

TEXTE 41/2003

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungsbericht 299 44 140
UBA-FB 000477

Ermittlung und Evaluierung der Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher sowie Ableitung von geeigneten Maßnahmen zur Emissionsminderung

**Dr.-Ing. Michael Struschka
Dr.-Ing. Ulrich Zuberbühler
Dipl.-Ing. Anja Dreiseidler
Dipl.-Ing. Daniel Dreizler
Prof. Dr.-Ing. Günter Baumbach**

Universität Stuttgart

und

**Dr. Hans Hartmann
Dipl.-Ing. (FH) Volker Schmid
Dipl.-Ing. (FH) Heiner Link**

Bayerische Landesanstalt für Landtechnik
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Straubing

KURZFASSUNG

Ermittlung und Evaluierung der Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher sowie Ableitung von geeigneten Maßnahmen zur Emissionsminderung

Zur Erzeugung von Raum- und Prozesswärme sowie zur Brauchwassererwärmung bei Haushalten und Kleinverbrauchern werden derzeit vor allem gasförmige, flüssige und feste Brennstoffe eingesetzt. Hierbei wird neben Erdgas vor allem leichtes Heizöl (Heizöl EL) in Feuerungsanlagen im Geltungsbereich der 1. BImSchV verbrannt. Feste Brennstoffe tragen nur zu einem geringen Anteil zur Energieversorgung in diesen Bereichen bei, verursachen aber den überwiegenden Teil am Emissionsaufkommen an Produkten unvollständiger Verbrennung (Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe, Partikel).

In diesem Vorhaben sollen neue Emissionsfaktoren und das aktuelle Emissionsaufkommen von Partikeln für Feuerungsanlagen für feste und flüssige Brennstoffe der Haushalte und Kleinverbraucher in Deutschland ermittelt werden. Die Partikelemissionen werden differenziert nach der Gesamtmasse der emittierten Partikel und den Anteilen der Partikelfraktionen PM₁, PM_{2,5} und PM₁₀. Dazu werden Partikelmessungen auf dem Prüfstand an Einzelfeuerstätten (Dauerbrandofen, Heizeinsatz für Kachelofen, Kamineinsatz und Kaminofen) und Heizkesseln (Stückholzkessel, Hackgutfeuerung und Kessel-Pelletfeuerung) durchgeführt. Stellvertretend für Feuerungen im Bereich der Kleinverbraucher wurden Messungen an Vorschubrost- und Unterschubfeuerungen vorgenommen. Außerdem wurde das Emissionsverhalten von Heizölkesseln beim Einsatz von leichten Heizölen mit unterschiedlichen Schwefelgehalten und beim Zusatz eines ferrocenhaltigen Additivs untersucht.

Anhand der durchgeführten Untersuchungen wurde das Minderungspotential für Partikel ermittelt und die zukünftige Emissionsentwicklung für den Haushalts- und Kleinverbraucherbereich abgeschätzt.

Definition von Partikeln

Partikel sind kleine Teilchen, denen ein definiertes Volumen und eine Grenzfläche zugeordnet werden kann und die dispers in Erscheinung treten. Partikel entstehen z.B. durch Abrieb, Kondensation und Nukleation aus der Gasphase sowie durch unvollständige Verbrennung mit typischen Größenverteilungen und Partikelstrukturen, die auch von sekundären Maßnahmen zur Emissionsminderung abhängig sind.

Die Feinstaubbelastung der Außenluft setzt sich aus direkt emittierten Partikeln (primäre Partikel) und aus sekundär gebildeten Anteilen zusammen. Diese sekundären Feinstäube entstehen aus gasförmigen Vorläufersubstanzen durch chemische Umwandlung in der Atmosphäre.

Primäre Partikel können definiert werden als Partikel die direkt von der Emissionsquelle in Partikelform emittiert werden und solche Stoffe, die nach Verlassen der Emissionsquelle in unmittelbarer Umgebung des Schornsteins als Partikel vorliegen. Somit können die Partikel-emissionen aus einem filterbaren und einem kondensierbaren Anteil bestehen.

Dies ist bei Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe und bei ungünstigen Verbrennungsbedingungen der Fall. Diese Abgase enthalten organische Verbindungen, die bei Umgebungs-temperatur kondensieren und dann in flüssiger oder fester Form vorliegen. Ebenso trifft dies bei Ölfeuerungen zu, wenn Schwefelverbindungen im Brennstoff enthalten sind. Denn ein geringer Teil des Brennstoffschwefels wird zu Schwefeltrioxid oxidiert, welches sich mit dem im Abgas vorhandenen Wasserdampf zu Schwefelsäure umsetzt, die unterhalb des Schwefelsäuretaupunktes kondensiert. Die gemessene Partikelmasse wird somit über das eingesetzte Messverfahren (z.B. Probenahme, Art der Partikelabscheidung, eingesetzte Filtersubstrate, Auswerteverfahren) und den Abgaszustand am Probenahmeort definiert. Dies mindert z.T. die Vergleichbarkeit von Literaturdaten, da unterschiedliche Messverfahren eingesetzt bzw. die Partikelprobenahme bei unterschiedlichen Abgaszuständen erfolgte.

Um sowohl die filterbaren als auch die kondensierbaren Partikel bei den Einzelfeuerstätten und bei einem Stückholzkessel mit veralteter Verbrennungstechnik zu erfassen, erfolgte die Partikelprobenahme im verdünnten und abgekühlten Abgas. Somit können die im heißen Abgas aus filter- und kondensierbaren Anteile bestehenden Partikel im verdünnten Abgas gemeinsam in Form filterbarer Partikel abgeschieden werden. Bei den untersuchten Ölfeuerungen erfolgte die Probenahme zur Bestimmung der filterbaren Partikel im unverdünnten Abgas. Der kondensierbare Anteil der Partikelemission in Form von Schwefelsäure wurde separat erfasst, wobei keine Größenfraktionierung vorgenommen werden konnte. Deshalb erfolgte in diesem Fall eine Berechnung der Partikelfraktionen PM_x anhand von Literaturangaben über die Größenverteilung von kondensierter Schwefelsäure.

Vorgehensweise

Die gerätebezogenen und sektoralen Emissionsfaktoren und das Emissionsaufkommen wurden unter Berücksichtigung des Anlagenbestandes, der gerätebezogenen Endenergieverbräuche und der Emissionsangaben für die verschiedenen Feuerungsanlagen berechnet. Die wesentlichen Bearbeitungsschritte und deren Verknüpfungen sind in **Bild 1** schematisch dargestellt.

