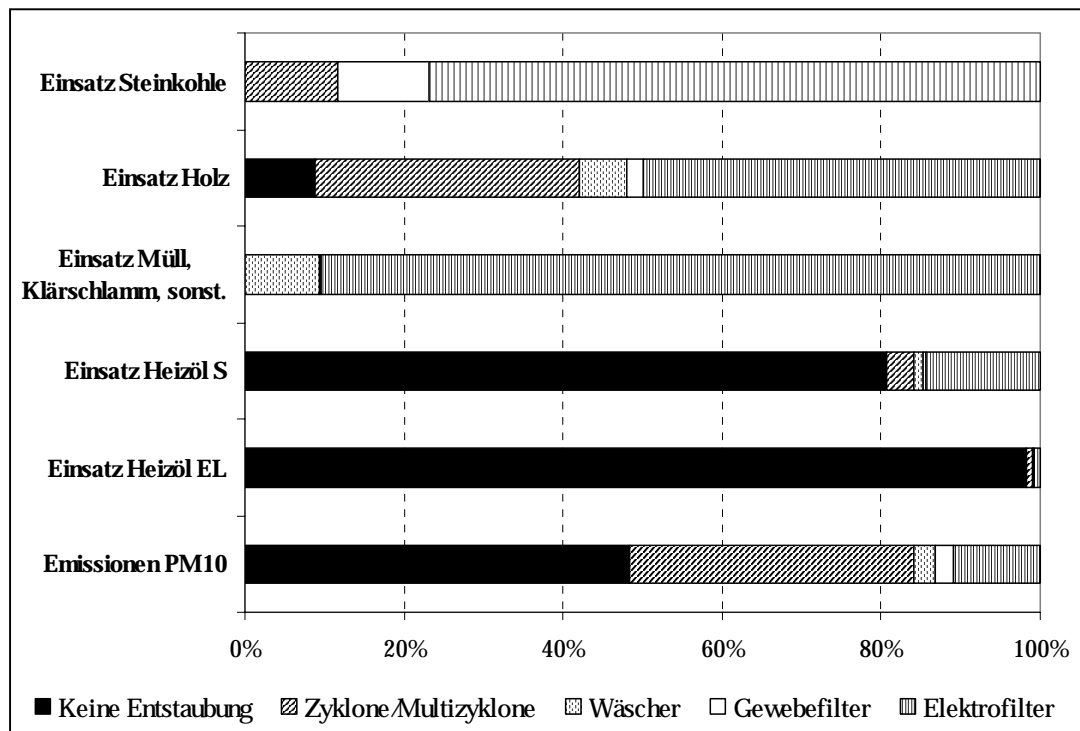


Abb. 4-6: Abgasreinigungssysteme bei genehmigungsbedürftigen Anlagen im Jahr 1996 – Feuerungen BImSchV-Nr. 01.02 und indirekte Prozessfeuerungen

Ausgehend von der Auswertung der Emissionserklärungen und verfügbaren Literaturdaten werden die unten genannten Fallannahmen definiert. Damit werden insgesamt ca. 90 % der  $PM_{2,5}$ -Emissionen und 83 % der  $PM_{10}$ -Emissionen aus genehmigungsbedürftigen Anlagen im Jahr 2010 hinsichtlich weitergehender Minderungspotenziale betrachtet. Bei den Feuerungsprozessen werden ausschließlich thermisch erzeugte Feinstäube aus Anlagen mit festen und flüssigen Brennstoffen betrachtet. Die berücksichtigten Produktionsprozesse (prozessbedingte Emissionen einschließlich direkte Prozessfeuerungen) sind das Brechen, Mahlen, Klassieren von Gestein, die Zement-, Kalk- und Gips Herstellung, die Herstellung von Glas oder Glasfasern, Eisen- und Stahlgießereien, Gießereien für NE-Metalle, Lackieranlagen, die Herstellung von Holzfasern- und Holzspanplatten, Räuchereien und Zuckerfabriken. Die Emissionen der Erdölraffinerien und der Papier- und Pappenherstellung sind fast vollständig bei den indirekten Prozessfeuerungen berücksichtigt.

Des Weiteren wird bei den Großfeuerungen (öffentliche Kraft- und Heizwerke) die Substitution der Steinkohlefeuerung betrachtet. Die Ausführungen von FAHL et al. (2001) zeigen, dass insbesondere bei den Kraftwerksstandorten Altbach, Mannheim, Heilbronn und Karlsruhe ein Ersatz mit Erdgas denkbar ist. Ausgehend davon wird eine

mögliche Substitution des Steinkohleeinsatzes bei den Großfeuerungen in Baden-Württemberg insgesamt von 80 % angenommen. Allerdings ist nur beim Kraftwerk Altbach diese Substitution ohne größere Umbaumaßnahmen erreichbar. Bei den Industriefeuerungen (ohne direkte Prozessfeuerungen) wird ein möglicher Ersatz von Heizöl S und Kohlen betrachtet. Zusätzlich zu den genehmigungsbedürftigen Anlagen kann auch für die Kleinfeuerungen eine grobe Abschätzung der maximalen Minderungspotenziale durch die Substitution von Kohlen und Heizöl S und bei den Holzfeuerungen durch den konsequenten Einsatz von Neuanlagen entsprechend dem Stand der Technik vorgenommen werden.

Tab. 4-2: Fallannahmen für stationäre Quellen

Fall-Nr.	Erläuterung
F11	Großfeuerungen 01.01 mit AGR mit 99 % $PM_{10}$ -, $PM_{2,5}$ -Abscheidung, bei Steinkohle 99,5 % $PM_{10}$ -Abscheidung
F12	Großfeuerungen 01.01 mit niedrigsten Emissionsfaktoren aus der Literatur
F13	Großfeuerungen 01.01 mit niedrigsten Emissionsfaktoren aus (UMEG, 1999a)
F14	Feuerungsanlagen 01.02 und indirekte Prozessfeuerungen gen.-bed. mit AGR mit 99 % $PM_{10}$ -, $PM_{2,5}$ -Abscheidung, bei Steinkohle 99,5 % $PM_{10}$ -Abscheidung
F15	Feuerungsanlagen 01.02 und indirekte Prozessfeuerungen gen.-bed. mit niedrigsten Emissionsfaktoren aus der Literatur
F16	Feuerungsanlagen 01.02 und indirekte Prozessfeuerungen gen.-bed. mit niedrigsten Emissionsfaktoren aus (UMEG, 1999a)
F17	Bedeutende gen.-bed. Prozesse * (inkl. direkte Feuerungen) mit AGR mit 99 % $PM_{10}$ -, $PM_{2,5}$ -Abscheidung
F18	Bedeutende gen.-bed. Prozesse * (inkl. direkte Feuerungen) mit niedrigsten Emissionsfaktoren aus der Literatur
F19	Großfeuerungen 01.01, Substitution von 80 % Steinkohle durch Erdgas
F20	Feuerungsanlagen 01.02 und indirekte Prozessfeuerungen gen.-bed., Substitution von Heizöl S und Kohlen durch Erdgas
F21	Kleinfeuerungen Haushalte und Kleinverbraucher, Substitution von Heizöl S und Kohlen durch Erdgas
F22	Kleinfeuerungen Haushalte und Kleinverbraucher, zusätzliche Holzfeuerungen nach Stand der Technik (Annahme: 50 % geringere spezifische Emissionen)

\* BImSchV-Nr. 02.02, 02.03, 02.04, 02.08, 03.07, 03.08, 05.01, 06.03, 07.05, 07.24

#### 4.2.2 Ergebnisse der Minderungsszenarien

In Abbildung 4-7 sind die Ergebnisse für den Verkehr dargestellt. Durch die Einführung des Diesel-Partikelfilters bei neuen PKW und LNF ab Anfang 2005 können die  $PM_{10}$ -Emissionen aller anthropogenen Quellgruppen in Baden-Württemberg (ohne die Aufwirbelung von Straßenstaub) im Jahr 2010 um etwa 5 %, die  $PM_{2,5}$ -Emissionen um 7 % gemindert werden. Die Wirksamkeit dieser Maßnahme wird sich in den Folgejahren verstärken, da die Implementierung im Jahr 2010 noch nicht abgeschlossen sein wird. Auch für die SNF ist im Jahr 2010 die Implementierung des Partikelfilters noch nicht abgeschlossen. Hieraus und aus den strengen EURO 4-Anforderungen, ergibt sich ein relativ geringes über EURO 4 hinausgehendes Minderungspotenzial für das Jahr 2010. Die Nachrüstung älterer KFZ ab dem Jahr 2005 erreicht bei den SNF im Jahr 2010 ein deutlich höheres Minderungspotenzial als die Ausrüstung von Neufahrzeugen. Dieses Minderungspotenzial liegt aber wiederum niedriger als das erreichbare Potenzial der Nachrüstung von PKW und LNF, die jedoch aufgrund des größeren Fahrzeugbestandes mit einem weitaus höheren Aufwand umzusetzen wäre.

In Abbildung 4-7 sind den Ergebnissen für den Straßenverkehr Szenarien für die vollständige Implementierung von Partikelfiltern bei sonstigen Fahrzeugen älterer und neuer Bauart gegenübergestellt. Bedingt durch das gegenüber dem Straßenverkehr höhere Durchschnittsalter der Fahrzeuge (insbesondere bei den Traktoren) können Minderungspotenziale vor allem über die Nachrüstung des derzeitigen Fahrzeugbestandes realisiert werden. Es wird deutlich, dass auch hier erhebliche Minderungen erreicht werden können, auch wenn eine Reduzierung der spezifischen Emissionen des gesamten Bestandes um optimistische 90 % wohl kaum umgesetzt werden kann.

Abbildung 4-8 zeigt die Minderungspotenziale der Nachrüstung der Fahrzeuge im Straßenverkehr nach Fahrzeugkonzept beispielhaft in  $Mg PM_{10}$ . In diesem Fall ist eine spezifische Reduktion der Fahrzeugemissionen von jeweils 90 % angenommen worden. Es zeigt sich, dass bei den PKW vor allem die Nachrüstung der EURO 3-Fahrzeuge aufgrund der Fahrleistungsanteile zur Partikelminderung im Jahr 2010 beitragen kann, obwohl die spezifisch erreichbaren Minderungen bei älteren Fahrzeugen größer sind. Bei den leichten und schweren Nutzfahrzeugen haben demgegenüber die Fahrzeuge vor EURO 3 einen deutlich höheren Anteil an der erreichbaren Emissionsminderung.

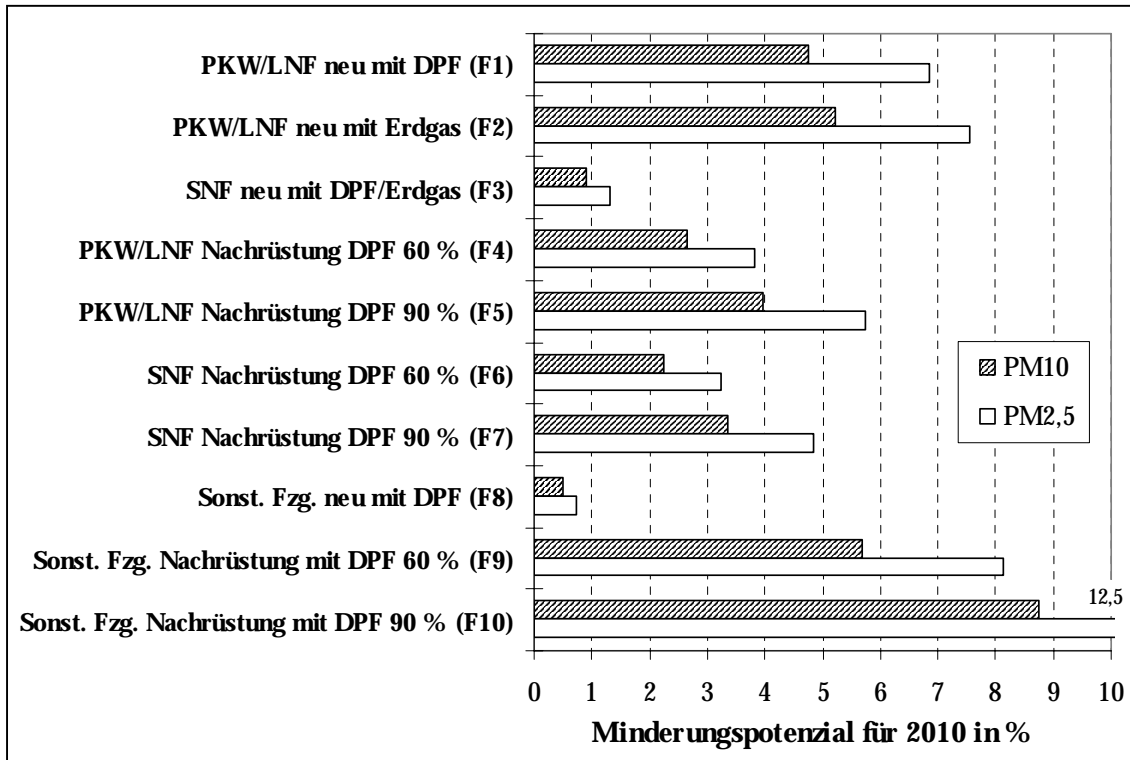


Abb. 4-7: Minderungspotenziale in Baden-Württemberg für mobile Quellen in % Minderung aller anthropogenen Emissionen im Jahr 2010 (ohne Staubaufwirbelung im Verkehr)

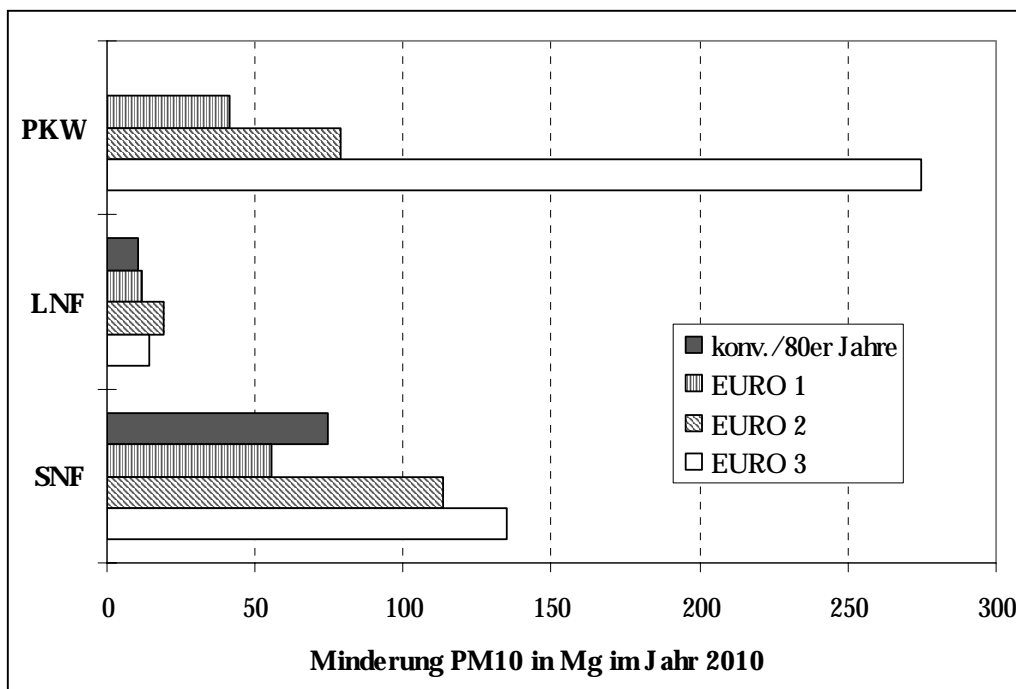


Abb. 4-8: Minderungspotenziale in Baden-Württemberg für die Nachrüstung von KFZ mit DPF (90 % Minderung) für verschiedene Fahrzeugkonzepte in Mg PM<sub>10</sub>



In Abbildung 4-9 sind Ergebnisse für die stationären Quellen dargestellt. Für die Großfeuerungen ergeben sich ähnliche Minderungspotenziale von 3,5 % bezüglich  $PM_{10}$  und ca. 5 % bezüglich  $PM_{2,5}$  falls eine Abscheiderate von 99 % oder die niedrigsten Emissionsfaktoren aus der Literatur angesetzt werden. Der niedrigste Emissionsfaktor abgeleitet aus den Emissionserklärungen ergibt sich für Anlagen mit Elektrofilter, der zumeist bereits eingesetzt wird, so dass mit dieser Vorgehensweise nur eine geringe Minderung darstellbar ist. Minderungspotenziale ergeben sich wie erwartet über die Annahme einer möglichen Verbesserung der Feinstaubabscheidung der bestehenden Filteranlagen. Bei den Industriefeuerungen liefern alle drei Fallannahmen für die Abgasreinigung eine Minderung von etwa 3 % der Gesamtemissionen. Verbesserungen der Feinstaubabscheidung betreffen hier vor allem Holzfeuerungen und Raffineriefeuerungen mit Heizöl S. Bei den betrachteten Produktionsprozessen resultiert insgesamt ein hohes Minderungspotenzial von etwa 7 bzw. 6 %, falls eine Abscheiderate von 99 % vorausgesetzt wird. Diese Minderung ergibt sich vor allem für das Brechen, Mahlen und Klassieren von Gestein, das zu einem großen Teil in mobilen Anlagen im Freien stattfindet. Für Lackierereien, Gießereien, Räuchereien und die Herstellung von Holzfaserver- und Holzspanplatten errechnet sich ein Minderungspotenzial von etwa 2 %, während mit dieser Vorgehensweise bei der Zementherstellung, den Ziegeleien und der Glasherstellung keine Minderung dargestellt werden kann. Sofern die niedrigsten aus der Literatur verfügbaren Emissionsfaktoren angesetzt werden, ergeben sich kaum Minderungspotenziale. Dies liegt daran, dass die aus den Emissionserklärungen abgeleiteten Emissionsfaktoren meist deutlich unter den Literaturwerten liegen. Hier bestätigt sich möglicherweise, dass die in den Emissionserklärungen dargestellten Emissionen aus Industrieprozessen teilweise die Emissionssituation unterschätzen, da diffuse Emissionen aus den Betrieben nicht vollständig berücksichtigt wurden. Die damit zusammenhängenden Minderungspotenziale durch eine verbesserte Erfassung der Emissionen können derzeit nicht quantifiziert werden.

