

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES  
BUNDEMINISTERIUMS FÜR UMWELT,  
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Luftreinhaltung

Förderkennzeichen (UFOPLAN) 203 44 358

**Ermittlung und Minderung der Emissionen krebserzeugender  
und weiterer besonders gesundheitsgefährdender Stoffe  
bei Kleinfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe**

von

Stefanie Greiselis-Bailer

Dr. Bernd-Michael Kemper

Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg

in Zusammenarbeit mit

Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen der Universität Stuttgart

UMEG, Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit

Baden-Württemberg

IM AUFTRAG DES UMWELTBUNDESAMTES

Januar 2006

## Berichts-Kennblatt

1. Berichtsnummer UBA-FB 203 44 358	2.	3.
4. Titel des Berichts Ermittlung und Minderung der Emissionen krebserzeugender und weiterer besonders gesundheitsgefährdender Stoffe bei Kleinfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe		
5. Autor(en), Name(n), Vorname(n) S. Greiselis-Bailer B.-M. Kemper	8. Abschlussdatum 30.06.2005	
6. Durchführende Institution (Name, Anschrift)  Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg Referat 31 – Umwelttechnologie Griesbachstraße 1 – 3 76185 Karlsruhe	9. Veröffentlichungsdatum Januar 2006	
	10. UFOPLAN-Nr. 203 44 358	
	11. Seitenzahl 275	
	12. Literaturangaben 115	
7. Fördernde Institution (Name, Anschrift)  Umweltbundesamt, Postfach 1406, D-06813 Dessau	13. Tabellen und Diagramme 39	
	14. Abbildungen 26	
	15. Zusätzliche Angaben	
16. Kurzfassung Im Rahmen des Vorhabens wurden Emissionsfaktoren und das Emissionsaufkommen von krebserzeugenden und weiteren besonders gesundheitsgefährdenden Stoffen von Kleinfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe ermittelt. Hierbei wurden insbesondere die Emissionen von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAH), Benzol, polychlorierten Dibenzo-p-dioxinen und Dibenzofuranen (PCDD/F), polychlorierten Biphenylen (PCB) und von Partikeln betrachtet, die bei der Verbrennung von Holz, Braunkohlenbriketts und Steinkohlenbrennstoffen entstehen können.  Zur Ermittlung der Emissionsfaktoren wurden vorhandene nationale und internationale Literaturangaben ausgewertet und eigene Untersuchungen verwendet. Ergänzend wurden orientierende Messungen auf dem Prüfstand bzw. Feldmessungen an Dritte vergeben, um Datenlücken zu schließen.  Anhand zweier Szenarien wurde die zukünftige Entwicklung des Emissionsaufkommens abgeschätzt. Hierbei wurde zum einen die Entwicklung des Brennstoffmarktes und zum anderen der mögliche Einfluss von Minderungsmaßnahmen auf das Emissionsaufkommen dargestellt. Ohne Minderungsmaßnahmen ist zu erwarten, dass die Emissionen krebserzeugender und gesundheitsgefährdender Luftschadstoffe aus Kleinfeuerungsanlagen (Benzol, Benzo(a)pyren, Feinstaub) zwischen 6 und 20 % ansteigen werden. Ein Rückgang der Emissionen kann langfristig nur erreicht werden, wenn verstärkt Minderungsmaßnahmen zum Einsatz kommen.  Als konkretes Ergebnis des Arbeitsprogramms wurden Handlungsempfehlungen für eine Novellierung der 1. BImSchV abgeleitet.		
17. Schlagwörter feste Brennstoffe, Steinkohlen, Braunkohlen, Holz, Emissionen, Emissionsaufkommen, Emissionsfaktoren, Minderungsmaßnahmen, Partikel, Aromaten, PAH, PCDD, PCDF, PCB, Dioxine, Furane, Feinstaub, Pellets		
18. Preis	19.	20.

## Report Cover Sheet

1. Report No. UBA-FB 203 44 358	2.	3.
4. Report Title Determining and reducing the emissions of carcinogenic and other substances, particularly hazardous to health, for small-scale combustion units for solid fuels		
5. Autor(s), Family Name(s), First Name(s) S. Greiselis-Bailer B.-M. Kemper	8. Report Date 30.06.2005	
6. Performing Organisation (Name, Address)  Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg Referat 31 – Umwelttechnologie Griesbachstraße 1 – 3 76185 Karlsruhe	9. Publication Date January 2006	
	10. UFOPLAN-Ref. No. 203 44 358	
	11. No. of Pages 275	
	12. No. of Reference 115	
7. Sponsoring Agency (Name, Address)  Umweltbundesamt, Postfach 1406, D-06813 Dessau	13. No. of Tables, Diagrams 39	
	14. No. of Figures 26	
	15. Supplementary Notes	
<p>16. Abstract</p> <p>Within the project, emission factors and the emitted quantities of carcinogenic and other substances particularly hazardous to health were determined for small scale combustion units for solid fuels. In doing so, the emissions, which originate through the combustion of wood, brown coal briquettes and hard coal fuels, of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH), benzene, polychlorinated dibenzo-p-dioxines and dibenzofuranes (PCDD/F), polychlorinated biphenyls (PCB) and particles were considered.</p> <p>For the determining of the emissions factors existing national and international literature sources were evaluated and investigations carried out. In addition, indicative measurements on a test-rig and field-measurements were sub-contracted to a third-party in order that the gaps in the available data could be closed.</p> <p>Based on two scenarios, the future development of the emitted quantities was estimated. In doing so the development of the fuel markets on the one hand and on the other hand the possible influence of mitigation measures on the emitted quantities was presented.</p> <p>Without mitigation measures, it can be expected, that the emission of carcinogenic and other substances hazardous to health as air pollutants from small scale combustion units (benzene, benzo(a)pyrene, particulate matter) will increase by between 6 and 20 %.</p> <p>A concrete result of the programme of work was recommendations for action for an amendment of the First Ordinance on small and medium scale combustion units - 1. BImSchV.</p>		
17. Keywords solid fuels, hard coal, brown coal, wood, emissions, emitted quantities, emission factors, mitigation measures, particles, aromatics, PAH, PCDD, PCDF, PCB, Dioxins, Furans, particulate matter, pellets.		
18. Price	19.	20.

**Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Zielsetzung</b> .....	<b>7</b>
1.1	Einleitung.....	7
1.2	Bedeutung der Kleinf Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe für die gesamte Emissionssituation.....	8
1.3	Arbeitsprogramm.....	11
<b>2</b>	<b>Technische Grundlagen</b> .....	<b>13</b>
2.1	Vorgänge bei der Verbrennung.....	14
2.2	Brennstoffe, Eigenschaften und ihr Einfluss auf die Verbrennung, Normierung.....	17
2.3	Feuerungstechnik und Bauarten.....	24
2.3.1	Feuerungsprinzipien bei manuell beschickten Anlagen.....	24
2.3.2	Bauarten manuell beschickter Einzelraumfeuerstätten.....	27
2.3.3	Feuerungsprinzipien bei automatisch beschickten Anlagen.....	29
2.4	Primärmaßnahmen zur Emissionsminderung.....	32
2.4.1	Primärmaßnahmen für handbeschickte Einzelfeuerstätten.....	32
2.4.2	Primärmaßnahmen für handbeschickte Stückholzkessel.....	35
2.4.3	Primärmaßnahmen für mechanisch beschickte Anlagen.....	35
2.5	Bewertung von Sekundärmaßnahmen zur Luftreinhaltung.....	36
2.5.1	Oxidationskatalysatoren.....	36
2.5.2	Staubabscheider.....	40
2.5.3	Zusammenfassung.....	43
<b>3</b>	<b>Emissionen und Immissionen</b> .....	<b>45</b>
3.1	Schadstoffe und Messtechnik.....	45
3.1.1	Abgasrandbedingungen, Messbedingungen.....	45
3.1.2	Messunsicherheiten.....	46
3.1.3	Klassische Schadstoffe (CO, Gesamt-C, NOx, Partikel).....	46
3.1.4	Krebserzeugende und besonders gesundheitsgefährdende Stoffe.....	50
3.1.5	Sonstige Luftschadstoffe (Chlorwasserstoff, Aldehyde, Phenole, Metalle) ..	57
3.2	Messergebnisse aus der Literatur.....	59
3.3	Eigene Messprogramme und Erhebungen.....	61
3.3.1	Einfluss des Pufferspeichers auf die Emissionen.....	61
3.3.2	Messung an einem handbeschickten Stückholzkessel - Wartungszustand ..	64
3.3.3	Messungen an einem Kachelofen-Heizeinsatz – Betreiberverhalten.....	65
3.3.4	Messungen an einem einfachen Abgaskatalysator.....	66
3.3.5	Messungen an Holzbacköfen.....	68

## Inhaltsverzeichnis

3.4	Bundesweite Emissionskataster für krebserzeugende und besonders gesundheitsschädliche Luftverunreinigungen .....	73
3.5	Immissionen durch Kleinfeuerungsanlagen.....	76
<b>4</b>	<b>Berechnung und Prognose des Emissionsaufkommens .....</b>	<b>80</b>
4.1	Bestand und Struktur der Feuerungsanlagen sowie des Brennstoffeinsatzes .....	80
4.1.1	Bestand und Struktur der Feuerungsanlagen.....	80
4.1.2	Struktur des Brennstoffeinsatzes.....	83
4.1.3	Energieeinsatz bei verschiedenen Verbrauchern.....	85
4.2	Ermittlung der Emissionsfaktoren für die Berechnung des Emissionsaufkommens.....	89
4.3	Berechnung des Ist-Zustandes der Emissionen.....	92
4.4	Prognose der Emissionsentwicklung.....	96
4.4.1	Entwicklung des Brennstoffeinsatzes .....	96
4.4.2	Einfluss der Emissionsminderungsmaßnahmen .....	97
4.5	Bewertung der Emissionen aus Kleinfeuerungsanlagen für Festbrennstoffe im Vergleich zu den Emissionen aus anderen Quellgruppen.....	99
4.6	Abschätzung des Einflusses von Betreiberverhalten und Brennstoffmissbrauch auf die Emissionen .....	102
4.6.1	Betreiberverhalten .....	102
4.6.2	Brennstoffmissbrauch.....	102
<b>5</b>	<b>Vorhandene Regelwerke.....</b>	<b>104</b>
5.1	Regelungen in Deutschland .....	104
5.1.1	1. BImSchV.....	104
5.1.2	Baurecht, DIN-Normen .....	107
5.2	EU-weite Regelungen.....	109
5.3	Nationale Regelungen im Ausland .....	109
5.3.1	Österreich .....	109
5.3.2	Schweiz .....	112
<b>6</b>	<b>Probleme bei der Anwendung der 1. BImSchV und Ansätze zur Lösung .....</b>	<b>114</b>
6.1	Fachgespräch zur Novellierung der 1. BImSchV im November 2004 in Berlin .....	114
6.2	Regelbrennstoffliste, Brennstoffliste nach prCEN 14961 .....	115
6.2.1	Verbrennung von Holzabfällen in Schreinereien .....	118

## Inhaltsverzeichnis

6.2.2	Verbrennung von Getreide bzw. Getreideganzpflanzen, Halmgut, Ölsaaten...	119
6.3	Bestimmung der Nennwärmeleistung bei der Prüfung nach DIN 18 891 ...	121
6.4	Emissionsüberwachung.....	122
6.4.1	Überwachung von Einzelöfen.....	122
6.4.2	Überwachung von Ganzhausheizungen.....	122
6.5	Information und Schulung der Betreiber.....	123
<b>7</b>	<b>Weiteres Vorgehen.....</b>	<b>124</b>
7.1	Handlungsempfehlungen zur Novellierung der 1. BImSchV im Kontext von EU-Regelungen.....	124
7.2	Überarbeitung weiterer Normen und Regelwerke .....	127
7.3	Öffentlichkeitsarbeit.....	127
7.4	Weiterer Forschungsbedarf.....	128
<b>8</b>	<b>Klimaschutz als Motor des Einsatzes und der Entwicklung von Energiepflanzen.....</b>	<b>130</b>
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>133</b>
<b>10</b>	<b>Anhänge .....</b>	<b>136</b>
10.1	Abkürzungsverzeichnis.....	136
10.2	Literaturverzeichnis .....	137
10.3	Protokoll zum Fachgespräch „Novellierung der 1. BImSchV - künftige Anforderungen an Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe“ am 29.11.2004 in Berlin.....	150
10.4	Tabellen der Emissionsfaktoren .....	158
10.4.1	Emissionsfaktoren aus den Einzelmessungen .....	158
10.4.2	Gerätebezogene Emissionsfaktoren und Endenergieeinsatz 2003.....	168
10.5	Herstellerverzeichnis .....	174
10.6	Unterbericht : Untersuchungen an einem Stückholzkessel mit und ohne Wärmespeicher zur Ermittlung optimaler Speichergrößen.....	176
10.7	Unterbericht „Emissionsuntersuchungen auf dem Prüfstand an Kleinfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe“ .....	219
10.8	Unterbericht „Ermittlung des Emissionsaufkommens und der zukünftigen Entwicklung für krebserzeugende und weitere besonders gesundheitsgefährdende Stoffe bei Kleinfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe“ .....	262

### **1 Zielsetzung**

#### **1.1 Einleitung**

Als in der Urzeit der Mensch erste Erfahrungen mit dem Element Feuer sammelte, geschah dies zunächst auf Basis der Festbrennstoffe. Zuerst wurde Holz verbrannt, später kam die Holzkohle und danach Braun- und Steinkohle hinzu. Flüssige Brennstoffe (Öl, Wachs) wurden zuerst zur Beleuchtung eingesetzt, Gase wurden erst im 19. Jahrhundert allgemein verfügbar.

Die Verbrennung von Kohle in Privathaushalten hatte durch die oft ungünstige Ableitung der Abgase wegen der niedrigen Kaminhöhen schon immer zu starken Belastungen der Außenluft geführt. Erwähnt sei hier nur die Smogsituation in London im Winter 1952/1953, die durch die Verbrennung von Kohle bei gleichzeitiger ungünstiger Wetterlage ausgelöst wurde.

In der Folgezeit wurde die Kohle sukzessive durch die umweltfreundlicheren und in der Anwendung auch bequemeren Brennstoffe Erdgas und Heizöl ersetzt, die vereinzelte Einführung der Fernwärme reduzierte ebenfalls die Emissionen in den Ballungsgebieten.

Während die Verbrennung von Kohle zur Wärmeerzeugung in Haushalten in den letzten Jahren stetig abgenommen hat, hat die Verbrennung von Holz in den letzten Jahren wieder zugenommen. Zum einen suggeriert Holz als „natürlicher“ Brennstoff eine umweltfreundliche Verbrennung, zum anderen entstammt Holz als erneuerbare Energie dem natürlichen Kohlenstoffkreislauf. Holz trägt somit über den Ersatz fossiler Brennstoffe zur Reduzierung der Emissionen von Treibhausgasen bei; die Verbrennung von Holz wird dementsprechend auch umweltpolitisch gefördert.

Neben den wichtigen und begrüßenswerten Bestrebungen zum Klimaschutz – insbesondere zur Verringerung des Ausstoßes an CO<sub>2</sub> durch den Einsatz nachwachsender biogener Festbrennstoffe – dürfen die Aspekte der Luftreinhaltung nicht vernachlässigt werden.

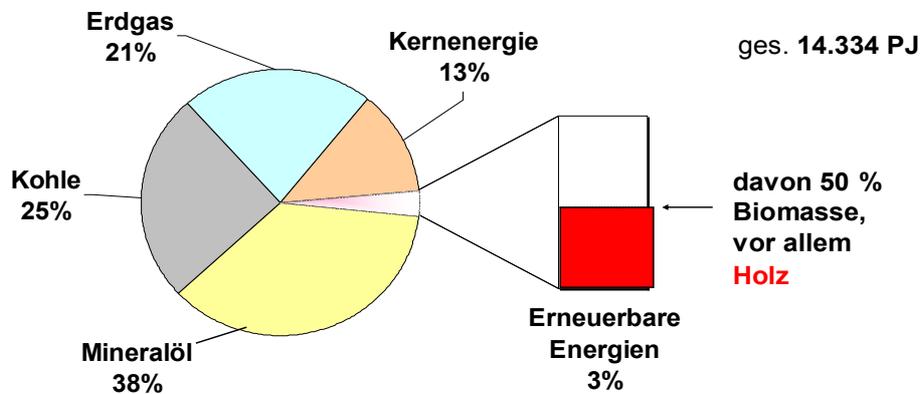
In der 1. BImSchV, der Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen zum Bundes-Immissionsschutzgesetz, sind die allgemeinen und speziellen Anforderungen für diese Feuerungsanlagen festgelegt. In nächster Zeit ist eine Novellierung dieser Verordnung (die letzte größere Änderung hinsichtlich der Festbrennstoffe war im Jahre

1988) geplant, um die Anforderungen an die Feuerungsanlagen an den derzeitigen Stand der Technik anzupassen.

## 1.2 Bedeutung der Kleinfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe für die gesamte Emissionssituation

Um die Bedeutung der Kleinfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe im Hinblick auf die gesamte Emissionssituation in Deutschland ermessen zu können, muss der Anteil der Emissionen der Kleinfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe an der gesamten Emission und im Vergleich zu anderen Brennstoffen und Quellgruppen ermittelt werden.

Zur Einordnung der festen Brennstoffe ist der Anteil der erneuerbaren Energien am Primärenergieverbrauch wichtig, da in Kleinfeuerungsanlagen für Festbrennstoffe zu über 80 % Holz eingesetzt wird. Dies ist im Bild 1.1 für das Jahr 2003 dargestellt.



Quellen: [1-6], [1-7]

Bild 1.1: Primärenergieverbrauch 2003 in Deutschland nach Energieträgern

Der Anteil der fossilen Energieträger – Mineralöl, Kohle und Erdgas – am Primärenergieverbrauch beträgt ca. 84 %, der Anteil aller erneuerbaren Energien beträgt dagegen nur 3 %.

Etwa die Hälfte des Energieverbrauchs aus erneuerbaren Energien ist auf die Verbrennung von Holz, der andere Teil ist auf sonstiger Biomasse (z. B. Biogas) sowie die Energiegewinnung durch Wasser, Wind und Sonne (z. B. Solarthermie, Wärmepumpen, Wasserkraft u. a.) zurückzuführen. Daraus lässt sich ableiten, dass lediglich 1,5 % der Primärenergie durch die Verbrennung von Holz erzeugt wird.

Da der allmähliche Ausstieg aus der Kernenergie bereits politisch beschlossen ist [1-4], muss der Anteil der Kernenergie an der Energieversorgung anderweitig abgedeckt werden: Einerseits durch fossile Energieträger - diese sind zum großen Teil importabhängig - und andererseits durch erneuerbare Energien. Das Ziel der Bundesregierung ist es [1-5], den Anteil der erneuerbaren Energien an der Energieversorgung bis zum Jahr 2010 zu verdoppeln.

Unter diesen Rahmenbedingungen wird die Energiegewinnung aus Biomasse voraussichtlich weiter zunehmen. Dies führt über den höheren Brennstoffeinsatz zwangsläufig zu einem Anstieg der Emissionen durch die Kleinf Feuerungsanlagen. Wünschenswert wäre dann, wenn durch geeignete Emissionsminderungsmaßnahmen die Emissionen reduziert werden könnten.

Zu dem Emissionsbeitrag der Kleinf Feuerungsanlagen sind bundesweit nur wenige Daten verfügbar – vor allem zu den von Kleinf Feuerungsanlagen emittierten besonders gesundheitsgefährdenden Schadstoffen (siehe Kap. 3.2). Zwar gibt es bundesweite Erhebungen zu den ozonschichtschädigenden und klimawirksamen Stoffen ([1-1], [1-2]), doch diese sind für die Kleinf Feuerungsanlagen nur von untergeordneter Bedeutung. Ebenso gibt es kein bundesweites Emissionskataster, wohl aber Emissionskataster verschiedener Bundesländer.

Im Emissionskataster von Baden-Württemberg [1-3] ist u. a. die prozentuale Verteilung der Quellgruppen auf die Schadstoffe dargestellt. Neben den klassischen Schadstoffen werden auch besonders gesundheitsgefährdende Schadstoffe wie z. B. Benzo[a]pyren aufgegriffen.

In Bild 1.2 ist für Baden-Württemberg dargestellt, wie sich die einzelnen Schadstoffe auf die verschiedenen Quellgruppen verteilen. Die Quellgruppe „Kleinf Feuerungsanlagen“ beinhaltet neben den festen Brennstoffen auch die gas- und ölbefeuerten Anlagen.

## Einleitung

In Baden-Württemberg betrug 2002 der Anteil der Emissionen an Feinstaub PM10 (Partikel mit mittlerer Größe 10 µm), die auf Kleinfeuerungsanlagen zurückzuführen sind, weniger als 10 % an den gesamten Emissionen.

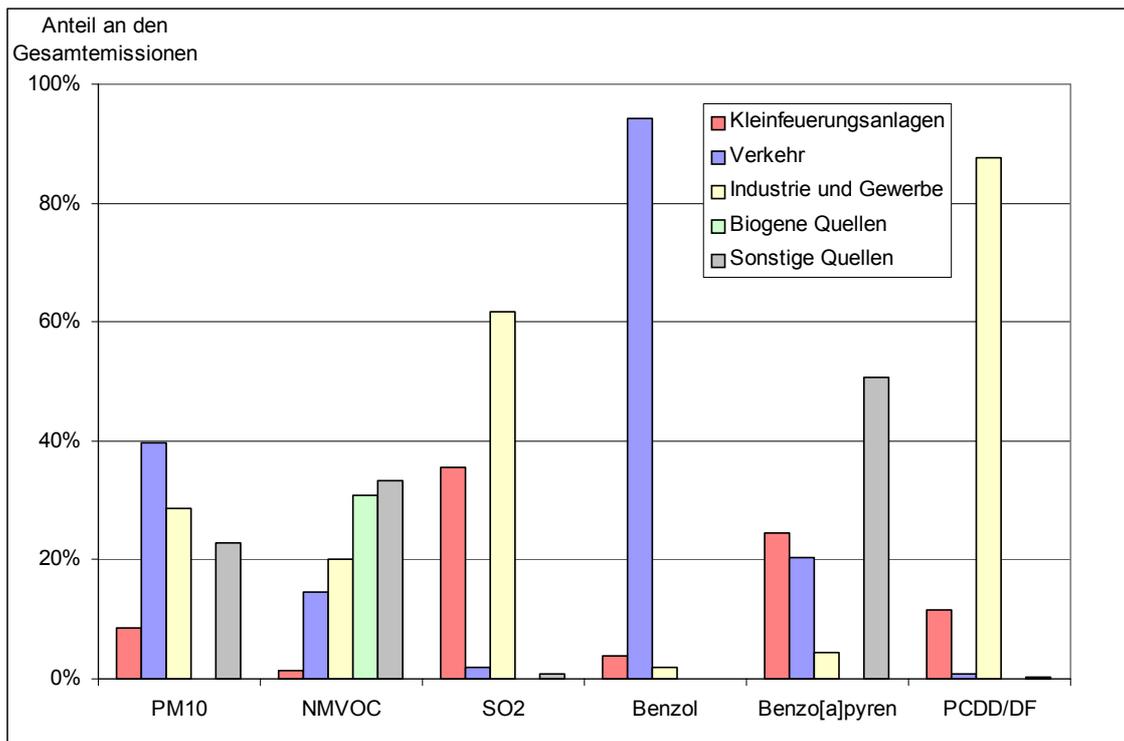


Bild 1.2: prozentuale Verteilung der Schadstoffe auf die verschiedenen Quellgruppen in Baden-Württemberg 2002 [1-3]

Beim Benzo[a]pyren liegt der Anteil der Kleinfeuerungen bei etwa einem Viertel der Gesamtemissionen hinter den sonstigen Quellen (Geräte, Maschinen, Fahrzeuge).

Die Schwefeldioxidemissionen werden zu über 30 % durch Kleinfeuerungsanlagen verursacht. Diese Emissionen entstehen jedoch zu 97 % durch die Verbrennung von Heizöl. Die Verbrennung von Brenngasen und Festbrennstoffen führt dagegen nur zu geringen Schwefeldioxidemissionen.

Im Gegensatz dazu stammen bei den Kleinfeuerungsanlagen die Emissionen von Benzo[a]pyren, Benzol und Feinstaub PM10 fast ausschließlich aus der Verbrennung von Festbrennstoffen.

Obwohl der Anteil der Festbrennstoffe am Energieverbrauch insgesamt gering ist, tragen die Festbrennstoffe bei manchen Luftschadstoffen merklich zur Gesamtemission bei.

### **1.3 Arbeitsprogramm**

Ziel dieses Vorhabens war es, den aktuellen Stand und die Entwicklung der Emissionen an krebserzeugenden und besonders gesundheitsgefährdenden Stoffen bei Kleinfeuerungsanlagen für Festbrennstoffe zu ermitteln.

Im Rahmen einer Literaturrecherche sollten die wesentlichen Stoffe im Abgas der zu betrachtenden Kleinfeuerungsanlagen ermittelt werden, von denen eine besonders gesundheitsgefährdende Wirkung ausgeht. Sofern für die zu untersuchenden Stoffe größere Datenlücken identifiziert werden, sollten ergänzend zu den Literaturdaten orientierende Emissionsmessungen zum Schließen der Lücken durchgeführt werden.

Aus den Ergebnissen sollten dann in einem weiteren Arbeitsschritt mittlere Emissionsfaktoren für Anlagengruppen und Sektoren abgeleitet werden, die das Emissionsverhalten des Anlagenbestandes möglichst realistisch und praxisgerecht abbilden. Hierbei waren auch praxisnahe Betriebsbedingungen (z. B. Wartungszustand, unsachgemäße Bedienung der Feuerstätte, häufiger Teillastbetrieb, Mitverbrennung unzulässiger Einsatzstoffe) zu berücksichtigen.

Mit Hilfe von aktuellen Energieverbrauchsdaten für Deutschland war das Emissionsaufkommen der betrachteten Stoffe aus Kleinfeuerungsanlagen zu berechnen und dem anderer relevanter Quellen in Deutschland gegenüberzustellen. Die zukünftige Emissionsentwicklung für die betrachteten Stoffe sollte in Form verschiedener Szenarien für die Zukunft bis 2020 abgeschätzt werden.

In einem nächsten Schritt waren geeignete technische Minderungsmaßnahmen zu untersuchen und zu bewerten, wobei neben den primärseitigen Maßnahmen zur Verbrennungsoptimierung auch mögliche abgasseitige Maßnahmen (z. B. Katalysatoreinsatz bei Kleinstfeuerstätten, Staubfilter bei gewerblichen Anlagen) zu betrachten waren. Darüber hinaus sollten in der vorliegenden Arbeit besonders für den Bereich der Haushaltsfeuerung auch anderweitige, z. B. ordnungsrechtliche und verhaltensbeeinflussende Maßnahmen, diskutiert werden.

## Arbeitsprogramm

Bei einem Fachgespräch mit nationalen Experten sollten Probleme bei der Anwendung der bestehenden 1. BImSchV aufgezeigt, Möglichkeiten zur Lösung sowie Eckpunkte für eine anstehende Novellierung diskutiert werden.

Als Ergebnis des Arbeitsprogramms sollten konkrete Handlungsempfehlungen für eine Novellierung der 1. BImSchV abgeleitet werden.

Um die Ergebnisse des Vorhabens auch außerhalb der Fachwelt publik zu machen, war neben dem wissenschaftlichen Endbericht ein allgemein verständliches Faltblatt zu erstellen, welches das bisher in der öffentlichen Diskussion nicht ausreichend berücksichtigte Spannungsverhältnis zwischen der Nutzung von CO<sub>2</sub>-neutralen (naturbelassenen) Holzbrennstoffen und den hierbei u.U. verursachten hohen Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung mit hohem Gefährdungspotential diskutiert.

## 2 Technische Grundlagen

Die Verbrennung in einer Feuerungsanlage ist ein komplexer physikalischer und chemischer Prozess, der von vielen unterschiedlichen Faktoren beeinflusst wird. Im Bild 2.1 ist dies graphisch verdeutlicht.



Bild 2.1: Einflüsse auf die Verbrennung von Festbrennstoffen

### 2.1 Vorgänge bei der Verbrennung

Da in Kleinf Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe überwiegend Holz verbrannt wird (siehe Kap. 4.2.1), wird im Folgenden vor allem auf die Verbrennung von Holz näher eingegangen.

Verbrennung ist definiert als Reaktion von Stoffen mit Sauerstoff unter Wärme- und Lichteinwirkung, die nach Erreichen einer bestimmten Entzündungstemperatur sehr rasch verläuft. Die Endprodukte bei der vollständigen Verbrennung organischer Stoffe sind Kohlendioxid und Wasser [2-1].

Obwohl Holz ein fester Brennstoff ist, ist die Holzverbrennung in erster Linie eine Verbrennung der Holzgase, denn rund 83 Gew.-% der brennbaren Holzsubstanz verbrennen als Gas [2-2].

Der komplexe Verbrennungsvorgang fester Brennstoffe lässt sich in drei Phasen einteilen ([2-3], [2-4], [2-5]):

- die Trocknung
- die Pyrolyse und
- die Zersetzung

In der ersten Phase, der Erwärmung und Trocknung, wird der Brennstoff erwärmt. Bei Temperaturen über 100 °C erfolgt die Verdampfung des in den Zellen gespeicherten Wassers. Der Wasserdampf vermischt sich mit dem Rauchgas und wird mit diesem abtransportiert. Bei Temperaturen um 150 °C ist das Holz nahezu trocken.

Die zweite Phase, die pyrolytische Zersetzung des jetzt wasserfreien Brennstoffs, beginnt bei Temperaturen über 150 °C. Zunächst entweichen die flüchtigen Bestandteile und reagieren mit Sauerstoff zu den brennbaren Gasen Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffen. Anschließend wird der feste Kohlenstoff bei Temperaturen ab 500 °C mit Kohlendioxid, Wasserdampf und Sauerstoff zu Kohlenmonoxid vergast. Vom ursprünglichen Holz ist in diesem Stadium nur noch Holzkohle übrig.

Die dritte Phase entspricht der eigentlichen „Verbrennung“. Die brennbaren Gase oxidieren mit (Sekundär-)Luftsauerstoff vollständig zu Kohlendioxid und Wasser. Diese exotherme Reaktion ist an den sichtbaren Flammen und der fühlbaren Wärmeabgabe

## Vorgänge bei der Verbrennung

erkennbar. Die Holzkohle verbrennt im Glutbett mit (Primär-) Luftsauerstoff vollständig. Als Verbrennungsrückstand verbleibt Asche.

Beim chargenweisen Abbrand (Bild 2.2) laufen diese Vorgänge zeitlich hintereinander ab. Nach dem Auflegen des Holzes auf das vorhandene Glutbett entweichen die flüchtigen Bestandteile sehr schnell. Die Verbrennungstemperatur ist noch niedrig, was zu einem schlechteren Ausbrand und hohen Emissionen an Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffen führt. Die erst danach einsetzende Vergasung und Verbrennung des Kohlenstoffs ist am verzögerten Auftreten der Emissionsspitzen beim Kohlendioxid bzw. am Minimum bei der Sauerstoffkonzentration zu erkennen. In dieser Phase wird das Temperaturmaximum erreicht, die Konzentrationen von Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffen sind niedrig. Gegen Ende des Abbrands sinken die Temperaturen im Brennraum, die Konzentrationen von Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffen nehmen wieder leicht zu.

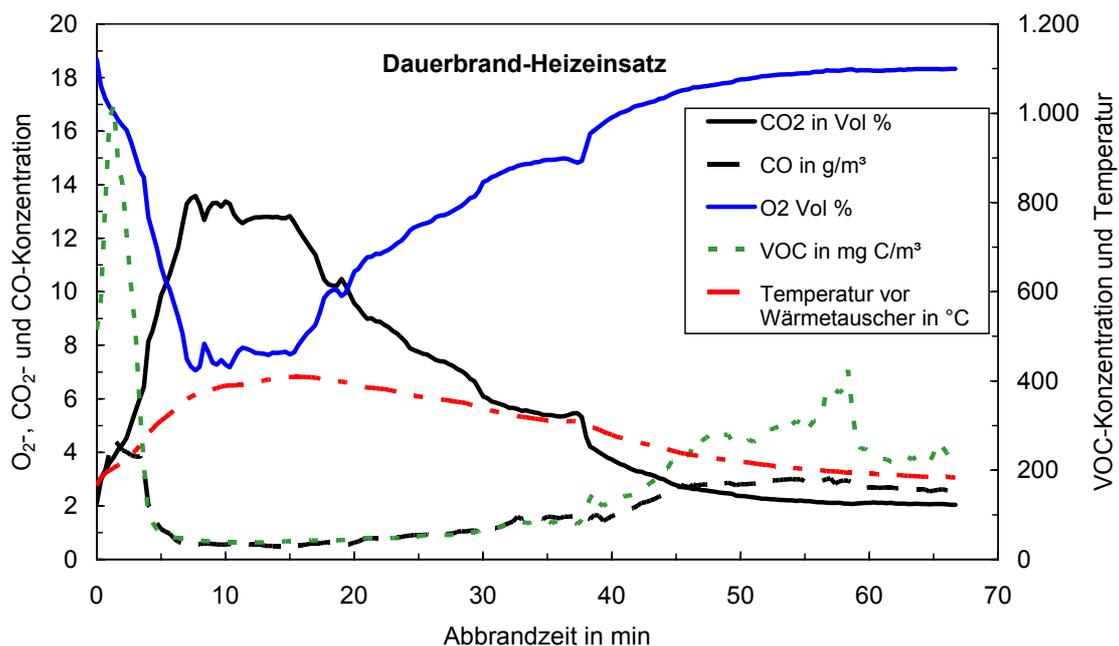


Bild 2.2: Typischer Verlauf der Emissionen bei einer manuell beschickten Stückholzfeuerung [2-29]

Bei automatisch beschickten Anlagen (Bild 2.3) laufen die Verbrennungsvorgänge nach dem Anfahren nahezu kontinuierlich ab, was sich an den Emissionen von Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffen zeigt; je nach Art der Feuerung ist die getaktete

## Vorgänge bei der Verbrennung

Zuführung des Brennstoffs bzw. Reinigungsvorgänge, wie z.B. das im Stundenrhythmus stattfindende Ausblasen der Brennschale in einem Pelletskaminofen (Bild 2.3) an den Emissionen erkennbar.

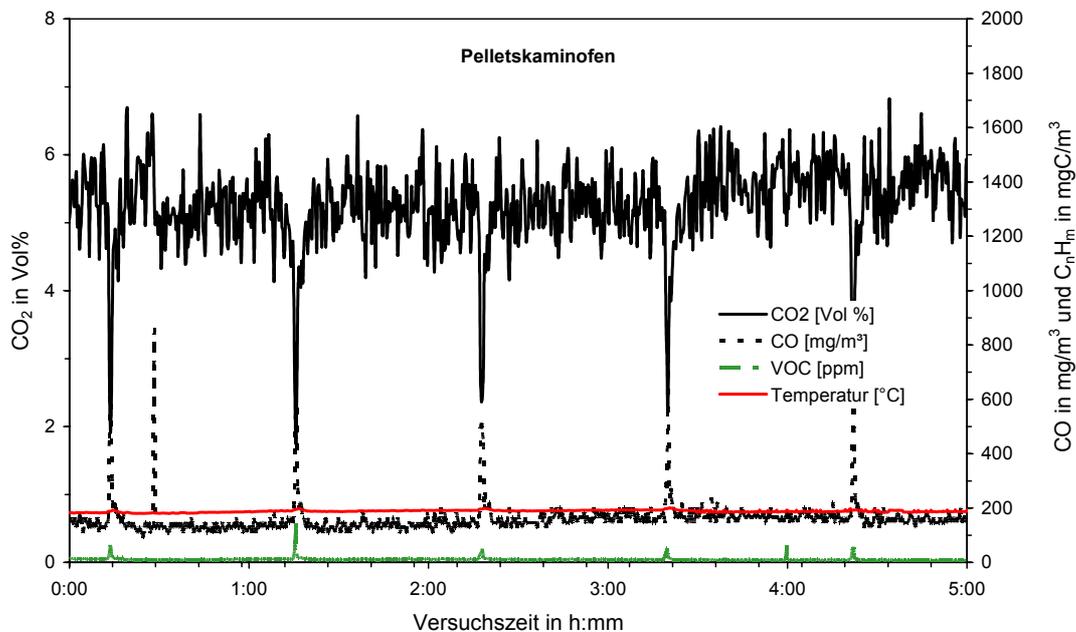


Bild 2.3: Typischer Verlauf der Emissionen bei einer mechanisch beschickten Feuerung (Pelletsfeuerung) [2-29]

Eine „gute“, d. h. eine möglichst vollständige und schadstoffarme Holzverbrennung lässt sich auch für den Laien an mehreren einfachen Erscheinungen ableiten [2-2]:

- Eine saubere Verbrennung führt zu feiner weißer Asche.
- Eine schlechte Verbrennung ist an dunklem Holzrauch zu erkennen.
- Holzruß ist nicht ausreichend verbranntes Holz.
- Glanzruß im Feuerungsraum behindert durch seine isolierende Wirkung den Wärmeübergang.
- Der Rauch sollte als Zeichen einer ausreichenden Abgastemperatur unmittelbar am Schornsteinkopf zunächst unsichtbar sein.
- Zu heißer Rauch führt zu Energieverlusten, zu kalter Rauch durch Kondensation zu Kaminschäden.

## 2.2 Brennstoffe, Eigenschaften und ihr Einfluss auf die Verbrennung, Normierung

Im Regelungsbereich der 1. BImSchV werden Kleinfeuerungsanlagen differenziert nach den eingesetzten Brennstoffen – fest, flüssig oder gasförmig – betrachtet, wobei es für jeden Brennstoff unterschiedliche Verbrennungstechniken und gesetzliche Regelungen gibt. Im Rahmen dieses Projektes werden nur die festen Brennstoffe untersucht, die im Folgenden näher betrachtet werden.

Um den Verbrennungsvorgang und die Entstehung eventueller Schadstoffe verstehen zu können, ist die möglichst genaue Kenntnis der Zusammensetzung der verschiedenen Brennstoffe wichtig.

In § 3 der 1. BImSchV ist geregelt, welche Brennstoffe grundsätzlich in Feuerungsanlagen gemäß der 1. BImSchV eingesetzt werden dürfen. Einen Überblick gibt Tabelle 2.1.

Tab. 2.1: Brennstoffliste für feste Brennstoffe gemäß §3 (1) der 1. BImSchV

§ 3 (1)	Brennstoffe
1.	Steinkohlen, nicht pechgebundene Steinkohlenbriketts, Steinkohlenkoks
2.	Braunkohlen, Braunkohlenbriketts, Braunkohlenkoks
3.	Torfbriketts, Brenntorf
3a.	Grill-Holzkohle, Grill- Holzkohlebriketts
4.	naturbelassenes stückiges Holz einschließlich anhaftender Rinde ...
5.	naturbelassenes nicht stückiges Holz ...
5a.	Presslinge aus naturbelassenem Holz in Form von Holzbriketts entsprechend DIN 51731 ...
6.	gestrichenes, lackiertes oder beschichtetes Holz sowie daraus anfallende Reste ...
7.	Sperrholz, Spanplatten, Faserplatten oder sonst verleimtes Holz sowie daraus anfallende Reste ...
8.	Stroh oder ähnliche pflanzliche Stoffe

Getreidekörner sind keine Regelbrennstoffe nach dieser Brennstoffliste, es werden lediglich „Stroh oder ähnliche pflanzliche Stoffe“ (§ 3 Abs. 1 Nr. 8) genannt. Der Einsatz von Presslingen (Briketts oder Pellets) ist auf solche aus naturbelassenem Holz eingeschränkt.

In § 3 Abs. 2 – 4 ist der Massegehalt an Schwefel im Brennstoff (1 % der Rohsubstanz), der Feuchtegehalt (nur in lufttrockenem Zustand) sowie die Verwendung von Bindemitteln für Presslinge und Briketts (nur Bindemittel aus Stärke, pflanzlichem Paraffin oder Melasse zugelassen) geregelt.

Die §§ 4, 5 und 6 der 1. BImSchV beschreiben die Anforderungen (Grenzwerte, Brennstoffe) an Kleinfeuerungsanlagen für Festbrennstoffe, differenziert nach Anlagengröße (Nennwärmeleistung). Für offene Kamine gelten besondere Einschränkungen für Betriebszeit und Brennstoffen.

Die eigentlichen brennbaren Substanzen eines Brennstoffes sind die organischen Bestandteile [2-7], die aus den Elementen Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff aufgebaut sind. Diese Elemente haben zusammen einen Massenanteil von über 90 % der Trockenmasse, unabhängig von der Brennstoffart.

Die Elementarzusammensetzung der pflanzlichen Biomasse liegt immer in derselben Größenordnung mit ca. 45 % Kohlenstoff, 40 % Sauerstoff und 6 % Wasserstoff. Größere Unterschiede gibt es aber im Stickstoffgehalt. Während dieser bei Holz und Stroh bei bis zu 0,5 % der Trockenmasse liegt, ist der Stickstoffgehalt bei Ganzpflanzen und Getreidekörnern um den Faktor 2 – 3 größer. Die höheren Stickstoffgehalte sind einerseits auf die Verwendung von Stickstoffdüngemitteln zurückzuführen, andererseits auf das im Getreide enthaltene Eiweiß.

Ebenso ist Chlor ein Begleitstoff der Düngemittel, so dass vor allem die gedüngten Feldkulturen, wie z. B. Getreide, im Gegensatz zu unbehandeltem Holz, einen höheren Chlorgehalt haben ([2-27], [2-5]). Der Chlorgehalt wirkt sich auf die Bildung von HCl und Dioxinen/Furanen aus.

Der Schwefelgehalt der biogenen Festbrennstoffe ist mit Werten zwischen 0,01 – 0,2 % der Trockenmasse relativ niedrig. Deutlich höher ist dagegen der Schwefelgehalt der Kohlenbrennstoffe. Aus diesem Grund sind die SO<sub>x</sub>-Emissionen bei den festen Brennstoffen auch nur bei den Kohlenbrennstoffen relevant.

In Tabelle 2.2 ist die Elementarzusammensetzung verschiedener Brennstoffe zusammengefasst ([2-4], [2-5], [2-6], [2-27]).

Tab. 2.2: Elementarzusammensetzung verschiedener fester Brennstoffe

Brennstoffart	C	H	O	N	S	Cl
	in % der Trockenmasse					
Steinkohle	72,5	5,6	11,1	1,3	0,94	< 0,13
Koks	90 - 98	0,3 – 2,9	0 - 5	0 – 0,9	0,6 – 1,2	
Braunkohle	65,9	4,9	23,0	0,7	0,39	< 0,1
Braunkohle-Briketts	53	3,9	20,4	0,59	0,28	
Fichtenholz (mit Rinde)	49,8	6,3	43,2	0,13	0,015	0,005
Buchenholz (mit Rinde)	47,9	6,2	45,2	0,22	0,015	0,006
Birke	48,9	6,1	44,6	0,1	0,02	
Tanne	50,4	5,9	43,4	0,05	0,02	
Lärche	49,6	5,8	44,2	0,2	0,02	
Eiche	50,2	6,0	43,4	0,1	0,02	
Pappelholz (Kurzumtrieb)	47,5	6,2	44,1	0,42	0,031	0,004
Weidenholz (Kurzumtrieb)	47,1	6,1	44,3	0,54	0,045	0,004
Rinde (Nadelholz)	51,4	5,7	38,7	0,48	0,085	0,019
Stroh	42,5 – 47,5	5,1 – 6,0	39,1 – 43,8	0,42 – 1,11	0,056 – 0,27	0,019 – 0,81
Getreideganzpflanzen	44,0 – 48,0	5,8 – 6,4	40,9 – 44,6	1,08 – 1,41	0,11 – 0,18	0,09 – 0,34
Getreidekörner	43,5 – 45,7	6,4 – 6,5	44,4 – 46,4	1,68 – 2,28	0,11 – 0,12	0,04 – 0,16
Rapskörner	60,5	7,2	23,8	3,94	0,1	
Straßengrasschnitt	37,1	5,1	33,2	1,49	0,19	0,88
Holz-Briketts	44,5	5,3		0,08	0,03	
beschichtete Spanplatten	48,0	5,5		4,02	0,06	< 0,1

Neben zahlreichen weiteren Haupt- und Spurenelementen (z. B. Kalium, Magnesium, Phosphor sowie Schwermetalle wie Blei, Quecksilber, Kupfer usw.) sind für den Schadstoffausstoß vor allem der Schwefel-, Stickstoff- und Chlorgehalt sowie der Aschegehalt maßgebend. Die Emissionen dieser Stoffe sind weitgehend unabhängig von der Art der Feuerung [2-2], je höher der Gehalt dieser Elemente im Brennstoff selbst ist, desto größer sind die entsprechenden Schadstoffemissionen.

Bei den festen natürlichen Brennstoffen ändert sich das Verhältnis von Sauerstoff und Wasserstoff zu Kohlenstoff mit dem Alter des Brennstoffs. Damit verändern sich auch

der Heizwert und der Wassergehalt. So liegt z. B. bei waldfischem Holz der Wassergehalt je nach Baumart, Jahreszeit und Alter zwischen 45 – 60 % [2-5]. Lufttrockenes Holz hat dagegen nur noch einen Wassergehalt von 12 - 20 % [2-4].

Diese und weitere brenntechnischen Merkmale für zahlreiche feste Brennstoffe sind in Tabelle 2.3 (Quellen: [2-3], [2-4], [2-5], [2-7], [2-25], [2-26]) zusammengefasst.

Tab. 2.3: brenntechnische Merkmale verschiedener fester Brennstoffe

Brenntechnische Merkmale	Heizwert Hu	Flüchtige Bestandteile	Wassergehalt	Aschegehalt	Ascheerweichungspunkt
	[MJ/kg]	% Trockenmasse			[° C]
Steinkohle	27,9			8,3	1250
Koks	27,1 – 28,9	~ 1	5 - 12		
Braunkohle	20,6			5,1	1050
Braunkohlen-Briketts	19,3		19,1	2,7	
Torf	11,3 – 15,2	> 63	25 - 55		
Fichtenholz (mit Rinde)	18,8	82,9		0,6	1426
Buchenholz (mit Rinde)	18,4	84,0	~ 15	0,5	
Pappelholz (Kurzumtrieb)	18,5	81,2		1,8	1335
Weidenholz (Kurzumtrieb)	18,4	80,3		2,0	1283
Rinde (Nadelholz)	19,2	77,2		3,8	1440
Stroh	15,8 – 17,5	72,7 – 81,4		4,8 – 12,2	839 - 1336
Getreideganzpflanzen	17,7 – 17,7	77,6 – 79,1		4,1 – 4,2	833 - 977
Getreidekörner	16,9 – 17,1	80,0 – 81,0		2,0 – 2,7	810 - 933
(Rapskörner)	26,5	85,2		4,6	
Straßengrasschnitt	14,1	61,7		23,1	1200
Pellets	18		8 - 10	< 1,5	
Holz-Briketts	16,4		11,6	0,23	
Hackschnitzel	11,9 – 15,5				
beschichtete Spanplatten	18,5	79,3		1,6	

Für die energetische Nutzung und das Abbrandverhalten der festen Brennstoffe sind neben der Elementarzusammensetzung vor allem die brenntechnischen und physikalischen Eigenschaften maßgebend. Auch hierbei wird wiederum deutlich, welcher komplexer Prozess sich hinter dem Verbrennungsvorgang verbirgt (siehe Kap. 2.3).

In Tabelle 2.4 sind wichtige Qualitätsmerkmale fester Brennstoffe mit ihren jeweiligen Auswirkungen zusammengefasst ([2-4], [2-8], [2-28]).

Tab. 2.4: Qualitätsmerkmale fester Brennstoffe und ihre Auswirkungen

<b>Qualitätsmerkmal</b>	<b>wichtigste Auswirkung</b>
<b>brenntechnische Kenngrößen:</b>	
Heizwert	energetischer Brennstoffwert, Anlagenauslegung
Wassergehalt	Heizwert, Lagerfähigkeit, Brennstoffgewicht, Selbstentzündung, Verbrennungstemperatur
Gehalt an flüchtigen Bestandteilen	Brennverhalten, Anlagenauslegung
Aschegehalt	Partikelemission, Rückstandsbildung und –verwertung
Ascheerweichungspunkt	Schlackebildung und- ablagerungen (Anlagenauslegung), Betriebssicherheit und –kontinuität, Wartungsbedarf
<b>Elementgehalte:</b>	
Stickstoff	NO <sub>x</sub> - HCN- und N <sub>2</sub> O-Emissionen
Schwefel	SO <sub>x</sub> -Emissionen, Hochtemperaturkorrosion
Chlor	Emission von Organochlorverbindungen (z. B. Dioxine/Furane) und HCl, Hochtemperaturkorrosion
Kalium	Ascheerweichungsverhalten, Hochtemperaturkorrosion
Magnesium, Calcium	Ascheerweichungsverhalten, Ascheeinbindung von Schadstoffen, Ascheverwertung
Schwermetalle	Ascheverwertung, Schwermetallemission
<b>Physikalische Kenngrößen:</b>	
Größe und Form	Beschickung, Anlagentyp, Aufbereitungsbedarf
Korngrößenverteilung/Feinanteil	Förderung, Rieselfähigkeit, Brückenbildungseigenschaften, Belüftungs-/Trocknungseigenschaften, Staubemission
Rohdichte (Einzeldichte)	Schüttdichte, Förderung, Brenneigenschaften (Zündtemperatur, Brenngeschwindigkeit usw.)
Schütt-/Stapeldichte (Lagerdichte)	Transport und Lagerung, Brenneigenschaften, Größe Vorratsbehälter
Abriebfestigkeit	Feinanteil (Staubemission, Entmischung)
Brückenbildungsneigung	Rieselfähigkeit
spezifische Oberfläche	Brennverhalten (Dauer der Trocknung/Entgasung)

Der Wassergehalt ist eine wesentliche Einflussgröße auf den Heizwert eines Brennstoffes. Da die in der Natur vorkommenden Brennstoffe praktisch nie wasserfrei sind, muss die im Brennstoff enthaltene Feuchtigkeit während der Verbrennung verdampfen. Die hierfür erforderliche Energie mindert die Nettoenergieausbeute der Verbrennung, da die Kondensationswärme des im Abgas enthaltenen Wassers normalerweise nicht

nutzbar gemacht wird. Ein geringer Wassergehalt wirkt sich meist positiv auf die Verbrennung aus. Ein hoher Wassergehalt begünstigt jedoch einen unvollständigen Ausbrand mit schadstoffreichen, geruchsintensiven Abgasen. Besonders die geruchsintensiven Abgase können zu Nachbarschaftsbeschwerden führen. Außerdem wird durch einen erhöhten Wassergehalt die Wirtschaftlichkeit der Brennstoffverwertung vermindert, da das im Brennstoff enthaltene Wasser das Gewicht des Brennstoffs erhöht und zusätzliche Energie für die Verdampfung benötigt wird.

Vor allem bei der Feuerung in Haushalten wird der Brennstoff (Holz) oft nicht ausreichend lange gelagert. Gemäß der 1. BImSchV, § 3 (3) müssen die Brennstoffe in lufttrockenem Zustand sein. In der Regel ist dazu, je nach Holzsorte, eine Lagerzeit von 1 – 2 Jahren notwendig. Die aus einem erhöhten Wassergehalt resultierenden Probleme sind oben dargestellt.

Von allen festen Brennstoffen hat Holz mit ca. 0,5 % der Trockenmasse den geringsten Aschegehalt. Rinde, Äste, Zweige sowie Verunreinigungen erhöhen den Aschegehalt. So liegt der Aschegehalt von Hackschnitzeln deutlich über 1 % [2-6], da diese oft aus Schwachholz mit hohem Rinden- und Fremdstoffanteil (z. B. Verunreinigungen durch Erde) gewonnen werden.

### **Normierung**

Auf europäischer Ebene (innerhalb der CEN Mitgliedsstaaten) gibt es eine Normung vom Europäische Komitee für Normung (CEN) für feste Biobrennstoffe: Die Technische Spezifikation prCEN/TS 14961 Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und –klassen. Darin werden „eindeutige und klare Klassifizierungsprinzipien für feste Biobrennstoffe“ definiert. Die festen Biobrennstoffe werden spezifiziert durch ihre Herkunft und Quelle (Abschnitt 6) und ihre hauptsächlichen Handelsformen und Eigenschaften (Abschnitt 7).

Die Herkunft der festen Brennstoffe ist in der Norm beschränkt auf die vier Hauptgruppen holzartige Biomasse, halmgutartige Biomasse, Biomasse von Früchten und definierte und undefinierte Mischungen.

Durch die Handelsformen werden unterschiedliche Größen und Formen festgelegt, die sich auf die Handhabung und die Verbrennungseigenschaften des jeweiligen Brennstoffes auswirken.

In zahlreichen Tabellen der Norm sind die Eigenschaften (z. B. Heizwert, Aschegehalt, Schwefelgehalt) der jeweiligen Handelsform festgelegt. Im Anhang A der Norm sind Beispiele beschrieben, die zur Spezifizierung für Klassen von besonders hoher Qualität dienen. Für diese Brennstoffe wird eine Verwendung im häuslichen Bereich empfohlen. Übliche verwendete Handelsformen für Holz in Haushalten sind gemäß der Norm Pellets, Briketts, Hackschnitzel und Scheite.

Werden in Kleinf Feuerungen Pellets eingesetzt, müssen sie bestimmten Anforderungen entsprechen.

In Deutschland sind Pellets nach DIN 51731 und in Österreich nach ÖNORM M 7135 genormt. Beide Normen beschäftigen sich ausschließlich mit der Herstellung von Pellets. Im Gegensatz zur DIN ist bei der ÖNORM eine Zugabe von 1 – 2 % Kartoffel- oder Maisstärke als Presshilfsmittel erlaubt.

Der Transport und die Lagerlogistik werden in Österreich durch die ÖNORM 7136 geregelt. Die ÖNORM 7137 regelt die Anforderungen an die Pelletlagerung beim Verbraucher.

In Deutschland gibt es seit Beginn des Jahres 2002 das Zertifizierungsprogramm DINplus, das die Anforderungen der DIN 51731 und der ÖNORM 7135 kombiniert. Wenn in beiden Normen zu identischen Kriterien Festlegungen getroffen wurden, so wurde der strengere Wert übernommen.

## 2.3 Feuerungstechnik und Bauarten

Holzfeuerungen können unterschieden werden nach:

- Art der Brennstoffzufuhr: manuell oder automatisch
- Bauartengruppen: Einzelfeuerstätte, erweiterte Einzelfeuerstätte oder Zentralheizungskessel
- Feuerungsprinzip: Durchbrand, oberer Abbrand oder unterer Abbrand, Unterschub- Quereinschub und Abwurffeuerungen
- Zugbedingungen: Naturzug oder gebläseunterstützter Zug
- Rost: Rostlose Verbrennung oder Feuerungen mit Rost
- Lage des Rostes: Flachfeuerung oder Füllfeuerung,

Von diesen Unterscheidungsmöglichkeiten sollen nachfolgend die wichtigsten, nämlich die Feuerungsprinzipien, und bei den manuell beschickten Feuerungen die Bauarten näher erläutert werden. Detailliertere Angaben finden sich im Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen [2-4].

### 2.3.1 Feuerungsprinzipien bei manuell beschickten Anlagen

**Durchbrandfeuerung:**

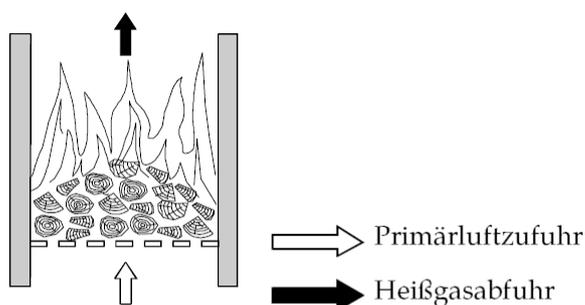


Bild 2.4: Prinzip einer Durchbrandfeuerung

Bei der Durchbrandfeuerung wird die Verbrennungsluft durch den Rost und somit durch die gesamte Brennstoffschichtung geführt. Die Zündung erfolgt von unten, und das Glutbett entwickelt sich über dem Rost unterhalb des restlichen Brennstoffvorrats. Dadurch wird der gesamte Brennstoff erhitzt und befindet sich gleichzeitig in Reaktion.

Durchbrandfeuerungen sind am besten durch häufiges Nachlegen kleiner Brennstoffmengen zu betreiben, um einen möglichst gleichmäßigen Verbrennungsablauf zu erzielen, dennoch ändern sich die Verbrennungsbedingungen mit jedem Nachlegen.

Der Durchbrand ist das klassische Verbrennungsprinzip bei Einzelöfen für Kohlenbrennstoffe. Daneben wird das Durchbrandprinzip auch bei Einzelfeuerstätten für Brennholz (insbesondere Kaminöfen und Kamine) angewendet, da hier eine problemlose Entaschung durch den Rost und den Aschekasten möglich ist.

### Oberer Abbrand

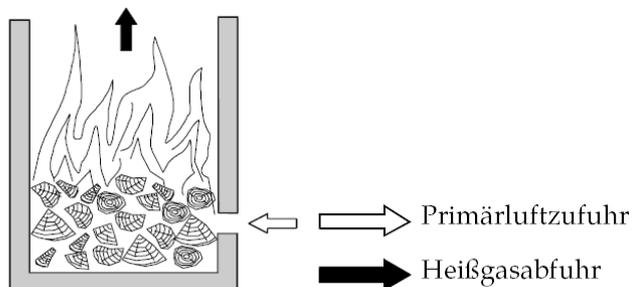


Bild 2.5: Prinzip des oberen Abbrandes

Im Gegensatz zur Durchbrandfeuerung wird die Verbrennungsluft beim oberen Abbrand nicht durch einen Rost geleitet, sondern gelangt seitlich zur Glutbettzone.

Die erste Brennstoffcharge wird von oben gezündet; in der ersten Abbrandphase bildet sich hier die Glutzone. Da die Flammen und die heißen Brenngase steigen ungehindert nach oben, in der Nachbrennzone kann schnell ein vollständiger Ausbrand erreicht werden, während sich der Brennstoffvorrat langsam von oben nach unten erhitzt. Die Gasfreisetzung erfolgt somit gebremst; der Holzvorrat brennt gleichmäßiger und kontrollierter ab als bei einer Durchbrandfeuerung.

Mit der Abnahme der Brennstofffüllhöhe ändern sich das Feuerraumvolumen und somit auch die Verweilzeit für die Nachverbrennung der Brenngase, die größte Verweilzeit wird erst zum Schluss des Abbrands einer Charge erreicht.

Beim Nachlegen wird neuer Brennstoff auf die verbliebene Grundglut gelegt; die nachfolgende Abbrandperiode ähnelt somit der Durchbrandfeuerung. Auch beim oberen Abbrand sind kleinere Nachlegemengen in häufigeren Intervallen von Vorteil.

Vielfach werden solche Feuerungen ohne Rost gebaut; dies hat allerdings den Nachteil, dass dann die Ascheentnahme nur bei abgekühlter Anlage erfolgen kann.

### Unterer Abbrand

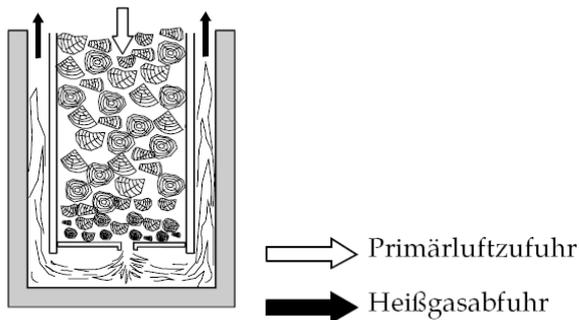


Bild 2.6: Prinzip des unteren Abbrandes

Beim unteren Abbrand breiten sich die Flammen unterhalb des Feuerraumbodens oder zur Seite hin aus („Unterbrandfeuerungen“). Dadurch nimmt nur die jeweils unterste Schicht des Brennstoffbetts an der Verbrennung teil. Die freigesetzten Brenngase werden über einen Gebläsezug in eine Nachbrennkammer gelenkt, in der sie unter Sekundärluftzugabe nachverbrennen.

Das über der Glutzone liegende Holz rutscht im Verlauf des Chargenabbrandes selbsttätig nach und ermöglicht somit einen quasikontinuierlichen Brennstoffnachschub. Die Abbranddauer einer Charge in einem solchen Scheitholzessel kann bis zu fünf Stunden und länger betragen.

Der untere Abbrand ermöglicht eine relativ kontinuierliche pyrolytische Zersetzung und Vergasung des Brennstoffes, die Verbrennungsluftmenge kann – in der Regel durch Gebläse – gut an die freigesetzte Brenngasmenge angepasst werden. Hierdurch wird ein guter Ausbrand und somit eine hohe Verbrennungsqualität erreicht. Das untere Abbrandprinzip stellt auf Grund dieser Vorteile bei Stückholz-Zentralheizungskesseln das mit Abstand am häufigsten verwendete Feuerungsprinzip dar.

In Einzelfeuerstätten wird der untere Abbrand nur selten eingesetzt, auch sind die Anlagen nur für stückiges Holz oder sehr grobes Hackgut gut geeignet, ein Nachfüllen während der Hauptabbrandphase ist nur bedingt möglich.

Das Prinzip des unteren Abbrands findet seine Anwendung in Speicheröfen (selten), Küchenherden, Zentralheizungsherden und Stückholzkesseln.

### **2.3.2 Bauarten manuell beschickter Einzelraumfeuerstätten**

Im Gegensatz zu den Zentralheizungskesseln geben Einzelraumfeuerstätten ihre Wärme nur an den umgebenden Raum über Wärmestrahlung oder zusätzlich über Luftkonvektion ab.

Einzelraumfeuerstätten können nach verschiedenen Kriterien unterschieden werden. Durch Varianten und Mischformen gibt es eine Vielzahl von Bezeichnungen und Begriffen, die nicht immer eindeutig sind.

In dieser Untersuchung wird zwischen den sechs folgenden Arten von Einzelraumfeuerungen unterschieden:

#### **Offene Kamine und Kamine mit Heizeinsatz**

Beim offenen Kamin ist der Feuerraum zum Wohnraum hin offen, eine definierte Verbrennungsluftzufuhr ist nicht möglich; offene Kamine besitzen durch niedrige Temperaturen und hohen Luftüberschuss hohe Emissionen und einen niedrigen Wirkungsgrad, offene Kamine werden daher nur gelegentlich und nicht als Dauerheizung benutzt.

Bei Kaminen mit Heizeinsatz oder Cheminéeöfen wird der Feuerraum zum Wohnraum hin mit einer Glastür oder Glasscheibe verschlossen. Die Luftzufuhr kann dadurch besser geregelt und der Wirkungsgrad gesteigert werden.

Bedingt durch die Größe der Holzscheite ist der Feuerraum vergleichsweise groß.

#### **Dauerbrandöfen**

Dauerbrandöfen stehen frei im Wohnraum und arbeiten nach dem Durchbrandprinzip. Durch die obere Tür wird der Brennstoff in den meist aus Schamotte bestehenden Brennraum gegeben. Die durch den Rost gefallene Asche wird über den Aschekasten durch die untere Tür abgezogen. Die Luftmenge kann durch Klappen und Schieber, im einfachsten Fall in der Entaschungstür, geregelt werden. Dauerbrandöfen werden meist zur Verfeuerung von Kohle eingesetzt.

### **Kaminöfen**

Der Kaminofen ist die Variante des Dauerbrandofens für die Verfeuerung von Holz mit einer großen Beschickungstür, die mit einer Sichtscheibe ausgestattet ist. Kamin- und Dauerbrandöfen können mit Kacheln oder Naturstein verkleidet sein, um die Wärme gleichmäßiger abgeben zu können. Kaminöfen werden meist in der Übergangszeit und selten als Dauerheizung benutzt.

### **Kachelöfen (Speicheröfen)**

Speicheröfen besitzen eine große Speichermasse (Kacheln, Zementputz, Ton, Schamotte oder Speckstein) und eine große Oberfläche mit relativ niedriger Temperatur (80 bis 130 °C). Sie werden meist vor Ort von einem Ofenbauer errichtet. Speicheröfen werden in der Regel nur für kurze Zeit bei Volllast betrieben und geben die gespeicherte Wärme über einen längeren Zeitraum hin ab. Ein Gluthalbetrieb ist meist nicht erforderlich, daher zeichnen sich diese Öfen durch ein günstiges Emissionsverhalten aus. Durch das Prinzip der Wärmespeicherung liegt die Feuerungswärmeleistung (d.h. die Leistung beim Aufheizen unter Volllast) erheblich höher als die abgegebene Wärmeleistung (Nennleistung).

### **Herde (Küchenherde)**

Herde sind vor allem im ländlichen Bereich häufig zu finden, sie werden außer zum Kochen auch zum Heizen der entspr. Räume eingesetzt, der Anteil am Endenergieverbrauch liegt unter 2 %.

### **Badeöfen**

Badeöfen dienen zur Bereitstellung von Warmwasser. Sie spielen bzgl. Anzahl und Energieeinsatz nur eine untergeordnete Rolle.

### 2.3.3 Feuerungsprinzipien bei automatisch beschickten Anlagen

Bei Kleinanlagen im Leistungsbereich bis ca. 100 kW Nennwärmeleistung kommen nur Festbettfeuerungen zum Einsatz, auf deren sehr unterschiedliche Feuerungsprinzipien im Folgenden näher eingegangen werden soll.

#### Unterschubfeuerungen

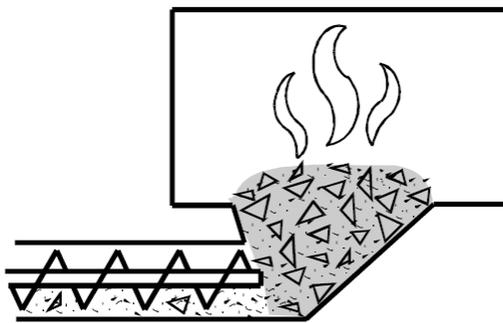


Bild 2.7: Prinzip einer Unterschubfeuerung

Bei einer Unterschubfeuerung wird der Brennstoff mit einer Förderschnecke von unten in die Feuermulde eingeschoben. Ein Teil der Verbrennungsluft wird als Primärluft in die Retorte eingeblasen. Dort erfolgen die Trocknung, pyrolytische Zersetzung und Vergasung des Brennstoffs sowie der Abbrand der Holzkohle. Um die brennbaren Gase vollständig zu oxidieren, wird die Sekundärluft vor dem Eintritt in die heiße Nachbrennkammer mit den brennbaren Gasen vermischt.

In Unterschubfeuerungen können Holzsnitzel mit einem Wassergehalt von 5 bis maximal 50 % verfeuert werden. Feuerraum und Nachbrennkammer müssen dabei an die Brennstoffqualität – insbesondere an den Brennstoff-Wassergehalt – angepasst sein, um technische Störungen zu vermeiden.

Unterschubfeuerungen eignen sich für aschearme Brennstoffe, die wegen der Schneckenbeschickung eine feinkörnige und gleichmäßige Beschaffenheit aufweisen müssen. Das Prinzip der Unterschubfeuerung wird zunehmend auch für die Verbrennung von Holzpellets verwendet (z. B. in Pellet-Zentralheizungskesseln).

### Quereinschubfeuerungen

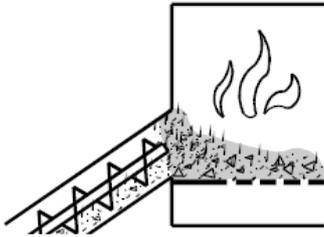


Bild 2.8: Prinzip einer Querschubfeuerung

Bei diesen Bauarten wird der Brennstoff von der Seite in den Feuerraum, der mit oder ohne Rost ausgestattet ist, eingebracht. Holzhackschnitzel mit kleinen Kantenlängen und relativ gleichbleibender Korngröße werden überwiegend mit Hilfe von Schnecken in die Feuerung eingebracht; grobkörnige ungleichmäßige Brennstoffe (z. B. zerspanntes oder ungesiebttes Schredderholz, Rinde) können aber auch durch Kolben beschickt werden.

Bei den Rostfeuerungen überwiegen die starren Rostsysteme. Erst im Leistungsbereich über 100 kW kommen auch bewegte Vorschubroste zum Einsatz. Beim Vorschubrost wandert der Brennstoff durch Vor- und Rückwärtsbewegungen der einzelnen Rostelemente auf dem Schrägrost nach unten.

Ähnlich wie die Unterschubfeuerung funktioniert auch die rostlose Schubbodenfeuerung (auch „Einschubfeuerung“). Wenn sie über eine wassergekühlte Brennmulde verfügt, ist sie – neben Hackschnitzeln und Holzpellets – speziell auch für aschereiche und zur Verschlackung neigende Brennstoffe geeignet.

### Abwurffeuerungen (Pelletfeuerungen)

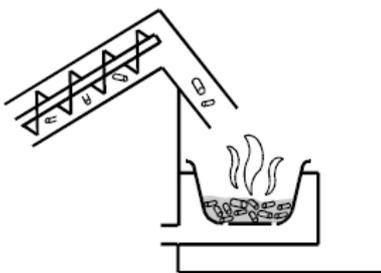


Bild 2.9: Prinzip einer Abwurffeuerung

Bei den Abwurff Feuerungen handelt es sich um eine Bauartengruppe, die speziell für Holzpellets entwickelt wurde und sich daher nicht für konventionelle Hackschnitzel eignet, mit anderen Brennstoffen (z. B. gesiebte Hackschnitzel) wird experimentiert.

Die mit einer Förderschnecke zugeführten Pellets fallen über ein Rohr oder einen Schacht von oben auf das Glutbett (in Brennschale, Kipprost oder Tunnel). Dort werden Primär- und Sekundärluft von unten bzw. seitlich eingeleitet. Die zusammen mit der Asche abgekippten noch brennbaren Bestandteile glühen im Aschebett aus, während neu zugeführte Pellets auf dem gereinigten Rost gezündet werden.

Pelletbrenner werden auch als Nachrüstkomponenten angeboten, die ähnlich wie ein Erdgas- oder Heizölbrenner an einen bestehenden Heizkessel angeflanscht werden können, so dass damit auch der Umbau einer bestehenden Anlage möglich wird. Hierbei sind insbesondere Kombinationen mit Scheitholzkesseln üblich.

Pelletfeuerungen werden mittlerweile auch als Einzelfeuerstätten angeboten.

Die Verwendung von anderen leicht rieselfähigen Körnerbrennstoffen wie Getreide, Ölsaaten oder Ackerbohnen ist jedoch wegen des hohen Aschegehalts und vor allem wegen der Verschlackungsneigung nicht problemlos möglich.

## **2.4 Primärmaßnahmen zur Emissionsminderung**

Neben einer fachgerechten Planung (z.B. Dimensionierung entsprechend dem Wärmebedarf, Integration eines Pufferspeichers bei z.B. Stückholzkesseln), Installation (z.B. hydraulische Einbindung der Einzelkomponenten), Inbetriebnahme und regelmäßiger Wartung der Feuerungsanlage ist die Verwendung von geeigneten und vorgesehenen Brennstoffen (Qualitätskontrollen) eine Grundvoraussetzung für einen emissions- und störungsarmen Betrieb der Feuerungen. Durch eine richtige Dimensionierung und den Einsatz von Pufferspeichern kann die Anzahl von Lastwechseln, Gluterhaltphasen und Anbrennvorgängen reduziert werden. Wird das zulässige Brennstoffband eingehalten, wirkt sich dies positiv auf das Emissionsverhalten, vor allem im Teillastbereich, bei Lastwechseln oder bei Anbrennvorgängen, aus.

Durch eine konsequente feuerungstechnische Optimierung der Holzfeuerungsanlagen und durch einen verstärkten Einsatz von Regel- und Messtechnik könnten die Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung und Staub weiter reduziert werden. Dem steht entgegen, dass zum einen die Anlagenkosten steigen würden und zum anderen z.T. entsprechende Messtechniken mit Regelkonzepten noch nicht marktreif zur Verfügung stehen. Mögliche Primärmaßnahmen für handbeschickte Einzelfeuerstätten und Stückholzkessel sowie für mechanisch beschickte Anlagen werden im Folgenden zusammenfassend beschrieben.

### **2.4.1 Primärmaßnahmen für handbeschickte Einzelfeuerstätten**

Einige wesentliche Kennzeichen handbeschickter Einzelfeuerstätten, wie z.B. Kachelöfen und Kaminöfen, sind:

- die Anlagen werden ohne mechanische Abgasförderung mit dem natürlichen Schornsteinzug betrieben
- ein ausgeprägter Chargenabbrand aufgrund der relativ geringen Brennstoffaufgabemengen (vor allem z.B. bei Kaminöfen und Kamineinsätzen) mit einer entsprechend kurzen Hauptverbrennungsphase und
- der häufige Teillastbetrieb bei installierten Feuerungen, da diese Heizgeräte in der Regel als Zusatzfeuerung eingebaut werden, deren Leistungen aber vergleichsweise hoch sind.

Diese Punkte wirken sich auf die Primärmaßnahmen und deren Wirksamkeit aus.

Mögliche Maßnahmen zur Verbesserung der Verbrennungsbedingungen sind:

- Verbesserung der Mischungsbedingungen von Verbrennungsluft und brennbaren Gasen, vor allem in der Nachreaktionszone. Unabhängig von den Teilvolumenströmen sollte eine konstant gute Mischungsgüte erhalten werden. Das Strömungsprofil in der Nachreaktionszone sollte so sein, dass ein möglichst gleichmäßiges Verweilzeitspektrum der Reaktionsprodukte erreicht wird
- bessere Abstimmung von Primär- und Sekundärluft-Volumenströmen und größere Eindringtiefe der Sekundärluft in die Nachreaktionszone bei hoher Turbulenz
- Festlegung von optimierten Zugabeorten der Sekundärluft in der Nachreaktionszone.

Diese Maßnahmen sollten über den gesamten Leistungsbereich des Heizgerätes weitgehend konstant wirksam sein. Da sich aber z.B. Temperatur- und Strömungsprofile in Abhängigkeit der Feuerungswärmeleistung innerhalb der Reaktionszonen der Feuerstätten verändern, sind hier einfache und schnelle Lösungen nicht umsetzbar. Deshalb wäre der Einsatz von Simulationsprogrammen zur Berechnung der Strömungs- und Temperaturprofile (mit Einschränkungen auch der Konzentrationsprofile) für eine optimierte Auslegung der Feuerräume und der Verbrennungsluftversorgung sinnvoll.

Für die Konstruktion der Heizgeräte lassen sich aufgrund des typischen Verlaufs von Chargenabbränden und den angeführten Primärmaßnahmen folgende Anforderungen ableiten:

- in der Anbrennphase muss durch eine geeignete Verbrennungslufführung (Primärluft sollte direkt in den Glutbereich zugeführt werden) eine schnelle Zunahme des Brennstoffumsatzes (und damit der Gastemperaturen) erreicht werden
- in der Hauptverbrennungsphase ist der Brennstoffumsatz zu stabilisieren (d.h. Reduzierung der Primärluft) und u.U. sollte der Sekundärluftanteil erhöht werden, um örtlichen Sauerstoffmangel zu verhindern
- in der Ausbrandphase sollte der Primärluft-Volumenstrom wieder erhöht und der Sekundärluft-Volumenstrom deutlich reduziert bzw. ganz abgestellt werden. Hierdurch wird der Brennstoffumsatz möglichst lange auf hohem Niveau gehalten und ein zu schnelles absinken der Gastemperatur verhindert.

Diese Maßnahmen können aber nicht ohne weiteres wirkungsvoll umgesetzt werden. So wirken sich Schwankungen des Schornsteinzuges unmittelbar auf den Abgasvolumenstrom und damit auch auf den Verbrennungsluftvolumenstrom aus, was die Mischungsbedingungen oder auch die Sicherstellung eines notwendigen Luftüberschusses beeinträchtigen kann. Außerdem steht für die Förderung des Abgases nur ein relativ geringer Schornsteinzug zur Verfügung, der auch die möglichen Druckverluste in der Feuerung stark begrenzt. Die für hohe Turbulenzen und gute Mischungen notwendigen höheren Strömungsgeschwindigkeiten, von z.B. der Sekundärluft, können unter diesen Bedingungen kaum realisiert werden. Werden hohe Anforderungen an die Verbrennungsqualität über den gesamten Betriebsbereich gestellt, erscheint ein Übergang zur mechanisch unterstützten Abgas- oder Verbrennungslufförderung notwendig.

Da bei diesen Feuerungen sowohl die Brennstoffqualität (z.B. Wassergehalt, Größe der Einzelstücke) als auch die Brennstoffaufgabemengen eine große Bandbreite abdecken, können wichtige Verbrennungsparameter (z.B. Verbrennungsluftmenge, Aufteilung in Primär- und Sekundärluft) nicht fest eingestellt werden. Die Einstellung nimmt bisher in den meisten Fällen der Betreiber vor, hat aber hierfür nur Anhaltswerte aus der Bedienungsanleitung oder eigene Erfahrungswerte zur Verfügung. Ein emissionsarmer Betrieb der Feuerungen ist deshalb nicht immer sichergestellt. Deshalb wurden verschiedene Konzepte zur Verbrennungsregelung schon vor einigen Jahren ausführlich untersucht ([2-30], [2-31]) und teilweise auch von einigen Herstellern am Markt eingeführt.

Als Regelgrößen für die Verbrennungsregelung werden derzeit z.B. Temperaturen oder die Sauerstoffkonzentration im Abgas verwendet. Die Verbrennungsgüte selbst wird nicht direkt gemessen, da bisher geeignete Sensoren am Markt noch nicht verfügbar sind. Eine Beurteilungsgröße hierfür wäre z.B. die CO-Konzentration im Abgas oder eine Summenmessung aller unverbrannter Bestandteile. Eine direkte Bestimmung der Verbrennungsgüte hätte gegenüber der Sauerstoffmessung den Vorteil, dass Verschiebungen des optimalen Betriebsbereiches erkannt werden. Diese Verschiebungen ergeben sich z.B. bei Änderungen des Wassergehaltes im Brennstoff oder bei Laständerungen.

Diese Regelkonzepte, in Verbindung mit einer feuerungstechnischen Optimierung, können Fehlbedienungen der Betreiber verhindern und reduzieren die Folgen beim Einsatz von weniger geeigneten Brennstoffen. Wenn diese Systeme dann noch Infor-

mationen an den Betreiber geben, wie von einigen Herstellern bereits praktiziert, könnte die Emissionsbandbreite und das Emissionsaufkommen aus Einzelfeuerstätten nach eigenen Einschätzungen doch deutlich reduziert werden.

### **2.4.2 Primärmaßnahmen für handbeschickte Stückholzkessel**

Die bereits im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Maßnahmen für Einzelfeuerstätten können großteils sinngemäß auch auf Stückholzkessel übertragen werden. Auch an Stückholzkesseln wurden verschiedene Konzepte zur Verbrennungsregelung schon vor einigen Jahren ausführlich untersucht ([2-13], [2-17]) und mittlerweile von vielen Herstellern am Markt eingeführt.

Insgesamt ist die Emissionsminderung an CO, VOC und Staub, die sich durch die konsequente feuerungstechnische Optimierung und den Einsatz entsprechender weit entwickelter Mess- und Regeltechnik ergeben würde, nur schwer abzuschätzen. Bisherige Prüfstandsuntersuchungen an mit unterschiedlichen Konzepten geregelten Feuerungen (z.B. Regelgröße Sauerstoffkonzentration und Temperatur gegenüber Kombination von Sauerstoff- und CO-Messung) ergaben z.T. nur überraschend geringe Verbesserungspotentiale im Bereich von 10 % [2-13]. Es ist aber davon auszugehen, dass sich das wirkliche Minderungspotential derartiger Regelkonzepte erst im Praxiseinsatz zeigt und nicht unter den kontrollierten und oft auch sehr optimierten Bedingungen auf Prüfständen.

Eine deutliche Emissionsminderung bei Stückholzkesseln wird in der Regel erreicht, wenn diese in Kombination mit einem ausreichend bemessenen Pufferspeicher ausgerüstet werden ([2-21] bzw. Kap. 10.6).

### **2.4.3 Primärmaßnahmen für mechanisch beschickte Anlagen**

Die Emissionen von CO, VOC und Staub lassen sich bei mechanisch beschickten Holzfeuerungen durch weitergehende Primärmaßnahmen reduzieren. Hierzu gehören ebenfalls weitere Verbesserungen in der Verbrennungs- und Regelungstechnik, mit der z.B., bedingt durch die Strömungsführung, ein nahezu vollständiger Ausbrand und eine weitgehende Partikelabscheidung bereits im Feuerraum erreicht wird. Teilweise wurden derartige Entwicklungen in marktfähige Produkte umgesetzt [2-24].