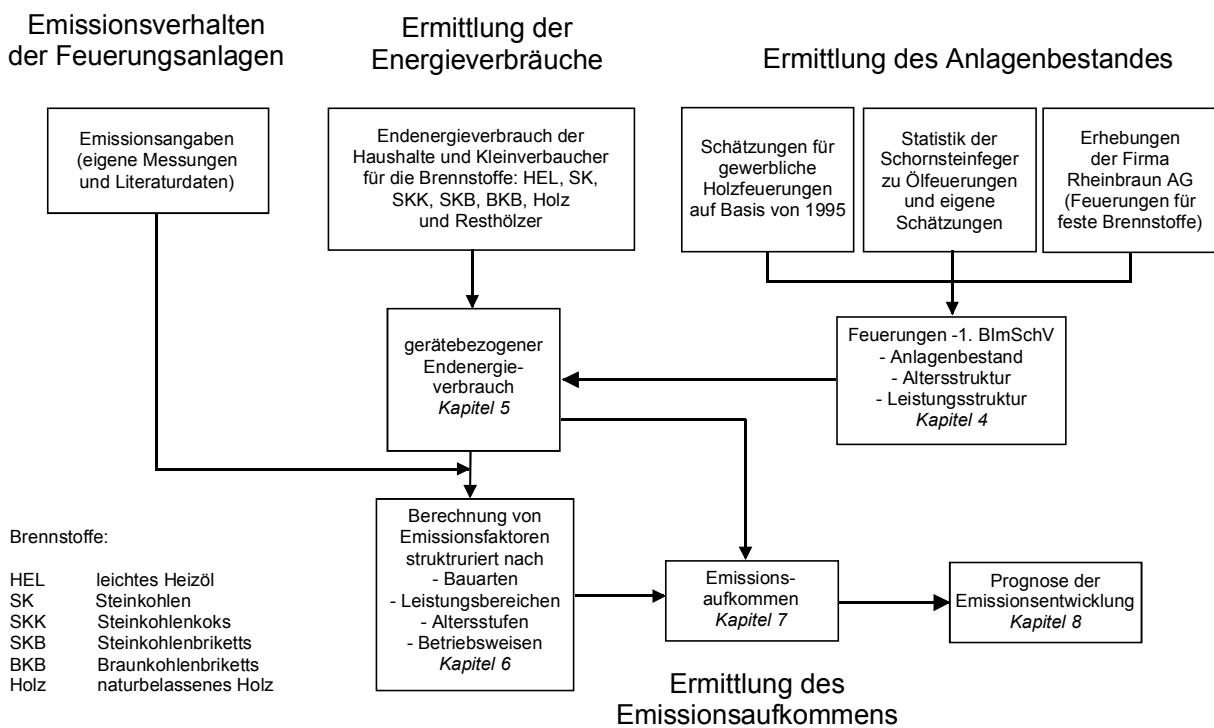


Bild 1: Vorgehensweise bei der Berechnung der Emissionsfaktoren und des Emissionsaufkommens

Ermittlung des Anlagenbestandes

Die Ermittlung des Bestandes von Feuerungsanlagen im Geltungsbereich der 1. BlmSchV (in der Fassung aus dem Jahr 1996) erfolgt für Heizkessel mit Ölgebläsebrennern auf Basis der Erhebungen des Schornsteinfegerhandwerks, Markterhebungen für Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe sowie eigenen Abschätzungen und Hochrechnungen für Ölöfen mit Verdampfungsbrennern und für gewerbliche Holzfeuerungen. In **Tabelle 1** ist der Bestand an Feuerstätten in Haushalten und bei Kleinverbrauchern für das Jahr 2000 dargestellt.

Zur Berechnung von gerätebezogenen Emissionsfaktoren werden neben dem Anlagenbestand auch Angaben zur Leistungs- und Altersstruktur für die verschiedenen Gerätebauarten benötigt. Diese Angaben wurden aus einem abgeschlossenen UBA-Vorhaben (F. Pfeiffer et al.: Ermittlung der mittleren Emissionsfaktoren zur Darstellung der Emissionsentwicklung aus Feuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher, Reihe UBA-TEXTE Nr. 14/00, 2000) übertragen.

Tabelle 1: Bestand an installierten Feuerstätten im Geltungsbereich der 1. BImSchV in Haushalten und bei Kleinverbrauchern in Deutschland im Jahr 2000

| Energie-träger | Bezeichnung der Feuerstätte | alte Bundesländer [1.000 Stück] | neue Bundesländer [1.000 Stück] | Deutschland [1.000 Stück] |
|---|--|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| Heizöl EL | Ölofen mit Verdampfungsbrennern | 1.534,9 | 71,3 | 1.606,2 |
| | Heizkessel mit Ölgebläsebrennern | 5.568,0 | 754,9 | 6.322,9 |
| | Summe | 7.102,9 | 826,2 | 7.929,1 |
| Festbrennstoffe (Kohlen- und Holzbrennstoffe) | Heizkessel (Zentral- und Etagenheizungen) | 422,4 | 256,4 | 678,9 |
| | Dauerbrandöfen | 2.060,0 | 290,0 | 2.350,0 |
| | Kachelöfen (mit Heizeinsatz oder als Grundofen) | 2.350,0 | 1.950,0 | 4.300,0 |
| | Kaminöfen | 2.080,0 | 400,0 | 2.480,0 |
| | Kamine (mit offenem oder geschlossenem Feuerraum) | 2.570,0 | 300,0 | 2.870,0 |
| | Badeöfen | 110,0 | 100,0 | 210,0 |
| | Herde (und Heizungsherde) | 1.410,0 | 340,0 | 1.750,0 |
| | Summe | 11.002,4 | 3.636,4 | 14.638,9 |
| Gesamtbestand der Feuerstätten | | 18.105,4 | 4.462,6 | 22.568,0 |

Ermittlung der Endenergieverbräuche

Anhand der Endenergiebilanz des Jahres 2000 für Deutschland erfolgte die Ermittlung des emissionsrelevanten Endenergieverbrauchs zur Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher strukturiert nach Gerätebauarten und Leistungsbereichen. Bei festen Brennstoffen wird der Endenergieverbrauch zur Erzeugung von Prozesswärme (Kochen) mit in die Betrachtungen einbezogen, da die Energie teilweise zur Beheizung des Aufstellungsraumes verwendet wird. Ebenfalls berücksichtigt wird die in der Landwirtschaft und im Gartenbau eingesetzte Prozesswärme. In allen anderen Fällen bleibt der geringe Endenergieverbrauch zur Prozesswärmeerzeugung in Haushalten und bei Kleinverbrauchern sowie die hierbei entstehenden Emissionen unberücksichtigt.