Auch die Substitution von Steinkohle durch Erdgas oder andere Gase bei den Großfeuerungen kann eine Emissionsminderung von etwa 4 bis 5 % erreichen. Bei den Industriefeuerungen kann die Substitution von Kohlen und Heizöl S die Gesamtemissionen um maximal etwa 2 % mindern, wobei hier der größte Anteil auf die Verfeuerung von Heizöl S in Raffinerien entfällt. Bei den Kleinf Feuerungen können sowohl durch die Substitution von Kohlen und Heizöl S als auch durch den konsequenten Einsatz von neuen Holzfeuerungen entsprechend dem Stand der Technik jeweils maximal 1 % der Gesamtemissionen in Baden-Württemberg gemindert werden.

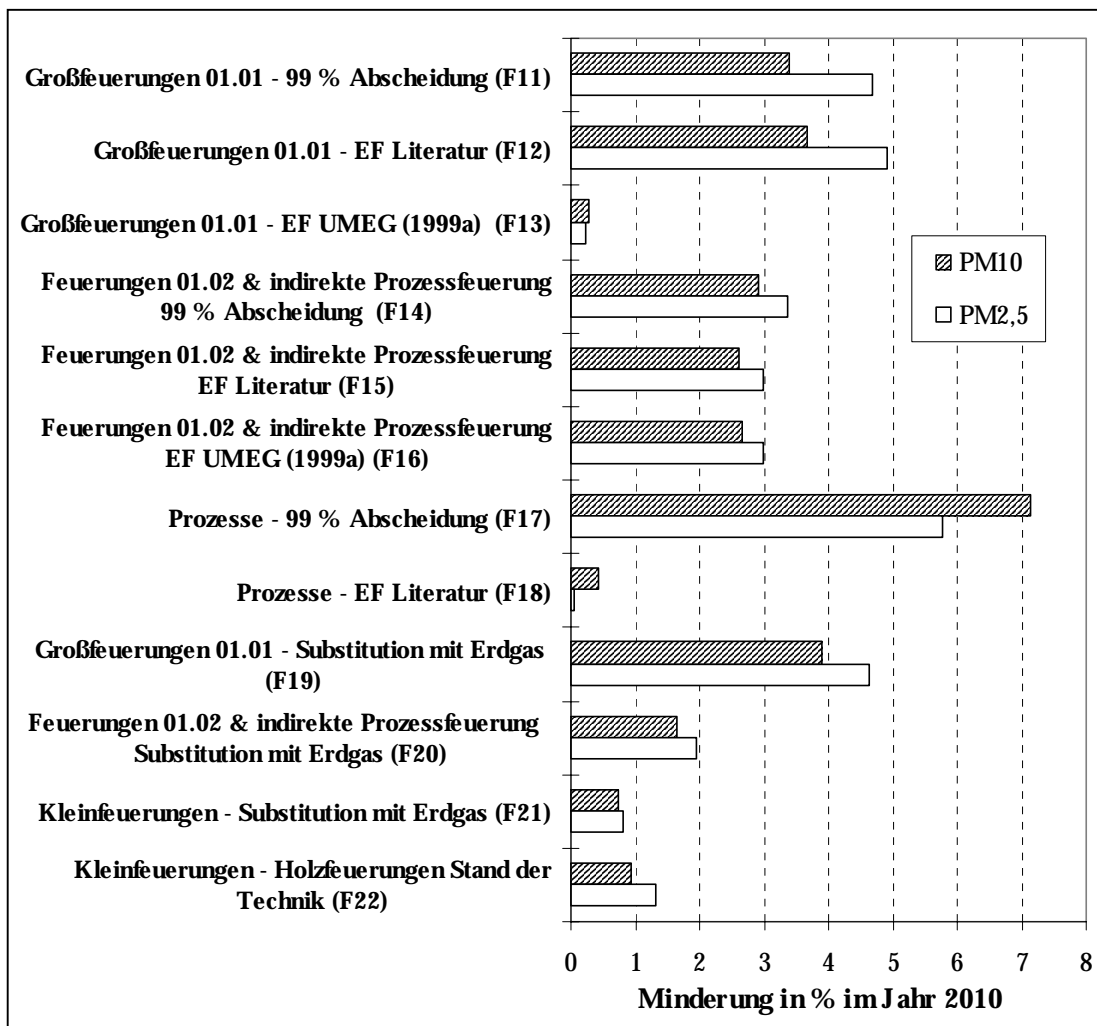


Abb. 4-9: Minderungspotenziale in Baden-Württemberg für stationäre Quellen in % Minderung aller anthropogenen Emissionen im Jahr 2010 (ohne Staubaufwirbelung im Verkehr)

### 4.3 Empfehlungen für eine zukünftige Minderungsstrategie

Die Betrachtung von Minderungsmaßnahmen liefert eine Reihe wirksamer Optionen zur Minderung der Feinstaubemissionen. Als wirksamste Maßnahmen, deren Einsatz die Emissionen der Partikelmasse und der Partikelanzahl auch schon bis zum Jahr 2010 wesentlich reduzieren kann, werden die folgenden Optionen gesehen:

- Partikelfiltersysteme für Dieselmotoren
- Erdgasmotoren anstatt Dieselmotoren
- Gewebefilter oder Elektrofilter nach Stand der Technik bei stationären Quellen

Dieselpartikelfilter können sowohl im Straßenverkehr als auch bei den sonstigen Fahrzeugen hohe Emissionsminderungen erreichen. Serienreife Systeme sind auf dem Markt vorhanden und seit Jahren bewährt. Für das Jahr 2010 hat die Nachrüstung von älteren Fahrzeugen bei den schweren Nutzfahrzeugen und den sonstigen Fahrzeugen noch eine weitaus größere Bedeutung als die Ausrüstung von Neufahrzeugen. Als langfristige Strategie ist die Ausrüstung aller neuen Dieselmotoren mit einem Partikelfilter anzustreben. Als mögliche Alternative mit ähnlichem Minderungspotenzial ist der Einsatz von Erdgasmotoren anstatt Dieselmotoren insbesondere bei Neufahrzeugen im Straßenverkehr zu sehen. Auch hier sind Voraussetzungen, wie Serienreife, Tankstelleninfrastruktur und finanzielle Anreize bereits vorhanden. Der konsequente Einsatz dieser Technologien bei Neufahrzeugen ab 2005 kann durch strengere Emissionsgrenzwerte für Partikel ab EURO 4 auf europäischer Ebene erreicht werden. Um Nachrüstungen oder vorzeitige Substitutionen von Dieselfahrzeugen zu erreichen, können steuerliche oder andere finanzielle Anreize eingesetzt werden. Die Steuerbegünstigung der Dieselfahrzeuge, die in den letzten Jahren einen starken Anstieg der Neuzulassungen von Diesel-PKW verursacht hat, sollte nur bei einer generellen und baldmöglichsten Einführung des Partikelfilters aufrecht erhalten bleiben.

Die Kosten von Partikelfiltersystemen erscheinen vertretbar in Anbetracht ihrer hohen Wirksamkeit. Sie liegen bei PKW unter 500 EUR, wobei der Kraftstoffmehrverbrauch mit etwa 2 bis 4 % angenommen wird. Zudem ist eine Wartung bzw. Reinigung des Filters von nicht oxidierbaren Ablagerungen erforderlich (ca. alle 80.000 bis 100.000 km bei PKW). Die Filterkosten liegen bei schweren Nutzfahrzeugen derzeit im Bereich von 5.000 bis 10.000 EUR und werden mit steigendem Produktionsvolumen abnehmen. Detaillierte Betrachtungen der Kosten von Partikelfiltern und auch Erdgasfahrzeugen fin-

den sich beispielsweise für Busse in DRECHSLER et al. (2000). Bei CRT-Systemen kann in Abhängigkeit von der Dimensionierung des Katalysators ein höherer  $\text{NO}_2$ -Anteil bei den  $\text{NO}_x$ -Emissionen entstehen. Positiv ist die zusätzliche Minderung von CO und HC durch den vorgeschalteten Oxidationskatalysator. Zur Einhaltung strenger Anforderungen sowohl an die Partikel- als auch die  $\text{NO}_x$ -Emissionen sind Kombinationen von Partikelfilter und Entstickung bereits in der Entwicklung (z. B. SCRT-Systeme).

Die Mehrkosten für einen Erdgasantrieb sind bei schweren Nutzfahrzeugen relativ hoch (z. B. bei Bussen ca. 30.000 bis 40.000 EUR). Zudem entstehen höhere Wartungskosten und ggf. Mehrkosten für die Tankstelleninfrastruktur. Die Fahrzeugmehrkosten bei den PKW liegen bei etwa 1.500 bis 3.500 EUR. Demgegenüber stehen die um ca. 35 % geringeren Kraftstoffkosten im Vergleich zum Diesel aufgrund eines deutlich reduzierten Mineralölsteuersatzes. Dieser Kostenvorteil wird derzeit bis Ende des Jahres 2020 in Deutschland garantiert. Für den reinen und damit optimierten Gasbetrieb ist vor allem im Individualverkehr eine europaweit flächendeckende Tankstelleninfrastruktur erforderlich. Erdgasmotoren als Ersatz für Dieselmotoren können auch zur Minderung der  $\text{NO}_x$ -, HC- und CO-Emissionen beitragen.

Nicht nur bei den mobilen, sondern auch bei den stationären Quellen sind erhebliche Minderungspotenziale vorhanden. Die Filtertechnologien für genehmigungsbedürftige Anlagen sind mittlerweile weit fortgeschritten. Eine technologische Verbesserung der Nanopartikelabscheidung bzw. eine bessere Dimensionierung vorhandener Anlagen ist oftmals möglich. Gewebefilter oder Elektrofilter entsprechend dem Stand der Technik können sowohl durch eine Neuinstallation als auch durch Nachrüstungen erreicht werden. Zur Umsetzung bzw. zum Erreichen des Standes der Technik sind entsprechende Anforderungen an die Feinstaubemissionen ( $\text{PM}_{10}$  und  $\text{PM}_{2,5}$ ) oder den Fraktionsabscheidegrad von Filteranlagen im Rahmen der Verordnungen zur Durchführung des BImSchG oder der TA Luft sowohl an Neu- als auch an Altanlagen erforderlich. Eine Neuinstallation von Filtersystemen ist in der Regel sehr kostenintensiv und abhängig von anlagenspezifischen Rahmenbedingungen. Der Aufwand für eine Nachrüstung oder Optimierung des Betriebs bestehender Filteranlagen liegt in der Regel deutlich unter dem einer Neuinstallation. Um den Stand der Technik zu erreichen gibt es mehrere Möglichkeiten, wie z. B. die Umwandlung von Elektrofiltern in Hybridfilter, ein zusätzliches Feld oder eine verbesserte elektrotechnische Ausstattung bei Elektrofiltern, verbesserte Filtermedien bei Gewebefiltern oder die Optimierung der Abreinigung zur Minimierung des Partikeldurchtritts. Die Potenziale für konkrete Maßnahmen und Angaben zu den Kosten ergeben sich sehr anlagenspezifisch und

können im Rahmen des Projekts nicht detaillierter betrachtet werden. Insbesondere Nachrüstungen von bereits bestehenden Abgasreinigungssystemen können je nach Anlagenkonfiguration einen sehr unterschiedlichen Aufwand bedeuten.

In Abbildung 4-10 sind Ergebnisse der Fallannahmen für die oben genannten Optionen Dieselpartikelfilter und Gewebe- oder Elektrofilter entsprechend dem Stand der Technik zusammengefasst dargestellt. Die Fallannahmen berücksichtigen eine spezifische Wirksamkeit von Partikelfiltern in Neufahrzeugen von 90 % bzw. 70 % bei schweren Nutzfahrzeugen, eine moderate Wirksamkeit der Nachrüstung von Altfahrzeugen mit Dieselpartikelfiltern von im Mittel 60 % und eine Feinstaub-Abscheiderate von 99 % als Stand der Technik bei den wichtigsten genehmigungsbedürftigen Anlagen. Die Minderungspotenziale sind unterteilt nach Straßenverkehr, sonstige Fahrzeuge und genehmigungsbedürftige Anlagen wiedergegeben. Es ergibt sich allein aus diesen beiden Strategien eine mögliche Emissionsminderung für das Jahr 2010 von insgesamt ca. 30 % für  $PM_{10}$  und 38 % für  $PM_{2,5}$ .

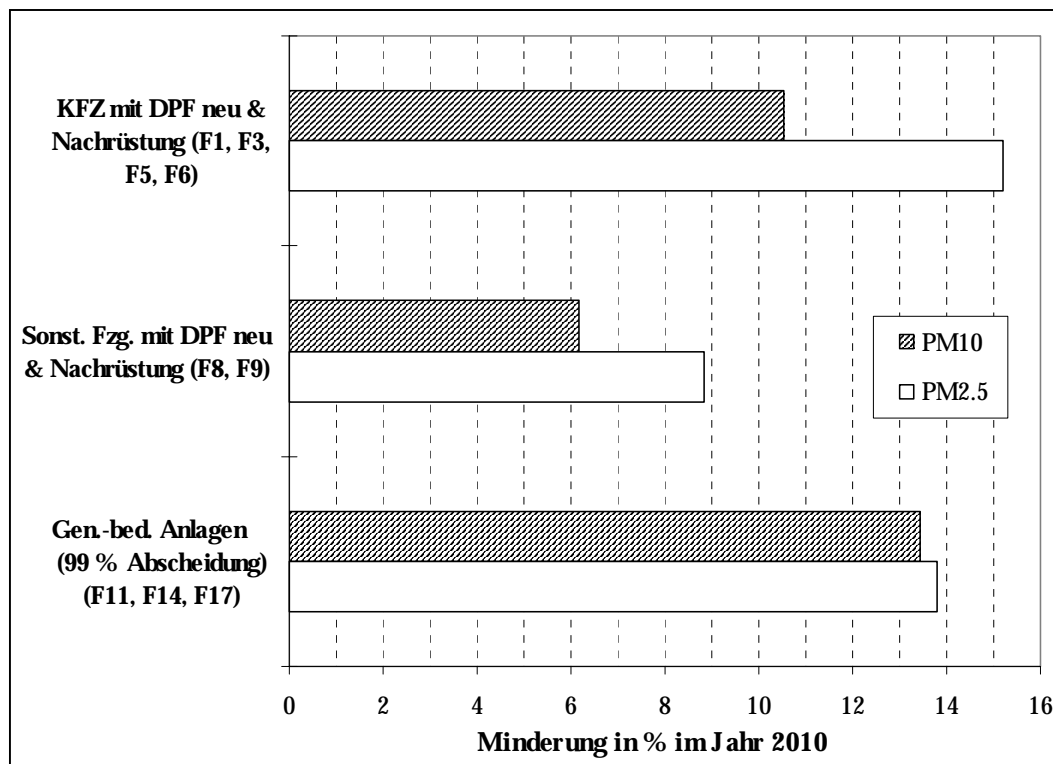


Abb. 4-10: Minderungspotenziale in Baden-Württemberg für den Verkehr und genehmigungsbedürftige Anlagen in % Minderung aller anthropogenen Emissionen im Jahr 2010 (ohne Staubaufwirbelung im Verkehr)

Als weitere, quellenspezifisch sehr wirksame Maßnahmen, die bis zum Jahr 2010 in Baden-Württemberg aufgrund einer eingeschränkten oder langsamen Umsetzung keine bedeutenden Minderungspotenziale erwarten lassen, aber langfristig ebenfalls einen wichtigen Beitrag zur Minderung der Partikelemissionen besitzen können, sind die nachstehenden Optionen zu nennen. Diese Maßnahmen können wirksame Bestandteile einer langfristigen Minderungsstrategie sein.