Ein weiteres Minderungspotential bei mechanisch beschickten Anlagen könnte noch ausgeschöpft werden, wenn wesentliche Kenngrößen des Brennstoffes (z.B. Wassergehalt oder Größenverteilung) direkt vor der Feuerung erfasst und in den Regelprozess

einfließen könnten. Hierdurch wäre es z.B. möglich, bei Rostfeuerungen die Verteilung von Primär- und Sekundärluft in Abhängigkeit des Wassergehaltes zu regeln oder auch den Teillastbereich entsprechend anzupassen. Eine geeignete Messtechnik steht bisher aber nicht zur Verfügung. Das Minderungspotential ist auch hier schwer abzuschätzen, da es wiederum vor allem im Praxiseinsatz deutlich werden würde, wenn starke Schwankungen der Brennstoffqualitäten in Kombination mit ausgeprägten Leistungsregelungen auftreten.

### **2.5 Bewertung von Sekundärmaßnahmen zur Luftreinhaltung**

Als Sekundärmaßnahmen zur Minderung von Produkten unvollständiger Verbrennung im Abgas der Feuerungsanlagen können z.B. Oxidationskatalysatoren eingesetzt werden. Hierbei erfolgt auch eine gewisse Minderung der Staubemissionen, da kondensierte hochsiedende organische Verbindungen auch im Katalysator oxidiert werden.

Als wirksame Maßnahme zur Minderung der Staubemissionen bieten sich z.B. Gewebefilter oder Elektrofilter an. Gemeinsam gilt für die genannten Sekundärmaßnahmen, dass der Investitionsaufwand (deutlich) zunimmt, der Wartungsaufwand für den Betrieb der Feuerungsanlage ansteigt und eine gute Abstimmung und Einbindung der Sekundärmaßnahme an die Feuerungsanlage notwendig ist.

#### **2.5.1 Oxidationskatalysatoren**

In den letzten 20 Jahren gab es immer wieder Ansätze zur Entwicklung von Oxidationskatalysatoren für die Anwendung in kleinen Feuerungsanlagen (z.B. [2-11], [2-15], [2-18]). Vorgesehen waren diese Entwicklungen für den Einsatz bei Einzelfeuerstätten (z.B. Kachelöfen oder Kaminöfen), die mit natürlichem Schornsteinzug betrieben werden. Mit dieser Technik sollten vor allem die Emissionen von CO und VOC reduziert werden. Bisher konnte sich keiner dieser Entwicklungen am Markt durchsetzen. Dies hatte u.a. folgende Gründe:

- relativ hohe Kosten der Katalysatoren im Vergleich zur Feuerstätte
- Wirksamkeit war nur gering oder gar nicht vorhanden
- zu geringe Standzeiten und
- Sicherheitsbedenken.

Insgesamt wurde bisher der Einsatz von Oxidationskatalysatoren bei diesen kleinen, einfach aufgebauten Feuerungsanlagen kritisch beurteilt. Hierbei spielen vor allem Sicherheitsaspekte (z.B. Betriebssicherheit bei erhöhten Druckverlusten im Katalysator durch zugesetzte Querschnitte, CO-Sicherheit bei kleinster Feuerungsleistung), die in der Praxis erreichbaren Standzeiten der Katalysatoren (z.B. Beaufschlagung mit Katalysatorgiften, Temperaturwechselbeständigkeit, Überschreitungen der zulässigen Arbeitstemperatur) und die Wirksamkeit dieser Systeme bei unterschiedlichen Betriebszuständen (z.B. Teillast) eine Rolle. Meist waren die Katalysatoren für den nachträglichen Einbau in bestehende Anlagen vorgesehen, so dass diese nach dem Abgasstutzen der Heizgeräte in das Abgasrohr eingebaut wurden. Hierdurch wurden die notwendigen Reaktionstemperaturen in bestimmten Betriebsphasen (z.B. Anbrennen, Teillast) gar nicht oder nur zum Teil während des Chargenabbrandes erreicht. Außerdem wird zur Oxidation der unvollständig verbrannten Abgasbestandteile im Katalysator ein ausreichender Luftüberschuss benötigt. Bei einfacher oder auch älterer Verbrennungstechnik (mit eingeschränkten Regelmöglichkeiten für die Verbrennungsluftzufuhr) und beim Betrieb der Heizgeräte mit hoher Feuerungswärmeleistung kann sich allerdings ein mehr oder weniger ausgeprägter Luftmangel einstellen, so dass eine Oxidation von Produkten unvollständiger Verbrennung im Katalysator nicht mehr oder nur noch in geringem Maße stattfindet, obwohl die Reaktionstemperatur ausreichend hoch ist. Einige der bisherigen Entwicklungen zeigten auch keine katalytische Wirkung bzw. die katalytisch wirksame Oberfläche war viel zu klein, um eine Emissionsminderung zu erreichen [2-20].

Eine aktuelle Katalysatorentwicklung wurde im Rahmen eines Teilprojektes im laufenden Vorhaben untersucht (siehe Kap. 3.3.4). Als Feuerstätte wurde ein Kachelofen-Heizeinsatz verwendet, der Abgaskatalysator wurde unmittelbar nach dem Stutzen des Heizeinsatzes in das Verbindungsstück zum nachgeschalteten Guss-Wärmetauscher eingebaut. Anhand unterschiedlicher Wärmeleistungen wurde die katalytisch bewirkte CO- und VOC-Minderung ermittelt. Als Brennstoffe wurden Buchenholz und Braunkohlenbriketts eingesetzt. Der Katalysator soll u.a. als Nachrüstatz für bestehende Feuerstätten zum Einsatz kommen [2-10].

Ergänzend hierzu wurden von der UMEG (Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit Baden-Württemberg, Karlsruhe) weitere Messungen am Katalysator durchgeführt. Hierbei wurden neben den Staubemissionen u.a. auch

die Konzentrationen von anorganischen Chlorverbindungen, aliphatischen Aldehyden, organischen Einzelkomponenten und polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe bestimmt [2-22].

Bei diesen Untersuchungen wurde festgestellt, dass die CO- und VOC-Emissionen des Heizeinsatzes durch den Einsatz eines Oxidationskatalysators reduziert werden können. Wird der Heizeinsatz in einem Leistungsbereich betrieben, bei dem die Gastemperatur vor Katalysator rasch auf über 300 °C ansteigt, so lassen sich die CO-Emissionen eines Chargenabbrandes im Mittel um rund 20 % (Bandbreite 19 bis 39 %) und die VOC-Emissionen um nahezu 50 % (Bandbreite 47 bis 60 %) mindern. Diese Mittelwerte wurden aus 3 Versuchsreihen mit Holzbrennstoffen und einer Versuchsreihe mit Braunkohlenbriketts berechnet. Werden nur die Versuche mit Buchenscheitholz betrachtet, so sind die Minderungen etwas höher (CO bei rund 23 % und VOC bei 54 %).

Diese Ergebnisse wurden durch die ergänzenden Messungen der UMEG bestätigt, wobei eine Emissionsminderung von mindestens 50 % auch für organische Einzelkomponenten (Benzol), polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, Staub und HCl nachgewiesen wurde.

Voraussetzung ist allerdings in allen Fällen (außer vielleicht für HCl), vor allem für eine effektive CO-Minderung, dass auch in der Hauptverbrennungsphase noch ausreichend Sauerstoff im Heizgas vor Katalysator enthalten ist.

Diese Katalysatorentwicklung befindet sich weiterhin in einer intensiven Erprobungsphase, die neben Prüfstandsmessungen auch Feldversuche mit einschließt [2-10].

Hauptproblem bei den Feldversuchen war der Druckverlust im Abgaskanal, hervorgerufen durch Probleme bei der Anpassung der Katalysatorlinse an marktübliche Ofenrohre sowie Druckverluste durch die Katalysatorschüttung selbst sowie durch in ihr abgelagerten Staub. Weiterhin sollte der Ausbau der Katalysatorlinse zum Zwecke der Reinigung vereinfacht werden. Dieser Optimierungsbedarf dürfte zu bewerkstelligen sein.

Über den Marktpreis dieses Zusatzgerätes sind noch keine Angaben bekannt.

Zusammenfassend wird der Einsatz von Oxidationskatalysatoren bei Einzelfeuerstätten wie folgt bewertet:

- Eine Minderung von CO in der Größenordnung von 20 bis 30 % und für VOC von 50 bis 60 % erscheint für einen Chargenabbrand bei guten Randbedingungen möglich. Voraussetzung hierfür ist ein Einbau des Katalysators möglichst unmittelbar am Abgasstutzen der Heizgeräte und ein Betrieb der Feuerungen im Bereich der Nennwärmeleistung (ca. > 65 % der Nennwärmeleistung). Außerdem sind die Brennstoffaufgabemengen, die Brennstoffqualitäten und die Verbrennungsluftschieber der Heizgeräte so zu wählen bzw. einzustellen, dass in jeder Betriebsphase des Chargenabbrandes auch ein gewisser Luftüberschuss im Abgas vor Katalysator erhalten bleibt. Werden diese Randbedingungen nicht eingehalten, nimmt die CO- und VOC-Minderung aufgrund zu geringer Katalysatortemperaturen oder zu geringer Sauerstoffkonzentrationen im Katalysator deutlich ab.
- Die Wirksamkeit des Katalysators ist, wie das Emissionsverhalten dieser Heizgeräte insgesamt, auch wesentlich vom Betreiberverhalten abhängig. Dieser beeinflusst mit den Brennstoffaufgabemengen, den Brennstoffqualitäten und den Einstellungen für die Verbrennungsluft die Verbrennungs- und Reinigungsqualität entscheidend.
- Bei den hier diskutierten Einzelfeuerstätten erfolgt die Förderung von Verbrennungsluft und Abgas durch die Druckdifferenz des natürlichen Schornsteinzuges. Diese Druckdifferenzen sind relativ gering und u.a. von den aktuellen meteorologischen Bedingungen, den Schornsteineigenschaften, der Feuerstätte (einschließlich nachgeschalteter Wärmetauscher) und vom Verbindungsstück zwischen Feuerstätte und Schornstein abhängig. Sowohl die Feuerstätte (z.B. durch geringe Strömungswiderstände) als auch deren Bedienung (z.B. durch die Vorgabe zur Einstellung der Stellorgane für Verbrennungsluft) ist auf diese geringen Druckdifferenzen abgestimmt. Auch die Typprüfung der Feuerstätten wird bei geringen Schornsteinzügen durchgeführt. Durch den nachträglichen Einbau eines Katalysators in das Abgasrohr erhöht sich der Druckverlust im System u.U. deutlich. Hierdurch kann es zu Störungen in der Verbrennung (die einströmende Verbrennungsluftmenge ist zu gering bzw. die Verteilung der Verbrennungsluft verändert sich) führen. Der Betreiber hat nun keine Hinweise (z.B. in der Bedienungsanleitung) dafür, wie er das Heizgerät mit Katalysator richtig betreiben soll (z.B. veränderte Einstellung der Stellorgane für Primär- und Sekundärluft beim Katalysatorbetrieb). Dies kann dazu führen, dass die Emissionen des Heizgerätes mit Katalysator höher sind als ohne Katalysator. Außerdem muss ein nachgeschalteter Katalysator bei zu geringem Schornsteinzug (z.B. beim

Anheizen der Feuerstätte) umfahren werden, damit die Anlage überhaupt in Betrieb genommen werden kann.

- Zusätzlich sind Sicherheitsaspekte zu beachten. So muss ein Abgasaustritt in den Aufstellungsraum auch dann verhindert werden, wenn bei sehr kleiner Wärmeleistung der Schornsteinzug stark abnimmt (CO-Sicherheit) oder wenn der Gasdurchgang im Katalysator durch Ablagerungen behindert wird.

### **2.5.2 Staubabscheider**

Abgasseitig lässt sich die Partikelkonzentration durch den Einsatz von Staubabscheidern deutlich mindern, wobei neben der Gesamtmasse der emittierten Partikel in etwa proportional auch die Masse der einzelnen Partikelfractionen (Feinstäube) abnimmt. So wurden bei eigenen Messungen an einer mit Resthölzern betriebenen Unterschubfeuerung bzw. einer mit Hackschnitzel betriebenen Rostfeuerung nach dem Gewebefilter Partikelkonzentrationen von  $< 10 \text{ mg/m}^3$  (bezogen auf 13 Vol % O<sub>2</sub>) ermittelt. Bisher werden solch wirksame Staubabscheider allerdings nur vereinzelt und meist nur bei größeren Holzfeuerungen (Nennwärmeleistung ab ca. 500 kW) eingesetzt. Dies liegt daran, das kostengünstige Entstaubungsverfahren (außer Zyklonen) für Kleinanlagen bisher nicht entwickelt wurden bzw. die bestehenden gesetzlichen Anforderungen auch mit einfacheren Techniken erfüllt werden können.

Prinzipiell können folgende Techniken zur Entstaubung eingesetzt werden:

- Massenkraftabscheider (z.B. Zyklone, Multizyklone)
- Nassentstauber
- Elektroabscheider
- filternde Staubabscheider (z.B. Gewebefilter).

Massenkraftabscheider bzw. Fliehkraftabscheider in der Bauform von z.B. Zyklonen oder Multizyklonen werden derzeit bereits häufig in mittleren und größeren Holzkesseln eingesetzt. Sie sind nur für die Abscheidung relativ grober Teilchen mit einem aerodynamischen Durchmesser von größer als etwa 5 - 10  $\mu\text{m}$  geeignet und werden häufig auch als Vorabscheider eingesetzt. Bestehen keine höheren Anforderungen an die Gesamtstaubkonzentration im Abgas, wie in der derzeitigen 1. BImSchV festgelegt, und werden an die Abscheidung von Feinstaub auch keine erhöhten Anforderungen gestellt, können derartige Entstauber eingesetzt werden. Diese sind relativ kosten-

günstig und direkt in das Kesselgehäuse integriert. Ursachen für ungenügende Abscheideleistungen sind z.B. eine falsche Auslegung der Fliehkraftabscheider oder eine mangelhafte Wartung der Geräte.

Bei Nassentstaubern versucht man die Masse der Staubteilchen durch Bindung an die Tropfen einer Waschflüssigkeit (z.B. Wasser) zu vergrößern und damit die Abscheidung, z.B. in Massenkraftabscheidern, zu erleichtern. Hierbei wird das Luftverunreinigungsproblem auf das Wasser verlagert, welches dann entsprechend gereinigt (z.B. Entfernung von Schlamm) bzw. aufbereitet (z.B. Neutralisation) werden muss. Hierdurch steigen apparativer Aufwand und Kosten des Verfahrens. Als Bauarten von Nassabscheidern können z.B. Wäscher, Wirbelwäscher und Venturi-Wäscher genannt werden. Bisher wurde über den Praxiseinsatz derartiger Wäscher in Holzfeuerungen im Geltungsbereich der 1. BImSchV nicht berichtet.

Der Feuerung nachgeschaltete Wärmetauscher zur Brennwertnutzung weisen auch eine gewisse Staubabscheidung auf. Hierbei bleiben Staubpartikel auf den nassen Wärmetauscherrohren hängen und werden mit dem Kondensat entfernt. Wenn der Wasserdampftaupunkt im Wärmetauscher stark unterschritten wird, könnte auch eine Tröpfchenbildung auf Staubpartikeln, die als Keime wirken, stattfinden. Die staubhaltigen Tröpfchen können sich dann auf den Oberflächen des Wärmetauschers niederschlagen. Insgesamt erscheint eine Staubminderung durch die Brennwertnutzung in der Größenordnung von 20 bis 30 % möglich (z.B. [2-9] und [2-14]). Voraussetzung hierfür ist, dass der Wärmetauscher in einem Temperaturbereich betrieben wird, bei dem auch der Wasserdampftaupunkt unterschritten wird (Kondensationsbetrieb). Ob die Entsorgung der Kondensate als Abwasser möglich ist, ist nicht einheitlich geregelt.

Elektroabscheider (Elektrofilter für nassen oder trockenen Betrieb) wurden bisher, abgesehen von wenigen Ausnahmen, nur bei größeren Holzfeuerungen (Geltungsbereich der TA-Luft, z.B. [2-16]) eingesetzt. Dies liegt u.a. an den relativ hohen Investitionskosten (hier vor allem für die Hochspannungsbauteile) und dem großen Platzbedarf. Im Rahmen eines aktuellen FNR-Projektes [2-12] zur Getreideverbrennung soll ein kostengünstiger Elektroabscheider entwickelt und bis zur Praxisreife erprobt werden. Derzeit liegen noch keine abschließenden Ergebnisse aus dem Projekt vor.

Die bisher diskutierten Staubabscheider können aufgrund des Druckverlustes im Entstauber nur mit einer mechanischen Förderung des Abgases betrieben werden. Dies

geschieht entweder durch das Kesselgebläse oder mit einem separaten Gebläse im Entstauber.

Ein einfachst aufgebauter Elektroabscheider für den Einsatz bei Einzelfeuerstätten wurde von der EMPA in der Schweiz [2-19] in Zusammenarbeit mit dem Feuerungshersteller Rüegg entwickelt. Bei diesem Elektroabscheider wird in das senkrechte Abgasrohr des Heizgerätes eine Elektrode eingebaut, die als Sprühelektrode wirkt. Die geladenen Partikel sollen sich an der Innenwand des Abgasrohres (Niederschlags-elektrode) niederschlagen. Bei ausreichender Belagsstärke rutschen diese ab. So kann der Staub in einem geeigneten Bereich im Abgasrohr gesammelt und von dort entnommen werden. Insgesamt wurde die Wirksamkeit des Systems nachgewiesen (Abscheideleistung in der Größenordnung von 50 %). Ungeklärt sind noch Fragen zur Betriebssicherheit und zur praxisgerechten Abreinigung und Entnahme des abgeschiedenen Staubes. Der Elektroabscheider ist auch zur Nachrüstung vorhandener Anlagen vorgesehen, aber noch nicht am Markt vorhanden.

Filternde Staubabscheider (z.B. Gewebefilter) werden bei mittleren und größeren Holzfeuerungen im Geltungsbereich der TA-Luft mit Erfolg eingesetzt. Bei richtiger Auslegung der Filter, guter Einbindung an die Kesselanlage und guter Wartung sind dauerhafte Reingasstaubkonzentrationen von  $< 10 \text{ mg/m}^3$  (bezogen auf 13 Vol.-%  $\text{O}_2$ ) möglich. Bei Holzfeuerungen mittlerer Nennwärmeleistung (ab ca. 500 kW) werden diese Filtersysteme bisher aus Kostengründen nur selten eingesetzt. Kleinere Kessel ( $< 150 \text{ kW}$ ) werden bisher praktisch gar nicht mit dieser Technik ausgerüstet, da kostengünstige Filter nicht auf dem Markt vorhanden sind.

Im Rahmen eines Forschungsauftrags durch das Bayerische Landesamt für Umwelt wurden Versuche mit einem neuartigen, beheizten Staubabscheider an einer 3 MW Holzfeuerung durchgeführt. Hierbei wurde nur ein Teilstrom des Abgases entnommen, die Ergebnisse waren sehr positiv. Neben geringen Staubkonzentrationen (durchgängig  $< 10 \text{ mg/m}^3$  bei 13 Vol.-%  $\text{O}_2$ ) konnte während der mehrwöchigen Versuche ein problemloser Probetrieb realisiert werden. Das Filter konnte stets gut abgereinigt werden, eine Korrosion der Filterelemente oder Verbackungen auf der Filteroberfläche wurde nicht festgestellt [2-23].

## Sekundärmaßnahmen zur Emissionsminderung

Im Rahmen von aktuellen FNR-Projekten [2-12] zur Getreideverbrennung wurde dieser Staubabscheider bis zur Praxisreife erprobt. Derzeit liegen allerdings noch keine abschließenden Ergebnisse vor.

In der nachfolgenden Tabelle 2.5 sind Beispiele für realisierte Staubabscheider bei Feuerungsanlagen im Leistungsbereich  $\leq 1.000$  kW aufgeführt.

Tab. 2.5: Beispiele für realisierte Staubabscheider bei Feuerungsanlagen im Leistungsbereich  $\leq 1.000$  kW

Anlagenstandort	Anlagenleistung in kW	Abgasreinigung
Biomasseheizwerk Berching	500	Abgaskondensation
Heimschule Lender in Sasbach	1.000	Abgaskondensation
Heizwerk Ostfildern-Nellingen	1.000	Elektrofilter
Schreinerei Schneider AG, Pratteln BL (CH)	450	Gewebefilter
Lindengymnasium Calw-Stammheim	450	Gewebefilter

### 2.5.3 Zusammenfassung

Nachgeschaltete Maßnahmen zu Emissionsminderung sollten kostengünstig sein und mit geringem Wartungsaufwand zuverlässig funktionieren. Die Emissionsminderung von Produkten unvollständiger Verbrennung und Staub sollte deshalb vorrangig über Primärmaßnahmen erfolgen. Hierdurch sollten in allen Betriebszuständen (z.B. Anfahren, Leistungsregelung, Gluterhalt) der Feuerungsanlage und auch innerhalb des nutzbaren Brennstoffbandes die bestmöglichen Verbrennungsbedingungen eingestellt, überwacht und nachgeregelt werden. Reichen diese Maßnahmen nicht aus um die geforderten Emissionswerte zu erreichen, wird auch der Einsatz von Sekundärmaßnahmen notwendig. Bei kleinen, chargenweise beschickten Einzelfeuerstätten wäre grundsätzlich der Einsatz von Oxidationskatalysatoren oder einfachst aufgebauten Elektrofiltern denkbar. Hiermit könnte, abgeleitet aus bisherigen Prüfstandsuntersuchungen an entsprechenden Versuchsfilttern, eine CO-Minderung im Bereich von 20 bis 30 % und eine VOC-Minderung in der Größenordnung von 50 bis 60 % für einen

Chargenabbrand bei guten Randbedingungen erreicht werden. Gute Randbedingungen liegen dann vor, wenn die notwendige Reaktionstemperatur am Katalysator schnell erreicht wird und während des gesamten Abbrandes ein ausreichender Luftüberschuss im Abgas vor Katalysator vorhanden ist. Ansonsten nehmen die Umsetzungsraten für diese Emissionen ab. An einem einfachst aufgebauten Labor-Elektrofilter wurden Minderungsraten für Staub im Bereich von 50 % erreicht. Sowohl Oxidationskatalysatoren als auch Elektrofilter sind bisher noch nicht bis zur Marktreife entwickelt worden. Offene Fragen betreffen vor allem die Betriebssicherheit (z.B. CO-Sicherheit) der Feuerungsanlage und der Reinigungseinrichtung, die Anbindung der Reinigungseinrichtung an die Feuerstätte sowie deren Standzeiten, Bedienung und Wartung (z.B. Entnahme des abgeschiedenen Staubes).

Bei mechanisch beschickten Anlagen mittlerer und höherer Leistung sind derzeit bereits einfache Staubabscheider (z.B. Multizyklone) von vielen Herstellern in den Kessel integriert. Eine Reihe von installierten Anlagen sind aber auch mit wirksameren Staubabscheidern, z.B. Gewebe- oder Elektrofiltern, ausgerüstet. Insgesamt haben sich diese Staubabscheider in der Praxis bewährt, Staubkonzentrationen  $< 10 \text{ mg/m}^3$  sind bei diesen Anlagen in der Praxis erreichbar.

Wesentlicher Entwicklungsbedarf, aber auch Entwicklungspotential, besteht noch für kostengünstige Staubabscheider für Heizkessel kleiner bis mittleren Leistung (von  $< 100 \text{ kW}$  bis etwa  $250 \text{ kW}$  Nennwärmeleistung). Hier sind vor allem Fragen zur Einbindung der Staubabscheider an die Kesselanlage, deren Betriebsverhalten bei unterschiedlichen Last- und Betriebszuständen des Kessels (z.B. Teillast, Gluterhalt, Anfahren), der Wartungsintensität und der Wartungskosten sowie der Standzeiten zu klären. Bei all diesen Punkten muss während der Entwicklung nach den kostengünstigsten Lösungen gesucht werden, damit diese Systeme zu einem, im Verhältnis zu den Kosten des Heizkessels, akzeptablen Marktpreis angeboten werden können. In mehreren Forschungsvorhaben wird derzeit an entsprechenden technischen und wirtschaftlichen Lösungen gearbeitet.

### **3 Emissionen und Immissionen**

#### **3.1 Schadstoffe und Messtechnik**

##### **3.1.1 Abgasrandbedingungen, Messbedingungen**

Während sich bei der Überwachung von Kleinfeuerungsanlagen der Messaufwand an den Kosten für den Betreiber orientieren muss, wird bei wissenschaftlichen Untersuchungen eine aufwändigere Messtechnik angewendet, in der Regel kommen Messverfahren für Industrieanlagen zum Einsatz, sie sind in den einschlägigen VDI-Richtlinien und DIN/EN-Normen beschrieben (s. Anhang 6 TA Luft 2002).

Unabdingbare Voraussetzung für reproduzierbare Emissionsmessungen ist eine gleichmäßige Verteilung der Konzentrationen bzw. der Abgasgeschwindigkeit über den Messquerschnitt.

Für Emissionsmessungen nach §§ 26, 28 BImSchG sind die erforderlichen Abgasrandbedingungen in der VDI-Richtlinie 4200 dargestellt. Notwendig ist eine turbulente Strömung über eine ausreichende Laufstrecke um eine gute radiale Durchmischung im Abgasstrom zu erreichen (möglichst  $> 5 \text{ m/s}$ , Ein- und Auslaufstrecke je  $\geq 3 \cdot D_{\text{hydr}}$ ).

Während bei Prüfstandsmessungen diese Randbedingungen durch entsprechende Messaufbauten noch eingehalten werden können, ist dies bei Feldmessungen insbesondere an kleinen Anlagen kaum noch möglich. Die Kaminrohre zwischen Ofen und Kamin sind kurz, die Kamine selbst sind oft sehr groß dimensioniert, die Abgasgeschwindigkeiten sind daher oft niedrig. Hierdurch ergeben sich laminare Strömungen mit Strähnen nur teilweise verbrannter Abgase, was zu starken Schwankungen bei den Messergebnissen führt.

Für umfangreiche Messprogramme werden wegen der unterschiedlichen Messverfahren viele Messöffnungen benötigt, zudem ist für die unterschiedlichen Probenahme- und Messaufbauten viel Platz erforderlich, der bei Feldmessungen wegen der beengten Verhältnisse vor Ort kaum realisiert werden kann. Aus diesem Grunde werden die nach der 1. BImSchV erforderlichen Messungen zur Überwachung mit einem Kombi-messgerät (nur eine Messöffnung erforderlich) durchgeführt.

Bei der Messung der Abgasgeschwindigkeit (für Messungen nach der 1. BImSchV nicht vorgesehen) ist bei Feldmessungen die Verwendung eines Anemometers meist nicht möglich, hier ist die CO<sub>2</sub>-Tracermethode eine sinnvolle Alternative.

### 3.1.2 Messunsicherheiten

Bei der Berechnung der Emissionsfaktoren gibt es folgende Messunsicherheiten:

- Messunsicherheiten bei der Bestimmung der Massenkonzentration (Unsicherheit der Messmethode selbst sowie Unsicherheiten wegen ungleichmäßiger Verteilung der Konzentrationen (Konzentrationsprofile) über den Messquerschnitt)
- Messunsicherheit bei der Bestimmung des Abgasvolumenstroms (zur Berechnung des Massenstroms)
- Messunsicherheit bei der Bestimmung der Abgastemperatur (zur Berechnung des normierten Abgasvolumenstroms)
- Messunsicherheit bei der Bestimmung der Feuerungswärmeleistung (zur Bestimmung der Emissionsfaktoren)
- Messunsicherheit bei der Bestimmung des Sauerstoffgehalts im Abgas (zur Umrechnung der gemessenen Konzentrationen auf den Sauerstoffbezugswert, hier 13 Vol.-% O<sub>2</sub>)

### 3.1.3 Klassische Schadstoffe (CO, Gesamt-C, NOx, Partikel)

#### Kohlenmonoxid als Größe für die Ausbrandqualität

Während der Anbrandphase ist Kohlenmonoxid ein guter Indikator für die Qualität des Ausbrandes der Pyrolysegase. In dieser Phase korrelieren die gemessenen Konzentrationen an Kohlenmonoxid gut mit denen von Benzol, Aldehyden und polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK).

In der Nachbrandphase (Verbrennung von Holzkohleglut) ist wieder ein Anstieg der Konzentration von Kohlenmonoxid zu beobachten. Bei hohen Temperaturen im Glutbett (kleine Flammen) liegt das Boudouard-Gleichgewicht auf der rechten Seite, durch die schnelle Abkühlung der Abgase bleibt das gebildete Kohlenmonoxid metastabil.



Kohlenmonoxid ist daher nur bedingt als Indikator für die Qualität der Verbrennung geeignet, insbesondere dann, wenn der ganze Abbrandzyklus gemittelt betrachtet wird.

Niedrige Emissionswerte gibt es bei der Verbrennung von Pellets und Hackgut und in Feuerungsanlagen größer 50 kW. Hohe Emissionswerte verursachen Stückholz, feuchtes Holz und Feuerungsanlagen kleiner 15 kW.

Die Messung von Kohlenmonoxid erfolgt in der Regel durch Infrarotabsorption. Es gibt Kombimesegeräte, mit denen gleichzeitig auch noch die Konzentrationen von Stickstoffoxiden und Sauerstoff sowie die Abgastemperatur gemessen können.

### **Gesamt-Kohlenstoff**

Die Ermittlung der Konzentration an Gesamtkohlenstoff liefert bessere Hinweise auf die Ausbrandqualität, ist aber mit höherem Messaufwand verbunden, da für Messungen mit dem Flammenionisationsdetektor (FID) Prüf- und Betriebsgase erforderlich sind.

### **Stickstoffoxide**

Stickstoffoxide entstehen bei Verbrennungsprozessen durch

- Oxidation des in der Verbrennungsluft enthaltenen Stickstoffs
- Oxidation der im Brennstoff enthaltenen Stickstoffverbindungen

Während der Stickstoff in der Verbrennungsluft erst bei höheren Temperaturen oxidiert wird, trägt der Stickstoff im Brennstoff bereits bei mittleren Verbrennungstemperaturen zur Entstehung von Stickstoffoxiden bei.

Hohe Stickstoffgehalte im Brennstoff (z.B. in Spanplatten oder Getreide) und hohe Heizwerte (trockenes Holz) führen zu hohen Stickstoffoxidkonzentrationen im Abgas.

Bei der Verbrennung entsteht zunächst Stickstoffmonoxid NO, das mit Sauerstoff schnell zu Stickstoffdioxid NO<sub>2</sub> weiterreagiert:



Beide Verbindungen stehen in einem Gleichgewicht, das bei hohen Temperaturen auf der Seite des Stickstoffmonoxids liegt. Zur Messung der Stickstoffoxide werden ent-

weder beide Komponenten separat bestimmt oder das  $\text{NO}_2$  wird mittels eines Konverters in  $\text{NO}$  umgewandelt und die Summe des  $\text{NO}$  bestimmt. Als Messverfahren für  $\text{NO}$  wird neben der Infrarotabsorption auch das empfindlichere Chemolumineszenzverfahren angewendet, bei dem  $\text{NO}$  mit Ozon unter Emission eines Lichtquants reagiert, das dann spezifisch gemessen werden kann.

### **Partikel (Staub)**

Für die Messung von Partikeln (Staub) gibt es kein Verfahren, die die Emissionen direkt anzeigt. Nach diskontinuierlicher Probenahme erfolgt die Bestimmung der Partikelmasse gravimetrisch, d.h. eine zeitnahe Bestimmung ist, wenn überhaupt, nur bei Prüfstandsmessungen möglich.

Für die Emissionen von Partikeln gibt es mehrere Ursachen:

- aus dem Ascheanteil nach der Verbrennung (Flugasche)
- Rußbildung infolge unvollständiger Verbrennung
- Kondensation verdampfter Ascheanteile

Staubförmige Brennstoffe (Holzstaub) und hohe Abgasgeschwindigkeiten führen zu hohen Emissionen von Ascheanteilen, während bei schlechten Verbrennungsbedingungen erhöhte Emissionen durch einen hohen Russanteil auftreten. Die emittierten Partikel sind sehr klein (über 90% der Masse des Gesamtstaubs sind kleiner als  $10\ \mu\text{m}$ ), Kleinf Feuerungsanlagen für Festbrennstoffe sind eine erhebliche Quelle von Feinstaubemissionen.

Ein Zusammenhang zwischen den Emissionen von Kohlenmonoxid und Partikeln (Daten s. Kap. 4.2) ist zwar erkennbar, die Korrelation ist jedoch ziemlich schlecht (Bild 3.1); die Emissionen von Kohlenmonoxid sind als Indikator für hohe Staubemissionen nur bedingt geeignet.

Auch zwischen den Emissionen von Gesamtkohlenstoff und Partikeln ist eine Korrelation nur schlecht zu erkennen (Bild 3.2), aus dem Achsenabschnitt kann der Anteil der Asche am Gesamtstaub an den Emissionen auf etwa  $60\ \text{kg/TJ}$  (dies entspricht etwa  $90 - 100\ \text{mg/m}^3$ ) abgeschätzt werden.

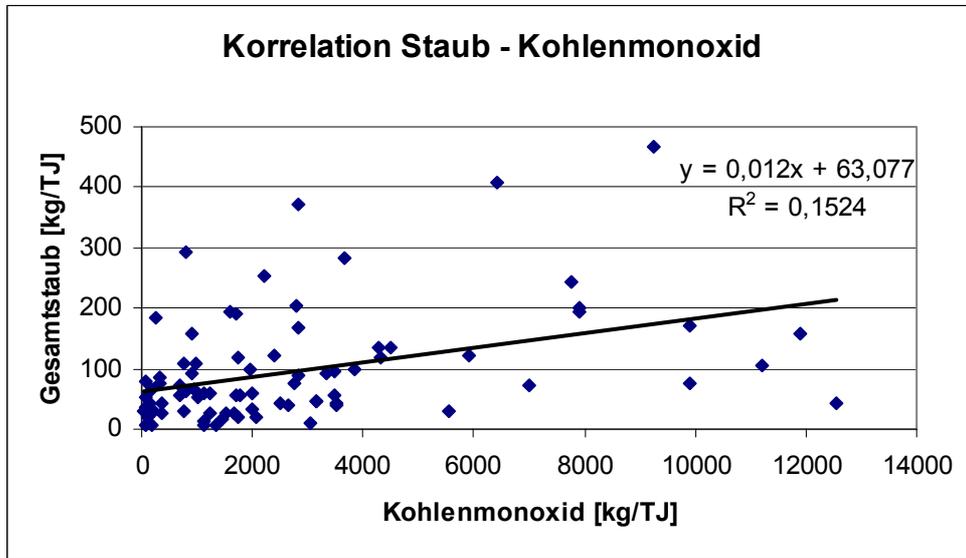


Bild 3.1: Korrelation Partikelemissionen - Kohlenmonoxid

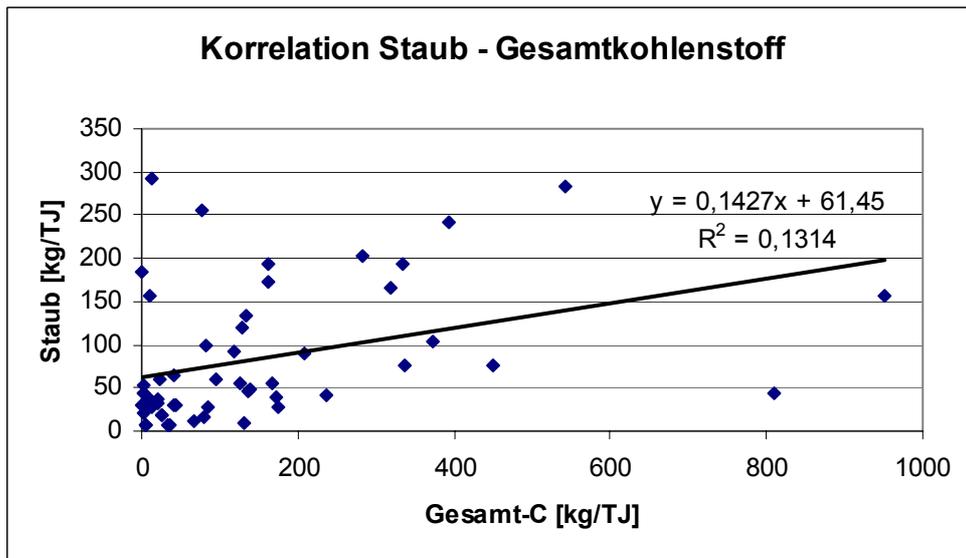


Bild 3.2: Korrelation Partikelemissionen – Gesamtkohlenstoff

Niedrige Emissionen gibt es bei der Verbrennung von Pellets und Hackgut und in größeren Feuerungsanlagen. Sehr hohe Staubemissionen werden durch die Verbrennung von Getreide ohne Filter und ohne Zusatzstoffe bzw. Bindemittel hervorgerufen.

### **3.1.4 Krebserzeugende und besonders gesundheitsgefährdende Stoffe**

#### **Benzol**

Benzol als sehr stabile Verbindung entsteht bei Verschmelungs- und Verbrennungsprozessen bei mittlerer Temperatur, z.B. bei der Verbrennung fester Brennstoffe in Kleinf Feuerungsanlagen. Als BTEX-Aromaten wird eine Stoffgruppe bezeichnet, die neben Benzol auch seine Alkylderivate, wie Toluol, Ethylbenzol und Xylole enthält.

Die BTEX-Aromaten werden nach Adsorption an Aktivkohle mittels Massenspektrometrie nach gaschromatographischer Auftrennung (GC-MS) identifiziert und bestimmt.

#### **Polycyclische Aromaten**

Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) umfassen weit über 100 Substanzen, deren Moleküle mindestens zwei miteinander verbundene aromatische Ringe aufweisen. Die für Tier und Mensch gefährlichsten Vertreter befinden sich in der Gruppe mit 4 - 7 Ringen.

Wegen ihres geschlossenen Molekülaufbaus sind die PAK sehr temperaturbeständig, sie treten als höhermolekulare Abbauprodukte bei unvollständig ablaufenden thermischen Prozessen von organischen Materialien auf. Die Entstehung der PAK läuft im Temperaturbereich zwischen ca. 500 und 2000 °C ab. Die zunächst gasförmig vorliegenden PAK lagern sich im Laufe ihres Weges an gleichzeitig im Abgas vorliegende sorptive Partikel an, was zu einer Anreicherung an deren Oberflächen führt.

Da die PAK mit mehr als 4 Ringen in sehr geringen Konzentrationen auftreten, sind oft lange Messzeiten, meist über mehrere Abbrandversuche erforderlich. Die niedermolekularen PAK werden meist gasförmig, die höhermolekularen meist an Partikel gebunden emittiert, so dass für quantitative Bestimmungen beide Phasen analysiert werden müssen.

Ein quantitatives Modell zur Beurteilung der kanzerogenen Potentiale der einzelnen PAK ist derzeit nicht verfügbar. Es ist daher nicht möglich, Messwerte über einzelne PAK zusammenfassend zu bewerten. Deshalb wird i. A. zur Reduzierung des Messaufwandes das Benzo[a]pyren als Leitsubstanz verwendet.

Daneben werden auch Summenwerte bestimmt, z.B. die Summe der 16 PAK nach EPA (Tabelle 3.1), die in Umweltproben häufig gefunden werden. Besonders bei Holzfeuerungen dominieren mit einem Anteil von über 80 % hierbei die niedermolekularen

PAK (Naphthalin, Acenaphthylen, Anthracen, Phenanthren), die aber kein oder nur ein geringes kanzerogenes Potential aufweisen.

Da die Messergebnisse für Benzo[a]pyren oft nahe an oder unterhalb der Nachweisgrenze liegen, ist es sinnvoll, zusätzlich auch die Summe der Konzentrationen einer Gruppe von wenigen relevanten PAK mit krebserzeugendem Potential zu betrachten, um die Messergebnisse statistisch besser absichern zu können. In diesem Bericht wurde daher noch eine Gruppe von 4 PAK aus dem UN-ECE-Protokoll betrachtet.

Tab. 3.1: Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

	Mol- masse	16 EPA-PAK	4 UNECE-PAK	Krebserz. Potential zu Benzo[a]pyren (nach Larsen und Larsen 1998)
1	128	Naphthalin		
2	152	Acenaphthylen		
3	154	Acenaphthen		
4	166	Fluoren		
5	178	Phenanthren		0,0005
6	178	Anthracen		0,0005
7	202	Fluoranthen		0,05
8	202	Pyren		0,001
9	228	Benzo(a)anthracen		0,005
10	228	Chrysen		0,03
11	252	Benzo(b)fluoranthen	Benzo(b)fluoranthen	0,1
12	252	Benzo(k)fluoranthen	Benzo(k)fluoranthen	0,05
13	252	Benzo(a)pyren	Benzo(a)pyren	1
14	278	Dibenz(a,h)anthracen		1,1
15	276	Benzo(g,h,i)-perylene		0,002
16	276	Indeno(1,2,3-cd)pyren	Indeno(1,2,3-cd)pyren	0,01

Neben dieser Zusammenstellung findet man in der Literatur noch die sogenannten 6 Borneff-PAK mit den zusätzlichen Komponenten Fluoranthen (Nr. 7) und Benzo(g,h,i)-perylene (Nr. 15).

Die Messergebnisse dieses Vorhabens (s. Kap. 4.2) für die 4 UN-ECE-PAK und die 16 PAK nach EPA korrelieren mäßig (Bild 3.3), der Massenanteil der 4 UN-ECE-PAK an den 16 PAK liegt unter 20 %, im Mittel bei etwa 10 %.

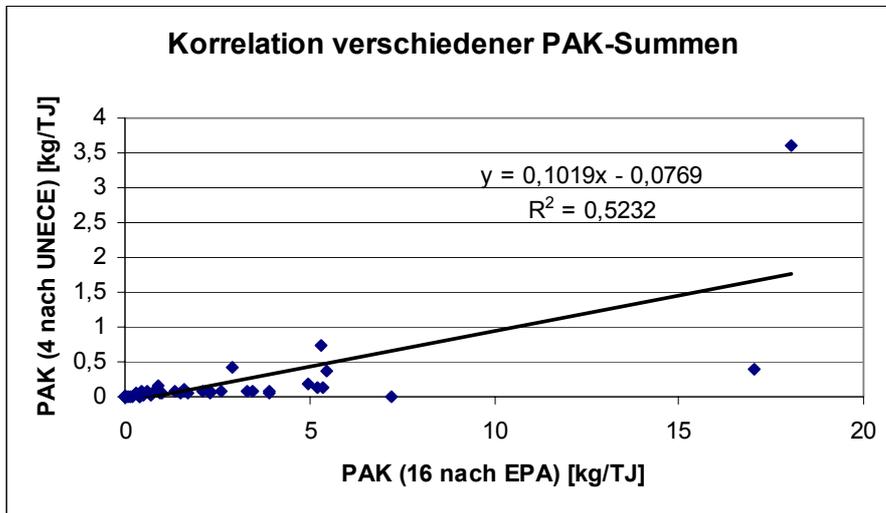


Bild 3.3: Korrelation verschiedener Zusammenfassungen von PAK

Die 4 UNECE-PAK korrelieren gut mit Benzo[a]pyren, weshalb diese Summenbildung als Alternative zur Beurteilung des krebserzeugenden Potentials geeignet ist (Bild 3.4).

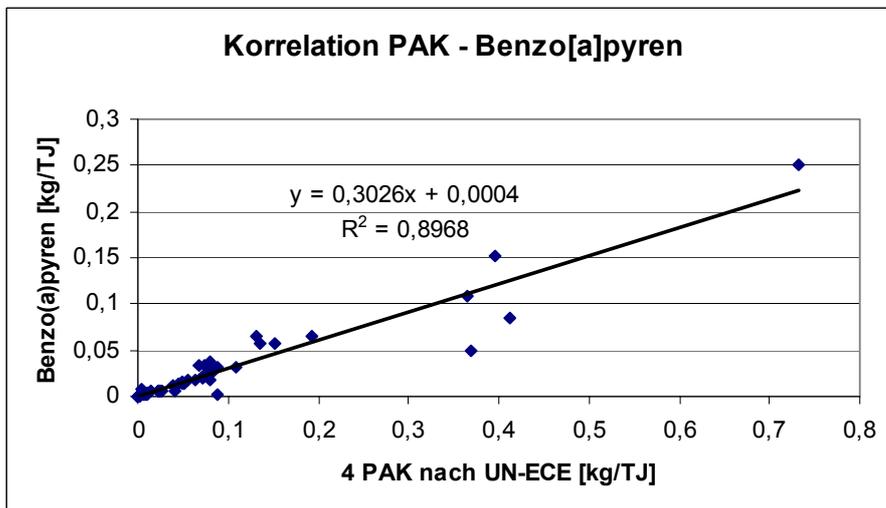


Bild 3.4: Korrelation Benzo[a]pyren – Summe 4 PAK nach UN-ECE

Welche Einzelkomponenten aus der Reihe der PAK bei Holzfeuerungen besonders relevant sind, ist aus Bild 3.5 erkennbar. Hierzu wurden die Messwerte von PAK aus 3

unterschiedlichen Messreihen mit dem relativen krebserzeugenden Potential aus Tabelle 3.1 multipliziert und auf 100 % normiert dargestellt.

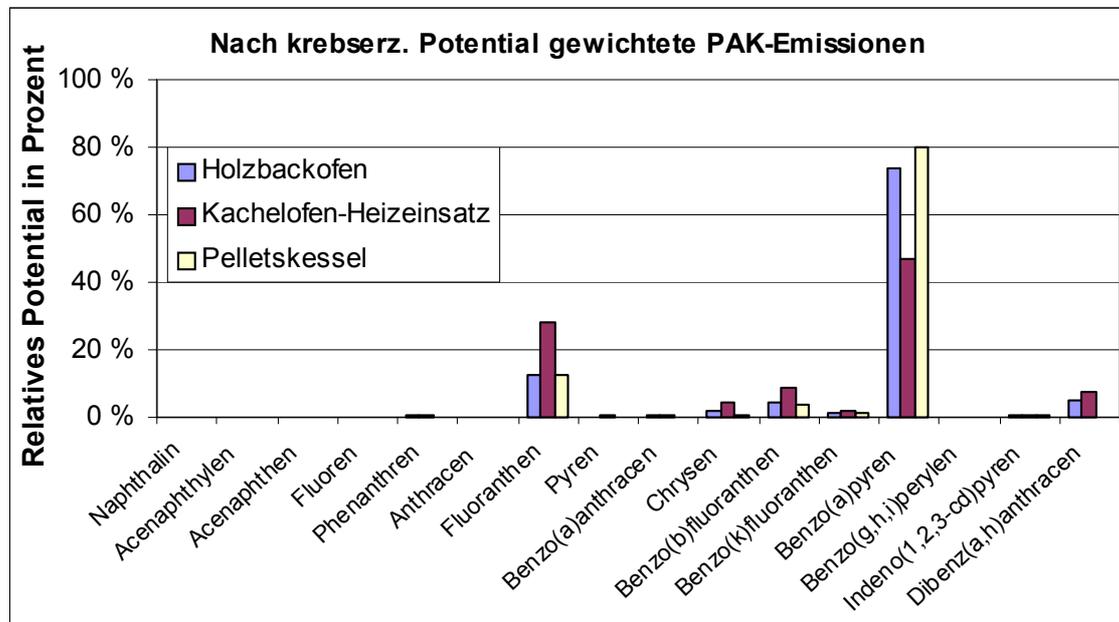


Bild 3.5: Nach krebserzeugendem Potential (s. Tabelle 3.1) gewichtete PAK-Emissionen aus 3 ausgewählten Messreihen

Die Leitkomponente Benzo(a)pyren ist die wesentliche Komponente bezüglich der krebserzeugenden Wirkung, gefolgt von Fluoranthren. Einen geringeren Beitrag liefern die Komponenten Chrysen, Benzo(b)fluoranthren, Benzo(b)fluoranthren und Dibenz(a,h)anthracen. Ob eine Summenbildung über diese 6 PAK ein besseres Kriterium bzgl. des krebserzeugenden Potentials darstellt als die bereits erwähnten UN-ECE bzw. Borneff-PAK, sollte näher untersucht werden.

Die höchsten Emissionen von PAK werden im Allgemeinen bei ungünstigen Verbrennungsbedingungen bzw. bei der Verbrennung von Steinkohle (hoher Anteil aromatischer Verbindungen) beobachtet.

Die PAK werden je nach Siedepunkt (abhängig von der Molmasse, s. Tabelle 3.1) gasförmig oder an Partikel gebunden emittiert. Der partikelförmige Anteil wird aus dem Filter für die Staubmessung extrahiert, die gasförmigen Anteile werden nach Adsorption an einem Polyurethanschaum eluiert und mittels Massenspektrometrie nach gaschromatographischer Auftrennung (GC-MS) identifiziert und bestimmt.

### **Polychlorierte Dibenzo[p]dioxine und –furane (PCDD/PCDF)**

PCDD/PCDF entstehen vor allem bei chemischen und thermischen Prozessen als unerwünschte Nebenprodukte. Ihre Bildungstemperatur liegt zwischen 300 und 800 °C, sie zersetzen sich ab ca. 1000 °C, können sich aber in geringerem Maße im abgekühlten Abgas zurückbilden.

Wegen der sehr geringen Konzentrationen im Abgas sind lange Probenahmezeiten erforderlich, die Bestimmung der verschiedenen Kongenere und Isomere erfordert einen hohen Messaufwand bei der Bestimmung.

Bei der Verbrennung von Festbrennstoffen ist immer dann mit erhöhten Emissionen zu rechnen, wenn

- die Verbrennungsbedingungen schlecht sind (d.h. das organische Kohlenstoffgerüst aufgebaut werden kann)
- Chlor im Brennstoff vorhanden ist (z.B. aus Altholz mit Beschichtungen, Beimengungen chlorhaltiger Verunreinigungen)

Die Bedingungen für die Bildung von PCDD/PCDF sind sehr komplex, teilweise spielen auch Memoryeffekte eine Rolle (Verbrennungsvorgänge mit hohen Emissionen wegen hoher Chlorkonzentrationen im Brennstoff wirken sich stark auf nachfolgende Verbrennungsvorgänge aus, bei denen nach Brennstoffart und Verbrennungsbedingungen nur geringen Emissionen zu erwarten sind).

Wie bei den PAK werden die PCDD/F sowohl partikelförmig als auch gasförmig emittiert. Deshalb werden die auf einem Partikelfilter abgeschiedenen Anteile extrahiert, die gasförmigen Anteile werden in Waschflaschen absorbiert bzw. an Polyurethanschäumen adsorbiert. Die Analyse aller Extrakte erfolgt nach Zugabe von <sup>13</sup>C-markierten Standards und Reinigung durch Säulenchromatographie mittels hoch auflösender Gaschromatographie und Massenspektrometrie (HRGC/HRMS nach DIN EN 1948).

Wegen der geringen Konzentrationen der PCDD/F im Abgas sind lange Probenahmezeiten erforderlich, um Messwerte deutlich über der Nachweisgrenze des Messverfahrens zu erhalten. Für manuell beschickte Anlagen bedeutet dies, dass über mehrere Abbrände gemessen werden muss.

### Polychlorierte Biphenyle

Die Stoffgruppe der Polychlorierten Biphenyle (PCBs) umfasst die Derivate des Biphenyls, bei denen ein oder mehrere der 10 Wasserstoffatome durch Chlor ersetzt ist. Insgesamt gibt es 209 verschiedene chlorierte Biphenyle.

Eine unter toxikologischen Gesichtspunkten besondere Gruppe sind die so genannten 12 „dioxin-ähnlichen PCBs“. Diese planaren PCB-Moleküle verhalten sich molekularbiologisch ähnlich wie die ebenfalls planaren PCDD/PCDF, weshalb die WHO den nicht-ortho-substituierten sowie einigen mono-ortho-substituierten PCB-Kongeneren Toxizitätsfaktoren relativ zum 2,3,7,8-TCDD zugeordnet hat.

Tab. 3.2: Nicht ortho-substituierte polychlorierte Biphenyle

Kurzbez.	Chem. Bezeichn.	WHO-TEF
PCB 77	3,3',4,4'-Tetrachlorobiphenyl	0,0001
PCB 81	3,4,4',5-Tetrachlorobiphenyl	0,0001
PCB 126	3,3',4,4',5-Pentachlorobiphenyl	0,1
PCB 169	3,3',4,4',5,5'-Hexachlorobiphenyl	0,01

Tab. 3.3: Mono-ortho-substituierte polychlorierte Biphenyle

Kurzbez.	Chem. Bezeichn.	WHO-TEF
PCB 105	2,3,3',4,4'-Pentachlorobiphenyl	0,0001
PCB 114	2,3,4,4',5-Pentachlorobiphenyl	0,0005
PCB 118	2,3',4,4',5-Pentachlorobiphenyl	0,0001
PCB 123	2,3',4,4',5'-Pentachlorobiphenyl	0,0001
PCB 156	2,3,3',4,4',5-Hexachlorobiphenyl	0,0005
PCB 157	2,3,3',4,4',5'-Hexachlorobiphenyl	0,0005
PCB 167	2,3',4,4',5,5'-Hexachlorobiphenyl	0,00001
PCB 189	2,3,3',4,4',5,5'-Heptachlorobiphenyl	0,0001

Neben dieser Gruppe gibt es noch eine Zusammenfassung von 6 PCB nach DIN 51527, die sich aber an der Häufigkeit der PCB in der Umwelt orientiert.

Tab. 3.4: Leit- oder Indikator-PCB nach DIN 51527

Kurzbez.	Chem. Bezeichn.	WHO-TEF
PCB 28	2,4,4'-Trichlorobiphenyl	
PCB 52	2,2',5,5'-Tetrachlorobiphenyl	
PCB 101	2,2',4,5,5'-Pentachlorobiphenyl	
PCB 138	2,2',3,4,4',5'-Hexachlorobiphenyl	
PCB 153	2,2',4,4',5,5'-Hexachlorobiphenyl	
PCB 180	2,2',3,4,4',5,5'-Heptachlorobiphenyl	

Zwischen den beiden Zusammenfassungen ist die Korrelation schlecht (schwankende PCB-Profile, Bild 3.6), während die 12 PCB nach WHO gut mit den Toxizitätsäquivalenten der PCDD/PCDF korrelieren (Bild 3.7). Hieraus ergibt sich auch, dass die relative Toxizität der PCB bei der Verbrennung von Festbrennstoffen in Kleinf Feuerungsanlagen knapp 1/20 der der PCDD/PCDF beträgt.

Die PCDD/PCDF sind sehr gut untersucht, der Einfluss der PCB bzgl. der Gesamtoxizität der Emissionen dürfte sich im Bereich der Messungenauigkeit bei der Bestimmung der PCDD/F bewegen. Umfangreiche Messprogramme zur Ermittlung der Emissionen an PCB sind daher nicht vordringlich, sinnvoll sind aber gezielte Messprogramme zur Absicherung dieser Einschätzung.

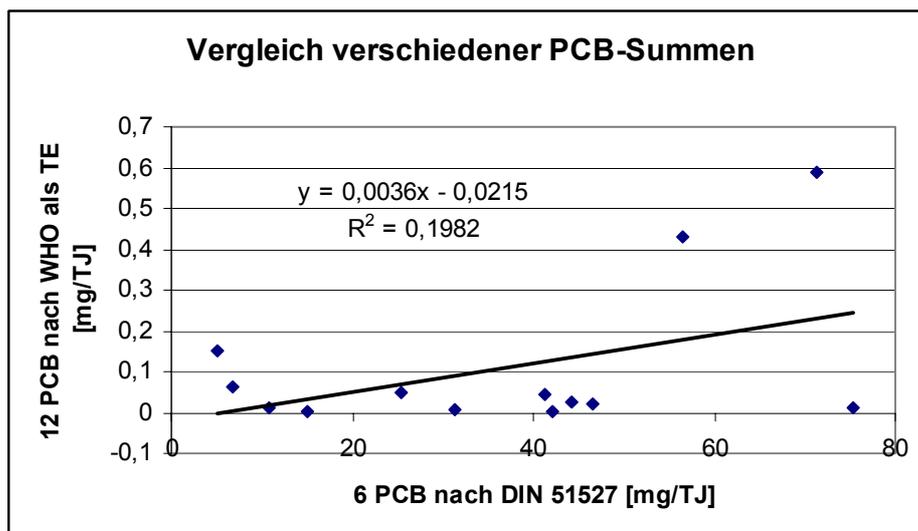


Bild 3.6: Korrelation verschiedener Zusammenfassungen von PCB

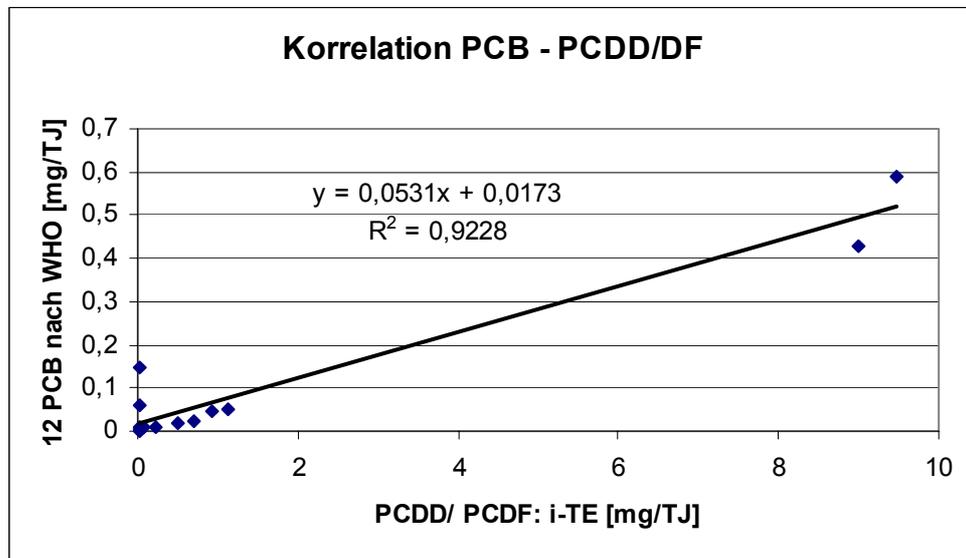


Bild 3.7: Korrelation von polychlorierte Biphenylen mit polychlorierten p-Dibenzodioxinen und –furanen

Die Messverfahren für PCB entsprechen denen der PCDD/F, daher werden diese Komponenten meistens zusammen bestimmt.

### 3.1.5 Sonstige Luftschadstoffe (Chlorwasserstoff, Aldehyde, Phenole, Metalle)

Die Komponente Chlorwasserstoff ist als Komponente für die Entstehung von PCDD/PCDF erforderlich, sie dient auch als Hinweis, ob chlorhaltige Brennstoffe oder Materialien ver- oder mitverbrannt wurden.

Die Probenahme von Chlorwasserstoff wird durch Absorption in wässrigen Lösungen in Waschflaschen vorgenommen, als Analyseverfahren wird meistens die Ionenchromatographie angewendet.

Aldehyde und Phenole sind die wesentlichen Komponenten, die für die Geruchswahrnehmung von Holzfeuerungen verantwortlich sind.

In dieser Untersuchung wurde als Leitparameter Formaldehyd betrachtet, es korreliert gut mit Kohlenmonoxid (Bild 3.8), d.h. bei hohen Emissionen von Kohlenmonoxid ist auch mit Geruchsbelästigungen in der Nachbarschaft zu rechnen.

Aldehyde werden in wässriger DNPH-Lösung absorbiert und mittels Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie (HPLC) analysiert, Phenole werden an Kieselgel

adsorbiert und nach gaschromatographischer Auftrennung massenspektrometrisch bestimmt (GC-MS).

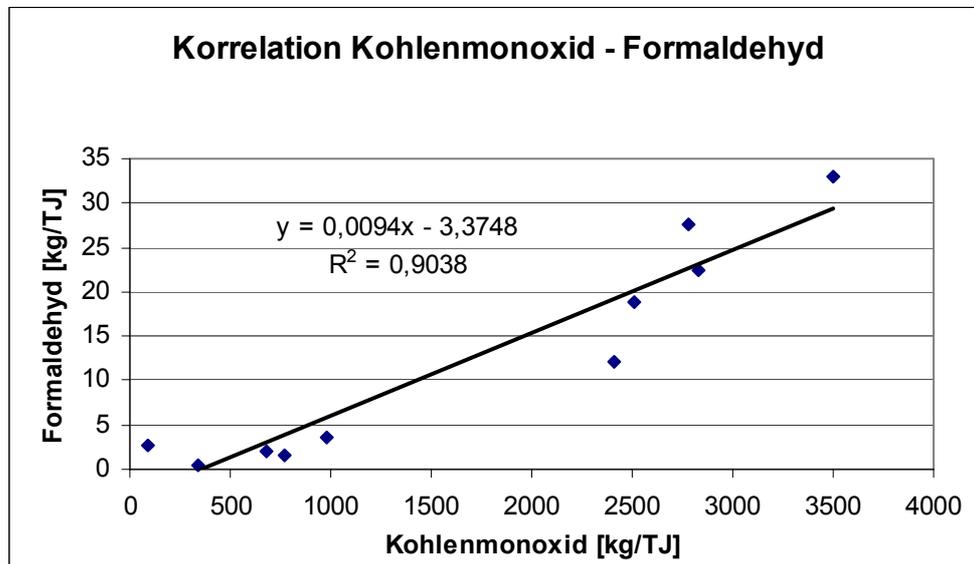


Bild 3.8: Korrelation Kohlenmonoxid – Formaldehyd

### **Krebserzeugende und besonders gesundheitsschädliche Metalle als Staubinhaltsstoffe**

Festbrennstoffe enthalten Mineralstoffe, die sich nach der Verbrennung zum größten Teil in der Asche wieder finden. Die Alkali- und Erdalkalimetalle Kalium, Magnesium und Calcium machen den Hauptanteil der Metalle an der Asche aus.

Die krebserzeugenden Metalle Arsen und Cadmium und Nickel kommen in geringen Mengen auch im Brennholz vor [2-8]. Der Gehalt von Cadmium in Holz ist im Verhältnis zu Arsen höher, als es die natürliche Häufigkeit in der Erdkruste erwarten lässt, vermutlich wird Cadmium in bestimmten Pflanzen angereichert. Daneben enthält Brennholz auch Chrom, das bei sauerstoffreicher Verbrennung in Form krebserzeugender Chrom-VI-Verbindungen emittiert wird.

In der Regel werden diese Metalle in der Asche eingebunden. Da Arsen und Cadmium als Chloride bei höheren Temperaturen flüchtig sind, können diese Metalle auch in die Luft emittiert werden, sie sind dann meist an den Feinstaub gebunden.

Es gibt zwar einige Untersuchungen über die Zusammensetzung der Aschen, Messergebnisse zu Emissionen von Schwermetallen aus Kleinf Feuerungsanlagen gibt es nur vereinzelt.

Gut untersucht wurden Schwermetallemissionen bei Großfeuerungsanlagen, in denen Kohle verbrannt wird. Wegen des viel höheren Energieeinsatzes (s. Bild 1.1) sind diese Anlagen die relevanten Emissionsquellen für Schwermetalle.

In diesem Vorhaben wurden die Schwermetallemissionen nicht näher untersucht.

### **3.2 Messergebnisse aus der Literatur**

Bei der Auswertung der ausgesuchten Literaturstellen der letzten zehn Jahre zeigte sich, dass sehr viele Daten zu den klassischen Mess-Komponenten, Kohlenmonoxid und Staub, daneben auch zu Stickstoffoxiden und speziell bei Prüfstandsmessungen zu Gesamtkohlenstoff vorhanden sind. Zahlreiche Messungen gibt es auch zu polycyclischen Aromaten (PAK) und polychlorierten p-Dibenzodioxinen und -furanen, vor allem im Rahmen größerer Messprogramme. Alle anderen Komponenten wurden nur sehr spärlich gemessen.

Interessant ist das Feldmessprogramm der UMEG [3-1]. Hier wurden umfangreiche Messungen an realen Anlagen und mit verschiedenen Anlagentypen und -größen durchgeführt. Neben den Standardkomponenten wurden BTEX-Aromaten, PAK und vor allem die wichtigsten Vertreter der für Geruchsbelästigungen relevanten Aldehyde und Phenole gemessen. Viele dieser Komponenten lagen allerdings unterhalb oder im Bereich der Nachweisgrenze. Daraus lässt sich ableiten, dass die derzeit betrachteten Leitsubstanzen (insbesondere CO und Staub) die wesentlichen Fragestellungen im Hinblick auf die Überwachung tatsächlich abdecken.

Auffällig ist bei sehr vielen Messkampagnen die große Schwankungsbreite der Messergebnisse. Da bei den verschiedenen Messkampagnen die „Ausreißer“ unterschiedlich berücksichtigt wurden, sind Vergleiche der Messergebnisse schwierig.

Ein weiterer Grund für die schlechte Vergleichbarkeit der Messwerte liegt in den großen Variationsmöglichkeiten bei der Feuerungsart, dem Ofen- bzw. Kesseltyp, der Wärmeleistung und des Brennstoffes.

Prüfstandsmessungen von Feuerungsanlagen erfolgen meist unter optimalen Bedingungen. Die Feuerungsanlagen in Feldmessprogrammen sind dagegen oft nicht ihrem Standort angepasst und häufig überdimensioniert. Dadurch werden diese Anlagen zeitweise nur bei Schwachlast betrieben, was zu hohen Emissionen führt.

Des Weiteren sind die eingesetzten Brennstoffe sehr inhomogen. Allein beim Brennstoff „Scheitholz“ gibt es viele verschiedene Holzarten (unterschiedliche Laub- und Nadelbäume), Feuchtegehalte (z. B. wenn das Holz nicht lange genug gelagert wurde), Rindenanteile usw. Beim Getreide ist sogar das Flurstück entscheidend, je nach Bodenbeschaffenheit und Düngung ändert sich die Elementarzusammensetzung und damit auch die Verbrennungsprodukte.

Vor allem bei handbeschickten Feuerungsanlagen sind die Verbrennungsbedingungen sehr inhomogen. Greift der Betreiber in den Verbrennungsvorgang ein, z. B. durch Nachlegen von Brennstoff oder Drosselung der Luftzufuhr oder bereits lediglich durch Öffnen der Ofentür, wirkt sich dies drastisch auf die Emissionen aus.

Auch die Lage der Probenahmestelle beeinflusst die Messergebnisse. Vielfach stehen keine Messöffnungen nahe der Feuerungsanlage zur Verfügung. Bei einer Probenahme am Ende des Kamins kann es wegen Depositionen bzw. Schadstoffneubildungen zu veränderten Messergebnissen kommen. Ganz pauschal lässt sich aus der Literatur jedoch erkennen, dass niedrigere Emissionswerte vor allem bei Pellets, Hackgut und Feuerungsanlagen größer 50 kW zu finden sind. Höhere Emissionswerte gibt es dagegen insbesondere bei Getreide und Feuerungsanlagen kleiner 50 kW.

Über das Emissionsverhalten von Steinkohle ist nur sehr wenig Literatur neueren Datums vorhanden.

### **3.3 Eigene Messprogramme und Erhebungen**

#### **3.3.1 Einfluss des Pufferspeichers auf die Emissionen**

Um günstige Verbrennungsbedingungen zu erhalten, sollte die Wärmeleistung von Stückholzkesseln nur in einem Bereich von etwa 50 bis 100 % der Nennwärmeleistung geregelt werden. Vor allem deutlich geringere Wärmeleistungen, bei denen die Feuerung in den Gluthalbetrieb wechselt, führen zu einem Anstieg der Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung.

Um diese Betriebszustände zu vermeiden, sollten derartige Feuerungsanlagen grundsätzlich bei Volllast betrieben werden, was sinnvollerweise nur mit einem ausreichend bemessenen Wärmespeicher möglich ist.

In § 6 Abs. (3) der 1. BImSchV wird zwar ein „ausreichend dimensionierter“ Pufferspeicher gefordert, für die Praxis sind jedoch konkrete Festlegungen erforderlich.

Aus diesem Grund wurden die Auswirkungen des Einsatzes unterschiedlich dimensionierter (750 / 1.500 l) Pufferspeicher auf die Emissionen eines modernen, handbefeueren Stückholzkessels mit einer Nennwärmeleistung von 30 kW untersucht. Diese Untersuchungen wurden im Rahmen eines Forschungsprojekts der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg an der Universität Stuttgart am Institut für Verfahrenstechnik und Dampfesselwesen (IVD) durchgeführt, der Originalbericht ist als Anlage 10.6 angefügt.

Um möglichst realistische Bedingungen simulieren zu können, wurden charakteristische Heizlastkurven (Bild 3.9) definiert, es wurde von einem 'guten' Betreiber ausgegangen, der marktübliche Scheitholzqualitäten (Buchen- und Nadelholz) in lufttrockenem Zustand verfeuert.

Die höchsten Emissionen sind beim Betrieb ohne Pufferspeicher zu erkennen (Bild 3.10). Bei den Heizlastkurven „mittel“ und „mild“ (die für Stuttgart 80% der Gesamtjahresstunden des Feuerungsbetriebes ausmachen) wirkt sich der Pufferspeicher von 750 l besonders stark auf die Emissionen aus. Die Verdoppelung des Speichervolumens führt in der Regel zu einer weiteren Reduzierung der Emissionen.

Einige Messwerte beim Betrieb mit 1500 l Pufferspeicher und bei milden und mittleren Heizlastkurven lagen etwas höher als erwartet, dies lag vermutlich zufallsbedingt an der Holzaufgabe, da bei diesen Versuchen nur geringe Holzmengen aufgelegt wurden.

## Eigene Messprogramme und Erhebungen

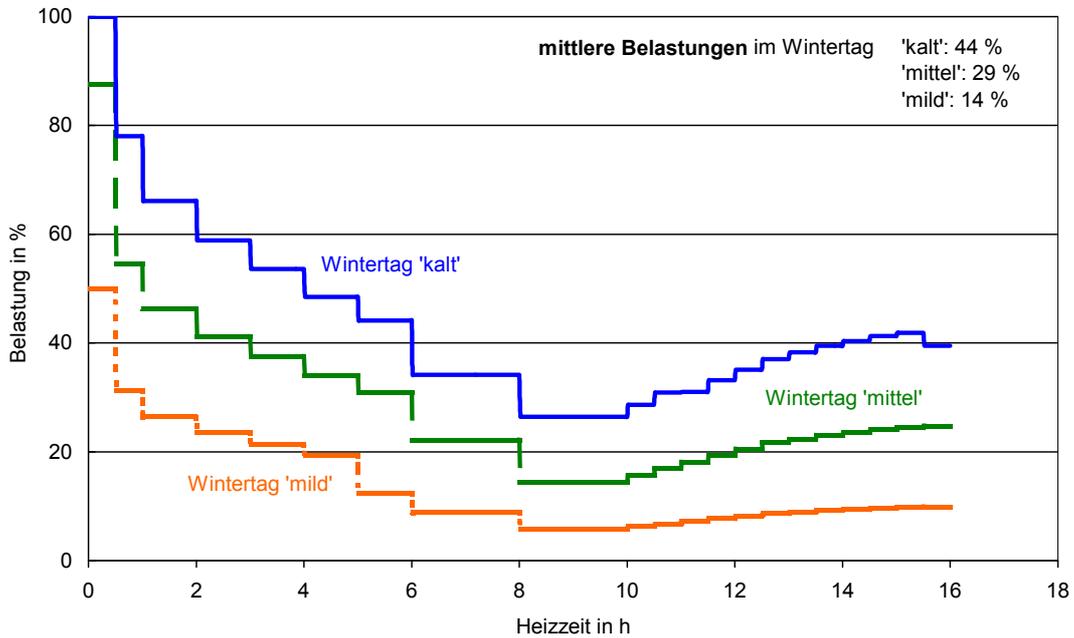


Bild 3.9: Heizlastkurven für Prüfstandsmessungen (Belastung ist auf Nennwärmeleistung des Holzkessels bezogen)

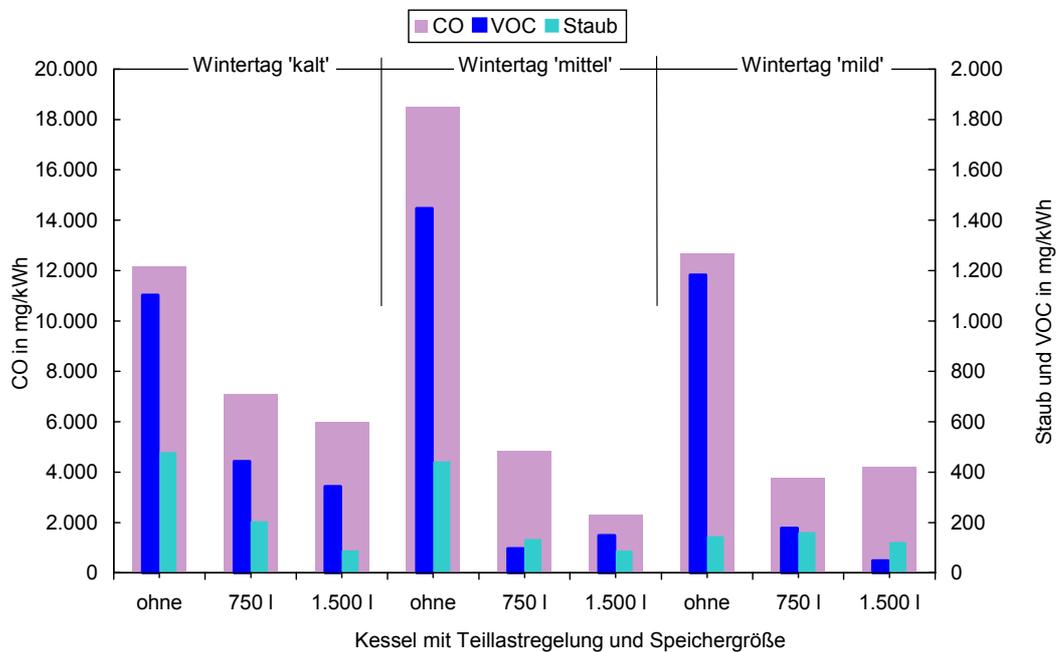


Bild 3.10: Emissionen des Kessels mit Teillastregelung ohne bzw. mit 750 und 1.500 l Speicher bei verschiedenen Heizlastkurven und günstigen Betriebsbedingungen

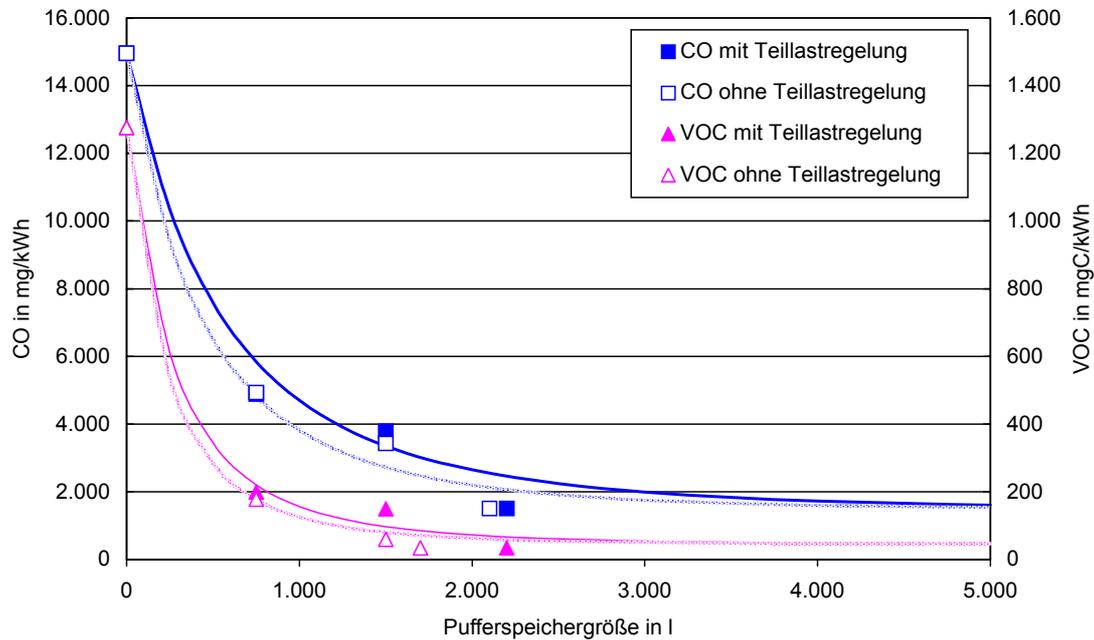


Bild 3.11: Verlauf der Emissionsfaktoren für CO und VOC in Abhängigkeit der Pufferspeichergröße beim Stückholzkessel mit und ohne Teillastregelung (Buchenscheitholz)

Extrapoliert man gegen einen unendlich großen Pufferspeicher (d. h., die Wärme wird komplett abgenommen), so ergibt sich die Kurve nach Bild 3.11. Die Teillastregelung bringt gegenüber der Vergrößerung des Pufferspeichers nur geringe Verbesserungen bei den Emissionen. Eine sinnvolle Größe des Pufferspeichers liegt bei 2000 bis 2500 l, eine weitere Vergrößerung bringt keine wesentliche Verbesserung mehr.

**Zusammenfassung:**

Durch ausreichend dimensionierte Pufferspeicher können die Emissionen handbefeuerter Stückholzkessel gemindert werden, insbesondere bei milden Witterungsbedingungen in der Übergangszeit. Die optimale Speichergröße liegt bei etwa 66 bis 83 l/kW.

### **3.3.2 Messung an einem handbeschickten Stückholzkessel - Wartungszustand**

Für einen emissionsarmen und störungsfreien Betrieb müssen Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe regelmäßig und fachgerecht gewartet werden.

Wöchentlich sind z.B. Aschen aus Füll- und Feuerraum zu entfernen, die Wärmetauscherrohre zu reinigen und bestimmte Anlagenparameter (z.B. Druck) zu kontrollieren.

Weitere Wartungsarbeiten und Kontrollen sind in größeren Zeitabständen durchzuführen, viele Hersteller empfehlen den Abschluss eines Wartungsvertrages, da bestimmte Prüfungen (z.B. Funktion der Lambda-Sonde) und Einstellarbeiten von den Betreibern nicht geleistet werden können.

Um den Einfluss des Wartungszustandes auf das Emissionsverhalten zu ermitteln, wurde eine moderner teillastfähiger Holzkessel mit Pufferspeicher während einer 2monatigen Betriebszeit in einem praxisnahen Heiztest exemplarisch untersucht. Wartungsarbeiten wurden, bis auf eine regelmäßige wöchentliche Entaschung, nicht durchgeführt.

Diese Untersuchungen wurden im Rahmen eines Forschungsprojekts der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg an der Universität Stuttgart am Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD) durchgeführt, der Originalbericht ist als Anlage 10.7 angefügt.

#### **Ergebnisse:**

Insgesamt war bei dem modernen Stückholzkessel mit Leistungs- und Verbrennungsregelung das Verbrennungsverhalten während der gesamten Betriebszeit von 9 Wochen überraschend stabil und wurde nur wenig von der zunehmenden Kesselverschmutzung beeinflusst.

Für die gemessenen Emissionen von CO, VOC und Partikeln ergaben sich während dieser Zeit keine eindeutig ansteigenden Werte. Während der schrittweise durchgeführten Reinigung der Feuerung (Wärmetauscher – Heizkessel – Lambda-Sonde) ergaben sich allerdings geringfügige Änderungen der CO- und Partikelkonzentrationen.

Einen merklichen, wenn auch im Bereich von lediglich 2 – 3 Prozentpunkten liegenden, Einfluss auf das Emissionsverhalten dürfte demnach der schleichende Wirkungsgradverlust haben, der sich aufgrund abnehmender CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Abgas und zunehmender Abgastemperaturen ergibt.

### 3.3.3 Messungen an einem Kachelofen-Heizeinsatz – Betreiberverhalten

An einem Kachelofen-Heizeinsatz wurde der Einfluss des Betreiberhaltens auf die Emissionen eines Kachelofen-Heizeinsatzes untersucht (Details s. Anlage 10.7). Im Vergleich zu den Idealbedingungen bei Prüfstandsmessungen nach DIN 18 891 (Volllast) sollten hier realistische Lastzustände (Heizlastkurven analog 3.3.2) sowie ein realistisches Betreiberverhalten simuliert und die dabei entstehenden Emissionsverhältnisse verglichen werden.

Bei den Abbrandversuchen wurde von einem Betreiber ausgegangen, der sich bei den Holzaufgabemengen und Einstellungen des Ofens an der Bedienungsanleitung bzw. am aktuellen Wärmebedarf orientiert, grobe Bedienungsfehler wurden hierbei nicht unterstellt.