Den Rahmen für die Aufteilung des Endenergieverbrauchs stellt die von der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen erstellte Energiebilanz (Stand 20. Juli 2001) für die Bundesrepublik Deutschland im Jahr 2000 dar, die nur beim Restholzverbrauch bei Kleinverbrauchern (gewerbliche Holzfeuerungen) durch eine eigene Abschätzung ergänzt wurde, da hier bisher überhaupt kein Verbrauch von Holzbrennstoffen ausgewiesen wird. In **Tabelle 2** ist der ermittelte emissionsrelevante Endenergieverbrauch an Heizöl EL sowie Stein-, Braun- und Holzbrennstoffen für Deutschland im Jahr 2000 zusammengestellt.

Tabelle 2: Emissionsrelevanter Endenergieverbrauch der Haushalte und Kleinverbraucher in den alten und neuen Bundesländern sowie Deutschland im Jahr 2000

| emissionsrelevanter Endenergieverbrauch im Jahr 2000 in TJ | Haushalte | | | Kleinverbraucher | | | Haushalte und Kleinverbraucher | | |
|--|----------------|----------------|----------------|------------------|---------------|----------------|--------------------------------|----------------|------------------|
| | aBL | nBL | D | aBL | nBL | D | aBL | nBL | D |
| Heizöl EL | 670.283 | 76.717 | 747.000 | 217.983 | 40.444 | 258.427 | 888.266 | 117.161 | 1.005.427 |
| Steinkohlen | 3.000 | 0 | 3.000 | 2.979 | 2.595 | 5.574 | 5.979 | 2.595 | 8.574 |
| Steinkohlenkoks | 7.760 | 1.240 | 9.000 | 2.159 | 634 | 2.794 | 9.919 | 1.874 | 11.794 |
| Steinkohlenbriketts | 2.788 | 212 | 3.000 | 0 | 0 | 0 | 2.788 | 212 | 3.000 |
| Braunkohlenbriketts | 9.711 | 11.289 | 21.000 | 0 | 0 | 0 | 9.711 | 11.289 | 21.000 |
| davon Rheinisches Revier | 9.122 | 0 | 9.122 | 0 | 0 | 0 | 9.122 | 0 | 9.122 |
| davon Lausitzer Revier | 0 | 9.451 | 9.451 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9.451 | 9.451 |
| davon Mitteldeutsches Revier | 0 | 1.278 | 1.278 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.278 | 1.278 |
| davon Importe | 589 | 560 | 1.149 | 0 | 0 | 0 | 589 | 560 | 1.149 |
| Holzbrennstoffe | 118.800 | 46.200 | 165.000 | 30.952 | 9.432 | 40.384 | 149.752 | 55.632 | 205.384 |
| davon naturbelassenes Holz | 118.800 | 46.200 | 165.000 | 7.791 | 1.710 | 9.502 | 126.591 | 47.910 | 174.502 |
| davon Resthölzer | 0 | 0 | 0 | 23.161 | 7.721 | 30.882 | 23.161 | 7.721 | 30.882 |
| Summe | 812.342 | 135.658 | 948.000 | 254.074 | 53.105 | 307.179 | 1.066.415 | 188.763 | 1.255.179 |

'0' kein Energieeinsatz

aBL alte Bundesländer

nBL neue Bundesländer

D Deutschland

Holzbrennstoffe: in Form von naturbelassenem Holz (eingesetzt in Haushalten und im Bereich Landwirtschaft und Gartenbau) und Resthölzern, die sich aus Resten von Holzwerkstoffen und naturbelassenem Holz zusammensetzen

Ermittlung der Emissionsfaktoren

Ausgangspunkt für die Berechnung der Emissionsfaktoren bilden Emissionsangaben, die sowohl aus der Literatur entnommen als auch durch eigene Messungen ermittelt wurden. Aus den Emissionsangaben zu den Partikelemissionen werden, unter Berücksichtigung der Betriebsweise der Feuerung und der Altersstufe, die gerätespezifischen Emissionsfaktoren für die unterschiedlichen Feuerungsbauarten und Leistungsbereiche ermittelt.

Aus den gerätebezogenen Emissionsfaktoren werden für die betrachteten Brennstoffe in Verbindung mit dem anteiligen Endenergieverbrauch, sektorale Emissionsfaktoren für die Bereiche Haushalte und Kleinverbraucher (nicht genehmigungsbedürftige Feuerungsanlagen im Geltungsbereich der 1. BImSchV, 1996) berechnet. **Bild 2** zeigt schematisch die Vorgehensweise zur Ermittlung der gerätespezifischen und sektoralen Emissionsfaktoren.

Die Emissionsfaktoren der Partikelfraktionen PM_1 , $PM_{2,5}$ und PM_{10} wurden aus den Emissionsfaktoren für Partikel anhand der gemessenen bzw. aus der Literatur entnommenen geräte- und brennstoffspezifischen Größenverteilungen der Partikel berechnet.

In **Tabelle 3** sind die ermittelten sektoralen Emissionsfaktoren für Feuerungsanlagen in den Bereichen Haushalte und Kleinverbraucher strukturiert nach Brennstoffen und alten und neuen Bundesländern sowie Deutschland aufgelistet.