- Alternative Antriebssysteme (Brennstoffzellen, Elektromotoren u. a.) insbesondere im Straßenverkehr
- Substitution von festen Brennstoffen und schwerem Heizöl durch Gase bzw. Substitution der entsprechenden Feuerungsanlagen
- Einsatz von Holzfeuerungen entsprechend dem Stand der Technik bei Kleinfeuerungen
- Ausbau der Biomassenutzung möglichst in Nahwärmeverbundsystemen
- Energiesparmassnahmen (Heizwärme und Prozesswärme)

Alternative Antriebssysteme werden bis zum Jahr 2010 nicht bedeutend sein, da entweder die Serienreife noch nicht erreicht ist oder keine ausreichend günstigen marktwirtschaftlichen Bedingungen zu erwarten sind. Zum Teil ist mit deutlich höheren Fahrzeugpreisen und anderen Fahreigenschaften zu rechnen, so dass unklar ist, ob und wann wettbewerbsfähige Systeme sich durchsetzen können. Langfristig, etwa ab dem Jahr 2020, werden aber große Potenziale gesehen. Bei einer Beurteilung sind die vor- und nachgelagerten Prozesse und deren Emissionen zu berücksichtigen.

Die Potenziale der Substitution von Kohlen und Heizöl S durch gasförmige Brennstoffe sind in Abhängigkeit von wirtschaftlichen Faktoren, der Altersstruktur und mittleren Lebensdauer des Anlagenbestandes zu bewerten. Diese Maßnahme ist auch im Zusammenhang mit dem Erreichen des Klimaschutzzieles in Baden-Württemberg zu sehen. Die größten Potenziale ergeben sich durch die Substitution der Steinkohle bei vier Kraftwerksstandorten in Baden-Württemberg, wobei zumeist größere Aufwendungen für den Umbau zu erwarten sind. Nur beim Kraftwerk Altbach könnte relativ problemlos auf Gasfeuerung umgestellt werden. Zudem entstehen erhebliche Mehrkosten aufgrund der höheren Brennstoffkosten beim Erdgaseinsatz. Auch bei den Industriefeuerungen und Kleinfeuerungen sind Brennstoffsubstitutionen sehr wirksam. Die detaillierten Daten zeigen hier die größte Emissionsminderung für die Substitution des Einsatzes von Heizöl S bei Raffinerien. Eine Beschleunigung des Austauschs von Altan-

lagen erfordert lenkende Maßnahmen und ist nur eingeschränkt möglich, auch aufgrund höherer Brennstoffkosten.

Aufgrund des Klimaschutzzieles wird zukünftig eine verstärkte Nutzung des Energieträgers Holz und anderer Biomasse erwartet. Hierbei können neue Kleinf Feuerungsanlagen nach Stand der Technik deutlich geringere spezifische Emissionen erreichen, als der derzeitige Anlagenbestand im Mittel. Erforderlich für eine konsequente Umsetzung dieser Primärmaßnahme sind Emissionsgrenzwerte z. B. im Rahmen der 1. BImSchV oder Fördermaßnahmen. Kleinere Filteranlagen könnten auch bei leistungsstärkeren Kleinf Feuerungen vermehrt eingesetzt werden. In diesem Zusammenhang ist auch ein Ausbau der Biomassenutzung in Nahwärmeverbundsystemen eine wirksame Option. Die Installation einer größeren Feuerungsanlage mit wirksamer Abgasreinigung kann zahlreiche Kleinf Feuerungen ohne Abgasreinigung ersetzen. Damit verbunden können auch Emissionsminderungen anderer Schadstoffe erreicht werden. Nahwärmeverbundsysteme sind insbesondere bei der Erschließung von Neubaugebieten denkbar.

Auch Energiesparmaßnahmen haben eine hohe spezifische Wirksamkeit, insbesondere beim Einsatz fester Brennstoffe. Auch hier werden Emissionsminderungen für weitere Schadstoffe erreicht. Bis zum Jahr 2010 ist zu erwarten, dass diese Maßnahme zu einem großen Teil bereits ausgeschöpft sein wird, insbesondere aufgrund der Energieeinsparung in der Industrie und der Energieeinsparverordnung (EnEV). Weitere energiesparende Maßnahmen erscheinen aufgrund der damit verbundenen Kosten bzw. Nutzenverluste nicht im bedeutenden Maße realisierbar.

Des Weiteren gibt es Bereiche, die möglicherweise für die Emissionssituation bedeutend sind, für die aber noch keine Aussagen zu möglichen Minderungspotenzialen gemacht werden können. Dies betrifft insbesondere diffuse Emissionen aus der Industrie und die Aufwirbelung von Straßenstaub im Straßenverkehr. Bei diesen Prozessen sind weitere messtechnische Untersuchungen der Emissionen erforderlich. Diffuse Feinstaubemissionen aus Industriebetrieben, wie z. B. aus Dachreitern oder anderen Hallenöffnungen, sind noch wenig untersucht und derzeit für Baden-Württemberg nicht quantifizierbar. Mögliche Minderungsmaßnahmen betreffen die Verbesserung der Stoffeffassung bei genehmigungsbedürftigen Anlagen zur Zuführung möglichst der gesamten in einem Betrieb entstehenden Emissionen zur Abluftreinigung. Betrachtungen der Wirksamkeit, Kosten und Implementierung sind nur anlagen- bzw. betriebsspezifisch möglich.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Analyse von Emissionsquellen und ihren Emissionen ist für die Entwicklung von Luftreinhaltestrategien eine wesentliche Voraussetzung. Im Rahmen des Projekts wurden Verbesserungen und Erweiterungen der Ermittlung von Feinstaubemissionen in Baden-Württemberg erreicht und eine detaillierte Emissionsdatenbasis für PM, PM<sub>10</sub> und erstmals auch für die Feinstaubfraktion PM<sub>2,5</sub> erarbeitet. Diese Daten wurden als Grundlage für eine möglichst detaillierte Identifizierung relevanter Quellen und die Betrachtung der Wirksamkeit von möglichen Maßnahmen zur Emissionsminderung am Beispiel Baden-Württembergs genutzt.

Für Baden-Württemberg errechnen sich für das Jahr 1998 ohne die Aufwirbelung von Straßenstaub in der Summe Jahresemissionen für PM von etwa 25,6 Gg, für PM<sub>10</sub> von 15,3 Gg und für PM<sub>2,5</sub> von 11,1 Gg. Der PM<sub>10</sub>-Anteil an der Gesamtstaubemission liegt im Mittel bei etwa 60 %, der PM<sub>2,5</sub>-Anteil bei 43 %. Besonders bedeutende Prozesse für die Entstehung von Feinstäuben sind der Betrieb von Dieselmotoren im Verkehr, die Verfeuerung von festen Brennstoffen und einige Prozesse in der Primärindustrie, wie das Brechen, Mahlen, Klassieren von Gestein, die Zementherstellung, Raffinerien, Eisen- und Stahlgießereien, Papier- und Pappenherstellung und Lackierereien. Des weiteren ist ausgehend vom derzeitigen Kenntnisstand auch der Staubaufwirbelung im Straßenverkehr ein relevanter Beitrag zur Emissionssituation in Baden-Württemberg zuzuordnen. Die Emissionsabschätzung mit Hilfe einer modifizierten empirischen Gleichung der US EPA liefert hohe PM<sub>10</sub>-Emissionen, die bei etwa einem Drittel der Emissionen aller anderen anthropogenen Quellen liegen. Die Aufwirbelung von Straßenstaub verursacht demnach PM<sub>10</sub>-Emissionen in etwa der gleichen Größenordnung wie die anderen Prozesse im Straßenverkehr. Der Straßenstaub führt möglicherweise auch zu bedeutenden PM<sub>2,5</sub>-Emissionen. Hierzu existieren allerdings nur wenige verwendbare Messdaten. Die derzeitige Methodik der Quantifizierung besitzt große Unsicherheiten, so dass weitere Messprojekte in Deutschland oder anderen Ländern zur Erweiterung und Verbesserung der Datenbasis wünschenswert sind. Anstelle der Vorgehensweise der US EPA könnte ein Modell basierend auf deutschen oder mitteleuropäischen Rahmenbedingungen und Messdaten unter Berücksichtigung weiterer relevanter Parameter, wie der Fahrzeuggeschwindigkeit, des Straßenzustandes oder der Luftfeuchtigkeit, weitaus bessere und fundiertere Ergebnisse liefern.

Bezüglich der Größenverteilung emittierter Partikel bestehen weiterhin Unsicherheiten und Kenntnislücken. Dies betrifft vor allem PM<sub>2,5</sub>, aber auch kleinere Fraktionen. Zu-



künftig wird möglicherweise die gröbenselektive Erfassung der emittierten Partikelanzahl aufgrund weiterer Erkenntnisse aus der toxikologischen Wirkungsforschung stärker in den Mittelpunkt rücken. Hier sind allerdings zunächst noch messtechnische Probleme zu lösen und die Standardisierung der Messverfahren und -bedingungen zu erreichen. Insbesondere für diffuse Quellen, wie die oben genannte Staubaufwirbelung, aber auch die derzeit in den Emissionserklärungen nur unvollständig dargestellten diffusen Quellen in Industriebetrieben, wie Dachreiter und andere Hallenöffnungen, sind weitere messtechnische Untersuchungen erforderlich, um die Relevanz dieser Prozesse und die damit verbundenen Minderungspotenziale beurteilen zu können. Auch hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung bzw. Inhaltsstoffe von Partikeln und ihrer toxikologischen Relevanz bestehen große Kenntnislücken und sind weitere Forschungsarbeiten wünschenswert. Offene Fragestellungen sind hier einerseits gröbensepezifische Anteile einzelner Inhaltsstoffe oder Stoffklassen und andererseits die Löslichkeit staubgebundener Inhaltsstoffe.

Die Projektion der Emissionen ins Jahr 2010 liefert eine Reduktion für Gesamtstaub um etwa 16 %, für  $PM_{10}$  um 27 % und für  $PM_{2,5}$  um 33 % gegenüber 1998, sofern die Staubaufwirbelung des Verkehrs unberücksichtigt bleibt. Wird dieser Prozess mit eingerechnet, ergibt sich eine Reduktion der Emissionen für Gesamtstaub nur um 6 %, für  $PM_{10}$  um 16 % und für  $PM_{2,5}$  um 28 %. Wesentlich geringere Emissionen im Vergleich zu 1998 ergeben sich bei den Dieselmotoren im Straßenverkehr aufgrund der EURO 3- und EURO 4-Grenzwerte. Reduktionen sind auch bei den Abgasemissionen der Ottomotoren, des sonstigen Verkehrs und der sonstigen Fahrzeuge, bei den genehmigungsbedürftigen Anlagen und den Kleinf Feuerungen zu erwarten. Die stationären Quellgruppen nehmen gegenüber dem Verkehr an Bedeutung zu. Die Dieselmotoremissionen des Straßenverkehrs bleiben aber relevant, wobei der Anteil der schweren Nutzfahrzeuge wesentlich geringer wird. Die Bedeutung der sonstigen Fahrzeuge und mobilen Geräte wird gegenüber dem Straßenverkehr deutlich zunehmen. Die sektorübergreifende Darstellung der relevantesten Quellgruppen im Jahr 2010 zeigt insgesamt fast die gleichen Emittenten wie im Jahr 1998. Die detaillierten Ergebnisse des Szenarios dienen als Referenzszenario für die Betrachtung von Minderungspotenzialen bei relevanten Quellgruppen.

Die Betrachtung von technischen Minderungsmaßnahmen und ihrer Wirksamkeit ergibt ein Reihe von spezifisch sehr wirksamen Maßnahmen. Hierbei wurden nur Optionen berücksichtigt, die auch in der Lage sind, Nanopartikel bzw. ultrafeine Stäube zu mindern. Die quellgruppenspezifischen Minderungspotenziale wurden für ausgewähl-

te wirksame Maßnahmenoptionen und relevante Quellgruppen ausgehend von Emissionsdaten des Referenzszenarios für 2010 quantifiziert.

Für Dieselmotoren werden Partikelfilter und der Ersatz mit Erdgasmotoren als wirksamste Optionen gesehen, die auch schon mittelfristig die Emissionssituation in Baden-Württemberg deutlich verbessern können. Dieselpartikelfilter haben erhebliche Minderungspotenziale sowohl beim Einsatz in Neufahrzeugen als auch bei der Nachrüstung von Altfahrzeugen. Diese Maßnahme ist sehr wirksam bei Fahrzeugen im Straßenverkehr und auch bei sonstigen Fahrzeugen in der Landwirtschaft, der Industrie und den Baumaschinen. Bei den schweren Nutzfahrzeugen und den sonstigen Fahrzeugen hat aufgrund der relativ hohen mittleren Fahrzeuglebensdauer für die Emissionssituation im Jahr 2010 die Nachrüstung das weitaus größte Potenzial. Als langfristige Strategie ist die Ausrüstung aller neuen Dieselmotoren im Verkehr mit einem Partikelfilter anzustreben. Insbesondere im Straßenverkehr können Erdgasmotoren und Neufahrzeuge mit Dieselpartikelfilter ein ähnliches Minderungspotenzial erreichen. Zur konsequenten Einführung dieser Technologien sind strengere Partikelgrenzwerte auf europäischer Ebene ab EURO 4 erforderlich. Für die Nachrüstung sind finanzielle Anreize z. B. über Steuernachlässe denkbar. Langfristig können auch alternative Antriebstechnologien wesentliche Emissionsminderungen bewirken, sofern ausreichend günstige Rahmenbedingungen bestehen.

Nicht nur beim Verkehr, sondern auch bei den stationären Quellen werden bedeutende Minderungspotenziale gesehen. Wirksame sekundäre Maßnahmen für stationäre Anlagen stellen vor allem verbesserte Gewebe- und Elektrofilter dar, die auch für die Abscheidung von ultrafeinen Partikeln gut geeignet sind. Für bestehende Filteranlagen können Nachrüstungen zur verbesserten Partikelabscheidung und die Optimierung des Anlagenbetriebs wirksam sein. Bei genehmigungsbedürftigen Feuerungsanlagen und industriellen Produktionsprozessen ergibt die Annahme einer erreichbaren Feinstaub-Abscheiderate von 99 % ein erhebliches Minderungspotenzial. Die konsequente Umsetzung des Standes der Technik kann z. B. über entsprechende Grenzwerte bezüglich der Feinstaubemissionen ( $PM_{10}$  und  $PM_{2,5}$ ) oder Anforderungen an den Fraktionsabscheidegrad von Filteranlagen im Rahmen der Verordnungen zur Durchführung des BImSchG oder der TA Luft sowohl für Neuanlagen als auch Altanlagen erreicht werden.