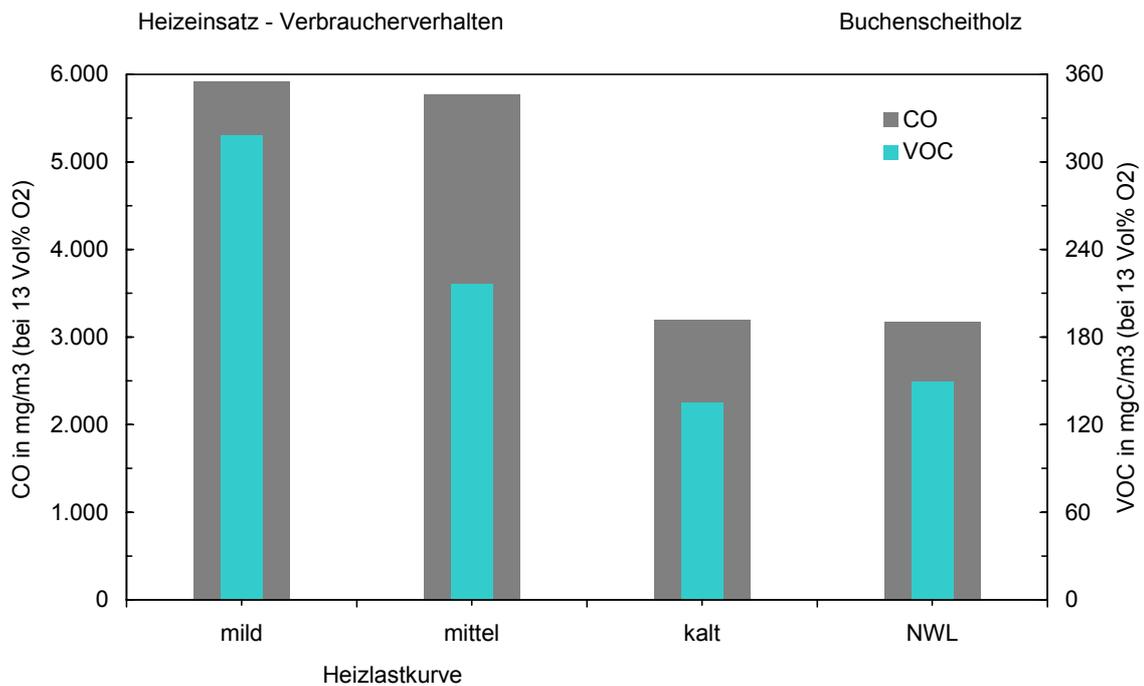


Bild 3.12: CO- und VOC-Konzentration als Mittelwerte der einzelnen Heizlastkurven und der Messungen unter normähnlichen Bedingungen (NWL)

### **Ergebnisse:**

Die Ergebnisse der Messungen bei den 4 verschiedenen Lastzuständen ergaben erhöhte Emissionen bei mittleren und milden Außenbedingungen. Im Vergleich zu den Bedingungen bei Prüfstandsmessungen liegen diese um den Faktor 1,6 höher.

Hierbei wurde von trockenem Brennstoff und sachgerechter Bedienung des Ofens ausgegangen. Werden nicht ausreichend abgelagerte Brennstoffe eingesetzt und kommt es zu Fehlverhalten des Betreibers, liegen die Emissionen mit Sicherheit noch höher.

### **3.3.4 Messungen an einem einfachen Abgaskatalysator**

An dem Kachelofen-Heizeinsatz, der für die Messungen zum Betreiberverhalten eingesetzt wurde, wurde die Wirksamkeit eines einfachen Abgaskatalysators untersucht. Hierzu wurde der Oxidationskatalysator direkt nach dem Stutzen des Heizeinsatzes in das Verbindungsstück zum nachgeschalteten Guss-Wärmetauscher eingebaut. Als Brennstoffe wurden Buchenholz und Braunkohlenbriketts eingesetzt.

Ergänzend hierzu wurden in einem Unterprojekt von der UMEG (Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit Baden-Württemberg, Karlsruhe) weitere Messungen durchgeführt. Hierbei wurden neben den Staubemissionen u.a. auch die Konzentrationen von anorganischen Chlorverbindungen, aliphatischen Aldehyden, organischen Einzelkomponenten und polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe bestimmt.

Die Vorgehensweise und die Versuchsergebnisse im Einzelnen sind im Anhang 10.7 bzw. im Messbericht der UMEG ausführlich beschrieben [2-22].

Diese Messungen wurden zeitlich nacheinander (Abbrand mit und ohne Katalysator) durchgeführt. Daneben wurden Kohlenmonoxid und Gesamt-C auch simultan (vor und nach dem Katalysator) gemessen.

Der Druckverlust des Katalysators wurde weitgehend dadurch ausgeglichen, dass der Schornsteinzug erhöht wurde. Trotzdem konnte nicht exakt dasselbe Abbrandverhalten des Heizeinsatzes wie beim Betrieb ohne Katalysator erreicht werden.

## Ergebnisse

Die CO-Minderung ist stark von der Gastemperatur und damit von der sich hieraus ergebenden Katalysatortemperatur abhängig. Bei Temperaturen unterhalb von 300 °C ergeben sich nur geringe CO-Umsetzungsraten, ab etwa 500 bis 600 °C werden im Katalysator bis zu 60 % des CO oxidiert. Hemmend auf die Umsetzungsrate wirkt sich die geringe Sauerstoffkonzentration aus. Bei O<sub>2</sub>-Konzentrationen unterhalb von 10 Vol.-% findet, trotz ausreichend hoher Temperatur, die CO-Minderung in einem geringeren Umfang statt.

Die Minderung bei den flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) ist dagegen weit weniger von der Temperatur und Sauerstoffkonzentration abhängig. Bereits bei Temperaturen von 200 °C werden die VOC im Katalysator zu 60 % oxidiert. Diese Umsetzungsrate nimmt vermutlich wegen der gleichzeitig abnehmenden Sauerstoffkonzentration auch bei höheren Temperaturen nicht mehr weiter zu.

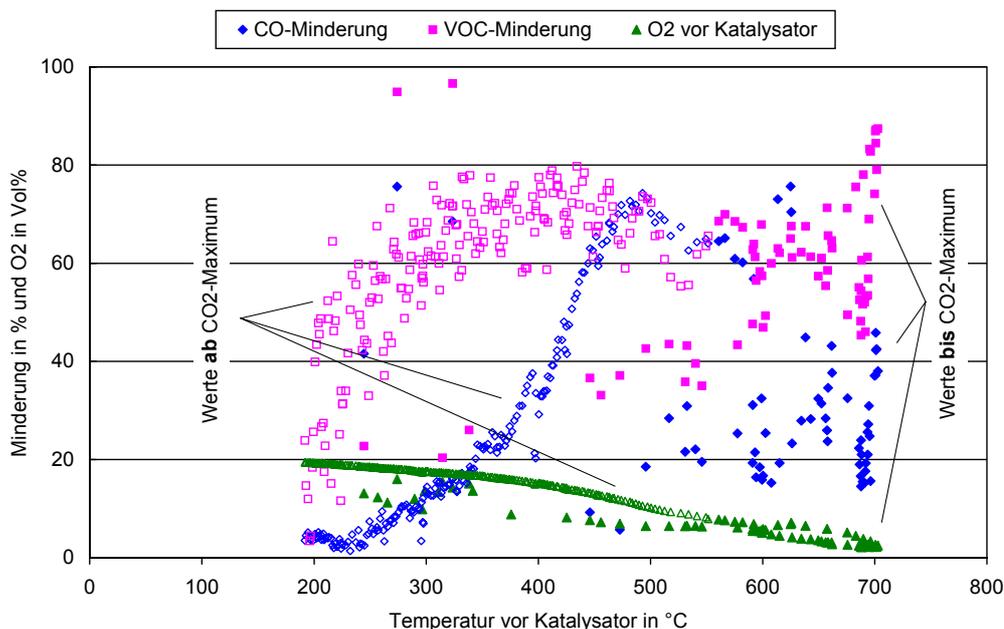


Bild 3.13: CO- und VOC-Minderung in Abhängigkeit der Gastemperatur (Abbrand mit Braunkohlenbriketts)

Bei den Messungen der UMEG ergab sich eine Emissionsminderung von mindestens 50 % auch für organische Einzelkomponenten (Benzol, Aldehyde), polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, Staub und HCl.

Voraussetzung ist allerdings, vor allem für eine effektive CO-Minderung, dass auch in der Hauptverbrennungsphase noch ausreichend Sauerstoff im Heizgas vor dem Katalysator enthalten sein muss. Dies bedeutet, dass in dieser Phase die Luftzufuhr nicht gedrosselt werden darf, bzw. bei zu geringem Kaminzug durch Zwangsbelüftung zu unterstützen ist.

Auf die Probleme im Betrieb, insbesondere mit dem Druckverlust in Feldversuchen wurde in Kapitel 2.5.1 hingewiesen.

### **3.3.5 Messungen an Holzbacköfen**

#### **Betriebsweise und Emissionsverhalten von Holzbacköfen**

Bei direkt beheizten Holzbacköfen, die derzeit von den Anforderungen der 1. BImSchV ausgenommen sind, wird vor jedem Backvorgang eine relativ große Brennstoffcharge direkt auf die Backfläche aufgelegt und in Brand gesetzt. Die Brennstoffmenge hängt von der Ofentemperatur ab und wird so berechnet, dass die zum Backen erforderliche Temperatur erreicht wird. Sie ist somit vor dem ersten Backvorgang mit kaltem Backofen am größten und sinkt sukzessive, sofern der Ofen bis zum nachfolgenden Backvorgang nicht auskühlt. Die verwendeten Holzbrennstoffe (Reisig, Sägerestholz) zeichnen sich durch große Oberflächen aus, so dass der Abbrand rasch und mit intensiver Wärmeentwicklung erfolgt. Nach dem Abbrand wird die noch vorhandene Glut von der Backfläche entfernt. Nach dem Reinigen der Backfläche und erforderlicher Wartezeiten zur Einstellung gleichmäßiger Temperaturen im Ofen wird das Backgut aufgegeben.

Die große Aufgabemenge an Brennstoff verbunden mit der großen Oberfläche führt zu einer raschen Zersetzung des Holzes bei hohen Temperaturen und ausgeprägtem Luftmangel ( $< 3 \text{ Vol.-% O}_2$ ). Die Folge sind im Vergleich zu anderen chargenweise betriebenen Holzfeuerungen sehr hohe Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung. Die deutlich erkennbare Rauch- und Geruchsentwicklung führt häufig zu Beschwerden seitens der Nachbarschaft.

### **Ergebnisse von Emissionsmessungen**

Es gibt nur wenige systematische Untersuchungen der Emissionen von Holzbacköfen. Nach ersten Messungen im Jahr 1996 wurden vom Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen der Universität Stuttgart (IVD) im Rahmen eines Forschungsprogramms der Deutschen Bundesstiftung Umwelt im Jahr 2002 Messungen und Versuche zur Emissionsminderung durchgeführt [3-2]. Im Rahmen eines Nachbarschaftsbeschwerdeverfahrens wurden von der UMEG im Jahr 2003 die Emissionen an einem Holzbackofen im Raum Stuttgart gemessen.

Da in den vorgenannten Messkampagnen nur die Standardkomponenten (Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe, Stickstoffoxide) bzw. PCDD/F gemessen wurden, wurden bei einem Hersteller für Holzbacköfen im Sommer 2005 umfangreiche Messungen mit den zusätzlichen Komponenten Benzol und polycyclische Kohlenwasserstoffe vorgenommen.

Bei der Messung des IVD der Universität Stuttgart im Jahr 2002 an einer gewerblichen Anlage wurden die höchsten Emissionen beim ersten Anheizen des kalten Backofens am Wochenbeginn mit einer großen Holzmenge (105 kg) festgestellt. Bei folgenden Abbränden im noch warmen Backofen wurden immer kleinere Holzmenge verwendet, so dass die Emissionen entsprechend sanken.

Bei der Messreihe der UMEG 2005 wurde immer die gleiche Holzmenge aufgegeben. Hierbei zeigte sich, dass bei der Holzaufgabe in den warmen Backofen der Verbrennungsprozess sehr schnell in Gang kam und dann zu sehr hohen Emissionen führte.

Die ungünstigen Verbrennungsbedingungen führen zu sehr hohen Emissionen von Kohlenmonoxid und organischen Verbindungen (Tabelle 3.5), insbesondere der krebs-erzeugenden Luftschadstoffe Benzol und PAK. Vergleichbar hohe Werte wurden bei Anlagen zur Gebäudeheizung nur unter extremen ungünstigen Bedingungen insbesondere bei offenen Kaminen erreicht.

In diesem Messprogramm wurde auch der Einfluss eines nachgeschalteten Brenners zur Minderung der Emissionen untersucht. Um eine sinnvolle Betriebsweise des Brenners zu erreichen, musste der Sauerstoffgehalt im Abgas durch zusätzliche Maßnahmen an der Ofensteuerung erhöht werden. Für die Produkte unvollständiger Verbrennung wurden Minderungsraten zwischen 64 und 85 % gefunden. Durch die unter-

## Eigene Messprogramme und Erhebungen

schiedliche Betriebsweise des Backofens ist der Vergleich der Messreihen allerdings problematisch.

Tab. 3.5: Messergebnisse bei Holzbacköfen (bezogen auf 13 Vol.-% O<sub>2</sub>)

	IVD 1996	IVD 2002	UMEG 2003	UMEG 2005	
Holzaufgabemenge	ca. 20 kg	32,5 kg (105 kg)*	2 x 14 kg 2 x 13 kg	9 kg 9 kg **	Minderungsrate
CO	17.659 mg/m <sup>3</sup>	8.000 mg/m <sup>3</sup> (9.125 mg/m <sup>3</sup> )	5.140 mg/m <sup>3</sup> 5.758 mg/m <sup>3</sup>	10.327 mg/m <sup>3</sup> 3.765 mg/m <sup>3</sup> **	64 %
Gesamt-C	5.880 mg/m <sup>3</sup>	1.250 mg/m <sup>3</sup> (4.694 mg/m <sup>3</sup> )	946 mg/m <sup>3</sup> 1.400 mg/m <sup>3</sup>	3.865 mg/m <sup>3</sup> 660 mg/m <sup>3</sup> **	85 %
NOx als NO <sub>2</sub>	114,6 mg/m <sup>3</sup>	-	64 mg/m <sup>3</sup> 68 mg/m <sup>3</sup>	60 mg/m <sup>3</sup> 76 mg/m <sup>3</sup> **	- 25 %
Staub	3.285 mg/m <sup>3</sup>	-	-	974 mg/m <sup>3</sup> 163 mg/m <sup>3</sup> **	83 %
Chlorwasserstoff	76 mg/m <sup>3</sup>	-	-	-	-
Benzol				211 mg/m <sup>3</sup> 53,7 mg/m <sup>3</sup> **	75 %
PAK (16)	-	-	-	127 mg/m <sup>3</sup> 36,3 mg/m <sup>3</sup> **	78 %
Benzo[a]pyren	-	-	-	1,5 mg/m <sup>3</sup> 0,34 mg/m <sup>3</sup> **	71 %
PCDD/F	0,43 ng/m <sup>3</sup>	-	-	-	-

\* Messung bei kaltem Ofen

\*\* Messung mit Nachbrenner und zusätzlicher Sauerstoffzufuhr

### Abschätzung der Emissionen

Über die Anlagenbestände ist wenig bekannt, da Holzbacköfen keiner wiederkehrenden Messverpflichtung unterliegen, sie unterliegen lediglich der Kehrpflicht nach § 1 des Schornsteinfegergesetzes.

Von einem Hersteller wurde die Anzahl der in den letzten ca. 10 Jahren verkauften Holzbacköfen mit ca. 700 angegeben, davon ca. 400 an Bäckereien. Die meisten der

genannten Backöfen besitzen eine Backfläche von 1 – 3 m<sup>2</sup>, wobei die Backfläche durch Etagenanordnung der Öfen vergrößert werden kann.

Insgesamt dürfte sich die Anzahl der Bäckereien mit Holzbacköfen in Deutschland um etwa 1000 bewegen.

Bei einer mittelgroßen gewerblichen Bäckerei kann davon ausgegangen werden, dass im Mittel etwa 1,5 Abbrände pro Arbeitstag stattfinden, dies sind im Jahr etwa 400 – 500 Abbrände. Bei Holzaufgabemengen von 20 – 30 kg pro Abbrand resultiert daraus ein Holzverbrauch von etwa 10 - 15 t pro Jahr, dies entspricht bei einem mittleren Heizwert von 18 MJ/kg etwa 0,25 TJ pro Ofen. In der Regel besteht ein Backofen aus zwei übereinander liegenden Backflächen, so dass der Energieeinsatz pro Backofen demnach bei etwa 0.5 TJ/a liegen dürfte.

Bei einer geschätzten Zahl von 500 Backöfen wäre der Energieeinsatz etwa 250 TJ/a, dies entspricht etwa 0,1 % des gesamten Holzeinsatzes in Kleinfeuerungen.

Aus den Messwerten in Tabelle 3.5 können Emissionsfaktoren abgeleitet werden. Daraus lassen sich die Emissionen für Holzbacköfen abschätzen (Tabelle 3.6). Zum Vergleich sind diesen Emissionsfaktoren die mittleren Emissionsfaktoren für Holzfeuerungen bei Haushalten und Kleinverbrauchern (s. Anhang 10.4.2) gegenübergestellt.

Tab. 3.6: Abschätzung der Emissionen aus Holzbacköfen

Schadstoff	Holzbacköfen		Holzfeuerungen
	Emissionsfaktor in kg/TJ	Geschätzte Emissionen	mittlere Emissionsfaktoren in kg/TJ
Kohlenmonoxid	10.000	2.500 t/a	n.b.
Gesamtstaub	1.500	275 t/a	110
Gesamtkohlenstoff	3.500	875 t/a	n.b.
Benzol	140	35 t/a	7,8
Benzo(a)pyren	1,0	250 kg/a	0,026
Polycyclische Aromaten (EPA16)	80	20 t/a	2,5
Polycyclische Aromaten (PAK4)	2,4	600 kg/a	0,1
PCDD/PCDF	0,3 mg/TJ	75 mg/a	0,1 mg/TJ

n.b.: in diesem Vorhaben nicht berechnet

Die Emissionsfaktoren für Holzbacköfen liegen um den Faktor 3 – 40 höher als die mittleren Emissionsfaktoren für Kleinf Feuerungsanlagen, in denen Holzbrennstoffe zum Einsatz kommen. Der Anteil der Holzbacköfen an den Emissionen aller Holzfeuerungen in Deutschland dürfte demnach je nach Schadstoff zwischen 0,5 und 4 % liegen. Unabhängig davon können Holzbacköfen zu erheblichen Immissionsbelastungen an krebserzeugenden Luftschadstoffen in der Nachbarschaft führen.

### **Minderungsmaßnahmen**

Nach den Richtlinien für Brot und Kleingebäck muss das ausschließlich zu verwendende Brennmaterial Holz direkt im Ofen verbrannt werden, Backkammer und Brennkammer müssen eine Einheit bilden.

Ein auch nur teilweiser Ersatz des Holzes (z.B. beim Aufheizen der Öfen bzw. als Nachbrenner im hinteren Ofenteil) durch emissionsärmere Brennstoffe wie Öl oder Gas würde dazu führen, dass das derart gebackene Brot nicht mehr als Holzofenbrot bezeichnet werden darf.

Von einem Hersteller wird ein spezieller Brenner für Holzpellets angeboten, der als mobile Einheit den Backofen über die Beschickungsöffnungen vorheizen soll, Messergebnisse darüber sind nicht bekannt.

Es gibt auch Versuche, durch Sekundärmaßnahmen, wie z.B. Nachverbrennung, die Emissionen im Abgas zu senken. Bei der Nachverbrennung ergibt sich das Problem, dass zu den Zeiten der höchsten Emissionen der Sauerstoffgehalt im Abgas auf sehr kleine Werte sinkt. Für eine wirksame Nachverbrennung sind Sauerstoffgehalte im Abgas von mindestens 10 Vol.-% erforderlich, die Öfen sollten daher mit einer Zwangsbelüftung ausgestattet sein. Dies wirkt sich aber auf die gesamte Ofenkonstruktion aus, so dass eine Nachrüstung sehr aufwendig wird. Minderungsmaßnahmen durch Nachverbrennung sollten daher bereits bei der Ofenkonstruktion mit eingeplant werden. Bei den Messungen der UMEG ergaben sich Minderungen bis 75 % (s. Tab. 3.5).

Wegen der problematischen Zusammensetzung des Abgases (kondensierbare Teeranteile) scheidet der Einsatz filternder Abscheider zur Minderung von Staub und der staubgebundenen Schadstoffe aus.

### 3.4 Bundesweite Emissionskataster für krebserzeugende und besonders gesundheitsschädliche Luftverunreinigungen

Für die einzelnen Bundesländer existieren verschiedene Emissionskataster, die meistens nur die klassischen Luftschadstoffe enthalten. Angaben zu den in diesem Vorhaben untersuchten Stoffen für die relevanten Quellengruppen sind nur für wenige Bundesländer verfügbar [1-3, 3-7 bis 3-11].

Daneben gibt es einige bundes- und EU-weite Zusammenstellungen zu PAK, PCDD/F und Feinstaub, genauer wurden die Feinstaubemissionen untersucht.

#### Feinstaubemissionen

Die Feinstaubemissionen (PM10) der Quellgruppe Haushalte und Kleinverbraucher in den Bundesländern [Tab. 3.7] betragen im Bezugsjahr 5 – 30 % der Gesamtemissionen, sie liegen unter den Emissionen des Verkehrs.

Tab. 3.7: PM10-Feinstaubemissionen (t/a) in den deutschen Bundesländern

Land	Bezugsjahr	Haushalte und Kleinverbraucher	Verkehr	Industrie und Gewerbe	sonstige	Summe
Baden-Württemberg	2002	1.314	6.133	4.422	3.543	<b>15.412</b>
Bayern	1996	7.601	10.621	5.593	1.771	<b>25.586</b>
Brandenburg	2000	1.298	2.740	5.279		<b>9.317</b>
Hessen	1999	2.956	7.648	4.366		<b>14.970</b>
NRW	2000	1.844	34.727	19.995		<b>56.667</b>

Zu den Feinstaubemissionen für Deutschland und die EU gibt es verschiedene Schätzungen, die sich in den Ergebnissen unterscheiden. Die Emissionen des Verkehrs werden darin oft überschätzt. Neuere Ergebnisse gehen von geringeren Abgasmissionen aus, auch führen die verschiedenen Modelle zur Berechnung des Abriebs aus Reifen, Bremsen und Straßenbelag zu unterschiedlichen Emissionsangaben.

Zum Bezugsjahr 2003 liegen keine aktuellen Berechnungen vor, beispielhaft sind in Tabelle 3.8 die Ergebnisse des Instituts für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT) vom Oktober 2004 [3-12] für das Jahr 2000 aufgeführt.

Nach diesem Modell werden u.E. die Emissionen der Haushalte eher unterschätzt, während die Abgasemissionen des Verkehrs nach aktuellen Berechnungen und Prognosen niedriger liegen (s. Kap. 4.5 [4-33]).

Tab. 3.8: Feinstaubemissionen (PM10) in Deutschland in 2000 [3-12]

	Gesamtstaub 2000 [kt]	Feinstaub- anteil [%]	Feinstaub 2000 [kt]	Anteil am Gesamtfein- staub 2000 [%]
Industrieprozesse	123	43	53	21
Kraft-, Heizwerke und sonstige stationäre Verbrennung	28	75	21	8
Haushalte, Kleinverbraucher	22	90	19	7
Schüttgutumschlag	49	50	24	9
Straßenverkehr (Abgas)	46	100	45	18
übriger Verkehr (Abgas)	20	100	19	7
Straßenverkehr (Abrieb)	88	20	18	7
Landwirtschaft	69	30	22	9
Sonstige	49	70	35	14
<b>Summe</b>	<b>494</b>		<b>256</b>	<b>100</b>

### Benzol

In den Emissionskatastern der Bundesländer stammen die Emissionen von Benzol zu über 90 % aus dem Verkehr, Kleinf Feuerungsanlagen spielen mit einem Anteil von weniger als 5 % nur eine geringe Rolle (Tab 3.9).

Tab. 3.9: Benzolemissionen (t/a) in den deutschen Bundesländern

Land	Bezugsjahr	Haushalte und Kleinverbraucher	Verkehr	Industrie und Gewerbe	sonstige	Summe
Baden-Württemberg	2002	57	1.426	31		<b>1.514</b>
Bayern	1996	243	4.622	83	92	<b>5.040</b>
Brandenburg	2000	92	551	3.443		<b>4.086</b>
Hessen	1995			18,6		
NRW	1996	201	2.481	202		<b>2.884</b>

Nach Berechnungen des ifeu [4-33] lagen die Gesamtemissionen des Straßenverkehrs in Deutschland an Benzol bis 1990 bei ca. 60 kt/a und fielen dann stark auf Werte um 10 kt/a in 2000 ab, bis 2010 werden die Emissionen dann auf ca. 5 kt/a gesunken sein.

**PCDD/F**

Der Hauptemittent von PCDD/F ist die Quellengruppe Industrie und Gewerbe (Tabelle 3.10), die Kleinf Feuerungen haben auch hier einen Anteil von 5 - 10 %.

Tab. 3.10: Emissionen von PCDD/F (g i-TEQ/a) in den deutschen Bundesländern

Land	Bezugsjahr	Haushalte und Kleinverbraucher	Verkehr	Industrie und Gewerbe	sonstige	Summe
Baden-Württemberg	2002	1,7	0,12	13	0,03	<b>15</b>
Brandenburg	2000	0,36		13,45		<b>13,8</b>
NRW	2000	1,48	0,24	62,35		<b>64,1</b>

Nach Erhebungen des Umweltbundesamtes [3-14] lagen die Emissionen an PCDD/F in Deutschland 1994 noch bei 330 g I-TE. Durch Erfolge bei der Emissionsminderung bei der Metallgewinnung und Müllverbrennung wurden die Emissionen für das Jahr 2000 auf kleiner als 70 g I-TE abgeschätzt. Der Anteil der Hausbrandfeuerstätten mit 15 g I-TE in 1994 und kleiner 10 g I-TE in 2000 stieg damit von 4,5 auf etwa 14 % an.

Schätzungen für Österreich ergaben, dass der Hausbrand für etwa ein Drittel der Emissionen von PCDD/F verantwortlich ist [3-15].

**Polycyclische Aromaten (PAK)**

Zu den Gesamt-PAK (16 EPA-PAK) gibt es nur spärliche Angaben in den Emissionskatastern der Bundesländer, meistens wird Benzo(a)pyren als Leitkomponente angegeben (Tab. 3.11).

Tab. 3.11: Emissionen von polycyclischen Aromaten (EPA-PAK in t/a) in den deutschen Bundesländern

Land	Bezugsjahr	Haushalte und Kleinverbraucher	Verkehr	Industrie und Gewerbe	sonstige	Summe
Brandenburg	2000	21		0,12		<b>21</b>
Hessen	1999		5,82			

EU-weite Schätzungen wurden für Deutschland für die Summe der Emissionen der 6 Borneff-PAK (s. Kap. 3.1.4) durchgeführt, für die 16 EPA-PAK sind keine Emissionsdaten verfügbar.

### Benzo(a)pyren

Beim Benzo(a)pyren sind die Kleinf Feuerungen die wesentlichen Emittenten, in Baden-Württemberg liegen lediglich die Emissionen der sonstigen Maschinen, Geräte und Fahrzeuge höher.

Tab. 3.12: Emissionen von Benzo(a)pyren (kg/a) in den deutschen Bundesländern

Land	Bezugsjahr	Haushalte und Kleinverbraucher	Verkehr	Industrie und Gewerbe	sonstige	Summe
Baden-Württemberg	2002	202	169	36	420	<b>827</b>
Brandenburg	2000	389		0,464		
Hessen	1994	509				
NRW	2000	1.005	538	385		<b>1.928</b>

EU-weite Schätzungen ergeben für Deutschland Emissionen von 26,4 t/Jahr (Bezugsjahr 1995, [3-13])

### 3.5 Immissionen durch Kleinf Feuerungsanlagen

Obwohl sich die vorliegende Arbeit im Wesentlichen mit der Emissionssituation von Kleinf Feuerungsanlagen beschäftigt, soll im Folgenden jedoch auch ein kurzer Blick auf die Immissionssituation im Umfeld solcher Anlagen gegeben werden. Die lufthygienische Relevanz der Produkte der unvollständigen Verbrennung aus Feuerungsanlagen und sonstigen Emissionsquellen ist seit vielen Jahrzehnten ein wichtiger Teilbereich von stationären Immissionsmessungen. So wird beispielsweise in fast allen Luftmessstationen der Bundesländer die Komponente Kohlenmonoxid kontinuierlich gemessen. Seit Jahren sind auch für flüchtige organische Komponenten Messprogramme etabliert.

Jedoch sind die Immissionsmessungen von krebserzeugenden und weiteren, besonders gesundheitsgefährdenden Stoffen aufgrund der aufwändigen Probennahme und Analytik derzeit noch nicht sehr verbreitet bzw. erst im Aufbau begriffen.

Insbesondere die polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) mit ihrer Leitkomponente Benzo(a)pyren sind hier von besonderem Interesse.

Nach einer Studie der Europäischen Union [3-3] ist bei den in der EU21 auftretenden etwa 200 000 Todesfällen durch Lungenkrebs pro Jahr ein geschätzter Anteil von 0,1 – 0,4 % auf die Wirkung der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe in der Luft zurückzuführen.

Insbesondere die EU-Länder Frankreich, Italien, Polen und Deutschland sind hier betroffen. So wurde in der genannten Studie für Deutschland ein Wert von etwa 34 Todesfällen pro Jahr durch die PAK-Exposition abgeschätzt. Die relevanteste Quellgruppe für die Emissionen ist hier, wie bereits in Kapitel 3.4 dargestellt, der Bereich Hausbrand.

Gemäß der Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über Arsen, Cadmium, Quecksilber, Nickel und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe in der Luft (4. Tochterrichtlinie) existiert nun ein Zielwert von 1 ng/m<sup>3</sup> im Jahresmittel für die Leitsubstanz Benzo(a)pyren.

Im Folgenden soll an Hand von 3 Literaturstellen eine orientierende Einschätzung der derzeitigen Immissionssituation im Umfeld von Feststofffeuerungen für die Hausbeheizung gegeben werden.

### **Sampling Program for Residential Wood Combustion, Canada [3-4]**

Aufgrund eines Anteils von etwa einem Drittel Holzfeuerungen am Heizungsbestand in der kanadischen Provinz Quebec hat die regionale Umweltbehörde im Winter 1998/99 ein größeres Immissionsmessprogramm im Stadtgebiet von Montreal im Umfeld von Holzheizungsanlagen durchgeführt. Es war vermutet worden, dass Holzheizungen als bedeutende Quelle für Luftverunreinigungen anzusehen sind und bei einzelnen Komponenten über 50 % der Emissionen verursachen. Durch eine frühere Studie war bereits bekannt, dass die PAK-Konzentrationen im Winter 10 bis 20fach höher sein können als im Sommer.

Im Rahmen der Messungen wurden mittlere PAK-Immissionen als Tagesmittelwert bis zu 76,8 ng/m<sup>3</sup> gefunden. Für die Leitkomponente Benzo(a)pyren wurden Maximalwerte von 4,53 ng/m<sup>3</sup> und Mittelwerte von 1,20 ng/m<sup>3</sup> als Tagesmittel gefunden. Die Ergeb-

nisse dieser Studie aus dem Winter 1998/99 deuten darauf hin, dass der von der EU festgelegte Zielwert von 1 ng/m<sup>3</sup> für Benzo(a)pyren im Umfeld von Holzfeuerungsanlagen durchaus überschritten werden kann.

### **PAK in der Luft – Messungen in Graz und Linz, 2001 [3-5]**

In einem Messprogramm des österreichischen Umweltbundesamtes wurden PAK-Messungen in Graz und Linz im Jahre 2001 durchgeführt. Auch in diesem Messprogramm zeigte sich eine Überschreitung des Zielwertes von 1 ng/m<sup>3</sup>. Es wurde für die Komponente Benzo(a)pyren in Graz ein Jahresmittelwert von 1,15 ng/m<sup>3</sup> und für Linz von 2,27 ng/m<sup>3</sup> gefunden. In einer Pilotstudie des Jahres 1999 wurden auch in Wien 0,98 ng/m<sup>3</sup> als Jahresmittelwert für Benzo(a)pyren gefunden.

In den Messprogrammen zeigte sich, dass in den Sommermonaten deutlich geringere Konzentrationen als in den Wintermonaten vorlagen. Als Gründe für die jahreszeitlichen Schwankungen werden neben dem Jahresgang der Emissionen beim Hausbrand auch die saisonal unterschiedlichen atmosphärischen Stabilitäten der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe angegeben. Durch höhere Sonneneinstrahlung und höhere Temperatur sowie durch das Vorhandensein von Ozon und Hydroxylradikalen kommt es nach Aussage der Studie während der Sommermonate zu photolytischen und chemolytischen Prozessen, die die geringeren Messwerte im Sommer mit erklären.

Die höheren Messergebnisse in Graz werden auf die besondere orographische Lage der Stadt (Beckenlage), welche zu Inversionswetterlagen neigt und daher ungünstigere Voraussetzungen zur Schadstoffausbreitung bieten, zurückgeführt.

### **PAK-Immissionsmessungen im Zusammenhang mit Holzfeuerungen im Winter 2002/2003 in Baden-Württemberg [3-6]**

Die nach derzeitigem Kenntnisstand umfangreichste Immissionsuntersuchung im Hinblick auf die Immissionen im Umfeld von Holzfeuerungsanlagen wurde im Rahmen eines Messprogramms im Winter 2002/2003 von der UMEG in Baden-Württemberg durchgeführt. Für diese Messungen wurde mit Hilfe des Emissionskatasters für Baden-

Württemberg drei Gemeinden mit einem hohen Holzeinsatz bei der Energiegewinnung ausgewählt.

In diesen Gemeinden fanden dann im Winter 2001/2002 erste orientierende Messungen für Benzo(a)pyren und dann im Winter 2002/2003 umfangreichere Emissionsmessungen für 7 als kanzerogen eingestufte PAK's statt.

Die Messungen in den drei Gemeinden konnten dann jeweils mit Vergleichsmessungen an den Stationen des Vielkomponenten-Luftmessnetzes des Landes Baden-Württemberg verglichen werden.

Sowohl die orientierende Messung im Jahre 2001/2002 als auch das Messprogramm 2002/2003 zeigt für die Leitkomponente Benzo(a)pyren signifikante Überschreitungen des Zielwertes der 4. EU-Tochterraichtlinie. So wurden für die beiden Messzeiträume maximale Mittelwerte bis 3,5 ng/m<sup>3</sup> Benzo(a)pyren gefunden. Für einzelne Messpunkte konnte sehr gut ein Zusammenhang zwischen niedrigen Temperaturen und damit höherem Heizbedarf und hohen Benzo(a)pyren-Konzentrationen gefunden werden. In der Gemeinde mit der höchsten Benzo(a)pyren-Konzentration fand sich auch ein Zusammenhang zu den parallel mitbestimmten Formaldehyd-Konzentrationen, die ebenfalls als Emissionen aus Holzfeuerungsanlagen angesehen werden können. Ein ähnliches Ergebnis zeigte der Verlauf der Benzolkonzentration.

Als Ergebnis der drei betrachteten Literaturstellen ist festzustellen, dass Holzfeuerungen zu einer deutlichen Erhöhung der Außenluftbelastung mit krebserzeugenden polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen führen können. Dieser Zusammenhang zwischen Emissionen und Immissionen sollte durch weitere Messprogramme in den Bundesländern näher untersucht werden. Hier sollte die Zahl der Komponenten neben den PAK's auch um beispielsweise Formaldehyd und Benzol ergänzt werden. Zur Einhaltung des Zielwertes der 4. EU-Tochterraichtlinie von 1 ng/m<sup>3</sup> Benzo(a)pyren als Jahresmittelwert müssen in Gebieten mit hohem Feststofffeuerungsanteil bereits jetzt Maßnahmen zur Verminderung der Emissionen ergriffen werden.

## **4 Berechnung und Prognose des Emissionsaufkommens**

### **4.1 Bestand und Struktur der Feuerungsanlagen sowie des Brennstoffeinsatzes**

#### ***4.1.1 Bestand und Struktur der Feuerungsanlagen***

In diesem Kapitel werden der Anlagenbestand und die Anlagenstruktur von Kleinfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe im Geltungsbereich der 1. BImSchV für das Jahr 2003 in Deutschland aufgezeigt.

Zur Darstellung des Anlagenbestandes gibt es unterschiedliche Angaben ([4-17], [4-16], [4-14]).

Da systematische Erhebungen der Struktur der Kleinfeuerungsanlagen nicht verfügbar sind bzw. nur Detailergebnisse von Schornsteinfegern in einigen Kehrbezirken vorliegen, wurde bei allen Literaturstellen auf Befragungen bzw. Markterhebungen, die auf Gesamtdeutschland hochgerechnet wurden, zurückgegriffen.

Weitere Nachfragen bei anderen Institutionen, Verbänden, Marktforschungsinstituten usw. endeten durchweg ohne konkrete Ergebnisse bzw. führten nur in Einzelfällen zu einer Verbesserung der Datenqualität.

Genauere Angaben über den Bestand und die Struktur von Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe, insbesondere für diejenigen kleiner 15 kW, könnten nur die Schornsteinfeger selbst erheben, doch die meisten Kleinfeuerungsanlagen werden, da sie keiner Messpflicht unterliegen (siehe Kap. 5.1), nicht von den Schornsteinfegern erfasst.

Die Schornsteinfeger sind sich mittlerweile dieser Wissenslücke bewusst und beginnen nun vereinzelt, sämtliche Kleinfeuerungsanlagen im Rahmen der Feuerstättenschau zu erfassen [4-27]. Bis daraus repräsentative Ergebnisse erhalten werden können, wird es jedoch noch einige Zeit dauern, da Feuerstättenschauen nur alle fünf Jahre stattfinden.

Der Bestand der Kleinfeuerungsanlagen im Geltungsbereich der 1. BImSchV, aufgeteilt in die Sektoren Haushalte (HH) und Gewerbe, Handel, Dienstleistung (GDH) (bzw. Kleinverbraucher) in Deutschland im Jahr 2003 ist in Tabelle 4.1 dargestellt.

Zum Vergleich wurden zwei wesentliche Bestandsstudien gegenübergestellt. Dies ist in Tabelle 4.2 dargestellt. Obwohl hier zwei verschiedene Jahre (2000 und 2003) unter-

sucht und jeweils andere Datengrundlagen verwendet wurden, stimmen beide Bestandsstudien weitgehend überein.

Tab. 4.1: Bestand der Kleinf Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe in Deutschland

Deutschland (2003)	Leistungs- bereich	installierte Anlagen		
		HH+GHD [Stück]	GHD [Stück]	HH [Stück]
<b>Zentralheizungen und Etagenheizungen</b>	4 - 25 kW	303.888	2.685	301.203
	25-50 kW	210.302	9.320	200.982
	> 50 kW	73.727	31.060	42.667
<b>Summe</b>	<b>&gt; 4 kW</b>	<b>587.917</b>	<b>43.065</b>	<b>544.852</b>
<b>Dauerbrandöfen</b>	> 4 kW	2.010.000	23.833	1.986.167
<b>Kamine</b>	> 4 kW	3.050.000	27.757	3.022.243
<b>Kaminöfen</b>	> 4 kW	3.060.000	41.630	3.018.370
<b>Kachelöfen</b>	> 4 kW	4.050.000	129.072	3.920.928
<b>Summe</b>	<b>&gt; 4 kW</b>	<b>12.170.000</b>	<b>222.292</b>	<b>11.947.708</b>
<b>Badeöfen</b>	> 4 kW	130.000	8.512	121.488
<b>Herde</b>	> 4 kW	1.500.000	146.642	1.353.358
<b>Summe</b>	<b>&gt; 4 kW</b>	<b>1.630.000</b>	<b>155.153</b>	<b>1.474.847</b>
<b>Summen</b>	<b>&gt; 4 kW</b>	<b>14.387.917</b>	<b>420.510</b>	<b>13.967.407</b>

Quelle: [4-14], [4-17], [4-28], eigene Berechnungen

Tab. 4.2: Vergleich der Anlagenbestände verschiedener Literaturstellen

	Alte Bundesländer [1.000Stk.]		Neue Bundesländer [1.000 Stk.]		Deutschland [1.000 Stk.]	
	UBA 41-03 [2000]	Heizprofi [2003]	UBA 41-03 [2000]	Heizprofi [2003]	UBA 41-03 [2000]	Heizprofi [2003]
<b>Heizkessel</b>	422,4	350	256,4	210	678,9	560
<b>Dauerbrandöfen</b>	2.060,0,0	1.790	290,0	220	2.350,0	2.010
<b>Kachelöfen</b>	2.350,0	2.430	1950,0	1.620	4.300,0	4.050
<b>Kaminöfen</b>	2080,0	2.580	400,0		2.480,0	3.060
<b>Kamine</b>	2.570,0	2.730	300,0	320	2.870,0	3.050
<b>Badeöfen</b>	110,0	80	100,0	50	210,0	130
<b>Herde</b>	1410,0	1.270	340,0	230)	1.750,0	1.500
<b>Summe</b>	11.002,4	11.230	3.636,4	3.130	14.638,9	14.360

Quelle: [UBA 41-03: 4-17], [Heizprofi: 4-14]

Die Berechnungen in [4-14] stützen sich auf statistische Angaben der Kohlenwirtschaft, des statistischen Bundesamtes und der Gesellschaft für Konsumforschung (GfK). Dabei wurden von der GfK 14.000 Haushalte befragt und die Ergebnisse auf Deutschland hochgerechnet.

Die Ermittlung des Anlagenbestandes in [4-17] für das Jahr 2000 berechnet sich aus Angaben des Statistischen Landesamtes, basierend auf einer „1 %-Gebäude- und Wohnungsstichprobe 1993“ in den alten Bundesländern sowie einer Gebäude- und Wohnungszählung in den neuen Bundesländern, Zahlen des Schornsteinfegerhandwerkes, Abschätzungen der Firma Rheinbraun und eigenen Abschätzungen und Berechnungen.

Nach [4-14] ist der Markt der traditionellen Festbrennstoff-Heizgeräte (Kohle-/Dauerbrandöfen, Kohleherde, Kohle-Badeöfen, Kohle-Zentral-/Etagenheizungen und in den neuen Bundesländern auch die Kachelöfen) seit vielen Jahren rückläufig. Dagegen nimmt der Bestand an modernen Festbrennstoff-Heizgeräten (Kachel-/Kaminöfen, Heizkamine, offene Kamine) um ca. 250.000 – 300.000 Stück pro Jahr zu. Bei dieser gegenläufigen Entwicklung scheint sich der Gerätebestand bei etwa 14 Mio. Stück zu stabilisieren.

Der Anteil der modernen Kleinf Feuerungsanlagen, die über eine fortschrittliche Verbrennungstechnik mit niedrigeren Emissionen verfügen, nimmt zu. Demzufolge müsste auch die Summe der Emissionen aus Kleinf Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe zurückgehen.

Ein Grund für die Zunahme an modernen Kleinf Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe ist auch auf die momentane schlechte konjunkturelle Wirtschaftslage in Deutschland sowie hohe Preise bei Öl und Gas zurückzuführen: private Haushalte mit Kleinf Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe können bei den Brennstoffen sparen. In diesen Kleinf Feuerungsanlagen wird zu über 90 % Holz [4-14] verbrannt, welches entweder sehr günstig oder sogar kostenlos (z. B. Holz aus Privatwald) zur Verfügung steht.

Ein weiterer Grund für die Zunahme der modernen Kleinf Feuerungsanlagen ist auch in einem gestiegenen Umweltbewusstsein zu sehen. Der Brennstoff Holz ist mittlerweile weg von seinem „Schmutzimage“ und leistet als CO<sub>2</sub>-neutraler Brennstoff einen wichtigen Betrag zum Klimaschutz.

Der Bestand an Kleinfeuerungsanlagen im Sektor der Kleinverbraucher (GDH) wurde aus [4-17] bzw. [4-1] übernommen und auf das Jahr 2003 hochgerechnet [4-28].

#### 4.1.2 Struktur des Brennstoffeinsatzes

In diesem Kapitel wird der emissionsrelevante Brennstoffeinsatz in Kleinfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe im Geltungsbereich der 1. BImSchV für das Jahr 2003 verdeutlicht.

Tab. 4.3: Endenergieverbrauch 2003 in Deutschland

Endenergieverbrauch 2003 in Deutschland - Angaben in TJ				
Energieträger		HH und GHD	HH	GHD
Steinkohlen		12.000	6.000	6.000
Steinkohlenkoks		6.000	3.000	3.000
Steinkohlenbriketts		3.000	3.000	0
Braunkohlenbriketts	insgesamt	18.000	18.000	0
davon:	Rheinisches Revier	9.018	9.018	0
	Lausitzer Revier	6.534	6.534	0
	Mitteldeutsches Revier	810	810	0
	Importe	1.638	1.638	0
Brennholz	insgesamt	228.561	190.355	38.206
hiervon:	naturbelassenes Holz	199.344	190.355	8.989
	Resthölzer	29.217	0	29.217
<b>Summen</b>		<b>267.561</b>	<b>220.355</b>	<b>47.206</b>

Quellen: [1-6], [4-19], [4-16], [4-28], eigene Berechnungen

Tabelle 4.3 zeigt den Endenergieverbrauch im Jahr 2003 in Deutschland, aufgeteilt auf die unterschiedlichen Energieträger.

Die Darstellung des Endenergieverbrauchs, aufgeteilt auf die einzelnen Energieträger, ist aufgrund der Datenlage ebenfalls schwierig.

Ein Teil der für die weiteren Berechnungen benötigten Endenergieverbräuche konnte aus Angaben der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AG EB) [1-6] übernommen werden. Doch hier gibt es weder für Braunkohle eine Unterteilung auf die einzelnen Reviere und Importmengen, noch erfolgt eine Unterteilung in die jeweiligen Leistungs-

klassen. Der Brennstoff Holz ist in den Tabellen der Arbeitsgemeinschaft nicht explizit erwähnt, sondern ist Bestandteil der „übrigen feste Brennstoffe“, die auch noch Solarthermie, Wärmepumpen u. a. enthalten. Weiterhin fehlt für die Holzbrennstoffe eine Aufschlüsselung in naturbelassenes Holz und Restholz. Alle diese Angaben sind jedoch für die weiteren Berechnungen erforderlich.

Etliche Literaturangaben, insbesondere zur Erfassung des Holzverbrauches ([4-2],[4-3], [4-4], [4-5], [4-6], [4-7], [4-8], [4-9], [4-10], [4-11], [4-12], [4-13], [1-7], [4-15], [4-18], [4-20], [4-21], [4-22], [4-23], [4-24], [4-25]), konnten nur teilweise genutzt werden, da die benötigten Daten entweder nicht vorhanden waren oder der notwendige Detaillierungsgrad fehlte.

Umfangreiche und auch vergleichende Untersuchungen zum Energieverbrauch der Sektoren private Haushalte und Kleinverbraucher sind in [4-16] dargestellt. Doch auch hier wurde das Problem der statistischen Erfassungsdefizite sowohl im Bereich der Anlagenzahlen als auch beim Brennstoffeinsatz erkannt.

Es ist davon auszugehen, dass ein großer Teil der energetisch genutzten Holzmenge in Deutschland [4-14] über Selbstversorgung abgedeckt und deshalb nicht statistisch erfasst wird. Beispielsweise beträgt der Anteil des Privatwaldes am gesamten deutschen Wald ca. 43 % [4-26].

Stein- und Braunkohlen-Brennstoffe dagegen werden über den Brennstoffhandel vertrieben und sind somit statistisch gut erfassbar, doch besonders im ländlichen Raum gibt es viele Holz-Feuerstätten in denen privates Holz (Holz aus dem eigenen Privatwald oder privat gekauftes Holz) verbrannt wird.

So ist es auch zu erklären, dass der Endenergieverbrauch der Holzbrennstoffe in verschiedenen Untersuchungen teilweise um den Faktor 10 und mehr auseinander liegt (z.B. [1-6], [4-17]).

In einigen Literaturstellen ist vom technischen Potenzial die Rede. Dieses ist jedoch um den Faktor 2 - 3 [4-20] größer als die tatsächlich eingesetzten Mengen.

Mit Hilfe des Bestandes und der Struktur der Kleinf Feuerungsanlagen sowie dem Endenergieverbrauch können nun die gerätespezifischen Endenergieverbräuche berechnet werden.

#### 4.1.3 Energieeinsatz bei verschiedenen Verbrauchern

Der Endenergieverbrauch lässt sich auf die jeweiligen Verbraucher und Einsatzstoffe aufteilen. Der Sektor Kleinverbraucher kann dabei noch in Landwirtschaft/Gartenbau und Holzgewerbe unterteilt werden. Hierbei wird angenommen, dass im Bereich Landwirtschaft/Gartenbau nur naturbelassenes Holz und im Bereich Holzgewerbe nur Resthölzer eingesetzt werden [4-17]. Die Heizkessel mit einer Nennwärmeleistung kleiner 50 kW werden dem Bereich Landwirtschaft, diejenigen größer 50 kW den Bereich Holzgewerbe zugeordnet.

Tab. 4.4: Vergleich des Endenergieverbrauchs bei verschiedenen Verbrauchern

Verbraucher	Endenergieverbrauch (EEV)		davon Kohle		davon Holz	
	[TJ]	%	[TJ]	%	[TJ]	%
Haushalte	220.355	82,4	30.000	76,9	190.355	<b>83,3</b>
Landwirtschaft, Gartenbau	17.989	6,7	9.000	23,1	8.989	<b>3,9</b>
Holzgewerbe	29.217	10,9	0	0	29.217	<b>12,8</b>
Summe	267.561	<b>100</b>	39.000	<b>100</b>	228.561	<b>100</b>

Tabelle 4.4 zeigt, dass die in Kleinfeuerungsanlagen eingesetzten Brennstoffe Kohle und Holz überwiegend (77 % bei der Kohle und 83 % beim Holz) in den Haushalten verbrannt werden. Im holzverarbeitenden Gewerbe sind dies knapp 13 % und in der Landwirtschaft lediglich noch knapp 4 %.

Bei der Kohle ergibt sich ein anderes Bild: 23 % der Kohle werden in der Landwirtschaft verbrannt. Im Holzgewerbe wird keine Kohle verbrannt.

#### Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe in Haushalten

Bestand und der Energieverbrauch der Feuerungsanlagen in den Haushalten, aufgeteilt auf die Art der Feuerung und die Energieträger Kohle und Holz, sind in Tabelle 4.5 ([4-14], [4-28]) dargestellt.

Tab. 4.5: Bestand und Energieverbrauch von Kleinfeuerungen in Haushalten 2003

Art der Feuerung	Leistung [kW]		Bestand	EEV		Kohle		Holz	
	Bereich	Mittl.*		[PJ]	%	[PJ]	%	[PJ]	%
Heizkessel (Zentral- und Etagenheizungen)	4 – 25	19	301.203	22,0	10,0	1,19	4,0	20,8	<b>10,9</b>
	> 25 - 50	33	200.982	25,9	11,8	0,65	2,2	25,3	<b>13,3</b>
	> 50	55	42.667	9,2	4,2	0,26	0,9	9,0	<b>4,7</b>
<b>Summe Kessel</b>			<b>544.852</b>	<b>57,1</b>		<b>2,1</b>		<b>55,1</b>	
Dauerbrandöfen	< 15	5,7	1.986.167	10,1	4,6	9,72	32,4	0,4	<b>0,2</b>
Kamine	< 15	7,5	3.022.243	31,0	14,1	3,57	11,9	27,4	<b>14,4</b>
Kaminöfen	< 15	7,5	3.018.370	37,5	17,0	3,49	11,6	34,0	<b>17,9</b>
Kachelöfen	< 15	7,9	3.920.928	80,2	36,4	10,35	34,5	69,9	<b>36,7</b>
Badeöfen	< 15	5	121.488	0,3	0,1	0,06	0,2	0,2	<b>0,1</b>
Herde	< 15	5	1.353.358	4,1	1,9	0,72	2,4	3,4	<b>1,8</b>
Summe			13.967.407	277,4		32,11		190,4	

\* Mittlere Leistung der Feuerungsanlagen

In Tabelle 4.5 ist ersichtlich, dass bei festen Brennstoffen Kohle mit knapp 14 % zum Gesamtenergieverbrauch beiträgt, wobei Kohle im Wesentlichen in Dauerbrand- und Kachelöfen verfeuert wird.

Holz wird überwiegend in Kachelöfen (36,7 %) und Heizkesseln (28,9 %) eingesetzt. Kamine und Kaminöfen haben einen Anteil von jeweils über 15 %.

Badeöfen und Herde spielen beim Endenergieverbrauch (EEV) sowohl beim Holz als auch bei der Kohle praktisch keine Rolle mehr.

Gegenüber dem Jahr 2000 hat sich die mittlere Nennwärmeleistung nicht verändert [4-29]. Zwar ist der Holzverbrauch insgesamt deutlich angestiegen, doch dies ist in erster Linie auf eine vermehrte Nutzung der Kleinfeuerungsanlagen (gestiegene Zahl an Vollbenutzungsstunden) zurückzuführen.

### Kleinf Feuerungsanlagen im Sektor Handel, Dienstleistungen, Gewerbe

Bei den Feuerungsanlagen, die nicht den privaten Haushalten zugeordnet werden, wird zwischen den Feuerungen im Holzverarbeitenden Gewerbe, bei denen der Brennstoff aus der Produktion stammt (s. Tab. 4.7), und den Feuerungen, in denen Brennholz oder Kohle eingesetzt wird, unterschieden. Der Bestand und der Endenergieverbrauch letzterer Anlagen ist in Tabelle 4.6 aufgezeigt.

Bei den darin aufgeführten Anlagen handelt es sich um Kleinf Feuerungen im sonstigen Gewerbe und in öffentlichen Einrichtungen, den sog. Kleinanlagen bzw. dem Sektor HDG (Handel, Dienstleistung, Gewerbe).

Tab. 4.6: Bestand und Energieverbrauch von Kleinf Feuerungsanlagen im Sektor Handel, Dienstleistung, Gewerbe in 2003

Art der Feuerung	Leistung [kW]		Bestand (2003)	EEV		Kohle		Holz	
	Bereich	Mittl.		[TJ]	%	[TJ]	%	[TJ]	%
Heizkessel (Zentral- und Etagenheizungen)	4 – 25	24	2.685	248	0,5	-	-	248	<b>0,6</b>
	> 25 - 50	44	9.320	1.715	3,6	41	0,5	1.674	<b>4,4</b>
	> 50	134	31.060	41.299	87,5	8.814	97,9	32.485*	<b>85,0</b>
Dauerbrandöfen	< 15	5,8	23.833	144	0,03	144	1,6	0	<b>0</b>
Kamine	< 15	7,5	27.757	277	0,6	-	-	277	<b>0,7</b>
Kaminöfen	< 15	7,5	41.630	382	0,8	-	-	382	<b>1,0</b>
Kachelöfen	< 15	8,5	129.072	2.646	5,6	-	-	2.646	<b>6,9</b>
Badeöfen	< 15	5	8.512	18	0,04	-	-	18	<b>0,05</b>
Herde	< 15	5	146.642	475	1,0	-	-	475	<b>1,2</b>
Summe			420.510	47.206		8.999		38.205	

\*: einschl. Restholz

Tabelle 4.6 zeigt, dass bei den Kohlefeuerungen die großen Heizkessel ab 50 kW mit über 97 % des Endenergieverbrauchs die entscheidende Rolle spielen.

Bei den Holzfeuerungen werden 90 % des Holzes in Heizkesseln, hauptsächlich in Kesseln > 50 kW, verfeuert.

Bei den Einzelöfen sind die Kachelöfen mit ca. 7 % des Holzeinsatzes beachtenswert.

Wegen der geringen Nutzungsdauer durch den nur gelegentlichen Betrieb tragen offene Kamine und Kaminöfen nur in geringem Maße zum Gesamtenergieverbrauch bei Holzfeuerungen bei.

### Kleinf Feuerungsanlagen im Holzverarbeitenden Gewerbe

In den Kleinf Feuerungsanlagen des Holzverarbeitenden Gewerbes dürfen in Feuerungsanlagen > 50 kW neben naturbelassenem Holz auch

- gestrichenes, lackiertes oder beschichtetes Holz sowie daraus anfallende Reste, soweit keine Holzschutzmittel aufgetragen oder enthalten sind (§ 3 (1) Nr. 6) und
- Sperrholz, Spanplatten, Faserplatten oder sonst verleimtes Holz sowie daraus anfallende Reste (§ 3 (1) Nr. 7) eingesetzt werden, soweit keine Holzschutzmittel aufgetragen oder infolge einer Behandlung enthalten sind und Beschichtungen keine halogenorganischen Verbindungen oder Schwermetalle enthalten.

Diese Anlagen, unterschieden nach der Art der Feuerung, werden in Tabelle 4.7 aufgezeigt (vgl. auch Kap. 5).

Bei diesen Holzfeuerungen, in denen sowohl naturbelassene Hölzer als auch Holzwerkstoffe (Spanplatten, Leimholz, lackiertes Holz) eingesetzt werden, wird etwa die Hälfte des Holzes manuell als Stückholz eingesetzt (→ Schachtfeuerung).

Tab. 4.7: Bestand und Energieverbrauch der Kleinf Feuerungsanlagen im Holzverarbeitenden Gewerbe

Art der Feuerung	Leistung [kW]		Bestand (2003)	EEV		davon naturbel. Holz		davon Holzwerkstoffe	
	Bereich	Mittel		[TJ]	%	[TJ]	%	[TJ]	%
Schachtfeuerungen	> 50	78	18.424	14.188	48,6	11.064	48,5	3.121	<b>48,7</b>
Unterschubfeuerungen	> 50	149	2.792	6.105	20,9	4.770	20,9	1.347	<b>21,0</b>
Vorofenfeuerungen	> 50	108	2.792	4.428	15,2	3.465	15,2	971	<b>15,1</b>
Einblasfeuerungen	> 50	206	3.909	4.494	15,4	3.507	15,4	971	<b>15,1</b>
Summe			27.917*	29.216		22.807		6.410	

\*: davon 9.492 mechanisch beschickt

Die andere Hälfte des Holzes wird in mechanisch beschickten Feuerungsanlagen eingesetzt, die eine mittlere Nennwärmeleistung über 100 kW besitzen.

## **4.2 Ermittlung der Emissionsfaktoren für die Berechnung des Emissionsaufkommens**

### **Auswahl der Literaturstellen**

Bei der Auswahl der Literaturstellen wurde darauf geachtet, dass diese möglichst die Einzelmessungen (Originaldaten) mit direkter Zuordnung zu einem bestimmten Ofen bzw. Brennstoff und Betriebszustand enthielten.

Bei zusammenfassenden Berichten sind diese Anforderungen oft nicht erfüllt, zudem ergibt sich das Problem, dass identische Abbrandexperimente in unterschiedlichen Zusammenstellungen mehrfach vorkommen können und dann bei der Zusammenfassung der Emissionsfaktoren überbewertet werden.

Zur Ermittlung der Emissionsfaktoren wurden daher aus der Gesamtmenge 18 Veröffentlichungen ausgewählt, bei denen krebserzeugende und besonders gesundheits-schädliche Emissionen ermittelt wurden und bei denen die Messergebnisse eindeutig bestimmten Anlagen bzw. Brennstoffen zugeordnet werden konnten.

### **Erfassung der Messwerte in einer Datenbank**

Zur Erfassung der gefundenen Messwerte und Emissionsfaktoren wurde eine relationale Datenbank entwickelt, um

- die Daten komfortabel und strukturiert mit den notwendigen Randinformationen erfassen zu können,
- die Daten bestimmten Ofen- und Brennstoffkategorien so zuordnen zu können, dass diese mit dem entsprechend gegliederten Energieverbrauch in Einklang gebracht werden können,
- Plausibilisierung und Umrechnungen auf einheitliche Bezugswerte durchführen zu können und
- flexible Auswertungen erstellen zu können

Die Datenbank besteht aus den vier Ebenen Literatur (Hinweise zur Fundstelle), Anlage, Betriebszustand und Messwerte.

### Datenbankebene „Anlage“

In der Ebene Anlage werden die technischen Daten zur Anlage (Art, Typ, Nennleistung), Angaben zum Hersteller sowie zu evtl. vorhandenen Abgasreinigungstechnik erfasst.

Tab. 4.8: Datenbankebene „Anlage“: Ofenarten und Feuerungstechnik

Ofenarten	Feuerungstechnik
Heizkessel 4 - 25 kW	Rost Durch- und oberer Abbrand
Heizkessel >25-50 kW	Rost unterer und seitlicher Abbrand
Heizkessel > 50kW - < 1MW	Unterschubfeuerung
Dauerbrandofen	Quereinschubfeuerung
Kachelofen	Abwurfteuerung
Kaminofen	Einblasfeuerung
offener Kamin, auch mit Heizeinsatz (Chemineéofen)	
Badeofen	
Herd	

### Datenbankebene „Betriebszustand“

In dieser Ebene werden die Randbedingungen der einzelnen Abbrandversuche erfasst, z.B. Angaben zum Brennstoff, zur Laststufe bzw. Leistung sowie Abgasrandparameter (Volumenstrom, Temperatur, O<sub>2</sub>-Gehalt).

Tab. 4.9: Datenbankebene „Betriebszustand“: Brennstoffe

Brennstoffe	Brennstoffform	Brennstofffeuchte
Koks (aus Steinkohle)	Stückholz, Scheitholz	Absolut trocken
Braunkohle	Hackschnitzel	lufttrocken
Steinkohle	Pellets	waldfeucht
Holz	Briketts	
Getreide	Späne	
Altholz, Verschnitt von Holz und Spanplatten	Staub	
Holz mit Müll (Papier, Kunststoff)	kleine Stücke (Kohle, Koks) und (Eier-) Briketts	

### Datenbankebene „Messwert“

Die Messwerte werden einheitlich auf 13 % O<sub>2</sub> bezogen erfasst, daneben können zur Plausibilisierung auch die auf andere Sauerstoffkonzentrationen bezogenen Werte

gespeichert werden. Auch die Emissionsfaktoren können als Originalwerte eingegeben oder über ein Berechnungsprogramm über die Massenströme und den Energieverbrauch ermittelt werden.

Diese Emissionsfaktoren werden automatisiert in eine einheitliche Dimension (kg/TJ bzw. mg/TJ bei PCB und PCDD/F) gebracht, wobei die Originalwerte erhalten bleiben. Alternativ können die Emissionsfaktoren auch über normierte (d.h. z.B. auf 13 Vol.-% O<sub>2</sub> bezogene) Massenkonzentrationen mittels brennstoffspezifischer Umrechnungsfaktoren bestimmt werden. Falls sich die nach beiden genannten Methoden ermittelten Emissionsfaktoren erheblich unterscheiden, kann die Methode für die automatische Berechnung manuell vorgegeben werden.

Bei den PAK-Emissionen wurde, sofern in der Literaturstelle die Einzelkomponenten aufgeführt waren, neben den 16 EPA-PAK die Leitkomponente Benzo(a)pyren sowie die Summe der 4 UN-ECE-PAK berechnet (s. Kap. 3.1), um die Emissionen der PAK besser vergleichen bzw. beurteilen zu können.

### **Bewertung der Messergebnisse**

Die einzelnen Messergebnisse wurden bzgl. der Datenqualität grob klassifiziert, soweit dies aus den Literaturstellen abgeleitet werden konnte. Unplausible Messwerte wurden für die Weiterverarbeitung nicht berücksichtigt, dies wurde in der Datenbank dokumentiert. Bei der Vielzahl der möglichen Kombinationen Ofenart / Betriebszustand ergaben sich in vielen Fällen nur wenige Messwerte mit starker Streuung. Um eine Überbewertung einzelner Messwerte zu vermeiden, wurde bei der Zusammenfassung der Daten anstelle des Mittelwerts der Medianwert verwendet (s. Kap. 10.8).

### **Probleme bei der Vergleichbarkeit von Messungen**

Ein Problem stellt die Vergleichbarkeit von Messungen, insbesondere bei manuell beschickten Anlagen dar. Nach der 1. BImSchV wird 5 Minuten nach dem Auflegen des Brennstoffes über eine Dauer von 15 Minuten gemessen. Für die Ermittlung von Emissionsfaktoren ist eine Messung über die gesamte Abbranddauer erforderlich, wenn für die Bestimmung der Feuerungswärmeleistung die Masse des eingebrachten Brennstoffes verwendet wird.

In der Anbrandphase bei manuell beschickten Anlagen ist der Abgasvolumenstrom in der Regel höher als in der Ausbrandphase. Wird mit gemittelten Werten gerechnet (mittlere Konzentration und Abgasvolumenstrom), so wird die emissionsrelevante Anbrandphase unterbewertet.

### 4.3 Berechnung des Ist-Zustandes der Emissionen

Die Berechnung des Emissionsaufkommens erfolgte analog dem Berechnungsschema in [4-17] bzw. [4-1], welches in Bild 4.1 zusammenfassend dargestellt ist.

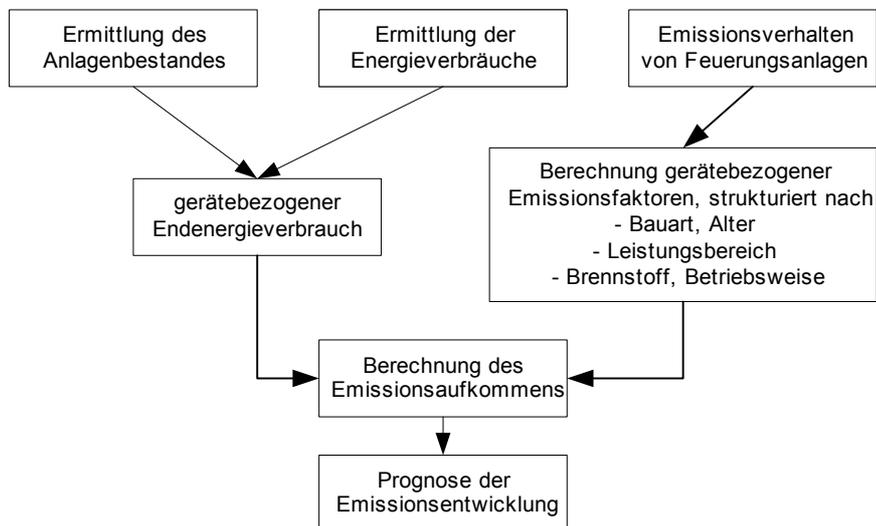


Bild 4.1: Berechnung der Emissionsfaktoren und des Emissionsaufkommens

Die Grundlage der Berechnung bilden drei Datensätze, die zunächst zu ermitteln waren: die Anlagenbestände (siehe Kap. 4.1.1), die Energieverbräuche (siehe Kap. 4.1.2) sowie das Emissionsverhalten der Feuerungsanlagen. Aus diesen Datensätzen wurden die gerätespezifischen Emissionsfaktoren und Energieverbräuche berechnet, sie sind im Anhang 10.4.2 dargestellt.

Mit Hilfe dieser gerätespezifischen Daten wurde das Emissionsaufkommen bestimmt.

### Emissionen für das Jahr 2003

Wegen fehlender bzw. nicht plausibler Emissionsfaktoren für Benzol für Kamine und Kaminöfen konnten für diese Anlagenarten keine Emissionen berechnet werden (s.

Tab. 4.11), die tatsächlichen Emissionen bei den Haushalten und Kleinverbrauchern dürften daher um etwa den Faktor 1,5 höher liegen als in Tabelle 4.10 angegeben.

Für Holzbacköfen gibt es nur wenige Messungen, insbesondere zu krebserzeugenden und besonders gesundheitsschädlichen Luftschadstoffen. Der Anlagenbestand und der Energieverbrauch von Holzbacköfen konnte nur grob abgeschätzt werden. Die Schätzungen in Kapitel 3.3.5 für die Emissionen aus Holzbacköfen ergaben je nach Schadstoffart einen Anteil von etwa 0,5 bis 4 % bezogen auf die Emissionen aller Kleinfeuerungen für Holz. In den Berechnungen der Emissionen für das Jahr 2003 (Tabelle 4.10) wurden die Holzbacköfen nicht berücksichtigt.

Das Ergebnis der Berechnung der Emissionen ist in Tabelle 4.10 dargestellt.

Aus den vorliegenden Daten können folgende Schlüsse gezogen werden:

- Entsprechend dem Energieeinsatz stammen um 90 % der Emissionen aus der Verbrennung von Holz, bei den PAK und Chlorwasserstoff trägt die Verbrennung von Kohle zu 20 % zu den Emissionen bei.
- Bei der Verbrennung von Holz und Holzwerkstoffen bei Kleinverbrauchern sind die Emissionen von Chlorwasserstoff und PCDD/F vergleichsweise höher als bei den Haushalten, was auf chlorhaltige Einsatzmaterialien zurückgeführt werden kann.
- Die Emissionen der 16 EPA-PAK, der Partikel und des Benzols sind wegen der besseren Verbrennungsbedingungen infolge höherer Feuerungswärmeleistungen bei den Kleinverbrauchern niedriger als bei den Haushalten.

Da der Einsatz von Brennholz in Haushalten über 70 % am Energieeinsatz aller Kleinfeuerungsanlagen für Festbrennstoffe ausmacht, sind in Tabelle 4.11 nur die Emissionen aus Holzfeuerungen in Haushalten aufgeführt.

Auffällig sind die geringen Partikelemissionen aus Heizkesseln zwischen 4 und 25 kW, möglicherweise sind hier die in diesem Bereich eingesetzten Pelletsfeuerungen etwas überbewertet.

Bei den PCDD/F stammen die wesentlichen Emissionen aus Kaminöfen, den kleinen (4 – 25 kW) und den großen (> 50 kW) Heizkesseln. Bei den Heizkesseln ist sehr gut die Abnahme der Benzolemissionen von den kleinen zu den großen Heizkesseln zu beobachten.

## Berechnung des Ist-Zustandes der Emissionen

Für Benzol standen konnten wegen fehlender Emissionsfaktoren die Emissionen für Dauerbrand- und Kaminöfen sowie für Kamine nicht berechnet werden.

Tab. 4.10: Ergebnis der Emissionsberechnung für das Jahr 2003

Brennstoff	Bereich	Leistungsbereich	Endenergieverbrauch	Benzol	Benzo-(a)pyren	PAK (16)	PAK (4)	PCDD/F	HCl	Partikel
		kW	TJ	t	t	t	t	g	t	t
Brennholz	naturbelassenes Holz	> 4	190.355	1.184	4,0	539	8,5	10,0	130	22.743
	naturbelassenes Holz und Holzwerkstoffe	> 4	38.206	76	1,0	27	10,1	13,1	114	2.321
	<b>Summe Haushalte + Kleinverbraucher</b>		<b>228.560</b>	<b>1.260</b>	<b>5,0</b>	<b>565</b>	<b>18,7</b>	<b>23,1</b>	<b>244</b>	<b>25.064</b>
Braunkohlen	Briketts	> 4	17.999	14	0,3	95	0,2	0,8	62	1.269
	Kleinverbraucher	> 4								
	<b>Summe Haushalte + Kleinverbraucher</b>	<b>&gt; 4</b>	<b>17.999</b>	<b>14</b>	<b>0,3</b>	<b>95</b>	<b>0,2</b>	<b>0,8</b>	<b>62</b>	<b>1.269</b>
Steinkohlenkoks	Haushalte	> 4	3.000		0,005	0,4	0,01	0,5		48
	Kleinverbraucher	> 4	3.000		0,0001	0,01	0,0005	0,01		50
	<b>Summe Haushalte + Kleinverbraucher</b>	<b>&gt; 4</b>	<b>5.999</b>		<b>0,0</b>	<b>0,4</b>	<b>0,0</b>	<b>0,5</b>		<b>98</b>
Steinkohlen	Steinkohlen und	> 4	9.000		0,3	17	1,6	2,5		934
	Steinkohlenbriketts	> 4	6.000		0,003	0,2	0,02	0,1		111
	<b>Summe Haushalte + Kleinverbraucher</b>	<b>&gt; 4</b>	<b>15.000</b>		<b>0,3</b>	<b>17</b>	<b>1,7</b>	<b>2,6</b>		<b>1.045</b>
	<b>Haushalte + Kleinverbraucher insgesamt</b>	<b>&gt; 4</b>	<b>267.559</b>	<b>1.274</b>	<b>5,7</b>	<b>678</b>	<b>20,5</b>	<b>27,0</b>	<b>306</b>	<b>27.476</b>

Tab. 4.11: Emissionen aus Holzfeuerungen in Haushalten in 2003

Emissionen	Haushalte		Endenergieverbrauch TJ	Anteil	Benzol t	Benzo(a)- pyren t	PAK (16) t	PAK (4) t	PCDD/F g	Deutschland	
	Leistungsbereich kW									HCl t	Partikel t
Dauerbrandöfen	< 15		384	0,2 %	-	0,004	0,4	0,01	0,02	-	27
Kachelöfen	< 15		69.867	37 %	605,1	0,8	198,8	2,3	0,6	28,5	7.836
Kamine	< 15		27.439	14 %	-	0,5	77,8	-	0,2	16,5	4.377
Kaminöfen	< 15		34.002	18 %	-	1,1	60,5	1,9	3,0	-	3.894
Heizkessel	4 - 25		20.812	11 %	406,2	0,8	131,7	1,8	1,5	-	1.703
	> 25 - 50		25.287	13 %	161,7	0,9	66,5	2,5	0,5	80,8	4.437
	> 50		8.951	5 %	10,6	-	2,2	0,01	3,8	4,3	191
Badeöfen	< 15		237	0,1 %	-	-	0,02	-	0,01	-	18
Herde	< 15		3.375	2 %	-	-	0,9	-	0,3	-	260
<b>Summe</b>	<b>&gt; 4</b>		<b>190.355</b>	<b>100 %</b>	<b>1.183,6</b>	<b>4,0</b>	<b>538,8</b>	<b>8,5</b>	<b>10,0</b>	<b>130,1</b>	<b>22.743</b>

### Abschätzung der Emissionen für polychlorierte Biphenyle (PCB)

Da die Emissionsfaktoren für PCB für Berechnungen nicht ausreichend sind, können die Emissionen entsprechend Bild 3.7 aus Kap. 3.1.4 abgeschätzt werden. Aus den Gesamtemissionen der PCDD/F von ca. 27 g i-TE ergeben sich die Emissionen der 12 WHO-PCB zu etwa 1,5 g i-TE.

#### 4.4 Prognose der Emissionsentwicklung

##### 4.4.1 Entwicklung des Brennstoffeinsatzes

Die Entwicklung des Endenergieverbrauchs wurde nach den Erhebungen von Prognos [4-32] abgeschätzt. Zwischen 2003 und 2020 wurde eine Abnahme des Verbrauchs an Steinkohle von 70 % und bei Braunkohlebriketts um 60 % sowie eine Zunahme von 20 % bei Brennholz (23 % bei den Haushalten und 7 % bei den Kleinverbrauchern) zugrunde gelegt. Für den Endenergieverbrauch für alle Festbrennstoffe ergibt sich damit eine Zunahme um 7,6 % (Tab. 4.12).

Tab. 4.12: Stand und Entwicklung des Endenergieverbrauchs

Endenergieverbrauch (Prognose)	Endenergieverbrauch in TJ in den Jahren 2003 bis 2020 Haushalte und Kleinverbraucher in Deutschland				
	2003	2005	2010	2015	2020
Steinkohlen und -briketts	15.000	13.314	9.568	6.766	4.498
Steinkohlenkoks	6.000	5.245	3.642	2.472	1.543
Braunkohlenbriketts	18.000	15.993	12.008	9.625	7.370
Brennholz	228.561	236.876	256.301	263.328	274.550
<b>Summe</b>	<b>267.561</b>	<b>271.429</b>	<b>281.520</b>	<b>282.192</b>	<b>287.961</b>

Tab. 4.13: Stand und Entwicklung der Emissionen ohne Einfluss von Minderungs-  
-maßnahmen

Emissionen (Prognose 1)	Emissionsaufkommen in den Jahren 2003 bis 2020 Haushalte und Kleinverbraucher in Deutschland				
	2003	2005	2010	2015	2020
Benzol in t	1.274	1.321	1.430	1.472	1.540
Benzo(a)pyren in t	5,7	5,8	6,0	6,0	6,2
PAK (16) in t	678	687	711	715	731
PAK (4) in t	20	21	22	21	22
PCDD/F in g	27	27	28	27	27
HCl in t	306	307	310	307	307
Partikel in t	26.207	26.819	28.294	28.677	29.588

Ohne Minderungsmaßnahmen sind für die betrachteten Stoffe geringe bis starke Zunahmen zu erwarten (Tab. 4.13).

Die Emissionen von Chlorwasserstoff und PCDD/F stammen zum großen Teil aus den Kohlefeuerungen und den Kleinverbrauchern. Durch die starke Abnahme beim Kohleverbrauch und die moderate Zunahme von 7 % beim Einsatz von Holzbrennstoffen bei den Kleinverbrauchern verändern sich insgesamt die diese Emissionen zwischen 2003 und 2020 nur wenig.

Bei den PAK steigen die Emissionen um 6 – 9 % etwa wie beim Energieaufkommen, d.h. die mittleren Emissionsfaktoren für PAK unterscheiden sich bei Holz- und Kohlefeuerungen nicht wesentlich.

Die Emissionen von Benzol stammen hauptsächlich aus den Holzfeuerungen und nehmen im gleichen Maß wie der Endenergieverbrauch von Holz zwischen 2003 und 2020 um 20 % zu.

Bei den Emissionen von Partikeln liegt die Steigerung im Mittelfeld, zwischen 2003 und 2010 ist eine Zunahme von etwa 13 % zu erwarten.

#### 4.4.2 Einfluss der Emissionsminderungsmaßnahmen

Der Einfluss von Emissionsminderungsmaßnahmen wurde nur für Holzfeuerungen berechnet, da bei Kohlefeuerungen kein technischer Fortschritt zu erwarten ist. Bei den Holzfeuerungen wurde eine pauschale Minderung der Emissionen um 40 % innerhalb des Zeitraums von 2003 – 2020 angenommen.

Tab. 4.14: Stand und Entwicklung der Emissionen unter Berücksichtigung künftiger Minderungsmaßnahmen

<b>Emissionen (Prognose 2)</b>	<b>Emissionsaufkommen in den Jahren 2003 bis 2020 Haushalte und Kleinverbraucher in Deutschland</b>				
	<b>2003</b>	<b>2005</b>	<b>2010</b>	<b>2015</b>	<b>2020</b>
Benzol in t	1.274	1.259	1.196	1.058	926
Benzo(a)pyren in t	5,7	5,5	5,1	4,4	3,8
PAK (16) in t	678	659	606	529	455
PAK (4) in t	20	20	18	16	13
PCDD/F in g	27	26	23	20	17
HCl in t	306	295	266	230	194
Partikel in t	26.207	25.657	23.882	20.890	18.049

Mit Abnahmen zwischen 27 % bei den Emissionen von Benzol und 39 % bei den Emissionen von PCDD/F fallen die zu erwartenden Minderungseffekte eher moderat

## Prognose der Emissionsentwicklung

aus (Tab. 4.14). Die Entwicklung der Emissionen für die verschiedenen Szenarien ist beispielhaft für Benzo(a)pyren und Benzol in Bild 4.2 aufgezeigt:

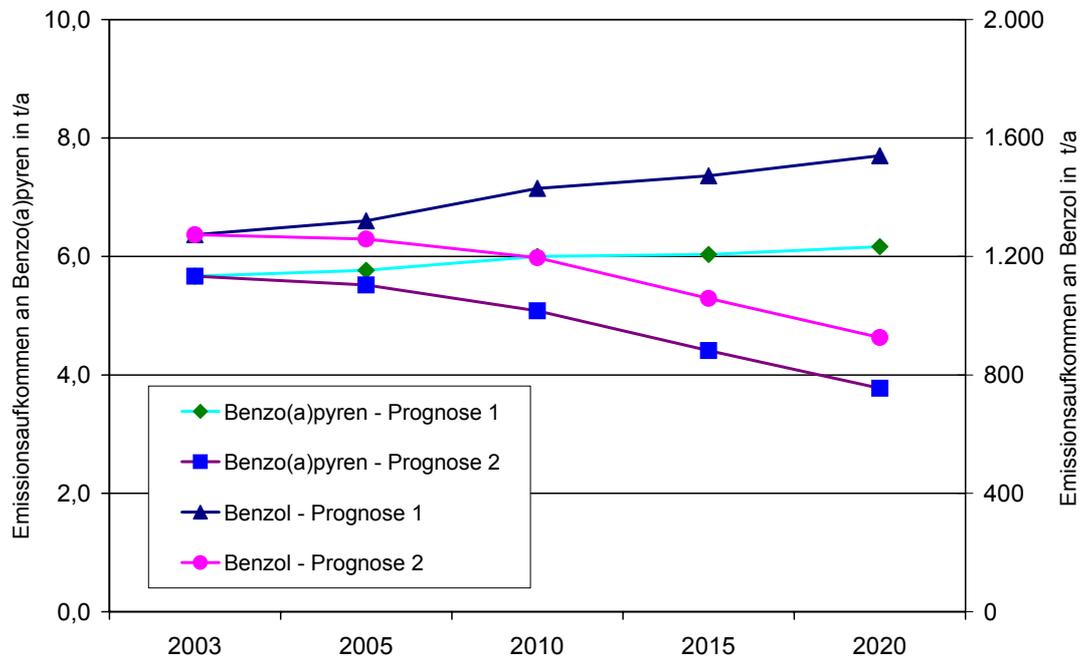


Bild 4.2: Entwicklung der Emissionen von Benzo(a)pyren und Benzol zwischen 2003 und 2020 ohne und mit Einfluss künftiger Minderungsmaßnahmen.