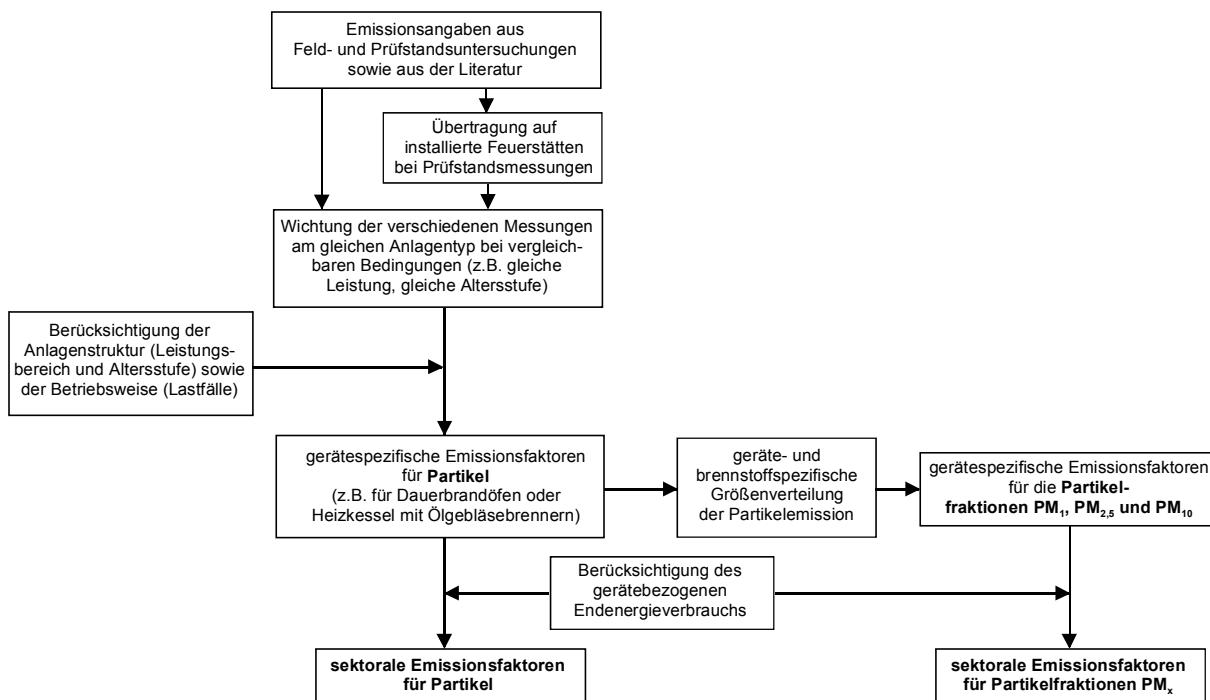


Bild 2: Vorgehensweise zur Ermittlung der Emissionsfaktoren

Tabelle 3: Sektorale Emissionsfaktoren für Partikel von Feuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher in Deutschland im Jahr 2000

| Partikel | Emissionsfaktoren in kg/TJ im Jahr 2000 | | | | | | | | |
|---------------------------|---|-----|-----|------------------|-----|-----|--------------------------------|-----|-----|
| | Haushalte | | | Kleinverbraucher | | | Haushalte und Kleinverbraucher | | |
| | aBL | nBL | D | aBL | nBL | D | aBL | nBL | D |
| Steinkohlen und -briketts | 86 | 92 | 86 | 18 | 18 | 18 | 63 | 24 | 54 |
| Steinkohlen | 18 | - | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 |
| Steinkohlenbriketts | 159 | 92 | 154 | - | - | - | 159 | 92 | 154 |
| Steinkohlenkoks | 16 | 16 | 16 | 17 | 17 | 17 | 16 | 16 | 16 |
| Braunkohlenbriketts | 89 | 88 | 89 | - | - | - | 89 | 88 | 89 |
| Rheinisch | 89 | 72 | 120 | - | - | - | - | - | - |
| Lausitzer | | | | | | | | | |
| Mitteldeutsche | | | | | | | | | |
| Importe (Böhmisches) | | | | | | | | | |
| Holzbrennstoffe | 118 | 111 | 116 | 73 | 76 | 73 | 108 | 105 | 107 |
| naturbelassenes Holz | 118 | 111 | 116 | 73 | 71 | 71 | - | - | - |
| naturbelassenes Holz * | | | | | 80 | 96 | 84 | | |
| Holzwerkstoffe | | | | | | | | | |
| Heizöl EL | 1,7 | 1,6 | 1,7 | 1,7 | 1,6 | 1,7 | 1,7 | 1,6 | 1,7 |

* naturbelassenes Holz als Restholz (gewerbliche Holzfeuerungen) und naturbelassenes Holz bei übrigen Kleinverbrauchern

leeres Feld kein anteiliger Endenergieverbrauch angesetzt, deshalb wurden keine Emissionsfaktoren ermittelt

- Brennstoff wird derzeit in diesen Bereichen nicht eingesetzt

aBL

alte Bundesländer

nBL neue Bundesländer

D

Deutschland

Die Emissionsfaktoren für Partikel bei Feuerungsanlagen für leichtes Heizöl im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher sind vergleichsweise niedrig und unterscheiden sich für die Verbraucherbereiche und die alten und neuen Bundesländer kaum. Die Partikelemissionen von Feuerungsanlagen für Heizöl EL bestehen bei derzeitigem Schwefelgehalt des Brennstoffs zum überwiegenden Teil aus kondensierbaren Partikeln (Schwefelsäure). Durch die Zugabe eines ferrocenhaltigen Additivs zum Heizöl wurde, in Abhängigkeit der Additivdosierung, ein Konzentrationsanstieg von filterbaren Partikeln im Abgas ermittelt.

Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe weisen deutlich höhere Emissionsfaktoren für Partikel auf. In den ausgewerteten Literaturstellen erfolgte allerdings die Partikelprobenahme bei Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe mit erhöhten Konzentrationen von kondensierbaren organischen Verbindungen im Abgas meist bei höheren oder nicht dokumentierten Abgas-temperaturen, was dies die Vergleichbarkeit von Literaturdaten untereinander und zu den eigenen durchgeföhrten Untersuchungen z.T. mindert. Um die Datenbasis für die Berechnung der Partikelemissionen nicht zu stark einzuschränken, wurden aber trotzdem alle vorliegenden Messwerte zur Ermittlung der Emissionsfaktoren verwendet.

Bei der Verbrennung von Steinkohlenkoks und Steinkohlen werden für diese Brennstoffe noch die niedrigsten Faktoren ermittelt, die sich auch für die beiden Verbraucherbereiche und die alten und neuen Bundesländer nur wenig unterscheiden.

Bei Steinkohlen wird der Emissionsfaktor nahezu ausschließlich durch die Emissionsangaben bei der Verbrennung von Anthrazitkohlen bestimmt, die ca. 98 % der im Jahr 2000 in den Bereichen Haushalte und Kleinverbraucher genutzten Steinkohlen ausmachen. Die restlichen 2 % entfallen auf Fettkohlen.

Der hohe Emissionsfaktor für Steinkohlenbriketts bei Haushalten wird wesentlich durch Messergebnisse an Dauerbrandöfen, vor allem im Teil- und Schwachlastbetrieb, verursacht. In Dauerbrandöfen werden rund 60 % der Steinkohlenbriketts verfeuert, wobei der Anteil des Teil- und Schwachlastbetriebs ebenfalls 60 % beträgt.