Allein durch die beiden Strategien Dieselpartikelfilter bzw. Erdgasmotoren im Verkehr und Filteranlagen entsprechend dem Stand der Technik bei genehmigungsbedürftigen Anlagen lässt sich unter Voraussetzung der getroffenen Annahmen eine mögliche

Emissionsminderung für das Jahr 2010 von etwa einem Drittel der Gesamtemissionen erreichen. Weitere Minderungen können insbesondere für Feuerungsanlagen durch spezifisch sehr wirksame primäre Maßnahmen, wie Technologie- und Brennstoffsubstitutionen oder Energieeinsparungen erreicht werden. Die Umsetzung dieser primären Maßnahmen ist durch ökonomische Faktoren eingeschränkt und kann nur langsam erfolgen. Diese Optionen können aber mögliche wirksame Bestandteile einer langfristigen Minderungsstrategie darstellen. Vielversprechend ist hier vor allem die Substitution des Steinkohleeinsatzes durch gasförmige Brennstoffe bei Großfeuerungen. Aber auch bei Industriefeuerungen und Kleinf Feuerungen können hiermit nicht unbedeutende Minderungen erreicht werden. Für weitere, möglicherweise bedeutende Prozesse können noch keine Aussagen zu möglichen Minderungspotenzialen gemacht werden. Dies betrifft insbesondere diffuse Emissionen aus der Industrie und die Aufwirbelung von Straßenstaub im Straßenverkehr. Weitere Erkenntnisse über die Feinstaubemissionen dieser Prozesse sind hierzu erforderlich.

## 6 Literatur

- ACEA, 1999: ACEA Programme on Emissions of Fine Particles from Passenger Cars. Association of European Automobile Manufacturers, Brüssel
- ACEA, 2002: ACEA Programme on Emissions of Fine Particles from Passenger Cars [2]. Association of European Automobile Manufacturers, Brüssel
- ADAC, 2001: Study on the influence of fuel sulphur content on exhaust emissions and fuel consumption of current and advanced engine concepts. Test report ADAC März 2001
- AEAT, 2001: The Costs of Reducing PM10 and NO2 Emissions and Concentrations in the UK: Part 1: PM10. Report AEAT/ENV/R/0342, AEA Technology plc Abingdon Oxfordshire produced for DEFRA and DTI
- AECC, 2001a: Navistar certifies first Heavy Duty Diesel Particulate Filter. Association for Emissions Control by Catalyst (AECC), Newsletter März-April 2001
- AECC, 2001b: Partikelfilter für Diesel-PKW's besteht Lebensdauer-Test. Association for Emissions Control by Catalyst (AECC), Newsletter Sept.-Okt. 2001
- AK EK, 2001: Emissionsfaktoren für nicht genehmigungsbedürftige Feuerungsanlagen. Länder-Arbeitskreis Emissionskataster (AK EK) Stand September 2000, schriftliche Mitteilung von Hr. Horn, UMEG Karlsruhe
- ANDERSSON, J. & WEDEKIND, B., 2001: DETR/SMMT/Concawe Particulate Research Programme. Summary Report May 2001, Ricardo Consulting Engineers
- BACH, H.; DITTES, W.; HEISEL, U.; GRAEF, J., 1999: Stofferfassung - Voraussetzung für Arbeitsplatzluftreinhaltung und Abluftreinigung. 10. ALS Kolloquium 1998 „Abluftreinigung in Industrie und Gewerbe“, Universität Stuttgart
- BAFA, 2002: Nicht-Eisen-Metallfachstatistik. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, (<http://www.bafa.de/1/de/service/statistik/statistik.htm>)
- BAUINDUSTRIE, 2001: Umsatz Produktion 1991 bis 2000. Die Deutsche Bauindustrie, (<http://www.bauindustrie.de>)
- BAUMBACH, G.; ZUBERBÜHLER, U.; STRUSCHKA, M.; STRAUB, D.; HEIN, K.R.G., 1999: Feinstaubuntersuchungen an Holzfeuerungen. Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD) und UMEG - Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit Baden-Württemberg im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg
- BDB, 1998: Entwicklung der Einäscherungszahlen seit 1950. schriftliche Mitteilung des Bundesverbandes des Deutschen Bestattungsgewerbes e.V. (BDB) vom 25.11.1998
- BERDOWSKI, J.; BAAS, J.; BLOOS, J.; VISSCHEDIJK, A.; ZANDVELD, P., 1997: The European Atmospheric Emission Inventory of Heavy Metals and Persistent Organic Pollutants. UBA-Forschungsbericht, TNO Institute of Environmental Sciences, Energy Research and Process Innovations, Apeldoorn (NL)
- BLANK, P.; OBERMEIER, A.; FRIEDRICH, R.; DREISEIDLER, A.; PFEIFFER, F.; BAUMBACH, G., 1999: Erstellung eines Emissionskatasters für Feuerungsanlagen in Haushalt und Kleinverbrauch. UBA-Forschungsbericht 104 02 830
- BRANDL, A.; SAMHAMMER, H.; PRESSLER, A.; STROBL, J.; SCHMIDT, J., 2000: Grundsatzuntersuchung über die Korngrößenverteilung im Abgas verschiedener Emittenten (<PM<sub>2,5</sub> und < PM<sub>10</sub>). Projekt I und II, TÜV Ecoplan Umwelt GmbH bzw. TÜV Süddeutschland im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz (LfU)

- BUWAL, 1994: Schadstoffemissionen und Treibstoffverbrauch von Baumaschinen. Umwelt-Materialien Nr. 32, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern
- BUWAL, 1996: Schadstoffemissionen und Treibstoffverbrauch des Offroad-Sektors. Umwelt-Materialien Nr. 49, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern
- BUWAL, 2000a: Offroad-Datenbank für die Berechnung von Offroad-Emissionen. Version 1.0/1.1.2000. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern
- BUWAL, 2000b: Emissionsfaktoren für stationäre Quellen. Ausg. 2000, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern
- BUWAL, 2001: Massnahmen zur Reduktion der PM10-Emissionen. Umwelt-Materialien Nr. 136 Luft, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern
- CARB, 2002: ARB Verified Particulate Matter Emission Control Devices. California Air Resource Board (CARB) (<http://www.arb.ca.gov/diesel/verifieddevices/verdev.htm>)
- CARBOTECH, 2000: PM10-Emissionsfaktoren: Mechanischer Abrieb im Offroad-Bereich. Arbeitsunterlage 16, Folgearbeiten zum BUWAL-Bericht SRU Nr. 255, Carbotech GmbH im Auftrag des BUWAL
- CONCAWE, 1998: A Study of the Number, Size and Mass of Exhaust Particles Emitted from European Diesel and Gasoline Vehicles under Steady-state and European Driving Cycle Conditions. Report No. 98/51
- COSTANTINI, M., 2000: Relation between Particle Metal Content (with Focus on Iron) and Biological Responses. 4. Internat. ETH-Conference on Nanoparticle Measurement, Zürich
- COWHERD, C. & KUYKENDAL, W., 1997: Fine Particle Components of PM10 from Fugitive Dust Sources. Air and Waste Management Association's 90th Annual Meeting & Exhibition, Toronto
- DB, 2001: Umweltbericht 2000 – Emissionsminderung. Deutsche Bahn AG
- DRECHSLER, S.; SCHOLZ, W.; AHRENS, D., 2000: Möglichkeiten der Minderung von Schadstoffen bei Bussen. Bericht, Teil 1 und Teil 2, Landesanstalt für Umweltschutz (LfU) Baden-Württemberg, Karlsruhe
- DREISEIDLER, A. & BAUMBACH, G., 1999: Erfassung des energetisch genutzten Holzverbrauchs. Teilprojekt zum UBA-Forschungsbericht 104 02 830 „Erstellung eines Emissionskatasters für Feuerungsanlagen in Haushalt und Kleinverbrauch“
- DREISEIDLER, A.; STRAUB, D.; BAUMBACH, G., 2001: Korngrößenverteilung (PM10 und PM2,5) von Staubemissionen relevanter stationärer Quellen. Teil II zu 297 44 853, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD) der Universität Stuttgart im Auftrag des Umweltbundesamtes Berlin
- DÜRING, I. & LOHMEYER, A., 2001: Validierung von PM10-Immissionsberechnungen im Nahbereich von Straßen und Quantifizierung der Feinstaubbildung von Straßen, Ingenieurbüro Lohmeyer Karlsruhe im Auftrag der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Umweltschutz und Technologie, Berlin
- DÜRING, I.; BÄCHLIN, W.; LOHMEYER, A., 2003: Quantifizierung der PM10-Emissionen durch Staubaufwirbelung und Abrieb von Straßen auf Basis vorhandener Messdaten. Projektbericht 1772, Ingenieurbüro Lohmeyer Karlsruhe im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg
- ECOCAST, 2002: PM<sub>10</sub>-Feinstaubminderung bei automatischen Holz- und Biomassefeuerungen Bericht zum Stand der Technik. ECOCAST Abfallenergie-/Umwelttechnik Luzern im Auftrag der Baudirektion Kanton Zürich, AWEL Abteilung Lufthygiene

- EHRlich, C.; NOLL, G.; KALKOFF, W.D., 1999: Meßtechnische Ermittlung von PM10- und PM2,5-Emissionen aus Industrieanlagen und Hausbrandfeuerstätten. VDI-Berichte 1443
- EICKELPASCH, D., 1998: Methodik zu Bestimmung diffuser Staubemissionen beim Schüttgutumschlag. Reihe „Logistik für die Praxis“, Verlag Praxiswissen Dortmund
- EIPPCB, 2001: Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC): Best Available Techniques for Large Combustion Plants. JRC Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies (IPTS), Sevilla, Draft dated March 2001
- ELEX, 2002: Produktübersicht. ELEX AG Schwerzenbach (CH) (<http://www.elex.ch/D/html/produkte.html>)
- EPA, 1993: Emission Factor Documentation for AP-42, Section 13.2.1, Paved Roads. MRI Project No. 9712-44, Environmental Protection Agency (EPA)
- EPA, 1995: Compilation of Air Pollutant Emission Factors. AP-42, Fifth Edition, Volume I: Stationary Point and Area Sources, Appendix B.2. Environmental Protection Agency (EPA)
- EPA, 2000: SPECIATE VERSION 3.1. Environmental Protection Agency (EPA): (<http://www.epa.gov>)
- EPA, 2001: Voluntary Diesel Retrofit Program. Environmental Protection Agency (EPA) (<http://www.epa.gov/otaq/retrofit/>)
- EPA, 2002: Compilation of Air Pollutant Emission Factors. AP-42, Fifth Edition, Volume I: Stationary Point and Area Sources, Section 13.2.1. Paved Roads. Environmental Protection Agency (EPA)
- EPEFE 1995: European Programme on Emissions, Fuels and Engine Technology. Final Report, ACEA and Europa
- FAHL, U.; BLESL, M.; RATH-NAGEL, S.; VOSS, A., 2001: Maßnahmen für den Ersatz der wegfällenden Kernenergie in Baden- Württemberg. Gutachten Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart im Auftrag des Wirtschaftsministeriums Baden-Württemberg
- FITZ, D., 1998: Evaluation of Street Sweeping as a PM10 Control Method. Final Report 98-AP-RT4H-005-FR, Center for Environmental Research and Technology, College of Engineering (CE-CERT), University of California, Riverside
- FITZ, D. & BUFALINO, C., 2002: Measurement of PM10 Emission Factors from Paved Roads Using On-Board Particle Sensors. 11th International Emission Inventory Conference Atlanta, GA, April 15-18, 2002, US EPA, Technology Transfer Network, Clearinghouse for Inventories & Emission Factors
- FREIBAUER, A. & KALTSCHMITT, M. (eds.) 2001: Biogenic Greenhouse Gas Emissions from Agriculture in Europe. Task 3 Report of the Concerted Action FAIR3-CT96-1877. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart
- FRIEDRICH, R.; KRÜGER, R.; KÜHLWEIN, J.; WICKERT, B. 2001: Luftschadstoffemissionen des Straßen- und Luftverkehrs. Jahresbericht Arbeitsgruppe Luftreinhaltung (ALS) der Universität Stuttgart, Beitrag zum 13. ALS Kolloquium "Luftreinhaltung bei Kraftfahrzeugen und Flugzeugen" am 05.10.2000 in Stuttgart
- FRONHÖFER, M. & LEIBOLD, H., 1995: Abreinigungstechnik für Schwebstofffilter zur Entstaubung großer Volumenströme bei hohen Staubkonzentrationen. Institut für Technische Chemie, FZKA-PEF 135, hrsg. v. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
- GARBEN, M., 1996: Emissionskataster Kraftfahrzeugverkehr Berlin 1993. IVU GmbH Berlin im Auftrag der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Umweltschutz und Technologie Berlin

- GARG, B.D.; CADLE, S.H.; MULAWA, P.A.; GROBLICKI, P.J., 2000: Brake Wear Particulate Matter Emissions. *Environ. Science and Technology*
- GEBBE, HARTUNG, BERTHOLD, 1998: Quantifizierung des Reifenabriebs von Kraftfahrzeugen in Berlin. ISS-Fahrzeugtechnik, TU Berlin, im Auftrag der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Umweltschutz und Technologie Berlin
- HARRISON & VAN GRIEKEN, 1998: Atmospheric Particles. IUPAC Series on Analytical and Physical Chemistry of Environmental Systems, Volume 5, John Wiley & Sons, Chichester
- HEINRICHS, H., 1993: Die Wirkung von Aerosolkomponenten auf Böden und Gewässer industrieferner Standorte: eine geochemische Bilanzierung. Habilitationsschrift, Georg-August-Universität Göttingen
- HELDSTAB, J., 2002: PM10-Emissionen des Verkehrs Statusbericht Teil Schienenverkehr. Umwelt-Materialien Luft Nr. 144, Bundesamt f. Umwelt, Wald u. Landschaft (BUWAL) Bern
- HILDEMANN, L.M.; MARKOWSKI, G.R.; CASS, G.R., 1991: Chemical Composition of Emissions from Urban Sources of Fine Organic Aerosol. *Environ., Sci. Technol.*, Volume 25
- HJS, 2000: HJS präsentiert verschiedene Abgasreinigungs-Systeme für Dieselmotoren. HJS Fahrzeugtechnik GmbH & Co, Menden, (<http://www.hjs.com/aktuelles05.htm>)
- HOLOUBEK, I., 2000: POPs in the Czech Republic - Emission Inventory and 12 Years of Measurement of the Regional Background Level. EUROTRAC-2 Symposium 2000, Garmisch-Partenkirchen
- HOLTMANN, T., 1997: Entwicklung eines Instrumentariums zur Emissionsprojektion auf der Basis des Emissionsfaktoransatzes. Europäische Hochschulschriften, Reihe 5; Volks- und Betriebswirtschaft; Bd. 2161
- HOPF, R. & VOIGT, U., 2001: Antworten des DIW zum Fragenkatalog für eine öffentliche Anhörung der Enquete-Kommission. Enquete Kommission des Deutschen Bundestages "Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung", Anhörung "Mobilität und Verkehr" am 06.12.2001 in Berlin
- HÖPFNER, U., 2001: Stellungnahme zu: Verkehrsbedingte Emissionen des Straßenverkehrs zwischen 1980 und 2020. Enquete Kommission des Deutschen Bundestages "Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung", Anhörung "Mobilität und Verkehr" am 06.12.2001 in Berlin
- HÜGLIN, C.; GEHRIG, R.; HOFER, P.; MONN, C.; BALTENSPERGER, U., 2000: Partikelemissionen (PM10 und PM2,5) des Straßenverkehrs. Chemische Zusammensetzung des Feinstaubes und Quellenzuordnung mit einem Rezeptormodell. Bericht C4 des NFP41 "Verkehr und Umwelt" EMPA, Abteilung Luftfremdstoffe/Umwelttechnik, Dübendorf (CH)
- HÜTTIG et al., 1994: Kenntnisstand über die Bewertung der Schadstoffemissionen im Flughafennahbereich. Forschungsbericht Institut für Luft- und Raumfahrt, TU Berlin im Auftrag des Bundesministers für Verkehr
- ICAO, 1999: ICAO Engine Exhaust Emissions Data Bank. International Civil Aviation Organization (Hrsg.), Montreal
- IFEU, 1998: Ermittlung von Emissionen und Minderungsmaßnahmen für persistente organische Schadstoffe in der Bundesrepublik Deutschland. UBA-Forschungsbericht 98-115, IFEU - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
- IFEU, 1999: Fortschreibung Daten- und Rechenmodell, Teil 1: Daten. UFOPLAN Nr. 298 45 105, IFEU - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
- IIASA, 2002: Rains PM Web Module. International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg (A), (<http://www.iiasa.ac.at/~rains/PM/pm-home.html>)