Bewertung der Emissionen aus Kleinfeuerungsanlagen für Festbrennstoffe im  
Vergleich zu den Emissionen aus anderen Quellgruppen

**4.5 Bewertung der Emissionen aus Kleinfeuerungsanlagen für Festbrennstoffe im Vergleich zu den Emissionen aus anderen Quellgruppen**

**Feinstaubemissionen:**

In Tabelle 4.15 sind die Ergebnisse der Emissionsermittlung aus Kap. 4.4 den aktuellen TREMOD-Ergebnissen des ifeu [4-33] für die Abgasemissionen des Straßenverkehrs gegenübergestellt:

Tab. 4.15: Vergleich der Emissionsschätzungen und Prognosen für Partikel [kt/a] für die Quellgruppen Hausbrand und Straßenverkehr (Abgasemissionen)

	2003	2005	2010	2015	2020
Kleinfeuerungsanlagen ohne Minderungsmaßnahmen (Prognose 1)	26,2	26,8	28,3	28,7	29,6
Kleinfeuerungsanlagen mit Minderungsmaßnahmen (Prognose 2)	26,2	25,7	23,9	20,9	18,0
Partikel aus dem Abgas des Straßenverkehrs	22,7	21,4	11,7	6,8	5,1

Die im vorliegenden Projekt ermittelten und prognostizierten Emissionen für Partikel aus Kleinfeuerungsanlagen für Festbrennstoffe liegen um ein Drittel über den Schätzungen und Prognosen aus dem RAINS-Modell (s. Tab. 3.8). Die Emissionen aus dem Abgas des Straßenverkehrs werden in den nächsten Jahren stark abnehmen und weit unter die Emissionen aus Kleinfeuerungen fallen.

Berücksichtigt man, dass die Hauptmenge der Feinstaubemissionen aus hohen Schornsteinen (z.B. Industrie, Kraftwerke) emittiert wird (Tab.3.8), nimmt bei den kleinräumigen Emissionen hinsichtlich der daraus resultierenden Immissionsbelastung in Siedlungsgebieten die Bedeutung von Kleinfeuerungen gegenüber dem Verkehr zukünftig stark zu, besonders wenn berücksichtigt, dass Kleinfeuerungsanlagen nur während der Heizperiode emittieren.

Bewertung der Emissionen aus Kleinfeuerungsanlagen für Festbrennstoffe im  
Vergleich zu den Emissionen aus anderen Quellgruppen

**Benzol**

Tab. 4.16: Vergleich der Emissionsschätzungen und Prognosen für Benzol [kt/a] für die Quellgruppen Hausbrand und Straßenverkehr (Abgasemissionen)

	2003	2005	2010	2015	2020
Kleinfeuerungsanlagen ohne Minderungsmaßnahmen (Prognose 1)	1,3	1,3	1,4	1,5	1,5
Kleinfeuerungsanlagen mit Minderungsmaßnahmen (Prognose 2)	1,3	1,3	1,2	1,1	0,9
Benzolemissionen aus dem Abgas des Straßenverkehrs	5,6	4,5	3,0	2,3	2,1

In bisherigen Erhebungen spielten die Kleinfeuerungen bei den Benzolemissionen nur eine untergeordnete Rolle. Durch den Einsatz des geregelten Katalysators sind die Benzolemissionen des Straßenverkehrs zwischen 1990 und 2000 von über 60 kt/a auf Werte unter 10 kt/a stark gesunken. Da die Emissionen auch künftig noch abnehmen werden, können die Benzolemissionen aus Hausbrandfeuerungen dann bis zu oder über die Hälfte der Benzolemissionen des Straßenverkehrs erreichen.

**PCDD/F**

Durch die Erfolge bei der Luftreinhaltung in Anlagen zur Metallgewinnung und Müllverbrennung nehmen die Kleinfeuerungsanlagen für Festbrennstoffe einen immer bedeutenderen Anteil an den Emissionen von PCDD/F ein. So stieg nach Berechnungen des Umweltbundesamtes [3-14] (Kapitel 3.4) der Anteil der Kleinfeuerungsanlagen an den Emissionen von PCDD/F von 3 % im Jahr 1990 auf 14 % im Jahr 2000 an.

Aus den Berechnungen dieses Vorhabens ergeben sich für 2003 Emissionen von 27 g I-TEQ/a an PCDD/F für die Kleinfeuerungsanlagen für Festbrennstoffe, dies liegt deutlich höher als die Schätzungen des Umweltbundesamtes von kleiner als 10 g I-TE für das Jahr 2000 für diese Quellgruppe. Legt man Wert von 27 g I-TE für die Schätzungen für das Jahr 2000 zugrunde, so ergibt sich ein Anteil der Quellgruppe Kleinfeuerungsanlagen von 30 % an den Gesamtemissionen.

## Bewertung der Emissionen aus Kleinfeuerungsanlagen für Festbrennstoffe im Vergleich zu den Emissionen aus anderen Quellgruppen

### **Polychlorierte Biphenyle (PCB)**

Wegen der Datenlage können die Emissionen der 12 dioxinähnlichen PCB nach WHO zu ca. 1,5 g I-TE abgeschätzt werden. Vergleichswerte mit Emissionen aus anderen Quellengruppen sind nicht verfügbar, dürften aber besonders beim Umgang mit PCB-haltigen Materialien deutlich höher liegen. Insgesamt können die Emissionen von PCB aus Kleinfeuerungen als eher unkritisch angesehen werden.

### **Benzo(a)pyren**

Bezogen auf die Emissionen von 26,7 t/a (1995) machen die berechneten Emissionen der Kleinfeuerungen von 6 – 7 t/a einen Anteil von ca. 25 % an den Gesamtemissionen Deutschlands aus. Dagegen beträgt der Anteil der Emissionen der Kleinfeuerungen in den Länderkatastern Baden-Württembergs und Nordrhein-Westfalens an den Gesamtemissionen über 50 %.

### **Polycyclische Aromaten**

Abschätzungen für die 16 EPA-PAK für Deutschland liegen nicht vor, lediglich ein Wert von 420 t/a für die 6 Borneff-PAK (s. Kapitel 3.4). Diese wiederum können nicht mit den Emissionen an den 4 UN-ECE-PAK (20 – 25 t/a) verglichen werden, da besonders die bei den 4 UN-ECE-PAK fehlende Komponente Fluoranthen bei Messungen in höherer Konzentration auftritt als die Summe der 4 UN-ECE-PAK (s. Tab. 3.1).

### **Zusammenfassung**

Kleinfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe tragen zu einem deutlichen Anteil an den Emissionen polycyclischer Aromaten und von PCDD/F bei. Bei den übrigen Luftschadstoffen ist der Anteil zwar geringer, er könnte zukünftig bei starker Zunahme des Holzeinsatzes in Kleinfeuerungen und gleichzeitigem Rückgang der Emissionen aus anderen Quellen (z.B. bei Feinstaub und Benzol) zunehmen.

Berücksichtigt man, dass Kleinfeuerungen nur in der kalten Jahreszeit und aus niedrigen Quellen emittieren, ist dafür Sorge zu tragen, dass die Förderung des Holzeinsatzes aus Gründen des Klimaschutzes nicht zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen führt. Moderne Kleinfeuerungsanlagen für Festbrennstoffe müssen daher hohen Anforderungen bezüglich der Luftreinhaltung entsprechen.

## **4.6 Abschätzung des Einflusses von Betreiberverhalten und Brennstoffmissbrauch auf die Emissionen**

### **4.6.1 Betreiberverhalten**

Da der Betreiber an einer langen Standzeit seiner Feuerungsanlage interessiert ist, ist in der Regel ein vorsätzliches Fehlverhalten beim Betrieb der Anlage nicht zu erwarten.

Höhere Emissionen im Vergleich zum Normbetrieb, d.h. Volllastbetrieb nach DIN 18891, sind in folgenden Fällen zu erwarten:

- Teillastbetrieb in der Übergangszeit (siehe Kap. 3.3.3)
- Zu hohe Holzaufgabemengen aus Gründen der Bequemlichkeit
- Mangelnder Wartungszustand der Feuerungsanlage (siehe Kap. 3.3.2)

Wie in Kapitel 3.3.3 bereits erwähnt, liegen die Emissionen bei einem Kachelofen-Heizeinsatz bei milder Witterung um den Faktor 1,6 höher als beim Volllastbetrieb an kalten Wintertagen. Ähnlich dürfte dieser Einfluss auch bei anderen manuell beschickten, insbesondere Einzelraumfeuerungen sein.

Bei Zentralheizungskesseln wird der Einfluss des Teillastbetriebes in der Übergangszeit geringer sein, wenn ausreichend dimensionierte Pufferspeicher eingebaut sind.

Bei Pelletsfeuerungen, die automatisch gestartet werden können und bei denen somit kein für das Emissionsverhalten ungünstiger Gluthaltebetrieb durchlaufen werden muss, sollten milde Wintertage zu keiner wesentlichen Verschlechterung des Emissionsverhalten führen.

Bei dem untersuchten Stückholzkessel waren die Effekte bei mangelhaften Wartungsarbeiten gering, es ließ sich lediglich eine geringfügige Verschlechterung des Kesselwirkungsgrades feststellen.

### **4.6.2 Brennstoffmissbrauch**

Brennstoffmissbrauch kann prinzipiell in zwei verschiedene Arten unterteilt werden:

- Verwendung von Regelbrennstoffen ungeeigneter Art und Feuchte und
- Mitverbrennung von Abfällen bzw. Einsatz von Abfällen beim Anfeuern

## Abschätzung des Einflusses von Betreiberverhalten und Brennstoffmissbrauch auf die Emissionen

Ungeeignete Holzbrennstoffe werden in der Regel dann eingesetzt, wenn die Vorräte an trockenem Holz aufgebraucht sind und nur noch feuchtes Holz zur Verfügung steht bzw. feuchtes Holz bzw. Holzreste wie Rinde usw. anfallen und aus verschiedenen Gründen (z.B. mangelnder Lager- bzw. Trocknungsmöglichkeiten) feucht eingesetzt werden.

Die Mitverbrennung von Abfällen wird in geringem Umfang immer eine Rolle spielen, da sich die wenigsten Betreiber bewusst sind, dass bereits das Anfeuern mit z.B. Papier oder gar Kunststoffen zu erheblich höheren Emissionen führen wird.

Dass Feuerungsanlagen überwiegend nur zur Abfallentsorgung betrieben werden, kann ausgeschlossen werden, da die dadurch auftretenden Korrosionsprobleme zu Zerstörung der Anlage führen werden.

Die Erkennung bzw. Verhinderung von Brennstoffmissbrauch ist, wenn überhaupt, nur bei elektronisch mittels Abgassensoren geregelten Öfen möglich. Abfälle werden jedoch häufig in handbeschickten Öfen (Herde, Dauerbrandöfen) eingesetzt, bei denen keine technischen Maßnahmen zur Verhinderung des Brennstoffmissbrauchs eingesetzt werden können.

Die wirksamste Maßnahme, dem Brennstoffmissbrauch vorzubeugen, ist die Überwachung der Brennstoffe bzw. der Verbrennungsrückstände. Auch die Beschau des Feuerraums bzw. der Verbrennung kann hierzu Rückschlüsse liefern.

In Tabelle 4.17 sind einige Daten zu Emissionen von PCDD/F bei der Mitverbrennung von Abfall dargestellt [4-30, 4-31].

Tab. 4.17: Einfluss der Abfallmitverbrennung auf die Emissionen von PCDD/F

Ofenart	Brennstoff	PCDD/F in ng TE/m <sup>3</sup> bei 13 % O <sub>2</sub>	Quelle
Holzofen	Holz (naturbelassen) Abfall	0,019 – 0,104 114	Hasler et al. (1993)
Holzessel	Holz (naturbelassen) Holz plus Papier Holz plus Lack Holz plus PVC	0,002 – 0,03 0,177 2,9 6,4	Launhardt et al. (1998)
Fass	Abfall Abfall plus Chlor	1,4 – 24 bis 1060	Lemieux et al. (2003)

## 5 Vorhandene Regelwerke

### 5.1 Regelungen in Deutschland

#### 5.1.1 1. BImSchV

##### Anforderungen an den Betrieb (Überwachung)

Die 1. Bundesimmissionsschutz-Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen – 1. BImSchV – gilt für die Errichtung, die Beschaffenheit und den Betrieb von Feuerungsanlagen, die keiner Genehmigung nach § 4 des Bundesimmissionsschutzgesetzes [5-1] bedürfen (1. BImSchV, § 1).

Die zulässigen biogenen Festbrennstoffe und die jeweiligen emissionsseitigen Anforderungen - unterteilt in verschiedene Nennwärmeleistungen - sind in Tab. 5.1 aufgelistet. Weiterhin sind Braun- und Steinkohlen-Brennstoffe sowie Torf- und Grillbrennstoffe zugelassen (§ 3 Abs. 1 Nr. 1 – 3a).

Tab. 5.1: Anforderungen der 1. BImSchV für feste Biomasse in Deutschland

NWL	Zulässige Brennstoffe	Anforderungen
<b>&lt;= 15 kW</b>	<b>nur</b> naturbelassene Holzbrennstoffe gem. §3 Abs. 1 Nr. 4 und Presslinge (5a)	Abgastrübung gemäß Ringelmannskala heller 1
<b>&gt; 15 kW</b>	nur naturbelassene Holzbrennstoffe gem. §3 Abs. 1 Nr. 4, 5, 5a und Stroh oder ähnliche pflanzliche Stoffe (Nr. 8)	<b>Staub:</b> 0,15 g/m <sup>3</sup> <b>CO:</b> bis 50 kW: 4 g/m <sup>3</sup> 50-150 kW: 2 g/m <sup>3</sup> 150-500 kW: 1 g/m <sup>3</sup> >500 kW: 0,5 g/m <sup>3</sup> (O <sub>2</sub> -Bezug 13%)
<b>&gt; 50 kW</b>	zusätzlich auch Holzwerkstoffe gem. §3 Abs. 1 Nr. 6 und 7 ohne Holzschutzmittel und ohne halogenorganische Beschichtungen; <b>nur</b> in Betrieben der Holzbe/-verarbeitung	<b>Staub:</b> 0,15 g/m <sup>3</sup> <b>CO:</b> bis 100 kW: 0,8 g/m <sup>3</sup> 100-500 kW: 0,5 g/m <sup>3</sup> >500 kW: 0,3 g/m <sup>3</sup>

Für die sog. Kleinanlagen, d. h. die Kleinf Feuerungsanlagen mit einer Nennwärmeleistung kleiner 15 kW, dürfen nur naturbelassene stückige Holzbrennstoffe, d. h. Scheitholz, Hackschnitzel, Reisig oder Zapfen (gemäß § 3, Abs. 1 (4)), und Holzpellets oder -briketts nach DIN 51731 (gemäß § 3, Abs. 1 (5)) verbrannt werden, d. h. Rinde, Säge-

mehl, Späne und Schleifstaub sowie Stroh- oder sonstige Pellets sind ausgeschlossen. Bei Grundöfen gelten diese Brennstoffbeschränkungen auch über die 15 kW-Grenze hinaus. Die eingesetzten Brennstoffe müssen in lufttrockenem Zustand sein (gemäß § 3 (3)).

Die emissionsseitigen Anforderungen verlangen eine Abgastrübung heller 1 gemäß der Ringelmannskala.

Für Kleinf Feuerungsanlagen mit einer Nennwärmeleistung größer 15 kW sind zusätzlich noch Stroh und ähnliche pflanzliche Stoffe zugelassen.

Für diese Anlagen sind Emissionsgrenzwerte für Kohlenmonoxid (CO) und Staub festgelegt. Der Grenzwert von CO ist abhängig von der Anlagengröße und liegt zwischen 4 und 0,5 g/m<sup>3</sup>. Je größer die Anlage ist, desto weniger CO darf noch im Abgas vorhanden sein. Die gemessene Staubemission darf 0,15 g/m<sup>3</sup> nicht überschreiten.

Für Kleinf Feuerungsanlagen mit einer Nennwärmeleistung größer 50 kW sind in Betrieben der Holz-be- und -verarbeitung zusätzlich Holzwerkstoffe zugelassen, sofern keine Holzschutzmittel aufgetragen oder infolge einer Behandlung enthalten sind und Beschichtungen keine halogenorganischen Verbindungen oder Schwermetalle enthalten. Diese Holzwerkstoffe können entweder gestrichenes, lackiertes oder beschichtetes Holz sowie daraus anfallende Reste (§ 3 (1) 6.) oder Sperrholz, Spanplatten, Faserplatten oder sonst verleimtes Holz sowie daraus anfallende Reste (§ 3 (1) 7.) sein.

Der Emissionsgrenzwert für Staub ist hier, wie schon bei den Anlagen größer 15 kW, auf 0,15 g/m<sup>3</sup> festgelegt. Der Emissionsgrenzwert für CO ist strenger als bei den Anlagen größer 15 kW und liegt, je nach Anlagengröße, zwischen 0,8 und 0,3 g/m<sup>3</sup>.

### **Emissionsüberwachung**

Eine wiederkehrende Überwachung ist für alle mechanisch beschickten Anlagen mit einer Nennwärmeleistung größer 15 kW für den Einsatz der in § 3 Abs. 1 Nr. 1 bis 5a oder 8 genannten festen Brennstoffe (d. h. Stein- und Braunkohle, naturbelassenes, stückiges Holz, Holzpellets und Stroh und ähnliche pflanzliche Stoffe) erforderlich. Ebenso ist eine wiederkehrende Überwachung beim Einsatz der in § 3 Abs. 1 Nr. 6 oder 7 genannten Stoffe (Holzwerkstoffe aus der Holz- be- und –verarbeitung) erforderlich, die ohnehin nur in Feuerungsanlagen mit einer Nennwärmeleistung größer 50 kW verbrannt werden dürfen.

Kleinf Feuerungsanlagen mit einer Nennwärmeleistung kleiner 15 kW sowie handbeschickte Anlagen < 15 kW unterliegen keiner Messpflicht, sofern nur die Brennstoffe gemäß § 3 Abs. 1 Nr. 1 bis 5a oder 8 verwendet werden.

Handbeschickte Feuerungsanlagen für naturbelassenes Holz müssen demnach nicht (bzw. Anlagen > 15 kW nur einmalig) überwacht werden. Ebenso wenig mechanisch beschickte Anlagen mit einer Nennwärmeleistung kleiner 15 kW.

Die Hersteller von Kleinf Feuerungsanlagen haben sich auf diese Anforderungen eingestellt und bieten zahlreiche mechanisch beschickte Anlagen mit einer Nennwärmeleistung knapp unter 15 kW (meist 14,9 kW) an. So kann die Überwachung, die für den Betreiber der Anlage mit Kosten verbunden ist, umgangen werden. Hier ist Handlungsbedarf erforderlich. Durch ein Herabsenken der Leistungsgrenze könnte dieser offensichtlichen Umgehung der Überwachungspflicht entgegengewirkt werden.

Die derzeitigen Anforderungen der 1. BImSchV lassen deutlich erkennen, dass Kleinf Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe z. Z. von der 1. BImSchV privilegiert werden, obwohl sie bei manchen Luftschadstoffen wesentlich zu den Emissionen und Immissionen beitragen (vgl. Kap. 1.2). Auch deshalb ist eine Novellierung der 1. BImSchV notwendig.

Die genaue Ausführung der Schornsteinfegerarbeiten von den Gebühren über besondere Reinigungsverfahren bis hin zur Überprüfungshäufigkeit ist in der Verordnung über die Ausführung von Schornsteinfegerarbeiten (Kehr- und Überprüfungsordnung – KÜO) vom 29.03.1999 geregelt [5-2].

### **5.1.2 Baurecht, DIN-Normen**

#### **Anforderungen an Anlagen**

In Deutschland wird die Verwendbarkeit von Feuerungsanlagen durch die Landesbauordnung und die Feuerungsverordnung der Länder geregelt. Um diese Regelungen in den einzelnen Bundesländern möglichst zu vereinheitlichen, wurde eine Musterbauordnung (MBO) erlassen [5-3]. Die darin für alle Bundesländer festgelegten Standards sollen in Länderverordnungen festgelegt werden.

Die Musterbauordnung legt fest, dass Feuerungsanlagen nur verwendet werden dürfen, wenn sie entweder das nationale Übereinstimmungszeichen „Ü-Zeichen“ oder das europäische Konformitätszeichen CE tragen. Beide Zeichen sind für das Inverkehrbringen von Feuerungsanlagen notwendig und dienen der Dokumentation der Übereinstimmung mit den geltenden Richtlinien.

Das Ü-Zeichen muss die Daten des Herstellers, die Prüfgrundlage und die Prüfstelle nennen. Die Prüfgrundlage ist entweder die Zulassungsnummer oder, bei Normkonformität, die DIN/EN-Nummer. Für die Gestaltung und Anbringung des Ü-Zeichens gelten die Verordnungen des Landes, in dem der Hersteller seinen Sitz hat.

Feuerungsanlagen mit CE-Zeichen entsprechen einer in nationales Recht umgesetzten EG-Richtlinie und zusätzlich den wesentlichen Anforderungen mitgeltender EG-Richtlinien. Das CE-Zeichen muss sichtbar auf der Feuerungsanlage angebracht werden. Der Hersteller muss eine EG-Konformitätserklärung mit Angaben über den Hersteller, die Feuerungsanlage und den zugrunde liegenden DIN-Normen ausstellen.

Neben diesen beiden notwendigen gibt es noch freiwillige Zeichen, die von verschiedenen Prüfstellen und Zertifizierungseinrichtungen vergeben werden.

So wird z. B. das DIN plus-Qualitätszeichen nach erfolgreicher DIN-Prüfung sowie dem Nachweis der Erfüllung der Anforderungen (s. Tab. 5.2) nach DIN plus und der Zertifizierung durch DIN CERTCO vergeben.

Ein anderes Zeichen ist der „Blaue Engel“, der von der Jury Umweltzeichen in Zusammenarbeit mit dem Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, dem Umweltbundesamt und dem RAL e. V. (Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung) vergeben wird. Damit werden besonders emissionsarme und energieeffiziente Holzpellet-Kessel im Leistungsbereich bis 50 kW und Holzpellet-Öfen zur

Einzelraumheizung bis 15 kW gekennzeichnet. Pelletheizungen, die das RAL-UZ-Kennzeichen erhalten wollen, müssen strengen Anforderungen genügen (Tab. 5.2)

Tab. 5.2: Vergleich der Anforderungen für das DINplus Prüfzeichen und das Kennzeichen nach RAL-UZ („Blauer Engel“, Werte bezogen auf 13 Vol.-% O<sub>2</sub>)

Produkt	Wirkungsgrad	CO [mg/m <sup>3</sup> ]	NO <sub>x</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	Gesamt-C [mg/m <sup>3</sup> ]	Staub [mg/m <sup>3</sup> ]
<b>Prüfzeichen DINplus</b>					
Kamineinsätze und -Kassetten	≥ 78 bzw. ≥ 72 %	≤ 1.500	≤ 200	≤ 120	≤ 75
Kaminöfen	≥ 75 %	≤ 1.500	≤ 200	≤ 120	≤ 75
Kachelöfen-Heizeinsätze	≥ 80 %	≤ 1.500	≤ 200	≤ 120	≤ 65
<b>Prüfzeichen RAL-UZ 111 (Pelletöfen) und 112 (Pelletheizkessel)</b>					
Pelletöfen bis 15 kW	≥ 90 %	≤ 200 ( ≤ 400 )	≤ 150	≤ 10 ( ≤ 15 )	≤ 35
Pelletheizkessel bis 50 kW	≥ 90 % ( ≤ 88% )	≤ 100 ( ≤ 300/250 )	≤ 150	≤ 5	≤ 30

In Klammern: Werte für Teillast

### Anforderungen an die Errichtung (Abnahmeprüfung)

Für Feststofffeuerungen gelten zahlreiche Normen aus dem Bereich der Feuerungs- oder Kesselprüfung, elektrischen Sicherheit sowie der Regel- und Steuertechnik [2-4], von denen nur einige beispielhaft genannt seien:

- DIN 18 880; Teil 1: Dauerbrandherde für feste Brennstoffe, Verfeuerung von Kohleprodukten
- E DIN 18 891 A1: Kaminöfen für feste Brennstoffe, Änderung 1
- DIN 18 894: Feuerstätten für feste Brennstoffe – Pelletöfen – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung [5-8]
- DIN EN 12 809: Heizkessel für feste Brennstoffe – Nennwärmeleistung bis 50 kW – Anforderungen und Prüfung [5-9]
- DIN EN 303-5, Teil 5: Heizkessel für feste Brennstoffe, hand- und automatisch beschickte Feuerungen, Nennwärmeleistungen bis 300 kW, Begriffe, Anforderungen, Prüfungen und Kennzeichnung [5-10]

Die baulichen Anforderungen zum Einbau einer Festbrennstoff-Feuerstätte sind in den jeweiligen Länder-Feuerungsverordnungen geregelt. Zur Standardisierung sind diese angelehnt an das Muster einer bundesweiten Feuerungsverordnung (M-FeuVO).

Hierin werden u. a. die Verbrennungsluftversorgung (bei raumluftabhängigen Feuerstätten) vorgeschrieben sowie die Anforderungen an den Aufstellort bzw. den Heizraum, das Brennstofflager und die Abgasanlagen festgelegt.

Die Anforderungen an die Brennstoffe (Klassifikation) sind in Kap. 2.2 beschrieben.

### **5.2 EU-weite Regelungen**

Die Europeanorm EN 303-5 „Heizkessel für feste Brennstoffe“, Veröffentlichung April 1999 [5-10], ist für alle CEN-Mitglieder Voraussetzung zur Veröffentlichung als nationale Norm.

Auf europäischer Ebene (innerhalb der CEN Mitgliedsstaaten) gibt es vom Europäischen Komitee für Normung (CEN) einen Entwurf zur Normung für feste Biobrennstoffe: Die Technische Spezifikation prCEN/TS 14961 Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und –klassen (Vornorm, siehe Kap. 2.2). Diese Norm kann zu einer einheitliche Prüfung und Beurteilung der Biomassefeuerungen in Europa beitragen.

### **5.3 Nationale Regelungen im Ausland**

#### **5.3.1 Österreich**

Auf der Grundlage der Europeanorm EN 303-5 wurde die ÖNORM EN 303-5 „Heizkessel für feste Brennstoffe“ als Standard für die einheitliche Prüfung und Beurteilung von Biomassefeuerungen veröffentlicht.

Nachfolgend werden die relevanten Normen Anforderungen und Prüfungen von Heizkesseln für Festbrennstoffe in Österreich aufgelistet [5-4]:

- ÖNORM EN 303-5: Heizkessel für feste Brennstoffe, hand- und automatisch beschickte Feuerungen, Nennwärmeleistung bis 300 kW; Begriffe, Prüfungen und Kennzeichnung (01.07.1999)

- ÖNORM M 9465-1 bzw. -2: Emissionsbegrenzung für luftverunreinigende Stoffe aus Strohheizungsanlagen bis zu einer Brennstoff-Wärmeleistung von 75 kW; Anforderungen und Überprüfung am Aufstellort bzw. Prüfstand (01.10.1985)
- ÖNORM M 9466: Emissionsbegrenzung für luftverunreinigende Stoffe aus Feuerungsanlagen mit einer Nennwärmeleistung ab 50 kW; Anforderungen und Überprüfung am Aufstellungsort (01.06.1998)
- ÖNORM M 7510-4: Überprüfung von Heizanlagen für feste Brennstoffe mit einer Wärmeleistung bis 300 kW (01.05.1997)

### **Anforderungen an die Brennstoffe (Klassifikation)**

Die Anforderungen an die Brennstoffe sind in Österreich durch verschiedene Normen geregelt, z. B.:

- ÖNORM M 7132: Energiewirtschaftliche Nutzung von Holz und Rinde als Brennstoff, Begriffsbestimmungen und Merkmale (01.07.1998), [5-11]
- ÖNORM M 7133: Holzhackgut für energetische Zwecke; Anforderungen und Prüfbestimmungen (01.02.1998), [5-12]
- ÖNORM M 7135: Presslinge aus naturbelassenem Holz oder naturbelassener Rinde, Pellets und Briketts; Anforderungen und Prüfbestimmungen (01.11.2000), [5-13]

### **Landes- und Bundesgesetzgebung:**

Der österreichische Bund und die österreichischen Bundesländer haben in Art. 15 a B-VG die Vereinbarung über die „Einsparung von Energie“ beschlossen. Darin sind Kleinfeuerungen definiert als technische Einrichtungen zum Zwecke der Gewinnung von Nutzwärme für die Raumheizung oder zur Warmwasserbereitung bis zu einer Brennstoffwärmeleistung von 400 kW. (In Deutschland werden Feuerungsanlagen kleiner 1000 kW den Kleinfeuerungsanlagen zugeordnet).

Gemäß dieser Vereinbarung dürfen Kleinfeuerungen nur dann in Verkehr gebracht werden, wenn der Nachweis der Erfüllung dieser Vereinbarung durch die Vorlage eines Prüfberichts einer hierzu befugten Stelle erfolgt.

Die Emissionsgrenzwerte für Kleinfeuerungen für feste Brennstoffe sind in Tabelle 5.3 aufgelistet:

Tab. 5.3: Emissionsgrenzwerte für Kleinfeuerungen für feste Brennstoffe in Österreich für Anlagen mit einer Brennstoffwärmeleistung von bis zu 400 kW [5-4]

Feuerungen für feste Brennstoffe		Emissionsgrenzwerte [mg/MJ]			
		CO	NOx	OGC	Staub
händisch beschickt	biogene Brennstoffe	1100	150 *)	80	60
	fossile Brennstoffe	1100	100	80	60
automatisch beschickt	biogene Brennstoffe	500 **)	150 *)	40	60
	fossile Brennstoffe	500	100	40	40
		*) NOx-Grenzwert gilt nur für Holzfeuerungen **) bei Teillastbetrieb kann der Grenzwert um 50 % überschritten werden			

Daneben gibt es noch zahlreiche weitere Normen, z. B. die ÖNORM 7136 (Transport und die Lagerlogistik) [5-14] oder die ÖNORM 7137 (Anforderungen an die Pelletlagerung beim Verbraucher) [5-15].

### Anforderungen an Anlagen

Das Baurecht in Österreich ist weitgehend Ländersache. Der Bundesstaat Österreich besteht aus neun selbständigen Ländern, wobei die Kompetenzen zwischen Bund und Ländern in den Kompetenzartikeln (Art. 10 – 15 B-VG) geregelt ist. Das Bundesrecht steht nicht über dem Landesrecht, sondern Bundes- und Landesrecht sind gleichrangig. Die baurechtlichen Vorschriften sind, je nach Bundesland, in Baugesetzen, Bauordnungen oder mehreren parallelen Gesetzen geregelt.

### **5.3.2 Schweiz**

In der Schweiz werden die Anforderungen an die Kleinf Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe durch die Luftreinhalte-Verordnung (LRV) [5-5] geregelt.

#### **Anforderungen an die Brennstoffe (Klassifikation)**

Die zulässigen Brennstoffe sind in Anhang 5 der LRV festgelegt.

Gemäß Ziffer 2 darf der Schwefelgehalt von Kohle, Kohlebriketts und Koks der Qualität A (bzw. B) 1,0 (bzw. 3,0) Masse-% nicht übersteigen.

Als Holzbrennstoffe gelten naturbelassenes stückiges Holz einschließlich anhaftender Rinde, naturbelassenes nicht stückiges Holz sowie Restholz aus der Holzverarbeitenden Industrie und dem Holzverarbeitenden Gewerbe sowie von Baustellen, soweit das Holz nicht druckimprägniert ist und keine Beschichtungen aus halogenorganischen Verbindungen enthält (Ziffer 3 Anh. 5 LRV).

Torf, Getreide, Stroh und sonst. biogene Festbrennstoffe werden nicht explizit erwähnt.

#### **Anforderungen an den Betrieb (Überwachung)**

In kleinen handbeschickten Feuerungen (unter 40 kW) sowie in Cheminéeöfen dürfen nur naturbelassenes, stückiges Holz sowie Reisig und Zapfen verbrannt werden.

Holzfeuerungen bis 70 kW müssen nicht periodisch überwacht werden, sofern die Anlage fachgerecht betrieben und ausschließlich naturbelassenes Holz verbrannt wird. Besteht der Verdacht einer übermäßigen Rauch- und Geruchsmission, so kann die Behörde eine Messung veranlassen und ggf. ergänzende oder verschärfte Emissionsbegrenzungen verlangen. Die Genehmigung und die Kontrolle von Holzheizungen für naturbelassenes Holz bis 70 kW obliegen den Gemeinden.

Nicht periodisch gemessen werden müssen die Emissionen bei Feuerungsanlagen (Anhang 3, Ziff. 22 LRV), die weniger als 100 Stunden p. a. betrieben werden, Feuerungen bis 12 kW zur ausschließlichen Einzelraumbeheizung sowie Kohlefeuerungen bis 70 kW. Außerdem muss jede Feuerungsanlage gekennzeichnet sein (Anhang 3, Ziff. 24).

Für Feuerungen mit naturbelassenem Holz (gemäß Anhang 5 Ziffer 3 Absatz 1 LRV) gelten folgende Emissionsgrenzwerte, die in Tabelle 5.4 aufgezeigt sind:

Tab. 5.4: Emissionsgrenzwerte für Kohlenmonoxid für Feuerungsanlagen kleiner 1 MW in der Schweiz

		<b>Feuerungswärmeleistung</b> (bezogen auf 13 Vol.-% O <sub>2</sub> )			
		<b>20 – 70 kW</b>	<b>70 – 200 kW</b>	<b>200 – 500 kW</b>	<b>500 kW – 1 MW</b>
Feststoffe	mg/m <sup>3</sup>	-	150	150	150
naturbelassenes Holz	mg/m <sup>3</sup>	4000*	2000	1000	500
Restholz (Anh. 5 Ziff. 3 Abs. 1 Bst. c)	mg/m <sup>3</sup>	1000	1000	800	500

\*: gilt nicht für Zentralheizungsherde

Restholz von Schreinereien und Baustellen darf nur in messpflichtigen Anlagen verbrannt werden.

In der Schweiz scheint die Verbrennung von Abfällen, besonders in Haushalten, ein großes Problem zu sein. Grundsätzlich ist es verboten, Abfälle in Feuerungsanlagen mit einer Nennwärmeleistung kleiner 350 kW zu verbrennen (LRV, Anhang 2, Ziff. 728 LRV). Zahlreiche Merkblätter, Informationsbroschüren und Leitfäden (z. B. [5-6], [5-7]) beschäftigen sich jedoch mit dieser Problematik. Wohl aus diesem Grund wurde der EMPA-Ascheschnelltest entwickelt, um den Brennstoffmissbrauch zu erkennen und nachzuweisen.

Für die Zulassung typengeprüfter Brenner und Heizkessel ist seit Anfang 2005 die europäische Prüfung maßgebend.

## **6 Probleme bei der Anwendung der 1. BImSchV und Ansätze zur Lösung**

### **6.1 Fachgespräch zur Novellierung der 1. BImSchV im November 2004 in Berlin**

Bei dem Fachgespräch mit nationalen Experten wurden Probleme bei der Anwendung der derzeit gültigen 1. BImSchV und darauf aufbauend Eckpunkte einer Novellierung sowie folgende künftige Anforderungen an Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe diskutiert:

- die Senkung der Leistungsgrenze für überwachungspflichtige Anlagen,
- die Verschärfung der Emissionsgrenzwerte für CO und Staub,
- die Festlegung von konkreten emissionsbegrenzenden Anforderungen an Einzelraumfeuerstätten,
- den Einsatz von Pufferspeichern für grundsätzlich alle Kessel,
- die Überarbeitung des Brennstoffkatalogs,
- modifizierte Überwachungsregelungen, Beratung der Betreiber
- und ein Sanierungskonzept für bestehende Anlagen.

In weitem Verlauf berichteten Experten aus Industrie, Forschung und Ländern zu folgenden Themen:

- Emissionsminderung durch ein beheiztes Metallgewebefilter
- Elektrisches Partikelabscheidesystem für kleine Holzfeuerungen
- Emissionsminderung durch Oxidationskatalysatoren
- Aussagefähigkeit von Staubmessverfahren
- Schnellbeurteilung von Staubmessungen mit dem Delta-p-Verfahren
- Pufferspeicherdimensionierung
- Ascheschnelltest zum Nachweis von Brennstoffmissbrauch

## **6.2 Regelbrennstoffliste, Brennstoffliste nach prCEN 14961**

Bei der Überarbeitung der Regelbrennstoffliste nach § 6 (1) der 1. BImSchV ist es sinnvoll, internationale Konventionen zu berücksichtigen.

Die prCEN 14961 „Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und –klassen“ (Schluss-Entwurf vom Juli 2004) enthält keine konkreten Normierungen für bestimmte Brennstoffe, sondern Klassifizierungsprinzipien für feste Biobrennstoffe.

### **Klassifizierung der Herkunft und Quellen**

Herkunft und Quellen werden sehr detailliert in Tabelle 1 beschrieben, nachfolgend eine verkürzte Auswahl:

#### 1. Holzartige Biomasse

##### 1.1 Wald- und Plantagenholz

Vollbäume, Stammholz, Waldrestholz (frisch und grün / trocken), Stümpfe, Rinde, holzartige Biomasse aus der Landschaftspflege

##### 1.2 Industrierestholz (be- / unbehandelt, faserige Zellstoffabfälle)

##### 1.3 Gebrauchtholz (be- / unbehandelt)

##### 1.4 Mischungen

#### 2. Halmgutartige Biomasse (incl. Nebenprodukte und Rückstände)

##### 2.1.1 Getreide (Stroh und/oder Körner)

##### 2.1.2 Gräser (Stroh und/oder Samen)

##### 2.1.3 Ölsaaten

##### 2.1.4 Wurzelfrüchte

##### 2.1.5 Hülsenfrüchte

##### 2.1.6 Blumen

#### 3. Biomasse aus Früchten (Beeren-, Stein-/Kernobst, Nüsse und Eicheln, Rückstände)

In der prCEN 14961 wird zwischen Industrierestholz (Rückstände aus der Produktion) und Gebrauchtholz (Holzabfälle nach Benutzung durch Verbraucher/Gesellschaft) unterschieden, für beide Gruppen gilt, dass keine halogenorganischen oder schwermetallhaltigen Holzschutzmittel aufgebracht wurden.

### **Klassifizierung der Eigenschaften**

In Tabelle 2 werden die Haupthandelsformen beschrieben, in Tabelle 3 die Eigenschaften (Heizwert, Wasser- und Aschegehalt, mechanische Eigenschaften, haupt- und Nebenbestandteile).

Aus den Inhalten der Tabellen 1 bis 3 sind in den Tabellen 4 bis 13 Spezifizierungen von Eigenschaften für die wichtigsten Haupthandelsformen fester Biobrennstoffe genannt:

Tabelle 4 – Briketts

Tabelle 5 – Pellets

Tabelle 6 – extrahierter Olivenkuchen

Tabelle 7 – Holzhackschnitzel

Tabelle 8 – grobes Schredderholz

Tabelle 9 – Scheitholz

Tabelle 10 – Sägespäne

Tabelle 11 – Rinde

Tabelle 12 – Strohballen

Tabelle 13 – andere feste Biobrennstoffe

Im Anhang A (informativ) sind beispielhaft einige Spezifizierungen von Biobrennstoffen, wie sie im häuslichen Bereich angewendet werden, genannt.

A1 – Holzbriketts

A2 – Holzpellets

A3 – Holzhackschnitzel

A4 – Scheitholz

Im Anhang C sind typische Werte fester Biomasse-Brennstoffe genannt, im Anhang D sind Beispiele möglicher Gründe für abweichende Werte (Anhang C) genannt.

### **Vergleich der Holzarten in der 1. BImSchV mit denen der prCEN 14961**

In Tabelle 6.1 ist die Brennstoffliste der 1. BImSchV den Klassifikationsprinzipien gegenübergestellt.

Tab. 6.1: Vergleich der Brennstofflisten der 1. BImSchV und der prCEN 14961

<b>1. BImSchV, § 3 Abs. (1)</b>	<b>prCEN 14961</b>
1-3a Kohle, Torf, Grillholzkohle/-briketts	-
4. naturbelassenes stückiges Holz einschließlich anhaftender Rinde, beispielsweise in Form von Scheitholz, Hackschnitzeln, sowie Reisig und Zapfen,	Tabelle 9 bzw. A4 (Scheitholz), Tabelle 7 bzw. A3 (Hackschnitzel), Reisig und Zapfen ggf. nach Tab.13
5. naturbelassenes nicht stückiges Holz, beispielsweise in Form von Sägemehl, Spänen, Schleifstaub oder Rinde,	Tabelle 10 (Sägespäne), Tabelle 11 (Rinde)
5a. Presslinge aus naturbelassenem Holz in Form von Holzbriketts, Holzpellets oder andere Presslinge	Tabelle 4 bzw. A1 Holzbriketts Tabelle 5 bzw. A2 Holzpellets
6. gestrichenes, lackiertes oder beschichtetes Holz sowie daraus anfallend Reste, soweit keine Holzschutzmittel aufgetragen oder enthalten sind und Beschichtungen nicht aus halogenorganischen Verbindungen oder Schwermetalle enthalten	Tabelle 7 (Hackschnitzel) Tabelle 10 (Sägespäne) Bretter etc. → Tabelle 13
7. Sperrholz, Spanplatten, Faserplatten oder sonst verleimtes Holz sowie Reste, soweit .. (s. Nr. 6)	
8. Stroh oder ähnliche pflanzliche Stoffe,	Tabelle 12
(3) Die in Absatz 1 Nr. 4 bis 8 genannten Brennstoffe dürfen in handbeschickten Feuerungsanlagen nur in lufttrockenem Zustand eingesetzt werden.	Wassergehalt M20
(4) Bindemittel für Briketts oder Pellets: Stärke, pflanzliches Paraffin oder Melasse	< 2%, landwirtschaftl. oder forstl. Biomasse

Aus dem Vergleich der beiden Brennstofflisten ergeben sich für die in Haushalten empfohlenen Biobrennstoffe folgende Konsequenzen:

- Nach Anhang A der prCEN 14961 sind für die Verwendung im häuslichen Bereich beispielhaft Scheitholz, Holzbriketts, -pellets und -hackschnitzel empfohlen.
- Reisig und Zapfen sind nicht erwähnt.
- Der Wassergehalt ist mit max. 20 % explizit angegeben.
- Die Art der Bindemittel für Pellets ist nur bzgl. des Gehalts von < 2 % und der Herkunft (Biomasse) beschränkt.

### **6.2.1 Verbrennung von Holzabfällen in Schreinereien**

Nach § 3 (1) der 1. BImSchV dürfen auf den Holzbrennstoffen „keine Holzschutzmittel aufgetragen oder infolge einer Behandlung enthalten sein und Beschichtungen keine halogenorganischen Verbindungen oder Schwermetalle enthalten“.

In der prCEN 14961 können die Rückstände chemisch behandelt sein, solange sie keine Schwermetalle oder halogenierten organischen Verbindungen im Ergebnis der Behandlung mit Holzschutzmitteln oder Aufbringung von Beschichtungen enthalten.

Nach der 1. BImSchV dürfen generell keine Holzschutzmittel aufgetragen sein, nach der prCEN 14961 wären auch Holzschutzmittel ohne halogenorganische Verbindungen oder Schwermetalle zulässig.

Ein weiteres Problem ist die Unterscheidung von Restholz und Gebrauchtholz in Schreinereien, da insbesondere bei Reparatur- und Renovierungsarbeiten beide Holzarten gleichzeitig anfallen, so dass damit zu rechnen ist, dass nicht unerhebliche Mengen von Gebrauchtholz in Schreinereien verbrannt werden.

Kontrovers wird auch diskutiert, ob das Restholz einer Schreinerei in einem anderen Betrieb verbrannt werden darf oder ob hier schon die Bedingungen der Altholzverbrennung (Anlagen nach Nr. 8.2 der 4. BImSchV) anzuwenden sind.

In der hiesigen Überwachungspraxis sind Fälle aufgetreten, bei denen

- die Öfen nur für stückiges, nicht aber für plattenartiges Holz geeignet waren und es daher wegen Beeinträchtigung der Luftzuführung zu erhöhten Emissionen kam und
- die Ofenleistung zu groß bemessen war und wegen zu klein dimensionierter Pufferspeicher die Anlage ständig im Gluthalbetrieb mit den daraus resultierenden hohen Emissionen lief.

Gerade von kleineren Schreinereien wird häufig vorgebracht, dass die nach der 1. BImSchV erforderliche Mindestnennwärmeleistung von 50 kW zu groß für den Wärmebedarf der Betriebe sei.

### **6.2.2 Verbrennung von Getreide bzw. Getreideganzpflanzen, Halmgut, Ölsaaten**

Bei Getreidefeuerungen ist zunächst zu unterscheiden, welche der folgenden Brennstoffe eingesetzt werden:

- Getreidekörner (z.B. Ausputzgetreide)
- Halmgut
- Gesamtpflanzen oder
- Pellets aus Halmgut, ggf. mit Körner- oder auch Holzanteilen.

Getreidekörner lassen sich gut fördern, sie werden oft zusammen mit Pellets oder Holzhackschnitzeln verbrannt. Der Ascheschmelzpunkt von reinen Getreidekörnern liegt relativ niedrig (ca. 700°C, im Vergleich: Holz > 1200 °C). Um Verbackungen im Ofen zu vermeiden, werden daher Brennstoffmischungen eingesetzt oder es sind spezielle ofentechnische Maßnahmen erforderlich.

Halmgut erfordert spezielle Verbrennungsanlagen oder wird in verdichteter Form (Pellets, Briketts) eingesetzt.

Gegenüber Holz besitzen Getreidekörner einen erheblich höheren Anteil an Stickstoff, der zu höheren Emissionen von Stickstoffoxiden führt.

Asche- und Chlorgehalt sind bei Halmgut wesentlich höher als bei Holz, bei reinen Körnern ist dies nicht so stark ausgeprägt.

#### **Emissionen:**

- Infolge des höheren Ascheanteils in Getreidekörnern und insbesondere im Halmgut liegen die Staubemissionen signifikant höher als bei der Verfeuerung von Holz.
- Durch den bis zu 10-fach höheren Stickstoffanteil im Getreide werden auch erhöhte Emissionen von Stickstoffoxiden beobachtet. Durch feuerungstechnische Maßnahmen, wie z.B. Senkung der Temperatur im Verbrennungsraum, kann eine gewisse Reduzierung der Emissionen von Stickstoffoxiden erreicht werden, zumal auch Probleme mit der Ascheerweichung vermieden werden können. Ob die Emissionswerte auf z.B. < 200 mg/m<sup>3</sup> reduziert werden können, ist fraglich. Andererseits können derartige Maßnahmen die Ausbrandqualität verschlechtern, wodurch höhere Emissionen von Kohlenmonoxid und organischen Stoffen (Gesamt-C, Benzol, PAK) zu erwarten sind.

- PAK entstehen bei schlechten Verbrennungsbedingungen und sind daher mehr von den ofentechnischen Gegebenheiten als vom eingesetzten Brennstoff abhängig.
- Wegen des höheren Gehalts an Chlor in Getreide, insbesondere von Halmgut, werden auch höhere Emissionen von Chlorwasserstoff beobachtet.
- Bei schlechten Verbrennungsbedingungen sind daher auch höhere Emissionen von PCDD/PCDF zu erwarten. Bei den hier bekannten Ergebnissen bei Vergleichsmessungen waren die Unterschiede zwischen der Verbrennung von Holz und Getreide in dieser Hinsicht nicht signifikant. Bei der Verbrennung von reinem Halmgut mit höherem Chlorgehalt und den brennstoffbedingt schlechteren Verbrennungsbedingungen wurden auch signifikant höhere PCDD/F-Emissionen beobachtet.
- In einigen Fällen wurden trotz geringer Emissionswerte für Kohlenmonoxid (Kriterium für die Ausbrandqualität) auffällig hohe Werte für Gesamt-Kohlenstoff gefunden. Getreidefeuerungen haben bereits zu Nachbarschaftsbeschwerden über Geruchsbelästigungen geführt.

### **Zusammenfassung**

Derzeit gibt es etliche Vorhaben zur Verbrennung von Getreide, überwiegend im Bereich Forschung, mit dem Ziel der Optimierung der Feuerungstechnik.

Bei gemischter Verfeuerung mit Holzhackschnitzeln bzw. Pellets sind die Probleme mit dem geringen Ascheerweichungspunkt beherrschbar.

Bei guten Ausbrandbedingungen konnten im Vergleich zu Holzfeuerungen keine erheblich höheren Emissionen von PAK und PCDD/F beobachtet werden.

Je nach Anlagenart kommt es zu höheren Emissionen von Staub. Bedingt durch den hohen Stickstoffgehalt im Getreide liegen die Emissionen von Stickstoffoxiden im Vergleich zu Holz erheblich höher.

Bei ungünstigen Bedingungen kann es zu Geruchsbelästigungen in der Nachbarschaft kommen.

Beim derzeitigen Stand der Entwicklung kann eine allgemeine Freigabe der Verbrennung von Getreide derzeit nicht empfohlen werden.

Denkbar ist eine branchenspezifische Regelung (orientiert an der landwirtschaftlichen Prozesskette) analog dem holzverarbeitenden Gewerbe für Anlagen mit einer Feue-

nungswärmeleistung von mindestens 50 kW. Eine Forderung von Sekundarmaßnahmen, wie z.B. eine Entstaubung, wird sich auch positiv auf die Emissionen von PAK und PCCD/F auswirken.

### **6.3 Bestimmung der Nennwärmeleistung bei der Prüfung nach DIN 18 891**

Für die Auswahl einer Feuerungsanlage zur Beheizung ist die Nennwärmeleistung (NWL) ausschlaggebend. Sie ist in § 2 Nr. 10 der 1. BImSchV wie folgt definiert ist als:

„die höchste von der Feuerungsanlage im Dauerbetrieb nutzbar abgegebene Wärmemenge je Zeiteinheit; ist die Feuerungsanlage für einen Nennwärmeleistungsbereich eingerichtet, so ist die Nennwärmeleistung die in den Grenzen des Nennwärmeleistungsbereichs fest eingestellte und auf einem Zusatzschild angegebene höchste nutzbare Wärmeleistung; ohne Zusatzschild gilt als Nennwärmeleistung der höchste Wert des Nennwärmeleistungsbereichs“

Für die Berechnung von Emissionsinventaren, die auf Basis der mit dem Brennstoff eingebrachten Energie berechnet werden, ist die Angabe der Feuerungswärmeleistung (FWL) notwendig, weiterhin ist die Beurteilung der Emissionen nur in Verbindung mit der FWL sinnvoll.

Bei der Prüfung nach DIN 18 891 sollte daher die bei den Abbrandversuchen erreichte Feuerungswärmeleistung mit angegeben werden.

## **6.4 Emissionsüberwachung**

### **6.4.1 Überwachung von Einzelöfen**

Die Überwachung von Einzelöfen (Nennwärmeleistung in der Regel < 15 kW) beschränkte sich bislang bis auf wenige Ausnahmen nur auf die Überwachung der Abgasfahne nach § 4 (1) 1. BImSchV.

Eine messtechnische Überwachung bei diskontinuierlich beschickten Öfen ist wegen der stark schwankenden Emissionen wenig aussagekräftig und daher wenig sinnvoll, zumal in den meisten Fällen keine geeigneten Messstellen vorhanden sind.

Es ist daher zu empfehlen, die Öfen im laufenden Betrieb visuell zu begutachten, da für den erfahrenen Fachmann hierbei Fehler bei Einstellung der Öfen sowie bei der Bedienung rasch erkennbar sind.

Daneben sollte auch der Brennstoff auf Art und Feuchte untersucht werden. Aus der Beschau der Asche bzw. des Feuerraumes ergeben sich Hinweise, ob falsche Brennstoffe eingesetzt oder Abfälle mitverbrannt wurden.

Der gelegentliche Betrieb (§ 4 Abs. 3) bei offenen Kaminen bzw. bei Feuerungen, die besonders geeignet sind, in der Nachbarschaft Geruchsbelästigungen zu verursachen, sollte konkretisiert werden.

### **6.4.2 Überwachung von Ganzhausheizungen**

Durch den geringeren Wärmebedarf in Wohnhäusern ist es oft nicht mehr notwendig, Heizanlagen mit Nennwärmeleistungen größer 15 kW vorzuhalten. Aus Gründen falsch verstandener „Sicherheit“ wurden bislang Heizungen eher überdimensioniert, während es aus Sicht des Immissionsschutzes sinnvoller ist, die Feuerungen eher knapp zu bemessen und bei extremen Verhältnissen z.B. mit elektrischer Energie zuzuheizen.

Da die Angabe der Nennwärmeleistung auslegungsfähig ist, liegt die von den Herstellern angegebene NWL bei vielen Öfen knapp unter 15 kW.

Es ist daher sinnvoll, die Leistungsgrenze für Ganzhausheizungen entsprechend abzusenken, um eine ausreichende Überwachung gewährleisten zu können.

Um die Betreiber zur Investition in besonders emissionsarme Anlagen anzuregen, sollte nach entsprechender Feststellung bei der Abnahmemessung eine Reduzierung der

Überwachungsdichte möglich gemacht werden. In diesem Zusammenhang ist es auch sinnvoll, eine Norm oder ein Gütesiegel für emissionsarme Feuerungen aufgrund konkreter Anforderungen seitens des Immissionsschutzes zu entwickeln.

Eine weitere Maßnahme zur Vereinfachung der Emissionsüberwachung ist der Einsatz des sogenannten Delta-p-Messverfahrens für partikelförmige Emissionen. Hier kann über den Druckverlust bereits während der Probenahme festgestellt werden, ob der Emissionsgrenzwert sicher eingehalten wird, so dass auf die aufwändige Auswägung des Filters verzichtet werden kann. Weiterhin kann festgestellt werden, ob der Grenzwert signifikant überschritten wird, so dass die Überprüfung der Feuerungsanlage umgehend veranlasst werden kann und nicht das Ergebnis der Auswägung des Filters abgewartet werden muss. Eine Auswägung des Filters ist dann nur noch in den Fällen erforderlich, in denen der Messwert vermutlich in der Nähe des Grenzwerts liegt.

Bei etlichen Feuerungsanlagen wurde festgestellt, dass die Anlage zwar sachgerecht installiert war (meist durch den örtlichen Heizungsbaubetrieb), bei den Messungen ergaben sich aber Überschreitungen der Grenzwerte, die erst durch Eingriffe von Fachleuten der Herstellerfirma abgestellt werden konnten. Wünschenswert ist daher eine überwachte Inbetriebnahme der Anlage mit Bestätigung der korrekten Installation.

### **6.5 Information und Schulung der Betreiber**

Wie bereits mehrfach erwähnt, ist eine intensivere Beratung der Ofenbetreiber erforderlich. Die technisch einwandfreie Funktion einer Feuerung unter Normbedingungen festzustellen reicht im Sinne des Immissionsschutzes nicht aus, vielmehr ist es wichtig, die Betreiber anzuleiten, ihre Feuerungsanlagen optimal zu betreiben. Dies sollte auch und gerade mit den Ofenherstellern erfolgen.

## **7 Weiteres Vorgehen**

### **7.1 Handlungsempfehlungen zur Novellierung der 1. BImSchV im Kontext von EU-Regelungen**

#### **Allgemeines**

Die Grenzwerte in der derzeit gültigen 1. BImSchV gelten für unterschiedliche Sauerstoffbezugswerte (z.B. für die Verbrennung von Holz und Kohle); hier sollte ein Bezug auf einen einheitlichen Wert erfolgen. Aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit mit den Werten größerer Anlagen wird vorgeschlagen, den in der TA Luft für Feststofffeuerungen gültigen Wert von 11 % einzusetzen und die bisherigen Grenzwerte entsprechend anzupassen bzw. dem Stand der Technik entsprechend zu verschärfen.

#### **Unterscheidung in Einzel- und Ganzhausheizung**

Bei der Festlegung von Anforderungen sollte nicht nur die Ofengröße (Nennwärmeleistung), sondern auch der Verwendungszweck herangezogen werden.

Deshalb sollte zwischen Einzelraum- und Ganzhausheizungen unterschieden werden, da Einzelraumheizungen für Festbrennstoffe in der Regel nur gelegentlich betrieben werden, während Ganzhausheizungen wesentlich stärker ausgelastet und deshalb oft auch bezüglich des Emissionsverhaltens weiter entwickelt sind.

#### **Anforderungen an die Feuerungsanlagen**

Infolge des geringeren Wärmebedarfs sollte die Schwelle für die messtechnische Überwachung bei Ganzhausheizungen von 15 kW auf deutlich unter 10 kW reduziert werden.

Auch bei Einzelraumfeuerungen soll die Leistungsgrenze 15 kW auf unter 10 kW reduziert werden, auch um zu erreichen, dass diese Feuerungen nicht zu groß dimensioniert werden, was zu einem schlechten Emissionsverhalten führen würde.

Der Betrieb von Einzelraumfeuerstätten, die neben einer Ganzhausheizung betrieben werden, sollte zeitlich beschränkt werden (mit Ausnahme von Kochherden), diese zeitliche Beschränkung sollte konkretisiert werden (z.B. nicht häufiger als an 10 Tagen

## Handlungsempfehlungen zur Novellierung der 1. BImSchV im Kontext von EU-Regelungen

im Monat für jeweils maximal 5 Stunden).

### **Ableitbedingungen**

Die Ableitung der Abgase ist in der 1. BImSchV nur für Anlagen mit einer Feuerungs-wärmeleistung von 1 Megawatt oder mehr geregelt, bei kleineren Feuerungen ergeben sich die Anforderungen aus dem Baurecht. Zur Vermeidung der sich häufenden Nachbarschaftsbeschwerden sollten konkrete Anforderungen an die Ableitung der Rauchgase gestellt werden, insbesondere bei ungünstigen Bebauungsverhältnissen bzw. Hanglagen.

### **Brennstoffkatalog**

In häuslichen Ganzhaus- und Einzelraumfeuerungen sollten, neben nicht pechgebundenen Braun- bzw. Steinkohlenbriketts, nur naturbelassenes stückiges Holz (Scheitholz), Hackschnitzel sowie Holzpellets eingesetzt werden. Der Einsatz von Reisig und Zapfen sollte z.B. auf das Anfeuern beschränkt werden. Brenntorf sollte aus Gründen des Schutzes der Moore für diese Anlagen aus dem Brennstoffkatalog gestrichen werden.

Der maximale Wassergehalt des Holzes sollte auf einen Wert 20 % (entspr. M20 der prCEN14691) festgelegt werden.

Bei Presslingen aus naturbelassenem Holz (Pellets oder Briketts) können als Bindemittel auch andere Biomaterialien zugelassen werden. Generell kann bei Pellets bei der Festlegung entsprechender Normen eine größere Flexibilität erreicht werden.

### **Besondere Feuerungsanlagen: Holzverarbeitendes Gewerbe**

Nach § 6 (2) der derzeit gültigen 1. BImSchV darf Restholz nur in Feuerungsanlagen mit einer Nennwärmeleistung von mindestens 50 Kilowatt eingesetzt werden. Der Wärmebedarf vieler Betriebe liegt deutlich niedriger, so dass die Anlagen meistens ungünstig unter Teillast und oft ohne Pufferspeicher betrieben werden.

Die Senkung der Leistungsgrenze für den Einsatz von Restholz auf 30 kW bei Einsatz nachgewiesenermaßen emissionsarmer Kesselanlagen in Verbindung mit ausreichend

## Handlungsempfehlungen zur Novellierung der 1. BImSchV im Kontext von EU-Regelungen

dimensionierten Wärmepuffern kann daher zu einer Minderung der Emissionen führen. Nachteilig könnte sein, dass durch diese Senkung diese Anlagen attraktiver werden und es zu einem sprunghaften Anstieg der Anlagenzahlen kommt.

### **Besondere Feuerungsanlagen: Landwirtschaft**

Dem Wunsch nach der Möglichkeit zur Verbrennung weiterer Biobrennstoffe aus der landwirtschaftlichen Produktion sollte unter Beachtung des Immissionsschutzes Rechnung getragen werden. Kleine Feuerungen für Stroh haben sich in der Vergangenheit nicht bewährt, es gibt Forschungsaktivitäten bezüglich Verbrennung von Getreide.

Prinzipiell sollten diese Stoffe in größeren Anlagen verbrannt werden, ab einer Leistung von 100 kW fallen sie unter den Anwendungsbereich der TA Luft (Anlage nach Nr. 1.3 Spalte 2 der 4. BImSchV). Kleinere Anlagen im Bereich von 50 bis 100 kW sollten sich an den Vorgaben der nur wenig größeren Anlagen orientieren.

Eine sinnvolle Möglichkeit zum Einsatz von Biobrennstoffen ist in Form von Presslingen (Pellets) mit genormten Eigenschaften, hier sind Einsatzmöglichkeiten auch bei kleineren Anlagen denkbar.

### **Besondere Feuerungsanlagen: Holzbacköfen**

Holzbacköfen ab einer Backfläche von ca. 3 m<sup>2</sup> (mit Ausnahme nur gelegentlich betriebener Anlagen) sollten nicht mehr vom Geltungsbereich der 1. BImSchV ausgeschlossen werden.

Neuanlagen sollten mit Sekundärmaßnahmen wie Nachverbrennung, Rauchgaswäsche usw. ausgestattet sein, um die betriebsbedingt hohen Emissionen senken zu können. Solange die 1. BImSchV keine Anforderungen an die Anlagen stellte, gab es auch kaum Anlass zu Entwicklung hin zu emissionsarmen Holzbacköfen.

### **Verwendung von Pufferspeichern**

Bei Ganzhausheizungen, die mit biogenen Festbrennstoffen betrieben werden, sind ausreichend dimensionierte Pufferspeicher (mindestens 50 l/kW) vorzusehen, sofern nicht eine kontinuierliche Wärmeabnahme gesichert ist.

### **Messtechnische Überwachung**

Die Ermittlung der Staubemissionen in der bisherigen Verfahrensweise (zentrale Auswägung der Sammelhülsen) führt dazu, dass die Messergebnisse erst einige Wochen nach den Probenahmen vorliegen. Mit Hilfe des Delta-p-Messverfahrens (s. Kapitel 6.4.2) kann vor Ort erkannt werden, ob die Anlage die Grenzwerte für Staub überschreiten wird, so dass sehr schnell Maßnahmen zu emissionsarmer Betriebsweise eingeleitet werden können.

Insbesondere für die privaten Betreiber stellen die Emissionsmessungen einen nicht zu unterschätzenden Kostenfaktor dar. Betreiber besonders fortschrittlicher und emissionsarmer Anlagen könnten z.B. nach entspr. Feststellung bei der Abnahmemessung durch verlängerte Messintervalle „belohnt“ werden.

### **7.2 Überarbeitung weiterer Normen und Regelwerke**

Bei der Prüfung von Kleinfeuerungen nach den einschlägigen DIN-Normen (s. Kap. 5.1.2) sollte neben der Nennwärmeleistung auch die bei den Abbrandversuchen erreichte Feuerungswärmeleistung mit angegeben werden, damit die Prüfergebnisse einfacher für Emissionsberechnungen verwendet werden können.

Auch wären Angaben zum Teillastverhalten der Feuerungen wünschenswert.

Die Prüfergebnisse sollten – wie z.B. in Österreich – der Öffentlichkeit zur Verfügung stehen. Der Kundenwunsch nach emissionsarmen Kleinfeuerungen dürfte zu mehr Innovation in der Entwicklung emissionsarmer Heizsysteme führen.

### **7.3 Öffentlichkeitsarbeit**

Der Öffentlichkeit sollte klar gemacht werden, dass

- Holzfeuerungen zwar als CO<sub>2</sub>-neutral gelten, im Vergleich zu fossilen Energien aber erheblich höhere Emissionen krebserzeugender und besonders gesundheitsschädlicher Emissionen verursachen können,
- bei moderner Anlagentechnik, geeigneten Brennstoffen und sachgemäßem Betreiberverhalten relativ emissionsarm betrieben werden können,

## Handlungsempfehlungen zur Novellierung der 1. BImSchV im Kontext von EU-Regelungen

- die Mitverbrennung von Abfällen zu erhöhten Emissionen von PCDD/F führt und Schäden an der Anlage verursachen kann.

### **7.4 Weiterer Forschungsbedarf**

#### **Anlagenbestand**

Da es keine systematische Erfassung des gesamten Anlagenbestandes z.B. durch die Schornsteinfeger gibt, können die Anlagenbestände derzeit nur über Einzelerhebungen bzw. Herstellerbefragungen hochgerechnet werden (s. Kapitel 4.1.1). Wünschenswert ist eine aktuelle, statistisch gut abgesicherte Neuerhebung des Anlagenbestandes, die auch die Entwicklungen auf dem Ofenmarkt angemessen berücksichtigt.

#### **Energieeinsatz**

Die Angaben zum Endenergieverbrauch insbesondere von Holz sind sehr uneinheitlich und liegen z.T. bis zu einem Faktor von 10 auseinander (s. Kapitel 4.1.2). Noch schwieriger ist die Zuordnung des Energieeinsatzes zu bestimmten Ofenarten. Verlässliche Angaben können nur im Rahmen einer systematischen, aber sehr aufwändigen Neuerhebung erhalten werden.

#### **Holzbacköfen**

Bei den Holzbacköfen sind nur vage Schätzungen bezüglich der Bestandszahlen möglich. Es gibt bislang nur wenige Messungen zur Ermittlung der Emissionen. Weiterhin sind Untersuchungsprogramme notwendig, um Möglichkeiten für Minderungsmaßnahmen bei diesen Anlagen zu ermitteln.

#### **Messergebnisse von polychlorierten Biphenylen (PCB)**

Es gibt wenige Messungen zu PCB bei Kleinf Feuerungsanlagen für Festbrennstoffe. Die bisher vorliegenden Ergebnisse lassen keine besonders hohen Emissionen erwarten. Zur Absicherung sollten jedoch Messungen an Anlagen mit Einsatz chlorhaltiger Brennstoffe (z.B. Spanplatten) durchgeführt werden, um dies weiter abzuklären.

### **Messungen an Kaminen und Kaminöfen**

Bei offenen Kaminen, Kamineinsätzen und Kaminöfen stehen insgesamt nur wenige Datensätze zur Verfügung, es fehlen für diese Ofenarten z.B. geeignete Emissionsfaktoren für Benzol. Bei den Kaminöfen, deren Bestand derzeit stark anwächst, sind daher weitere Messungen wünschenswert, um die zukünftige Entwicklung besser prognostizieren zu können.

Interessant wäre auch, für Kaminöfen den Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit auf die Emissionen zu ermitteln.

### **Minderungsmaßnahmen**

In Kapitel 2.4 und 2.5 wurden primäre und sekundäre Maßnahmen zur Emissionsminderung, insbesondere für Partikel und organische Stoffe beschrieben. In Kap. 3.3.5 wurden Messergebnisse an einem einfachen Abgaskatalysator vorgestellt. Hierzu sind noch weitere Untersuchungen notwendig. Da die Notwendigkeit von Minderungsmaßnahmen von den gesetzlichen Vorgaben abhängt, sollten hier auch staatlicherseits Untersuchungen angestoßen und gefördert werden.

### **Getreidefeuerungen**

Im Bereich Getreidefeuerungen gibt es derzeit Forschungsprojekte, besonders zur Reduzierung der Staubemissionen. Nur die Einhaltung gewisser Mindeststandards eröffnet die Möglichkeit, dass die Getreideverbrennung in beschränktem Umfang zugelassen werden kann. Die begonnenen Projekte sollten zielstrebig weitergeführt werden.

### **Polycyclische Aromaten (PAK)**

PAK werden von mehreren Quellengruppen emittiert. Untersuchungen über bestimmte, für Holzfeuerungen spezifische PAK-Muster bzw. besondere Einzelkomponenten (z.B. Reten, 7-Isopropyl-1-Methylphenanthren) sind wünschenswert, um die Brücke von den Emissionen zu den Immissionen an krebserzeugenden und besonders gesundheits-schädlichen Luftverunreinigungen schlagen zu können.

## **8 Klimaschutz als Motor des Einsatzes und der Entwicklung von Energiepflanzen**

Die globale Klimaveränderung, zu der menschliche Aktivitäten – insbesondere die Emissionen von Treibhausgasen wie Kohlendioxid aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe – beitragen, ist eine der größten Herausforderungen unserer Zeit. Nur rasches Handeln wird es der Menschheit ermöglichen, den für alle bereits spürbaren und bereits in Reaktionen der Flora und Fauna ablesbaren Wandel unserer Klimazonen zu verlangsamen und langfristig aufzuhalten. Hierbei spielen die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Energieumwandlung eine Schlüsselrolle. Das Kyoto-Protokoll von 1997 sieht vor, dass die Industrieländer die Emissionen der im Protokoll genannten Treibhausgase deutlich reduzieren. Darüber hinausgehend hat die Bundesregierung sich 1995 freiwillig zum Ziel gesetzt, die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2005 gegenüber 1990 um 25 % zu reduzieren. Auch das Bundesland Baden-Württemberg hat sich verpflichtet, hierzu einen angemessenen Beitrag zu leisten und die CO<sub>2</sub>-Emissionen von derzeit ca. 78 Mill. t/a pro Jahr auf unter 70 Mill. t/a bis 2005 und unter 65 Mill. t/a bis 2010 zu reduzieren.

Um die Klimaschutzziele zu erreichen ist es erforderlich, die drei Klimaschutzelemente rationelle Energieumwandlung, sparsame Energienutzung und erneuerbare Energien gleichrangig einzusetzen. Während die kurzfristig angestrebten Reduktionen im Wesentlichen noch durch rationellere Energieumwandlung und Energienutzung erreicht werden können, sind eine lang dauernde stetige Reduktion von CO<sub>2</sub> und die Abkehr von der Abhängigkeit von den fossilen Energieträgern nur durch den Einsatz regenerativer Energien oder die Nutzung der Kernenergie zu erreichen.

Neben der weitgehend bereits ausgenutzten Wasserkraft und der weiter aufstrebenden Windenergie wird hier der Einsatz fester und flüssiger biogener Brennstoffe einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der Ziele leisten müssen.

Insbesondere der Einsatz biogener Festbrennstoffe in kleinen und mittleren Feuerungsanlagen birgt jedoch latent auch die Gefahr in sich, die in den letzten Jahrzehnten erreichten Erfolge im Bereich der Luftreinhaltung bei einzelnen Schadstoffkomponenten, wie z. B. den krebserzeugenden Stoffen oder den Staubemissionen, wieder zunichte zu machen.

Die Nutzung regenerativer Energien ist anerkanntermaßen ein wichtiger Baustein im Klimaschutz. Erkennbar ist jedoch, dass hier beim Einsatz der verschiedenen regenerativen Energiequellen kein allgemeingültiger Weg für alle Regionen und Bundesländer zu finden ist.

So wird es beispielsweise immer Regionen geben, denen eher zur Windenergienutzung zu raten ist oder deren Schwerpunkt bei der Erzeugung und der Vermarktung biogener Brennstoffe liegen sollte.

Unter Berücksichtigung dieser regionalen Unterschiede sollte es das Ziel sein, auf Bundesebene das Thema Biomassenutzung in Form von Grundpositionen festzulegen und so ein einheitliches Verwaltungshandeln und eine einheitliche Förderrichtung zu ermöglichen. Beispielhaft seien hier die Grundpositionen des Landes Schleswig-Holstein genannt [8-1]:

Dort wurden drei Grundpositionen veröffentlicht:

- „Ziel der Landesregierung bei der energetischen Nutzung von Biomasse ist der vorrangige Einsatz von Reststoffen, nachrangig die Nutzung von Energiepflanzen mit positiver Öko-Bilanz.
- Neben der energetischen Nutzung wird die Landesregierung auch die stoffliche Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen intensivieren.
- Die energetische Biomassenutzung darf den Bemühungen der Landesregierung zur Etablierung einer umweltverträglichen landwirtschaftlichen Produktion nicht entgegenarbeiten.
- Es gilt, ein besonderes Augenmerk auf die Sorgfalt bei der Errichtung und dem Betrieb der Feuerungsanlagen zu richten und sicherzustellen, dass die Anlagen dem Stand der Technik entsprechend betrieben werden“.

Solche mehrere Jahre gültigen Grundpositionen verbunden mit gezielten langfristigen landesspezifischen Förderprogrammen würden technische Rahmenbedingungen für die Kesselbauer und Brennstofflieferanten festlegen, Investitionssicherheit für die Landwirte bedeuten und die Versorgungssicherheit mit Brennstoffen für die Anlagenbetreiber garantieren.

Weiterhin sollte in der synoptischen Aufarbeitung der weitere Forschungs- und Untersuchungsbedarf ermittelt werden, um beispielsweise über Förderprogramme gezielte anwendungsorientierte Untersuchungen anstoßen zu können.

Mögliche Ansatzpunkte sind hier beispielsweise die Brennstoffnormung, die Förderung des Anbaues geeigneter Brennstoffe, die Unterstützung von Vermarktungsbestrebungen und vor allem die Schaffung von Planungs- und Investitionssicherheit aller beteiligten Akteure, insbesondere der Landwirte und Anlagenbetreiber.

Neben der Förderung der alleinigen Verbrennung oder Mitverbrennung von Biomasse in geeigneten modernen Großanlagen, ist auch unter gewissen Voraussetzungen an die Verbrennung in Kleinfeuerungsanlagen zu denken. Großanlagen bieten jedoch eine schnelle und umweltfreundliche Form, die gesetzten Klimaschutzziele zu erreichen und ermöglichen auch eine große Flexibilität beim Einsatzspektrum der einsetzbaren Biomassen und deren wechselnden Marktverfügbarkeit und sind deshalb zu favorisieren.

Bei der Verbrennung von biogenen Festbrennstoffen in Kleinfeuerungsanlagen entsteht im Gegensatz hierzu leicht ein Zielkonflikt zwischen Klimaschutz und Luftreinhaltung. Bei Kleinfeuerungsanlagen ist deshalb die Definition und Normung von Brennstoffen wichtiger Ausgangspunkt der Betrachtungen. Kesselbauern, Anlagenbetreibern und den überwachenden Schornsteinegern ist ein verbindliches und planbares Handlungsfeld zu eröffnen.

Bei der Getreideverbrennung wäre z.B. die Festlegung und Beschränkung auf eine bestimmte Getreidesorte wie Roggen oder Triticale denkbar. Bei der Pelletverbrennung (derzeit Holzpellets wie in §3, Abs. 1 Nr. 5a der 1. BImSchV genannt) könnten weiter Pelletkategorien (z.B. Pellets mit prozentualem Holzmindestanteil und Getreide/Stroh-Pellets) mit genormten Mindesteigenschaften in die Regelbrennstoffliste aufgenommen werden. Die Kesselhersteller wären so in der Lage, ihre Anlagen entsprechend zu optimieren und für die einsetzbaren Brennstoffe einzeln freizugeben.

## 9 Zusammenfassung

Ziel des Vorhabens war es, den aktuellen Stand und die Entwicklung der Emissionen an besonders gesundheitsgefährdenden Luftschadstoffen bei Kleinfeuerungsanlagen zu ermitteln und geeignete Maßnahmen zur Emissionsminderung abzuleiten.

Hierzu wurden die in der Literatur beschriebenen Emissionsuntersuchungen ausgewertet. Die relevanten Emissionsdaten, erweitert um Ergebnisse eigener Untersuchungen, wurden in einer Datenbank erfasst und mittlere Emissionsfaktoren für die verschiedenen Anlagengruppen ermittelt.

Auf der Basis aktueller Energieverbrauchsdaten wurde das Emissionsaufkommen für eine Auswahl von Luftschadstoffen bezogen auf das Jahr 2003 berechnet.

Demnach stammt bundesweit ein Großteil der Emissionen von polycyclischen Aromaten, insbesondere von Benzo(a)pyren, aus Kleinfeuerungen für Festbrennstoffe.

Beim Feinstaub (PM10) liegen die Emissionen aus Kleinfeuerungsanlagen bereits jetzt knapp über den Abgasemissionen des reinen Straßenverkehrs (ohne sonstiger Verkehr und Reifenabrieb).

Anhand zweier Szenarien wurden die Emissionen für die Jahre 2005, 2010, 2015 und 2020 hochgerechnet. In Prognose 1 wurde zunächst nur der Endenergieverbrauch verändert. Zwischen 2003 und 2020 wurde ein Rückgang des Einsatzes von Kohlebrennstoffen um 50 - 60 % und eine Zunahme des Einsatzes von Brennholz um 20 % angenommen. Dies entspricht einer Zunahme des gesamten Energieverbrauchs um rund 10 %. Bei dieser Prognose wurde keine Verbesserung des Emissionsverhaltens der einzelnen Arten von Feuerungsanlagen berücksichtigt.

In Prognose 2 wurde angenommen, dass durch Minderungsmaßnahmen bei Holzfeuerungen die auf den Energieverbrauch bezogenen spezifischen Emissionen zwischen 2003 und 2020 um 40 % sinken werden. Für Kohlefeuerungen wurde keine Verbesserung bzgl. des Emissionsverhaltens unterstellt.

Ohne Minderungsmaßnahmen ist zu erwarten (Prognose 1), dass die Emissionen krebserzeugender und gesundheitsgefährdender Luftschadstoffe aus Kleinfeuerungsanlagen (Benzol, Benzo(a)pyren, Feinstaub) zwischen 6 und 20 % ansteigen werden. Ein Rückgang der Emissionen kann langfristig nur erreicht werden, wenn verstärkt

Minderungsmaßnahmen (feuerungstechnische und/oder sekundäre Maßnahmen) zum Einsatz kommen.

Bei den hier zugrunde gelegten Minderungspotentialen wird, wegen der Zunahme des Holzeinsatzes in den nächsten Jahren, die berechnete Minderung je nach Schadstoff mit ca. 27 – 39 % moderat ausfallen (Prognose 2).

Bei den Emissionen von Benzol beträgt der Anteil der Kleinf Feuerungsanlagen 2003 im Vergleich zu den Abgasemissionen des Straßenverkehrs noch etwa ein Viertel. Bis 2020 wird wegen des zu erwartenden Rückgangs bei den Abgasemissionen des Straßenverkehrs die Bedeutung der Kleinf Feuerungsanlagen bzgl. der Emissionen von Benzol stark zunehmen.

In einem zweiten Schritt des Vorhabens wurden geeignete technische Minderungsmaßnahmen untersucht und bewertet und einige Unterprojekte mit Prüfstandsmessungen durchgeführt.

Aus Untersuchungen zum Einfluss des Wärmespeichers auf die Emissionen wurden Hinweise zur Dimensionierung von Pufferspeichern an Heizkesseln abgeleitet.

Die Simulation des Wartungszustandes und insbesondere des Betreiberhaltens auf die Emissionen bei einem modernen Stückholzkessel führte zu Umrechnungsfaktoren für die Übertragung von Prüfstandsmessungen auf die beim Betreiber vorliegenden tatsächlichen Betriebsverhältnisse.

An einem einfachen Abgaskatalysator konnte bei einem Kachelofen-Heizeinsatz eine Minderung der Emissionen krebserzeugender und besonders gesundheitsschädlicher Luftschadstoffe von teilweise bis über 50 % beobachtet und weitere Erkenntnisse zur Realisierung nachgeschalteter Maßnahmen gewonnen werden.

Die Situation bezüglich Abgasminderungsverfahren für Kleinf Feuerungsanlagen für Festbrennstoffe kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Für größere Kesselanlagen sind Abgasreinigungsverfahren mit hoher Abscheideleistung (orientiert an den Anforderungen z.B. der TA Luft) verfügbar. In aktuellen Forschungsprojekten wird daran gearbeitet, diese Verfahren auch auf kleinere Anlagen (mit Feuerungswärmeleistungen zwischen 100 und 250 kW) zu übertragen.
- Auch bei kleineren Kesselanlagen und Einzelraumfeuerungen gibt es mittlerweile Ansätze zur Emissionsminderung. Diese Abgasreinigungstechniken müssen

## Zusammenfassung

kompakt, einfach handhabbar, in bestehende Anlagen integrierbar und zu einem akzeptablen Preis verfügbar sein. Die bisher erreichten Minderungsraten liegen i.d.R. noch weit unter 90 %, die Systeme beeinflussen z.T. das Brennverhalten der Feuerung. Bisher kann noch kein derartiges System als marktreif betrachtet werden.