Bei Briketts aus dem Lausitzer Revier basiert der Emissionsfaktor auf Messergebnissen an unterschiedlichen Heizgeräten, die auf dem Prüfstand und als installierte Anlagen im Bereich der Nennwärmeleistung betrieben wurden. Untersuchungen mit Braunkohlenbriketts aus dem Rheinischen Revier wurden auch bei anderen Wärmeleistungen (Teil- und Schwachlast) durchgeföhr. Da im Teil- und Schwachlastbetrieb die Partikelemissionen der untersuchten Feuerstätten gegenüber dem Nennlastbetrieb zunahmen, ergibt sich für Briketts aus dem Rheinischen Revier insgesamt ein höherer Emissionsfaktor.

Bei der Verbrennung von Braunkohlenbriketts aus dem Böhmischem Revier, die stellvertretend für importierte Briketts in den neuen Bundesländern stehen, ergaben sowohl im Teillast- als auch beim Nennlastbetrieb der Feuerstätten hohe bis sehr hohe Partikelkonzentrationen.

Die Emissionsfaktoren für Partikel der mit Holzbrennstoffen betriebenen Feuerungsanlagen liegen für beide Verbraucherbereiche und die alten und neuen Bundesländer in einer relativ engen Bandbreite und unterscheiden sich nicht grundsätzlich. Diese Faktoren wurden anhand der Ergebnisse von Prüfstands- und Feldmessungen an den unterschiedlichsten Feuerstätten beim Betrieb mit Nennlast und auch bei Teillast ermittelt.

Die Emissionsfaktoren der Partikelfraktionen PM_{10} , $PM_{2,5}$ und PM_{10} werden aus den Emissionsfaktoren für Partikel anhand der gemessenen bzw. aus der Literatur entnommenen geräte- und brennstoffspezifischen Größenverteilungen der Partikel berechnet. In **Tabelle 4** sind beispielhaft die prozentualen Anteile der Partikelfraktion PM_{10} an den sektoralen Emissionsfaktoren für Partikel bei den betrachteten Feuerungsanlagen und Brennstoffen in den Bereichen Haushalte und Kleinverbraucher aufgeführt.

Tabelle 4: Anteil der Partikelfraktion PM_{10} an den sektoralen Emissionsfaktoren für Partikel bei Feuerungsanlagen im Bereich Haushalte und Kleinverbraucher in Deutschland in 2000

| Partikelfraktion PM_{10} | Anteil der Fraktion in % im Jahr 2000 | | | | | | | | |
|-------------------------------|---------------------------------------|-----|-----|------------------|-----|-----|--------------------------------|-----|-----|
| | Haushalte | | | Kleinverbraucher | | | Haushalte und Kleinverbraucher | | |
| | aBL | nBL | D | aBL | nBL | D | aBL | nBL | D |
| Steinkohlen und -briketts | 100 | 100 | 100 | 97 | 97 | 97 | 99 | 98 | 99 |
| <i>Steinkohlen</i> | 97 | - | 97 | 97 | 97 | 97 | 97 | 97 | 97 |
| <i>Steinkohlenbriketts</i> | 100 | 100 | 100 | - | - | - | 100 | 100 | 100 |
| Steinkohlenkoks | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Braunkohlenbriketts | 95 | 97 | 96 | - | - | - | 95 | 97 | 96 |
| <i>Rheinisch</i> | 95 | | | | | | | | |
| <i>Lausitzer</i> | | 98 | | | | | | | |
| <i>Mitteldeutsche</i> | | 94 | | | | | | | |
| <i>Importe (Böhmischa)</i> | | 95 | | | | | | | |
| Holzbrennstoffe | 97 | 97 | 97 | 94 | 93 | 94 | 96 | 96 | 96 |
| <i>naturbelassenes Holz</i> | 97 | 97 | 97 | 95 | 94 | 95 | | | |
| <i>naturbelassenes Holz *</i> | | | | 89 | 90 | 89 | | | |
| <i>Holzwerkstoffe</i> | | | | | | | | | |
| Heizöl EL | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

* naturbelassenes Holz im Holzgewerbe und bei übrigen Kleinverbrauchern
 leeres Feld oder - keine Emissionsfaktoren da kein Endenergieverbrauch bzw. kein Brennstoffeinsatz
 aBL alte Bundesländer nBL neue Bundesländer D Deutschland

Emissionsaufkommen

Das ermittelte Emissionsaufkommen der Bereiche Haushalte und Kleinverbraucher ist für Partikel in **Tabelle 5** enthalten.

Tabelle 5: Emissionsaufkommen für Partikel in den Bereichen Haushalte und Kleinverbraucher in den alten und neuen Bundesländern sowie Deutschland im Bezugsjahr 2000

| Partikel | Emissionsaufkommen in t im Jahr 2000 | | | | | | | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------|---------------|------------------|------------|--------------|--------------------------------|--------------|---------------|
| | Haushalte | | | Kleinverbraucher | | | Haushalte und Kleinverbraucher | | |
| | aBL | nBL | D | aBL | nBL | D | aBL | nBL | D |
| Steinkohlen und -briketts | 498 | 20 | 517 | 55 | 48 | 103 | 553 | 68 | 620 |
| Steinkohlen | 55 | - | 55 | 55 | 48 | 103 | 110 | 48 | 158 |
| Steinkohlenbriketts | 442 | 20 | 462 | - | - | - | 442 | 20 | 462 |
| Steinkohlenkoks | 124 | 20 | 144 | 36 | 11 | 47 | 160 | 31 | 191 |
| Braunkohlenbriketts | 865 | 994 | 1.859 | - | - | - | 865 | 994 | 1.859 |
| Rheinisch | 865 | 679 | | - | - | - | | | |
| Lausitzer | | 153 | | - | - | - | | | |
| Mitteldeutsche | | 162 | | - | - | - | | | |
| Importe (Böhmisches) | | | | | | | | | |
| Brennholz | 13.977 | 5.108 | 19.085 | 2.253 | 713 | 2.966 | 16.230 | 5.821 | 22.051 |
| naturbelassenes Holz | 13.977 | 5.108 | 19.085 | | | | | | |
| naturbelassenes Holz * Holzwerkstoffe | | | | 1.846 | 551 | 2.397 | | | |
| Holzwerkstoffe | | | | 407 | 162 | 568 | | | |
| Heizöl EL | 1.110 | 125 | 1.235 | 371 | 66 | 436 | 1.481 | 190 | 1.671 |
| Summe | 16.574 | 6.266 | 22.840 | 2.715 | 837 | 3.552 | 19.288 | 7.104 | 26.392 |

* naturbelassenes Holz im Holzgewerbe und bei übrigen Kleinverbrauchern
 leeres Feld oder - kein Emissionsaufkommen da kein Endenergieverbrauch bzw. kein Brennstoffeinsatz
 aBL alte Bundesländer nBL neue Bundesländer D Deutschland

In **Tabelle 6** ist das ermittelte Emissionsaufkommen für die Partikelfraktionen PM_{10} der Bereiche Haushalte und Kleinverbraucher enthalten.