- INFRAS, 1995: Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs. INFRAS AG Bern im Auftrag des Umweltbundesamtes Berlin (UBA) und des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern
- INFRAS, 2000: Aktualisierung der Emissions- und Verkehrsgrundlagen. Folgearbeiten zum BUWAL-Bericht SRU Nr. 255; Arbeitsunterlage 15, INFRAS AG Bern im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern
- JM, 2001: Continuously Regenerating Technology (CRT). Johnson Matthey Catalytic Systems Division (<http://www.jmcsd.com/html/crt.html>)
- JOCKEL, W. & HARTJE, J., 1991: Datenerhebung über die Emission umweltgefährdender Schwermetalle. Forschungsbericht 91-104 02 588 TÜV Rheinland e.V. im Auftrag des Umweltbundesamtes Berlin (UBA)
- JONES, K.H., 1993: Diesel Truck Emissions - an Unrecognized Source of PCDD/F Exposure in the United States. Risk Analysis, 13(3)
- KBA, 1998: Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern am 1. Juli 1998 nach zulässigem Gesamtgewicht und Fahrzeugarten in Deutschland. Statistische Mitteilungen des Kraftfahrt-Bundesamtes, Flensburg, Reihe 1, Heft 7/1998
- KEEFE, G. & MUELLER, R., 2001: Experience with SCR Technology for Diesel Exhaust Emission Control of Trucks in Asia, Europe and North America. Asian Vehicle Emission Control Conference (AVECC) Feb. 2001, Bangkok
- KRÜGER, R., 2002: Systemanalytischer Vergleich alternativer Kraftstoff- und Antriebskonzepte in der Bundesrepublik Deutschland. Dissertation am Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart
- KÜHLWEIN, J.; FRIEDRICH, R.; OBERMEIER, A.; THELOKE, J., 1999: Abschätzung und Bewertung der Unsicherheiten hochaufgelöster NO<sub>x</sub>- und NMVOC-Emissionsdaten. Forschungsbericht zum Projekt PEF 2 96 002, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart
- LAI, 1992: Krebsrisiko durch Luftverunreinigungen. Bericht des LAI (Länderausschuss für Immissionsschutz)
- LAITINEN, A.; VAARASLAHTI, K.; KESKINEN, J., 2000: Preformed Spray Scrubber: Comparison of Precipitation Mechanisms for Charged Fine Particles. J. Aerosol Sci. Vol. 31, Suppl. 1
- LAMBRECHT, U. & HÖPFNER, U., 2000: Mögliche Diskrepanzen bei der Bestimmung von Partikeln. IFEU - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg
- LFU-BW, 2000: Entwicklung der Emissionen krebserzeugender Luftschadstoffe in Baden-Württemberg. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe
- LFUG-SN, 1999: Bericht über die Durchführung von Emissionsmessungen. Institut für Energetik und Umwelt gGmbH im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, Dresden
- LGRB, 2002: Rohstoffbericht Baden-Württemberg 2002. Informationen 14, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, Freiburg
- LLOYD'S REGISTER, 1993: Marine Exhaust Emissions Research Programme - Phase II Transient Emission Trails. Lloyd's Register House, Engineering Service Group, Croydon, U.K
- LUA-NRW, 1997: European Dioxin Inventory. Im Auftrag der Europäischen Kommission, DG XI ([http://europa.eu.int/comm/environment/dioxin/stage1/road\\_transport.pdf](http://europa.eu.int/comm/environment/dioxin/stage1/road_transport.pdf))
- LÜKEWILLE, A.; BERTOK, I.; AMANN, M.; COFALA, J.; GYARFAS, F.; HEYES, C.; KLIMONT, Z.; SCHÖPP, W., 2001: A Framework to Estimate the Potential and Costs for the



- Control of Fine Particulate Emissions in Europe. Interim Report IR-01-023 , International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg (A)
- MAYER, A., 1998: Feinstaub-Emissionen aus dem Strassenverkehr. TTM Bericht V12/11/97, TTM Niederrohrdorf im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern
- MAYER, A., 2000: "Particles". Glossary of notions attributed to particles stemming from the exhaust of internal combustion engines. TTM Niederrohrdorf
- MAYER, A. et al., 2000: VERT-Verminderung der Emissionen von Real-Dieselmotoren im Tunnelbau – Ein Verbundprojekt von SUVA, AUVA, TBG und BUWAL (1993 –1999). Abschlussbericht
- MLR-BW, 1999: Maßnahmen- und Entwicklungsplan Ländlicher Raum des Landes Baden-Württemberg für den Zeitraum 2000 – 2006 gemäß Art. 41 der Verordnung (EG) Nr. 1257/1999. Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum, Stuttgart
- MLR-BW, 2001: Schlepperbestand und Dieserverbrauch in der Landwirtschaft, Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum (MLR) Baden-Württemberg, schriftliche Mitteilung Hr. Kammler vom 15.01.2001
- MOHN, J., 2000: Emissionen und Stoffflüsse von (Rest-) Holzfeuerungen. EMPA Forschungsbericht Nr. 880002/1, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA), Dübendorf (CH)
- MOHR, M., 2000: Partikelaustritt von benzinbetriebenen Personenwagen. Forschungsbericht Nr. 200069, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA)
- MWV, 2000: Kraftstoffverbrauch im Sektor Haushalte und Kleinverbraucher getrennt in Landwirtschaft, Militär und sonstig. Mineralölwirtschaftsverband e. V., schriftliche Mitteilung Hr. Rossbach vom 04.12.2000
- NORBECK, J.M.; DURBIN, T.D.; TRUEX, T.J., 1998a: Characterization of Particulate Emissions from Gasoline-Fueled Vehicles. Report 98-VE-RT85-006-FR, Centre for Environmental Research and Technology, College of Engineering, University of California
- NORBECK, J.M.; DURBIN, T.D.; TRUEX, T.J., 1998b: Measurement of Primary Particulate Matter Emissions from Light-Duty Motor Vehicles. Report 98-VE-RT2A-001-FR, Centre for Environmental Research and Technology, College of Engineering, University of California
- NOREM, 1998: NOREM: Database for Nonregulated Emissions from Motor Vehicles. CD-ROM, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern
- PETERS, A.; SCHULZ, H.; KREYLING, W.G.; WICHMANN, H.E., 1998: Staub und Staubinhaltsstoffe/Feine und ultrafeine Partikel. In: WICHMANN, H.E. et al.: Handbuch Umweltmedizin, 14. Erg. Aufl. 10 /98
- PFEIFFER, F.; STRUSCHKA, M.J.; BAUMBACH, G., 2000: Ermittlung der mittleren Emissionsfaktoren zur Darstellung der Emissionsentwicklung aus Feuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher. Forschungsbericht 295 46 364, IVD Universität Stuttgart im Auftrag des Umweltbundesamtes Berlin
- PHILLIPS; K., HOWARD, D.A., BENTLEY, M.C., ALVAN,G., (1999): Assessment of Environmental Tobacco Smoke and Respirable Suspended Particle Exposures for Nonsmokers in Basel by Personal Monitoring. Atmospheric Environment, Issue 12 Volume 33
- PITTERMANN, R., 2002: Ermittlung von Basisemissionsdaten des dieselbetriebenen Schienenverkehrs. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben 299 43 111, WTZ Roßlau GmbH im Auftrag des Umweltbundesamtes Berlin

- PROGNOS, 1993: Die Bundesrepublik Deutschland 2000 - 2005 - 2010, Entwicklung von Wirtschaft und Gesellschaft. Prognos AG Basel
- PROGNOS, 1995: Die Energiemärkte Deutschlands im zusammenwachsenden Europa - Perspektiven bis zum Jahr 2020. Prognos AG Basel im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft
- PROGNOS, 1999: Die längerfristige Entwicklung der Energiemärkte im Zeichen von Wettbewerb und Umwelt. Prognos AG Basel im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie
- RAUTERBERG-WULFF, A., 1998: Beitrag des Reifen- und Bremsenabriebs zur Rußimmission an Straßen. Dissertation am Fachgebiet Luftreinhaltung der TU Berlin
- RAUTERBERG-WULFF, A., 2000: Untersuchung über die Bedeutung der Staubaufwirbelung für die PM10-Immission an einer Hauptverkehrsstraße. Technische Universität Berlin, Fachgebiet Luftreinhaltung
- REINHARDT, G.; UIHLEIN, A.; PATYK, A., 2003: Analyse von Maßnahmen zur Reduktion der Feinstaubbelastung durch die Landwirtschaft in Baden-Württemberg. Projekt BWE 20009, Zwischenbericht anlässlich des BWPLUS-Statuskolloquiums 12.03.2003, Karlsruhe
- RIVM, 2001: mündliche Mitteilung Nov. 2001, Netherlands Institute of Public Health and the Environment (RIVM), Laboratory for Waste Materials and Emissions
- ROGGE, W.F.; HILDEMANN, L.M.; MAZUREK, M.A.; CASS, G.R., 1993: Sources of Fine Organic Aerosol. 3. Road dust, tyre debris and organometallic brake lining dust: Roads as sources and sinks. Environ. Science and Technology, 27(9)
- SCHMIDT, E. & WEIß, B., 1998: Regenerierungsbedingte Partikelemission bei Oberflächenfiltern. Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft, Vol. 58, 1/ 2 -Januar/Februar
- SHELL, 2000: Bleigehalt im Flugbenzin. mündliche Mitteilung Hr. Dr. Brunner, Shell GmbH, Forschungslabor vom 05.12.2000
- SIGNER, M., 1996: Schwefelarmer Dieseltreibstoff (< 0,005%), z.B. Greenlife Diesel. IVECO Motorenforschung, Schweizerische Studiengesellschaft für Motorbetriebsstoffe SSM, 3/1996
- SONG, J.; CHEENKACHORN, K.; WANG, J.; PEREZ, J.; BOEHMAN, A.L.; YOUNG, P.J.; WALLER, F.J., 2001: Effect of Oxygenated Fuel on Combustion and Emissions in a Light-Duty Turbo Diesel Engine. Energy & Fuels, received 11/2001
- SPITZER, J.; ENZINGER, P.; FANKHAUSER, P.; FRITZ, W.; GOLJA, F.; STIGLBRUNNER, R., 1998: Emissionsfaktoren für feste Brennstoffe. Report No. IEF-B-07/98, Johanneum Research, Institut für Energieforschung
- SPORENBERG, F., 1999: Technischer Bericht über die Ermittlung der Emissionen des Gesamtstaubes und fraktionierter Feinstaubanteile einschließlich diffuser Emissionen der Gießerei Elsterberg GmbH. Meßbericht der Dr. Sporenberg Umweltschutz und Meßtechnik GmbH im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie
- STALA, 1992-2002: Energiebilanzen Baden-Württemberg von 1990 bis 2000. Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, Stuttgart
- STALA, 1992-2000: Der Außenhandel 1990 – 1998. Statistik von Baden-Württemberg, Band 529, Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, Stuttgart
- STALA, 2000a: Energiebilanz Baden-Württemberg 1998, Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, Stuttgart
- STALA, 2000b: Produktionsindizes für das Verarbeitende Gewerbe in Baden Württemberg 1990-1999, schriftliche Mitteilung Hr. Jung, Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, Stuttgart

- STALA, 2001a: Energieverbrauch der Industrie 1996 und 1998 in Baden-Württemberg. E-mail von Hr. Stenius vom 16.03.2001, Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, Stuttgart
- STALA, 2001b: Kommunales Abfallaufkommen in Baden-Württemberg seit 1980 nach Abfallarten. Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (<http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/UmweltVerkehr/Landesdaten/LRt0801.asp>)
- STALA, 2001c: Zum Absatz bestimmte Produktionsergebnisse ausgewählter Güterarten/Klassen des Verarbeitenden Gewerbes in Baden-Württemberg, Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, schriftliche Mitteilung von Hr. Jung vom 22.05.2001
- STBA, 1991-2001: Statistisches Jahrbuch 1990 bis 2001 für die Bundesrepublik Deutschland, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
- STBA, 1998: Statistisches Jahrbuch 1998 für die Bundesrepublik Deutschland. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
- STBA, 2000a: Statistisches Jahrbuch 2000 für die Bundesrepublik Deutschland. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
- STBA, 2000b: Tabaksteuerstatistik. schriftliche Mitteilung von Hr. Berghäuser vom 27.06.2000, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
- STRAND M.; PAGELS, J.; SZPILA, A. et al., 2002: Fly Ash Penetration through Electrostatic Precipitator and Flue Gas Condenser in a 6 MW Biomass Fired Boiler. Environmental Science & Technology, received March 28, 2002
- STRIEBEL, T. & GRUBER, A., 1997: Schwermetalle in Straßenstäuben und Schlammtopfsedimenten in Bayreuth: Konzentrationsbereiche, Einfluß der Verkehrsbelastung, Bindungsformen. Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft. Vol. 57
- TAKAI, H.; PEDERSEN, S.; JOHNSON, J.O.; et al., 1998: Concentrations and emissions of airborne dust in livestock buildings in Northern Europe. Journal of Agricultural Engineering Research, Vol. 70
- TAXI, 1999: Schwefelgehalte in Diesel und Benzin. Taximagazin München, Ausgabe 3/99
- THELOKE, J., 2002: persönliche Mitteilung Hr. Theloke, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart
- TNO, 2001: CEPMEIP Database. TNO Institute of Environmental Sciences, Energy Research and Process Innovations, Apeldoorn (NL) (<http://spiritas.host.sk/tno/cepmeip/>)
- UBA, 1989: Luftreinhaltung '88. Umweltbundesamt Berlin (Hrsg.)
- UBA, 1998: Unterlagen zum Fachgespräch am 22.07.1998, schriftliche Mitteilung von Hr. Remus vom 25.06.1998, UBA III 2.5, Umweltbundesamt Berlin
- UBA, 1999a: Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs. INFRAS AG Bern im Auftrag von Umweltbundesamt Berlin und Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern, Version 1.2
- UBA, 1999b: Einladung zum UBA-Fachgespräch „Untersuchungen zu Feinstaubemissionen“. schriftliche Mitteilung von Hr. Remus vom 02.11.1999, UBA II 4.6, Umweltbundesamt Berlin
- UBA, 2001a: Emissionsfaktoren industrieller Produktionsprozesse. schriftliche Mitteilung von Hr. Nöcker vom 22.05.2001, Umweltbundesamt Berlin
- UBA, 2001b: Deutschland - nationale Emissionen aus Verbrennung nach Emittentengruppen. schriftliche Mitteilung von Hr. Nöcker vom 25.03.2001, Umweltbundesamt Berlin
- UMEG, 1999a: Datenbasis für emissionserklärungspflichtige Anlagen Baden-Württemberg 1996. Lieferung 2/1999 des UMEG - Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit Baden-Württemberg, Karlsruhe

- UMEG, 1999b: Emissionskataster Baden-Württemberg 1996, Quellengruppe Industrie, Emissionserklärungspflichtige Anlagen. UMEG - Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit Baden-Württemberg, Karlsruhe im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg, Stuttgart
- UMEG, 2001: Emissionskataster Baden-Württemberg 1998. UMEG - Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit Baden-Württemberg, Karlsruhe im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg
- UMEG, 2003: mündliche Mitteilung Hr. Leiber vom 10.03.2003, UMEG - Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit Baden-Württemberg
- URBATZKA, E. & WILKEN, D., 2000: Kapazitätsengpässe im Flughafennetz Deutschlands. Internationales Verkehrswesen, Vol. 52, 11
- UVM, 2002: Klärschlamm Entsorgung. Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg, Stuttgart (<http://www.abfallinfodienst.de/showartikel.asp?ID=101>)
- VENKATRAM, A., 2000: A Critique of Empirical Emission Factor Models: a Case Study of the AP-42 Model for Estimating PM10 Emissions from Paved Roads. Atmospheric Environment, Issue 1 Volume 34
- VINOGRADOV, A.P., 1962: Die Durchschnittsgehalte der chemischen Elemente in den Hauptarten der Eruptivgesteine. I. Geochimija, Vol 7
- WECKWERTH, G., 2001: Verification of traffic emitted aerosol components in the ambient air of Cologne (Germany). Atmospheric Environment, accepted April 2001
- WICKERT, B., 2001: Berechnung anthropogener Emissionen in Deutschland für Ozonsimulationen - Modellentwicklung und Sensitivitätsstudien. Dissertation, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart
- WIEDMANN T.; KERSTEN, J.; BALLSCHMITER K., 2000: Art und Menge von stofflichen Emissionen aus dem Verkehrsbereich. Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg, Stuttgart
- WIESER, U. & GAEGAUF, C., 2000: Nanoparticle Emissions of Wood Combustion Processes. 1st World Conference and Exhibition on Biomass for Energy and Industry, Sevilla
- WIESER, U.; GAEGAUF, C.; MACQUAT, Y., 2001: Partikelemissionen aus Holzfeuerungen. Ökozentrum Langenbruck (CH) im Auftrag des Bundesamtes für Wald, Umwelt und Landschaft (BUWAL) und des Bundesamtes für Energie (BFE)