Nach einem Überblick der in Deutschland und im Ausland vorhandenen Regelwerke zu Kleinfeuerungsanlagen für Festbrennstoffe wurden Probleme bei der Anwendung der nationalen Anforderungen (1. BImSchV) aufgezeigt. Bei einem Fachgespräch mit nationalen Experten am 29.11.2004 in Berlin wurden diese Probleme und die Möglichkeiten zur Lösung diskutiert.

Als Ergebnis des Arbeitsprogramms wurden Handlungsempfehlungen für die geplante Novellierung der 1. BImSchV abgeleitet. Wesentliche Punkte sind:

- Unterscheidung in Ganzhaus- und Einzelraumfeuerungen,
- verschärfte Grenzwerte, Senkung der Leistungsgrenze für die Überwachung und Einbau ausreichend dimensionierte Pufferspeicher bei Ganzhausheizungen,
- verschärfte Anforderungen und Beschränkungen bei Einzelraumfeuerungen,
- Verbesserung bei der Überwachung: Einstufungsmessungen, Erleichterung für besonders emissionsarme Anlagen, Beratung der Betreiber

## 10 Anhänge

### 10.1 Abkürzungsverzeichnis

1. BImSchV	Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen)
B(a)P	Benzo(a)pyren
CEN	Comité Européen de Normalisation (Europ. Komitee für Normung)
CO	Kohlenstoffmonoxid; Kohlenmonoxid
BTX, BTEX	Flüchtige monoaromatische Verbindungen, wie Benzol, Toluol, Xylole, Ethylbenzol
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
EPA	Environmental Protection Agency
FWL	Feuerungswärmeleistung
ifeu	Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
I-TE, I-TEQ	Internationales Toxizitätsäquivalent
HCl	Chlorwasserstoff
H <sub>u</sub>	Heizwert (unterer Heizwert)
IVD	Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen der Universität Stuttgart
NM VOC	Non-Methane Volatile Organic Compounds (flüchtige organische Verbindungen ohne Methan)
NO <sub>x</sub>	Stickstoffoxide (NO + NO <sub>2</sub> )
NWL	Nennwärmeleistung
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PAK4	Summe aus 4 krebserzeugenden PAK
PAK16, EPA-PAK	Summe aus 16 PAK nach EPA-Protokoll
PCDD/F	polychlorierte p-Dibenzodioxine und -furane
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PM10	Particulate Matter (Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von 10 µm)
SO <sub>x</sub>	Schwefeloxide
TA-Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
TEF, TEQ	Toxizitäts-Äquivalenzfaktor, Toxizitäts-Äquivalente
UMEG	Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit Baden-Württemberg
VOC	Volatile Organic Compounds (flüchtige organische Verbindungen)

## 10.2 Literaturverzeichnis

### KAPITEL 1

- [1-1] **Deutsches Treibhausgasinventar 1990 – 2002**, Nationaler Inventarbericht (NIR 2004). Berichterstattung unter der Klimakonvention der vereinten Nationen. Umweltbundesamt. Berlin 2004
- [1-2] **Emissionen nach Emittengruppen in Deutschland 1990 – 2001**, Umweltbundesamt, April 2003. [www.env-it.de/umweltdaten](http://www.env-it.de/umweltdaten)
- [1-3] **Luftschadstoffemissionskataster Baden-Württemberg 2002**, Bericht-Nr. 4-04/2004, UMEG (Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit Baden-Württemberg), Karlsruhe, 2004
- [1-4] **Kernenergieausstieg im Konsens mit den Stromversorgern angestrebt**. Deutscher Bundestag 2005, [www.bundestag.de/bp/2000/bp0002/0002028a](http://www.bundestag.de/bp/2000/bp0002/0002028a)
- [1-5] **Für den Ausstieg aus der Kernenergie**, Deutscher Bundestag 2005, [www.bundestag.de/bp/2001/bp0101/0101034c](http://www.bundestag.de/bp/2001/bp0101/0101034c)
- [1-6] [www.ag-energiebilanzen.de](http://www.ag-energiebilanzen.de) darin:  
**Endenergieverbräuche der Haushalte und des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen**, Stand 10/2004
- [1-7] **Umweltpolitik: Erneuerbare Energie in Zahlen – nationale und internationale Entwicklung – Stand März 2004**. Hrsg: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Referat Öffentlichkeitsarbeit, Berlin 2004

### KAPITEL 2

- [2-1] Jakube, H.-D., Jeschkeit, H.: **Chemie**, Band 2, VEB F. A. Brockhaus Verlag, Leipzig, 1987
- [2-2] Ebert, H.-P.: **Heizen mit Holz in allen Ofenarten**. 9. überarbeitete und erweiterte Auflage, ökobuch Verlag, Staufen bei Freiburg, 2004
- [2-3] Holz-Energie-Fibel: **Holzenergienutzung, Technik, Planung, Genehmigung**, 2002; Hrsg: Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg

- [2-4] Hartmann, Hans (Hrsg.): **Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen**. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Gülzow 2003
- [2-5] Launhardt, T.: **Umweltrelevante Einflüsse bei der thermischen Nutzung fester Biomasse in Kleinanlagen**. Dissertation, Weihenstephan, Forschungsbericht Agrartechnik 397, 2002
- [2-6] Strehler, A. et al.: **Prüfung des Emissionsverhaltens von Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe und Entwicklung feuerungs- und regelungstechnischer Bauteile zur Verbesserung der Feuerungsqualität**, StMLU-Materialien 109, 1994, Technische Universität München-Weihenstephan, Hrsg.: Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, München
- [2-7] Brandt, F.: **Brennstoffe und Verbrennungsrechnung**, Fachverband Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau e. V. (FDBR), FDBR-Fachbuchreihe Band 1, 3. Auflage. Essen 1999
- [2-8] Hartmann, H., Böhm, Th., Maier, L.: **Naturbelassene biogene Festbrennstoffe – umweltrelevante Eigenschaften und Einflussmöglichkeiten**, StMLU-Materialien 154, 2000, Institut und Bayerische Landesanstalt für Landtechnik der Technischen Universität München-Weihenstephan, Hrsg.: Bayerischen Landesamt für Umweltschutz, Freising, 2000
- [2-9] Bertozzi, L.: **Erstellen einer Kondensationsanlage an der Holzfeuerung des neuen Wärmeverbundes Schwanden / GL**. Projekt Nr. 28.463. Schlussbericht im Auftrag des Bundesamtes für Energie, CH-Bern, 2003
- [2-10] Erich, E.: Persönliche Mitteilung von Dr. Erich, Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V., Duisburg, 2005
- [2-11] Eutec.: EUTEC-Katalysator. **Technologien der Zukunft**. Firmenprospekt eutec Energie und Umwelttechnik GmbH, Amberg, 1985
- [2-12] FNR Fachagentur nachwachsende Rohstoffe, Gülzow; Projekte 2005: **Weiterentwicklung einer Feuerungsanlage für die Nutzung fester Bioenergieträger mit dem Schwerpunkt Staubreduzierung durch Einsatz eines Elektrofilters**, Förderkennzeichen (FKZ) 22017603: **Untersuchungen zum Emissionsverhalten von getreide- und halmgut-**

- artigen Brennstoffen für Feuerungsanlagen in der Praxis**, FKZ 22018003  
**Kleinf Feuerungsanlage für Getreide und Stroh**, FKZ 22019303  
**Prototypentwicklung zur energetischen Nutzung von Getreide und Stroh in dezentralen Wärmeerzeugungsanlagen mit Leistungen unter 1 MW**, FKZ 22018103  
**Dezentrale energetische Nutzung von Getreide und Stroh - Entwicklung neuer genehmigungsfähiger Verbrennungsanlagen**, FKZ 22018903
- [2-13] Good, J.: **Verbrennungsregelung bei automatischen Hackschnitzelfeuerungen**. Dissertation Nr. 9771, ETH Zürich, 1992
- [2-14] H. Hartmann, H., Roßmann, P., Link, H. und Marks, A.: **Erprobung der Brennwerttechnik bei häuslichen Holzhackschnitzelfeuerungen mit Sekundärwärmetauscher**. Berichte aus dem TFZ Nummer 2, Technologie- und Förderzentrum (TFZ) im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Straubing, 2004
- [2-15] IGEKA: **Katalysator IGEKA-Glocke**. Firma ABATEC Umwelt-Verfahrenstechnik GmbH, Jena, 1997
- [2-16] Jirkowsky, Ch.: **Nasse Entstaubung. Rauchgasreinigung in Biomasse-Heizkraftwerken**. BWK Bd. 56, Nr. 5, S. 33-35, 2004
- [2-17] Kerschbaumer, D.: **Regelung einer Stückholzfeuerung**. Dissertation, Institut de Microtechnique, Université de Neuchâtel, 1990
- [2-18] Kleine-Voßbeck, H.: **Katalysatoren**. Das Schornsteinfegerhandwerk, Heft 9, Seite 17-29, 1988
- [2-19] Schmatloch, V.: **Partikelabscheider für handbeschickte Holzfeuerungen**. EMPA, CH-Dübendorf, 2004
- [2-20] Struschka, M.: **Die Emissionssituation von Kachel-Grundöfen**. Kachelofen & Kamin, Nr. 4, S. 6-12, 1994
- [2-21] Struschka, M., Emich, O., Baumbach, G.: **Untersuchungen an einem Stückholzkessel mit und ohne Wärmespeicher zur Ermittlung optimaler Speichergrößen**. Universität Stuttgart, Institut für Verfahrenstechnik und

- Dampfkesselwesen (IVD) im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe, 2001 (in diesem Bericht in Kapitel 10.6)
- [2-22] UMEG: **Emissionsmessungen an einem holzbefeuerten Kachelofen-Heizeinsatz**. UMEG, Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit Baden-Württemberg, Messbericht Nr. 43-04/05, Karlsruhe, 2005
- [2-23] Winkel, O.: **Entwicklung eines Entstaubungsaggregates für Abgase aus Holz- Kleinf Feuerungsanlagen**. Endbericht zum Projekt Nr. 1331 im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz. Ing.Büro O. Winkel, Parsberg-Rudenshoven, 2004
- [2-24] Zuberbühler, U.: **Maßnahmen zur feuerseitigen Emissionsminderung bei der Holzverbrennung in gewerblichen Anlagen**. Erschienen in der Reihe IVD-Berichte als Nr. 50. Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD), Universität Stuttgart, 2002
- [2-25] Struschka, M.; Straub, D.; Baumbach, G.: **Vergleich der Schadstoffemissionen bei der Verbrennung von Braunkohlenbriketts und Buchenscheitholz in marktgängigen Feuerstätten**. Bericht Nr. 30 – 1994. Institut für Dampfkesselwesen und Luftreinhaltung – Abteilung Reinhaltung der Luft. Universität Stuttgart, Sept. 1994
- [2-26] Zuberbühler, U., Baumbach, G.: **Emissionsarme Verbrennung von problematischen gewerblichen und industriellen Rest- und Abfallhölzern in Pilotanlagen unter 1 MW Feuerungsleistung**, Bericht Nr. 38, 1997, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen Uni Stuttgart
- [2-27] Kaltschmitt, M., Hartmann H. (Hrsg.) (2001): **Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken, Verfahren**. Springer-Verlag, Berlin 2001
- Hartmann, H.; Kaltschmitt, M. (Hrsg.): **Biomasse als erneuerbarer Energieträger**. Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Band 3, 2. Auflage 2002. ISBN 3-7843-3197-1
- [2-28] Struschka, M.; Straub, D.; Baumbach, G: **Schadstoffemissionen von Kleinf Feuerungsanlagen**. VDI Fortschritt-Berichte ,1988, Reihe 15: Umwelttechnik, Nr. 60. VDI-Verlag, Düsseldorf

- [2-29] pers. Mitteilungen von Hrn. Dr. Struschka zu Emissionsverläufen bei manuell und automatisch beschickten Holzfeuerungsanlagen, Institut für Dampfkesselwesen der Universität Stuttgart (IVD), August 2005
- [2-30] H. Bichlmaier: **Holzfeuerungen mit elektronischer Steuerung oder Regelung**, K&L Magazin, Heft 4, S. 64-71, 1996
- [2-31] A. G. Meiering: **Entwicklung eines emissionsmindernden Regelmechanismus für Feststoff-Feuerungsanlagen**, Bayerische Landesanstalt für Landtechnik, TU München Weihenstephan, Freising, August 1991

### KAPITEL 3

- [3-1] **Emissionsmessungen an Holzfeuerungen im Regelungsbereich der 1. BImSchV** – Feldmessprogramm in Baden-Württemberg, Heizperiode 2002/2003, Bericht Nr.: 43-18/03, UMEG
- [3-2] Struschka, M.; Zuberbühler, U., Straub, D., Baumbach, G.: **Emissionsminderung bei Holzbacköfen**, IVD-Bericht Nr. 49 – 2002, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen der Universität Stuttgart
- [3-3] **Economic Evaluation of Air Quality Targets for PAH's**, European Commission DG Environment, 2001
- [3-4] **Sampling Program for Residential Wood Combustion**, Winter of 1998-99 Study Report, Environment Canada, Quebec Region, 2000
- [3-5] **PAH in der Luft – Messungen in Graz und Linz 2001**, Umweltbundesamt GmbH, Wien 2002
- [3-6] **PAK-Immissionsmessungen in Zusammenhang mit Holzfeuerungen im Winter 2002/2003**, UMEG, Karlsruhe 2004
- [3-7] **Aktualisierung der Gesamtstaub- und PM10-Emissionen des Luftschadstoffemissionskatasters Baden-Württemberg 2002** (Bericht Nr. 4-04/2004, Lit. [1-3]), UMEG (Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit Baden-Württemberg), Sachstand 29.08.2005
- [3-8] **Emissionen aus Kleinf Feuerungsanlagen 2002 im Land Brandenburg**, Fachbeiträge des Landesumweltamtes Heft Nr. 71, Cottbus, Potsdam 2002

- [3-9] **Emissionskataster Luft Nordrhein-Westfalen 1996/97, Essen, 1999**  
Emissionskataster 1999/2000 unter:  
<http://www.gis.nrw.de/ims/ekatsmall/welcome.htm>
- [3-10] **Emissionskataster in Hessen Sachstand 1999**, Wiesbaden, Oktober 1999
- [3-11] **Emissionskataster für Bayern – 1996**,  
<http://interl.bayern.de/emissionskataster/php/start.php>
- [3-12] Jörß, W.: **Luftreinhaltung 2020 – Modellierung der Emissionen**, Prüfung der Daten und Annahmen des RAINS-Modells für Deutschland im Rahmen der Europäischen Luftreinhaltungspolitik (CAFE), Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT), Werkstattbericht 69, Berlin, Okt. 2004
- [3-13] EU Working Group On Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, **Ambient Air Pollution by Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH)**, Juli 2001
- [3-14] <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-daten/daten/dioxine.htm>
- [3-15] Thanner, G., Moche, W.: **Emissionen von Dioxinen, PCBs und PAHs aus Kleinf Feuerungen**. Monographien Band 153, 2002; Hrsg. Umweltbundesamt GmbH, A – Wien

#### KAPITEL 4:

- [4-1] Pfeiffer, F., Struschka, M., Baumbach, G.: **Ermittlung der mittleren Emissionsfaktoren zur Darstellung der Emissionsentwicklung aus Feuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher**. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 295 46 364. UBA-Text 14-00, Hrsg. Umweltbundesamt, Berlin
- [4-2] **Endenergieverbrauch in Deutschland 2002**, M-19/2003. Verband der Elektrizitätswirtschaft –VDEW- e. V., Frankfurt 2003
- [4-3] Dieter, M.: **Holzbilanzen 2001 und 2002 für die Bundesrepublik Deutschland**, Arbeitsbericht des Instituts für Ökonomie 2003 / 2. Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Hamburg 2003
- [4-4] Fahl, U. u. a.: **Energieverbrauchsprognose für Bayern – Gutachten im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Verkehr und**

- Technologie, Kurzfassung. Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Stuttgart 2000
- [4-5] **Energieholzpotenzial Oberfranken:** <http://www.energieagentur-oberfranken.de>, Holzenergiepotenzialstudie
- [4-6] **Gesamtholzbilanz der Bundesrepublik Deutschland:**  
Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, <http://www.bfafh.de/>
- [4-7] Energie Daten 2002, **Energie Daten 2003 – nationale und internationale Entwicklung.** Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, Berlin
- [4-8] Nitsch, J., Rösch, C. u. a.: **Schlüsseltechnologie Regenerative Energien,** Teilbericht im Rahmen des HGF-Projektes „Global zukunftsfähige Entwicklung – Perspektiven für Deutschland“, Arbeitsgemeinschaft FZK, DLR, FZJ, GMD. Stuttgart, Karlsruhe 2001     darin:  
Prognose Endenergieverbrauch bis 2050 für HH und HDG
- [4-9] **Energieversorgung im Kleinverbrauchssektor in Deutschland.** Informationszentrum Energie (IE), Landesgewerbeamt Baden-Württemberg 2004
- [4-10] **Holzenergiefibel: Holzenergienutzung – Technik, Planung und Genehmigung.** Hrsg. Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, Stuttgart 2002
- [4-11] **Holzverbrauch und -erzeugung in unterschiedlichen Branchen.**  
<http://www.infoholz.de>
- [4-12] **Der Energieholzmarkt Bayern – LWF-Bericht Nr. 26.** Bayerische Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft, <http://www.lwf.bayern.de/lwfbericht/lwfber26>
- [4-13] Buddenberg, J.; Kralemann, M.: **Welches Potenzial bietet der Energieholzmarkt wirklich?** – Status und Entwicklungstendenzen des Energieholzmarktes in Deutschland am Beispiel Niedersachsens, Projekt Nr. 3009, Niedersächsische Energieagentur, 2002
- [4-14] **Der Festbrennstoffmarkt in Deutschland 2003.** Homepage der Firma heizprofi bzw. Rheinbraun Brennstoff GmbH.  
[www.heizprofi.com/marktinfo/beheizung.html](http://www.heizprofi.com/marktinfo/beheizung.html)

- [4-15] TEKES, Zentrum für Technologieförderung: **Technologie und Markt für Holzbrennstoffe** – Erzeugung und Einsatz von Holzbrennstoffen bei Kleinverbrauchern 2002. Helsinki 2004 (Daten aus Finnland)
- [4-16] Merten, D.; Falkenberg, D.; Nill, M.; Kaltschmitt, M.: **Wärmegewinnung aus Biomasse**. Anlagenband zum Abschlussbericht Energieverbrauch der privaten Haushalte und des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistung (GHD) [29], Projektnummer 17/02. Leipzig 2004
- [4-17] Struschka, M.; Zuberbühler, U.; Dreiseidler, A.; Dreizler, D., Baumbach, G. sowie Hartmann, H.; Schmid, V.; Link, H.: **Ermittlung und Evaluierung der Feinstaubemission aus Kleinf Feuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher sowie Ableitung von geeigneten Maßnahmen zur Emissionsminderung**. Endbericht zum UBA-Forschungsvorhaben 299 44 140. UBA-TEXTE Nr. 41-03, Umweltbundesamt, Berlin, 2003
- [4-18] Marutzky, R.: **Biomassen auf Basis von Holz als Brennstoff in Österreich, der Schweiz und Deutschland – Nutzungssituation – Theoretische Potenziale – Qualitäten – Wettbewerbssituation – Preistendenzen**. Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI), Braunschweig 2004
- [4-19] Homepage der **Statistik der Kohlenwirtschaft**: [www.kohlenstatistik.de](http://www.kohlenstatistik.de)
- [4-20] Goy, G.: **Holz – ein Bioenergieträger mit Zukunft?**. Wochenbericht 26/99. <http://www.diw.de>. Berlin, 1999
- [4-21] Scheuermann, A.; Thrän, D. u. a.: **Monitoring zur Wirkung der Biomasseverordnung auf Basis des erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG)**. Endbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 201 41 132 des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und des Umweltbundesamtes. Institut für Energetik und Umwelt. Leipzig, Dez. 2003
- [4-22] Schlomann, B.; Ziesing, H.-J.; Geiger, B.: **Erarbeitung kostengünstiger Erhebungsformen zur Erfassung des effektiven Energieverbrauchs im Bereich Haushalte und Kleinverbraucher**. Projekt Nr. NF-III-03. Abschlussbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. Berlin, Karlsruhe, München, Oktober 2000

- [4-23] Schlomann, B. u. a.: **Energieverbrauch der privaten Haushalte und des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD)**. Projektnummer 17/02. Abschlussbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit. Karlsruhe, Berlin, Nürnberg, Leipzig, München, April 2004
- [4-24] Leible, L.; Fürniß, A. u. a.: **Energie aus biogenen Rest- und Abfallstoffen**. Bereitstellung und energetische Nutzung organischer Rest- und Abfallstoffe sowie Nebenprodukte als Einkommensalternative für die Land- und Forstwirtschaft – Möglichkeiten, Chancen und Ziele. Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA 6882, Karlsruhe 2003
- [4-25] **Basisdaten Bioenergie Deutschland. Aktuelle Informationen zum Thema Bioenergie**. Biomasse Info-Zentrum (BIZ), <http://www.biomasse-info.net>, Sept. 2002
- [4-26] **Bundeswaldinventur 2**, BMVEL (Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung, Landwirtschaft) 2004
- [4-27] persönliche Mitteilung von Hrn. Fellmeth, Landesinnungsverband des Schornsteinfegerhandwerkes Baden-Württemberg, Ulm, März 2004
- [4-28] persönliche Mitteilungen von Hrn. Dr. Struschka zum Anlagenbestand und Endenergieverbrauch, Institut für Dampfkesselwesen der Universität Stuttgart (IVD), April 2005
- [4-29] pers. Mitteilungen von Hrn. Dr. Struschka zu den mittleren Nennwärmeleistungen, Institut für Dampfkesselwesen der Universität Stuttgart (IVD), Juni 2005
- [4-30] Hasler, P.; Nussbaumer, T.; Bühler, R.: **Dioxinmissionen von Holzfeuerungen**, Schriftenreihe Umwelt Nr. 208, Luft, Hrsg.: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL). Bern 1993
- [4-31] Nussbaumer, T.: **PCDD/F-Emissionen der illegalen Abfallverbrennung: Einflussgrößen, Korrelationen und Konsequenzen für Holzfeuerungen**, Immissionsschutz Nr. 2 / 2005, S. 43ff.
- [4-32] Prognos: **Die Energiemärkte Deutschlands im zusammenwachsenden Europa - Perspektiven bis zum Jahr 2020**. Bericht im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft. Prognos AG - Europäisches Zentrum für Wirtschaftsforschung und Strategieberatung, Basel, Schweiz 1995

- [4-33] ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, **Direkte Emissionen des Straßenverkehrs in Deutschland; Berechnungen mit TREMOD**, Stand 27.09.2005, im Auftrag des Umweltbundesamtes

#### **KAPITEL 5:**

- [5-1] Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (**Bundes-Immissionschutzgesetz – BImSchG**) vom 26.09.2002 (BGBl. I S. 3830)
- [5-2] Verordnung über die Ausführung von Schornstiefegerarbeiten (**Kehr- und Überprüfungsordnung – KÜO**) vom 29.03.1999
- [5-3] **Musterbauordnung (MBO)**, Fassung November 2002
- [5-4] Lasselsberger, L.: **Rahmenbedingungen – Kleinf Feuerungen**. Darstellung der Umsetzung von Regelwerken an Kleinf Feuerungen für Holz in Österreich. Bundesanstalt für Landtechnik (BLT), A – Wieselburg. Juni 2002  
[http://www.bl.t.bmlf.gv.at/vero/veroeff/0710\\_Rahmenbedingungen\\_Kleinf Feuerungen.pdf](http://www.bl.t.bmlf.gv.at/vero/veroeff/0710_Rahmenbedingungen_Kleinf Feuerungen.pdf)
- [5-5] **Luftreinhalte-Verordnung (LRV)** vom 16. Dezember 1985 (Stand am 3. August 2004). Verordnung des Schweizerischen Bundesrates, gestützt auf die Artikel 12, 13 16 und 39 des Bundesgesetzes vom 7. Oktober 1983 über den Umweltschutz (Gesetz)
- [5-6] **Keine Abfälle in den Ofen – Vorgehen bei unerlaubter Abfallverbrennung. Ein Leitfaden für Gemeinden**. Schweizerische Vereinigung für Holzenergie (Vhe) unter Mitwirkung kantonaler Umweltbehörden, des BUWAL und der EMPA. Zürich, 1998.
- [5-7] **Verbrennung von Abfällen in Öfen und im Freien**. Merkblatt des Amtes für Lebensmittelkontrolle und Umweltschutz des Kantons Schaffhausen. 2004
- [5-8] **DIN 18894**, Ausgabe:02-2005  
Feuerstätten für feste Brennstoffe - Pelletöfen - Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung
- [5-9] **DIN EN 12809**, Ausgabe:08-2005  
Heizkessel für feste Brennstoffe - Nennwärmeleistung bis 50 kW - Anforderungen und Prüfungen; Deutsche Fassung EN 12809:2001 + A1:2004

- [5-10] **DIN EN 303-5**, Ausgabe:06-1999  
Heizkessel - Teil 5: Heizkessel für feste Brennstoffe, hand- und automatisch beschickte Feuerungen, Nenn-Wärmeleistung bis 300 kW - Begriffe, Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung; Deutsche Fassung EN 303-5 vom 01.05.1999, Österreichische Fassung ÖNorm EN 303-5 vom 01.07.1999
- [5-11] **ÖNORM M 7132**: Energiewirtschaftliche Nutzung von Holz und Rinde als Brennstoff, Begriffsbestimmungen und Merkmale vom 01.07.1988
- [5-12] **ÖNORM M 7133**: Holzhackgut für energetische Zwecke, Anforderungen und Prüfbestimmungen vom 01.02.1998
- [5-13] **ÖNORM M 7135**: Presslinge aus naturbelassenem Holz und naturbelassener Rinde, Pellets und Briketts; Anforderungen und Prüfbedingungen vom 11.01.2000
- [5-14] **ÖNORM M 7136**: Presslinge aus naturbelassenem Holz - Holzpellets - Qualitätssicherung in der Transport- und Lagerlogistik vom 01.06.2001
- [5-15] **ÖNORM M 7137**: Presslinge aus naturbelassenem Holz - Holzpellets - Anforderungen an die Pelletslagerung beim Endkunden vom 01.10.2003

#### **KAPITEL 8:**

- [8-1] Bettina Meyer.: **Der Anbau von Biomasse zur energetischen Nutzung im Spannungsfeld zwischen Natur- und Klimaschutz**, in : Lebensland Schleswig-Holstein – Eine Vision für Vielfalt der Natur, Dokumentation des Naturschutztages Schleswig-Holstein vom 29. September 2001 in Rendsburg, Hansadruck Kiel 2002, ISSN 1431-1712

#### **KAPITEL 10:**

Die Angaben in Klammern entsprechen den Quellengaben in den Tabellen der Emissionsfaktoren in Anhang 10.4.

- [UMEG\_43-18] siehe [3-1]

[StMLU 156] Launhardt, T. , Hartmann, H., Link, H., Schmid, V.: **Verbrennungsversuche mit naturbelassenen biogenen Festbrennstoffen in einer Kleinfeuerungsanlage – Emission und Aschequalität.** Abschlussbericht für das Bayerische Landesamt für Umweltschutz (BayLfU), Schriftenreihe StMLU-Materialien Nr. 156, 2000, Hrsg. Bayrisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU)

[WKI Nr. 30] Marutzky, R.: **Dioxine bei Feuerungen für Holz und andere Festbrennstoffe.** (1994) Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI) – Fraunhofer-Arbeitsgruppe für Holzforschung. Tagungsband zum WKI-Workshop am 02.11.1994 in Braunschweig, WKI-Bericht Nr. 30, Hrsg. R. Marutzky, darin:  
- Nussbaumer, T.: **Ergebnisse von Dioxinmessungen an Holzfeuerungen in der Schweiz**  
- Strecker, M.: **Ergebnisse von Dioxinmessungen an Holzfeuerungen in Niedersachsen**

[IVD 38-1997] siehe [2-26]

[TUBraun 1-0] Pieper, Anja: **Untersuchung zur Schadstoffbildung und Emissionsminderung der energetischen Verwertung von Resthölzern in Kleinfeuerungsanlagen,** Dissertation , Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2001

[StMLU 142] Launhardt, T., Hurm, R., Schmid, V., Link, H.: **Dioxin- und PAK-Konzentrationen in Abgas und Aschen von Stückholzfeuerungen,** StMLU 142, 1998; Hsrg.: Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU), München

[ÖUBA M-153] siehe [3-15]

[LfUBY 54 537] Stöcklein, F.: **Emissionsmessungen im Abgas von Getreidefeuerungen – Vorübergehende energetische Nutzung von Getreide in der Heizperiode 02/03.** Messprogramm zur Begleitung des vorübergehenden Getreideeinsatzes in Feuerungsanlagen (2003, Projekt 1300), Zusammenfassung der Messergebnisse, Bericht Nr. 54 537/1, Auftraggeber: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, 86179 Augsburg

[IVD 30-1994] siehe [2-25]

[BUWAL 208] siehe [4-30]

[LAU-SA] Ehrlich, C., Albrecht, W., Kalkoff, W.-D., Wusterhausen, E.: **Ergebnisbericht Anlagenbezogenes Dioxinmessprogramm in Sachsen-Anhalt 1993 – 1996**, Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt

[LIS 114] Hoffmann, V., Giebel, J., Trippe, Y.: **Emissionen und Immissionen durch Holzfeuerungen im Hausbrandbereich**. LIS Bericht NR. 114, 1994; Hrsg.: Landesanstalt für Immissionsschutz Nordrhein-Westfalen, Essen

[LIS 103] Bröker, G. et.al.: **Emissionen polychlorierter Dibenzo-p-dioxine und -furane aus Hausbrand-Feuerungen**. LIS-Bericht Nr. 103, 1992; Hrsg.: Landesanstalt für Immissionsschutz Nordrhein-Westfalen. Essen

[LfUBY] Mair, Konrad, **Ergebnisse von Emissionsmessungen sowie Brenn- und Reststoffuntersuchungen an zwei Kleinf Feuerungsanlagen** (11 kW, 300 kW), Seminar am 07.05.1996 in Wackersdorf, Bayerisches Amt für Umweltschutz, Augsburg

[FTU] Hübner, C. et. al.: **PCDD/F-Emissionen aus mit Festbrennstoffen betriebenen Kleinf Feuerungen** (<= 50 kW) der urbanen und ländlichen Haushalte, FTU Forschungsgesellschaft Technischer Umweltschutz GmbH, Wien 2000

[UBA 10403527] Erken, M., Heinen, R., Wawrzinek, J.: **N<sub>2</sub>O, VOC- und Dioxin-Furan-Emissionen aus festbrennstoffgefeuerten Kleinf Feuerungsanlagen**, UBA-Forschungsbericht 10 40 35 27, Rheinbraun AG, im Auftrag des Umweltbundesamtes, 1996

[UMEG-MP] Messungen der UMEG in 2005:

Emissionsmessungen an einem Hackschnitzelkessel, Bericht Nr. 43-03/05

Emissionsmessungen an einem Kachelofen-Heizeinsatz, Bericht-Nr. 43-04/05

Emissionsmessungen an einem Holzbackofen, Bericht-Nr. 43-07/05

[IVD 33-1996] Baumbach, G., Angerer, m., Zuberbühler, U., Straub, **Schadstoffemissionen gewerblicher und industrieller Holzfeuerungen; Ermittlung der Schadstoffemissionen und Verfahren zur Emissionsminderung**, 1996

**10.3 Protokoll zum Fachgespräch „Novellierung der 1. BImSchV - künftige Anforderungen an Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe“ am 29.11.2004 in Berlin**

**TOP 1 Begrüßung und Einführung**

Herr Weiss (Umweltbundesamt, UBA) begrüßt die Teilnehmer an dem Fachgespräch, das Bestandteil eines laufenden UBA-Forschungsvorhabens ist.

**TOP 2 Novellierung der 1. BImSchV**

Hr. Weiss erläutert die Hintergründe der anstehenden Novellierung der 1. BImSchV (Ausgangslage, Notwendigkeit). Handlungsbedarf ist u. a. dadurch gegeben, dass sich der Stand Technik der Feststofffeuerung weiterentwickelt hat hin zu emissionsarmer Feuerungstechnik, wodurch die bisherigen Grenzwerte z. T. deutlich unterschritten werden können.

Durch den vermehrten Einsatz des Brennstoffes Holz in Kleinfeuerungsanlagen gibt es zunehmend Probleme mit der Luftqualität in Ballungsräumen.

Die Notwendigkeit zum Handeln ist gegeben, denn Kleinfeuerungsanlagen sind eine Hauptquellgruppe für Feinstäube und andere kritische Luftschadstoffe (z. B. PAH, PCDD/F) in Deutschland.

**TOP 3 Vorstellung des Vorhabens „Ermittlung und Minderung der Emissionen krebserzeugender und weiterer besonders gesundheitsgefährdender Stoffe bei Kleinfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe“, bisherige Ergebnisse**

**TOP 3.1 Inhalte und Vorgehen**

Fr. Greiselis-Bailer (Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg) stellt das o.g. Forschungsvorhaben vor, das von der LfU Baden-Württemberg im Auftrag des Umweltbundesamtes durchgeführt wird: aus der Sicht des Immissionsschutzes ist eine Beschäftigung mit den Kleinfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe notwendig, da sie bei manchen Luftschadstoffen wesentlich zur Gesamtemission beitragen. Eine Novellierung der 1. BImSchV ist im Hinblick auf die künftige Entwicklung des Verbrauchs an biogenen Festbrennstoffen vordringlich.

### **TOP 3.2 Möglichkeiten der Emissionsminderung**

Dr. Kemper (Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg) erläutert die Entstehung der Emissionen und Maßnahmen zur ihrer Minderung: bestimmte Biomasse-Festbrennstoffe besitzen gegenüber Holz erhöhte Gehalte an Asche-, Chlor- oder Stickstoff, was bei der Verbrennung zu erhöhten Emissionen von Staub, Stickstoffoxiden und Chlorwasserstoff bzw. Dioxinen führen kann. Brennstoffmissbrauch kann zu schlechten Verbrennungsbedingungen (z. B. bei nassem Holz) und erhöhten Chlorwasserstoff- oder Schwermetallemissionen führen.

Sekundärmaßnahmen zur Emissionsminderung sind bei kleinen Feuerungsanlagen zwar schwierig, die vorhandenen Ansätze sollten jedoch weiter untersucht werden.

### **TOP 3.3 Vorschläge zur Änderung der 1. BImSchV**

Dr. Kemper unterbreitet verschiedene Vorschläge zur Änderung der Verordnung.

U. a. sollten die Leistungsgrenzen für die Messung bzw. Überwachung an den aktuellen niedrigeren Wärmebedarf angepasst werden, es sollte auch über die Verwendung der Feuerungswärmeleistung anstelle der Nennwärmeleistung nachgedacht werden. Weiterhin sollte der Anwendungsbereich der 1. BImSchV auf Holzbacköfen ausgeweitet werden, da diese zu hohen Emissionen führen und oft zu Problemen mit der Nachbarschaft führen. Der Brennstoffkatalog nach § 3 Abs. 1 sollte sich an der prCEN14961 orientieren.

Zu groß dimensionierte Kessel arbeiten meistens im ungünstigen Teillastbereich bzw. Gluthaltebetrieb, daher sollten ausreichend dimensionierte Pufferspeicher (z. B. 50 l/kW) gefordert werden.

Messungen alleine sind für einen umweltfreundlichen Betrieb oft nicht ausreichend, denkbare zusätzliche Maßnahmen wären:

- Prüfung der ordnungsgemäßen Installation und Inbetriebnahme einer Feuerungsanlage, Kontrolle des Wartungszustandes,
- Verlängerung der Messintervalle für emissionsarme Anlagen,
- zielgerichtete Überwachung handbeschickter Feuerungen, insbes. Einzelöfen, Überwachung bzgl. Brennstoffmissbrauch / Holzfeuchte
- sowie Information und Schulung der Betreiber.

Dr. Stanev (FNR, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.) fordert eine deutliche Ausweitung des Brennstoffkatalogs nach § 3. Durch einen Verweis auf die europäischen Normen wären auch die bisher nicht genannten Biobrennstoffe zugelassen. Dr. Kemper weist darauf hin, dass die Normen zwar eine Vielzahl an Biobrennstoffen erfassen, dort jedoch keine konkreten Anforderungen an die Brennstoffqualität enthalten sind.

#### **TOP 4 Eckpunkte künftiger Anforderungen der 1. BImSchV**

Herr Weiss stellt die Eckpunkte des UBA-Vorschlags zur Novelle der 1. BImSchV vor.

Im Wesentlichen handelt es sich dabei um

- die Senkung der Leistungsgrenze (Schwellenwert) für überwachungspflichtige Anlagen auf unter 15 kW NWL,
- die Verschärfung der Emissionsgrenzwerte für CO und Staub entsprechend dem Stand der Technik unter Berücksichtigung der verfügbaren Messmethoden,
- die Festlegung von konkreten emissionsbegrenzenden Anforderungen an Einzelraumfeuerstätten (u. a. Prüfstandsanforderungen und zeitliche Beschränkung des Betriebs von Zusatzfeuerstätten),
- den Einsatz von Pufferspeichern für grundsätzlich alle Kessel (obligatorisch bei handbeschickten Kesseln),
- modifizierte Überwachungsregelungen (jährliche Messungen auch für handbeschickte Kessel, großzügige Überwachungszyklen (alle 2 Jahre) bei besonders emissionsarmen Anlagen mit mechanischer Beschickung),
- und ein Sanierungskonzept für bestehende Anlagen (Altanlagenregelung mit Übergangsfristen).

Durch den Schornsteinfeger soll in regelmäßigen Abständen der Brennstoff überprüft und der Betreiber zum richtigen Umgang mit der Feuerstätte beraten werden.

Zukünftig sollen auch für Kohlefeuerungsanlagen CO-Grenzwerte gelten (Gleichstellung von Holz und Kohle). Für Stroh oder ähnliche pflanzliche Stoffe sollen Sonderregelungen festgelegt werden mit besonders anspruchsvollen Emissionsgrenzwerten. Torf soll ganz aus der Brennstoffliste gestrichen werden.

Dr. Hartmann (TFZ - Technologie- und Förderzentrum nachwachsende Rohstoffe) warnt vor der neuen Anforderung zur Beschränkung des Betriebs von Einzelraum-

feuerstätten, denn diese würde das „Aus für Niedrigenergiehäuser mit Zentralheizung im Wohnzimmer“ bedeuten. Es muss Sonderregelungen geben, die die technische Entwicklung berücksichtigen. Herr Weiss stellt klar, dass die Regelung nur für Einzelraumöfen gelten soll, die zusätzlich neben einer Hauptheizung betrieben werden. Für fortschrittliche, besonders emissionsarme Einzelraumfeuerstätten, die z.B. über abgasseitige Minderungsmaßnahmen verfügen, kann es weitere Öffnungsklauseln geben.

Durch die Konkretisierung des Begriffs „gelegentlicher Betrieb“ bei Einzelraumfeuerstätten soll mehr Rechtssicherheit bei Nachbarschaftsauseinandersetzungen gegeben werden.

### **Position des Schornsteinfegerhandwerks und der Industrie**

Dr. Stehmeier (ZIV, Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks) stellt die Kernpunkte eines von Industrie, TFZ und Schornsteinfegerhandwerk erarbeiteten Positionspapiers zur Änderung der 1. BImSchV vor. Bei mechanisch beschickten Anlagen soll es eine einmalige Messung für den Bestand geben und für Neuanlagen wiederkehrende CO- und Staub-Messungen geben. Die Grenzwerte sollen moderat verschärft werden.

Dr. Stehmeier hält es für vertretbar, bei der jährlichen Überwachung nur die CO-Werte zu messen. Zwar ist keine tatsächliche Korrelation zwischen CO und Staub zu erkennen, doch zeige die Erfahrung, dass gute CO-Werte auch auf eine gute Feuerung und niedrige Staubwerte schließen lassen. Zusätzlich erläutert Dr. Stehmeier, dass die Anlagen generell mit einem ausreichenden Wärmespeicher zu betreiben sind und es Übergangsregelungen für Altanlagen geben soll.

Weiterhin sollten die Bedingungen für den Einsatz von Stroh und Energiegetreide erleichtert werden und Feuerstättenbetreiber künftig durch den Bezirksschornsteinfegermeister über den sachgerechten Betrieb ihrer Feuerungsanlage regelmäßig beraten werden.

Hr. Weiss erachtet es angesichts der Feinstaubproblematik als nicht durchsetzbar, auf Staubmessungen zu verzichten und nur CO zu messen, solange es keine eindeutige Korrelation zwischen diesen Abgaskomponenten gibt. Er hält zudem die vorgeschlagenen Emissionsgrenzwerte für zu schwach bzw. nicht akzeptabel (bis zu 6 g CO/Nm<sup>3</sup>). Hinsichtlich der Übergangsregelungen kritisiert Hr. Weiss, dass es sinnlos sei, bei Alt-

anlagen eine Einstufungsmessung durchzuführen ohne diese anschließend wiederkehrend überwachen zu lassen.

Hr. Friedl (Windhager Zentralheizung GmbH) verdeutlicht, dass die Vorschläge der Verbände „viele selbst auferlegte Regelungen“ enthalten. Wichtig ist, dass das Holz „weg von seinem Schmutz-Image“ kommt. Er warnt davor, dass „die Mittelständler ihre Grundlage verlieren“ könnten.

## **TOP 5 Berichte von Experten aus Industrie, Forschung und Ländern zu ausgewählten Themen**

### **TOP 5.1.1 Emissionsminderung durch ein beheiztes Metallgewebefilter**

Hr. Schmoeckel (Bayerisches Landesamt für Umweltschutz) stellt das F&E-Projekt „Entwicklung eines Entstaubungsaggregats für Holz-Kleinfeuerungen“ vor, bei dem der Praxiseinsatz eines neu entwickelten, beheizten Metallgewebefilters erfolgreich erprobt wurde.

Eine Staubkonzentration im Reingas von kleiner  $10 \text{ mg/m}^3$  konnte erreicht werden. Die mittlere Größe der abgeschiedenen Stäube betrug  $10 \mu\text{m}$ . Die eingelagerten Stäube in den Falten verklebten nicht und waren durch Abklopfen leicht entfernbar.

Bisher gab es keinen Ausfall der Anlage und keine Veränderungen in der Struktur des Gewebes. Es gibt keine Probleme durch Auskondensieren, auch nicht bei Anfahrvorgängen.

### **TOP 5.1.2 Elektr. Partikelabscheidesystem für kleine Holzfeuerungen**

Dr. Schmatloch (EMPA, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Dübendorf) veranschaulicht das EMPA-Projekt zur „Minderung der Feinstaubemissionen kleiner Holzfeuerungen“.

Das Elektrofilter zeichnet sich durch einen hohen Abscheidegrad für ultrafeine Feinstäube, ein modulares Konzept, welches nachrüsttauglich und kostengünstig ist und einen erfolgreichen, praxisnahen Testbetrieb aus.

Durch glimmende Partikel kann es zur Nachverbrennung bei der Ablage des Staubes am Filter kommen. Verklebungen und Verschmutzungen werden durch Luftspülungen verhindert.

Dr. Schmatloch erläutert, dass eine Serienreife prinzipiell möglich ist und rechnet mit Stückkosten von etwa 1000 - 1500 €. Spätestens im übernächsten Jahr soll eine Kleinserie auf den Markt kommen.

### **TOP 5.1.3 Emissionsminderung durch Oxidationskatalysatoren**

Prof. Schmidt (iuta - Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V.) berichtet über die „Entwicklung eines Katalysators für die Anwendung bei der Ofenfeuerung“.

Die Basis des Katalysators bilden Späne aus der Metallverarbeitung. Durch verschiedene Dotierungsstufen konnte der Katalysator optimiert werden. Problematisch ist noch das Anfahrverhalten, denn „es braucht eine Weile, bis der Kat. warm“ ist.

Ggf. ist ein Bypass zur Vermeidung des Druckverlustes notwendig. Wenn der Staub auf dem Katalysator abgelagert wird, lässt dessen Wirkung nach und der Staub muss entfernt werden. Nach dem vertikalen und horizontalen Einbau sieht die neueste Konstruktion nun eine drehbare Schüttung vor. Mit dem Katalysator wurden bereits Feldtests durchgeführt. Die Kosten der Schüttung (600 g, 6 cm Höhe) belaufen sich auf 50 €. Die Modifikation des Ofenrohrs kostet etwa 150 €.

Hr. Vohs (ZVSHK - Zentralverband Sanitär Heizung Klima) schlägt vor, den Katalysator als Bestandteil der Feuerstätte zu übernehmen, eine baurechtliche Zulassung ist dann nur bei alten Anlagen, die nachgerüstet werden, notwendig.

### **TOP 5.2 Messtechnische Überwachung**

Dr. Struschka (IVD - Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen der Universität Stuttgart) berichtet von einem weiteren UBA-Forschungsprojekt zum Thema „Aussagefähigkeit der Überwachungsmessung nach 1. BImSchV“.

Dabei sollte die bisherige Überwachungspraxis mit dem Schwerpunkt Staubmessverfahren bewertet und Maßnahmen zur Erhöhung der Aussagekraft und Genauigkeit der Messergebnisse abgeleitet werden. Neben vorhandenen Mess- und Anlagendaten des Schornsteinfegerhandwerks wurden Feld- und Praxisuntersuchungen durchgeführt und Verbesserungsvorschläge erarbeitet.

Dr. Struschka betont, dass es einen Zusammenhang zwischen der CO- und der Staubemission, wie er bei einzelnen Öfen beobachtet wird, generell nicht gibt.

Anschließend erläutert Dr. Hartmann den Teilbericht des TFZ zur Aussagefähigkeit der Überwachungsmessungen bei Kleinf Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe.

Dabei sollten die Bedingungen für überhöhte Staubemissionen, anhand von brennstoff- und betriebsbezogenen Einflussgrößen sowie fehlerhafter Bedienung und Funktionsstörung, nachgestellt werden. Zu hohen Staubemissionen führen ein ungünstiger Messzeitpunkt nach der Scheitholzaufgabe, während der Messung ablaufende automa-

tische Wärmetauscherabreinigungen und fehlerhafte Anlagenausstattungen bzw. – reinigungen. Keinen Einfluss auf den Staubausstöß haben der Reinigungszustand des Wärmetauschers, eine falsche Luftzufuhr und fehlende Turbulatoren.

Zusammenfassend erklärt Dr. Hartmann, dass wechselnde Betriebsbedingungen bei Holzfeuerungen unvermeidlich sind, d. h. ein stationärer Betriebszustand ist kaum erreichbar. Eine relativ hohe Messunsicherheit ist daher zu akzeptieren.

Dies muss bei der Novellierung der 1. BImSchV berücksichtigt werden.

Dr. Ester (Wöhler GmbH) referiert über die „Schnellbeurteilung von Staubmessungen“ mit dem Delta-p-Verfahren. Aufgrund der nicht standardisierten Betriebsbedingungen vor Ort gibt es eine hohe Diskrepanz zwischen den Ergebnissen der Prüfstands- und Praxismessungen. Eine Vereinfachung und Sofortbestimmung der Staubmessung ist wünschenswert. Das Delta-p-Verfahren ist eine Möglichkeit, ohne Mehrkosten, mit geringen technischen Modifikationen und bei hoher Trefferquote die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte bereits während der Staubmessung festzustellen.

Durch eine sofortige Identifizierung der „staubarmen“ Anlagen ist das Einschicken der Filterhülse oft nicht mehr notwendig.

### **TOP 5.3 Pufferspeicherdimensionierung**

Dr. Struschka stellt die Ergebnisse einer Untersuchung zur Dimensionierung von Pufferspeichern vor. Aus den Messungen (Extrapolation gegen unbegrenzte Wärmeabnahme) wurde eine sinnvolle Pufferspeichergröße im Bereich von 67 - 83 l/kW abgeleitet.

Dr. Struschka schlägt für die Novellierung der 1. BImSchV als Mindestgröße für Pufferspeicher 50 l/kW für alle handbeschickten Stückholzkessel vor. Die reine Teillastregelung des Kessels ohne Pufferspeicher ist bei schneller Änderung der Leistungsabnahme im Vergleich zur Vollastregelung wenig effizient.

### **TOP 5.4 Ascheschnelltest zum Nachweis von Brennstoffmissbrauch**

In ihrem Vortrag „Untersuchungen an Holzaschen“ berichtet Dr. Gärtner (Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen) über den EMPA-Ascheschnelltest. Dieser wurde entwickelt, um vor Ort in Holzaschen erhöhte Werte an Chlor, Zink und Blei nachzuweisen, um daraus einen evtl. Brennstoffmissbrauch abzuleiten.

Dr. Gärtner fasst zusammen, dass die Metalle Zink und Blei keine guten Indikatoren für Brennstoffmissbrauch sind. Besser ist der visuelle Aschebeschau zum Nachweis von Brennstoffmissbrauch mit ggf. anschließenden umfangreichen Laboruntersuchungen,

auch von Chrom, Kupfer, Cadmium, Titan und Aluminium. Besonders Aluminium und Titan sind Indikatoren für mitverbrannten Hausmüll.

Fr. Gärtner empfiehlt auch keinen modifizierten Ascheschnelltest, es sei besser, vom Schnelltest Abstand zu nehmen und Ascheproben im Labor analysieren zu lassen.

Hr. Weiss will prüfen, ob eine geeignete Anforderung mit Ascheuntersuchung in die Novelle aufgenommen werden sollte. Die Schornsteinfeger müssten dann eine visuelle Prüfung der Asche vornehmen und nur bei begründetem Verdacht auf Brennstoffmissbrauch eine Ascheanalyse veranlassen.

### **TOP 6 Ausblick**

Hr. Weiss fasst die wesentlichen Ergebnisse des Fachgesprächs zusammen und stellt fest, dass die Positionen des UBA und der Industrie „gar nicht so weit auseinander“ liegen. In den Maßnahmen zur abgasseitigen Emissionsminderung sieht Hr. Weiss eine „größere Perspektive“. Es ist wichtig, ihren Einsatz in Feldmessungen zu erproben, damit diese Techniken künftig verstärkt in den Feuerstätten eingesetzt werden können.

Herr Weiss dankt den Teilnehmern und Referenten für die Vorträge und konstruktiven Diskussionsbeiträge.

# Tabellen der Emissionsfaktoren

## 10.4 Tabellen der Emissionsfaktoren

### 10.4.1 Emissionsfaktoren aus den Einzelmessungen

Ofenkategorie	Brennstoff	Brennstoffform	Laststufe	Bemerkg BST	Hersteller	Typ	Baujahr	Abgasreinigung	NWL	Leist.BZ	Messprogramm
Backofen	Holz	Stuecke	k.A.	Reisig, naturbelassen		Backhaus: Gru	ca. 1930	k.A.			Feld
Backofen	Holz	Stuecke	Voll		Häussler	HABO 20	2005				Feld
Dauer	Braunkohle	Brikett	k.A.		Jotul	602N	1990	n.v.	unbek.	4,9	Feld
Dauer	Braunkohle	Brikett	Teil	BB-Rheinis	k.A.		ca. 80er Jahre	n.v.	7	4,8	Pruefstand
Dauer	Braunkohle	Brikett	Teil	BB-Rheinis	k.A.		ca. 80er Jahre	n.v.	7	4,4	Pruefstand
Dauer	Braunkohle	Brikett	Teil	BB-Mittelde	k.A.		ca. 80er Jahre	n.v.	7	5,25	Pruefstand
Dauer	Braunkohle	Brikett	Teil	BB-Mittelde	k.A.		ca. 80er Jahre	n.v.	7	5,95	Pruefstand
Dauer	Braunkohle	Brikett	Teil	BB-Lausitz	k.A.		ca. 80er Jahre	n.v.	7	5,4	Pruefstand
Dauer	Braunkohle	Brikett	Teil	BB-Lausitz	k.A.		ca. 80er Jahre	n.v.	7	4,9	Pruefstand
Dauer	Braunkohle	Brikett	Voll				ca. 1994	k.A.	5	5,5	Pruefstand
Dauer	Braunkohle	Brikett	Voll				ca. 1994	k.A.	11	11	Pruefstand
Dauer	Braunkohle	Brikett	Voll				ca. 1994	k.A.	9,5	9,5	Pruefstand
Dauer	Braunkohle	Brikett	Voll	MIBRAG 1	OHRA Rather	812 DGH/N	n.b.	n.v.	6	6	Pruefstand
Dauer	Braunkohle	Brikett	Voll	Lausitz 1	OHRA Rather	812 DGH/N	n.b.	n.v.	6	7,5	Pruefstand
Dauer	Braunkohle	Brikett	Voll	MIBRAG 2	OHRA Rather	812 DGH/N	n.b.	n.v.	6	7,5	Pruefstand
Dauer	Braunkohle	Brikett	Voll	Lausitz 2	OHRA Rather	812 DGH/N	n.b.	n.v.	6	6	Pruefstand
Dauer	Braunkohle	Brikett	Voll	Böhmen	OHRA Rather	812 DGH/N	n.b.	n.v.	6	6	Pruefstand
Dauer	Braunkohle	Brikett	Voll	Polen	OHRA Rather	812 DGH/N	n.b.	n.v.	6	6	Pruefstand
Dauer	Braunkohle	Brikett	Voll		Meller	D4	ca. 1960	n.v.	unbek.	12,6	Feld
Dauer	Braunkohle	Brikett	Voll	BB-Rheinis	k.A.		ca. 80er Jahre	n.v.	7	7,2	Pruefstand
Dauer	Braunkohle	Brikett	Voll	BB-Rheinis	k.A.		ca. 80er Jahre	n.v.	7	7,7	Pruefstand
Dauer	Braunkohle	Brikett	Voll	BB-Mittelde	k.A.		ca. 80er Jahre	n.v.	7	8,1	Pruefstand
Dauer	Braunkohle	Brikett	Voll	BB-Mittelde	k.A.		ca. 80er Jahre	n.v.	7	7,6	Pruefstand
Dauer	Braunkohle	Brikett	Voll	BB-Lausitz	k.A.		ca. 80er Jahre	n.v.	7	8,1	Pruefstand
Dauer	Braunkohle	Brikett	Voll	BB-Lausitz	k.A.		ca. 80er Jahre	n.v.	7	7,8	Pruefstand
Dauer	Holz	Brikett	Voll	Buchenholz			ca. 1994	k.A.	9,5	10,5	Pruefstand
Dauer	Holz	Brikett	Voll	Holzbrikett	Swoboda	Tantal 161	unbekannt	n.v.	unbek.	9	Feld
Dauer	Holz	Stuecke	Teil	Scheite 25	"unteres Preissegment"		ca. 2001	n.v.	10		Pruefstand
Dauer	Holz	Stuecke	Teil	Scheite 25	"unteres Preissegment"		ca. 2001	n.v.	10		Pruefstand
Dauer	Holz	Stuecke	Teil	Scheite 25 cm 15,69 kg			ca. 1980	n.v.	10		Pruefstand
Dauer	Holz	Stuecke	Teil	Scheite 25 cm 20,33 kg			ca. 1980	n.v.	10		Pruefstand
Dauer	Holz	Stuecke	Teil	Scheite 25 cm 12,65 kg			ca. 1980	n.v.	10		Pruefstand
Dauer	Holz	Stuecke	Teil	Buchensch	k.A.		ca. 80er Jahre	n.v.	7	8,05	Pruefstand
Dauer	Holz	Stuecke	Teil	Buchensch	k.A.		ca. 80er Jahre	n.v.	7	4,4	Pruefstand
Dauer	Holz	Stuecke	Teil	Buchensch	k.A.		ca. 80er Jahre	n.v.	7	4,55	Pruefstand
Dauer	Holz	Stuecke	Voll	Buchenholz			ca. 1994	k.A.	5	5,5	Pruefstand
Dauer	Holz	Stuecke	Voll	Buchenholz			ca. 1994	k.A.	11	11	Pruefstand
Dauer	Holz	Stuecke	Voll	Scheite 25	"unteres Preissegment"		ca. 2001	n.v.	10		Pruefstand
Dauer	Holz	Stuecke	Voll		Celus	unbek.	1990	n.v.	unbek.	6,5	Feld
Dauer	Holz	Stuecke	Voll	Hartholz	Bullerjan	unbek.	ca. 1985	n.v.	unbek.	14,3	Feld
Dauer	Holz	Stuecke	Voll	Buchensch	k.A.		ca. 80er Jahre	n.v.	7	6,9	Pruefstand
Dauer	Holz mit Mü	Stuecke	Voll	Weichholz	DeLonghi	SCL8	ca. 1985	n.v.	8	13	Feld
Dauer	Koks (aus S	Kohle	Teil	"Ostrauer K	"unteres Preissegment"		ca. 2001	n.v.	10		Pruefstand
Dauer	Koks (aus S	Kohle	Voll	"Ostrauer K	"unteres Preissegment"		ca. 2001	n.v.	10		Pruefstand
Dauer	Koks (aus S	Kohle	Voll	"Ostrauer Koks", 3,04 kg			ca. 1980	n.v.	10		Pruefstand
Dauer	Koks (aus S	Kohle	Voll	"Ostrauer Koks", 2,72 kg			ca. 1980	n.v.	10		Pruefstand
Dauer	Steinkohle	Kohle	Teil	polnischer l	"unteres Preissegment"		ca. 2001	n.v.	10		Pruefstand
Dauer	Steinkohle	Kohle	Teil	polnischer l	"unteres Preissegment"		ca. 2001	n.v.	10		Pruefstand
Dauer	Steinkohle	Kohle	Teil	polnischer l	"unteres Preissegment"		ca. 2001	n.v.	10		Pruefstand
Dauer	Steinkohle	Kohle	Teil	polnischer Ursprung, 3,64 kg			ca. 1980	n.v.	10		Pruefstand
Dauer	Steinkohle	Kohle	Teil	polnischer Ursprung, 5,65 kg			ca. 1980	n.v.	10		Pruefstand
Dauer	Steinkohle	Kohle	Teil	Anthrazit 1	k.A.		ca. 80er Jahre	n.v.	7	4,1	Pruefstand
Dauer	Steinkohle	Kohle	Teil	Anthrazit 1	k.A.		ca. 80er Jahre	n.v.	7	4,6	Pruefstand
Dauer	Steinkohle	Kohle	Teil	Steinkohle	k.A.		ca. 80er Jahre	n.v.	7	3,8	Pruefstand
Dauer	Steinkohle	Kohle	Teil	Steinkohle	k.A.		ca. 80er Jahre	n.v.	7	4,3	Pruefstand
Dauer	Steinkohle	Kohle	Teil	Steinkohle	k.A.		ca. 80er Jahre	n.v.	7	4,55	Pruefstand
Dauer	Steinkohle	Kohle	Teil	Steinkohle	k.A.		ca. 80er Jahre	n.v.	7	4,4	Pruefstand
Dauer	Steinkohle	Kohle	Voll	polnischer l	"unteres Preissegment"		ca. 2001	n.v.	10		Pruefstand
Dauer	Steinkohle	Kohle	Voll	polnischer Ursprung, 7,22 kg			ca. 1980	n.v.	10		Pruefstand

## Tabellen der Emissionsfaktoren

Lit	Benzo(a)p [kg/TJ]	Benzol [kg/TJ]	HCl [kg/TJ]	Formald. [kg/TJ]	Ges.-C [kg/TJ]	CO [kg/TJ]	PCB DIN (6) [mg/TJ]	PCB i-TE (12) [mg/TJ]	PCDD/DF [mg/TJ]	Staub [kg/TJ]	NOx [kg/TJ]	PAK (16) [kg/TJ]	PAK (4) [kg/TJ]
IVD 33-1996 1996			50,16		3881	11655			0,2838	2168	75,64		
UMEG-MP 2005	1,002	139,3		28,18	2885	6816				643	39,93	83,56	2,424
FTU 2000									0,27				
UBA 10403527 1996					444	4215			0,019		75,1		
UBA 10403527 1996					498	4742			0,016		78,2		
UBA 10403527 1996					273	3203			0,012		65,9		
UBA 10403527 1996					323	3511			0,011		61,3		
UBA 10403527 1996					260	2963			0,012		67,5		
UBA 10403527 1996					230	2495			0,015		67,5		
IVD 30-1994 1994					95,7	1993				60,72	99		
IVD 30-1994 1994					174,9	1531				27,72	106,9		
IVD 30-1994 1994					66	1135				12,54	78,54		
LAU-SA 1998	0,025	7,47			172	2636	10,89	0,01	0,02	38	80	0,81	0,08257
LAU-SA 1998	0,019	3,68	8,8		132	3057	5,1	0,149	0,015	10	86	0,43	0,07187
LAU-SA 1998	0,057	8,1	1,1		208	2830			0,0128	90	84	0,9167	0,1523
LAU-SA 1998	0,01848	9,4	1		236	3504			0,01383	41	55	0,6102	0,08032
LAU-SA 1998	0,92	36,65	0,58		542	3670	6,75	0,061	0,033	284	78	18,04	3,602
LAU-SA 1998	0,085	11,7	0,56		336	2765	42,2	0,0002	0,03	76	90	2,91	0,4132
FTU 2000									0,029				
UBA 10403527 1996					237	2509			0,037		87,4		
UBA 10403527 1996					62	2519			0,062		81,3		
UBA 10403527 1996					242	1901			0,019		64,4		
UBA 10403527 1996					436	3715			0,017		56,7		
UBA 10403527 1996					177	2189			0,054		65,9		
UBA 10403527 1996					203	2103			0,025		72,1		
IVD 30-1994 1994					79,2	1445				17,16	66,66		
FTU 2000									0,027				
ÖUBA M-153 0	0,002187						14,94	0,002895	0,02			0,4242	0,009306
ÖUBA M-153 0	0,00298						46,64	0,01914	0,493			0,4039	0,00926
ÖUBA M-153 0	0,006053								0,09431			0,3827	0,0139
ÖUBA M-153 0	0,02579								0,3749			2,088	0,07953
ÖUBA M-153 0	0,006904								0,2934			0,6844	0,02178
UBA 10403527 1996					163	1928			0,034		61,3		
UBA 10403527 1996					773	4547			0,013		52,1		
UBA 10403527 1996					646	4336			0,014		53,7		
IVD 30-1994 1994					125,4	1795				56,1	77,88		
IVD 30-1994 1994					33	1353				7,26	91,08		
ÖUBA M-153 0	0,000767						75,3	0,01	0,07			0,1005	0,003
FTU 2000									0,152				
FTU 2000									0,02				
UBA 10403527 1996					328	2754			0,023		55,2		
FTU 2000									2,3				
ÖUBA M-153 0							41,17	0,04466	0,9282				
ÖUBA M-153 0							25,31	0,04935	1,14				
ÖUBA M-153 0	0,000154						44,17	0,02448	0,7052			0,02585	0,000659
ÖUBA M-153 0	0,002247						31,24	0,008405	0,2299			0,1728	0,006785
ÖUBA M-153 0	0,005526						71,3	0,59	9,47			0,3906	0,0234
ÖUBA M-153 0	0,006888								7,786			0,5233	0,02577
ÖUBA M-153 0	0,005989								5,934			0,5093	0,02538
ÖUBA M-153 0	0,1085								2,051			5,484	0,365
ÖUBA M-153 0	0,03195								5,19			1,625	0,1085
UBA 10403527 1996					53	3822			0,021		81,3		
UBA 10403527 1996					156	2582			0,02		76,7		
UBA 10403527 1996					216	5871			0,011		61,3		
UBA 10403527 1996					144	4588			0,023		61,3		
UBA 10403527 1996					4	5894			0,023		32,2		
UBA 10403527 1996					6	6302			0,036		35,3		
ÖUBA M-153 0	0,01382						56,6	0,43	8,99			0,7289	0,0502
ÖUBA M-153 0	0,002376								4,19			1,373	0,0878

## Tabellen der Emissionsfaktoren

Ofenkategorie	Brennstoff	Brennstoffform	Laststufe	Bemerkg BST	Hersteller	Typ	Baujahr	Abgasreinigung	NWL	Leist.BZ	Messprogramm
Dauer	Steinkohle	Kohle	Voll	Anthrazit 1	k.A.		ca. 80er Jahre	n.v.	7	6,9	Pruefstand
Dauer	Steinkohle	Kohle	Voll	Anthrazit 1	k.A.		ca. 80er Jahre	n.v.	7	7,35	Pruefstand
Dauer	Steinkohle	Kohle	Voll	Steinkohle	k.A.		ca. 80er Jahre	n.v.	7	6,9	Pruefstand
Dauer	Steinkohle	Kohle	Voll	Steinkohle	k.A.		ca. 80er Jahre	n.v.	7	6,4	Pruefstand
Dauer	Steinkohle	Kohle	Voll	Steinkohle	k.A.		ca. 80er Jahre	n.v.	7	6,4	Pruefstand
Dauer	Steinkohle	Kohle	Voll	Steinkohle	k.A.		ca. 80er Jahre	n.v.	7	7,6	Pruefstand
Herd	Braunkohle	Brikett	Voll		Celus	Jubilar	ca. 1970	n.v.	unbek.	8,3	Feld
Herd	Braunkohle	Brikett	Voll		Tirolia	unbek.	ca. 1975	n.v.	unbek.	10	Feld
Herd	Holz	Stuecke	Voll	Weichholz	Lohberger	-	1980	n.v.	-	8,1	Feld
Herd	Holz	Stuecke	Voll	Hartholz	(Eigenbau)	-	1993	n.v.		12,6	Feld
Kachel	Braunkohle	Brikett	Teil	BB-Rheinisch 2			ca. 80er Jahre	n.v.	9,5	6,5	Pruefstand
Kachel	Braunkohle	Brikett	Teil	BB-Rheinisch 2			ca. 80er Jahre	n.v.	9,5	6,5	Pruefstand
Kachel	Braunkohle	Brikett	Teil	BB-Mitteldeutsch 2			ca. 80er Jahre	n.v.	9,5	5,9	Pruefstand
Kachel	Braunkohle	Brikett	Teil	BB-Mitteldeutsch 2			ca. 80er Jahre	n.v.	9,5	5,7	Pruefstand
Kachel	Braunkohle	Brikett	Teil	BB-Lausitz 1			ca. 80er Jahre	n.v.	9,5	5,6	Pruefstand
Kachel	Braunkohle	Brikett	Teil	BB-Lausitz 1			ca. 80er Jahre	n.v.	9,5	5,7	Pruefstand
Kachel	Braunkohle	Brikett	Teil	BB-Rheinisch 1			ca. 80er Jahre	n.v.	9,5	5,5	Pruefstand
Kachel	Braunkohle	Brikett	Teil	BB-Rheinisch 1			ca. 80er Jahre	n.v.	9,5	6,4	Pruefstand
Kachel	Braunkohle	Brikett	Voll	Lausitz 3	n.b. nbl		vor 1990	n.v.	7,5	7,5	Pruefstand
Kachel	Braunkohle	Brikett	Voll	Stedten	n.b. nbl		vor 1990	n.v.	7,5	7,5	Pruefstand
Kachel	Braunkohle	Brikett	Voll	Profen 1	n.b. nbl		vor 1990	n.v.	7,5	7,5	Pruefstand
Kachel	Braunkohle	Brikett	Voll	BB-Rheinisch 2			ca. 80er Jahre	n.v.	9,5	9,4	Pruefstand
Kachel	Braunkohle	Brikett	Voll	BB-Rheinisch 2			ca. 80er Jahre	n.v.	9,5	8,2	Pruefstand
Kachel	Braunkohle	Brikett	Voll	BB-Mitteldeutsch 1			ca. 80er Jahre	n.v.	9,5	9,9	Pruefstand
Kachel	Braunkohle	Brikett	Voll	BB-Mitteldeutsch 2			ca. 80er Jahre	n.v.	9,5	9,2	Pruefstand
Kachel	Braunkohle	Brikett	Voll	BB-Lausitz 1			ca. 80er Jahre	n.v.	9,5	9,2	Pruefstand
Kachel	Braunkohle	Brikett	Voll	BB-Lausitz 1			ca. 80er Jahre	n.v.	9,5	10,2	Pruefstand
Kachel	Braunkohle	Brikett	Voll	BB-Rheinisch 1			ca. 80er Jahre	n.v.	9,5	9,8	Pruefstand
Kachel	Braunkohle	Brikett	Voll	BB-Rheinisch 1			ca. 80er Jahre	n.v.	9,5	9,5	Pruefstand
Kachel	Holz	Brikett	Voll	Nadelholzgemisch,		Kachelofen *op	Anfang 90er	n.v.	8,5	8,5	Pruefstand
Kachel	Holz	Brikett	Voll	Nadelholzgemisch		Kachelofen *op	Anfang 90er	n.v.	8,5	8,5	Pruefstand
Kachel	Holz	Stuecke	Teil	Buchenscheitholz			ca. 80er Jahre	n.v.	9,5	6,5	Pruefstand
Kachel	Holz	Stuecke	Teil	Buchenscheitholz			ca. 80er Jahre	n.v.	9,5	6,4	Pruefstand
Kachel	Holz	Stuecke	Voll	Fichte ohne U. Brunner, B4		Durchbrandofen HB01E		n.v.	11		Pruefstand
Kachel	Holz	Stuecke	Voll	Holz, Buche, Iutro		Kachelofen *eil	70er - 80er	n.v.	7	7	Pruefstand
Kachel	Holz	Stuecke	Voll	Holz, Nadelholzgemisch		Kachelofen *eil	70er - 80er	n.v.	7	7	Pruefstand
Kachel	Holz	Stuecke	Voll	Holz, Buche, Iutro		Kachelofen *op	Anfang 90er	n.v.	8,5	8,5	Pruefstand
Kachel	Holz	Stuecke	Voll	Holz, Nadelholzgemisch, I		Kachelofen *op	Anfang 90er	n.v.	8,5	8,5	Pruefstand
Kachel	Holz	Stuecke	Voll	Holz, Fichte, feucht		Kachelofen *op	Anfang 90er	n.v.	8,5	8,5	Pruefstand
Kachel	Holz	Stuecke	Voll	Hartholz	unbek.	unbek.	1990	n.v.	unbek.	18,3	Feld
Kachel	Holz	Stuecke	Voll		Justus	4630-8	1998	n.v.	8	7,7	Feld
Kachel	Holz	Stuecke	Voll	Buchenscheitholz			ca. 80er Jahre	n.v.	9,5	9,3	Pruefstand
Kachel	Holz	Stuecke	Voll	Buchenscheitholz			ca. 80er Jahre	n.v.	9,5	9,8	Pruefstand
Kachel	Holz	Stuecke	Voll		Buderus	Kandern		n.v.	8	21,2	Pruefstand
Kachel	Koks (aus S	Kohle	Teil	Steinkohlenkoks			ca. 80er Jahre	n.v.	9,5	5,6	Pruefstand
Kachel	Koks (aus S	Kohle	Teil	Steinkohlenkoks			ca. 80er Jahre	n.v.	9,5	4,1	Pruefstand
Kachel	Koks (aus S	Kohle	Voll	Steinkohlenkoks			ca. 80er Jahre	n.v.	9,5	9,1	Pruefstand
Kachel	Koks (aus S	Kohle	Voll	Steinkohlenkoks			ca. 80er Jahre	n.v.	9,5	10	Pruefstand
Kachel	Steinkohle	Kohle	Teil	Anthrazit 1			ca. 80er Jahre	n.v.	9,5	4,7	Pruefstand
Kachel	Steinkohle	Kohle	Teil	Anthrazit 1			ca. 80er Jahre	n.v.	9,5	5,1	Pruefstand
Kachel	Steinkohle	Kohle	Teil	Steinkohlebrikett (Eierkohle)			ca. 80er Jahre	n.v.	9,5	4,9	Pruefstand
Kachel	Steinkohle	Kohle	Teil	Steinkohlebrikett (Eierkohle)			ca. 80er Jahre	n.v.	9,5	5,3	Pruefstand
Kachel	Steinkohle	Kohle	Voll	Anthrazit 1			ca. 80er Jahre	n.v.	9,5	8,2	Pruefstand
Kachel	Steinkohle	Kohle	Voll	Anthrazit 1			ca. 80er Jahre	n.v.	9,5	9,9	Pruefstand
Kachel	Steinkohle	Kohle	Voll	Steinkohlebrikett (Eierkohle)			ca. 80er Jahre	n.v.	9,5	9,7	Pruefstand
Kachel	Steinkohle	Kohle	Voll	Steinkohlebrikett (Eierkohle)			ca. 80er Jahre	n.v.	9,5	10	Pruefstand
Kaminofen	Braunkohle	Brikett	Teil	6-Zoll-Briket	Fa. DGK	PREMIUM-Kar	vor 1994	n.v.	9	5,5	Pruefstand
Kaminofen	Braunkohle	Brikett	Teil	BB-Rheinisch	k.A.		ab 1986	n.v.	7	4,7	Pruefstand
Kaminofen	Braunkohle	Brikett	Teil	BB-Rheinisch	k.A.		ab 1986	n.v.	7	4,55	Pruefstand
Kaminofen	Braunkohle	Brikett	Teil	BB-Rheinisch	k.A.		ab 1987	n.v.	7	4,5	Pruefstand

## Tabellen der Emissionsfaktoren

Lit	Benzo(a)p [kg/TJ]	Benzol [kg/TJ]	HCl [kg/TJ]	Formald. [kg/TJ]	Ges.-C [kg/TJ]	CO [kg/TJ]	PCB DIN (6) [mg/TJ]	PCB I-TE (12) [mg/TJ]	PCDD/ DF [mg/TJ]	Staub [kg/TJ]	NOx [kg/TJ]	PAK (16) [kg/TJ]	PAK (4) [kg/TJ]
UBA 10403527 1996					72	1130			0,024		79,7		
UBA 10403527 1996					210	1371			0,031		67,5		
UBA 10403527 1996					227	2215			0,021		59,8		
UBA 10403527 1996					313	3045			0,019		56,7		
UBA 10403527 1996					5	5132			0,05		27,6		
UBA 10403527 1996					6	4777			0,069		27,6		
FTU 2000									0,12				
FTU 2000									0,048				
FTU 2000									0,15				
FTU 2000									0,073				
UBA 10403527 1996					43	2147			0,01		78,2		
UBA 10403527 1996					91	2496			0,011		75,1		
UBA 10403527 1996					106	2438					70,5		
UBA 10403527 1996					99	3464					65,9		
UBA 10403527 1996					127	2877					73,6		
UBA 10403527 1996					164	2486					79,7		
UBA 10403527 1996					78	2189			0,055		73,6		
UBA 10403527 1996					26	1771			0,016		101,2		
LAU-SA 1998	0,002	0,42	4,6		37	1116			0,027	7	81	0,06	0,009062
LAU-SA 1998	0,008	0,73	5,7		41,1	746			0,035	30	74	0,21	0,004298
LAU-SA 1998	0,25	0,3	0,43		128	1740			0,016	119	70	5,29	0,7326
UBA 10403527 1996					100	1302			0,013		99,7		
UBA 10403527 1996					135	1551			0,019		105,8		
UBA 10403527 1996					48	1058			0,022		84,3		
UBA 10403527 1996					61	1317			0,009		86		
UBA 10403527 1996					55	1049			0,027		70,5		
UBA 10403527 1996					61	1075			0,012		87,4		
UBA 10403527 1996					151	1116			0,084		99,7		
UBA 10403527 1996					49	944			0,078		102,7		
SiMLU 142 0					69,3	1018			0,0099		31,68	0,3406	
SiMLU 142 0					35,64	606,5			0,01452		36,96	0,3775	
UBA 10403527 1996					666	5540			0,01		46		
UBA 10403527 1996					312	4083			0,009		47,5		
LFUBY 1996	0,000188				168,3	1696			0,04092	55,04	33,2	7,213	0,000569
SiMLU 142 0					440,9	3873			0,00924		64,02	5,814	
SiMLU 142 0					441,5	3204			0,004488		64,02	2,617	
SiMLU 142 0					314,2	1577			0,002838		76,56	0,6699	
SiMLU 142 0					277,9	1131			0,004158		39,6	0,9161	
SiMLU 142 0					747,1	2565			0,00726		44,88	3,422	
FTU 2000									0,045				
FTU 2000									0,12				
UBA 10403527 1996					122	1851			0,01		55,2		
UBA 10403527 1996					122	2264			0,028		65,9		
UMEG-MP 2005	0,006892	5,806	2,523		42,08	936,4				64,86	65,89	1,528	0,04125
UBA 10403527 1996					1	671			0,028		46		
UBA 10403527 1996					1	931			0,02		35,3		
UBA 10403527 1996					1	301			0,018		47,5		
UBA 10403527 1996					1	406			0,049		49		
UBA 10403527 1996					67	3855			0,006		79,7		
UBA 10403527 1996					57	3108			0,01		81,3		
UBA 10403527 1996					28	3846			0,007		78,2		
UBA 10403527 1996					56	4951			0,01		78,2		
UBA 10403527 1996					22	1513			0,01		102,7		
UBA 10403527 1996					15	1071			0,013		87,4		
UBA 10403527 1996					46	924			0,018		73,6		
UBA 10403527 1996					30	932			0,017		81,3		
LIS 114 1994	0,01954	0,01756		0,924	1937	13860					131,3	1,499	
UBA 10403527 1996					223	3038			0,011		93,5		
UBA 10403527 1996					227	3111			0,008		92		
UBA 10403527 1996					523	3653			0,261		96,6		