Tabelle 6: Emissionsaufkommen für die Partikelfraktionen PM_{10} in den Bereichen Haushalte und Kleinverbraucher in Deutschland im Bezugsjahr 2000

| Partikelfraktion PM_{10} | Emissionsaufkommen in t im Jahr 2000 | | | | | | | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------|---------------|------------------|------------|--------------|--------------------------------|--------------|---------------|
| | Haushalte | | | Kleinverbraucher | | | Haushalte und Kleinverbraucher | | |
| | aBL | nBL | D | aBL | nBL | D | aBL | nBL | D |
| Steinkohlen und -briketts | 496 | 20 | 515 | 53 | 47 | 100 | 549 | 66 | 615 |
| Steinkohlen | 54 | - | 54 | 53 | 47 | 100 | 107 | 47 | 154 |
| Steinkohlenbriketts | 442 | 20 | 462 | - | - | - | 442 | 20 | 462 |
| Steinkohlenkoks | 124 | 20 | 144 | 36 | 11 | 47 | 160 | 31 | 191 |
| Braunkohlenbriketts | 823 | 960 | 1.783 | - | - | - | 823 | 960 | 1.783 |
| Rheinisch | 823 | 663 | | - | - | - | | | |
| Lausitzer | | 144 | | - | - | - | | | |
| Mitteldeutsche | | 154 | | - | - | - | | | |
| Importe (Böhmisches) | | | | | | | | | |
| Brennholz | 13.499 | 4.944 | 18.443 | 2.115 | 665 | 2.780 | 15.614 | 5.609 | 21.223 |
| naturbelassenes Holz | 13.499 | 4.944 | 18.443 | | | | | | |
| naturbelassenes Holz * Holzwerkstoffe | | | | 1.752 | 519 | 2.271 | | | |
| Holzwerkstoffe | | | | 363 | 145 | 508 | | | |
| Heizöl EL | 1.110 | 125 | 1.235 | 371 | 66 | 436 | 1.481 | 190 | 1.671 |
| Summe | 16.051 | 6.070 | 22.121 | 2.575 | 787 | 3.363 | 18.627 | 6.857 | 25.483 |

* naturbelassenes Holz im Holzgewerbe und bei übrigen Kleinverbrauchern
 aBL alte Bundesländer nBL neue Bundesländer D Deutschland

Bewertung der ermittelten Emissionsfaktoren

In allen Teilschritten des Berechnungsverfahrens - Ermittlung des Anlagenbestandes und des gerätebezogenen Endenergieverbrauchs sowie Beschreibung des Emissionsverhaltens der Feuerungsanlagen – wurden nur abgesicherte und nachvollziehbare Daten herangezogen. War eine entsprechende Datengrundlage nicht vorhanden, wurde auf bestmögliche Schätzungen zurückgegriffen.

Tabelle 7 gibt in zusammengefasster Form einen Überblick über die Bewertung der ermittelten (sektoralen) Emissionsfaktoren. In dieser Übersicht sind die häufigsten Nennungen der Qualitätsstufen aufgeführt.

Tabelle 7: Zusammenfassende Bewertung der ermittelten Emissionsfaktoren für Partikel der Haushalte und Kleinverbraucher anhand von vier Qualitätsstufen

| Bewertung der Emissionsfaktoren für Partikel | Bandbreite der häufigsten Nennungen der Qualitätsstufen bei | | | |
|--|---|-------------------------|-------------------------|------------------|
| | Heizöl EL | Steinkohlenbrennstoffen | Braunkohlenbrennstoffen | Holzbrennstoffen |
| Heizkessel | A-B | C-D | C-D | A-B |
| Ölöfen | D | | | |
| Dauerbrandöfen | | A-C | A-B | C |
| Kachelöfen | | C-D | A-C | A |
| Kamine | | D | C-D | B |
| Kaminöfen | | D | C | B |
| Badeöfen | | | C | C |
| Herde | | D | C | C |
| Heizkessel-Schachtfeuerungen * | | | | C |
| Einblasfeuerungen * | | | | D |
| Unterschubfeuerungen * | | | | A-B |
| Vorofenfeuerungen * | | | | A-B |

* gewerbliche Holzfeuerungen
leeres Feld keine sektorale Emissionsfaktoren vorhanden

Qualitätsstufen: A breite Datenbasis mit zuverlässigem Hintergrund
B mittlere Datenbasis, Hintergrund kann noch als zuverlässig bezeichnet werden
C geringe Datenbasis, nur stichprobenartige Emissionsmessungen
D Einzelmessungen; Abschätzungen der Emissionsfaktoren auf Basis vergleichbarer Feuerungen (nur Abgaskomponenten mit geringer Abhängigkeit von den Verbrennungsbedingungen)

Alle ermittelten gerätebezogenen Emissionsfaktoren wurden hinsichtlich ihrer Datenbasis einer internen Qualitätsbeurteilung unterzogen. So wurde jeder ermittelte Emissionsfaktor in eine von vier Qualitätsstufen (A bis D) eingeordnet, wobei A die höchste und D die niedrigste Stufe darstellt. Voraussetzung für die Einordnung eines Emissionsfaktors in die höchste Qualitätsstufe war hierbei eine ausreichend breite Datenbasis mit einer hohen Qualität und Verlässlichkeit der Emissionsmessungen, die durch Einsatz von erprobten und anerkannten Messverfahren und Vorgehensweisen beim Betrieb der Feuerungen erhalten wird.

Basiert die Berechnung der Emissionsfaktoren auf nur wenigen Messwerten (u.U. liegt nur ein einziger Wert vor) oder erfolgten die Messungen z.B. mit nicht ausreichend erprobten Messverfahren, so wurde diesen Faktoren die niedrigste Qualitätsstufe zugeordnet. Emissionsfaktoren in der niedrigsten Qualitätsstufe geben nur die zu erwartende Größenordnung eines tatsächlichen Emissionsfaktors wieder.

Die Angabe eines Fehler- oder Unsicherheitsbereiches für die ermittelten (sektoralen) Emissionsfaktoren und für das berechnete Emissionsaufkommen ist aus folgenden Gründen nicht möglich:

- die Unsicherheiten die den Eingangsdaten (gerätebezogener Endenergieverbrauch, Zahlen zum Anlagenbestand, Emissionswerte) zugrunde liegen sind nicht bekannt
- es existiert kein anerkanntes Berechnungsverfahren zur Ermittlung von Unsicherheiten für Emissionsfaktoren. In einem derartigen Berechnungsverfahren müsste u.a. auch festgelegt werden, wie sich die Größe einer Stichprobe (z.B. die Anzahl der Messwerte) und deren Standardabweichung auf die Genauigkeit der Wiedergabe der Grundgesamtheit (z.B. des Emissionsverhaltens aller installierter Kaminöfen die mit naturbelassenem Holz betrieben werden) auswirkt.