## 7 Anhang

Tab. 7-1: Feinstaubanteile der Emissionen aus genehmigungsbedürftigen Anlagen nach Verfahrensart/Anlagentyp und Abgasreinigung (Abschätzungen basierend auf Literaturlauswertungen)

Art-Nr.	AGR-Nr.	Anteil PM <sub>10</sub>	Anteil PM <sub>2,5</sub>	Art-Nr.	AGR-Nr.	Anteil PM <sub>10</sub>	Anteil PM <sub>2,5</sub>
1	1	0,43	0,30	1	4	0,94	0,80
2	1	0,91	0,77	2	4	1,00	0,97
3	1	0,99	0,99	3	4	0,99	0,99
4	1	0,52	0,40	6	4	0,94	0,77
5	1	0,99	0,95	7	4	0,97	0,83
6	1	0,60	0,40	8	4	0,92	0,75
7	1	0,90	0,56	9	4	0,92	0,84
8	1	0,44	0,20	10	4	0,85	0,52
9	1	0,70	0,54	11	4	0,85	0,52
10	1	0,20	0,02	12	4	0,85	0,52
11	1	0,31	0,20	1	5	0,94	0,85
12	1	0,18	0,15	2	5	0,94	0,90
1	2	0,73	0,49	4	5	0,94	0,86
2	2	0,95	0,80	6	5	0,94	0,77
4	2	0,84	0,64	7	5	0,94	0,77
6	2	0,74	0,52	8	5	0,92	0,75
7	2	0,92	0,60	9	5	0,94	0,66
8	2	0,50	0,23	10	5	0,96	0,68
9	2	0,80	0,60	12	5	0,96	0,68
10	2	0,34	0,09	1	6	0,94	0,75
11	2	0,49	0,19	2	6	0,97	0,85
12	2	0,34	0,09	3	6	0,99	0,99
1	3	0,90	0,53	4	6	0,97	0,86
2	3	0,97	0,85	5	6	0,99	0,95
4	3	0,94	0,69	6	6	0,80	0,70
5	3	0,99	0,95	7	6	0,92	0,60
6	3	0,83	0,50	8	6	0,61	0,26
7	3	0,89	0,59	9	6	0,85	0,64
8	3	0,84	0,60	10	6	0,66	0,29
9	3	0,91	0,51	11	6	0,66	0,29
10	3	0,53	0,15	12	6	0,66	0,29
11	3	0,87	0,29				
12	3	0,87	0,29				

Tab. 7-2: Einzelergebnisse der Emissionsermittlung für den Straßenverkehr in Baden-Württemberg 1998

Quellgruppe KFZ	Spezifikation	PM [Mg]	PM <sub>10</sub> [Mg]	PM <sub>2,5</sub> [Mg]
Dieselmotoren	Bus – Autobahn	42	42	40
Dieselmotoren	Bus – außerorts	79	79	75
Dieselmotoren	Bus – innerorts	114	114	109
Dieselmotoren	LKW o. Anhänger – Autobahn	176	175	168
Dieselmotoren	LKW o. Anhänger – außerorts	313	311	298
Dieselmotoren	LKW o. Anhänger – innerorts	240	239	228
Dieselmotoren	LKW m. Anhänger – Autobahn	627	623	596
Dieselmotoren	LKW m. Anhänger – außerorts	344	341	327
Dieselmotoren	LKW m. Anhänger – innerorts	168	167	160
Dieselmotoren	Sattelzüge – Autobahn	133	132	127
Dieselmotoren	Sattelzüge – außerorts	78	78	75
Dieselmotoren	Sattelzüge – innerorts	45	45	43
Dieselmotoren	PKW – Autobahn	375	373	357
Dieselmotoren	PKW – außerorts	421	418	400
Dieselmotoren	PKW – innerorts	420	417	399
Dieselmotoren	LNF – Autobahn	79	78	75
Dieselmotoren	LNF – außerorts	76	76	73
Dieselmotoren	LNF – innerorts	53	53	50
Dieselmotoren	Kaltstart – PKW, LNF	160	159	152
Ottomotoren	PKW mit geregelter Kat.	223	203	192
Ottomotoren	PKW mit ungeregelter Kat.	19	18	17
Ottomotoren	PKW ohne Kat.	131	126	118
Ottomotoren	LNF mit geregelter Kat.	2,1	1,9	1,7
Ottomotoren	LNF mit ungeregelter Kat.	0,0	0,0	0,0
Ottomotoren	LNF ohne Kat.	5,2	4,9	4,6
Ottomotoren	KRAD 2-Takt ohne Kat.	44	44	37
Ottomotoren	KRAD 4-Takt ohne Kat.	11	10	10
Reifenabrieb	PKW (4 Reifen)	2.832	436	22
Reifenabrieb	KRAD (2 Reifen)	35	5,4	0,3
Reifenabrieb	LNF (4,6 Reifen)	159	25	1,2
Reifenabrieb	SNF (6,7 Reifen)	2.370	182	9,1
Bremsenabrieb	PKW	240	206	151
Bremsenabrieb	KRAD	6,0	5,1	3,8
Bremsenabrieb	LNF	10	8,9	6,5
Bremsenabrieb	SNF	51	44	32
Straßenstaub	Straßenverkehr gesamt	11.186	4.992	1.257
<b>Straßenverkehr gesamt ohne Straßenstaub</b>		<b>10.083</b>	<b>5.239</b>	<b>4.356</b>

Tab. 7-3: Einzelergebnisse der Emissionsermittlung für den sonstigen Verkehr und sonstige Fahrzeuge und mobile Geräte in Baden-Württemberg 1998

Quellgruppe	Spezifikation	PM [Mg]	PM <sub>10</sub> [Mg]	PM <sub>2,5</sub> [Mg]
Flugverkehr zivil	Triebwerke LTO-Zyklen	27	27	27
Flugverkehr militärisch	Triebwerke insgesamt	19	19	19
Flughäfen Vorfeldverkehr	Ottomotoren	1,3	1,3	1,2
Flugverkehr	Reifenabrieb	13	4,0	0,2
Flugverkehr	Bremsenabrieb	0,003	0,003	0,002
Flugverkehr	Pistenstaub/-abrieb	78	15	3,8
Bahnverkehr	Dieseltraktion	189	170	161
Bahnverkehr	Schienenabrieb	168	84	25
Bahnverkehr	Radabrieb	39	19	5,8
Bahnverkehr	Fahrleitungsabrieb	4,9	4,9	0,7
Bahnverkehr	Bremsenabrieb	369	119	55
Schiffsverkehr	Dieselmotoren	248	223	211
<b>Sonstiger Verkehr gesamt</b>		<b>1.157</b>	<b>686</b>	<b>510</b>
Sonst. Fzg. Militär	Dieselmotoren	156	149	141
Sonst. Fzg. Militär	Ottomotoren	4,2	4,0	3,8
Sonst. Fzg. Militär	Reifenabrieb	1,3	0,4	0,02
Sonst. Fzg. Militär	Bremsenabrieb	0,05	0,04	0,03
Sonst. Fzg. Militär	Staubaufwirbelung	184	35	8,9
Sonst. Fzg. Baumaschinen	Dieselmotoren	715	679	644
Sonst. Fzg. Baumaschinen	Reifenabrieb	10	1,0	0,1
Sonst. Fzg. Baumaschinen	Ketten-/Schaufelabrieb	22	2,2	0
Sonst. Fzg. Baumaschinen	Staubaufwirbelung	68	6,8	1,7
Sonst. Fzg. Landwirtschaft	Dieselmotoren	1.029	978	926
Sonst. Fzg. Landwirtschaft	Ottomotoren	63	60	56
Sonst. Fzg. Landwirtschaft	Reifen	335	30	5,0
Sonst. Fzg. Landwirtschaft	Bremsen	17	14	10
Sonst. Fzg. Landwirtschaft	Staubaufwirbelung	12	1,8	0,5
Sonst. Fzg. Industrie	Dieselmotoren	251	238	226
Sonst. Fzg. Industrie	Ottomotoren	41	39	37
Sonst. Fzg. Industrie	Reifenabrieb	2,6	0,8	0,04
Sonst. Fzg. Industrie	Bremsenabrieb	0,5	0,5	0,3
Sonst. Fzg. Industrie	Staubaufwirbelung	14	2,7	0,7
<b>Sonstige Fahrzeuge und mobile Geräte gesamt</b>		<b>2.927</b>	<b>2.243</b>	<b>2.061</b>

Tab. 7-4: Einzelergebnisse der Emissionsermittlung für genehmigungsbedürftige Feuerungsanlagen (1. Obergruppe 4. BImSchV und Müllverbrennung) in Baden-Württemberg 1996

Quellgruppe	BImSchV-Nr.	PM [Mg]	PM <sub>10</sub> [Mg]	PM <sub>2,5</sub> [Mg]
Kraftwerke > 50 MW für feste, flüssige und gasförmige Brennstoffe	01.01/1	1.188	798	634
Feuerungsanlagen >= 50 MW für feste und flüssige Brennstoffe	01.02A/1	17	16	14
Feuerungsanlagen 1 - < 50 MW feste u. flüssige Brennstoffe (außer Heizöl EL)	01.02A/2	268	202	145
Feuerungsanlagen 5 - < 50 MW Heizöl EL	01.02B/2	11	8,3	6,8
Feuerungsanlagen 10 - < 50 MW gasförmige Brennstoffe	01.02C/2	7,5	6,0	5,0
Feuerungsanlagen >= 1 MW andere Brennstoffe	01.03/1	26	24	21
Verbrennungsmotoranlagen >= 1 MW andere Brennstoffe	01.04B/2	3,5	3,4	3,3
Gasturbinen >= 50 MW	01.05/1	3,6	3,5	3,5
Gasturbinen < 50 MW	01.05/2	5,2	4,4	4,2
Sonstige Anlagen 1. Obergruppe (außer 01.09 /2)	01.14/1, 01.04A/2, 01.02B/1, 01.03/2	0,4	0,3	0,2
Abfallbeseitigungsanlagen durch Verbrennung fester, flüssiger oder gasförmiger Stoffe	08.01/1	7,7	7,1	5,4
<b>Feuerungen gen.-bed. 1996</b>		<b>1.538</b>	<b>1.073</b>	<b>843</b>
<b>Feuerungen gen.-bed. für 1998 abgeleitet</b>		<b>1.456</b>	<b>1.016</b>	<b>798</b>



Tab. 7-5: Einzelergebnisse der Emissionsermittlung für genehmigungsbedürftige Produktionsprozesse in Baden-Württemberg 1996 nach BImSchV-Nr.

Quellgruppe	BImSchV-Nr.	PM [Mg]	PM <sub>10</sub> [Mg]	PM <sub>2,5</sub> [Mg]
Mahlen oder Trocknen v. Kohle > 1 t/h	01.09/2	1,0	0,4	0,2
Brechen, Mahlen, Klassieren von Gestein	02.02/2	2.136	831	368
Zementherstellung	02.03/1	492	359	207
Brennen von mineralischen Stoffen	02.04/2	116	81	46
Mahlen von mineralischen Stoffen	02.05/2	27	21	10
Blähen von Perliten, Schiefer oder Ton	02.07/2	35	23	12
Herstellung von Glas oder Glasfasern	02.08/1	42	37	26
Brennen keramischer Erzeugnisse Besatzdichte $\geq 100 \text{ kg/m}^3$	02.10/1, 02.10/2	38	24	13
Herstellung von Beton oder Mörtel $\geq 100 \text{ m}^3/\text{h}$	02.13/2	24	5,9	1,1
Bitumenschmelz-/ Mischanlagen $\geq 200 \text{ t/h}$	02.15/1	86	35	15
Sonstige Anlagen 2. Obergruppe	02.09/2	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Stahlerzeugung und Erschmelzen von Gusseisen oder Stahl $\geq 2,5 \text{ t/h}$	03.03/1	24	21	11
Erschmelzen v. Zink o. Zinklegierungen $\geq 1000 \text{ kg}$ o. sonst. NE-Metalle $\geq 500 \text{ kg}$	03.04/1	22	17	11
Walzen von NE-Schwermetall $\geq 8 \text{ t/h}$ oder von NE-Leichtmetall $\geq 2 \text{ t/h}$	03.06/1	3,9	2,8	2,1
Eisen-, Stahlgießereien $\geq 80 \text{ t}$ Gussteile/Monat	03.07/1	168	138	86
Gießereien für NE-Metalle	03.08/1	43	32	18
Druckgussgießereien mit Zuhaltekräften $\geq 2 \text{ MN}$	03.08/2	15,0	12,4	8,6
Aufbringen metallischen Schutzschichten mittels Bäder	03.09A/1, 03.09A/2	2,9	2,4	1,5
Zerkleinern von Schrott mit Rotormühlen > 500 kW	03.14/1	9,3	7,6	4,8
Strahlanlagen außerhalb geschl. Räume	03.20/2	1,7	0,7	0,4
Sonstige Anlagen 3. Obergruppe		4,8	3,8	2,7
Herstellung von anorganischen Chemikalien	04.01A/1	22	19	14
Herstellung v. Metallen u. Nichtmetallen	04.01B/1	6,7	6,0	3,4
Herstellung von Korund oder Karbid	04.01C/1	6,2	5,1	2,4
Herstellung organischer Chemikalien/Lösungsmittel	04.01G/1	3,1	2,7	2,0
Herstellung von Kunststoffen oder Chemiefasern	04.01H/1	11	7,3	5,2

## Anhang

Quellgruppe	BImSchV-Nr.	PM [Mg]	PM <sub>10</sub> [Mg]	PM <sub>2,5</sub> [Mg]
Herstellung von Teerfarben oder - zwischenprodukten	04.01O/1	4,2	3,8	3,1
Verarbeitung von Erdöl, Erdölerzeugnis- sen	04.04 /1	320	193	155
Herstellung von Firnis, Lacken, Druck- farben >= 5 t/d	04.10/2	5,6	4,4	1,8
Sonstige Anlagen 4. Obergruppe		1,4	1,2	0,8
Lackier-/Trocknungsanlagen, Lösemit- teleinsatz >= 250 kg/h	05.01A/1	100	71	55
Lackier-/Trocknungsanlagen, Lösemit- teleinsatz 25 - < 250 kg/h	05.01A/2	18	14	12
Rotationsdruckmaschinen Lösemittelein- satz >= 250 kg/h	05.02B/1	3,2	2,6	1,2
Tränken oder Überziehen von Stoffen mit Teer, Teeröl, Bitumen	05.04/2	25	21	7,4
Herstellung bahnenförmiger Materialien	05.06/2	3,5	3,0	1,2
Sonstige Anlagen 5. Obergruppe		5,8	4,9	3,6
Zellstoffgewinnung aus Holz, Stroh oder ähnlichen Faserstoffen	06.01/1	23	14	9,1
Fabrikmäßige Papier- und Pappenher- stellung, Bahnlänge >= 75 m	06.02/2	89	73	55
Herstellung von Holzfaserplatten, Holz- spanplatten oder Holzfasermatten	06.03/1	60	49	29
Sonstige Anlagen 6. Obergruppe	06.04/2	0,1	0,1	0,1
Räucheranlagen für Fleisch oder Fisch >= 1 t/Woche	07.05/2	51	48	46
Herstellung von Gelatine, Haut-/Leder- /Knochenleim	07.08/1	2,5	2,3	2,0
Malzdarren	07.20/2	8,9	6,3	3,6
Mühlen für Nahrungs- oder Futtermittel >= 500 t/d	07.21/1	21	11	3,3
Mühlen für Nahrungs- oder Futtermittel 100 - < 500 t/d	07.21/2	6,9	4,5	1,7
Extrahieren pflanzlicher Fette oder Öle	07.23/1	43	17	4,6
Zuckerfabriken	07.24/1	38	30	22
Trocknung von Grünfutter	07.25/2	39	19	9,0
Melassebrennereien, Trebertrocknung, Brauereien >= 5.000 hl/a	07.27/2	7,8	5,2	3,7
Rösten von Kaffeeersatzprodukten, Ge- treide, Kakao oder Nüssen >= 75 kg/h	07.30/2	1,8	0,8	0,4
Sonstige Anlagen 7. Obergruppe		2,9	1,8	1,1