## Tabellen der Emissionsfaktoren

Ofenkategorie	Brennstoff	Brennstoffform	Laststufe	Bemerkg BST	Hersteller	Typ	Baujahr	Abgasreinigung	NWL	Leist.BZ	Messprogramm
Kaminofen	Braunkohle	Brikett	Teil	BB-Rheinisch	k.A.		ab 1987	n.v.	7	4,3	Pruefstand
Kaminofen	Braunkohle	Brikett	Voll	Rheinische Braunkohle			ca. 1994	k.A.	7	8	Pruefstand
Kaminofen	Braunkohle	Brikett	Voll				ca. 1994	k.A.	8	8,5	Pruefstand
Kaminofen	Braunkohle	Brikett	Voll	BB-Rheinisch	k.A.		ab 1986	n.v.	7	7,14	Pruefstand
Kaminofen	Braunkohle	Brikett	Voll	BB-Rheinisch	k.A.		ab 1986	n.v.	7	7,49	Pruefstand
Kaminofen	Braunkohle	Brikett	Voll	BB-Rheinisch	k.A.		ab 1987	n.v.	7	6,9	Pruefstand
Kaminofen	Braunkohle	Brikett	Voll	BB-Rheinisch	k.A.		ab 1987	n.v.	7	7,2	Pruefstand
Kaminofen	Holz	Brikett	Teil		Fa. DGK	PREMIUM-Kar	vor 1994	n.v.	9	6	Pruefstand
Kaminofen	Holz	Stuecke	diverse	11 - 17,5 %	Fa. DGK	PREMIUM-Kar	vor 1994	n.v.	9		Pruefstand
Kaminofen	Holz	Stuecke	diverse	38 - 38 %	Fa. DGK	PREMIUM-Kar	vor 1994	n.v.	9		Pruefstand
Kaminofen	Holz	Stuecke	Teil	Scheite 25 cm	10,56 kg		ca. 1992	n.v.	10		Pruefstand
Kaminofen	Holz	Stuecke	Teil	Buchensch	k.A.		ab 1987	n.v.	7	6,9	Pruefstand
Kaminofen	Holz	Stuecke	Teil	Buchensch	k.A.		ab 1987	n.v.	7	8,2	Pruefstand
Kaminofen	Holz	Stuecke	Teil	Buchensch	k.A.		ab 1987	n.v.	7	4,3	Pruefstand
Kaminofen	Holz	Stuecke	Teil	Buchensch	k.A.		ab 1987	n.v.	7	3,9	Pruefstand
Kaminofen	Holz	Stuecke	Voll	Buchenholz			ca. 1994	k.A.	7	6,5	Pruefstand
Kaminofen	Holz	Stuecke	Voll	Buchenholz			ca. 1994	k.A.	8	6	Pruefstand
Kaminofen	Holz	Stuecke	Voll	Scheite 25 cm	11,72 kg		ca. 1992	n.v.	10		Pruefstand
Kaminofen	Steinkohle	Kohle	Teil	Steinkohle	k.A.		ab 1987	n.v.	7	4,3	Pruefstand
Kaminofen	Steinkohle	Kohle	Teil	Steinkohle	k.A.		ab 1987	n.v.	7	4,3	Pruefstand
Kaminofen	Steinkohle	Kohle	Voll	poln. Ursprung,	3,68 kg		ca. 1992	n.v.	10		Feld
Kaminofen	Steinkohle	Kohle	Voll	Steinkohle	k.A.		ab 1987	n.v.	7	7,9	Pruefstand
Kaminofen	Steinkohle	Kohle	Voll	Steinkohle	k.A.		ab 1987	n.v.	7	6,8	Pruefstand
Kessel gr	Altholz, Vers	Brikett	Voll	Briketts aus	k.A.	k.A.	check	n.v.	65	65	Feld
Kessel gr	Altholz, Vers	Hack	Teil	unbesch. S	Ackermann G	FSB-2000-3	1992	Zyklon	300	200	Pruefstand
Kessel gr	Altholz, Vers	Hack	Teil	Spanplatte	Ackermann G	FSB-2000-3	1992	Zyklon	300	200	Pruefstand
Kessel gr	Altholz, Vers	Hack	Teil	Spanplatter	Ackermann G	FSB-2000-3	1992	Zyklon	300	175	Pruefstand
Kessel gr	Altholz, Vers	Hack	Teil	Feuchte = 22 %		Unterschubfeu	< 1997	Filter	175	145	Pruefstand
Kessel gr	Altholz, Vers	Hack	Teil	Holz- und S	Fröling	Lambdamatic 60		n.v.	70-80 kW	20	Feld
Kessel gr	Altholz, Vers	Hack	Teil	Hackschnitz	k.A.	k.A.	check	Zyklon	960		Feld
Kessel gr	Altholz, Vers	Hack	Voll	Spanplatter	molting Feuer	NRK 502	2000	n.v.	585	592	Feld
Kessel gr	Altholz, Vers	Hack	Voll	Versuch 10		Prototyp-Vorofen	feuerung mit F	k.A.	150	150	Pruefstand
Kessel gr	Altholz, Vers	Hack	Voll	Versuch 11		Prototyp-Vorofen	feuerung mit F	k.A.	150	150	Pruefstand
Kessel gr	Altholz, Vers	Hack	Voll	Altholz, Versuch 12		Prototyp-Vorofen	feuerung mit F	k.A.	150	150	Pruefstand
Kessel gr	Altholz, Vers	Hack	Voll	Altholz schnitzel ohne	Feinanteil		1990	Zyklon	850	850	Feld
Kessel gr	Altholz, Vers	Hack	Voll	Feuchte = 20 %		Unterschubfeu	< 1997	Filter	175	161	Pruefstand
Kessel gr	Altholz, Vers	Hack	Voll	Feuchte = 23 %		Unterschubfeu	< 1997	Filter	175	175	Pruefstand
Kessel gr	Altholz, Vers	Hack	Voll	Feuchte = 19 %		Unterschubfeu	< 1997	Filter	175	164	Pruefstand
Kessel gr	Altholz, Vers	Hack	Voll	Cl-freie Spa	k.A.	k.A.	check	n.v.	150	150	Pruefstand
Kessel gr	Altholz, Vers	Hack	Voll	Gatterspän	k.A.	k.A.	check	Beruhigung	400	400	Feld
Kessel gr	Altholz, Vers	Hack	Voll	Hackschnitz	k.A.	k.A.	check	Zyklon	960	960	Feld
Kessel gr	Altholz, Vers	Hack	Voll	Holz- und S	Fröling	Lambdamatic 60		n.v.	70-80 kW	51	Feld
Kessel gr	Altholz, Vers	Spaene	k.A.	Brennstoff: Späne, naturb		Unterschubvor	1993	k.A.	120		Feld
Kessel gr	Altholz, Vers	Spaene	k.A.	Brennstoff: Späne, naturb		Unterschub/Vo	1993	k.A.	120		Feld
Kessel gr	Altholz, Vers	Spaene	k.A.	Brennstoff: naturbelassene	Späne einblasf		1979	k.A.	170		Feld
Kessel gr	Altholz, Vers	Spaene	k.A.	Brennstoff: Späne, Mehl,			1981	k.A.	230		Feld
Kessel gr	Altholz, Vers	Spaene	k.A.	Brennstoff: Späne, Mehl, H		Unterschubfeu	1989	k.A.	430		Feld
Kessel gr	Altholz, Vers	Spaene	k.A.	Brennholz: Stückholz, Säg		Wärmulftofen	1990	k.A.	120		Feld
Kessel gr	Altholz, Vers	Spaene	k.A.	Brennstoff: Späne, vor allem	Balsa		1990	k.A.	800		Feld
Kessel gr	Altholz, Vers	Spaene	k.A.	Späne, Mehl, Häckselgut		Unterschubfeu	1992	k.A.	200		Feld
Kessel gr	Altholz, Vers	Spaene	k.A.	Brennstoff: Späne, Mehl, H		Unterschubfeu	1993	k.A.	300		Feld
Kessel gr	Altholz, Vers	Spaene	k.A.	Späne, naturbelassen + in		Unterschubfeu	1993	k.A.	120		Feld
Kessel gr	Altholz, Vers	Spaene	k.A.	Späne, Mehl, Häckselgut,		Unterschubfeu	1993	k.A.	800		Feld
Kessel gr	Altholz, Vers	Spaene	Voll				1981	k.A.	230	230	Feld
Kessel gr	Altholz, Vers	Spaene	Voll	Späne, Mehl, Häckselgut		Unterschubfeu	1989	k.A.	430	430	Feld
Kessel gr	Altholz, Vers	Spaene	Voll			Wärmulftofen	1990	k.A.	120	120	Feld
Kessel gr	Altholz, Vers	Spaene	Voll			Unterschubfeu	1992	k.A.	200	200	Feld
Kessel gr	Altholz, Vers	Spaene	Voll			Unterschubfeu	1993	k.A.	300	300	Feld
Kessel gr	Altholz, Vers	Stuecke	k.A.	Späne, Stückholz			1989	k.A.	145		Feld
Kessel gr	Altholz, Vers	Stuecke	k.A.	Stückholz, wenig Späne,	7	Schachfeueru	1991	k.A.	80		Feld

## Tabellen der Emissionsfaktoren

Lit	Benzo(a)p [kg/TJ]	Benzol [kg/TJ]	HCl [kg/TJ]	Formald. [kg/TJ]	Ges.-C [kg/TJ]	CO [kg/TJ]	PCB DIN (6) [mg/TJ]	PCB I-TE (12) [mg/TJ]	PCDD/ DF [mg/TJ]	Staub [kg/TJ]	NOx [kg/TJ]	PAK (16) [kg/TJ]	PAK (4) [kg/TJ]
UBA 10403527 1996					352	2895			0,204		99,7		
IVD 30-1994 1994					26,4	1723				19,14	91,74		
IVD 30-1994 1994					13,2	1228				27,06	107,6		
UBA 10403527 1996					36	1020			0,061		115		
UBA 10403527 1996					18	798			0,038		105,8		
UBA 10403527 1996					94	1385			0,2548		99,7		
UBA 10403527 1996					94	1853			0,336		119,6		
LIS 114 1994	0,0169	0,002112		13,13	334,6	7920				192,7	64,68	1,126	
LIS 114 1994	0,06442	0,003485		18,55	283,1	7920				202	64,02	2,272	
LIS 114 1994	0,08184	0,00462		18,41	163	9900				171,6	163	4,542	
ÖUBA M-153 0	0,01418								0,2812			1,022	0,05067
UBA 10403527 1996					208	2224			0,038		42,9		
UBA 10403527 1996					656	5158			0,011		35,3		
UBA 10403527 1996					543	3824			0,004		52,1		
UBA 10403527 1996					771	3786			0,003		50,6		
IVD 30-1994 1994					138,6	3148				47,52	686,4		
IVD 30-1994 1994					85,8	1657				27,06	88,44		
ÖUBA M-153 0	0,006155								0,1457			0,6877	0,0239
UBA 10403527 1996					198	3371			0,047		82,8		
UBA 10403527 1996					225	3112			0,031		84,3		
ÖUBA M-153 0	0,01522								1,933			0,9738	0,05018
UBA 10403527 1996					127	1400			0,081		67,5		
UBA 10403527 1996					150	1454			0,068		70,5		
WKI Nr. 30 1994			10,89		42,57	1039			0,05082				
LfUBY 1996			0,528		19,8	82,5			0,0198	37,09	491	0,00361	0,00002
LfUBY 1996			0,594		9,9	104,9			0,01254	37,55	500,9	0,00198	0,000007
LfUBY 1996			19,8		1,32	31,68			0,3168	30,69	500,9	0,002277	0,000007
IVD 38-1997 1997			3,696			23,23			0,1742		489,5		
UMEG-MP 2005		0,8382	6,699	1,742		1716				190,1	906,2	0,1032	
WKI Nr. 30 1994			0,66		2,31	418,8			0,00231				
UMEG_43-18/03 2004		0,08568	96,38	2,786		85,67				79,69	540,2	0,08567	
BUWAL 208 1993						39,6			0,05016				
BUWAL 208 1993						1980			0,01584				
BUWAL 208 1993						165			9,372				
BUWAL 208 1993						36,96			1,426				
IVD 38-1997 1997						33,26			68,64		221,8		
IVD 38-1997 1997			7,392			15,84			100,3		139,9		
IVD 38-1997 1997						13,2			47,52		162,1		
WKI Nr. 30 1994						1024			0,03432				
WKI Nr. 30 1994			0,66		13,2	342,2			0,0198				
WKI Nr. 30 1994			0,66		4,62	411,2			0,0033				
UMEG-MP 2005		0,3908	4,036	0,6267		170,8				65,39	963,3	0,06692	
IVD 33-1996 1996			9,9			1233			5,993	58,74	134,7		
IVD 33-1996 1996			3,3		2,336	137,3			0,33	42,9	173,5		
IVD 33-1996 1996					126,7	3016			0,1518		139,9		
IVD 33-1996 1996			7,92		10,3	908,5			0,066	156,4			
IVD 33-1996 1996			36,96		13,53	808,5			1,802	292,4	72,67		
IVD 33-1996 1996			14,52		136,1	3152			1,624	45,54	76,63		
IVD 33-1996 1996			24,42		22,11	1121			0,0528	60,06	106,2		
IVD 33-1996 1996			3,828		1,386	83,16			0,1716	53,46	193,1		
IVD 33-1996 1996			6,204		162,5	1597			0,5346	194	301,1		
IVD 33-1996 1996			7,26		3,696	374,9			0,3564	44,22	60,19		
IVD 33-1996 1996			85,14		1,261	248,2			0,2442	183,5	164,5		
IVD 33-1996 1996		0,04257			2,64	206,6							
IVD 33-1996 1996		0,1379			3,3	201,3							
IVD 33-1996 1996		6,405			40,26	2009							
IVD 33-1996 1996		0,05676			0,99	28,71							
IVD 33-1996 1996		0,0825			5,94	78,54							
IVD 33-1996 1996			3,3		392,7	7767			0,2904	242,9	72,93		
IVD 33-1996 1996			8,58		317,5	2835			0,4686	166,3	270,7		

## Tabellen der Emissionsfaktoren

Ofenkategorie	Brennstoff	Brennstoffform	Laststufe	Bemerkg BST	Hersteller	Typ	Baujahr	Abgasreinigung	NWL	Leist.BZ	Messprogramm
Kessel gr	Altholz, Vers	Stuecke	k.A.	Brennstoff: Stückholz und		Unterschubfeu	1993	k.A.	150		Feld
Kessel gr	Altholz, Vers	Stuecke	Teil	Feuchte = 35 %		Unterschubfeu	< 1997	Filter	175	113	Pruefstand
Kessel gr	Altholz, Vers	Stuecke	Voll	Hackschnitz	k.A.	k.A.	check	n.v.	65	65	Feld
Kessel gr	Altholz, Vers	Stuecke	Voll			Schachtfeueru	1991	k.A.	80	80	Feld
Kessel gr	Braunkohle	Brikett	Teil	BB-Rheinis	k.A.		ca. 1984	Zyklon	930	370	Pruefstand
Kessel gr	Braunkohle	Brikett	Teil	BB-Lausitz	k.A.		ca. 1984	Zyklon	930	316	Pruefstand
Kessel gr	Braunkohle	Brikett	Voll	BB-Rheinis	k.A.		ca. 1984	Zyklon	930	930	Pruefstand
Kessel gr	Braunkohle	Brikett	Voll	BB-Lausitz	k.A.		ca. 1984	Zyklon	930	717	Pruefstand
Kessel gr	Holz	Hack	Schwach		ZIMA, Achern	TRIOMAT	1999	n.v.	98 kW	7	Feld
Kessel gr	Holz	Hack	Schwach	Fichtenholz	in Literaturstelle als "Teillast" bezeichnet			k.A.	65	0	Pruefstand
Kessel gr	Holz	Hack	Teil	Fichte mit F	Ackermann G	FSB-2000-3	1992	Zyklon	300	155	Pruefstand
Kessel gr	Holz	Hack	Teil	Fichtenholz		BSHR Energie- und Umwelte	< 2000	Zyklon	250	250	Pruefstand
Kessel gr	Holz	Hack	Teil	Fichtenholz				k.A.	65	0	Pruefstand
Kessel gr	Holz	Hack	Teil	Buchenholz ca 60 %f		Unterschubfeu	1990	check	110	65	Pruefstand
Kessel gr	Holz	Hack	Voll		ZIMA, Achern	TRIOMAT	1999	n.v.	98 kW	50	Feld
Kessel gr	Holz	Hack	Voll	Nadelholz	Viessmann	1005-43	1969	n.v.	55 kW	62	Feld
Kessel gr	Holz	Hack	Voll	Fichtenholz				k.A.	65	65	Pruefstand
Kessel gr	Holz	Hack	Voll	Feuchte = 40 %		Prototyp-Vorofenfeuerung mit f		k.A.	150	150	Pruefstand
Kessel gr	Holz	Hack	Voll	Buchenholz 40 %F		Prototyp-Vorofenfeuerung mit f		k.A.	150	150	Pruefstand
Kessel gr	Holz	Hack	Voll	Hackschnitz	k.A.	k.A.	check	Zyklon	800	800	Feld
Kessel gr	Holz	Spaene	k.A.				1988	k.A.	470		Feld
Kessel gr	Holz	Spaene	Teil	naturbel. Hd	Nolting	DBK 80	1990	Zyklon	100		Feld
Kessel gr	Holz	Spaene	Voll	Fichtenspä	k.A.	k.A.	check	n.v.	230	230	Pruefstand
Kessel gr	Holz	Stuecke	Schwach		nolting	NRK 162	1995	n.v.	187 kW	5	Feld
Kessel gr	Holz	Stuecke	Schwach	Nadelholz	Viessmann	1005-43	1969	n.v.	55 kW	5	Feld
Kessel gr	Holz	Stuecke	Voll	Nadelholz,	inolting	NRK 162	1995	n.v.	187 kW	160	Feld
Kessel gr	Holz	Stuecke	Voll	Feuchte = 37 %		Unterschubfeu	< 1997	Filter	175	173	Pruefstand
Kessel gr	Holz	Stuecke	Voll	Nadelholz	k.A.	k.A.	check	Zyklon	58	58	Feld
Kessel gr	Holz	Stuecke	Voll	Pappelholz	k.A.	k.A.	check	n.v.	65	65	Feld
Kessel gr	Steinkohle	Kohle	Voll	Anthrazit 2,	k.A.		ca. 1985	Zyklon	400	301	Pruefstand
Kessel gr	Steinkohle	Kohle	Voll	Anthrazit 2	k.A.		ca. 1985	Zyklon	400	316	Pruefstand
Kessel kl	Holz	Pellet	Voll		Hager Energie	cp 15	2001	n.v.	14,9 kW	7	Feld
Kessel kl	Holz	Pellet	Voll		BGF	BKG K15	2001	n.v.	14,9 kW	14,5	Feld
Kessel kl	Holz	Pellet	Voll		VWR-Pelletiss	KP 15 KP 25	1999	n.v.	25	22,2	Feld
Kessel kl	Holz	Stuecke	Schwach	Lärche	Windhager	FRU 16	2000	n.v.	12,7	8	Feld
Kessel kl	Holz	Stuecke	Teil	Tanne, Lau	Fischer, Günz	SHK 14	2002	n.v.	14,8	9	Feld
Kessel kl	Holz	Stuecke	Teil	Nadelholz	Windhager, S	FRU 16	1996	n.v.	12,7	9	Feld
Kessel kl	Holz	Stuecke	Teil		Fröling	FH-G 20	1989	n.v.	20	15,9	Feld
Kessel kl	Holz	Stuecke	Voll		Wolf	FFS	2002	n.v.	14,6 kW	21	Feld
Kessel kl	Holz	Stuecke	Voll	Lärche	Windhager	FRU 16	2000	n.v.	12,7	26,7	Feld
Kessel kl	Holz	Stuecke	Voll	Tanne, Lau	Fischer, Günz	SHK 14	2002	n.v.	14,8	11	Feld
Kessel kl	Holz	Stuecke	Voll	Nadelholz	Windhager, S	FRU 16	1996	n.v.	12,7	17,3	Feld
Kessel kl	Holz	Stuecke	Voll		Degatherm	unbek.	1983	n.v.	ca 13-15 kW	12,9	Feld
Kessel kl	Koks (aus S	Kohle	Voll		Hoal	Variolyt VL 32	1981	n.v.	24,4	31,7	Feld
Kessel kl	Steinkohle	Kohle	Voll	Anthrazit 3,	k.A.		ab 1986	n.v.	17	17,85	Pruefstand
Kessel kl	Steinkohle	Kohle	Voll	Anthrazit 3,	k.A.		ab 1986	n.v.	17	17,3	Pruefstand
Kessel mi	Altholz, Vers	Spaene	k.A.	Späne, Sägemehl, Pellets		Warmluftofen	1987	k.A.	40		Feld
Kessel mi	Altholz, Vers	Spaene	Voll	Brennstoff: Späne, Sägem		Warmluftofen	1987	k.A.	40	40	Feld
Kessel mi	Braunkohle	Brikett	Schwach		Wilhelm und S	WSF DE 30 na	vor 1987	n.v.	35	9	Pruefstand
Kessel mi	Braunkohle	Brikett	Teil		Wilhelm und S	WSF DE 30 na	vor 1987	n.v.	35	24,6	Pruefstand
Kessel mi	Braunkohle	Brikett	Teil	BB-Rheinis	k.A.		ab 1985	n.v.	35	21,7	Pruefstand
Kessel mi	Braunkohle	Brikett	Teil	BB-Rheinis	k.A.		ab 1985	n.v.	35	23,1	Pruefstand
Kessel mi	Braunkohle	Brikett	Voll	mit Verpack	Guntamatik	GAZ 32/S	1987	n.v.	33 - 37	29,5	Feld
Kessel mi	Braunkohle	Brikett	Voll	BB-Rheinis	k.A.		ab 1985	n.v.	35	43	Pruefstand
Kessel mi	Braunkohle	Brikett	Voll	BB-Rheinis	k.A.		ab 1985	n.v.	35	36,4	Pruefstand
Kessel mi	Braunkohle	Brikett	Voll	BB-Lausitz	k.A.		ab 1985	n.v.	35	32,55	Pruefstand
Kessel mi	Braunkohle	Brikett	Voll	BB-Lausitz	k.A.		ab 1985	n.v.	35	37,8	Pruefstand
Kessel mi	Braunkohle	Brikett	Voll	BB-Mittelde	k.A.		ab 1985	n.v.	35	40	Pruefstand
Kessel mi	Braunkohle	Brikett	Voll	BB-Mittelde	k.A.		ab 1985	n.v.	35	39,2	Pruefstand
Kessel mi	Holz	Hack	diverse		Heizomat	HSK-Ra 50		k.A.	50	46,2	Feld

## Tabellen der Emissionsfaktoren

Lit	Benzo(a)p [kg/TJ]	Benzol [kg/TJ]	HCl [kg/TJ]	Formald. [kg/TJ]	Ges.-C [kg/TJ]	CO [kg/TJ]	PCB DIN (6) [mg/TJ]	PCB I-TE (12) [mg/TJ]	PCDD/ DF [mg/TJ]	Staub [kg/TJ]	NOx [kg/TJ]	PAK (16) [kg/TJ]	PAK (4) [kg/TJ]
IVD 33-1996 1996			4,488		81,84	1945			10,57	99	57,68		
IVD 38-1997 1997						37,49			0,4858		129,4		
WKI Nr. 30 1994			0,33		1,98	480,5			0,00561				
IVD 33-1996 1996		0,1815			7,92	105,6							
UBA 10403527 1996					0,66	135			0,015		76,7		
UBA 10403527 1996					11	497			0,011		41,4		
UBA 10403527 1996					88	716			0,022		72,1		
UBA 10403527 1996					63	696			0,013		53,7		
UMEG_43-18/03 2004		4,833	0,1667	22,5		2833				370,8	63,33	0,5833	
TUBraun 1-01 20	0,000071								0,000495			0,01626	0,000352
LfUBY 1996	0,0495		0,462		44,22	219,1			0,02244	28,97	217,8	0,01452	0,00037
TUBraun 1-01 20	0,000045								0,2551			0,02084	0,000946
TUBraun 1-01 20	0,000003								0,008125			0,00157	0,000026
BUWAL 208 1993						858			0,1412				
UMEG_43-18/03 2004		0,1697	0,4239	2,033		678,3				72,5	276	0,08478	
UMEG_43-18/03 2004		0,8569	0,8536	1,625		771				107,2	271,2	0,2998	
TUBraun 1-01 20	0,000003								0,000198			0,001775	0,000036
BUWAL 208 1993						224,4			0,04356				
BUWAL 208 1993						2178			0,1142				
WKI Nr. 30 1994			1,98		86,79	2081			0,0462				
IVD 33-1996 1996			6,468		132,5	4292			0,0396	133,7	148,6		
LfUBY 1996	0,06534		0,99		77,88	2200			0,332	254,8	88,44	4,946	0,1921
WKI Nr. 30 1994						1687			0,2117				
UMEG_43-18/03 2004		12,24	0,1321	33,04		3495				56,28	56,61	1,122	
UMEG_43-18/03 2004		1,223	0,2953	11,64		675				55,27	29,94	0,2531	
UMEG_43-18/03 2004		0,8511	0,1277	3,486		978,6				108,4	257,8	0,2127	
IVD 38-1997 1997						27,98			0,3907		77,62		
WKI Nr. 30 1994			0,33		279,2	1943			0,7927				
WKI Nr. 30 1994					198,7	2343			0,06303				
UBA 10403527 1996					2	151			0,006		65,9		
UBA 10403527 1996					3	185			0,003		58,3		
UMEG_43-18/03	0,01323	0,08889		1,675		923,6				93,58	288,5	0,3086	0,04414
UMEG_43-18/03	0,03819	3,847	0,02128	0,9797		1018				53,5	233,6	2,329	0,08078
FTU 2000									0,001				
UMEG_43-18/03	0,03264	13,06		30,44		4325				117,5	111	2,611	0,07344
UMEG_43-18/03	0,03408	13,64		23,18		6988				73,31	100,6	3,919	0,06817
UMEG_43-18/03	0,06528	20,61	0,02444	41,14		6437				406,6	88	5,214	0,1304
FTU 2000									0,021				
UMEG_43-18/03	0,01721	20,94	0,09258	32,03		3484				96,81	203,9	3,888	0,05439
UMEG_43-18/03	0,01135	13,13		30,75		3851				99,25	212,9	2,291	0,03969
UMEG_43-18/03	0,02139	27,5		28,25		5924				121,1	207,7	3,483	0,07261
UMEG_43-18/03	0,1524	47,31	0,02576	38,75		9246				466,7	130,9	17,04	0,3967
FTU 2000									0,086				
FTU 2000									0,071				
UBA 10403527 1996					89	2170			0,014		136,6		
UBA 10403527 1996					87	2430			0,013		133,4		
IVD 33-1996 1996			2,508		26,27	2068			3,769	19,14	111,9		
IVD 33-1996 1996		2,678			23,1	2231							
LIS 103 1992									0,0046				
LIS 103 1992									0,0079				
UBA 10403527 1996					25	211			0,021		84,3		
UBA 10403527 1996					43	273			0,035		82,8		
FTU 2000									0,4				
UBA 10403527 1996					139	691			0,02		115		
UBA 10403527 1996					70	410			0,049		111,9		
UBA 10403527 1996					48	279			0,017		90,5		
UBA 10403527 1996					82	317			0,03		99,7		
UBA 10403527 1996					26	253			0,011		101,2		
UBA 10403527 1996					130	522			0,02		104,3		
LfUBY 54 537/1	0,000152		0,7062		1,32	102,3			0,0198	20,46	48,18	0,0198	

## Tabellen der Emissionsfaktoren

Ofenkategorie	Brennstoff	Brennstoffform	Laststufe	Bemerkg BST	Hersteller	Typ	Baujahr	Abgasreinigung	NWL	Leist.BZ	Messprogramm
Kessel mi	Holz	Hack	diverse		Heizomat	HSK-Ra 50		k.A.	50	64,05	Feld
Kessel mi	Holz	Hack	k.A.		Biogen	WT-80	1992	n.v.	unbek.	27,7	Feld
Kessel mi	Holz	Hack	Schwach		Ernst Gerlinge	Biokompakt AV	2001	n.v.	45 kW	1	Feld
Kessel mi	Holz	Hack	Teil		Ernst Gerlinge	Biokompakt AV	2001	n.v.	45 kW	33,7	Feld
Kessel mi	Holz	Hack	Teil		Stellrad, Sverr	SHS II-35	1982	n.v.	40,7	19,8	Feld
Kessel mi	Holz	Hack	Voll	Fichtenholz	Okotherm	Biomassefeuerungsanlage, Typ		k.A.		50	Pruefstand
Kessel mi	Holz	Hack	Voll	Nadelholzgemisch, Hackgut			Anfang 90er	k.A.	30	30	Pruefstand
Kessel mi	Holz	Pellet	Voll		Okotherm	Kompakt C0		k.A.	50	40	Feld
Kessel mi	Holz	Pellet	Voll		Okotherm	Kompakt C0		k.A.	49	44	Feld
Kessel mi	Holz	Spaene	Voll	Fichtenspä	k.A.	k.A.	check	n.v.	35	35	Pruefstand
Kessel mi	Holz	Stuecke	k.A.				1993	k.A.	50		Feld
Kessel mi	Holz	Stuecke	Schwach		Viessmann	Mono	1983	n.v.	40 kW	15,5	Feld
Kessel mi	Holz	Stuecke	Schwach	Nadelholz	Stadler, Ulm	H 33	1981	n.v.	38	13	Feld
Kessel mi	Holz	Stuecke	Teil	Tanne, Fichte	Atmos CANKA	DC 32 GS	2001	n.v.	32 kW	19	Feld
Kessel mi	Holz	Stuecke	Teil	Holz, Buche, luro			Anfang 90er	k.A.	30	30	Pruefstand
Kessel mi	Holz	Stuecke	Teil	Holz, Buche, luro: Scheite			Anfang 90er	k.A.	30	30	Pruefstand
Kessel mi	Holz	Stuecke	Teil	lufttrockene	Wilhelm und SWSF	DE 30 na	vor 1987	n.v.	35	14	Pruefstand
Kessel mi	Holz	Stuecke	Teil	Buchensch	k.A.		ab 1985	n.v.	35	20,65	Pruefstand
Kessel mi	Holz	Stuecke	Teil	Buchensch	k.A.		ab 1985	n.v.	35	18,9	Pruefstand
Kessel mi	Holz	Stuecke	Teil		Juno-Burger	Doppletherm 1	1977	n.v.	35		Feld
Kessel mi	Holz	Stuecke	Voll	Nadelholz,	Strebel	vermutlich aus	1996	keine	65 (Koks)	36,5	Feld
Kessel mi	Holz	Stuecke	Voll	Fichte / Tanne	Viessmann	Mono	1983	n.v.	40 kW	58	Feld
Kessel mi	Holz	Stuecke	Voll	überwiegen	Kob und Schä	Pyromat ECO	2000	n.v.			Feld
Kessel mi	Holz	Stuecke	Voll	Tanne, Fichte	Atmos CANKA	DC 32 GS	2001	n.v.	32 kW	28	Feld
Kessel mi	Holz	Stuecke	Voll	Nadelholz	Stadler, Ulm	H 33	1981	n.v.	38	35,5	Feld
Kessel mi	Holz	Stuecke	Voll	Buche, Scheite			Anfang 90er	k.A.	30	30	Pruefstand
Kessel mi	Holz	Stuecke	Voll	Nadelholzgemisch, luro, Scheite			Anfang 90er	k.A.	30	30	Pruefstand
Kessel mi	Holz	Stuecke	Voll	w > 25 %			Anfang 90er	k.A.	30	30	Pruefstand
Kessel mi	Holz	Stuecke	Voll		Rendl	Biocal	1983	n.v.	unbek. 30	30,6	Feld
Kessel mi	Holz	Stuecke	Voll		Stellrad	NC28	1986	n.v.	28	36,1	Feld
Kessel mi	Holz	Stuecke	Voll		Hoval	Ecolyt 35 S	1988	n.v.	32	30,1	Feld
Kessel mi	Holz	Stuecke	Voll		Fröling	FH-G Turbo 30	1990	n.v.	30	29,9	Feld
Kessel mi	Holz	Stuecke	Voll	Buchensch	k.A.		ab 1985	n.v.	35	34	Pruefstand
Kessel mi	Holz	Stuecke	Voll	Buchensch	k.A.		ab 1985	n.v.	35	34,65	Pruefstand
Kessel mi	Holz	Stuecke	Voll	Buchenholz 15,8 %F		Stückholzkessel mit seitlichem,	Zyklon	35	52	Pruefstand	
Kessel mi	Holz	Stuecke	Voll	Buchenholz 15,8 %F		Stückholzkessel mit seitlichem,	Zyklon	35	40	Pruefstand	
Kessel mi	Holz	Stuecke	Voll				1993	k.A.	50	50	Feld
Kessel mi	Holz mit Mü	Stuecke	k.A.		Wilhelm und SWSF	DE 30 na	vor 1987	n.v.	35		Pruefstand
Kessel mi	Holz mit Mü	Stuecke	Voll		Eder	unbek.	1979	n.v.	45	63,5	Feld
Kessel mi	Koks (aus S	Kohle	Schwach		Wilhelm und SWSF	DE 30 na	vor 1987	n.v.	35	10	Pruefstand
Kessel mi	Koks (aus S	Kohle	Schwach		De Dietrich	CF 210	1978	n.v.	25,7	6	Feld
Kessel mi	Koks (aus S	Kohle	Teil		Wilhelm und SWSF	DE 30 na	vor 1987	n.v.	35	19	Pruefstand
Kessel mi	Koks (aus S	Kohle	Teil		Eder	EKO-Therm	1999	n.v.	25 - 30	21,2	Feld
Kessel mi	Steinkohle	Kohle	Schwach	Anthrazitko	Wilhelm und SWSF	DE 30 na	vor 1987	n.v.	35	7	Pruefstand
Kessel mi	Steinkohle	Kohle	Schwach	Eierkohle	Wilhelm und SWSF	DE 30 na	vor 1987	n.v.	35	7	Pruefstand
Kessel mi	Steinkohle	Kohle	Teil	Anthrazitko	Wilhelm und SWSF	DE 30 na	vor 1987	n.v.	35	17	Pruefstand
Kessel mi	Steinkohle	Kohle	Teil	Eierkohle	Wilhelm und SWSF	DE 30 na	vor 1987	n.v.	35	18	Pruefstand
offenK	Braunkohle	Brikett	Voll	6-Zoll-Brike	Fa. Rösler	Vulkan S 65/50	vor 1994	n.v.	11	13,7	Pruefstand
offenK	Holz	Brikett	diverse		Fa. Rösler	Vulkan S 65/50	vor 1994	n.v.	11		Pruefstand
offenK	Holz	Stuecke	diverse	11 - 17,5 %	Fa. Rösler	Vulkan S 65/50	vor 1994	n.v.	11		Pruefstand
offenK	Holz	Stuecke	diverse	38 - 38 % F	Fa. Rösler	Vulkan S 65/50	vor 1994	n.v.	11		Pruefstand
offenK	Holz	Stuecke	k.A.	lufttrockene Buchenholzscheite				n.v.			Pruefstand
offenK	Holz	Stuecke	Voll	Holz, Nadelholzgemisch, luro			Anfang 90er	n.v.	8	8	Pruefstand
offenK	Holz	Stuecke	Voll	12,1 %F	Versuch 1	Cheminéeeofen		n.v.	6	8,7	Pruefstand
offenK	Holz	Stuecke	Voll	12,1 %F		Cheminéeeofen		n.v.	6	11,7	Pruefstand
offenK	Holz mit Mü	sonstige	Voll	Kehricht: 2/3 Papier und K		Cheminéeeofen		n.v.	6		Pruefstand
offenK	Holz mit Mü	Stuecke	k.A.					n.v.			Pruefstand

## Tabellen der Emissionsfaktoren

Lit	Benzo(a)p [kg/TJ]	Benzol [kg/TJ]	HCl [kg/TJ]	Formald. [kg/TJ]	Ges.-C [kg/TJ]	CO [kg/TJ]	PCB DIN (6) [mg/TJ]	PCB i-TE (12) [mg/TJ]	PCDD/ DF [mg/TJ]	Staub [kg/TJ]	NOx [kg/TJ]	PAK (16) [kg/TJ]	PAK (4) [kg/TJ]
LfUBY 54 537/1 2	0,000208				1,485	70,13			0,0132		51,81		
FTU 2000									0,003				
UMEG_43-18/03 2004		1,483		13,19		781,3				63,33	23,44	0,2344	
UMEG_43-18/03 2004		0,5433		1,358		340,8				75,94	195,2	0,09417	
FTU 2000									0,006				
SiMLU 156 2002					1,056	86,46			0,03366	31,02	104,3	0,00396	
SiMLU 142 0					39,6	621,1			0,002508		76,56	0,2475	
LfUBY 54 537/1 2003			9,24		3,96	88,44				7,92	66		
LfUBY 54 537/1 2003			14,52		4,62	180,2				7,26	97,68		
WKI Nr. 30 1994						89,76			0,008184				
IVD 33-1996 1996			2,772		19,91	2004			0,0396	32,34	164,9		
UMEG_43-18/03 2004		2,706	0,18	12,21		2409				122,4	30,69	0,825	
UMEG_43-18/03	0,009	8,092		4,944		3506				41,36	49,44	0,9889	
UMEG_43-18/03	0,01278	10,89		17,21		5554				27,97	140,6	1,432	
SiMLU 142 0					75,9	593,3			0,002178		66	0,05148	
SiMLU 142 0					618,4	3676			0,004686		45,54	0,132	
LIS 103 1992									0,02383				
UBA 10403527 1996					5	589			0,012		61,3		
UBA 10403527 1996					9	250			0,011		56,7		
LfUBY 1996	0,03135	1,102	6,072	43,69	118,1	3330			0,4772	93,06	83,82	3,328	0,08864
UMEG_43-18/03	0,01682	1,01	0,1263	0,5047		336,6				84,17	369,9	1,726	0,06311
UMEG_43-18/03 2004		5,175	0,297	27,57		2780				203,8	74,39	1,033	
UMEG_43-18/03 2004		9,006	0,3131	18,9		2509				43,28	226,9	0,9412	
UMEG_43-18/03	0,008417	2,357	0,05906	0,6306		378,6				26,96	282,2	0,7575	
UMEG_43-18/03	0,05639	24,42		21,36		4497				135	123,9	5,369	0,1344
SiMLU 142 0					7,92	224,4			0,001848		106,9	0,03498	
SiMLU 142 0					11,22	405,9			0,00264		50,16	0,033	
SiMLU 142 0					491,7	3559			0,0099		33	0,1393	
FTU 2000									0,03				
FTU 2000									0,08				
FTU 2000									0,07				
FTU 2000									0,018				
UBA 10403527 1996					9	320			0,016		65,9		
UBA 10403527 1996					5	215			0,018		75,1		
BUWAL 208 1993						6732			0,02244				
BUWAL 208 1993						369,6			0,01267				
IVD 33-1996 1996		0,1043			6,138	229,5							
LIS 103 1992									1,645				
FTU 2000									2,6				
LIS 103 1992									0,006667				
FTU 2000									0,28				
LIS 103 1992									0,01446				
FTU 2000									0,087				
LIS 103 1992									0,0067				
LIS 103 1992									0,0038				
LIS 103 1992									0,00077				
LIS 103 1992									0,0182				
LIS 114 1994	0,02112				809,2	12540				42,9	170,3	15,41	
LIS 114 1994	0,00792	0,000198		29,46	373,6	11220				104,3	103	1,824	
LIS 114 1994	0,01214			20,96	449,5	9900				75,24	101,6	1,72	
LIS 114 1994	0,01056	0,000594		18,94	950,4	11880				156,4	167,6	2,338	
LIS 103 1992									0,00887				
SiMLU 142 0					541,9	2449			0,00726		46,2	0,856	
BUWAL 208 1993						2442			0,06864				
BUWAL 208 1993						4158			0,04224				
BUWAL 208 1993						3960			75,5				
LIS 103 1992									0,6745				

10.4.2 Gerätebezogene Emissionsfaktoren und Endenergieeinsatz 2003

Emissionsfaktoren		Haushalte		Deutschland							
		Leistungsbereich	Endenergieverbrauch	Endenergieverbrauch	Benzol	Benzo-(a)pyren	PAK (16)	PAK (4)	PCDD/F	HCl	Partikel
		kW	TJ	in %	kg/TJ	kg/TJ	kg/TJ	kg/TJ	mg/TJ	kg/TJ	kg/TJ
Brennstoff	Feuerung										
Brennholz	Dauerbrandöfen	< 15	384	0,2		0,0107	1,0697	0,0339	0,0527		72
	Kachelöfen	< 15	69.867	36,7	8,66	0,0110	2,8447	0,0335	0,0088	0,4	112
	Kamine	< 15	27.439	14,4		0,0169	2,8352		0,0073	0,6	160
	Kaminöfen	< 15	34.002	17,9		0,0330	1,7799	0,0562	0,0891		115
	Heizkessel	4 - 25	20.812	10,9	19,52	0,0381	6,3264	0,0854	0,0737		82
	Heizkessel	> 25 - 50	25.287	13,3	6,40	0,0347	2,6310	0,0981	0,0193	3,2	175
	Heizkessel	> 50	8.951	4,7	1,18		0,2480	0,0015	0,4279	0,5	21
	Badeöfen	< 15	237	0,1			0,0907		0,0416		76
	Herde	< 15	3.375	1,8			0,2549		0,0931		77
	<b>Mittlere Emissionsfaktoren</b>		<b>190.355</b>	<b>100,0</b>	<b>9,48</b>	<b>0,0227</b>	<b>2,8304</b>	<b>0,0536</b>	<b>0,0527</b>	<b>0,9894</b>	<b>119</b>

Tabellen der Emissionsfaktoren

Emissionsfaktoren		Kleinverbraucher				Deutschland					
Brennstoff	Feuerung	Leistungsbereich	Endenergieverbrauch in %	Endenergieverbrauch TJ	Benzol kg/TJ	Benzo-(a)pyren kg/TJ	PAK (16) kg/TJ	PAK (4) kg/TJ	PCDD/F mg/TJ	HCl kg/TJ	Partikel kg/TJ
Holz	naturbelas-	< 15	0,0	0		0,0107	1,0697	0,0339	0,0527		72
	senes Holz	< 15	6,9	2.646	8,66	0,0110	2,8447	0,0335	0,0088	0,4	112
(Bereich	Kamine	< 15	0,7	277		0,0169	2,8352		0,0073	0,6	160
Landwirtschaft	Kaminöfen	< 15	1,0	382		0,0330	1,7799	0,0562	0,0891		115
und Gartenbau)	Heizkessel	4 - 25	0,6	248	19,52	0,0381	6,3264	0,0854	0,0737		85
	Heizkessel	> 25 - 50	4,4	1.674	6,40	0,0347	2,6310	0,0981	0,0193	3,2	176
	Heizkessel	> 50	8,6	3.268	1,18		0,2480	0,0015	0,4279	0,5	21
	Badeöfen	< 15	0,0	18			0,0907		0,0416		76
	Herde	< 15	1,2	475			0,2549		0,0931		77
Gewerbliche	handb. Kessel	> 50	29,0	11.064	1,18		0,2480	0,0015	0,4279	0,5	21
Holzfeuer-	meh.besch.Kessel	> 50	30,7	11.742	1,16	0,0723	0,6046	0,8355	0,4998	3,5	63
rungen	handb. Kessel	> 50	8,2	3.121	1,61		0,2480		0,1051	11,1	63
	meh.besch.Kessel	> 50	8,6	3.288	0,63		0,0248		0,1896	7,3	104
	<b>Mittlere Emissionsfaktoren</b>		<b>100,0</b>	<b>38.206</b>	<b>2,06</b>	<b>0,0567</b>	<b>0,6963</b>	<b>0,3264</b>	<b>0,3431</b>	<b>3,1</b>	<b>61</b>

Tabellen der Emissionsfaktoren

Emissionsfaktoren		Haushalte und Kleinverbraucher				Deutschland					
Brennstoff	Feuerung	Leistungsbereich	Endenergieverbrauch in %	Endenergieverbrauch TJ	Benzol kg/TJ	Benzo-(a)pyren kg/TJ	PAK (16) kg/TJ	PAK (4) kg/TJ	PCDD/F mg/TJ	HCl kg/TJ	Partikel kg/TJ
Holz	naturbelas-	< 15	0,2	384		0,0107	1,0697	0,0339	0,0527		72
Brennholz	senes Holz	< 15	31,7	72.514	8,66	0,0110	2,8447	0,0335	0,0088	0,4	112
und Holz	Kamine	< 15	12,1	27.716		0,0169	2,8352		0,0073	0,6	160
aus Landwirtschaft	Kaminöfen	< 15	15,0	34.384		0,0330	1,7799	0,0562	0,0891		115
und Gartenbau	Heizkessel	4 - 25	9,2	21.060	19,52	0,0381	6,3264	0,0854	0,0737		82
	Heizkessel	> 25 - 50	11,8	26.962	6,40	0,0347	2,6310	0,0981	0,0193	3,2	175
	Heizkessel	> 50	5,3	12.218	1,18		0,2480	0,0015	0,4279	0,5	21
	Badeöfen	< 15	0,1	256			0,0907		0,0416		76
	Herde	< 15	1,7	3.850			0,2549		0,0931		77
Gewerbliche	handb. Kessel	> 50	4,8	11.064	1,18		0,2480	0,0015	0,4279	0,5	21
Holzfeuer-	meh.besch.Kessel	> 50	5,1	11.742	1,16	0,0723	0,6046	0,8355	0,4998	3,5	63
rungen	handb. Kessel	> 50	1,4	3.121	1,61		0,2480		0,1051	11,1	63
	meh.besch.Kessel	> 50	1,4	3.288	0,63		0,0248		0,1896	7,3	104
	<b>Mittlere Emissionsfaktoren</b>	<b>&gt; 4</b>	<b>100,0</b>	<b>228.560</b>	<b>7,78</b>	<b>0,0256</b>	<b>2,4737</b>	<b>0,0980</b>	<b>0,1013</b>	<b>1,4</b>	<b>110</b>

Tabellen der Emissionsfaktoren

Emissionsfaktoren	Haushalte und Kleinverbraucher	Deutschland													
		Leistungsbereich	Endenergieverbrauch in %	Endenergieverbrauch TJ	Benzol kg/TJ	Benzo-(a)pyren kg/TJ	PAK (16) kg/TJ	PAK (4) kg/TJ	PCDD/F mg/TJ	HCl kg/TJ	Partikel kg/TJ				
Brennstoff	Feuerung	kW													
Braunkohlen	Dauerbrandöfen	< 15	1,4	255	14,00	0,0352	1,1362	0,1303	0,0289	1,0	289				
	Kachelöfen	< 15	46,7	8.411	0,67	0,0128	0,3360	0,0145	0,0183	7,4	84				
	Kamine	< 15	19,0	3.411	0,67	0,0338	24,6560				24				
	Kaminöfen	< 15	18,5	3.336	0,67	0,0313	2,3984		0,1367		83				
	Heizkessel	4 - 25	5,7	1.034							58				
	Heizkessel	> 25 - 50	3,2	573					0,1266		61				
	Heizkessel	> 50	1,3	230					0,0146		59				
	Badeöfen	< 15	0,3	58					0,0884		31				
	Herde	< 15	3,8	692					0,0840		33				
	<b>Mittlere Emissionsfaktoren</b>	<b>&gt; 4</b>	<b>100,0</b>	<b>17.999</b>	<b>0,89</b>	<b>0,0218</b>	<b>6,1779</b>	<b>0,0179</b>	<b>0,0558</b>	<b>7,2</b>	<b>70</b>				



Tabellen der Emissionsfaktoren

Emissionsfaktoren		Haushalte und Kleinverbraucher					Deutschland					
Brennstoff	Feuerung	Leistungsbereich	Endenergieverbrauch	Endenergieverbrauch	Endenergieverbrauch	Benzol	Benzo(a)pyren	PAK (16)	PAK (4)	PCDD/F	HCl	Partikel
		kW	in %	TJ	kg/TJ							
Steinkohlen	Dauerbrandöfen	< 15	47,8	7.172			0,0462	2,3026	0,2293	0,3542		121
	Kachelöfen	< 15	9,7	1.460						0,0111		33
	Kamine	< 15	1,1	158								42
	Kaminöfen	< 15	1,0	151			0,0152	0,9738	0,0502	0,0596		42
	Heizkessel	4 - 25	0,4	66						0,0066		18
	Heizkessel	> 25 - 50	0,3	50						0,0092		18
	Heizkessel	> 50	39,5	5.917						0,0045		18
	Badeöfen	< 15	0,0	0								
	Herde	< 15	0,2	26								139
	<b>Mittlere Emissionsfaktoren</b>	<b>&gt; 4</b>	<b>100,0</b>	<b>15.000</b>			<b>0,0456</b>	<b>2,2752</b>	<b>0,2256</b>	<b>0,1750</b>		<b>70</b>

10.5 Herstellerverzeichnis

Hersteller von Kleinfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe Herstellername	Strasse	Land	PLZ	Ort	Telefon	Homepage	Herkunft	Feuerung		Ofentyp je nach Bauart								
								handbeschickt	mechanisch	Dauerbrandofen	Kachelofen	Kamin	Badeofen	Herd	Pelletofen	Zentralheizung		
Aichinger Ofen-Welt (atika Feuer AG)	Daimlerstr. 3	D	76676	Graben-Neudorf	07255-7122-0	www.ofenwelt.de	D	X										
Aichinger Ofen-Welt (HASE-)	Daimlerstr. 3	D	76676	Graben-Neudorf	07255-7122-0	www.ofenwelt.de	D	X										
Aichinger Ofen-Welt (Tuliviv)	Daimlerstr. 3	D	76676	Graben-Neudorf	07255-7122-0	www.ofenwelt.de	CH	X										
ARCA Heizkessel GmbH	Sonnenstr. 9	D	91207	Lauf	09123-84681	www.arca-heizkessel.de	D	X										
Austroflam GmbH	Gferth 101	A	4631	Krenolbach	180-3262929	www.austroflam.com	A	X										
BAXI-Werksverfertigung	Eichenfelder Landstr. 1	D	24441	Frensburg	0461-503310	www.baxi.dk	DK	X										
Binder Maschinenbau- und Handelsgesellschaft	Mittendorfer Str. 5	A	8572	Baimbach	03142-29544	www.binder-smbh.at	A	X										
Blotech GmbH	Industriestr. 3	D	83359	Freilassing	08664-494691	www.blotech.or.at	A	X										
Biotherm (GGF-Heizsysteme GmbH)	Vogelsang 9	D	88348	Bad Saulgau	07581-527070	www.pelleis.de/biotherm	D	X										
bösch	Industrie Nord	A	6990	Lustenau	#6577-8131-0	www.boesch.at	A	X										
Budenus Heiztechnik GmbH	Sophienstr. 30 - 32	D	35576	Wetzlar	06441-4181-0	www.heiztechnik.budenus.de	A	X										
Calimax GmbH	Bundestr. 102	A	6630	Reckweil	43-5522-33677	www.calimax.com	A	X										
Carl Capito Heiztechnik GmbH	Mühlenbergstr. 12	D	57290	Neunkirchen	02753-760-142242	www.capito-smbh.de	D	X										
CH - Industrievertretung Frank Christiansen	Groß-Quern 80	D	24972	Quern	04632-376905	www.diedelrichheiztechnik.de	DK	X										
De Dietrich Heiztechnik Vertriebs-GmbH (meridemo	Rheiner Str. 151	D	48282	Emsdetten	02572-23131	www.eder-kesselbau.at	F 7	X										
eder Energie- und Haustechnik GmbH	Friedberger Str. 10	D	90455	Nürnberg	0911-884807	www.elco-koepfer.de	A	X										
ELCO Klöckner Heiztechnik GmbH	Hohenzollernstr. 31	D	72379	Hohenzollern	07471-187-0	www.elco-koepfer.de	D	X										
Energie & Umwelt W. Bach (Liebi LNC, CH (+	Hundsdorfer Str. 10	D	76936	Forbach	07220-232	www.energieundumwelt.com	CH	X										
Ernst Gerlinger - BLOMIPAKT Heiztechnik	Froschack 79	A	4391	Waldhausen	0463-7260-4530	www.bloomipakt.com	A	X										
ERWIN GRANER KESSELBAU e.K.	Hoderackerstr. 3	D	70539	Geislingen	07156-21058	www.graner-kesselbau.de	D	X										
ETA-Industrievertretung Otto Throm	Dahlenweg 11	D	74589	Saaleidorf	07951-43204	www.otto-throm.de	A	X										
FERRO Wärmetechnik GmbH	Am Kleierschlag 1	D	91226	Schwabach	09122-9866-0	www.ferc-vaermetechnik.de	D	X										
FERÖLING	Industriestr. 12	A	4710	Grieksrchen	0043-7248-606-0	www.froelingat.at	A	X										
Georg Fischer GmbH & Co	Postfach 1261	D	89302	Günzburg	08221-9019-0	www.fischerheiztechnik.de	D	X										
GILLES Energie und Umweltechnik GmbH	Kooserbauer Str. 16	A	4810	Gmunden	#437612-3760-0	www.gilles.at	A	X										
GUNTAMATIC Heiztechnik GmbH	Bruck-Waasen 7	A	4722	Peudenbach	0043-7276-2441-0	www.guntamatec.com	D	X										
HAAS + SOHN Ofentechnik GmbH	Herbomer Str. 7 - 9	D	35764	Sinn	0272-5010-0	www.haassohn.com	D	X										
HDG Bavaria Heizkessel & Anlagenbau	Siemensstr. 6 und 22	D	84323	Massing	08724-897-0	www.hdb-bavaria.de	D	X										
HEIZOMAT GmbH	Maicha 21	D	91710	Gunzenhausen	09836-9797-0	www.heizomat.de	D	X										
Herit - Industrievertretung Frank Christiansen	Groß-Quern 80	D	24972	Quern	04632-876905	www.herit.com	A	X										
HERZ Feuerungstechnik GmbH	Str. 8272 Sebersdorf	A	8272	Sebersdorf	0043-3333-2411-0	www.herz-feuerung.com	A	X										
Hoval Hagenberger GmbH	Karl-Hammerschmidt-Str.45	D	85609	Aschheim	089-922097-0	www.hoval.de	A	X										

# Herstellerverzeichnis

Hersteller von Kleinfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe Herstellername	Strasse	Land	PLZ	Ort	Telefon	Homepage	Herkunft	Feuerung					Ofentyp je nach Bauart					
								Handbesicht	mechanisch	Beschicht	Dauerbrandöfen	Kachelöfen	Kaminöfen	Kamin	Badöfen	Herd	Pelletöfen	Zentralheizung
Kalkgruber Solar- und Umwelttechnik KOB & SCHÄFER KG	Werkstr. 1 Flotzbachstr. 33	A	44511	St. Ulrich/Steyer	#7952-50002-0 #43-5574-6770-0	www.kalkgruber.at www.koeb-schaefer.com	A	X									X	X
Kohlbach		A	69222	Wolfurt		www.kohlbach.at	A	X										X
LIGNASOL Holz-Solar-Heizsysteme - KWB	Albrecht-Wirt-Str. 1 Albrecht-Wirt-Str. 2	D	72108	Rottenburg	07457-697715	www.lignasol.de	DK	X									X	X
LIGNASOL Holz-Solar-Heizsysteme - PH		D	72109	Rottenburg	07457-697716	www.lignasol.de	A	X									X	X
LignoTherm Heizsysteme GmbH		A	9852	Trebesing	#0676/6371800	www.lignoTherm.at	D	X									X	X
Lopper Kesselbau GmbH	Rottenburger Str. 5 Klaus-Blank-Str. 1	D	93352	Rohr/Alzhausen	08783-9685-0	www.maxblank.com	S	X									X	X
Max Blank GmbH		D	91747	Westheim		www.naturvaermetechnik.de	D	X									X	X
Naturwärme GmbH	Leipziger Str. 8 Box 134	D	92411	Mühlau	03722-505700	www.naturvaermetechnik.de	D	X									X	X
NIBE AB		SE	28523	Markaryd	#46-433-75100	www.nibe.de	A	X										X
CERTIL-ROHLEDER Wärmetechnik	Postfach 1223	D	71693	Mögglingen	07141-2454-0	www.cerill.de	A	X									X	X
Okofen Heiztechnik GmbH	Kreuzbergstr. 9	D	86868	Mittehneufach	08262-96848-0	www.pelleisheizung.de	A	X									X	X
Olymp-Werke GmbH	Olympstr. 1 - 3	A	6410	Teils	#43-5262-6860	www.olymp.at	DK										X	X
Passat Energie AS	Vestegade 36	DK	8830	Tjele	#45-86652100	www.passat.dk	S										X	X
PeilX Innovative Heiztechnik (Scand	Theodor-Neuling-Str. 37D	37D	28757	Bremen	0421-654400	www.peilx.com	A	X									X	X
Perhofer Bio-Heizung GmbH & Co KG	Waisenegg 115	A	81900	Birkfeld	#43-3174-3705	www.biomat.at	D	X									X	X
RIKA Metallwarenges.m.b.H. & Co KG	Müllerviertel 20	A	4563	Micheldorf		www.rika.at	D	X									X	X
Ritter Energie- und Umweltechnik GmbH & Co. KG (Paradigma)	Ettlinger Str. 30	D	76037	Karlsbad	07202-922-0	www.paradigma.de	A	X									X	X
rosert ENERGIE- und Umweltechnik (Hargasser)	Herrmann-Burte-Str. 24	24	79689	Maulburg	07622-62262	www.rosenweb.de	CH	X									X	X
Schmid AG, Holzfeuerungen	Hörnlistr. 12	CH	8360	Eschikon	#71-9737373	www.holzfeuerung.ch	D	X									X	X
snt Heiztechnik aus Salzburg GmbH	Rechtes Salzlachufer, 40A	A	5101	Salzburg	#43-662-450444-D	www.snt.at	A	X									X	X
skantherm gmbh & co. Kg	Lümenweg 188 a	D	33378	Rheda-Wiedenbrunn	#9242-9381-0	www.skantherm.de	D	X									X	X
Sommerauer & Lindner Heizanlagenbau SL	Timmelkam 113	A	5120	St. Pantaleon	#43-6277-7804	www.sl-heizung.at	A	X									X	X
Speckstein- und Kaminofenaustellung	Robber-Mayer-Str. 6	D	74360	Ilsfeld	07062-653960	www.nunnawuni.com	FIN	X									X	X
Streibelwerk AG CH-Röthrist																		
Niederlassung Mannheim	Wiener Str. 118	D	68219	Mannheim	0621-8793-0	www.stebel.at	D	X										X
Ulrich Brunner GmbH	Zellhuber Ring 17	D	84307	Eggenfelden	08721-771-0	www.brunner.de	D	X									X	X
Viessmann Werke		D	35107	Allendorf (Eder)	06452-70-0		FIN	X									X	X
Wagner & Co Solartechnik	Zimmermannstr. 12	D	35091	Cölbe	06421-8007-0	www.wagner-solartechnik.de	D	X									X	X
WAMSLER Haus- und Küchentechnik	Gutenbergstr. 25	D	85748	Garching	089-32084-0	www.wamsler.hkt.de	D	X									X	X
Wodtke GmbH	Postfach 50.0161	D	72050	Tübingen	07071-7003-0	www.wodtke.com	D	X									X	X
Wolf GmbH	Postfach 1380	D	84048	Mannburg	08751-74-0	www.wolf.heiztechnik.de	S	X									X	X

**10.6 Unterbericht : Untersuchungen an einem Stückholzkessel mit und ohne  
Wärmespeicher zur Ermittlung optimaler Speichergrößen**

**Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen**

Direktor: Prof. Dr. techn. G. Scheffknecht

**Abteilung Reinhaltung der Luft**

Prof. Dr.-Ing. Günter Baumbach

Pfaffenwaldring 23, 70569 Stuttgart



Endbericht zum Forschungsvorhaben

**Untersuchungen an einem Stückholzkessel mit und ohne Wärmespeicher zur Ermittlung optimaler Speichergrößen**

von

Dr.-Ing. Michael Struschka

Dipl.-Ing. Olga Emich

Prof. Dr.-Ing. Günter Baumbach

Universität Stuttgart

Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD)

IM AUFTRAG DER  
LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG  
Referat 31, Umwelttechnologie  
Hertzstraße 173, 76187 Karlsruhe

Oktober 2004

## Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>179</b>
<b>2 Heizsysteme mit Stückholzkessel und Pufferspeicher.....</b>	<b>180</b>
2.1 Speicherdimensionierung.....	185
<b>3 Vorgehensweise .....</b>	<b>188</b>
3.1 Untersuchungsprogramm.....	191
3.2 Versuchsaufbau und Messtechnik .....	195
3.3 Versuchsauswertung.....	198
<b>4 Ergebnisse .....</b>	<b>200</b>
4.1 Betriebsverhalten der Kessel-Speicher-Kombinationen .....	200
4.2 Emissionen der Kessel-Speicher-Kombinationen .....	207
<b>5 Zusammengefasste Ergebnisse.....</b>	<b>213</b>
<b>6 Zusammenfassung.....</b>	<b>216</b>
<b>7 Literatur .....</b>	<b>217</b>

## 1 Einleitung

Sollen akzeptable Verbrennungsbedingungen bei Stückholzkesseln erhalten bleiben, kann die Wärmeleistung dieser Kessel nur in einem Bereich von etwa 50 bis 100 % der Nennwärmeleistung geregelt werden. Wesentlich höhere, aber vor allem deutliche geringere Wärmeleistungen, bei denen die Feuerung in den Gluthalbetrieb wechselt, führen zu einem Anstieg der Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung. Neben Kohlenmonoxid, organischen Verbindungen und Partikeln werden auch Geruchsstoffe in hohen Konzentrationen emittiert, die dann häufig Ursache für Nachbarschaftsbeschwerden sind. Um diese Betriebszustände möglichst zu vermeiden, wird in der 1. BImSchV (Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes - Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen) gefordert, dass derartige Feuerungsanlagen grundsätzlich bei Vollast zu betreiben und mit einem ausreichend bemessenen Wärmespeicher zu versehen sind. Ausnahmen werden zugelassen, wenn die Emissionsanforderungen an die Heizkessel auch im Teillastbetrieb eingehalten werden.

Die Größe des Pufferspeichers und der Regelbereich der teillastfähigen Stückholzkessel wirkt sich, im Zusammenhang mit der Abstimmung der Anlagenleistung auf den Wärmebedarf des Gebäudes, wesentlich auf das Emissionsverhalten und den Nutzungsgrad der Heizkessel und auf das Emissionsaufkommen aus. Unklar ist hierbei, inwieweit die Emissionen dieser Heizsysteme vom aktuellen Wärmebedarf bzw. vom Verlauf des Wärmebedarfs sowie von der Größe des Pufferspeichers abhängen und wie die einzelnen Lastanteile zur Jahresemission der Heizanlage beitragen.

Diese Fragen sollen exemplarisch an einem modernen teillastfähigen Holzkessel untersucht werden, der ohne und mit Pufferspeichern unterschiedlicher Größe in einem praxisnahen Heiztest betrieben wird. Als Brennstoffe sollen naturbelassenes Nadel- und Buchenstückholz verfeuert werden.

### 2 Heizsysteme mit Stückholzkessel und Pufferspeicher

Angeboten werden handbeschickte Stückholzkessel mit Nennwärmeleistungen von weniger als 15 bis etwa 800 kW, der Haupteinsatzbereich liegt allerdings bei Leistungen bis 50 kW. Kessel mit Nennwärmeleistungen von unter 15 kW unterliegen nicht der einmaligen Messpflicht durch den Schornsteinfeger (1. BImSchV, 2001).

Moderne Stückholzkessel sind überwiegend als Feuerungen mit unterem oder seitlichem Abbrand ausgeführt, wobei die Verbrennungsluft (Überdruckbetrieb) oder das Abgas (Unterdruckbetrieb) mit Gebläsen gefördert wird. Kessel mit Naturzugbetrieb sind allerdings noch im Anlagenbestand vorhanden und werden im unteren Preissegment auch noch angeboten. Der Gebläsebetrieb hat den Vorteil, dass die Feuerung weitgehend unabhängig von den Zugbedingungen im Schornstein betrieben werden kann, eine zuverlässige und reproduzierbare Dosierung von Primär- und Sekundärluft erreicht werden kann und höhere Druckverluste in der Feuerung überwunden werden können. Hierdurch kann in den Verbrennungszonen eine bessere Mischung von brennbaren Gasen und Verbrennungsluft und im Kesselbereich ein besserer Wärmeübergang von der Gas- auf die Wasserseite erreicht werden.

Die Beschickung der Kessel mit Scheithölzern oder grobem Hackgut erfolgt bei kleineren Kesseln durch auf der Frontseite angebrachte Fülltüren oder von oben über Füllschachtdeckel. Bei Heizkesseln, die mit Saugzuggebläsen ausgerüstet sind (Unterdruckbetrieb), kann die Fülltüre bzw. der Füllschachtdeckel jederzeit geöffnet werden, da durch die Erhöhung der Gebläsedrehzahl ein Schwelgasaustritt ganz verhindert bzw. stark reduziert wird.

Nach den Verbrennungszonen findet die Wärmeabgabe z.B. über wassergekühlte Seiten- oder Trennwände, Plattenwärmetauscher und Wärmetauscherrohre (Rauchrohe; Heizgas innen, Heizwasser außen) statt. In die Wärmetauscherrohre können auch Spiralen zur Erhöhung des Wärmeübergangs und zur Abreinigung der Rohre eingehängt sein.

Als sicherheitstechnischen Funktionen sind bei Stückholzkesseln z.B. Kontaktschalter mit Ansteuerung des Saugzuggebläses an der Kesseltür sowie, bei geschlossenen hydraulischen Systemen, die unverzichtbare thermische Ablaufsicherung vorhanden, die bei Überschreitung der maximal zulässigen Kesselwassertemperatur über eine Notkühlung mit Frischwasser einen weiteren Temperaturanstieg im Kessel verhindern soll. Außerdem können moderne Kessel mit Gebläse über eine Leistungs-, Verbrennungs-, Heizkreis- und Speicherladeregelung verfügen.

Die Regelung für Stückholzkessel muss dem besonderen Verbrennungsablauf des Holzchargenabbrandes angepasst sein. Der Holzabbrand stellt eine Kombination verschiedener physikalischer und chemischer Prozesse (Trocknung - thermische Zersetzung - homogene Oxidations- und Reduktionsreaktionen - heterogene Verbrennung des festen Kohlenstoffes) dar, die nach der Brennstoffaufgabe gleichzeitig, aber mit unterschiedlicher Intensität ablaufen.

In der Anbrennphase bei relativ niedriger Feuerraumtemperatur und geringer CO<sub>2</sub>-Konzentration sind meist hohe Kohlenmonoxid- und Kohlenwasserstoffkonzentrationen im Abgas messbar. Der Anteil dieser Verbrennungsphase an der Dauer des Gesamtabbrandes und bezüglich der Emissionskonzentrationen kann, in Abhängigkeit der konstruktiven und regelseitigen Ausführung der Feuerung, des Betriebszustandes (kalter oder warmer Kessel) und der Holzaufgabemenge, bei wenigen Prozenten oder im dominierenden Bereich liegen.

In der anschließenden Hauptverbrennungsphase werden meist hohe CO<sub>2</sub>-Gehalte im Abgas erreicht. In dieser Phase des Abbrandes können zeitweise örtliche Luftmangelsituationen unterschiedlicher Ausprägung auftreten, die erhöhte Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung zur Folge haben. Dies kann auch dann der Fall sein, wenn der Verbrennungsablauf gestört wird und sich ungünstige Verbrennungsbedingungen ergeben. Mögliche Ursachen können z.B. Veränderungen der Primär- und Sekundärluftmengen zur Leistungsanpassung oder eine Brückenbildung des Brennstoffes im Füllschacht (Hohlbrand) sein. Hierbei bildet sich zwischen Glutbett und Brennstoffstücken ein Hohlraum, der Brennstoffumsatz und damit auch die Verbrennungstemperaturen nehmen ab und der Luftüberschuss steigt stark an. Gut erkennbar ist dieser Zustand an einem plötzlichen Rückgang der Abgastemperatur und der Wärmeleistung des Kessels.

In der Ausbrandphase bei Umsetzung der verbleibenden Holzkohle nimmt der CO<sub>2</sub>-Gehalt im Abgas, der ein Maß für den Brennstoffumsatz darstellt, ab. Durch den verringerten Brennstoffumsatz sinkt auch die Verbrennungstemperatur. Deshalb treten in dieser Verbrennungsphase wieder höhere CO-Emissionen auf. Befinden sich in dieser Verbrennungsphase auch noch Brennstoffstücke mit flüchtigen Holzkomponenten im Füllraum, steigen auch die Kohlenwasserstoffemissionen wieder an. Länger andauernde Ausbrandphasen können erheblich zur CO-Gesamtemission (und ggf. auch zur VOC-Gesamtemission) der Feuerung beitragen.

Zur Regelung der Wärmeleistung des Kessels kann die Holzaufgabemenge nur in engen Grenzen variiert werden. Dies führt zu einem erhöhten Bedienungsaufwand, der in der Praxis wohl kaum akzeptiert wird. Durch die aufgegebene Holzmenge wird die insgesamt für einen Chargenabbrand verfügbare Energiemenge festgelegt. Mittels dieser Basisgröße kann eine Anpassung der Betriebsweise und des thermischen Zustandes des Heizsystems (d.h. Heizkessel und Speicher) an den momentanen Wärmebedarf vorgenommen werden. Die Aufgabe von unverhältnismäßig großen Holzmengen bei geringem Wärmebedarf und aufgeladenen Speichern muss als krasse Form der Fehlbedienung bewertet werden, die auch durch planerische oder technische Maßnahmen nicht sicher verhindert werden kann.

Somit kann die eigentliche Leistungsregelung (Regelung der Wärmeleistung) nur durch eine Änderung der Verbrennungsluftmenge vorgenommen werden. Eingesetzt werden kann die Leistungsregelung allerdings nur bei Kesseln mit Gebläse nach dem unteren oder seitlichen Abbrandprinzip und getrennter Zuführung von Primär- und Sekundärluft. Hierbei wird die Primärluft zur Einstellung der gewünschten Wärmeleistung und die Sekundärluft zur Sicherstellung eines ausreichenden Luftüberschusses und damit zur Regelung der Ausbrandquali-

tät herangezogen (Grundlagen hierzu z.B. in Kerschbaumer, 1990).

Die Primärluftmenge, die im Bereich des Glutbettes zugegeben wird, bestimmt das Volumen der Reaktionszone. Wird die Primärluftmenge vergrößert, nimmt auch das Volumen zu, in dem Verbrennungsreaktionen stattfinden. Hierdurch steigt die Entgasungsrate und damit der Brennstoffumsatz an, was zu einer höheren Wärmeleistung der Feuerung führt. Führungsgröße für die Leistungsregelung ist meist die Kesselwassertemperatur. Bei komplexeren Regelsystemen werden auch Speichertemperaturen mit berücksichtigt. Mit der Leistungsregelung sollen folgende Ziele erreicht werden:

- Minderung der Anheizemissionen durch Verkürzung der Anheizzeiten
- konstante Verbrennungsbedingungen und gleichmäßige Wärmeleistungen während der Hauptverbrennungsphase im zulässigen Leistungsbereich der Feuerung zur Erzielung möglichst langer Abbrandzeiten
- Minderung der Ausbrandemissionen
- Restwärmenutzung durch Integration der Speicherregelung.

Bei Durchbrandfeuerungen können die Verbrennungsreaktionen im Füllraum aufgrund des Verbrennungsprinzips nicht auf einen Bereich beschränkt werden, da die heißen Verbrennungsgase durch die gesamte Holzaufgabe nach oben strömen. Hierdurch setzen Verbrennungsreaktionen im gesamten Füllraum ein, die nur in einem engen Bereich durch Änderungen der Primärluftmenge beeinflusst werden können, wenn die Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung nicht übermäßig stark ansteigen sollen.

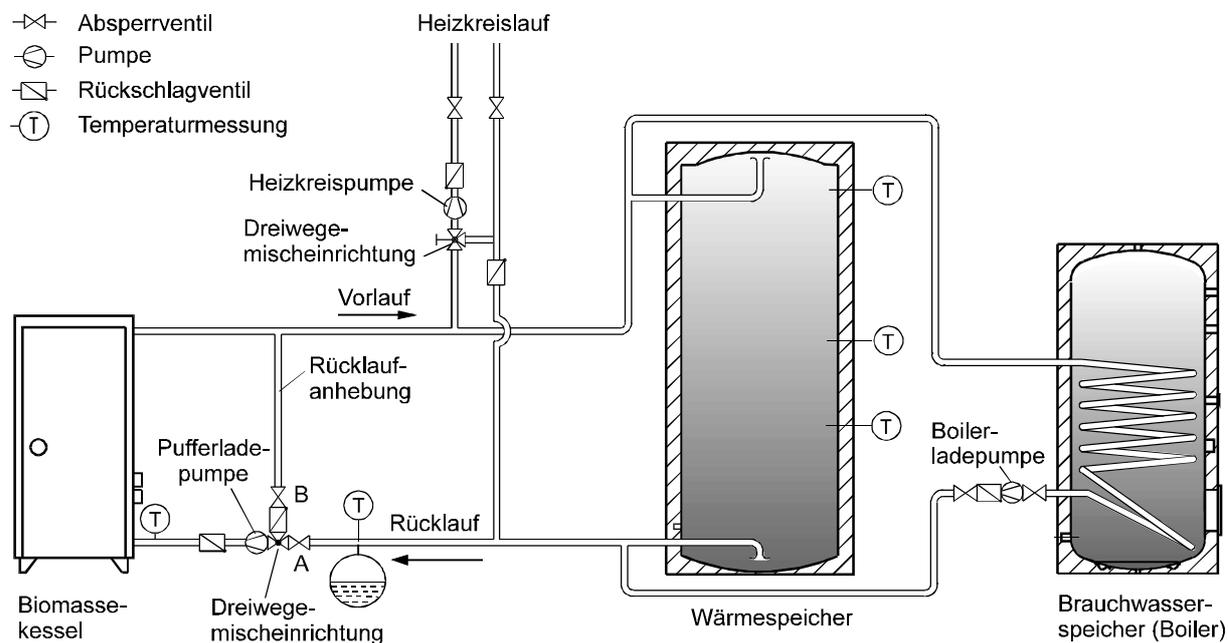
Bei Kesseln mit Verbrennungsregelung wird neben der Wärmeleistung auch die Verbrennungsqualität geregelt. Ziel ist hierbei, in jeder Verbrennungsphase einen ausreichenden, aber auch nicht zu hohen Luftüberschuss, einzustellen, um eine möglichst geringe Konzentration von Produkten unvollständiger Verbrennung im Abgas zu erhalten. Die Einstellung des Luftüberschusses erfolgt mit Hilfe der Sekundärluftmenge. Als Führungsgröße können die im Abgas gemessene Sauerstoffkonzentration oder bestimmte Temperaturen im Kessel (z.B. Verbrennungs- und Abgastemperatur) verwendet werden.

Um eine hohe Verbrennungsqualität zu erreichen, sollten Stückholzkessel mit hoher Wärmeleistung und solange wie möglich im vorgesehenen Regelbereich betrieben werden. Der maximale Wärmebedarf für Heizzwecke, auf den die Feuerung ausgelegt ist, wird aber in den meisten Fällen nur an wenigen Heiztagen im Jahr benötigt. Zur weitgehenden Anpassung der Feuerungsleistung an den momentanen Heizenergiebedarf sind daher verschiedene Maßnahmen erforderlich. Dies können z.B. sein:

- exakte Dimensionierung der Heizanlage unter Berücksichtigung der Komfortwünsche, auch bei der Warmwassererzeugung
- Auswahl einer Feuerungsanlage mit möglichst großem Regelbereich
- Kombination des Heizkessels mit einem ausreichend dimensionierten Pufferspeicher.

Sinkt der Wärmebedarf unter die niedrigste im Dauerbetrieb der Feuerung einstellbare Leistung, so muss der Kessel, damit die Kesselwassertemperatur nicht über den zulässigen Bereich ansteigt, entweder durch schließen der Verbrennungsluftklappen selbsttätig abschalten (Gluthaltebetrieb bei minimaler Primärluftzufuhr) oder die überschüssige Wärme wird in einen Wärmespeicher eingespeist. Hierbei handelt es sich i.a. um einen wärmeisolierten Stahlbehälter, der während der Speicherbeladung und –entladung vom Wärmeträgermedium (meist Wasser) durchflossen wird. Damit sich eine gute Temperaturschichtung bei der Speicherbeladung einstellt, sollten Turbulenzen des einlaufenden Wassers unterdrückt werden. Eine gute Temperaturschichtung und eine hohe Speicherkapazität wird durch hohe Kesselvorlauftemperaturen begünstigt. Bei der Speicherentladung wird entweder die Flussrichtung des Heizwassers umgekehrt oder es werden separate Entnahmeleitungen verwendet.

Die hydraulische Einbindung von Pufferspeichern kann auf unterschiedliche Arten, z.B. parallel zum Heizkessel oder in Reihe, erfolgen. Bei der Parallelschaltung wird der Heizkreis entweder über den Heizkessel oder den Speicher, bzw. in variablen Anteilen hieraus, mit Heizwasser versorgt. Vorteil dieser Verschaltung ist, dass Heizwasser auch bei kaltem Pufferspeicher schnell mit ausreichender Temperatur zur Verfügung steht. Bei der Reihenschaltung wird der Heizkreis direkt an den Pufferspeicher angeschlossen. In **Bild 2.1** ist ein hydraulisches Anschlussschema für Puffer- und Brauchwasserspeicher beispielhaft gezeigt.



**Bild 2.1:** Beispiel für die hydraulische Einbindung von Wärme- und Brauchwasserspeicher in den Heizkreis (Hartmann et al., 2003)

Bei der Planung, Auslegung und Inbetriebnahme von Stückholzkesseln, die zur Deckung des Wärmebedarfs und zur Warmwasserbereitung eingesetzt werden sollen, sind die örtlichen Gegebenheiten besonders sorgfältig zu berücksichtigen. So sind grundlegende Parameter, wie z.B. der Wärmebedarf des Gebäudes und der Warmwasserbedarf der Nutzer sowie der

Deckungsanteil des Kessels am Wärmebedarf (z.B. bei Kombination mit anderen Energieträgern oder Solarwärme) zu ermitteln. Außerdem ist auf eine funktionierende hydraulische Einbindung und Abstimmung des Heizkessels mit Speichern (z.B. Puffer- und Warmwasserspeicher) und Heizkreis zu achten. Weiterhin sollte die vorgesehene Kessel- und Heizungsregelung in der Lage sein, alle installierten Komponenten sinnvoll zu regeln und durch die Wahl von relevanten Parametern auch einen angepassten Betrieb zulassen. Wichtige Planungsfaktoren sind außerdem die Komfortwünsche (z.B. wie häufig muss Brennholz nachgelegt werden) der Betreiber und deren Nutzerverhalten (Anpassung der Kessel- und Heizungsregelung).

Im Gegensatz zu modernen Öl- und Gasfeuerungen, bei denen die Anpassung der Wärmeerzeugung an den aktuellen Wärmebedarf relativ einfach durch Ein- und Ausschalten des Brenners, bei relativ moderaten Mehremissionen (z.B. Struschka et al., 2000), realisiert werden kann, ist dies bei chargenweise beschickten Holzfeuerungen nicht so einfach zu erreichen. Sollen die Verbrennungsbedingungen akzeptabel bleiben, kann die Wärmeleistung der Feuerung nur in einem relativ engen Bereich von etwa 50 bis 100 % der Nennwärmeleistung geregelt werden. Ob es innerhalb des Regelbereichs dann auch wirklich nicht zu einem starken Anstieg der Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung kommt, hängt auch z.B. vom Wassergehalt des Brennstoffes und von der Temperatur im Verbrennungsbereich der Feuerung ab. Brennstoffe mit hohem Wassergehalt und damit geringem Heizwert schränken den nutzbaren Regelbereich ein. Wird eine kalte Feuerung sofort nach Inbetriebnahme im unteren Regelbereich betrieben, kann dies das Emissionsverhalten auch deutlich verschlechtern.

Liegt der Wärmebedarf unterhalb der kleinsten einstellbaren Teillast der Feuerung, kann eine Anpassung der Wärmeleistung nur noch dadurch erfolgen, dass die Verbrennungsluftzufuhr so stark gedrosselt wird, dass im wesentlichen nur noch ein Gluterhalt erfolgt. Vollständige Verbrennungsreaktion sind dann bei den sich einstellenden geringen Brennstoffumsätzen und hierdurch bedingten abnehmenden Verbrennungstemperaturen nicht mehr möglich, wodurch die Emissionskonzentrationen von Produkten unvollständiger Verbrennung drastisch ansteigen. Im Gluterhaltbetrieb liegt allerdings nur noch ein geringer Abgasvolumenstrom vor. Aber auch im Gluterhaltbetrieb erfolgen noch chemische Reaktionen die Wärme im Bereich von wenigen kW Leistung freisetzen. Diese Wärmeleistung muss dann auf jeden Fall abgeführt werden, damit die Kesselwassertemperatur nicht soweit ansteigt, dass eine Sicherheitsabschaltung des Kessels erfolgt. Steigt der Wärmebedarf wieder über die Wärmeleistung im Gluterhaltbetrieb der Feuerung an, wird der normale Heizbetrieb wieder gestartet. Während dem Hochfahren aus dem Gluterhalt auf eine Wärmeleistung im Regelbereich des Kessels dauert es einige Zeit, bis sich wieder intensive Verbrennungsreaktionen einstellen und sich eine stabil brennende Flamme bei guten Ausbrandbedingungen ausbildet. Die Folge sind erhöhte Emissionen während der Start- und Stabilisierungsphase.

Die Häufigkeit und Dauer während denen die Feuerung bei diesen ungünstigen Bedingungen mit erhöhten CO, VOC und Partikelemissionen betrieben wird, hängt auch vom Betrei-

berverhalten ab. Eine dem Wärmebedarf eher angepasste Bedienung des Kessels mindert die Emissionen doch deutlich. So kann z.B. bei geringem Wärmebedarf die Holzaufgabemenge je Charge stark reduziert werden. Die erhöht aber die Aufgabehäufigkeit, das sich die Abbrandzeiten verkürzen.

Aus diesen Gründen schreibt der Gesetzgeber vor, dass nicht teillastfähige handbeschickte Feuerungsanlagen mit flüssigem Wärmeträgermedium nur mit einem ausreichend dimensionierten Pufferspeicher zu betreiben sind. Darüber hinaus wird von vielen Institutionen und auch Herstellern empfohlen, auch teillastfähige Stückholzkessel mit Gebläse und unterem Abbrand ebenfalls nur mit Pufferspeichern zu betreiben. In beiden Anwendungsfällen ist letztlich unklar, wo die optimale Speichergröße liegt. Im Bereich der optimalen Speichergröße sollten die Ziele

- möglichst geringe Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung
- geringe Speicherverluste
- hoher Nutzungsgrad der Heizanlage und
- möglichst geringer Bedingungsanforderung ohne Komforteinschränkungen

realisiert werden.

### 2.1 Speicherdimensionierung

Damit möglichst lange Betriebszeiten des Stückholzkessels unter optimalen Verbrennungsbedingungen erreicht werden, sollte das erforderliche Speichervolumen unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten festgelegt werden. Wesentliche Einflussfaktoren für die Speicherdimensionierung sind:

- Nennwärmeleistung und Leistungsbereich des Stückholzkessels absolut und im Verhältnis zum rechnerisch ermittelten Wärmebedarf des zu beheizenden Gebäudes (Berücksichtigung einer Überdimensionierung)
- Volumen des Brennstoff-Füllraumes
- Temperaturbereich, in dem der Speicher bzw. das Heizsystem auslegungsgemäß betrieben werden soll und die sich hieraus ergebende Bandbreite der Temperaturdifferenzen im Speicher
- Komfortansprüche (Nachlegeintervalle bzw. Häufigkeit von Brennstoffaufgaben – z.B. guter Komfort, wenn max. 2x pro Tag nachgelegt werden muss).