Zur Festlegung eines Bewertungsverfahrens für Emissionsfaktoren von Feuerungsanlagen, welches nach einheitlichen, nachvollziehbaren, objektiven und dokumentierten Kriterien eine Beurteilung der Aussagekraft der Emissionsfaktoren erlaubt, ist noch zusätzlicher Forschungsbedarf notwendig.

Minderungsmaßnahmen und Prognose der Emissionsentwicklung

Die Partikelemissionen von Feuerungsanlagen für Heizöl EL bestehen bei derzeitigem Schwefelgehalt des Brennstoffs zum überwiegenden Teil aus kondensierbaren Partikeln (Schwefelsäure). Im Zuge der Novellierung der 3. BImSchV (2001) soll der zulässige Schwefelgehalt in leichtem Heizöl ab dem Jahr 2008 auf 0,1 Massen-% begrenzt werden. Anhand der eigenen Messergebnisse kann abgeschätzt werden, dass die Reduzierung des Schwefelgehaltes im Heizöl zu einer Minderung der Partikelemission durch geringere Schwefelsäurekonzentrationen im Abgas in der Größenordnung von 30 % führt. Durch eine weitere Reduzierung des Schwefelgehaltes im Heizöl auf z.B. 0,005 Massen-% (entsprechend 50 ppm) ergibt sich nach den vorliegenden Messergebnissen ein Minderung der Partikelemission gegenüber marktüblichem Heizöl in der Größenordnung von 70 %.

Die Partikelemissionen bei Holzfeuerungen lassen sich sowohl durch Primär- als auch durch Sekundärmaßnahmen reduzieren. Primärseitige Maßnahmen beinhalten eine verbesserte Verbrennungs- und Regelungstechnik, mit der z.B., bedingt durch die Strömungsführung, eine weitgehende Partikelabscheidung bereits im Feuerraum erreicht wird. Abgasseitig lässt sich die Partikelkonzentration durch den Einsatz von wirksamen Staubabscheidern deutlich mindern, wobei neben der Gesamtmasse der emittierten Partikel in etwa proportional auch die Masse der einzelnen Partikelfraktionen (Feinstäube) abnimmt. So wurden bei eigenen Messungen an einer mit Resthölzern betriebenen Unterschubfeuerung nach dem Gewebefilter Partikelkonzentrationen von < 10 mg/m³ (bezogen auf 13 Vol% O₂) ermittelt.

Mit Hilfe zweier Szenarien wurde die mögliche Emissionsentwicklung im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher bis zum Jahr 2020 abgeschätzt. Ausgangspunkt ist das ermittelte Emissionsaufkommen für Partikel im Jahr 2000.

Berücksichtigt wurde in dieser Prognose die vermutete Entwicklung der Endenergieverbräuche, die veränderten Anforderungen an den Schwefelgehalt von leichtem Heizöl und ein höherer Anteil an modernen mechanisch beschickten Holzfeuerungen. Die Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen zur möglichen Entwicklung des Emissionsaufkommens sind in **Tabelle 8** aufgeführt.

Tabelle 8: Entwicklung des Emissionsaufkommens für Partikel aus Feuerungsanlagen im Bereich Haushalte und Kleinverbraucher in Deutschland bis zum Jahr 2020

| Partikel (Prognose) | Emissionsaufkommen in t in den Jahren 2000 bis 2020 | | | | |
|--------------------------------|--|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | Haushalte und Kleinverbraucher in Deutschland | | | | |
| | 2000 | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 |
| Steinkohlen und -briketts | 620 | 349 | 209 | 136 | 95 |
| Steinkohlen | 158 | 130 | 78 | 49 | 33 |
| Steinkohlenbriketts | 462 | 218 | 131 | 87 | 62 |
| Steinkohlenkoks | 191 | - | - | - | - |
| Braunkohlenbriketts | 1.859 | 494 | 252 | 173 | 126 |
| Brennholz - Prognose 1 | 22.051 | 25.875 | 26.449 | 25.620 | 24.855 |
| Brennholz - Prognose 2 | 22.051 | 23.287 | 22.922 | 20.496 | 14.913 |
| Heizöl EL | 1.671 | 1.033 | 935 | 729 | 535 |
| Summe Prognose 1 | 26.392 | 27.751 | 27.845 | 26.658 | 25.612 |
| Summe Prognose 2 | 26.392 | 25.164 | 24.319 | 21.534 | 15.670 |

Prognose 1: keine zeitliche Entwicklung für die Emissionsfaktoren angenommen

Prognose 2: Bestand von Holzfeuerungen mit geringen Partikelemissionen nimmt deutlich zu

Aufgrund des stark abnehmenden Brennstoffeinsatz nehmen die Anteile und die Absolutwerte des Partikelaufkommens bei Kohlenbrennstoffen bis zum Ende des Prognosezeitraumes stark ab. Bei Ölfeuerungen hängen die Partikelemissionen vom Schwefelgehalt des eingesetzten Brennstoffes und damit von der Schwefelsäurekonzentration im Abgas ab. Deshalb führt ein reduzierter Schwefelgehalt im leichten Heizöl ebenfalls zu einem Rückgang des Partikelaufkommens.

Insgesamt wird die Entwicklung des Emissionsaufkommens vom zunehmenden Verbrauch an Holzbrennstoffen und dem prognostizierten Verlauf der Emissionsfaktoren für diese Feuerungen bestimmt. Wird keine wesentliche Änderung im Emissionsverhalten des Gerätebestandes bis zum Jahr 2020 angenommen, nehmen die Partikelemissionen aus Holzfeuerungen zu (Prognose 1). Bei einem stark zunehmenden Bestand an Holzfeuerungen mit relativ geringen Partikelemissionen (z.B. Pelletfeuerungen und moderne hand- und mechanisch beschickte Kessel) würde sich trotz des zunehmenden Holzverbrauchs ein deutlicher Rückgang der Partikelemissionen ergeben.