## Anhang

Quellgruppe	BImSchV-Nr.	PM [Mg]	PM <sub>10</sub> [Mg]	PM <sub>2,5</sub> [Mg]
Rückgewinnung durch Verbrennen aus festen Stoffen	08.03/1	2,4	2,0	1,2
Aufbereitung fester, flüssiger o. gasförmiger Abfälle >= 10 t/h ohne Sortierung	08.04/1	2,8	1,9	1,0
Aufbereitung fester, flüssiger o. gasförmiger Abfälle 1 - <= 10 t/h	08.04A/2	2,3	1,9	1,2
Abfallsortieranlagen f. Hausmüll >= 1 t/h	08.04B/2	5,0	2,5	1,1
Lagerung oder Behandlung von Abfällen	08.11/2	3,8	0,7	0,6
Sonstige Anlagen 8. Obergruppe ohne 08.01		1,2	0,6	0,4
Umschlag fester Abfälle >= 100 t/d	09.10/1	3,3	0,6	0,3
Umschlag Getreide gen.-bed.	09.11/2	58	24	12
Umschlag Futtermittel gen.-bed.	09.11/2	6,7	2,8	1,4
Umschlag Dünger gen.-bed.	09.11/2	8,3	3,5	1,7
Umschlag Petrolkoks gen.-bed.	09.11/2	11	4,5	2,3
Umschlag Steinkohle gen.-bed.	09.11/2	75	31	16
Umschlag Steinsalz gen.-bed.	09.11/2	126	53	26
Umschlag Steine und Erden gen.-bed.	09.11/2	33	14	7,0
Umschlag Gips gen.-bed.	09.11/2	7,9	3,3	1,7
Umschlag sonstig gen.-bed.	09.11/2	5,3	2,2	1,1
Sonstige Anlagen 9. Obergruppe		0,7	0,7	0,6
Vulkanisieren von Natur- oder Synthekautschuk >= 50 kg/h	10.07/2	3,5	2,7	1,5
Herst. von Bautenschutz-, Reinigungsmitteln mit organischem Lösemittel >= 1 t/h	10.08/2	4,4	2,4	1,3
Prüfstände für Verbrennungsmotoren, Gasturbinen >= 300 kW	10.15/2	18	18	16
Krematorien	10.24/2	12	7,1	5,5
Sonstige Anlagen 10. Obergruppe		2,5	1,9	1,2
<b>Prozesse gen.-bed. 1996</b>		<b>4.613</b>	<b>2.479</b>	<b>1.405</b>
<b>Prozesse gen.-bed. für 1998 abgeleitet</b>		<b>4.381</b>	<b>2.344</b>	<b>1.324</b>

Tab. 7-6: Einzelergebnisse der Emissionsermittlung für Kleinfeuerungen in Baden-Württemberg 1998

Quellgruppe	Spezifikation	PM [Mg]	PM <sub>10</sub> [Mg]	PM <sub>2,5</sub> [Mg]
Feuerungen Kleinverbraucher	Steinkohle	60	27	8,9
Feuerungen Kleinverbraucher	Braunkohle	19	18	10
Feuerungen Kleinverbraucher	Heizöl S	34	28	23
Feuerungen Kleinverbraucher	Heizöl EL	124	124	96
Feuerungen Kleinverbraucher	Erdgas und sonst. Gase	1,2	1,2	1,2
Feuerungen Kleinverbraucher	Holz	214	199	172
Feuerungen Haushalte	Steinkohlenkoks	0,3	0,2	0,1
Feuerungen Haushalte	Steinkohle	96	48	24
Feuerungen Haushalte	Braunkohle	134	120	110
Feuerungen Haushalte	Heizöl EL	206	206	193
Feuerungen Haushalte	Erdgas und sonst. Gase	3,5	3,5	3,5
Feuerungen Haushalte	Holz	682	671	639
Feuerungen Industrie	Heizöl EL	25	25	19
Feuerungen Industrie	Holz	49	45	39
Feuerungen Industrie	sonstige	12	8,2	5,8
<b>Kleinfeuerungen (nach Abgleich mit gen.-bed. Anlagen)</b>		<b>1.660</b>	<b>1.524</b>	<b>1.344</b>

Tab. 7-7: Einzelergebnisse der Emissionsermittlung für sonstige Prozesse, nicht genehmigungsbedürftig in Baden-Württemberg 1998

Quellgruppe	PM [Mg]	PM <sub>10</sub> [Mg]	PM <sub>2,5</sub> [Mg]
Umschlag in Häfen	2,0	1,0	0,1
Umschlag Getreide nicht gen.-bed.	158	47	9,5
Feuerwerke	364	328	219
Rauchen von Tabak	165	165	165
Ernten von Getreide	2,5	1,0	0,2
Trocknen von Getreide	56	29	23
Tierhaltung Legehennen	53	18	1,7
Tierhaltung Masthühner	49	29	4,5
Tierhaltung Schweine	1.179	530	94
Tierhaltung Rinder	844	380	84
Tierhaltung Schafe	11	4,2	1,3
Tierhaltung Pferde	34	13	4,0
Tierhaltung Mastenten und Gänse	4,2	2,4	0,4
Tierhaltung Truthähne	108	63	10
Schreinereien	339	271	47
Baugewerbe (Asphalt-, Beton-, Mörtelherstellung)	57	30	8,9
Steinbrüche (Umschlag und Sprengen)	711	370	36
Salzgewinnung	201	18	10
<b>Sonstige Prozesse nicht gen.-bed.</b>	<b>4.339</b>	<b>2.300</b>	<b>719</b>

Tab. 7-8: Verwendete Emissionsfaktoren für die Abschätzung der Emissionen organischer Verbindungen

Quellgruppe	PAK	BaP	PCDD/F (TEQ)	Einheit	Literaturquellen
Verkehr – Reifenabrieb	2,3E-02	3,9E-04	k.A.	%	ROGGE et al. (1993)
Verkehr – Bremsenabrieb	1,6E-04	7,4E-05	k.A.	%	ROGGE et al. (1993)
Kleinfeuerungen – Steinkohle	3,0E-01	1,4E-03	4,0E-09	kg/TJ	AK EK (2001)
Kleinfeuerungen – Steinkohlenkoks	7,0E-01	8,8E-03	2,0E-08	kg/TJ	AK EK (2001)
Kleinfeuerungen – Braunkohle	1,8E+00	2,0E-02	3,8E-08	kg/TJ	AK EK (2001)
Kleinfeuerungen – Heizöl EL	2,4E-03	2,0E-05	1,8E-09	kg/TJ	AK EK (2001)
Kleinfeuerungen – Gase	2,7E-04	2,7E-06	1,4E-09	kg/TJ	AK EK (2001)
Kleinfeuerungen – Holz	6,2E+00	1,3E-01	1,5E-08	kg/TJ	AK EK (2001)
Flugverkehr – Kerosin	2,1E-04	3,5E-06	1,0E-09	kg/t	BERDOWSKI et al. (1997), LAI (1992)
Sonstiger Verkehr – Diesel	5,9E-03	2,5E-04	1,0E-09	kg/t	BERDOWSKI et al. (1997), IFEU (1998)
Sonstige Fahrzeuge – Diesel	5,9E-03	2,5E-04	1,0E-09	kg/t	BERDOWSKI et al. (1997), IFEU (1998)
Sonstige Fahrzeuge – Benzin	3,0E-03	6,5E-05	1,1E-10	kg/t	HOLOUBEK (2000), LAI (1992)

Tab. 7-9: Verwendete Anteile an den Staubemissionen für die Abschätzung der Emissionen ausgewählter Elemente

Quellgruppe	Pb	Cd	As	Cr	Literaturquellen
Kleinfeuer. Haushalte – Steinkohle	9,5E-04	2,3E-05	2,3E-05	1,3E-05	PFEIFFER et al. (2000), AK EK (2001)
Kleinfeuer. Haushalte – Braunkohle	3,8E-05	2,8E-06	5,2E-05	1,6E-05	PFEIFFER et al. (2000), AK EK (2001)
Kleinfeuer. Haushalte – Heizöl EL	3,3E-03	1,3E-05	4,0E-04	3,3E-04	AK EK (2001)
Kleinfeuer. Haushalte – Gase	0	0	0	0	EPA (2000)
Kleinfeuer. Haushalte – Holz	4,1E-04	6,3E-05	6,6E-06	2,0E-04	PFEIFFER et al. (2000)
Kleinfeuer. sonst. – Steinkohlenkoks	6,8E-04	8,3E-05	1,1E-03	2,7E-03	PFEIFFER et al. (2000), BERDOWSKI et al. (1997)
Kleinfeuer. sonst. – Steinkohle	7,8E-04	1,4E-05	2,5E-05	7,6E-06	PFEIFFER et al. (2000)
Kleinfeuer. sonst. – Braunkohle	3,8E-05	2,8E-06	4,9E-05	1,6E-05	AK EK (2001)
Kleinfeuer. sonst. – Heizöl S	1,3E-04	6,6E-06	1,6E-05	1,3E-05	AK EK (2001)
Kleinfeuer. sonst. – Heizöl EL	2,9E-03	1,2E-05	3,5E-04	2,9E-04	AK EK (2001)
Kleinfeuer. sonst. – Gase	0	0	0	0	EPA (2000)
Kleinfeuer. sonst. – Holz	2,4E-03	7,5E-05	5,5E-05	3,9E-04	PFEIFFER et al. (2000)
Kleinfeuer. sonst. – Steinkohlenkoks	1,6E-02	1,1E-04	1,6E-04	2,7E-03	PFEIFFER et al. (2000), BERDOWSKI et al. (1997)

Anhang

Quellgruppe	Pb	Cd	As	Cr	Literaturquellen
Öff. Kraft-/Heizwerke - Steinkohle	2,5E-04	4,2E-06	5,0E-04	3,3E-04	EPA (2000)
Öff. Kraft-/Heizwerke - Heizöl	1,2E-02	1,3E-05	8,0E-04	7,1E-04	EPA (2000)
Öff. Kraft-/Heizwerke - Gase	0	0	0	0	EPA (2000)
Öff. Kraft-/Heizwerke - Holz	2,5E-03	2,7E-05	1,6E-05	3,3E-05	BERDOWSKI et al. (1997), EPA (2000)
Ind. Kraft-/Heizwerke - Steinkohle	2,5E-04	4,2E-06	5,0E-04	3,3E-04	EPA (2000)
Ind. Kraft-/Heizwerke - Diesel	7,0E-05	2,7E-05	2,1E-04	2,6E-04	HEINRICHS (1993)
Ind. Kraft-/Heizwerke - Heizöl EL	2,6E-04	1,3E-05	8,0E-04	2,0E-05	EPA (2000)
Ind. Kraft-/Heizwerke - Heizöl S	1,1E-03	1,5E-04	3,0E-04	4,7E-04	EPA (2000)
Ind. Kraft-/Heizwerke - Gase	0	0	0	0	EPA (2000)
Ind. Kraft-/Heizwerke - Holz	2,5E-03	2,7E-05	1,6E-05	3,3E-05	BERDOWSKI et al. (1997), EPA (2000)
Müllverbrennung	2,6E-02	8,2E-04	2,0E-04	7,5E-04	HEINRICHS (1993)
Klärschlammverbrennung	2,9E-02	8,3E-03	2,4E-06	5,8E-03	JOCKEL & HARTJE (1991), EPA (2000)
Verkehr - Diesel	7,0E-05	2,7E-05	1,5E-06	1,1E-05	HEINRICHS (1993)
Verkehr - Benzin	4,0E-04	4,5E-05	3,7E-04	3,0E-04	HILDEMANN et al. (1991)
Verkehr - Reifenabrieb	1,6E-04	9,0E-06	6,0E-06	3,0E-05	HEINRICHS (1993)
Verkehr - Bremsenabrieb	5,0E-05	6,5E-06	1,0E-05	1,2E-03	HILDEMANN et al. (1991), WESTERLUND (2001)
Verkehr - Straßenstaub	1,5E-04	2,2E-06	1,5E-06	3,5E-05	STRIEBEL & GRUBER (1997), VINOGRADOV (1962)
Verkehr - Natürlicher Staub	k.A.	9,8E-08	1,5E-06	3,5E-05	VINOGRADOV (1962)
Flugverkehr - Flugbenzin	7,0E-03	k.A.	k.A.	k.A.	SHELL (2000)
Flugverkehr - Kerosin	0	2,0E-08	9,9E-08	9,9E-08	BERDOWSKI et al. (1997)
Bahnverkehr - Diesel	7,0E-05	2,7E-05	1,5E-06	1,1E-05	HEINRICHS (1993)
Bahnverkehr - Schienen-, Radabrieb	k.A.	k.A.	1,8E-04	k.A.	WECKWERTH (2001)
Schiffsverkehr - Diesel	1,5E-07	1,0E-08	5,0E-08	5,0E-08	LLOYDS REGISTER (1993)

Tab. 7-10: Trendfaktoren (TF) und Datenquellen (Prognose oder Aktivitätszeitreihe Vergangenheit) für die Projektion von Aktivitäten von 1998 nach 2010

Quellgruppe	TF <sub>A</sub>	Datenquellen
<b>Straßenverkehr</b>		
Busse – Fahrleistungen	1,16	IFEU (1999)
LKW ohne Anhänger – Fahrleistungen	1,17	HOPF & VOIGT (2001)
LKW mit Anhänger – Fahrleistungen	1,19	HOPF & VOIGT (2001)
Sattelzüge – Fahrleistungen	1,55	HOPF & VOIGT (2001)
PKW Diesel – Fahrleistungen	1,97	abgeleitet v. HÖPFNER (2001), Annahme Dieselanteil 2010 37 %
LNF Diesel – Fahrleistungen	1,42	abgeleitet v. IFEU (1999), Annahme Dieselanteil 2010 80 %
PKW Otto mit geregelter Kat – Fahrleistungen	1,05	abgeleitet v. HÖPFNER (2001), Annahme Dieselanteil 2010 37 %
PKW Otto mit ungeregelter Kat – Fahrleistungen	0,03	UBA (1999a)
PKW Otto ohne Kat – Fahrleistungen	0,01	UBA (1999a)
LNF Otto mit geregelter Kat – Fahrleistungen	1,20	abgeleitet v. IFEU (1999), Annahme Dieselanteil 2010 80 %
LNF Otto mit ungeregelter Kat – Fahrleistungen	0,00	UBA (1999a)
LNF Otto ohne Kat – Fahrleistungen	0,01	UBA (1999a)
KRAD Otto 2-Takt ohne Kat – Fahrleistungen	0,80	HOPF & VOIGT (2001)
KRAD Otto 4-Takt ohne Kat – Fahrleistungen	1,49	HOPF & VOIGT (2001)
PKW gesamt – Fahrleistungen	1,14	HOPF & VOIGT (2001)
KRAD gesamt – Fahrleistungen	1,32	HOPF & VOIGT (2001)
LNF gesamt – Fahrleistungen	1,23	IFEU (1999)
SNF gesamt – Fahrleistungen	1,22	HOPF & VOIGT (2001)
KFZ gesamt – Fahrleistungen	1,15	HOPF & VOIGT (2001)
<b>Sonstiger Verkehr und sonstige Fahrzeuge und mobile Geräte</b>		
Flugverkehr zivil – Starts Flughafen Stuttgart	1,30	URBATZKA & WILKEN (2000)
Flugverkehr militärisch - Kraftstoffverbrauch	0,95	PROGNOS (1999)
Bahnverkehr Dieselloks - Dieselverbrauch	0,77	STALA (1992-2002)
Bahnverkehr gesamt - Verkehrsleistung	1,16	PROGNOS (1999)
Schiffsverkehr – Güterumschlag	0,90	STBA (1991-2001)
Sonst. Fzg. Militär – Dieselverbrauch	0,89	PROGNOS (1999)
Sonst. Fzg. Militär – Benzinverbrauch	0,92	PROGNOS (1999)
Sonst. Fzg. Bauwirtschaft – Dieselverbrauch	0,90	STALA (1992-2002)
Sonst. Fzg. Landwirtschaft - Kraftstoffverbrauch	0,77	MLR-BW (2001)
Sonst. Fzg. Industrie – Dieselverbrauch	0,90	STALA (1992-2002)
Sonst. Fzg. Industrie – Benzinverbrauch	0,74	STALA (1992-2002)