Stückholzkessel, die keine Leistungsregelung besitzen und somit nur im Bereich der Nennwärmeleistung betrieben werden sollten, benötigen u.U. einen größeren Speicher als teillastfähige Anlagen. Diese sind in der Lage, die Wärmeleistung in einem gewissen Bereich an den momentanen Wärmebedarf anzupassen. Hierdurch wird der Wärmeüberschuss geringer, der in den Pufferspeicher abgeführt werden muss. Größere Wärmespeicher können auch dann notwendig werden, wenn der Brennstofffüllraum, im Verhältnis zur Nennwärme-

leistung, überdurchschnittlich groß ist. In diesen Fällen kann je Brennstoffcharge, wenn die maximal mögliche Holzmenge aufgegeben wird, eine große Wärmemenge erzeugt werden.

Die Ladung des Speichers beginnt, sobald die Kesselvorlauftemperatur über der Speichertemperatur am Speichereinlauf liegt und endet, wenn die Kesselvorlauftemperatur unterhalb dieser Temperatur fällt. Analoge Zustände ergeben sich bei der Speicherentladung. Diese kann beginnen, sobald die Vorlaufspeichertemperatur über der zur Deckung des notwendigen Wärmebedarfs erforderlichen Vorlauftemperatur des Heizkreises liegt und endet, wenn diese Temperatur im Speichervorlauf unterschritten wird. Somit hängt die nutzbare Temperaturdifferenz zwischen Speicher- und Heizkreisvorlauf zum einen von der Auslegung des Heizungssystems (z.B. Radiatorenheizung 75/50 °C oder Fußbodenheizung 55/35 °C) und vom aktuellen Wärmebedarf ab. Wird bei der niedrigsten Außentemperatur die höchste Vorlauf-temperatur im Heizkreis verlangt, z.B. 75 °C, so beträgt die Temperaturdifferenz zum Speicher nur etwa 25 K.

Stehen für die Speicherauslegung nur wenige Daten zur Verfügung oder soll lediglich eine Mindestdimensionierung sichergestellt werden, so kann vereinfachend die Nennwärmeleistung des Heizkessels zur Speicherdimensionierung herangezogen werden. Hierbei reichen die Empfehlungen von mindestens 25 l/kW (z.B. Kommentar zur 1. BImSchV, 2001) über 50 l/kW (z.B. Uth, 2000 und Fröling, 2003) bis zu 100 l/kW. (Strehler, 1996 und Reisinger, 2004).

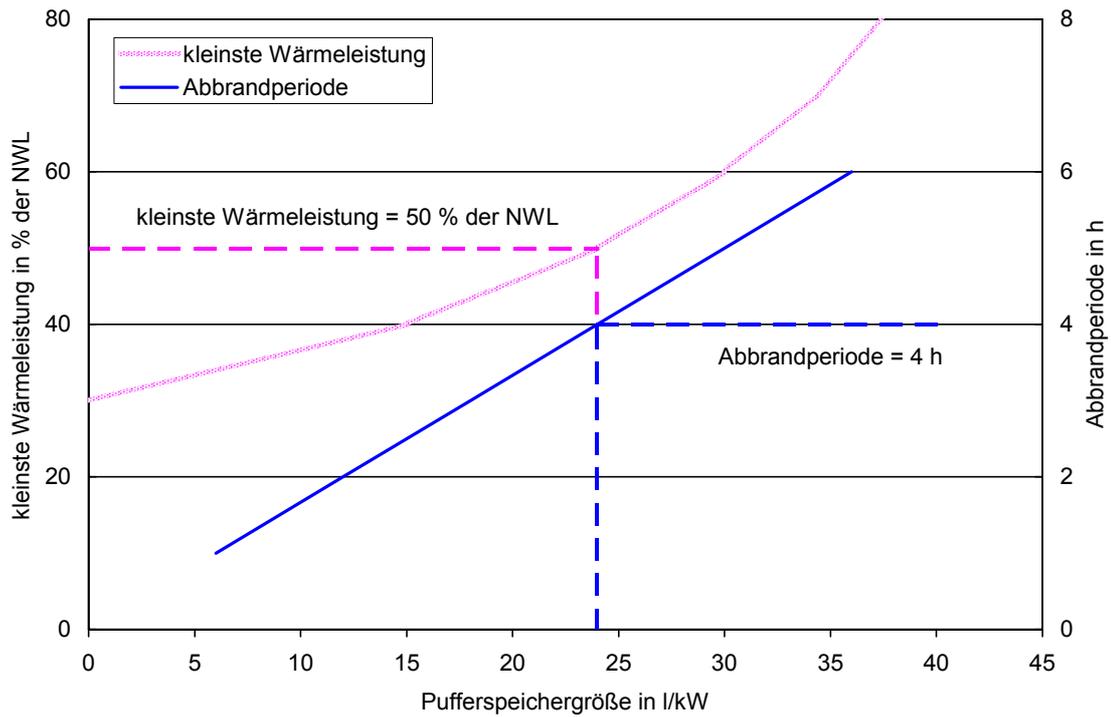
In der DIN EN 303-5 (1999) wird folgende Berechnungsformel zur Speicherdimensionierung vorgeschlagen:

$$V_{Sp} = 15 * T_B * Q_N * \left( 1 - \frac{0,3 * Q_H}{Q_{min}} \right) \quad [l] \quad (2.1)$$

mit:

$V_{Sp}$	Pufferspeichereinhalt in l
$T_B$	Abbrandperiode in h
$Q_N$	Nennwärmeleistung in kW
$Q_H$	Heizlast des Gebäudes in kW
$Q_{min}$	kleinste Wärmeleistung in kW.

In **Bild 2.2** ist der Zusammenhang nach Formel 2.1 zwischen Pufferspeichergröße und Abbrandperiode sowie kleinste Wärmeleistung für ein Beispiel dargestellt.

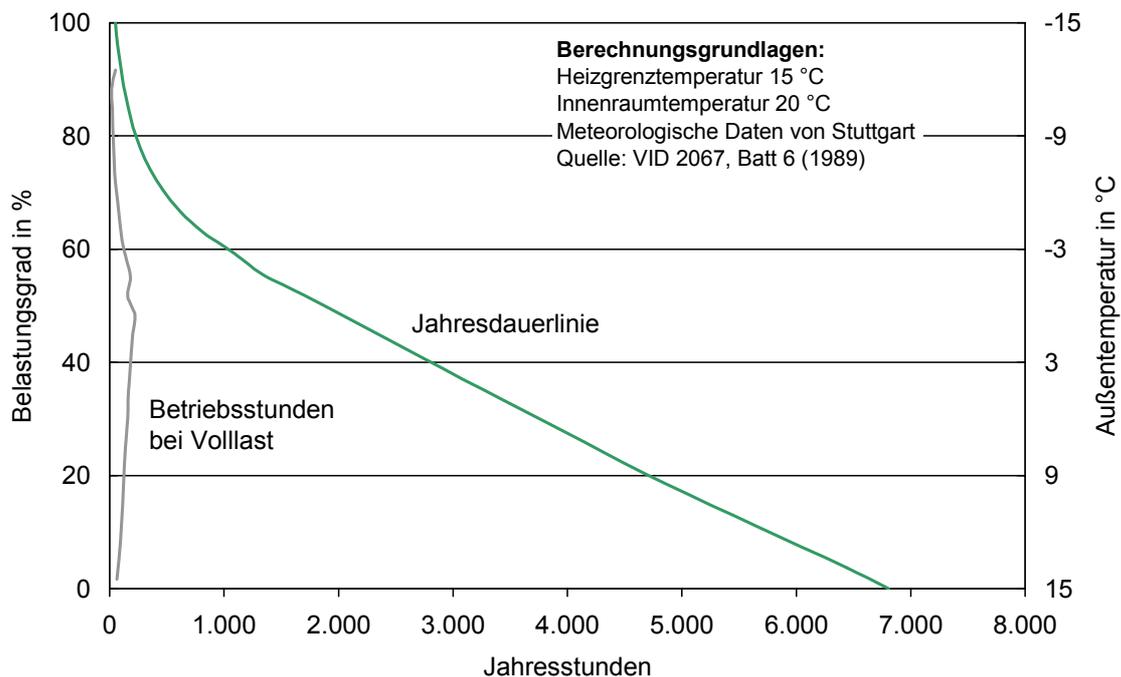


**Bild 2.2:** Zusammenhang zwischen Pufferspeichergröße und kleinster Wärmeleistung (bezogen auf Nennwärmeleistung (NWL)) sowie Abbrandperiode für einen Kessel mit 30 kW Nennwärmeleistung bzw. Heizlast des Gebäudes (nach DIN EN 303-5, 1999)

### 3 Vorgehensweise

Das Emissionsverhalten eines modernen teillastfähigen Holzkessels, der ohne und mit Pufferspeichern unterschiedlicher Größe betrieben wird, soll in einem praxisnahen Heiztest exemplarisch untersucht werden. Hierzu werden standardisierte Heizlastkurven ermittelt, die typische Außentemperaturbereiche wiedergeben.

Der Wärmebedarf eines Gebäude hängt direkt von der Differenz zwischen der gewünschten Innenraum- und der Außentemperatur ab. Werden für Innenraum- und Heizgrenztemperatur bestimmte Werte festgesetzt, so lässt sich die zu erwartende Belastung der Heizanlage (ohne Berücksichtigung von z.B. solarer Gewinne oder innerer Wärmequellen) bei unterschiedlichen Außentemperaturen berechnen. Ordnet man die jährlichen Tagesmitteltemperaturen eines Standortes entsprechend ihrer Höhe, kann eine Häufigkeitssummenkurve der Tagesmitteltemperaturen (Jahresdauerlinie) über der Außentemperatur bzw. der Belastung der Heizanlage dargestellt werden. In **Bild 3.1** ist die Jahresdauerlinie am Beispiel für Stuttgart nach Daten der VDI-Richtlinie 2067 Blatt 6 (1989) gezeigt. Mit aufgeführt sind die entsprechenden Betriebsstunden der Heizanlage bei Volllast (Nennwärmeleistung). Setzt man einen 24h-Betrieb der Heizanlage an, wird die Heizgrenztemperatur (also die Außentemperatur ab der geheizt werden soll) von 15 °C an über 6.800 h im Jahr für das Beispiel unterschritten.

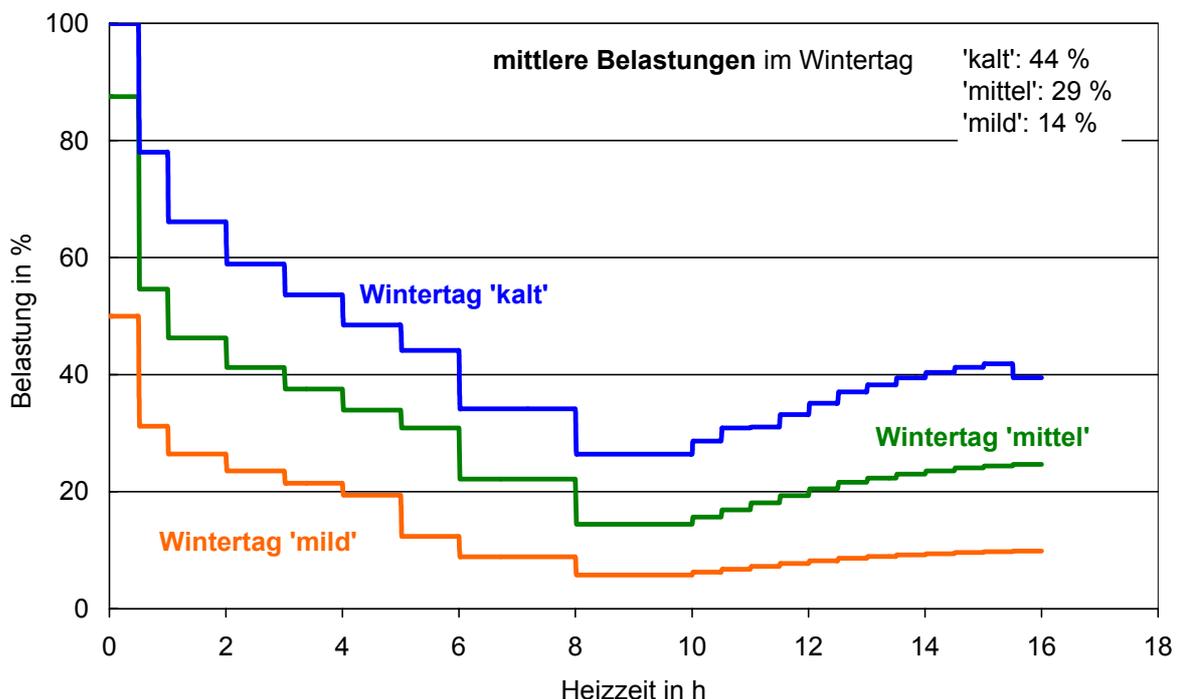


**Bild 3.1:** Jahresdauerlinie und Volllaststunden nach VDI-Richtlinie 2067 Blatt 6 (1989) für Stuttgart

In diesem Zeitraum wird bei einer üblichen Heizanlage ein Belastungsgrad von über 50 % nur an etwa 1.900 h erreicht. Für über 70 % der Betriebszeit liegt die Belastung der Heizanlage darunter. Die mittlere jährliche Belastung liegt lediglich bei rund 24 %.

Die insgesamt im Jahr erreichten Betriebszeiten bei den einzelnen Belastungen teilen sich auf die einzelnen Heiztage entsprechend der Bandbreite und Häufigkeit der jährlichen Außentemperaturverteilung und des täglichen Außentemperaturverlaufs auf. Hierbei lassen sich für übliche Heizanlagen typische Tagesgänge des Heizenergiebedarfs zusammenstellen, die unterschiedliche Außentemperaturniveaus wiedergeben. Praxisuntersuchen haben gezeigt, dass diese typischen Verläufe zwar im Detail und im Niveau von den örtlichen Gegebenheiten, wie z.B. Bauart und Betriebsweise der Heizanlage sowie von den Gebäudeeigenschaften abhängen, gewisse Grundzüge aber erhalten bleiben (FfE, 2002).

Diese bestehen darin, dass zu Beginn des Heiztages, bei niedrigen Außentemperaturen und ggf. relativ geringen Innenraumtemperaturen nach einer Nachtabsenkung, die höchste Wärmeleistung für eine gewisse Zeit benötigt wird. Im Tagesverlauf ansteigende Außentemperaturen, die zunehmende Erwärmung der Innenräume, innere Wärmequellen und ggf. solare Gewinne lassen den Heizbedarf kontinuierlich abnehmen. Gegen Abend, bei abnehmenden Außentemperaturen steigt der Heizbedarf wieder etwas an. Aufbauend auf diesen Ergebnissen der Studie wurden für die praxisnahe Ermittlung des Emissionsverhalten der untersuchten Kessel-Speicher-Kombinaten 3 Heizlastkurven festgelegt, die kalte, mittlere und milde Wintertage repräsentieren sollen, siehe **Bild 3.2**.



**Bild 3.2:** Definierte Heizlastkurven für Prüfstandsmessungen (Belastung ist auf Nennwärmeleistung des Holzkessels bezogen)

Diese Heizlastkurven wurden für einen angenommenen täglichen Heizbetrieb von 16 Stunden ohne Warmwassererzeugung definiert. In der Praxis würde dies einem Heizungsbetrieb mit Nachtabsenkung entsprechen. Insgesamt sind diese Heizlastkurven als Beispiele zu verstehen, die bei ähnlichen klimatische Daten wie die verwendeten für Stuttgart und vergleich-

baren angenommen Randbedingungen zutreffen. In der Praxis können die tatsächlichen Heizkurven, je nach den örtlichen Gegebenheiten und dem Betreiber- und Nutzerverhalten, mehr oder weniger hiervon abweichen.

Die derart festgelegten Wintertage umfassen gewisse Bandbreiten der Außentemperaturen und repräsentieren somit auch die Jahresstunden, in denen diese Temperaturen auftreten. Somit lassen sich die Anteile der so definierten Wintertage an den insgesamt vorhandenen Jahresstunden, an denen die Heizgrenztemperatur unterschritten wird, berechnen. In **Tabelle 3.1** sind für die definierten Wintertage die Außentemperaturbereiche mit Jahresstunden und jährlichen Anteile aufgelistet.

Bei der Festlegung vom Verlauf und der mittleren Belastungsgrade für die verschiedenen Wintertage wurde berücksichtigt, dass nach VDI-Richtlinie die Jahresstunden aus vollständigen 24 Stunden Tagesgängen der Außentemperatur berechnet wurden. Für die eigene Untersuchung wurde aber ein 16 h-Heizbetrieb mit Nachtabsenkung angesetzt. Somit reduziert sich der Belastungsgrad, da in den kalten Nächten nur ein eingeschränkter Wärmebedarf angenommen wurde.

**Tabelle 3.1:** Außentemperaturbereiche, Jahresstunden und Anteile für die definierten Wintertage

definierter Wintertag	Bereich der Außentemperaturen	Jahresstunden für Stuttgart	Anteil an Gesamtjahresstunden
<b>kalt</b>	< -13 bis -1	1.336	<b>20</b>
<b>mittel</b>	> -1 bis 8	2.808	<b>41</b>
<b>mild</b>	> 8 bis 15	2.663	<b>39</b>
Summe		6.807	100

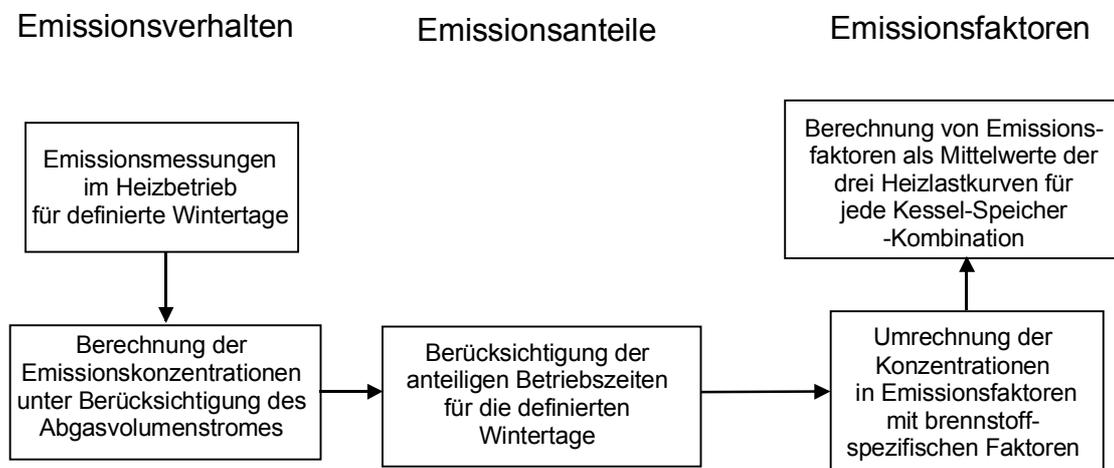
Für den Aufbau und Betrieb des Versuchstandes wurden noch folgende Annahmen gemacht:

- richtige Dimensionierung der Heizanlage. Bei angenommener niedrigster Außentemperatur wird maximale Heizleistung entsprechend der Nennwärmeleistung des Heizkessels als Heizwärme verlangt, d.h. 100 % Belastung entspricht der Nennwärmeleistung des Kessels
- die Wärmeabgabe im Heizkreis erfolgt über Radiatoren. Deren Wärmeabgabe an den Aufstellungsraum hängt von der Temperaturdifferenz zwischen Heizwasser und Aufstellungsraum ab. Die maximale Wärmeabgabe soll in diesem Fall bei einer Vorlauf-temperatur von mindestens 75 °C und einer Spreizung von 15 K erreicht werden. Bei geringerer Vorlauf-temperatur reduziert sich die maximal mögliche Wärmeabgabe. Die Berechnung dieser temperaturabhängigen maximal möglichen Wärmeabgabe der Radiatoren an den Aufstellungsraum wurde nach DIN EN 444-2 (1997) vorgenom-

men. Lag dieser Wert unterhalb der aktuell geforderten Heizleistung, die sich aus den Heizlastkurven für diesen Zeitpunkt ergab, musste auf jeden Fall Brennstoff nachgelegt werden.

- bei allen Heizlastkurven für die verschiedenen Wintertage wurde die Spreizung von Vor- und Rücklauftemperatur des Heizkreises konstant auf 15 K eingestellt.

Aus den Messergebnissen der einzelnen Heizlastkurven sollen zur Bewertung der jeweiligen Kessel-Speicher-Kombination mittlere Emissionsfaktoren ermittelt werden. Diese Emissionsfaktoren sind mit den Anteilen der Heizlastkurven am Heizbetrieb einer Heizperiode gewichtet und können unmittelbar zur Berechnung von Emissionsfrachten herangezogen werden. Die Vorgehensweise bei der Ermittlung der Emissionsfaktoren ist in **Bild 3.3** schematisch dargestellt.



**Bild 3.3:** Vorgehensweise bei der Berechnung der mittleren Emissionsfaktoren

### 3.1 Untersuchungsprogramm

Für die vergleichenden Messungen des Emissionsverhaltens wurde ein moderner teillastfähiger Holzkessel verwendet. Dieser wurde ohne und mit Pufferspeichern unterschiedlicher Größen, entsprechend den Anforderungen nach 1. BImSchV (25 l je kW Nennwärmeleistung des Kessels) und das doppelte Volumen hiervon, eingesetzt.

Das Betriebs- und Emissionsverhalten von Stückholzkesseln, die ohne und mit unterschiedlichen Wärmespeichern (Pufferspeichern) betrieben werden, soll hierbei untersucht werden. Mit den Ergebnissen sind folgende Fragen zu klären:

- Abhängigkeit der Emissionen für die unterschiedlichen Anlagenkonfigurationen vom aktuellen Wärmebedarf bzw. vom Verlauf des Wärmebedarfs
- Anteile der einzelnen Lastanteile an den Jahresemission

- Höhe der mittleren Emissionsfaktoren für die untersuchten Kessel-Speicher-Kombinationen. Aus diesen kann für eine Heizperiode unmittelbar das jährliche Emissionsaufkommen abgeleitet werden. Schlussfolgerung einer optimalen Pufferspeichergröße aufgrund der ermittelten Emissionsfaktoren.

Diese Fragen sollen exemplarisch an einem modernen teillastfähigen Holzkessel untersucht werden, der mit Teillastregelung und ohne Teillastregelung (d.h. dann nur bei Volllast) und mit und ohne Pufferspeichern betrieben wird. An Brennstoffen werden Buchenholz- und Nadelholzscheite eingesetzt. Wichtige Angaben zum eingesetzten Stückholzkessel und den verwendeten Pufferspeichern sind in **Tabelle 3.2** enthalten.

**Tabelle 3.2:** Angaben zum eingesetzten Stückholzkessel und zu den Pufferspeichern

	Stückholzkessel	Pufferspeicher 1	Pufferspeicher 2
Typ	Holzvergaserkessel	Schichtspeicher	Pufferspeicher
NWL in kW	30		
Inhalt in l	120	1.500	750
Füllraum in l	140		
Baujahr	2003	2003	2004
geeignete Brennstoffe	Scheitholz, Hackgut, Sägerestholz, lufttrocken ( $w < 25\%$ )		
Beschreibung	Kessel mit unterem Abbrand (Sturzbrand), Wirbelbrennkammer, Primär- und Sekundärluft sowie Lambda-Regelung	Schichtspeicher aus Stahlblech in stehender Bauweise mit 90 mm Wärmedämmung	Speicher aus Stahlblech in stehender Bauweise mit 100 mm Wärmedämmung
Betrieb	über Kesselregelung mit Teillast und ohne Teillastregelung	Anschluss Speicher in Heizkreis parallel zu Heizkessel	

NWL      Nennwärmeleistung

Die Wärmeabnahme aus dem Heizkessel bzw. den Pufferspeichern wurde den Verhältnissen in der Praxis angeglichen. Dies bedeutet, dass die Verläufe der Wärmeabnahmen den praktischen Heizsituationen von kalten Wintertagen (Wärmebedarf entspricht für längere Zeit in etwa der Nennwärmeleistung des Kessels) bis zur Übergangszeit (Wintertag mild - Wärmebedarf erreicht nur wenige Prozent der Nennwärmeleistung des Kessels) in Form von drei idealisierten Heizlastkurven realisiert wurde.

Für Buchenholzbrennstoff wurden die drei Heizlastkurven für jede Kessel-Speicher-Kombination mindestens ein Mal oder häufiger vollständig durchfahren, bei der Konfiguration ohne Speicher wurde jede Heizlastkurve nur einmal erfasst. Zusätzlich wurden einige vergleichende Messungen mit Nadelholz durchgeführt, siehe **Tabelle 3.3**. Unterschiedliche Brennstoffqualitäten (z.B. in Bezug auf den Wasser- oder Aschegehalt) wurden bei diesen Untersuchungen nicht berücksichtigt, sondern es wurde von einem 'guten' Betreiber ausgegangen, der marktübliche Scheitholzqualitäten in lufttrockenem Zustand verfeuert.

**Tabelle 3.3:** Versuchsmatrix der praxisnahen Prüfstandsmessungen

Konfiguration	Teillastregelung	Heizlastkurve	Brennstoff	Versuche
Stückholzkessel <b>ohne</b> Pufferspeicher	ja	kalt	Buchenholz Nadelholz	1 1
		mittel	Buchenholz	1
		mild	Buchenholz	1
Stückholzkessel mit <b>750 l</b> Pufferspeicher	ja	kalt	Buchenholz	1
		mittel	Buchenholz	1
		mild	Buchenholz	2
	nein	kalt	Buchenholz	1
		mittel	Buchenholz	1
		mild	Buchenholz Nadelholz	1 1
Stückholzkessel mit <b>1.500 l</b> Pufferspeicher	ja	kalt	Buchenholz Nadelholz	2 1
		mittel	Buchenholz Nadelholz	3 1
		mild	Buchenholz Nadelholz	2 1
	nein	kalt	Buchenholz	2
		mittel	Buchenholz	1
		mild	Buchenholz	2
	<b>Summe</b>			

Bei Stückholzfeuerungen hat der Betreiber über die Brennstoffqualität, die Aufgabehäufigkeit und Aufgabemengen und die Einstellung der Feuerungsanlage (z.B. Einstellung von Primär- und Sekundärluft) einen wesentlichen Einfluss auf das Emissionsverhalten. Das Nutzerverhalten des Betreibers, z.B. richtige Wahl der Heizkreisparameter mit z.B. Nachtabsenkung, beeinflusst in großem Maße den Heizenergiebedarf. Hieraus ergibt sich eine größere Emissionsbandbreite bei installierten und baugleichen Feuerungsanlagen.

Bei modernen gebläseunterstützten Kesseln mit Verbrennungsregelung werden die notwendigen Eingriffe der Betreiber wesentlich reduziert, da die Einstellung von Primär- und Sekundärluftmengen sowie ggf. die Gebläseleistung von der Regelung übernommen und dem aktuellen Verbrennungsablauf angepasst wird.

Bei der Aufgabehäufigkeit des Brennstoffes wurde vorausgesetzt, dass auch der Komfortgedanke (vor allem bei den beiden Konfigurationen mit Pufferspeicher) und übliche Tagesaktivitäten eine Rolle spielen. So wurde davon ausgegangen, dass der für einen Betriebstag notwendige Brennstoff in der Regel in ein bis zwei Chargen aufgegeben wird. Als Nachlegezeitpunkt wurde während der üblichen Arbeitszeiten die Vorlauftemperatur des Heizkreises herangezogen.

Lag diese unterhalb der zur Deckung des aktuellen Wärmebedarfs notwendigen Höhe, wurde eine neue Brennstoffcharge abgebrannt. Da sich der 16-stündige praxisnahe Heizbetrieb nur schwer mit den üblichen Arbeitszeiten vollständig realisieren lässt, wurde z.T. auch dann Brennstoff aufgegeben, wenn dies zu diesem Zeitpunkt noch nicht notwendig war. Somit ergibt sich eine Bandbreite im Betriebsverhalten, die auch in der Praxis zu erwarten ist. Auch dort wird es regelmäßig Fälle geben, in denen Brennstoff zu früh nachgelegt wird, damit z.B. nach anschließender Abwesenheit des Betreibers, die Heizleistung bis zur Rückkehr sichergestellt ist.

Die Aufgabemengen orientierten sich insgesamt an den definierten Heizkurven. Für eine einzelne Holzaufgabe wurde die Brennstoffmenge anhand der aktuellen Betriebsdaten (z.B. Kessel- und Speichertemperaturen, Betriebsdauer und Wärmebedarf aus der Heizlastkurve bis zur nächsten Holzaufgabe) abgeschätzt, weshalb auch hier eine gewisse Bandbreite vorhanden ist, was aber auch dem Praxisfall entspricht.

Beim Einschichten des Holzes und der Kesselwartung wurde von einem üblichen Betreiber ausgegangen, der die Anlage nicht mit übertriebener Sorgfalt, sondern routinemäßig bedient und nur Dinge beachtet, die direkt die problemlose Nutzung der Heizanlage und den Komfort betreffen. So wurde beim Einschichten des Holzes nur darauf geachtet, dass der Durchgang in die unter dem Füllraum liegende Nachbrennkammer nicht durch ein Holzstück verschlossen wird. Dies hätte zur Folge, dass die Heizleistung des Kessels nicht ausreichend ansteigt und somit der Wärmebedarf nicht vollständig gedeckt wird.

Vor jeder Brennstoffaufgabe wurden mit der vorhandenen und von Hand zu betätigenden Reinigungseinrichtung die Rauchrohre des Wärmetauschers abgereinigt. Eine Entaschung und Reinigung des Kessels erfolgte jeweils bei Versuchsbeginn einer Kessel-Speicher-Konfiguration und dann nur nach Bedarf und mit möglichst geringem Arbeitsaufwand, was auch unseren Erfahrungen von Messungen an installierten Anlagen entspricht.

Temperaturen und Volumenströme in den Wasserkreisläufen wurden kontinuierlich während des jeweils 16-stündigen Betriebs mit den Heizlastkurven aufgezeichnet und ausgewertet. Die Emissionen und andere Abgasparameter des Kessels wurden nach der Brennstoffaufgabe ab dem Zeitpunkt, an dem eine stabile Verbrennung erkennbar war, bis nahezu zum Ende des Holzkohlenabbrandes aufgezeichnet und ausgewertet. Eine stabile Verbrennung wurde, je nach Temperatur des Kessels bzw. bei der Holzaufgabe auf eine noch vorhandene (geringe) Grundglut meist innerhalb von 10 Minuten erreicht. Hierbei lag die CO<sub>2</sub>-Konzentration üblicherweise im Bereich von 3 bis 9 Vol%, bei Abgastemperaturen von 80 bis 160 °C. Das Ende des Holzkohlenabbrandes wurde angenommen, wenn bei laufendem Saugzuggebläse eine CO<sub>2</sub>-Konzentration von etwa 3 Vol% unterschritten wurde. Zu diesem Zeitpunkt war dann meist der weitaus größte Teil des Holzbrennstoffes verbrannt, im Füllraum befanden sich nur noch geringe Mengen von Holzkohle.

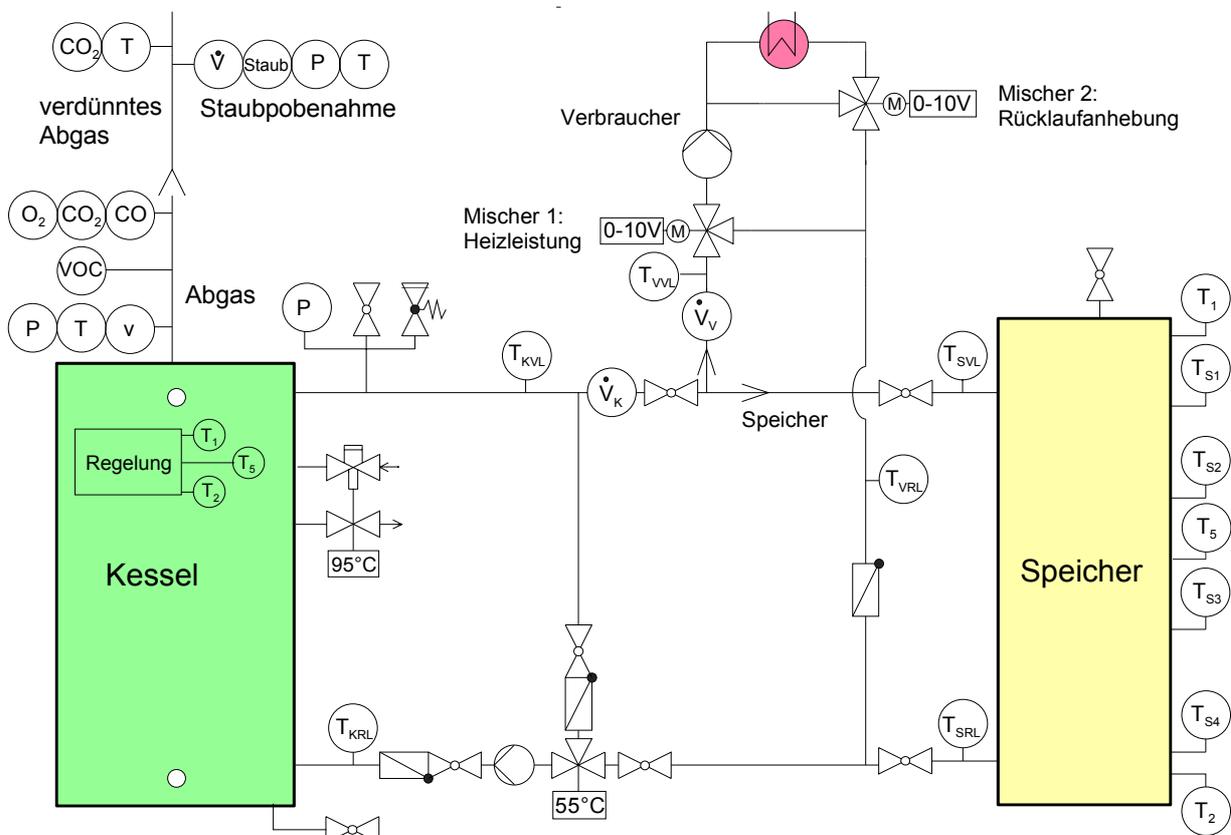
Sowohl die Versuchsdurchführung als auch die Zeiträume der Emissionserfassung unterscheiden sich bei dieser Untersuchung deutlich von Vorgehensweisen bei Normprüfungen, die unter festgelegten und weitgehend optimalen Randbedingungen erfolgen. Somit sind auch die Ergebnisse der Messungen nicht direkt vergleichbar.

### 3.2 Versuchsaufbau und Messtechnik

Im folgenden werden der Versuchsaufbau und die eingesetzte Messtechnik kurz beschrieben. Für die Durchführung der Messungen musste der im Technikum des Instituts vorhandene Kleinf Feuerungsversuchsstand so modifiziert werden, dass eine praxisnahe Wärmeentnahme aus der Kessel-Speicher-Kombination möglich wird. Dies betraf vor allem die geregelte Wärmeentnahme entsprechend den Heizlastkurven und die Einstellung einer festen Spreizung in Höhe von 15 K zwischen Verbrauchervor- und Rücklauf.

#### Versuchsaufbau

**Bild 3.4** zeigt das Hydraulikschema von Stückholzkessel und Pufferspeicher sowie die erfassten Messgrößen und deren Positionen.



**Bild 3.4:** Hydraulische Verschaltung von Stückholzkessel und Pufferspeicher sowie Messgrößen und -positionen

Eine Überprüfung der Kessel-Speicher-Installation und die Inbetriebnahme des Stückholzkessels sowie ein ausführliches und vorbildliches Einweisungs- und Beratungsgespräch wurde vom Werkskundendienst des Kesselherstellers durchgeführt.

Der Versuchsaufbau weist an Wasserkreisläufen die vom Kesselhersteller vorgeschriebene und unmittelbar am Kessel vorgesehene Rücklaufanhebung 'Kessel' auf ca. 55 °C, den Speicherkreis und den Verbraucherkreis mit Rücklaufanhebung (Spreizung ca. 15 K) auf. Die Rücklaufanhebung 'Kessel' wird von einem Thermostatventil gesteuert, welches Rücklaufwasser nach Überschreitung der Mindestrücklauftemperatur beimischt. Die temperaturgesteuerte Kesselpumpe läuft nach Erreichen einer einstellbaren Kesseltemperatur an bzw. schaltet bei deren Unterschreitung (Kessel ohne Speicher) wieder ab. Ist der Stückholzkessel mit einem Pufferspeicher kombiniert, schaltet die Kesselpumpe dann ab, wenn die Speichertemperatur über der Kesseltemperatur liegt.

Die nach Vorgabe der Heizlastkurven geforderte Heizleistung wird über den Volumenstrom in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen Verbraucher Vor- und Rücklauf mit einem Dreiwegemischer (Mischer 1) geregelt. Im Technikum des Instituts sind keine praxisnahen Verbraucher (z.B. Heizkörper) angeschlossen. Die in den Versuchsanlagen erzeugte Wärme wird in einem Kühlkreislauf mit Rückkühlwerk direkt an die Atmosphäre abgegeben. Hierbei stellen sich Kühlwassertemperaturen (ca. 20 -30 °C) ein, die jahreszeitlich in etwa konstant und deutlich niedriger sind als in Heizsystemen. Um hier praxisnahe Verhältnisse zu realisieren, wurde mit dem Mischer 2 (Dreiwegemischer) eine Rücklaufanhebung des Kühlwassers realisiert. Ziel war es hierbei, zwischen Verbrauchervorlauf und -Rücklauf eine Temperaturdifferenz von 15 K einzuhalten. Der Verbraucherkreis wird mit einer eigenen Umwälzpumpe versorgt.

Der Verbraucherkreis (oder Heizkreis) wird entweder aus dem Kessel, dem Speicher oder in einem variablen Verhältnis aus beiden mit Heizwasser versorgt. Liefert die Heizkesselpumpe mehr Wasser als der Heizkreis momentan benötigt, erfolgt die Speicherladung. Bei der Entladung des Speicher kehrt sich die Fließrichtung des Wassers um.

Neben den Temperaturen in den Wasserkreisläufen und im Speicher wurden auch die Volumenströme aus dem Kessel und in den Heizkreis erfasst. Die Differenz der gemessenen Volumenströme ergibt den Wasserstrom zum oder vom Speicher. Mit den Volumenströmen und den betreffenden Temperaturen können jeweils die Wärmeströme berechnet werden und unter Berücksichtigung der zugeführten Brennstoffenergie und des feuerungstechnischen Wirkungsgrades eine Wärmebilanz aufgestellt werden. In **Tabelle 3.4** sind die Messstellen für Temperaturen und Volumenströme aufgelistet.

**Tabelle 3.4:** Messstellen für Temperaturen und Volumenströme

	Messstelle	Messgrößen	Bezeichnung
Kessel-Speicherkreis	Kessel-Vorlauf	Temperatur Volumenstrom	$T_{KVL}$ $V_K$
	Kessel-Rücklauf	Temperatur	$T_{KRL}$
	Speicher-Vorlauf Speicher-Rücklauf	Temperatur	$T_{SVL}$ $T_{SRL}$
Speicher	oben 2/3 Höhe Mitte unten	Temperatur	$T_{S1}$ $T_{S2}$ $T_{S4}$ $T_{S4}$
Verbraucher	Verbraucher- (Heizkreis)-Vorlauf	Temperatur Volumenstrom	$T_{VVV}$ $V_V$
	Kessel-Rücklauf	Temperatur	$T_{VRL}$

Im Abgas wurden die Konzentrationen an CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO und VOC sowie die Abgastemperatur, der Schornsteinzug und die Abgasgeschwindigkeit kontinuierlich gemessen. Die mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentration und die mittlere Abgastemperatur eines Chargenabbrandes wurden zur Berechnung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades verwendet. Mit der Abgasgeschwindigkeit erfolgte eine Gewichtung der gemessenen Emissionskonzentrationen, damit deren Mittelwerte für die Chargenabbrände zur Berechnung der Emissionsfaktoren herangezogen werden können.

Damit auch organische Verbindungen erfasst werden, die unmittelbar an der Schornsteinmündung, d.h. bei Temperaturen unterhalb der Abgastemperatur, als Partikel vorliegen, erfolgte die Staubprobenahme aus dem verdünnten Abgas, siehe hierzu z.B. Struschka et al. (2003). Die Verdünnung der Feuerungsabgase erfolgt an der Mündung des rund 5 m hohen isolierten Stahlschornstein in einer Abgas-Sammelhaube mit Raumluft. Im Schornstein, der im Technikum installiert ist, stellt sich unabhängig von den nachfolgenden Einrichtungen ein natürlicher Schornsteinzug ein. Die Staubkonzentration (Partikelkonzentration) liegt als Mittelwert eines Chargenabbrandes vor. Zur Umrechnung auf den Bezugssauerstoffgehalt von 13 Vol% und zur Berechnung des Verdünnungsverhältnisses wurde im verdünnten Abgas ebenfalls die CO<sub>2</sub>-Konzentration erfasst.

Die Staubprobenahme erfolgte mit einem Filterkopfgerät für Planfilter entsprechend VDI 2066 (Blatt 1 und 7). Als Filtersubstrate wurden Quarzfaserfilter verwendet. Bei der Probenahme wird zu Kontroll- und Berechnungszwecken der abgesaugte Volumenstrom, der Unterdruck bei der Probenahme und die Temperatur gemessen. In **Tabelle 3.5** sind die verwendeten Messgeräte, die Prüfgaskonzentrationen und die eingesetzten Filtersubstrate für das Planfilterkopfgerät aufgelistet.

Bei den verfeuerten Holzbrennstoffen wurde nur der Wassergehalt ermittelt. Diese betragen beim Buchenholz 16,0 und 16,3 % sowie beim Nadelholz 12,4 %. Für Berechnungen, z.B. des Heizwertes, wurden mittlere Holzzusammensetzungen aus Pfeiffer und Struschka et al. (2000) verwendet.

**Tabelle 3.5:** Angaben zur verwendeten Messtechnik

Messgröße (Messprinzip) Messgerätetyp, Hersteller	Messbereich	Prüfgaskonzentration <sup>2</sup> Filtersubstrate	Größe
CO <sub>2</sub> (nicht dispersive Infrarotabsorption)	0-3 Vol% und 0-20 Vol%	2,0 Vol% CO <sub>2</sub> in N <sub>2</sub> 11,8 Vol% CO <sub>2</sub> in N <sub>2</sub>	Vol%
CO (nicht dispersive Infrarotabsorption): BINOS-Reihe. Fisher-Rosemount	0-3 Vol% 0-1.000 ppm v/v	0,77 Vol% CO in N <sub>2</sub> 253 ppm v/v CO in N <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup> und mg/kWh
O <sub>2</sub> (Paramagnetische Eigenschaften): Oxynos-Reihe. Fisher-Rosemount	0-25 Vol%	8,0 Vol% O <sub>2</sub> in N <sub>2</sub>	Vol %
VOC (Flammenionisation) <sup>1</sup> : FID RS 55. Ratfisch	0-1.000 ppm v/v	83 ppm v/v Propan in N <sub>2</sub>	mgC/m <sup>3</sup> und mgC/kWh
Temperaturen (Thermoelektrizität): Ni-CrNi-Thermoelemente	0-150 °C und 0-490 °C	-	°C
Partikel (Gravimetrie): Planfilterkopfgerät STE. Ströhlein	-	Quartz Microfibre MK 360, Φ 50 mm. Munktell Filter AB	mg/m <sup>3</sup> und mg/kWh
Unterdruck (piezoelektrische Sensoren): P-Sensor. E. Müller	0-50 Pa	-	Pa
Wasser-Volumenströme (Mehrstrahl- Flügelradzähler): Viterra Energy	bis 2,5 m <sup>3</sup> /h	-	m <sup>3</sup> /h
Abgasgeschwindigkeit (Flügelradanemometer): Flügelrad-Strömungssensor FA. Höntzsch	0,4 – 20 m/s	-	m/s
Geschwindigkeit Staubprobenahme (Hitzdrahtanemometer): Strömungssensor Typ SS, Schmidt	0-2,5 m/s	-	m/s
Unterdruck Abgas und Staubprobenahme (piezoelektrische Sensoren): Typ PTLN-K100, Airflow und Typ GMUD, Greisinger	0 – 100 Pa 0 – 200 mbar	-	Pa mbar

<sup>1</sup> bei den VOC-Messungen wurde eine beheizte Probenahmeleitung verwendet. Diese Leitung und der FID waren auf ca. 160 °C beheizt. Im FID ist ein Feinfilter vorhanden. Gemessen wurde die Summe der flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) im feuchten Abgas, es wird die Kohlenstoffmasse angegeben

<sup>2</sup> die Überprüfung der Nullpunkte der Gasanalytoren erfolgte mit Stickstoff 5.0.

### 3.3 Versuchsauswertung

Zur Auswertung der Versuchsergebnisse wurden bei den kontinuierlich erfassten Größen sämtliche registrierten 1-Minuten-Mittelwerte ab der Brennstoffaufgabe bis zum nahezu vollständigen Abbrand des aufgegebenen Brennstoffes verwendet. Zur Berechnung der mittleren gasförmigen Emissionskonzentrationen können die direkt gemessenen Werte nur dann herangezogen werden, wenn sich der Abgasvolumenstrom während des Chargenabbrandes nicht wesentlich ändert. Andernfalls werden ggf. z.B. hohe CO-Konzentrationen, die im Gluthaltebetrieb bei geringem Abgasvolumenstrom auftreten, zu stark bewertet. Deshalb wurden die gemessenen Emissionskonzentrationen (CO und VOC) mit der ebenfalls kontinuierlich ermittelten Abgasgeschwindigkeit gewichtet. Im Gluthaltebetrieb lag die Abgasgeschwindigkeit unterhalb des Messbereichs vom eingesetzten Flügelrad-Anemometer. Hier wurde dann mit einer abgeschätzten konstanten Abgasgeschwindigkeit von 0,2 m/s gerechnet. Dieser Wert entspricht etwa 10 % der bei Nennwärmeleistung gemessenen Geschwindigkeit.

Bei der Staubprobenahme wurden teilweise auch Betriebszeiten mit Gluthaltebetrieb erfasst. Hier konnte weder während der Probenahme noch nachträglich eine Anpassung an die unterschiedlichen Abgasvolumenströme vorgenommen werden. Die angegebenen Staubergebnisse sind deshalb mit gewissen Einschränkungen zu interpretieren und geben vor allem die Größenordnung der tatsächlich zu erwartenden Emission wieder.

Der feuerungstechnische Wirkungsgrad wurde in guter Näherung nach der indirekten Methode ermittelte (DIN EN 303-5 und DIN EN 304). Hierzu wurden aus Abgasdaten die Verluste durch freie Wärme der Abgase und durch unvollständiger Verbrennung berechnet, Verluste durch unvollständig verbrannten Brennstoff blieben unberücksichtigt.

Die Umrechnung der gemessenen CO-, VOC- und Partikelkonzentrationen auf einen einheitlichen Bezugssauerstoffgehalt von 13 Vol% erfolgte mittels der gemessenen O<sub>2</sub>- bzw. CO<sub>2</sub>-Konzentration nach 1. BImSchV (2001):

$$E_B = \frac{21 - O_{2,B}}{21 - O_{2,M}} * E_M \quad [\text{mg/m}^3] \quad (3.1)$$

$$E_B = CO_{2,\text{max}} * \frac{21 - O_{2,B}}{21 * CO_{2,M}} * E_M \quad [\text{mg/m}^3] \quad (3.2)$$

mit: E<sub>B</sub>: Emissionskonzentration, bezogen auf den Bezugssauerstoffgehalt  
 E<sub>M</sub>: gemessene mittlere Emissionskonzentration  
 O<sub>2,B</sub>: Bezugssauerstoffgehalt (hier: 13 Vol%)  
 O<sub>2,M</sub>: gemessene mittlere Sauerstoffkonzentration in Vol%  
 CO<sub>2,max</sub>: maximale CO<sub>2</sub>-Konzentration des Brennstoffs bei stöchiometrischer Verbrennung  
 CO<sub>2,M</sub>: gemessene mittlere Kohlendioxidkonzentration in Vol%.

Die Emissionskonzentrationen wurden zusätzlich auf energiebezogene Werte nach folgender Formel umgerechnet:

$$E_{Hu} = E_B * V_B / H_u \quad [\text{mg/kWh}] \quad (3.3)$$

mit: E<sub>Hu</sub>: auf Heizwert bezogener Emissionsfaktor in mg/MJ bzw. kg/TJ  
 E<sub>B</sub>: Emissionskonzentration, siehe Formeln (4.1 und 4.2)  
 V<sub>B</sub>: spezifisches Abgasvolumen im Normzustand (je nach Messgröße "feucht" oder "trocken") bei 13 Vol% O<sub>2</sub> in m<sup>3</sup>/kg  
 H<sub>u</sub>: Heizwert des Brennstoffes in kWh/kg.

Der Umrechnungsfaktor V<sub>B</sub> / H<sub>u</sub> hängt von der Brennstoffzusammensetzung und dem Bezug auf trockenes (für die Messgrößen CO und Partikel) oder feuchtes Abgas (für die Messgröße VOC) ab. Das brennstoffspezifische Abgasvolumen wurde mit mittleren Elementarzusammensetzungen für Buchen- und Nadelholz aus Pfeiffer und Struschka et al. (2000, Tabelle 4.16) berechnet. Der für die Berechnungen ebenfalls notwendigen Wassergehalte der verfeuerten Holzbrennstoffen wurde ermittelt.

## 4 Ergebnisse

In den folgenden Kapiteln werden die Messergebnisse der Heizversuche für die einzelnen Konfigurationen von Stückholzkessel ohne und in Kombination mit unterschiedlichen Pufferspeichern vorgestellt. Bevor auf die in Tabellenform zusammengefassten Ergebnisse eingegangen wird, soll als Überblick das Betriebsverhalten der untersuchten Konfigurationen anhand ausgewählter Verläufe der Emissionen, Wärm- und Volumenströme und Temperaturen im Pufferspeicher während des 16stündigen Heizbetriebes gezeigt werden.

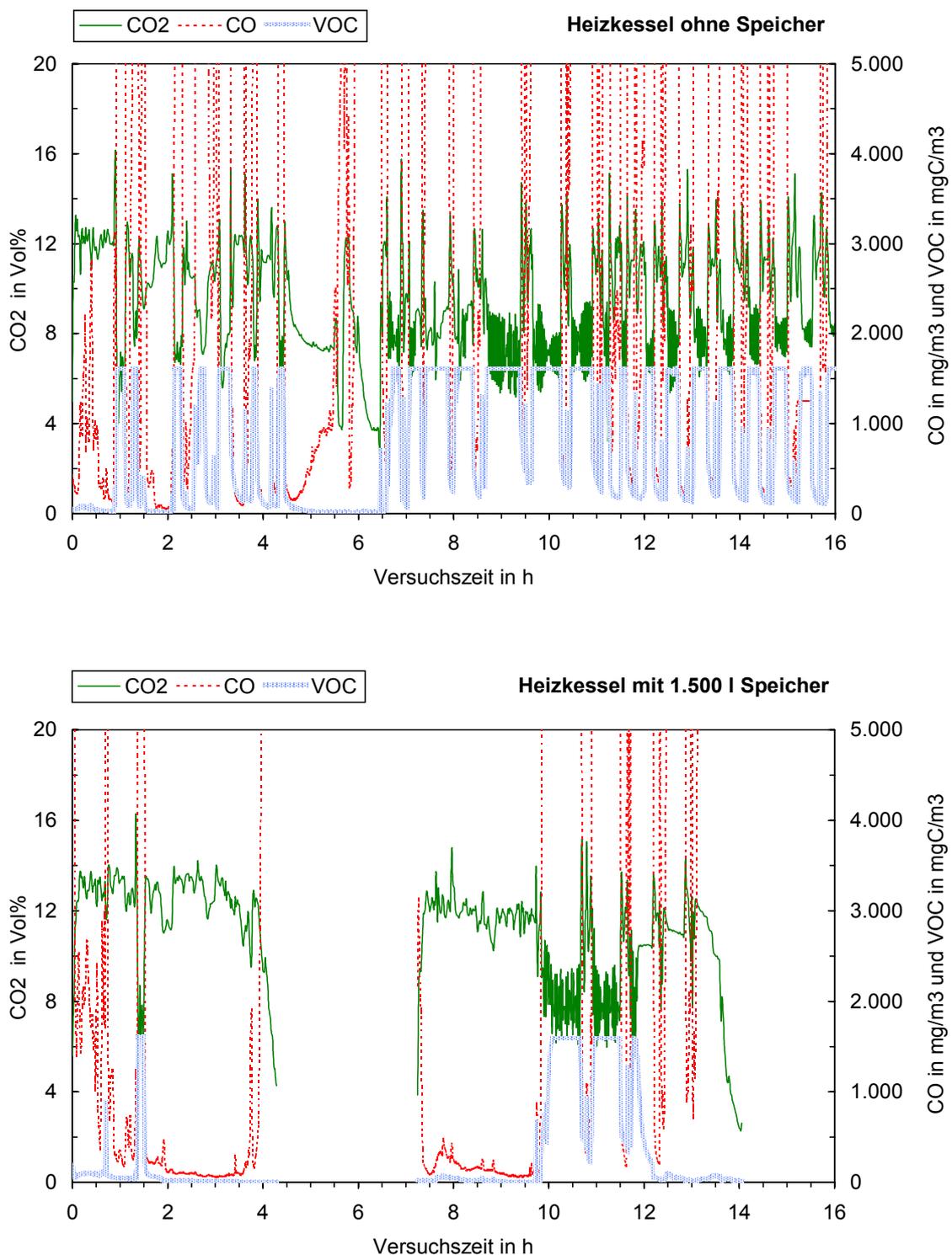
### 4.1 Betriebsverhalten der Kessel-Speicher-Kombinationen

#### Emissionsverläufe

Das Emissionsverhalten des untersuchten Stückholzkessels hängt wesentlich vom thermischen Zustand des Kessels und der Schamotte-Brennkammer sowie der Feuerungsleistung ab. Bei der Holzaufgabe in einen relativ kalten Kessel mit ausgekühlter Brennkammer steigt zwar die CO<sub>2</sub>-Konzentration und damit die Feuerungswärmeleistung schnell an, aber für CO werden solange erhöhte Werte gemessen, bis die Feuerraumwände und die Schamotte-Brennkammer höhere Temperaturen erreicht haben. Innerhalb des Leistungsregelbereichs können die CO- und VOC-Konzentrationen vergleichsweise niedrige Werte aufweisen. Deutliche Emissionsspitzen ergeben sich meist im Gluthalbetrieb, allerdings bei geringem Abgasvolumenstrom, und beim Anfahren des Kessels aus dem Gluthalbetrieb.

In **Bild 4.1** sind die Verläufe der CO<sub>2</sub>-, CO- und VOC-Konzentrationen für den Stückholzkessel ohne Speicher und mit 1.550 l Speicher für die Heizlastkurve Wintertag 'kalt' dargestellt. In beiden Fällen wurde der Heizenergiebedarf durch die Aufgabe von jeweils zwei Holzchargen gedeckt.

Beim Betrieb des Kessels mit Pufferspeicher kann die Feuerungsleistung über längere Zeiten konstant auf hohem Niveau gehalten werden, solange Überschusswärme in den Pufferspeicher gefahren werden kann. Dies war vollständig im ersten Abbrand und einige Zeit im zweiten Abbrand möglich. Höhere CO- und VOC-Emissionen beim ersten Abbrand traten durch den Anbrenn- und Aufwärmvorgang des Kessels und im weiteren Verlauf durch Störungen im Verbrennungsablauf (wahrscheinlich durch Vorgänge der Verbrennungsregelung oder geringfügige Brückenbildung im Füllraum) auf. Nach rund 1,5 h Feuerungsbetrieb erfolgte eine kurze Kesselabschaltung, da die obere Grenze der Kesselwassertemperatur erreicht wurde. Beim zweiten Abbrand war nach einer Feuerungszeit von rund 2 Stunden der Pufferspeicher nahezu aufgeladen. Dies führte zu längeren Betriebszeiten des Kessels im Gluthaltmodus.

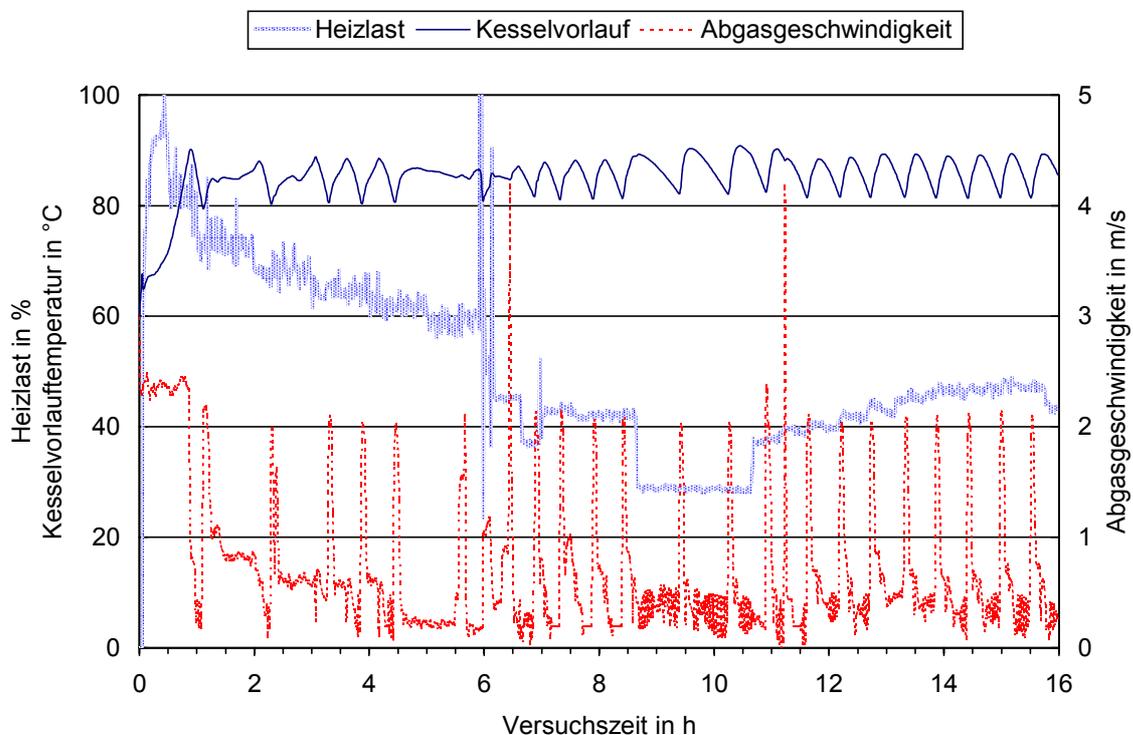


**Bild 4.1:** Gemessene Konzentrationsverläufe beim Heizbetrieb Wintertag 'kalt' für den Stückholzkessel ohne und mit 1.500 l Speicher (Brennstoff Buchenscheitholz, Holzaufgabemengen ohne Speicher 61 kg, mit Speicher 73 kg)

Beim Betrieb des Kessels ohne Pufferspeicher kann grundsätzlich die Feuerungsleistung der geforderten Heizleistung nur bis etwa 50 % der Nennwärmeleistung nachgeführt werden. Bei noch geringeren Heizleistungen erfolgt zwangsläufig ein Wechsel zwischen den Betriebszuständen Gluterhalt und Heizbetrieb. In den Modus Gluterhalt schaltet der Kessel bei Errei-

chen der oberen Grenze der Kesseltemperatur, der Feuerungsbetrieb wird wieder aufgenommen, wenn der Sollwert der Kesseltemperatur unterschritten wird.

Aus der Vorgabe der Heizlastkurve Wintertag 'kalt' wäre zu erwarten, dass für die ersten rund 6 Stunden des Heizbetriebes der Kessel den geforderten Wärmebedarf durch Anpassung der Feuerungsleistung im Regelbereich decken kann. Aber auch in diesem Zeitraum schaltet die Kesselregelung mehrfach in den Zustand Gluterhaltung. Ursache hierfür sind Sprünge in der Wärmeanforderung, die von der Leistungsregelung nicht schnell genug nachgeregelt werden. Schnellere Änderungen in der Wärmeanforderung ergeben sich auch in der Praxis, wenn z.B. Heizkörperthermostate öffnen oder schließen. Beim untersuchten Heizkessel kommt es hierbei zum Temperaturanstieg des Kesselwassers mit der Folge von Abschaltungen, siehe **Bild 4.2**.



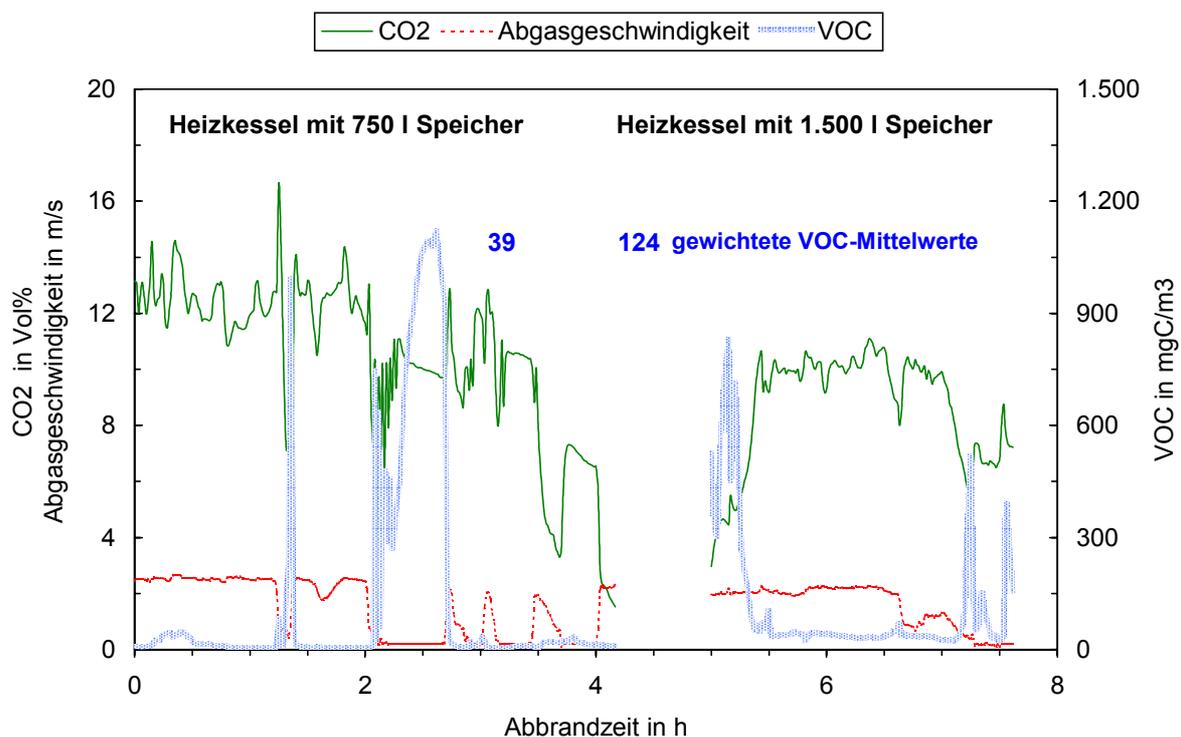
**Bild 4.2:** Verlauf der Heizlast (auf Nennwärmeleistung des Kessels bezogen), der Kesselvorlauftemperatur und der Abgasgeschwindigkeit (Stückholzkessel ohne Speicher, Wintertag 'kalt', Buchenscheitholz)

Bei den durchgeführten Versuchen ergab sich aus verschiedenen Gründen eine gewisse Bandbreite der Ergebnisse innerhalb einer Versuchsreihe. Ursachen hierfür sind vor allem:

- Variationen bei den Holzaufgabemengen und bei den Nachlegezeitpunkten. Dies führte u.a. dazu, dass Lastzustände, und damit auch Emissionsniveaus, in variablen Anteilen in einer gesamten Heizlastkurve enthalten sind
- Schwankungen in der Verbrennungsqualität, verursacht durch z.B. Regelvorgänge oder Brückenbildung im Füllraum und unterschiedliches Anbrennverhalten der Holzchargen

- unterschiedliche Anteile von Gluterhaltphasen, die auch noch zu unterschiedlichen Zeiten des Chargenabbrandes auftreten. Wird z.B. während der Hauptverbrennungsphase, wenn der Brennstoff noch einen hohen Anteil an flüchtigen Bestandteilen aufweist, die Primärluft soweit reduziert, dass sich der Betriebszustand Gluterhalt einstellt, steigen die Kohlenwasserstoffkonzentrationen im Abgas stark an. Deutlich geringer ist die VOC-Konzentration im Abgas, wenn der Gluterhaltmodus kurz vor oder während der Ausbrandphase eingestellt wird.

In **Bild 4.3** sind diese Einflüsse auf die Emissionsbandbreite exemplarisch an zwei Holzabbränden gezeigt. Im linken Teil des Bildes sind die Verläufe der CO<sub>2</sub>- und VOC-Konzentration sowie der Abgasgeschwindigkeit, für einen Chargenabbrand beim Heizkessel in Kombination mit dem 750 l Speicher dargestellt. Während des Abbrandes geht der Kessel immer wieder in den Betriebszustand Gluterhalt (Abgasgeschwindigkeit im Bereich von 0,2 m/s) über und im Abgas werden Spitzenkonzentrationen an VOC gemessen. Gegen Abbrandende, wenn sich im wesentlichen nur noch Holzkohle im Füllraum befindet, steigen die VOC-Konzentrationen deutlich weniger an.

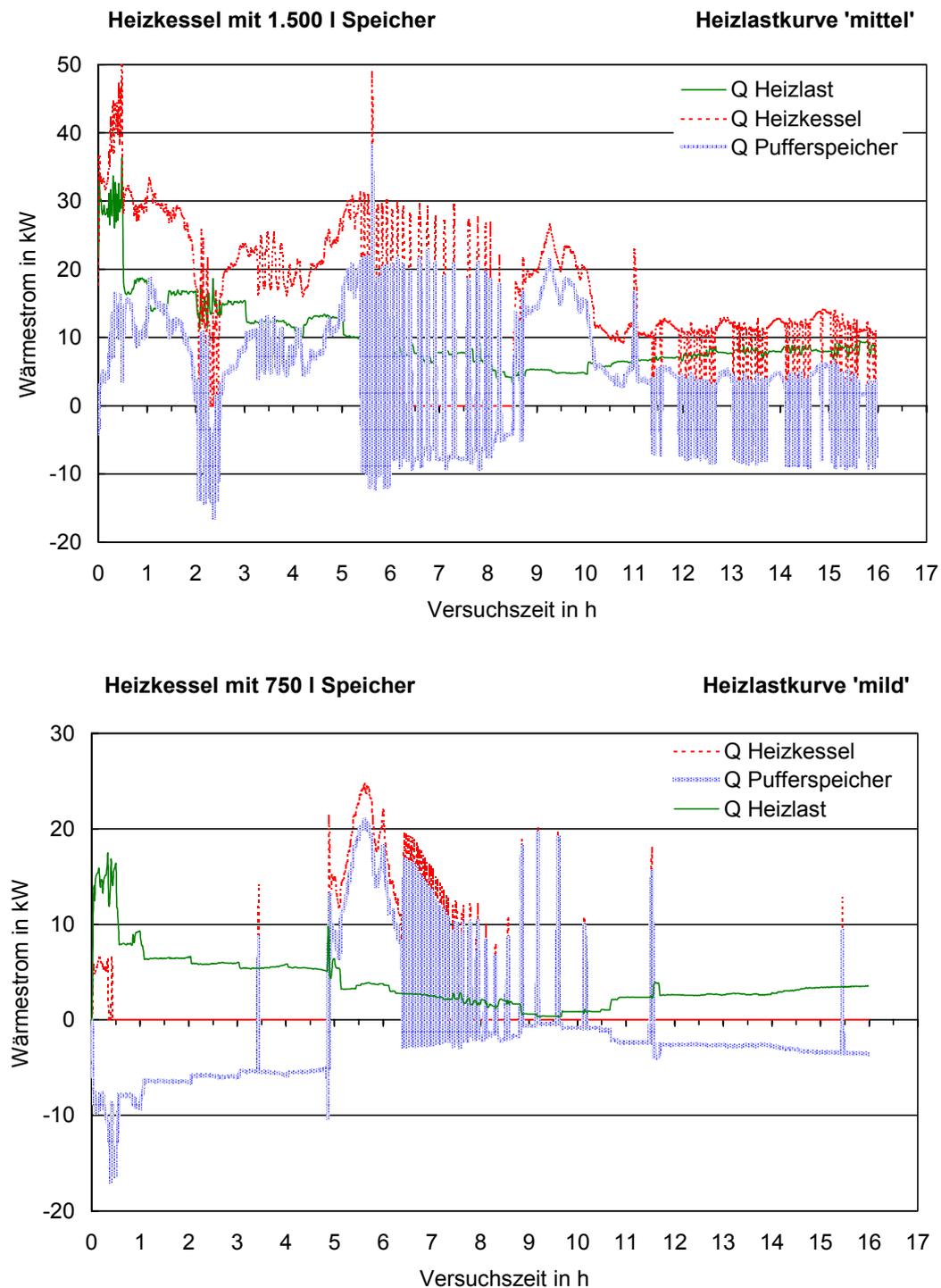


**Bild 4.3:** Beispielhafter Verlauf der CO<sub>2</sub>- und VOC-Konzentrationen sowie der Abgasgeschwindigkeit beim Heizkessel mit 750 und 1.500 l Speicher (Heizlastkurven Wintertag 'mittel, Buchenscheitholz)

Im rechten Teil des Bildes ist ein Abbrand mit der Konfiguration Heizkessel und 1.500 l Speicher gezeigt, bei dem vor allem in der Anbrennphase und dem Beginn der Hauptverbrennungsphase höhere VOC-Konzentrationen auftreten. Da diese Emissionsspitzen auch bei hohen Abgasgeschwindigkeiten auftreten, wirken sie sich in den gewichteten Konzentrationen auch wesentlich stärker aus.

## Wärmeströme

Im folgenden **Bild 4.4** sind beispielhaft die Verläufe der berechneten Wärmeströme für den Heizkessel mit 1.500 l Speicher und der Heizlastkurve 'mittel' sowie für den Heizkessel mit 750 l Speicher und der Heizlastkurve 'mild' dargestellt.



**Bild 4.4:** Verlauf der Wärmeströme beim Heizkessel mit 1.500 l Speicher (Heizlastkurve Wintertag 'mittel') und beim Heizkessel mit 750 l Speicher (Heizlastkurve Wintertag 'mild') (Buchscheitholz)

Bei dem gezeigten Versuch für den Heizkessel mit 1.500 l Speicher (Heizlastkurve Wintertag 'mittel') wurden drei Holzchargen verbrannt. Aufgrund der relativ kurzen Pausen zwischen den einzelnen Abbränden gibt der Heizkessel nahezu permanent Wärme ab, die zur Deckung der verlangten Heizlast und zur Speicheraufladung dient. Gegen Ende des Chargenabbrandes, bei abnehmender Kesselleistung und damit sinkender Kesselwassertemperatur, schaltet sich die Kesselpumpe zeitweise aus. Hierdurch ergeben sich die großen Schwankungen der Wärmeströme aus dem Kessel und Speicher.

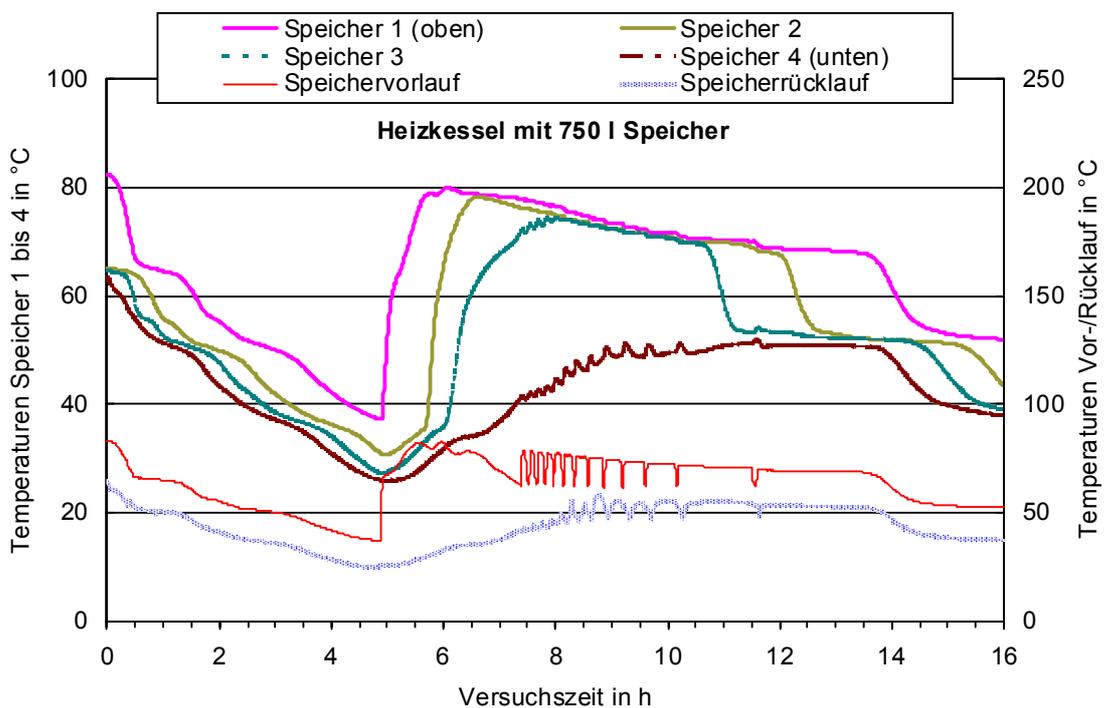
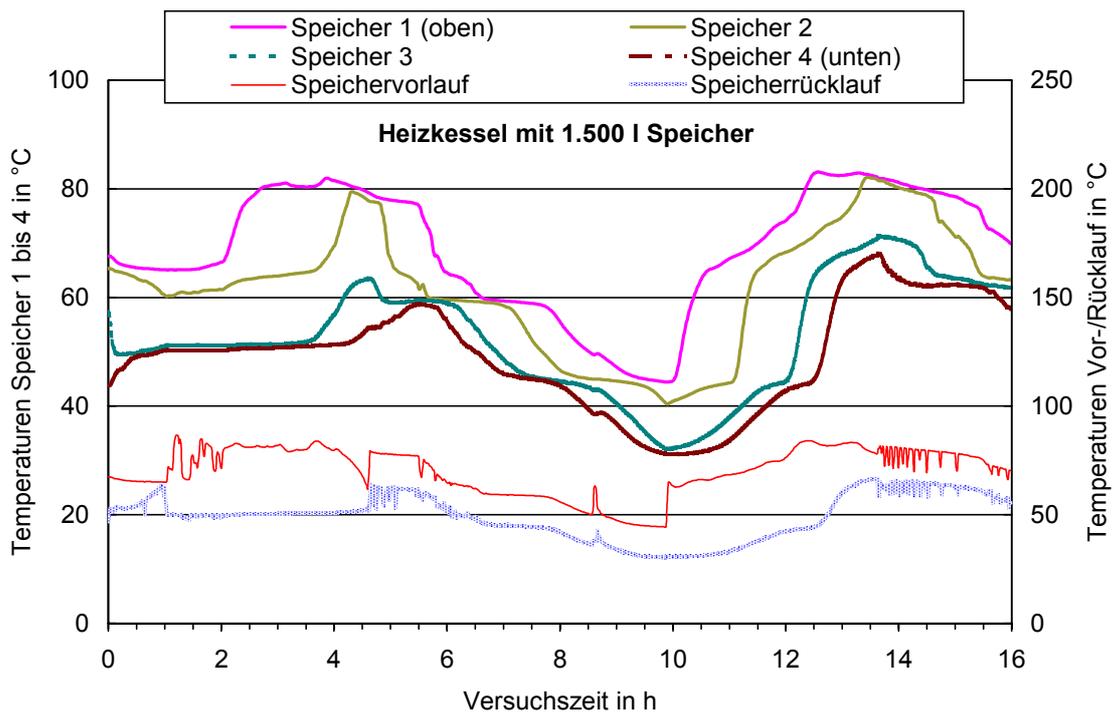
Beim dargestellten Versuch mit dem Heizkessel mit 750 l Speicher (Heizlastkurve Wintertag 'mild') wurde der geforderte Heizenergiebedarf durch den Abbrand von nur einer Holzcharge gedeckt. Ein geringer Beitrag lieferte die Nutzung von Restwärme aus dem Kessel aus dem vorangegangenen Versuch.

### Speichertemperaturen

Die Verläufe der Temperaturen in den Pufferspeichern an den Messpositionen 1 (oben) bis 4 (unten) sind für die Konfigurationen Heizkessel mit 1.500 und 750 l Speicher in **Bild 4.5.** beispielhaft für die Heizlastkurven Wintertag 'kalt' und 'mild' dargestellt.

Beim Start der Heizlastkurve für den Wintertag 'kalt' (Heizkessel mit 1.500 l Speicher) konnte der geforderte Wärmebedarf noch nicht vollständig aus dem nahezu gleichzeitig gestarteten Chargenabbrand gedeckt werden. Deshalb nimmt die Speichertemperatur an den Messpositionen 1 bis 3 ab. Mit abnehmendem Wärmebedarf und bei konstanter Kesselleistung beginnt nach etwa 2 Stunden die Speicheraufladung. Mit dem Abbrandende (nach etwas mehr als 4 Stunden) nimmt auch die Speichertemperatur wieder ab, der Heizenergiebedarf wird nun überwiegend aus dem Speicher gedeckt. Nach etwa 10 Stunden Versuchszeit ist die Speichertemperatur soweit abgefallen, dass der geforderte Heizenergiebedarf nicht mehr gedeckt werden kann, weshalb ein zweiter Chargenabbrand erfolgt. Mit dem Energieinhalt der Holzaufgabe dieser Charge wurde der Wärmebedarf für die letzten 6 Versuchsstunden gedeckt und der Speicher wieder auf ähnliche Temperaturen wie zu Versuchsbeginn aufgeladen.

Beim Wintertag 'mild' (Heizkessel mit 750 l Speicher) erfolgte der Versuchsstart bei hohen Speichertemperaturen, so dass eine Holzabbrand erst nach rund 5 Versuchsstunden bei dann niedrigeren Systemtemperaturen notwendig war. In diesem Fall wurde die Holzaufgabemenge etwas knapp bemessen, weshalb bei Versuchsende die Speichertemperaturen unterhalb den Starttemperaturen lagen. In diesem Versuch wurde somit ein Teil der geforderten Heizenergie aus dem Speicher gedeckt.



**Bild 4.5:** Verlauf der Speichertemperaturen beim Heizkessel mit 1.500 l Speicher (Heizlastkurve Wintertag 'kalt') und beim Heizkessel mit 750 l Speicher (Heizlastkurve Wintertag 'mild') (Nadel- bzw. Buchenscheitholz)

## 4.2 Emissionen der Kessel-Speicher-Kombinationen

Das Emissionsverhalten der untersuchten Heizkessel-Speicher-Kombinationen wurde bei der Verbrennung von Buchen- und Nadelstreuholz für die drei definierten Heizlastkurven Wintertag 'kalt', 'mittel' und 'mild' untersucht. Die Feuerungswärmeleistung wurde hierbei entweder von der Kesselregelung im Leistungsbereich von rund 50 bis 100 % der Nennwärmeleistung eingestellt oder weitgehend konstant (keine Teillast, nur Nennwärmeleistung) vorgegeben.

Brennstoffaufgaben erfolgten entweder dann, wenn die Systemtemperatur unterhalb der zur Deckung des Wärmebedarf notwendigen Temperatur lag oder auch vorher, wenn dies aufgrund des Versuchsablaufs unumgänglich war. Die Holzaufgabemengen und die Anzahl der aufgegebenen Holzchargen wurden an den Heizenergiebedarf der verschiedenen Heizlastkurven praxisnah angepasst. Durch dieses Vorgehen und die unvermeidbaren Streuungen der Emissionskonzentrationen bei Chargenabbränden ergibt sich eine Emissionsbandbreite, die einerseits bei installierten Anlagen auch zu erwarten ist, aber andererseits die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse erschwert. So werden Unterschiede zwischen den einzelnen Kessel-Speicher-Konfigurationen und Heizlastkurven kaum deutlich, wenn z.B. Mittelwerte unter Verwendung aller Versuchsreihen oder Abbrände für die jeweiligen Heizlastkurven berechnet werden.

Ausgangspunkt für die weitere Auswertung und Interpretation der Messergebnisse sind deshalb aus den einzelnen Versuchen zusammengestellte Emissionswerte für die einzelnen Heizlastkurven jeder Kessel-Speicher-Kombination, die unter günstigen Betriebsbedingungen zu erwarten sind. Günstige Betriebsbedingungen ergeben sich vor allem wenn:

- Holzaufgabemengen und Nachlegezeitpunkte gut an den Wärmebedarf und die Systemtemperatur angepasst sind. Leistungsregelvorgänge oder Gluthaltebetrieb werden hierdurch auf ein nahezu unvermeidbares Maß reduziert
- Störungen im Verbrennungsablauf (z.B. verzögertes Anbrennverhalten, Brückenbildung im Füllraum) nicht oder nur für kurze Zeiträume auftreten.