Ascertainment and Assessment of Particulate Matter Emissions from Combustion Appliances in the Household and Small Consumer Sectors and Outlook on Emission Reduction

In this project, new emission factors and the current load of particle emissions was ascertained for combustion appliances firing solid or liquid fuels as used in households and by small consumers in Germany. A difference concerning the particle emissions was made between the total mass of emitted particles and the percentages of three particle fractions, PM_1 , $PM_{2,5}$, and PM_{10} . The investigations involved particulate matter measurements on the test rig and at installed combustion appliances for solid fuels. In addition, the emission behaviour of boilers was investigated for light fuel oil with different sulphur contents and for a ferrocene-containing additive. The results of these investigations were used to establish the reduction potential concerning particles and to estimate the further development of emissions in the household and small-consumer sectors.

Particle Definition

The particle emissions may consist in a filterable and a condensable fraction. This is the case with combustion appliances for solid fuels and under unfavourable combustion conditions where the exhausts contain organic compounds which condense at ambient temperature, eventually existing in liquid or solid form. This is also true for the combustion of sulphurous fuel oils because less sulphuric acid develops in the exhaust. The measured particle mass is thus defined by the utilised measurement method and the state of the exhaust at the sampling location. This somehow diminishes the comparability of data from literature because various measurement methods were used and/or the particle sampling was done at different states of the exhaust gas.

In our test-rig measurements, in order to detect both the filterable and the condensable particles for combustion appliances in the case of unfavourable combustion conditions, the particle sampling was done in the diluted and cooled exhaust gas. In the case of the examined oil-fired appliances, the sampling determining the filterable particles was done in the undiluted exhaust gas. The condensable fraction of the particle emissions, in the form of sulphuric acid, was detected separately.

Emission Factors

Basis for the calculation of the emission factors are emission data from literature and results of own measurements. The data on particle emissions served to establish the types-specific

emission factors for the different **combustion appliance** types and heat output range. **Table 1** lists the thus evaluated sectoral emission factors for combustion appliances used in the household and small-consumer sectors.

Table 1: Sectoral emission factors for particles from combustion appliances in the household and small-consumer sectors in Germany for the year 2000

| Particulate Matter (2000) | Emission Factor in kg/TJ | | | | | | | | |
|--|--------------------------|-----|-----|-----------------|-----|-----|--------------------------------|-----|-----|
| | Households | | | Small consumers | | | Households and Small consumers | | |
| | aBL | nBL | D | aBL | nBL | D | aBL | nBL | D |
| High rank coals and products | 86 | 92 | 86 | 18 | 18 | 18 | 63 | 24 | 54 |
| Brown coal briquettes | 89 | 88 | 89 | - | - | - | 89 | 88 | 89 |
| Wood | 118 | 111 | 116 | 73 | 76 | 73 | 108 | 105 | 107 |
| Distillate oil (<i>EL-type fuel oil</i>) | 1.7 | 1.6 | 1.7 | 1.7 | 1.6 | 1.7 | 1.7 | 1.6 | 1.7 |

* residual untreated wood (commercial wood-fired furnaces) and untreated wood (other small consumers)

empty field no emission factors since proportional ultimate power consumption was not considered

- fuel currently not used in this sector

aBL 'old' German Laender nBL 'new' German Laender D Germany

The emission factors of particle fractions PM_1 , $PM_{2,5}$, and PM_{10} were evaluated from the emission factors for particles based on the appliance- and fuel-specific particle size distributions as measured or as given in the literature. **Table 2** shows as an example the percentages of particle fraction PM_{10} referring to the sectoral emission factors for particles.

Table 2: Percentage of particle fraction PM_{10} referring to the sectoral emission factors for particles

| Particle Fraction PM_{10} | Percentage of Fraction | | | | | | | | |
|--|------------------------|-----|-----|-----------------|-----|-----|--------------------------------|-----|-----|
| | Households | | | Small consumers | | | Households and Small consumers | | |
| | aBL | nBL | D | aBL | nBL | D | aBL | nBL | D |
| High rank coals and products | 100 | 100 | 100 | 97 | 97 | 97 | 99 | 98 | 99 |
| Brown coal briquettes | 95 | 97 | 96 | - | - | - | 95 | 97 | 96 |
| Wood | 97 | 97 | 97 | 94 | 93 | 94 | 96 | 96 | 96 |
| Distillate oil (<i>EL-type fuel oil</i>) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

* untreated wood used by the wood-processing industry and the other small consumers

empty field or - no emission factors since ultimate power consumption was not considered or fuel was not used

aBL 'old' German Laender nBL 'new' German Laender D Germany

Emission Load

The particle emission load was evaluated based on the type-specific emission factors and the respective end-user power consumption. **Table 3** shows the result of the evaluations with the example of particle fraction PM_{10} .

Table 3: Emission load for particle fraction PM₁₀ in the household and small-consumer sectors in Germany in the reference year 2000

| Particle Fraction PM ₁₀ | Emission Load in 2000 in tonnes | | | | | | | | |
|---------------------------------------|---------------------------------|--------------|---------------|-----------------|------------|--------------|--------------------------------|--------------|---------------|
| | Households | | | Small consumers | | | Households and Small consumers | | |
| | aBL | nBL | D | aBL | nBL | D | aBL | nBL | D |
| High rank coals and products | 620 | 40 | 659 | 89 | 57 | 147 | 709 | 97 | 806 |
| Brown coal briquettes | 823 | 960 | 1,783 | - | - | - | 823 | 960 | 1,783 |
| Wood | 13,499 | 4,944 | 18,443 | 2,115 | 665 | 2,780 | 15,614 | 5,609 | 21,223 |
| Distillate oil (EL-type fuel oil) | 1,110 | 125 | 1,235 | 371 | 66 | 436 | 1,481 | 190 | 1,671 |
| Total | 16,051 | 6,070 | 22,121 | 2,575 | 787 | 3,363 | 18,627 | 6,857 | 25,483 |

* untreated wood used by the wood-processing industry and the other small consumers
 aBL 'old' German Laender nBL 'new' German Laender D Germany

Emission Reduction and Prediction of Emission Development

The restriction on the allowable sulphur content in light fuel oil to 0.1 % by mass from 2008 will result in a reduction of particle emissions in the order of magnitude of 30 %. By using fabric filters, it is possible to substantially reduce the particle concentration in the exhaust gases of wood-fired appliances. In our own test rig measurements, for instance, a particle reduction of more than 90 % could be achieved.

On the basis of the presumed decline of coal fuels until 2020, there will be a strong decrease of particle emissions. For oil-fired appliances, a reduced sulphur content in the light fuel oil also results in a diminishing particle emission load. All in all, the development of the emission load is determined by the increasing consumption of wood fuels and the predicted course of the emission factors for these combustion appliances.