Quellgruppe	TF <sub>A</sub>	Datenquellen
<b>Genehmigungsbedürftige Feuerungsanlagen</b>		
Öff. Kraft-/Heizwerke – Steinkohle	1,03	STALA (1992-2002)
Öff. Kraft-/Heizwerke – Heizöle	0,39	STALA (1992-2002)
Öff. Kraft-/Heizwerke – Gase	2,01	STALA (1992-2002)
Öff. Kraft-/Heizwerke – Holz (Biomasse)	1,30	Annahme (Klimaschutzziel)
Ind. Kraft-/Heizwerke – Steinkohle	0,16	STALA (1992-2002)
Ind. Kraft-/Heizwerke – Diesel	1,00	k.A.
Ind. Kraft-/Heizwerke – Heizöle	0,64	STALA (1992-2002)
Ind. Kraft-/Heizwerke – Gase	1,18	STALA (1992-2002)
Ind. Kraft-/Heizwerke – Holz (Biomasse)	1,38	STALA (1992-2002)
Ind. Kraft-/Heizwerke – Ölschiefer	1,00	k.A.
Müllverbrennung	1,39	STALA (1992-2002)
Klärschlammverbrennung	2,70	abgeleitet v. UVM (2002)
Kleinverbraucher gesamt	1,00	k.A.
<b>Genehmigungsbedürftige Produktions- und sonstige Prozesse</b>		
Produktionsindex Ernährungsgewerbe	1,14	STALA (2000b)
Produktionsindex Holzgewerbe	1,20	STALA (2000b)
Produktionsindex Druckgewerbe	1,18	STALA (2000b)
Produktionsindex Chemische Industrie	1,38	STALA (2000b)
Produktionsindex Herst. Gummi-/ Kunststoffwaren	1,11	STALA (2000b)
Produktionsindex Glasgewerbe, Keramik, Verarbei-	1,08	STALA (2000b)
Produktionsindex Metallerzeugung und -bearbeitung	1,29	STALA (2000b)
Produktionsindex Fahrzeugbau	1,30	STALA (2000b)
Gewinnung Steine und Erden	0,95	abgeleitet v. LGRB (2002)
Zementherstellung in D	1,04	STBA (1991-2001)
EST-Guss in D	0,90	STBA (1991-2001)
NE-Metall-Guss in D	1,57	BAFA (2002)
Raffinerien – Rohöleinsatz	0,88	STALA (1992-2002)
Industrielle Lackiererei in D – NMVOC-Emissionen	1,57	THELOKE (2002)
Papier- und Pappenherstellung in D	1,11	STBA (1991-2001)
Räuchereien in D	1,36	STBA (1991-2001)
Zuckerherstellung in D	1,12	STBA (1991-2001)
Aufkommen Haus- und Sperrmüll	0,75	STALA (2001b)
Aufkommen Wertstoffsartierung	1,29	STALA (2001b)
Aufkommen Gewerbe- und Baustellenabfall	0,75	STALA (2001b)
Krematorien – Kremationen	1,19	BDB (1998)
Umschlag Getreide – Einfuhr & Produktion	1,11	STALA (1992-2000)
Umschlag Dünger – Einfuhr & Produktion	0,70	STALA (1992-2000)
Umschlag Steinkohle – Einfuhr & Produktion	1,16	STALA (1992-2000)
Umschlag Steine und Erden – Einfuhr & Produktion	0,95	STALA (1992-2000)
Umschlag Gips – Einfuhr & Produktion	0,74	STALA (1992-2000)
Umschlag sonstig – Einfuhr & Produktion	1,08	STALA (1992-2000)



Quellgruppe	TF <sub>A</sub>	Datenquellen
<b>Kleinfeuerungen</b>		
Kleinverbraucher – Verbrauch Steinkohlenkoks	0,22	PFEIFFER et al. (2000)
Kleinverbraucher – Verbrauch Steinkohle	0,28	PFEIFFER et al. (2000)
Kleinverbraucher – Verbrauch Braunkohle	0,34	PFEIFFER et al. (2000)
Kleinverbraucher – Verbrauch Heizöl S	0,41	PFEIFFER et al. (2000)
Kleinverbraucher – Verbrauch Heizöl EL	0,88	PFEIFFER et al. (2000), EnEV
Kleinverbraucher – Verbrauch Gase	1,10	PFEIFFER et al. (2000)
Kleinverbraucher – Verbrauch Holz	1,30	Annahme (Klimaschutzziel)
Haushalte – Verbrauch Steinkohlenkoks	0,38	PFEIFFER et al. (2000)
Haushalte – Verbrauch Steinkohle	0,38	PFEIFFER et al. (2000)
Haushalte – Verbrauch Braunkohle	0,36	PFEIFFER et al. (2000)
Haushalte – Verbrauch Heizöl EL	0,86	PFEIFFER et al. (2000), EnEV
Haushalte – Verbrauch Gase	1,28	PFEIFFER et al. (2000)
Haushalte – Verbrauch Holz	1,30	Annahme (Klimaschutzziel)
Industrie – Verbrauch Heizöl EL	0,88	PFEIFFER et al. (2000), EnEV
Industrie – Verbrauch Holz	1,38	STALA (1992-2002)
Industrie – Verbrauch sonstige	0,80	STALA (1992-2002)
<b>Sonstige nicht genehmigungsbedürftige Prozesse</b>		
Umschlag Getreide – Ernte und Einfuhr	1,11	STBA (1991-2001), STALA (1992-2000)
Feuerwerke – Bevölkerungsentwicklung	1,02	STBA (1991-2001)
Rauchen von Tabak in D	1,05	STBA (2000b)
Ernten und Trocknen von Getreide	1,08	STBA (1991-2001)
Tierhaltung Legehennen – Bestand	0,77	STBA (1991-2001)
Tierhaltung Masthühner – Bestand	0,98	STBA (1991-2001)
Tierhaltung Schweine – Bestand	0,88	STBA (1991-2001)
Tierhaltung Rinder – Bestand	0,68	STBA (1991-2001)
Tierhaltung Schafe – Bestand	0,89	STBA (1991-2001)
Tierhaltung Pferde – Bestand	0,77	STBA (1991-2001)
Tierhaltung Enten & Gänse – Bestand	0,24	STBA (1991-2001)
Tierhaltung Truthähne – Bestand	1,27	STBA (1991-2001)
Schreinereien – Produktionsindex Holzgewerbe	1,02	STALA (2000b)
Baugewerbe – Umsatz Produktion	0,96	BAUINDUSTRIE (2001)
Steinbrüche – Gewinnung Steine und Erden	0,95	abgeleitet v. LGRB (2002)
Salzgewinnung	1,15	abgeleitet v. LGRB (2002)

Tab. 7-11: Trendfaktoren (TF) und Annahmen für die Projektion von Emissionsfaktoren von 1998 nach 2010

Quellgruppe	TF <sub>EF</sub>	Annahmen/Datenquellen
Busse	0,21	UBA (1999a)
LKW ohne Anhänger	0,20	UBA (1999a)
LKW mit Anhänger	0,19	UBA (1999a)
Sattelzüge	0,16	UBA (1999a)
PKW Diesel	0,38	UBA (1999a)
LNF Diesel	0,26	UBA (1999a)
Kaltstart Dieselfahrzeuge	0,37	IFEU (1999)
PKW Otto mit geregelter Kat	0,70	98/69/EG, 98/70/EG
PKW Otto mit ungeregelter oder ohne Kat	1,00	keine Veränderung
LNF Otto mit geregelter Kat	0,75	98/69/EG, 98/70/EG
LNF Otto mit ungeregelter oder ohne Kat	1,00	keine Veränderung
Motorräder 4-Takt	0,80	2002/51/EG bzw. 97/24/EG
Leichtkrafträder, Mofas 2-Takt	0,70	2002/51/EG bzw. 97/24/EG
<b>Sonstiger Verkehr und sonstige Fahrzeuge und mobile Geräte</b>		
Bahnverkehr - Dieselloks	0,65	DB (2001)
Schiffsverkehr	0,90	IFEU (1999)
Flugverkehr	0,92	IFEU (1999)
Sonst. Fzg. - Militär, Dieselmotoren	0,90	Neufahrzeuge
Sonst. Fzg. - Baumaschinen, Dieselmotoren	0,65	97/68/EG
Sonst. Fzg. - Landwirtschaft, Dieselmotoren	0,80	2000/25/EG
Sonst. Fzg. - Industrie, Dieselmotoren	0,75	97/68/EG
Sonst. Fzg. - allgemein, Ottomotoren	0,90	Neufahrzeuge
<b>Genehmigungsbedürftige Feuerungsanlagen (BImSchV-Nr.)</b>		
Kraft-/Heizwerke (01.01) - Steinkohle	0,85	Auswirkung 13. BImSchV
Kraft-/Heizwerke (01.01) - Heizöl	0,90	Auswirkung 13. BImSchV
Kraft-/Heizwerke (01.01) - Gase	1,00	keine Veränderung
Kraft-/Heizwerke (01.01) - Holz (Biomasse)	0,90	Auswirkung 13. BImSchV
Feuerungsanlagen (01.02) - Steinkohle	0,70	Neuanlagen, Auswirkung TA Luft
Feuerungsanlagen (01.02) - Diesel	0,70	Neuanlagen, Auswirkung TA Luft
Feuerungsanlagen (01.02) - Heizöl EL	0,95	Neuanlagen, Auswirkung TA Luft
Feuerungsanlagen (01.02) - Heizöl S	0,70	Neuanlagen, Auswirkung TA Luft
Feuerungsanlagen (01.02) - Gase	1,00	keine Veränderung
Feuerungsanlagen (01.02) - Holz (Biomasse)	0,70	Neuanlagen, Auswirkung TA Luft
Feuerungsanlagen (01.02) - Ölschiefer	0,75	Auswirkung TA Luft
Müllverbrennung	0,95	Neuanlagen
Klärschlammverbrennung	0,95	Neuanlagen
Kleinverbraucher (01.02) gesamt	0,70	Neuanlagen, Auswirkung TA Luft

Quellgruppe	TF <sub>EF</sub>	Annahmen/Datenquellen
<b>Genehmigungsbedürftige Produktions- und sonstige Prozesse</b>		
Brechen, Mahlen, Klassieren v. Gestein	0,84	Auswirkung TA Luft
Zementherstellung	0,85	Auswirkung TA Luft
Brennen v. mineralischen Stoffen	0,74	Auswirkung TA Luft
Bitumenschmelz-/ Mischanlagen	0,90	Auswirkung TA Luft
Herst. v. Glas oder Glasfasern	0,90	Neuanlagen
Brennen keramischer Erzeugnisse	0,90	Auswirkung TA Luft
Blähen v. Perliten, Schiefer oder Ton	0,50	Auswirkung TA Luft
Mahlen v. mineralischen Stoffen	0,90	Neuanlagen
Herst. v. Beton oder Mörtel	0,90	Neuanlagen
Sonstige Anlagen 2. Obergruppe	0,90	Neuanlagen
Eisen-, Stahlgießereien	0,90	Auswirkung TA Luft
Gießereien für NE-Metalle	0,90	Auswirkung TA Luft
Stahlerzeugung, Schmelzen v. Eisen/ Stahl	0,85	Auswirkung TA Luft
Erschmelzen v. NE-Metallen	0,79	Auswirkung TA Luft
Druckgussgießereien	0,90	Neuanlagen
Zerkleinern v. Schrott mit Rotormühlen	0,90	Neuanlagen
Walzen v. NE-Metallen	0,90	Neuanlagen
Aufbringen metall. Schutzschichten	0,85	Auswirkung TA Luft
Strahlanlagen außerhalb geschloss. Räume	0,90	Neuanlagen
Sonstige Anlagen 3. Obergruppe	0,90	Neuanlagen
Verarbeitung v. Erdöl, Erdölerzeugnissen	0,60	Auswirkung TA Luft
Herst. v. anorganischen Chemikalien	0,90	Auswirkung TA Luft
Herst. v. Kunststoffen/Chemiefasern	0,95	Neuanlagen
Herst. v. Metallen u. Nichtmetallen	0,95	Neuanlagen
Herst. v. Korund oder Karbid	0,95	Neuanlagen
Herst. v. Firnis, Lacken, Druckfarben	0,70	Auswirkung TA Luft
Herst. v. Teerfarben/ -zwischenprod.	0,84	Auswirkung TA Luft
Herst. v. org. Chemikalien/Lösungsmittel	0,95	Auswirkung TA Luft
Sonstige Anlagen 4. Obergruppe	0,90	Auswirkung TA Luft
Lackier-/Trocknungsanlagen	0,90	Neuanlagen
Tränken/Überziehen v. Stoffen mit Teer etc.	0,95	Neuanlagen
Herst. bahnenförmiger Materialien	0,95	Neuanlagen
Rotationsdruckmaschinen	0,95	Neuanlagen
Sonstige Anlagen 5. Obergruppe	0,90	Auswirkung TA Luft
Fabrikmäßige Papier-/ Pappenherstellung,	0,75	Auswirkung TA Luft
Herst. v. Holzfaserplatten, Holzspanplatten oder Holzfaserplatten	0,71	Auswirkung TA Luft
Zellstoffgewinnung aus Holz, Stroh etc.	0,82	Auswirkung TA Luft
Sonstige Anlagen 6. Obergruppe	0,90	Neuanlagen
Räucheranlagen für Fleisch oder Fisch	0,95	Neuanlagen
Extrahieren pflanzlicher Fette oder Öle	0,95	Auswirkung TA Luft

Quellgruppe	TF <sub>EF</sub>	Annahmen/Datenquellen
Trocknung v. Grünfutter	0,95	Neuanlagen
Zuckerfabriken	0,84	Auswirkung TA Luft
Mühlen für Nahrungs- oder Futtermittel	0,95	Neuanlagen
Malzdarren	0,92	Auswirkung TA Luft
Melassebrennen, Trebertrocknen, Brauereien	0,80	Auswirkung TA Luft
Mühlen für Nahrungs- oder Futtermittel	0,95	Neuanlagen
Herst. v. Gelatine, Leim	0,50	Auswirkung TA Luft
Röstereien	0,73	Auswirkung TA Luft
Sonstige Anlagen 7. Obergruppe	0,95	Neuanlagen
Abfallsortieranlagen für Hausmüll	0,75	Auswirkung TA Luft
Lagerung oder Behandlung von Abfällen	0,85	Auswirkung TA Luft
Aufbereitung fester, flüssiger oder gasförmiger Abfälle ohne Sortierung	0,90	Neuanlagen
Rückgewinnung d. Verbrennen fester Stoffe	0,90	Neuanlagen
Aufbereitung fester, flüssiger, gasf. Abfälle	0,90	Neuanlagen
Sonstige Anlagen 8. Obergruppe	0,90	Neuanlagen
Umschlag fester Abfälle	0,77	Auswirkung TA Luft
Umschlag sonstig gen.-bed.	0,70	Verfahrensverbesserungen, Auswirkung TA Luft
Sonstige Anlagen 9. Obergruppe	0,85	Auswirkung TA Luft
Prüfstände für Motoren, Gasturbinen	0,90	Auswirkung TA Luft
Krematorien	0,76	Auswirkung TA Luft
Herst. v. Bautenschutz-, Reinigungsmitteln	0,83	Auswirkung TA Luft
Vulkanisieren v. Natur-/ Synth.kautschuk	0,95	Neuanlagen
Sonstige Anlagen 10. Obergruppe	0,95	Neuanlagen
Mahlen oder Trocknen v. Kohle	0,95	Neuanlagen
<b>Kleinfeuerungen</b>		
Kleinverbraucher/Ind. – Steinkohlen/-koks	1,00	PFEIFFER et al. (2000)
Kleinverbraucher/Ind. – Braunkohle	0,94	PFEIFFER et al. (2000)
Kleinverbraucher/Ind. – Heizöl S	0,95	PFEIFFER et al. (2000)
Kleinverbraucher/Ind. – Heizöl EL	0,95	PFEIFFER et al. (2000)
Kleinverbraucher/Ind. – Gase	1,00	PFEIFFER et al. (2000)
Kleinverbraucher/Ind. – Holz (Biomasse)	0,80	PFEIFFER et al. (2000), EnEV
Haushalte – Steinkohlen/-koks	1,00	PFEIFFER et al. (2000)
Haushalte – Braunkohle	0,90	PFEIFFER et al. (2000)
Haushalte – Heizöl EL	0,95	PFEIFFER et al. (2000)
Haushalte – Gase	1,00	PFEIFFER et al. (2000)
Haushalte – Holz (Biomasse)	0,80	PFEIFFER et al. (2000), EnEV
<b>Sonstige nicht genehmigungsbedürftige Prozesse</b>		
Umschlag nicht gen.-bed.	0,90	Verfahrensverbesserungen
Sonstige Prozesse	1,00	Annahme