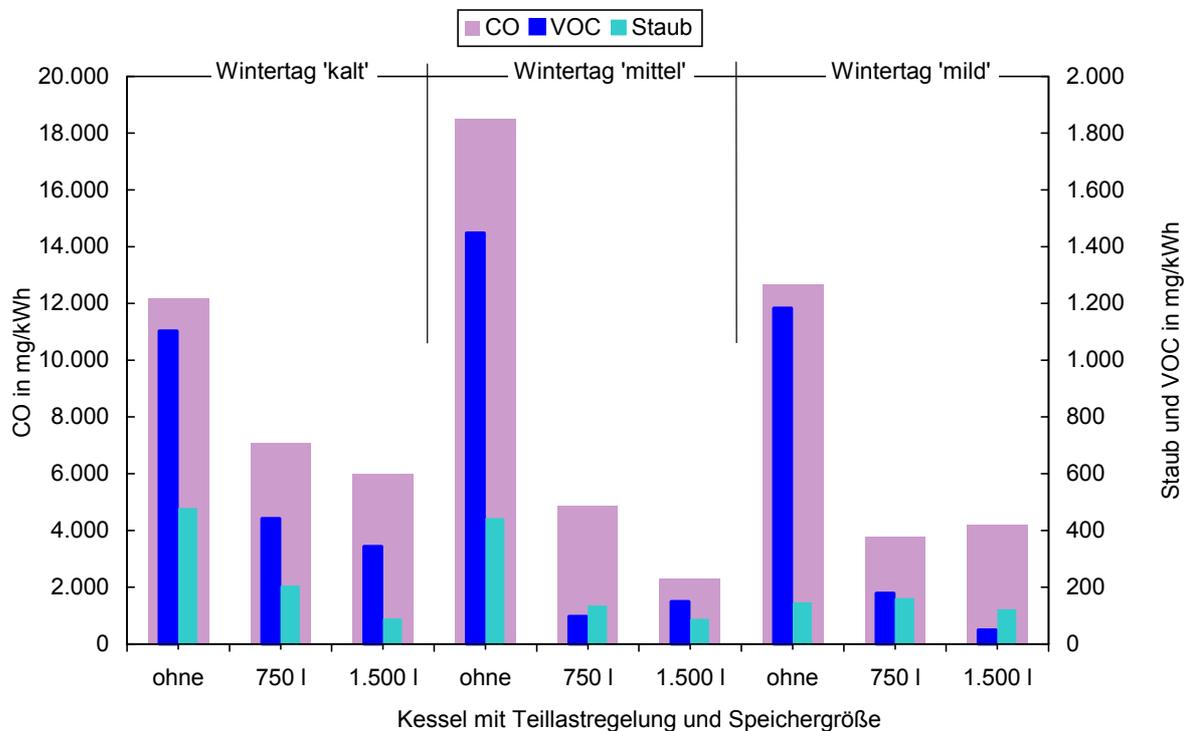
In **Tabelle 4.1** sind für die Kessel-Speicher-Kombinationen, bei denen die Teillastregelung des Heizkessels aktiviert war, die Ergebnisse der einzelnen Heizlastkurven bei günstigen Betriebsbedingungen zusammengefasst dargestellt.

**Tabelle 4.1:** Ergebnisse der Kessel-Speicher-Kombinationen für die einzelnen Heizlastkurven bei günstigen Betriebsbedingungen und mit Teillastregelung (Buchscheitholz)

	Mittelwerte oder Summen (mit Teillastregelung)		Wintertag 'kalt' - Kessel		Wintertag 'mittel' - Kessel		Wintertag 'mild' - Kessel	
	ohne Speicher	mit 1.500 l Sp.	ohne Speicher	mit 1.500 l Sp.	ohne Speicher	mit 1.500 l Sp.	ohne Speicher	mit 1.500 l Sp.
	2 (3)	2	2 (3)	2	2 (3)	2	4 (5)	2
Anzahl Abbrände	70	64	41	43	41	54	21	28
Holzauflagemenge in kg	16,3	16,0	16,0	16,3	16,0	16,3	16,0	16,3
Wassergehalt w in %	85	78	82	77	82	74	77	62
Kesseltemperatur VL in °C	79	65	77	66	77	63	74	63
Kesseltemperatur RL in °C	85	78	82	79	82	77	76	68
Verbraucher VL in °C	70	63	66	63	66	62	55	53
Verbraucher RL in °C	15	15	16	15	16	15	21	18
Delta T VL-RL in °C	29	78	27	76	27	78	50	78
Speichertemperatur VL	22	59	21	51	21	56	25	59
Speichertemperatur RL	30	76	28	75	28	77	52	78
Speichertemperatur S1-oben	27	69	26	68	26	71	46	70
Speichertemperatur S2	23	64	23	56	23	61	31	64
Speichertemperatur S3	23	59	22	51	22	57	26	49
Speichertemperatur S4-unten	9,4	9,9	7,8	10,7	7,8	9,1	4,8	9,1
CO2 in Vol%	5,055	2,944	7,674	2,484	7,674	9,58	5,261	1,747
CO in mg/m3 (bei 13 Vol% O2)	12,184	7,093	18,486	5,987	18,486	2,308	12,675	4,212
VOC in mgC/m3 (bei 13 Vol% O2)	424	171	558	132	558	58	456	19
VOC in mg/kWh	1.102	443	1.448	343	1.448	150	1.183	49
Partikel in mg/m3 (bei 13 Vol% O2)	197	84	183	36	183	36	60	50
Partikel in mg/kWh	475	203	441	87	441	86	143	120
Luftüberschusszahl in [-]	2,2	2,1	2,6	1,9	2,6	2,2	4,2	2,3
Abgasatemperatur in °C	118	150	102	126	102	161	97	165
feuerungst. Wirkungsgrad in %	87,5	88,3	85,7	90,1	85,7	87,9	80,9	88,5
auf NWL bezogene WL in %	72	138	35	85	35	124	38	103
Energieinhalt Holzaufgabe in kWh	286,0	262,2	168,0	261,7	168,0	217,6	84,7	122,0
feuerungstechnische Verluste in kWh	35,6	30,7	24,0	26,1	24,0	26,2	16,2	14,1
nutzbare Holzenergie in kWh	250,3	231,5	144,0	235,6	144,0	191,4	68,5	107,9
Heizenergie in kWh	242,9	222,2	139,0	232,0	139,0	154,1	64,2	79,3
aus Kessel in kWh	245,4	229,8	143,3	234,4	143,3	190,0	67,7	104,7
aus/in Speicher in kWh	2,4	7,6	4,3	2,4	4,3	35,9	47,1	25,4

NWL Nennwärmeleistung WL Wärmeleistung

Als Auszug aus dieser Tabelle sind die energiebezogenen Emissionen an CO, VOC und Staub für die verschiedenen Kessel-Speicher-Kombinationen und Heizlastkurven in **Bild 4.6** dargestellt.



**Bild 4.6:** Emissionen beim Kessel mit Teillastregelung und ohne bzw. mit 750 und 1.500 l Speicher bei den verschiedenen Heizlastkurven und bei günstigen Betriebsbedingungen (Buchscheitholz)

Beim Betrieb des Stückholzkessels ohne Speicher treten für alle Heizlastkurven die höchsten Emissionen an CO und VOC auf. Beim Speicherbetrieb weist der 1.500l Speicher meist das günstigste Emissionsniveau auf.

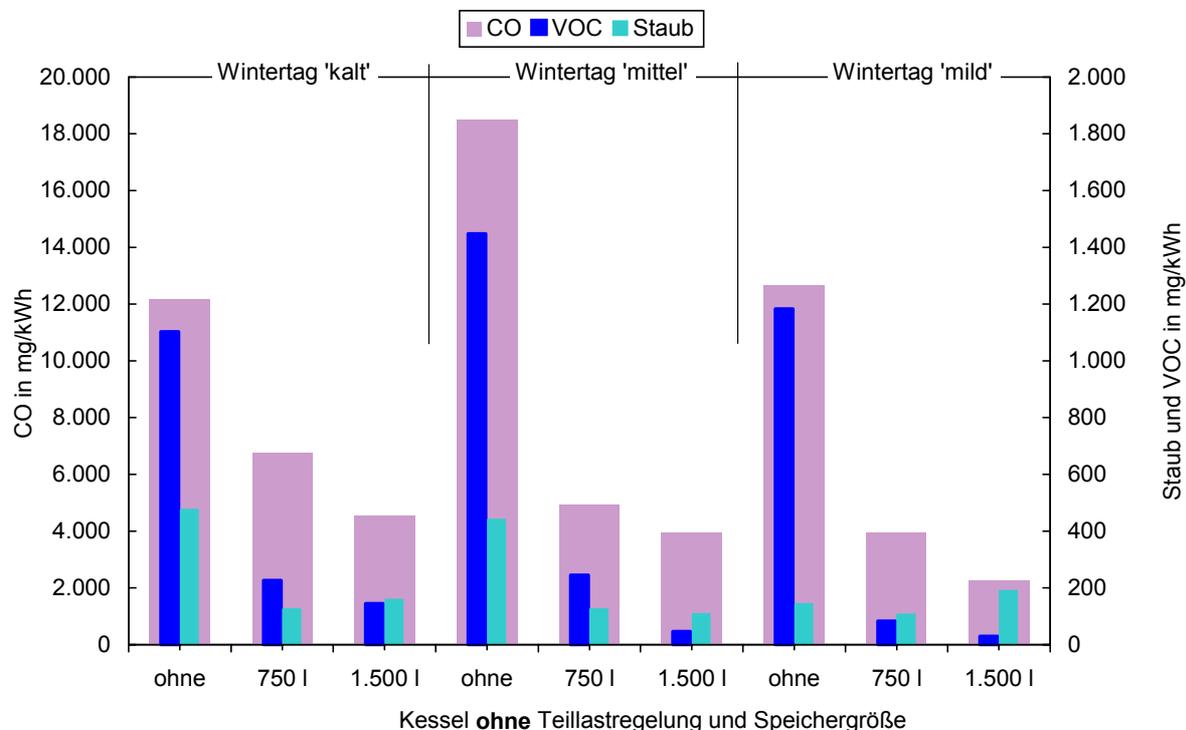
In **Tabelle 4.2** sind die Ergebnisse der einzelnen Heizlastkurven für die Kessel-Speicher-Kombinationen ohne Teillastregelung des Heizkessels aufgeführt. Auch hier gilt wieder, dass die Ergebnisse unter günstigen Betriebsbedingungen und mit Buchenholzscheiten ermittelt wurden.

**Bild 4.7** zeigt als Auszug aus dieser Tabelle wiederum die energiebezogenen Emissionen an CO, VOC und Staub für die verschiedenen Kessel-Speicher-Kombinationen und Heizlastkurven. Mit aufgenommen wurden die Werte für den Heizkesselbetrieb ohne Speicher aus Tabelle 4.1. Auch beim Betrieb des Stückholzkessels ohne Teillastregelung weist der 1.500l Speicher meist das günstigste Emissionsniveau auf.

**Tabelle 4.2:** Ergebnisse der Kessel-Speicher-Kombinationen für die einzelnen Heizlastkurven bei günstigen Betriebsbedingungen und ohne Teillastregelung (Buchenscheitholz)

Mittelwerte oder Summen (ohne Teillastregelung)		Wintertag 'kalt' - Kessel		Wintertag 'mittel' - Kessel		Wintertag 'mild' - Kessel	
		mit 750 l Sp.	mit 1.500 l Sp.	mit 750 l Sp.	mit 1.500 l Sp.	mit 750 l Sp.	mit 1.500 l Sp.
Wassertemperaturen	Anzahl Abbrände	2	2	2	2	1	1
	Holzaufgabemenge in kg	69	61	48	44	18	12
	Wassergehalt w in %	16,0	16,0	16,0	16	16,0	16,0
	Kesseltemperatur VL in °C	77	76	77	68	68	61
	Kesseltemperatur RL in °C	64	66	66	61	58	56
	Verbraucher VL in °C	77	80	79	73	74	69
	Verbraucher RL in °C	61	65	64	58	58	53
	Delta T VL-RL in °C	15	15	15	15	16	16
	Speichertemperatur VL	76	79	79	73	75	69
	Speichertemperatur RL	57	60	62	53	56	52
	Speichertemperatur S1-oben	75	79	78	73	74	69
	Speichertemperatur S2	67	75	72	66	68	64
	Speichertemperatur S3	64	63	68	56	64	56
Speichertemperatur S4-unten	57	59	61	53	55	53	
Abgas	CO <sub>2</sub> in Vol%	10,3	10,6	7,8	10,4	10,7	10,5
	CO in mg/m <sup>3</sup> (bei 13 Vol% O <sub>2</sub> )	2.806	1.891	2.052	1.643	1.649	944
	CO in mg/kWh	6.758	4.555	4.944	3.958	3.972	2.275
	VOC in mgC/m <sup>3</sup> (bei 13 Vol% O <sub>2</sub> )	87	56	94	18	32	11
	VOC in mg/kWh	226	145	245	47	83	29
	Partikel in mg/m <sup>3</sup> (bei 13 Vol% O <sub>2</sub> )	52	66	52	45	44	79
	Partikel in mg/kWh	126	159	126	109	107	190
	Luftüberschußzahl in [-]	2,0	1,9	2,6	2,0	1,9	2,0
	Abgastemperatur in °C	150	170	141	171	170	176
	feuerungst. Wirkungsgrad in %	87,8	87,8	86,3	87,8	89,9	88,8
auf NWL bezogene WL in %	88	104	82	111	181	151	
Energiebilanz	Energieinhalt Holzaufgabe in kWh	280,2	248,6	194,3	180,5	71,3	46,9
	feuerungstechnische Verluste in kWh	34,2	30,4	26,6	22,0	7,2	5,2
	<b>nutzbare Holzenergie in kWh</b>	<b>246,1</b>	<b>218,2</b>	<b>167,6</b>	<b>158,5</b>	<b>64,1</b>	<b>41,6</b>
	<b>Heizenergie in kWh</b>	<b>221,4</b>	<b>200,1</b>	<b>132,6</b>	<b>145,7</b>	<b>59,4</b>	<b>53,3</b>
	aus Kessel in kWh	243,9	216,5	167,6	155,3	61,4	40,8
aus/in Speicher in kWh	22,5	16,4	35,0	9,6	2,0	-12,5	

NWL Nennwärmeleistung WL Wärmeleistung



**Bild 4.7:** Emissionen beim Kessel **ohne** Teillastregelung und ohne bzw. mit 750 und 1.500 l Speicher bei den verschiedenen Heizlastkurven und bei günstigen Betriebsbedingungen (Buchenscheitholz)

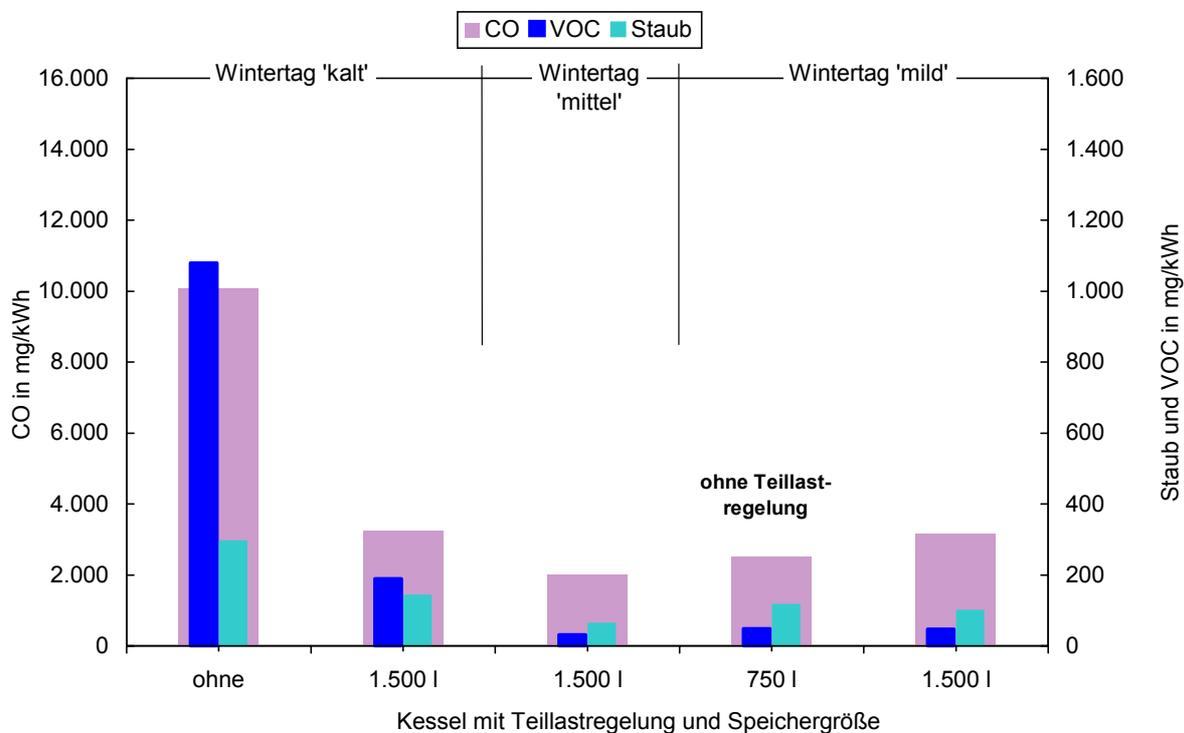
Wird der Heizkessel ohne Teillastregelung mit Pufferspeichern betrieben, wäre eigentlich zu erwarten, dass die Emissionen von CO, VOC und Staub deutlich ansteigen, da durch den Teillastbetrieb längere Abbrandzeiten unter günstigen Verbrennungsbedingungen realisiert werden können. Bei diesen Untersuchungen ergab sich allerdings nicht in jedem Fall ein deutlicher Vorteil durch den Teillastbetrieb, da immer wieder erhöhte Emissionen auftraten, die gerade durch die Regeleingriffe des Teillastbetriebes erzeugt wurden. Diese Emissionen traten auch noch bei hohen Abgasvolumenströmen auf, so dass sie sich deutlich bei den gewichteten Emissionsmittelwerten bemerkbar machen. Hierdurch wird der Vorteil längerer Betriebszeiten im Regelbereich des Kessels (beim Betrieb mit Teillastregelung) gegenüber längeren Gluterhaltungsphasen mit hohen Konzentrationen aber geringen Abgasvolumenströmen (beim Betrieb ohne Teillastregelung) teilweise kompensiert.

Neben Buchenscheitholz wurde bei einigen Heizlastkurven auch Nadelscheitholz eingesetzt. Bezüglich der Frage der Speicherdimensionierung ergaben sich durch die Verbrennungsversuche von Nadelscheitholz keine anderen Erkenntnisse. Etwas problematisch bei den Versuchen war allerdings die gegenüber Buchenholz höhere Brückenbildungsneigung im Füllraum. Hierdurch kann der Verbrennungsablauf doch erheblich gestört werden, was sich durch einen Abfall der Wärmeleistung des Kessels und einen Anstieg von Produkten unvollständiger Verbrennung im Abgas bemerkbar macht. Die hierdurch verursachten höheren Emissionen erschweren eine Interpretation der Ergebnisse wesentlich und sind auch nicht Gegenstand der Untersuchungen, da sie ursächlich nicht mit der Frage der Speichergröße zusammenhängen. Deshalb wurden diese Versuchsergebnisse nicht in die weiteren Betrachtungen zur Speicherdimensionierung mit einbezogen.

In **Tabelle 4.3** sind trotzdem die Ergebnisse ausgewählter Heizlastkurven für einige Kessel-Speicher-Kombinationen aufgeführt, die mit Nadelscheitholz ermittelt wurden. Bei diesen ausgewählten Abbränden erfolgte keine oder nur eine geringfügige Störung des Verbrennungsablaufes durch die Brückenbildung des Brennstoffes im Füllraum. **Bild 4.8** zeigt als Auszug aus dieser Tabelle wiederum die energiebezogenen Emissionen an CO, VOC und Staub für die verschiedenen Kessel-Speicher-Kombinationen und Heizlastkurven.

**Tabelle 4.3:** Ergebnisse einiger Kessel-Speicher-Kombinationen und Heizlastkurven bei günstigen Betriebsbedingungen mit Nadelscheitholz (mit und ohne Teillastregelung)

Mittelwerte oder Summen		Wintertag 'kalt' - Kessel		Wintertag 'mittel' - Kessel	Wintertag 'mild' - Kessel	
		ohne Speicher	mit 1.500 l Sp.	mit 1.500 l Speicher	mit 750 l Sp.	mit 1.500 l Sp.
Wassertemperaturen	Teillastregelung	ja	ja	ja	nein	ja
	Anzahl Abbrände	3	2	2	1	1
	Holzaufgabemenge in kg	69	63	55	23	24
	Wassergehalt w in %	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4
	Kesseltemperatur VL in °C	80	71	72	71	61
	Kesseltemperatur RL in °C	72	63	60	62	55
	Verbraucher VL in °C	80	72	73	77	55
	Verbraucher RL in °C	64	57	56	62	40
	Delta T VL-RL in °C	16	15	17	16	15
	Speichertemperatur VL	30	70	74	78	55
	Speichertemperatur RL	22	49	48	60	37
	Speichertemperatur S1-oben	31	69	73	77	54
	Speichertemperatur S2	27	62	66	71	48
	Speichertemperatur S3	23	53	56	67	41
Speichertemperatur S4-unten	23	49	50	60	38	
Abgas	CO <sub>2</sub> in Vol%	6,9	9,6	9,3	10,8	8,7
	CO in mg/m <sup>3</sup> (bei 13 Vol% O <sub>2</sub> )	4.217	1.355	841	1.051	1.327
	CO in mg/kWh	10.086	3.240	2.010	2.514	3.174
	VOC in mgC/m <sup>3</sup> (bei 13 Vol% O <sub>2</sub> )	422	74	12	19	18
	VOC in mg/kWh	1.080	189	31	48	47
	Partikel in mg/m <sup>3</sup> (bei 13 Vol% O <sub>2</sub> )	123	59	26	48	41
	Partikel in mg/kWh	295	142	63	116	99
	Luftüberschusszahl in [-]	2,9	2,1	2,2	1,9	2,3
	Abgastemperatur in °C	126	156	161	145	166
	feuerungst. Wirkungsgrad in %	84,4	88,3	88,0	90,7	86,6
	auf NWL bezogene WL in %	71	102	111	80	93
Energiebilanz	Energieinhalt Holzaufgabe in kWh	304,8	277,8	242,9	104,0	106,6
	feuerungstechnische Verluste in kWh	47,7	32,6	29,2	9,6	14,3
	<b>nutzbare Holzenergie in kWh</b>	<b>257,2</b>	<b>245,2</b>	<b>213,7</b>	<b>94,3</b>	<b>92,3</b>
	<b>Heizenergie in kWh</b>	<b>249,4</b>	<b>240,0</b>	<b>136,0</b>	<b>74,4</b>	<b>77,0</b>
	aus Kessel in kWh	253,6	242,4	210,1	88,7	87,9
aus/in Speicher in kWh	4,2	2,4	74,1	14,3	10,9	



**Bild 4.8:** Emissionen beim Kessel mit und ohne Teillastregelung und ohne bzw. mit 750 und 1.500 l Speicher bei verschiedenen Heizlastkurven und bei günstigen Betriebsbedingungen (Nadelscheitholz)

## 5 Zusammengefasste Ergebnisse

Die in diesem Vorhaben durchgeführten praxisnahen Emissionsmessungen an unterschiedlichen Stückholzkessel-Speicher-Kombinationen sind Grundlage zur Ermittlung emissionsoptimierter Speichergrößen.

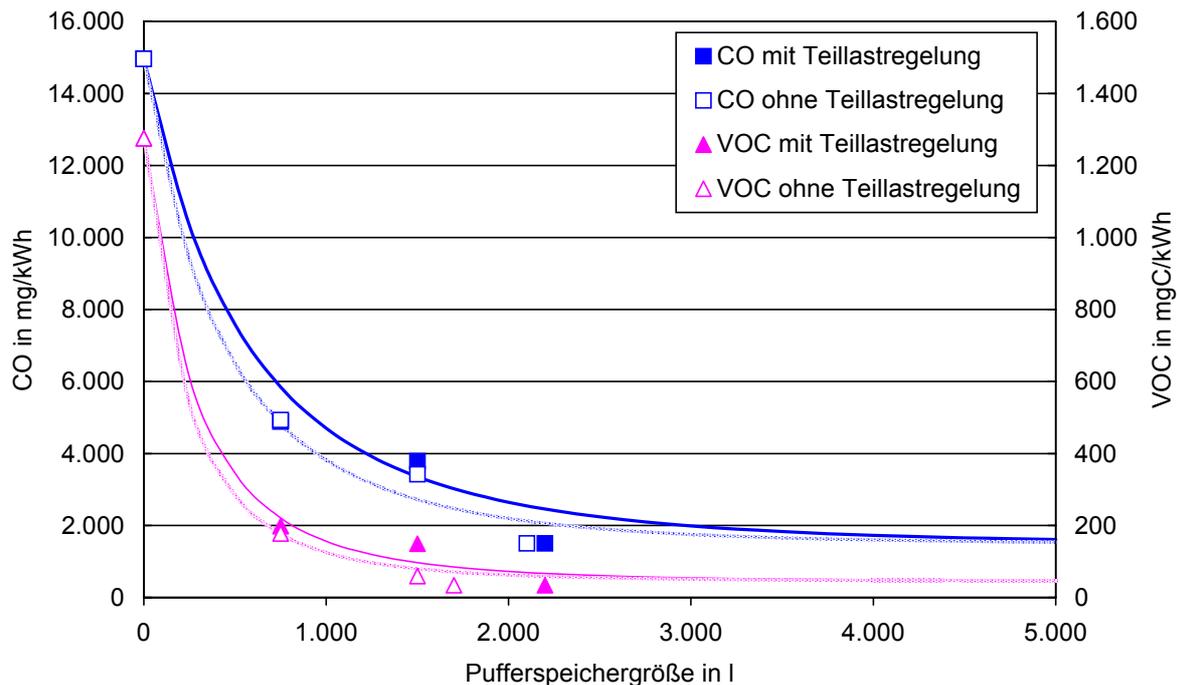
Für die zusammengefasste Auswertung und zur Berechnung von Emissionsfaktoren wurden die ermittelten CO- und VOC-Konzentrationen herangezogen. Die Staubkonzentrationen eignen sich für diese Betrachtung weniger, da hier wechselnde Abgasvolumenströme bei Teillast- und Gluterhaltbetrieb nicht berücksichtigt werden konnten. Aus den mittleren CO- und VOC-Konzentrationen für die verschiedenen Heizlastkurven, die in den Tabellen 4.1 und 4.2 dargestellt sind, wurden gewichtete Mittelwerte für eine Heizperiode berechnet. Die Heizlastkurven wurden hierzu entsprechend den Angaben in Tabelle 3.1 anteilig berücksichtigt. **Tabelle 5.1** gibt die Ausgangswerte, die Gewichtungsanteile und die hieraus berechneten Mittelwerte der Emissionsfaktoren wieder. Mit angegeben ist jeweils die Mindestemission, die bei einem ungestörten Dauerbetrieb während des Chargenabbrandes (ohne Regelvorgänge und Gluterhaltbetrieb) unter Berücksichtigung höherer Emissionen in der Anbrenn- und Ausbrandphase zu erwarten ist. Die hierbei angegebenen Werte liegen um etwa den Faktor 2 (für VOC) bzw. 3 (für CO) über den Emissionen, die im optimalen Betriebspunkt im Bereich der Nennwärmeleistung mit dem Stückholzkessel erreicht werden können.

**Tabelle 5.1:** CO- und VOC-Emissionsfaktoren als Mittelwerte einer Heizperiode für die untersuchten Heizkessel-Speicher-Kombinationen (Brennstoff: Buchenscheitholz)

VOC in mg/kWh	Pufferspeichergröße in l	mit Teillastregelung			ohne Teillastregelung		
		Wintertag 'kalt'	Wintertag 'mittel'	Wintertag 'mild'	Wintertag 'kalt'	Wintertag 'mittel'	Wintertag 'mild'
Ausgangswerte	0	1.102	1.448	1.183	1.102	1.448	1.183
	750	443	98	179	226	245	83
	1.500	343	150	49	145	47	29
Anteil an Jahresmittelwert in %		20	41	39	20	41	39
Mittelwerte für Heizperiode	0	1.276			1.276		
	750	198			178		
	1.500	149			59		
Mindestemission		34			34		

CO in mg/kWh	Pufferspeichergröße in l	mit Teillastregelung			ohne Teillastregelung		
		Wintertag 'kalt'	Wintertag 'mittel'	Wintertag 'mild'	Wintertag 'kalt'	Wintertag 'mittel'	Wintertag 'mild'
Ausgangswerte	0	12.184	18.486	12.675	12.184	18.486	12.675
	750	7.093	4.855	3.782	6.758	4.944	3.972
	1.500	5.987	2.308	4.212	4.555	3.958	2.275
Anteil an Jahresmittelwert in %		20	41	39	20	41	39
Mittelwerte für Heizperiode	0	14.959			14.959		
	750	4.884			4.928		
	1.500	3.786			3.421		
Mindestemission		1.500			1.500		

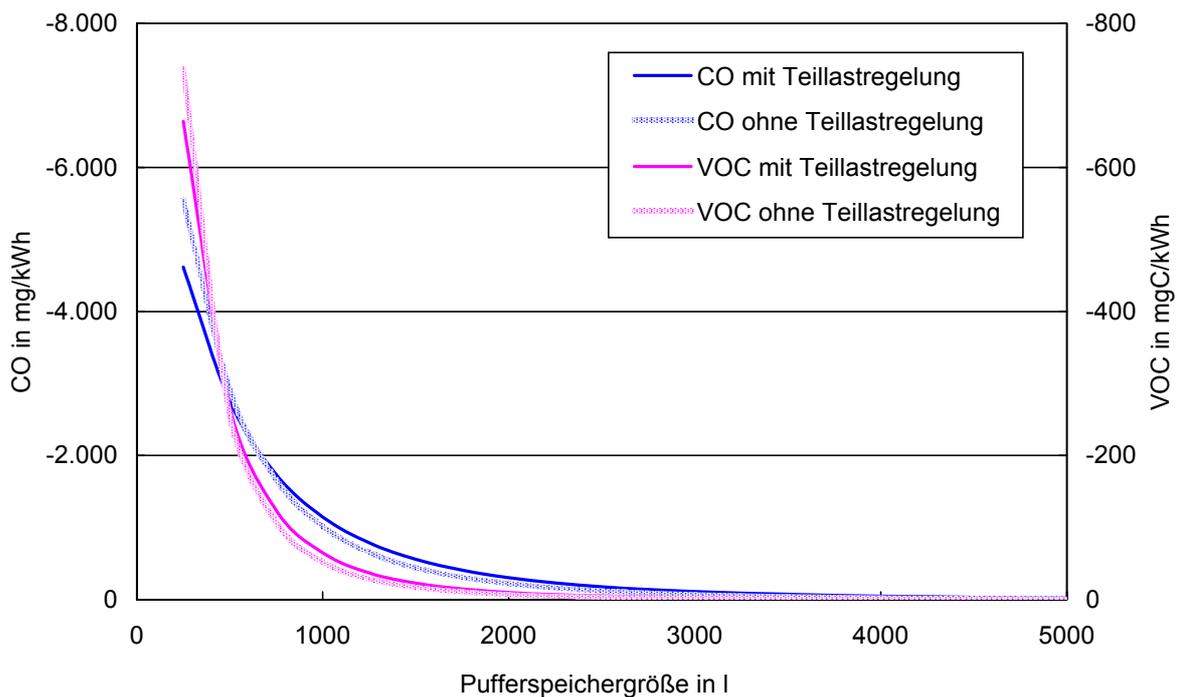
Diese mittleren Emissionsfaktoren einer Heizperiode für CO und VOC in Abhängigkeit der Pufferspeichergöße sind in **Bild 5.1** dargestellt. Durch die betreffenden Punkte wurde, unter Einbeziehung der zu erwartenden Mindestemissionen, jeweils eine Näherungskurve berechnet. Ausgehend von den Emissionsfaktoren beim Betrieb des Heizkessels ohne Speicher wurden die Kurvenverläufe so berechnet, dass die beiden Punkte für den Betrieb mit den Speichergrößen 750 bzw. 1.500 l gut wiedergeben und die Mindestemission asymptotisch angenähert werden. Aus den Verläufen der Näherungskurven lassen sich die Bereiche für optimale Speichergrößen ermitteln.



**Bild 5.1:** Verlauf der Emissionsfaktoren für CO und VOC in Abhängigkeit der Pufferspeichergöße beim Stückholzkessel mit und ohne Teillastregelung (Buchenscheitholz)

Als Kriterium zur Festlegung der optimalen Speichergröße kann die Abnahme der Emissionsfaktoren mit zunehmendem Speichervolumen herangezogen werden, siehe **Bild 5.2**. Ab einer Speichergröße von 2.000 bis 2.500 l, entsprechend rund 67 bis 83 l/kW Nennwärmeleistung, sind nur noch geringe Emissionsminderungen erzielbar. Der Bereich in dem die optimale Speichergröße zu erwarten ist, hängt von der Emissionskomponente und von der Art des Kesselbetriebs (mit und ohne Teillastregelung) ab. Im Mittel ergibt sich für die durchgeführten Untersuchungen eine optimale Speichergröße von 2.250 l bzw. 75 l/kW.

Die Kessel- und Speicherauswahl, die Untersuchungsbedingungen, die Versuchssystematik sowie die unvermeidliche Bandbreite der Emissionen haben natürlich die Untersuchungsergebnisse beeinflusst. Außerdem wurden bei dieser Untersuchung die Wärmeverluste des Pufferspeichers nur teilweise und nur für die eingesetzten Speichergrößen berücksichtigt.



**Bild 5.2:** Abnahme der Emissionsfaktoren für CO und VOC in Abhängigkeit der PufferspeichergroÙe beim Stückholzkessel mit und ohne Teillastregelung (Buchscheitholz)

Die Verluste nehmen aber u.a. mit der GröÙe des Speichers zu. Hierdurch sinkt der Nutzungsgrad der gesamten Anlage, was den Brennstoffverbrauch und damit die Emissionen erhöht. Ein stark überdimensionierte Speicher wirkt sich u.U. auch negativ auf den Komfort aus, da lange Speicherladezeiten notwendig werden.

Es wird folgende Regelung für den bisherigen § 6 Abs. 3 der 1. BImSchV vorgeschlagen:

Handbeschickte Feuerungsanlagen mit flüssigem Wärmeträgermedium sind bei Einsatz der in § 3 Abs. 1 Nr. 4 bis 8 genannten Brennstoffe grundsätzlich in Verbindung mit einem ausreichend bemessenen Wärmespeicher (Pufferspeicher) zu betreiben. Diese Anforderung gilt als erfüllt, wenn die GröÙe des Pufferspeichers, bezogen auf die Nennwärmeleistung des Heizkessels, mindestens **50 l/kW** beträgt. Abweichend hiervon gilt die Anforderung auch als erfüllt, wenn sichergestellt ist, dass die Feuerungsanlage nur bei Nennwärmeleistung betrieben werden kann.

Da die optimale SpeichergröÙe anlagenspezifisch ist und jeweils von den örtlichen Gegebenheiten sowie vom Betreiberverhalten abhängt, ist eine sorgfältige Planung und Auslegung der Heizanlage und des Pufferspeichers notwendig. Der hier gemachte Regelungsvorschlag in der 1. BImSchV ersetzt die Planungs- und Auslegungsarbeiten nicht, sondern ist vielmehr als Mindestanforderung zu verstehen.

## 6 Zusammenfassung

Damit akzeptable Verbrennungsbedingungen erhalten bleiben, kann bei Stückholzkesseln die Wärmeleistung meist nur in einem engen Bereich geregelt werden. Wärmeleistungen, bei denen die Feuerung in den Gluthaltebetrieb wechselt, oder Regelvorgänge können zu einem Anstieg der Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung führen. Neben Kohlenmonoxid, organischen Verbindungen und Partikeln werden dann auch Geruchsstoffe in höheren Konzentrationen emittiert, die Ursache für Nachbarschaftsbeschwerden sein können. Zur Vermeidung dieser Betriebszustände wird deshalb in der 1. BImSchV (Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes - Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen) gefordert, dass diese Feuerungsanlagen grundsätzlich bei Volllast zu betreiben und mit einem ausreichend bemessenen Wärmespeicher zu versehen sind. Ausnahmen werden zugelassen, wenn die Emissionsanforderungen an die Heizkessel auch im Teillastbetrieb eingehalten werden.

Die Größe des Pufferspeichers sowie der Regelbereich des Stückholzkessels wirkt sich, im Zusammenhang mit der Abstimmung der Anlagendimensionierung, wesentlich auf das Emissionsverhalten und den Nutzungsgrad aus. Unklar ist hierbei, inwieweit die Emissionen vom aktuellen Wärmebedarf sowie von der Größe des Pufferspeichers abhängen und wie die einzelnen Lastanteile zur Jahresemission der Heizanlage beitragen. Diese Fragen wurden exemplarisch an einem modernen teillastfähigen Holzkessel untersucht, der ohne und mit Pufferspeichern unterschiedlicher Größe in einem praxisnahen Heiztest mit naturbelassenem Nadel- und Buchenstückholz betrieben wurde.

Hierbei wurde ermittelt, dass ab einer Speichergröße von 2.000 bis 2.500 l, entsprechend rund 67 bis 83 l/kW Nennwärmeleistung, nur noch geringe Emissionsminderungen erzielt werden. Im Mittel ergab sich für den untersuchten Stückholzkessel bei den gewählten Randbedingungen eine optimale Speichergröße von 2.250 l bzw. 75 l/kW Nennwärmeleistung.

Die Festlegung optimaler Pufferspeichergrößen ist heizanlagen-spezifisch, und u.a. von den örtlichen Bedingungen, vom Betreiberverhalten und von dessen Komfortansprüchen abhängig. Für die Untersuchungen wurden Annahmen für Heizlastkurven, die Bedienung und Einstellung des Holzkessels und der Holzaufgabeintervalle getroffen. Wärmeverluste des Pufferspeichers wurden näherungsweise und für die untersuchten Speichergrößen berücksichtigt. Diese nehmen aber u.a. mit der Größe des Speichers zu, wodurch der Nutzungsgrad der gesamten Heizanlage sinkt. Hiermit erhöhen sich dann der Brennstoffverbrauch und die Emissionen. Ein stark überdimensionierte Speicher wirkt sich u.U. auch negativ auf den Komfort aus, da lange Speicherladezeiten notwendig werden.

Deshalb wird vorgeschlagen, dass im Rahmen der 1. BImSchV ein Pufferspeicher als ausreichend bemessenen angesehen wird, wenn dessen Inhalt mindestens **50 l** Wasser je kW installierte Nennwärmeleistung aufweist.

## 7 Literatur

1. BImSchV. 2001.

Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BImSchV) vom 15. Juli 1988 (BGBl. I, S. 1059), zuletzt geändert am 27. Juli 2001 (BGBl. I, S. 1950).

DIN EN 304. August 1998.

Heizkessel. Prüffregeln für Heizkessel mit Ölzerstäubungsbrennern. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN 303-5. Juni 1999.

Heizkessel. Teil 5: Heizkessel für feste Brennstoffe, hand- und automatisch beschickte Feuerungen, Nenn-Wärmeleistung bis 300 kW. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN 444-2 (1997)

Radiatoren und Konvektoren. Teil 2. Prüfverfahren und Leistungsangabe. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

FfE, 2002.

Wärmeerzeuger für die Raumheizung und Warmwasserbereitung. Verbundprojekt ISOTEC. Innovative Systeme und optimierte Techniken zur energetischen Gebäudesanierung. Forschungsstelle für Energiewirtschaft der Gesellschaft für praktische Energiekunde e.V. (FfE), München.

Fröling, 2003.

Persönliche Mitteilung von Herrn Thomas Broneske, Gebietsvertreter der Firma Fröling, D-73087 Boll bzw. A-4710 Grieskirchen.

Hartmann, H.; Thuneke, K.; Höldrich, A. und Roßmann, P. 2003.

Handbuch Bioenergie – Kleinanlagen. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow.

Kerschbaumer, D. 1990.

Regelung einer Stückholzfeuerung. Dissertation an der Université de Neuchâtel, Institut de Microtechnique.

Pfeiffer, F., Struschka, M. und Baumbach, G. 2000.

Ermittlung der mittleren Emissionsfaktoren zur Darstellung der Emissionsentwicklung aus Feuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben 295 46 364. Erschienen in der Reihe UBA-TEXTE als Nr. 14-00, Umweltbundesamt, Berlin.

Reisinger, K. 2004.

Grunddaten zur Auslegung eines Wärmespeichers für Scheitholzessel. Technologie- und Förderzentrum (TFZ) im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Straubing.

Strehler, A. 1996.

Wärme aus Holz und Stroh. DLG Arbeitsunterlagen, Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft e.V. (Hrsg.), Frankfurt, Eigenverlag, 80 S.

Struschka, M.; Zuberbühler, U.; Dreiseidler, A.; Dreizler, D. und Baumbach, G. 2003.

Ermittlung und Evaluierung der Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher sowie Ableitung von geeigneten Maßnahmen zur Emissionsminderung. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben 299 44 140. Erschienen in der Reihe UBA-TEXTE als Nr. 41-03, Umweltbundesamt, Berlin.

Struschka, M., Pfeiffer, F., Lepel, F. von, Baumbach, G. 2000.

Start- und Stopp-Emissionen von Öl- und Gasfeuerungen. Erdöl Erdgas Kohle, Heft 3, S. 121-122

Uth, J. 2000.

Scheitholzvergaserkessel. Broschüre der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) (Hrsg.), Gülzow, 2. Auflage, 52 S.

VDI 2066.

Blätter 1 und 7: Messen von Partikeln. VDI Handbuch Reinhaltung der Luft. Beuth Verlag GmbH, Berlin, jeweils aktuellste Fassung.

VDI 2067, Blatt 6. 1989.

Berechnung der Kosten von Wärmeversorgungsanlagen. Wärmepumpen. Partikeln. VDI Handbuch Heizungstechnik / Lüftungstechnik. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

**10.7 Unterbericht „Emissionsuntersuchungen auf dem Prüfstand an  
Kleinfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe“**

**Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen**

Direktor: Prof. Dr. techn. G. Scheffknecht

**Abteilung Reinhaltung der Luft**

Prof. Dr.-Ing. Günter Baumbach

Pfaffenwaldring 23, 70569 Stuttgart



## **Emissionsuntersuchungen auf dem Prüfstand an Kleinf Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe**

Teilbericht im Forschungsvorhaben:

Ermittlung und Minderung der Emissionen krebserzeugender und weiterer besonders gesundheitsgefährdender Stoffe bei Kleinf Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe

von

Dr.-Ing. Michael Struschka

Dipl.-Ing. Bernd Goblirsch

Dipl.-Ing. Joachim Kiess

Prof. Dr.-Ing. Günter Baumbach

Universität Stuttgart

Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD)

IM AUFTRAG DER  
LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG  
Referat 31, Umwelttechnologie  
Hertzstraße 173, 76187 Karlsruhe

Januar 2005

**Inhaltsverzeichnis**

	<u>Seite</u>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>222</b>
<b>2 Messungen am Stückholzkessel .....</b>	<b>223</b>
2.1 Vorgehensweise .....	224
2.2 Untersuchungsprogramm .....	225
2.3 Versuchsaufbau und Messtechnik.....	228
2.4 Versuchsauswertung .....	231
2.5 Ergebnisse .....	231
2.6 Zusammenfassende Bewertung beim Stückholzkessel .....	240
<b>3 Messungen am Kachelofen-Heizeinsatz - Betreiberverhalten .....</b>	<b>241</b>
3.1 Vorgehensweise .....	241
3.2 Untersuchungsprogramm .....	243
3.3 Versuchsaufbau und Messtechnik.....	244
3.4 Versuchsauswertung .....	245
3.5 Ergebnisse beim Kachelofen-Heizeinsatz - Betreiberverhalten .....	245
3.6 Zusammenfassende Bewertung beim Heizeinsatz - Betreiberverhalten.....	250
<b>4 Messungen am Kachelofen-Heizeinsatz mit Katalysator .....</b>	<b>251</b>
4.1 Vorgehensweise .....	251
4.2 Untersuchungsprogramm .....	252
4.3 Versuchsaufbau und Messtechnik.....	253
4.4 Versuchsauswertung .....	254
4.5 Ergebnisse beim Kachelofen-Heizeinsatz mit Katalysator .....	254
4.6 Messergebnisse der UMEG.....	258
4.7 Zusammenfassende Bewertung beim Heizeinsatz mit Katalysator .....	260
<b>5 Literatur .....</b>	<b>261</b>

### Einleitung

Bei ungünstigen Verbrennungsbedingungen sowie beim Einsatz von Holzwerkstoffresten oder von kontaminiertem Holz in Kleinf Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe können krebs-erzeugende (z.B. Benzol oder polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen) sowie andere besonders gesundheitsgefährdende Stoffe (z.B. Dioxine und Furane) emittiert werden. Die Höhe der Emissionen hängt hierbei u.a. auch vom technischen Zustand der Feuerungs-anlage (Wartungszustand) und vom Betreiberverhalten ab, wobei diese Einflüsse bisher nur schwer zu bewerten sind.

Deshalb sollen zur Klärung dieser Fragestellungen folgende Emissionsuntersuchungen auf dem Institutsprüfstand durchgeführt werden:

- Der Einfluss des Wartungszustandes auf die Emissionen eines Stückholzkessels soll durch ein praxisnahes Heizprogramm untersucht werden. Hierbei soll der Heizkessel über einen Zeitraum von etwa 2 Monaten mit Buchenholz ohne War-tungsarbeiten, außer gelegentliche und unumgängliche Entaschungen, betrieben werden. Anhand wöchentlich durchgeführter Emissionsmessungen und Wir-kungsgradberechnungen soll der aktuelle Zustand des Heizkessels erfasst wer-den.
- Der Einfluss des Betreiberhaltens auf die Emissionen eines Kachelofen-Heizeinsatzes soll anhand eines standardisierten Heizprogramms, welches den üblichen Leistungsbereich und damit die üblichen Betriebsbedingungen der Ein-zelfeuerstätte abdeckt, beschreiben werden. Auf Basis der gemessenen Konzentr-ationen in den einzelnen Betriebsbereichen und deren anteiligen Gewichtung an der gesamten jährlichen Heizleistung sollen die Jahresemissionen modellhaft be-rechnet werden. Außerdem soll ein Vergleich mit Emissionen, die sich unter den Randbedingungen der Normprüfung ergeben, durchgeführt werden. Als Brenn-stoff wird Buchenholz eingesetzt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung tragen zur besseren Bewertung von Emissionsdaten aus Prüfstandsmessungen und aus Feldmessungen bei.

Inwieweit Oxidationskatalysatoren die Emissionen von Produkten unvollständiger Verbren-nung bei Einzelfeuerstätten mindern können, soll ebenfalls am Beispiel des Kachelofen-Heizeinsatzes untersucht werden. Hierzu ist folgendes Programm vorgesehen:

- Ermittlung der Emissionen eines Kachelofen-Heizeinsatzes bei Verwendung ei-nes einfachen Abgaskatalysators. Dieser soll direkt am Ausgang des Heizeinsatz in das Verbindungsstück zum nachgeschalteten Guss-Wärmetauscher eingebaut werden. Anhand von zwei Wärmeleistungen des Heizeinsatzes, niedrige und ho-he Leistung, soll die Wirksamkeit des Katalysators bei der Verbrennung von Bu-chenscheitholz untersucht werden. Hierbei sollen Emissionsmessungen zeitgleich vor und nach dem Katalysator durchgeführt werden.

## 1 Messungen am Stückholzkessel

Moderne Stückholzkessel sind überwiegend als Feuerungen mit unterem oder seitlichem Abbrand ausgeführt, wobei entweder die Verbrennungsluft oder das Abgas mit Gebläsen gefördert wird. Kessel mit Naturzugbetrieb sind allerdings noch im Anlagenbestand vorhanden und werden im unteren Preissegment auch noch angeboten. Der Gebläsebetrieb hat folgende Vorteile:

- weitgehende Unabhängigkeit von den Zugbedingungen im Schornstein
- zuverlässige und reproduzierbare Dosierung von Primär- und Sekundärluft wird erreicht
- höhere Druckverluste in der Feuerung können überwunden werden.

Die Beschickung der Kessel mit Scheithölzern oder grobem Hackgut erfolgt bei kleineren Kesseln durch auf der Frontseite angebrachte Fülltüren oder von oben über Füllschachtdeckel. Nach den Verbrennungszonen findet die Wärmeabgabe z.B. über wassergekühlte Seiten- oder Trennwände, Plattenwärmetauscher und Wärmetauscherrohre statt. In die Wärmetauscherrohre können auch Spiralen zur Erhöhung des Wärmeübergangs und zur Abreinigung der Rohre eingehängt sein. Da bei Stückholzkesseln die Feuerungswärmeleistung, und damit die aktuelle Wärmeabgabe, nur eingeschränkt geregelt werden kann, sollten diese grundsätzlich nur in Kombination mit einem ausreichend dimensionierten Pufferspeicher betrieben werden.

Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe müssen, wie jede andere Feuerungsanlage auch, regelmäßig und fachgerecht gewartet werden. Dies ist die Grundvoraussetzung für einen emissionsarmen und störungsfreien Betrieb der Anlage. Wartungs- und Reinigungsarbeiten sind jeweils entsprechend den Vorgaben des Herstellers durchzuführen. Folgende Arbeiten können hierbei z.B. notwendig werden:

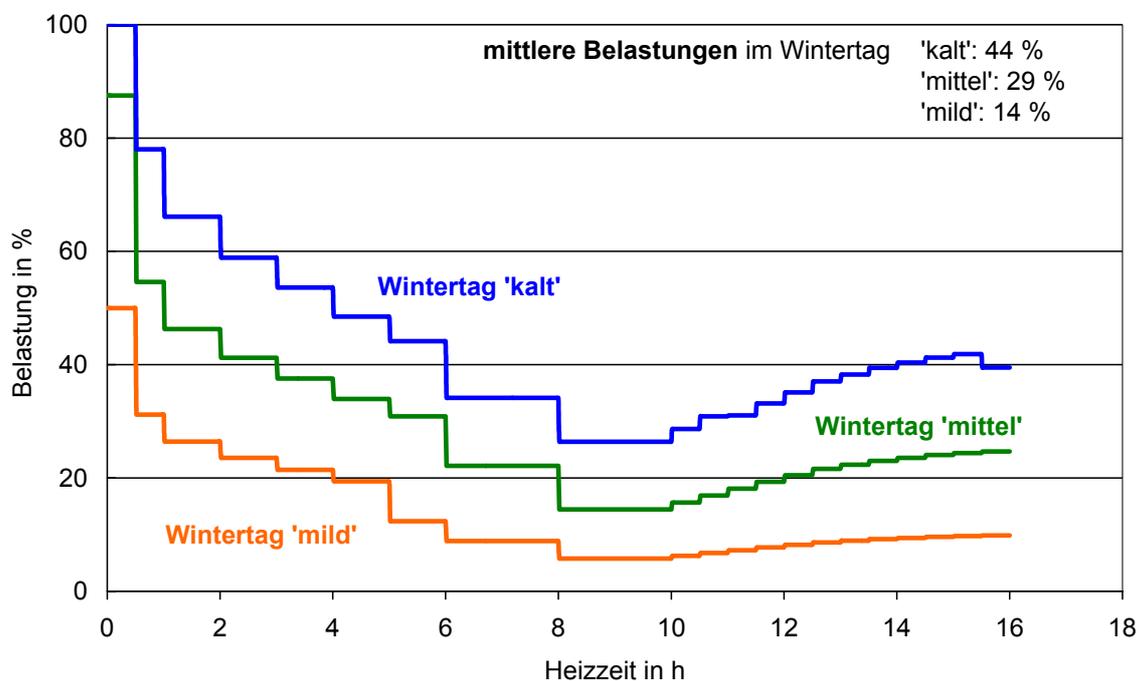
- **Wöchentliche Wartung:**
  - Asche aus Füll- und Feuerraum entfernen
  - Reinigung der Wärmetauscherrohre mit Reinigungseinrichtung
  - Kontrolle der thermischen Ablaufsicherung und des Anlagendruckes
- **Monatliche Wartung:**
  - gründliche Reinigung der Wärmetauscherrohre mit Reinigungsbürsten
  - Reinigung von heizgasberührten Kesselwänden
  - Reinigung und Sichtkontrolle des Abgasthermometers
- **Halbjährliche Wartung:**
  - Kontrolle und Reinigung der Luftöffnungen im Füll- und Brennraum
- **Jährliche Wartung:**
  - Reinigung von Schwelkanälen und Saugzugventilator
  - Dichtigkeitsprüfung der Kesseltüren und Klappen
  - Reinigung des Rauchrohrs
  - Überprüfung von Zugreglern.

Darüber hinaus empfehlen viele Hersteller den Abschluss eines Wartungsvertrages. Hierdurch soll die fachmännische Durchführung der Wartungsarbeiten gewährleistet werden und auch die Überprüfung und Instandsetzung anderer Bauteile (z.B. Lambda-Sonden), deren ordnungsgemäße Funktion vom Betreiber nicht ohne weiteres überprüft werden kann.

## 1.1 Vorgehensweise

Die Änderung des Emissionsverhaltens eines modernen teillastfähigen Holzkessels, der mit einem Pufferspeicher betrieben wird, soll während einer 2monatigen Betriebszeit in einem praxisnahen Heiztest exemplarisch untersucht werden. Wartungsarbeiten werden, bis auf eine regelmäßige wöchentliche Entaschung, nicht durchgeführt.

Für den praxisnahen Heiztest wurden 3 Heizlastkurven festgelegt, die kalte, mittlere und milde Wintertage repräsentieren sollen, siehe **Bild 2.1**. Diese Heizlastkurven wurden für einen angenommenen täglichen Heizbetrieb von 16 Stunden ohne Warmwassererzeugung definiert. In der Praxis würde dies einem Heizungsbetrieb mit Nachabsenkung entsprechen.



**Bild 2.1:** Definierte Heizlastkurven für Messungen am Stückholzkessel (Belastung ist auf Nennwärmeleistung des Holzkessels bezogen)

Die insgesamt im Jahr erreichten Betriebszeiten bei den einzelnen Belastungen teilen sich auf die einzelnen Heiztage entsprechend der Bandbreite und Häufigkeit der jährlichen Außentemperaturverteilung und des täglichen Außentemperaturverlaufs auf. Die derart festgelegten Wintertage umfassen gewisse Bandbreiten der Außentemperaturen und repräsentieren somit auch die Jahresstunden, in denen diese Temperaturen auftreten. Somit lassen sich die Anteile der so definierten Wintertage an den insgesamt vorhandenen Jahresstunden, an denen die Heizgrenztemperatur unterschritten wird, berechnen. In **Tabelle 2.1** sind für die definierten Wintertage die Außentemperaturbereiche mit Jahresstunden und jährlichen Anteile am Beispiel meteorologischer Daten für Stuttgart aufgelistet. Mit enthalten sind die Anzahl der Betriebstage und deren prozentualen Anteile an der gesamten Betriebszeit des Stückholzkessels bei den Prüfstandsmessungen.

**Tabelle 2.1:** Außentemperaturbereiche, Jahresstunden und Anteile für die definierten Wintertage aus meteorologischen Daten und Betriebstage und Anteile bei den Prüfstandsuntersuchungen (meteorologische Daten nach VDI 2067, 1989)

definierter Wintertag	aus meteorologischen Daten			Prüfstandsuntersuchungen	
	Bereich der Außentemperaturen in °C	Jahresstunden für Stuttgart	Anteil an Gesamtjahresstunden in %	Anzahl der Betriebstage	Anteil der Betriebstage in %
<b>kalt</b>	< -13 bis -1	1.336	<b>20</b>	8	<b>18</b>
<b>mittel</b>	> -1 bis 8	2.808	<b>41</b>	26	<b>59</b>
<b>mild</b>	> 8 bis 15	2.663	<b>39</b>	10	<b>23</b>
Summe		6.807	<b>100</b>	44	<b>100</b>

## 1.2 Untersuchungsprogramm

Für die Untersuchungen zum Einfluss des Wartungszustandes auf die Emissionen und auf den feuerungstechnischen Wirkungsgrad wurde ein moderner teillastfähiger Holzkessel verwendet, der mit einem Pufferspeichern betrieben wurde. Als Brennstoff wurden Buchenholzscheite eingesetzt. Wichtige Angaben zum eingesetzten Stückholzkessel und zum verwendeten Pufferspeicher sind in **Tabelle 2.2** enthalten.

**Tabelle 2.2:** Angaben zum eingesetzten Stückholzkessel und zum Pufferspeicher

	Stückholzkessel	Pufferspeicher
Hersteller	Fröling Heizkessel- und Behälterbau GmbH, A-4710 Grieskirchen	Euro-Speicher GmbH, D-93464 Tiefenbach
Typ	Turbo 3000	PS 750 Pufferspeicher
NWL in kW	30	
Inhalt in l	120	750
Füllraum in l	140	
Baujahr	2003	2004
geeignete Brennstoffe	Scheitholz, Hackgut, Sägerestholz, lufttrocken ( $w < 25\%$ )	
Beschreibung	Holzvergaserkessel mit unterem Abbrand (Sturzbrand), Wirbelbrennkammer, Primär- und Sekundärluft sowie Lambda-Regelung	Speicher aus Stahlblech in stehender Bauweise mit 100 mm Wärmedämmung
Aufbau	Anschluss Speicher in Heizkreis parallel zu Heizkessel	

NWL Nennwärmeleistung

Vor Beginn der Untersuchungen wurde der Heizkessel entsprechend den Wartungshinweisen des Herstellers gründlich gereinigt und überprüft. Hierbei wurde u.a. eine Dichtigkeitsprüfung der Kesseltüren und Klappen vorgenommen, das Abgasrohr gereinigt, und das Abgasthermometer sowie die Lambda-Sonde ausgebaut, visuell überprüft und gründlich gesäubert. Danach wurde eine Funktionskontrolle der Anlage vorgenommen.

Vor dem eigentlichen Betriebsprogramm wurden dann an zwei aufeinander folgenden Tagen die Emissionen und der feuerungstechnische Wirkungsgrad des gereinigten Kessels bestimmt. Anschließend wurde der Kessel 9 Wochen mit unterschiedlichen Heizlastkurven betrieben, wobei in jeder Woche der Betriebszustand anhand von Emissionsmessungen und Wirkungsgradberechnungen festgestellt wurde. Nach der gesamten Betriebszeit von 9 Wochen wurde der Kessel in mehreren Schritten gereinigt. Hierbei wurden in jedem Fall die Änderungen durch erneute Messungen belegt. In **Tabelle 2.3** sind die Betriebszeiten, die Messungen zur Dokumentation des Betriebszustandes, die aufgegebene Holzmen gen und die Wartungsarbeiten aufgelistet.

Bei Stückholzfeuerungen hat der Betreiber über die Brennstoffqualität, die Aufgabehäufigkeit, die Aufgabemengen und die Einstellung der Feuerungsanlage (z.B. Einstellung von Primär- und Sekundärluft) einen wesentlichen Einfluss auf das Emissionsverhalten. Bei modernen gebläseunterstützten Kesseln mit Verbrennungsregelung werden die notwendigen Eingriffe der Betreiber wesentlich reduziert, da die Einstellung von Primär- und Sekundärluftmengen sowie ggf. die Gebläseleistung von der Regelung übernommen und dem aktuellen Verbrennungsablauf angepasst wird.

Bei der Aufgabehäufigkeit des Brennstoffes wurde vorausgesetzt, dass auch der Komfortgedanke und übliche Tagesaktivitäten eine Rolle spielen. So wurde davon ausgegangen, dass der für einen Betriebstag notwendige Brennstoff in der Regel in ein bis zwei Chargen aufgegeben wird. Als Nachlegezeitpunkte wurde während der üblichen Arbeitszeiten die Vorlauf temperatur des Heizkreises herangezogen. Lag diese unterhalb der zur Deckung des aktuellen Wärmebedarfs notwendigen Höhe, wurde eine neue Brennstoffcharge abgebrannt. Da sich der 16-stündige praxisnahe Heizbetrieb nur schwer mit den üblichen Arbeitszeiten vollständig realisieren lässt, wurde z.T. auch dann Brennstoff aufgegeben, wenn dies zu diesem Zeitpunkt noch nicht notwendig war. Somit ergibt sich eine Bandbreite im Betriebsverhalten, die auch in der Praxis zu erwarten ist. Auch dort wird es regelmäßig Fälle geben, in denen Brennstoff zu früh nachgelegt wird.

Die Aufgabemengen orientierten sich insgesamt an den definierten Heizkurven. Für eine einzelne Holzaufgabe wurde die Brennstoffmenge anhand der aktuellen Betriebsdaten abgeschätzt, weshalb auch hier eine gewisse Bandbreite vorhanden ist, was aber auch dem Praxisfall entspricht. Beim Einschichten des Holzes und der Kesselwartung wurde von einem üblichen Betreiber ausgegangen, der die Anlage nicht mit übertriebener Sorgfalt sondern routinemäßig bedient und nur Dinge beachtet, die direkt die problemlose Nutzung der Heizanlage und den Komfort betreffen. So wurde beim Einschichten des Holzes nur darauf geachtet, dass der Durchgang in die unter dem Füllraum liegende Nachbrennkammer nicht durch ein Holzstück verschlossen wird. Dies hätte zur Folge, dass die Heizleistung des Kessels nicht ausreichend ansteigt und somit der Wärmebedarf nicht vollständig gedeckt wird.

Tabelle 2.3: Versuchsmatrix der Prüfstandsmessungen am Stückholzkessel

Wartung	Emissionsmessung	Heizbetrieb						
		Betriebs- woche	Versuchs- tage	Datum	Heizlastkurve			Holzmengen in kg
					kalt	mittel	mild	
1)	Ausgangszustand	<b>1</b>	1	27.09.2004		X		20
	Ausgangszustand		2	28.09.2004	X			31
			3	29.09.2004	X			64
			4	30.09.2004		X		42
			5	01.10.2004		X		29
			6	04.10.2004		X		46
2)	nach 1. Betriebswoche	<b>2</b>	7	05.10.2004		X		38
			8	06.10.2004		X		42
			9	07.10.2004		X		43
			10	08.10.2004		X		42
			11	11.10.2004		X		42
			12	12.10.2004		X		42
2)	nach 2. Betriebswoche	<b>3</b>	13	13.10.2004		X		32
			14	14.10.2004	X			40
			15	15.10.2004			X	27
			16	19.10.2004		X		42
2)	nach 3. Betriebswoche	<b>4</b>	17	20.10.2004		X		14
			18	21.10.2004		X		42
			19	22.10.2004			X	20
			20	25.10.2004	X			63
			21	26.10.2004	X			66
2)	nach 4. Betriebswoche	<b>5</b>	22	27.10.2004			X	25
			23	28.10.2004			X	20
			24	29.10.2004			X	23
			25	02.11.2004		X		42
2)	nach 5. Betriebswoche	<b>6</b>	26	03.11.2004		X		26
			27	04.11.2004	X			62
			28	08.11.2004		X		43
			29	09.11.2004			X	20
2)	nach 6. Betriebswoche	<b>7</b>	30	10.11.2004		X		14
			31	11.11.2004		X		43
			32	12.11.2004		X		42
			33	15.11.2004	X			64
			34	16.11.2004		X		42
			35	17.11.2004		X		42
2)	nach 7. Betriebswoche	<b>8</b>	36	18.11.2004			X	13
			37	22.11.2004	X			66
			38	23.11.2004		X		42
			39	24.11.2004			X	20
2)	nach 8. Betriebswoche	<b>9</b>	40	25.11.2004			X	10
			41	26.11.2004		X		42
			42	29.11.2004		X		28
			43	30.11.2004			X	14
			44	01.12.2004		X		28
2)	nach 9. Betriebswoche		45	07.12.2004		X		36
3)	Reinigung WT		46	09.12.2004				
4)	Reinigung Kessel		47	10.12.2004				
5)	Reinigung Lambda-Sonde		48	13.12.2004				
verfeuerte Holzmenge					während Heizbetrieb:			1.639
					während Messungen:			581
					insgesamt:			<b>2.220</b>

- 1) komplette Kesselreinigung und Funktionsprüfung      2) nach Messung: Asche aus Brennkammer entfernt  
 3) Wärmetauscher (WT) gereinigt (Reinigungseinrichtung)    4) Kessel / Wärmetauscher gründlich gereinigt  
 5) Lambda-Sonde gereinigt

Nach den Emissionsmessungen für die jeweilige Betriebswoche wurde die Asche aus der Brennkammer entfernt, wobei diese nicht vollständig gereinigt wurde. Nach Abschluss des Heizbetriebes und nachdem die entsprechenden Emissionsmessungen durchgeführt wurden, erfolgte eine Reinigung der Rauchrohre des Wärmetauschers mit der vorhandenen und von Hand zu betätigenden Reinigungseinrichtung. Anschließend wurden wiederum Emissionsmessungen durchgeführt. Danach wurde Kessel und Wärmetauscher gründlich gereinigt und die Auswirkung erneut vermessen. In einem letzten Schritt wurde die Lambda-Sonde ausgebaut und gereinigt und letzte Emissionsmessungen vorgenommen.

Damit bei den Emissionsmessungen weitgehend der gleiche Betriebszustand des Stückholzkessels erfasst wurde, war ein standardisiertes Vorgehen notwendig. Erreicht werden sollte jeweils die maximal mögliche Wärmeleistung unter konstanten Bedingungen während der Messzeit. Hierzu wurden entsprechende Änderungen an den Parametern der Leistungsregelung vorgenommen. Die Kesseltemperatur sollte im Bereich von 80 °C liegen. Es wurden jeweils zwei Messungen nacheinander durchgeführt. Bei den Messungen wurde jeweils wie folgt vorgegangen:

- Vorheizen und Grundgluterzeugung:  
Aufgabe von 5 bis 7 kg Holz, je nach Temperatur von Brennkammer und Kessel, abbrennen lassen bis auf Grundglut, dann war Kesseltemperatur bei ~ 80 °C und Wärmeleistung ungefähr im maximalen Bereich. Grundglut verteilen
- Abbrand für 1. Messung:  
Aufgabe von etwa 15 bis 20 kg Holz auf Grundglut, Wartezeit (Größenordnung: 15 – 30 min) bis Kesseltemperatur und Wärmeleistung konstant und bei Sollwerten. Außerdem wurde darauf geachtet, dass CO-Konzentration im Abgas ebenfalls weitgehend konstant und auf niedrigem Niveau (Erwartungswerte) lag. Durchführung der Emissionsmessung (ca. 30 Minuten)
- Abbrand für 2. Messung:  
Nachdem Holzaufgabe für 1. Messung weitgehend abgebrannt war, wurden nochmals 15 bis 20 kg Holz aufgegeben und eine weitere Emissionsmessung über ca. 30 Minuten durchgeführt.

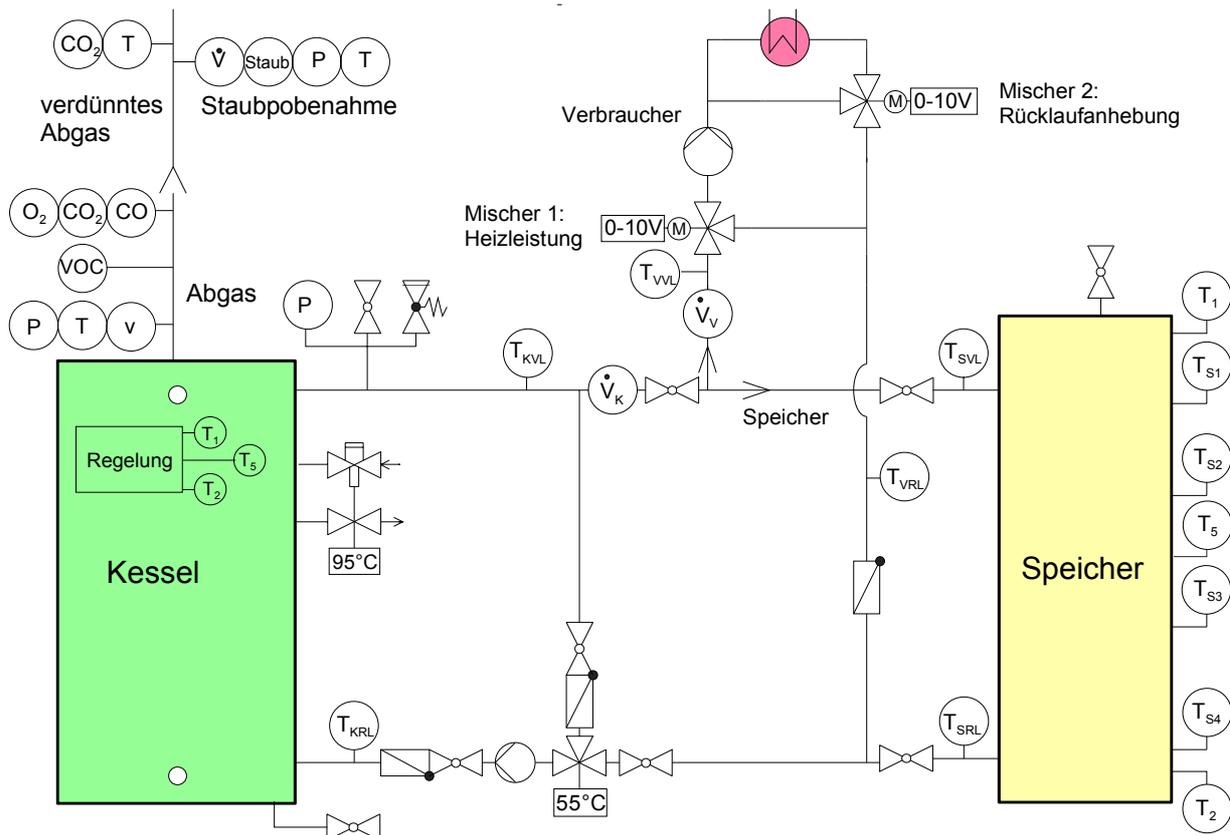
### 1.3 Versuchsaufbau und Messtechnik

Im folgenden werden der Versuchsaufbau und die eingesetzte Messtechnik kurz beschrieben.

#### Versuchsaufbau

**Bild 2.2** zeigt das Hydraulikschema von Stückholzkessel und Pufferspeicher sowie die erfassten Messgrößen und deren Positionen.

Der Versuchsaufbau weist an Wasserkreisläufen die vom Kesselhersteller vorgeschriebene und unmittelbar am Kessel vorgesehene Rücklaufanhebung 'Kessel' auf ca. 55 °C, den Speicherkreis und den Verbraucherkreis mit Rücklaufanhebung (Spreizung ca. 15 K) auf.



**Bild 2.2:** Hydraulische Verschaltung von Stückholzkessel und Pufferspeicher sowie Messgrößen und -positionen

Die Rücklaufanhebung 'Kessel' wird von einem Thermostatventil gesteuert, welches Rücklaufwasser nach Überschreitung der Mindestrücklauftemperatur beimischt. Die Kesselpumpe läuft nach Erreichen einer einstellbaren Kesseltemperatur an und schaltet bei deren Unterschreitung oder wenn die Speichertemperatur über der Kesseltemperatur liegt wieder ab.

Die nach Vorgabe der Heizlastkurven geforderte Heizleistung wird über den Volumenstrom in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen Verbraucher Vor- und Rücklauf mit einem Dreiwegemischer (Mischer 1) geregelt. Der Verbraucherkreis wird entweder aus dem Kessel, dem Speicher oder in einem variablen Verhältnis aus beiden mit Heizwasser versorgt. Liefert die Heizkesselpumpe mehr Wasser als der Heizkreis momentan benötigt, erfolgt die Speicherladung. Bei der Entladung des Speicher kehrt sich die Fließrichtung des Wassers um.

Im Abgas wurden die Konzentrationen an  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$  und  $\text{VOC}$  sowie die Abgastemperatur kontinuierlich gemessen. Die mittlere  $\text{CO}_2$ -Konzentration und die mittlere Abgastemperatur während den jeweils 30minütigen Messungen wurden zur Berechnung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades verwendet. Damit auch organische Verbindungen erfasst werden, die unmittelbar an der Schornsteinmündung, d.h. bei Temperaturen unterhalb der Abgastemperatur, als Partikel vorliegen, erfolgte die Staubprobenahme aus dem verdünnten Abgas, siehe hierzu z.B. Struschka et al. (2003).

Die Verdünnung der Feuerungsabgase erfolgt an der Mündung des rund 5 m hohen isolierten Stahlschornstein in einer Abgas-Sammelhaube mit Raumluft. Im Schornstein, der im Technikum installiert ist, stellt sich unabhängig von den nachfolgenden Einrichtungen ein natürlicher Schornsteinzug ein. Die Staubkonzentration (Partikelkonzentration) liegt als Mittelwert des Messzeitraumes (30 Minuten) vor. Zur Umrechnung auf den Bezugssauerstoffgehalt von 13 Vol% und zur Berechnung des Verdünnungsverhältnisses wurde im verdünnten Abgas ebenfalls die CO<sub>2</sub>-Konzentration erfasst.

Die Staubprobenahme erfolgte mit einem Filterkopfgerät für Planfilter entsprechend VDI 2066 (Blatt 1 und 7). Als Filtersubstrate wurden Quarzfaserfilter verwendet. Bei der Probenahme wird zu Kontroll- und Berechnungszwecken der abgesaugte Volumenstrom, der Unterdruck bei der Probenahme und die Temperatur gemessen. In **Tabelle 2.4** sind die verwendeten Messgeräte, die Prüfgaskonzentrationen und die eingesetzten Filtersubstrate für das Planfilterkopfgerät aufgelistet.

Beim verfeuerten Buchenholz wurde nur der Wassergehalt ermittelt, der zwischen 14,3 bis 14,8 % lag. Für Berechnungen, z.B. des Heizwertes, wurde eine mittlere Zusammensetzung des Buchenholzes aus Pfeiffer und Struschka et al. (2000) verwendet.

**Tabelle 2.4:** Angaben zur verwendeten Messtechnik

Messgröße (Messprinzip) Messgerätetyp, Hersteller	Messbereich	Prüfgaskonzentration <sup>2</sup> Filtersubstrate	Größe
CO <sub>2</sub> (nicht dispersive Infrarotabsorption)	0-3 Vol% und 0-20 Vol%	2,0 Vol% CO <sub>2</sub> in N <sub>2</sub> 11,8 Vol% CO <sub>2</sub> in N <sub>2</sub>	Vol%
CO (nicht dispersive Infrarotabsorption): BINOS-Reihe. Fisher-Rosemount	0-3 Vol% 0-1.000 ppm v/v	0,77 Vol% CO in N <sub>2</sub> 253 ppm v/v CO in N <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup>
O <sub>2</sub> (Paramagnetische Eigenschaften): Oxynos-Reihe. Fisher-Rosemount	0-25 Vol%	8,0 Vol% O <sub>2</sub> in N <sub>2</sub>	Vol %
VOC (Flammenionisation) <sup>1</sup> : FID RS 55. Rattfisch	0-1.000 ppm v/v	83 ppm v/v Propan in N <sub>2</sub>	mgC/m <sup>3</sup>
Temperaturen (Thermoelektrizität): Ni- CrNi-Thermoelemente	0-150 °C und 0-490 °C	-	°C
Partikel (Gravimetrie): Planfilterkopfgerät STE. Ströhlein	-	Quartz Microfibre MK 360, Φ 50 mm. Munktell Filter AB	mg/m <sup>3</sup>
Wasser-Volumenströme (Mehrstrahl- Flügelradzähler): Viterra Energy	bis 2,5 m <sup>3</sup> /h	-	m <sup>3</sup> /h
Geschwindigkeit Staubprobenahme (Hitdrahtanemometer): Strömungssensor Typ SS, Schmidt	0-2,5 m/s	-	m/s
Unterdruck Staubprobenahme (piezoel. Sensoren): Typ GMUD, Greisinger	0 – 200 mbar	-	mbar

<sup>1</sup> bei den VOC-Messungen wurde eine beheizte Probenahmeleitung verwendet. Diese Leitung und der FID waren auf ca. 160 °C beheizt. Im FID ist ein Feinfilter vorhanden. Gemessen wurde die Summe der flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) im feuchten Abgas, es wird die Kohlenstoffmasse angegeben

<sup>2</sup> die Überprüfung der Nullpunkte der Gasanalysatoren erfolgte mit Stickstoff 5.0

## 1.4 Versuchsauswertung

Zur Auswertung der Versuchsergebnisse wurden bei den kontinuierlich erfassten Größen alle registrierten 1-Minuten-Mittelwerte ab Messbeginn bis zum Messende (ca. 30 Minuten) verwendet. Der feuerungstechnische Wirkungsgrad wurde in guter Näherung nach der indirekten Methode ermittelt (DIN EN 303-5 und DIN EN 304). Hierzu wurden aus Abgasdaten die Verluste durch freie Wärme der Abgase und durch unvollständiger Verbrennung berechnet, Verluste durch unvollständig verbrannten Brennstoff blieben unberücksichtigt.

Die Umrechnung der gemessenen CO-, VOC- und Partikelkonzentrationen auf einen einheitlichen Bezugssauerstoffgehalt von 13 Vol% erfolgte mittels der gemessenen O<sub>2</sub>- bzw. CO<sub>2</sub>-Konzentration nach 1. BImSchV (2001):

$$E_B = \frac{21 - O_{2,B}}{21 - O_{2,M}} * E_M \quad [\text{mg/m}^3] \quad (2.1)$$

$$E_B = CO_{2,\text{max}} * \frac{21 - O_{2,B}}{21 * CO_{2,M}} * E_M \quad [\text{mg/m}^3] \quad (2.2)$$

mit: E<sub>B</sub>: Emissionskonzentration, bezogen auf den Bezugssauerstoffgehalt  
 E<sub>M</sub>: gemessene mittlere Emissionskonzentration  
 O<sub>2,B</sub>: Bezugssauerstoffgehalt (hier: 13 Vol%)  
 O<sub>2,M</sub>: gemessene mittlere Sauerstoffkonzentration in Vol%  
 CO<sub>2,max</sub>: maximale CO<sub>2</sub>-Konzentration des Brennstoffs bei stöchiometrischer Verbrennung  
 CO<sub>2,M</sub>: gemessene mittlere Kohlendioxidkonzentration in Vol%.

## 1.5 Ergebnisse

In der folgenden **Tabelle 2.5** sind die Messergebnisse der Prüfstandsmessungen für den Stückholzkessel aufgelistet, wobei für die beiden Einzelmessungen je Versuchstag ein Mittelwert gebildet wurde.

Insgesamt waren die Randbedingungen bei den Messungen und die Dauer der Messungen gut vergleichbar. Eine gewisse Bandbreite der Ergebnisse ergibt sich durch unvermeidbare Schwankungen der Verbrennungsqualität und der Wärmeleistung, die auch durch das standardisierte Vorgehen nicht vollständig unterdrückt werden konnten. Dies erschwert die Interpretation der Ergebnisse etwas, ändert aber nichts an den Kernaussagen.

Tabelle 2.5: Ergebnisse für den Stückholzkessel

Messungen bei höchster Wärmeleistung		Ausgangszustand		Messungen nach Betriebswoche				
				1	2	3	4	5
Datum und Dauer	Datum	27.9.04	28.9.04	5.10.04	13.10.04	20.10.04	27.10.04	3.11.04
	Versuchsdauer in min	32	32	32	32	32	32	31
Brennstoff	Holzaufgabemenge in kg	21,0	19,1	17,9	17,5	17,1	15,0	15,0
	Wassergehalt in %	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,8	14,8
Kessel	Wärmeleistung in kW	40,3	37,8	37,5	30,8	27,2	31,0	30,7
	Vorlauftemperatur in °C	83	82	82	83	83	84	83
	Rücklauftemperatur in °C	65	66	65	70	69	68	68
	Schamottetemperatur in °C	330	345	352	398	358	394	389
Abgas	CO <sub>2</sub> in Vol%	13,1	13,0	12,8	12,3	12,7	12,6	12,8
	CO in mg/m <sup>3</sup> (bezogen)	256	144	119	177	192	187	95
	VOC in mgC/m <sup>3</sup> (bezogen)	5	10	5	9	6	7	6
	Abgastemperatur in °C	177	183	178	192	199	212	214
verdünntes Abgas	CO <sub>2</sub> in Vol%	2,2	2,2	3,1	2,9	2,4	2,7	2,6
	Temperatur in °C	52	58	67	59	55	58	55
	Partikel in mg/m <sup>3</sup> (bezogen)	26	37	33	31	26	41	22
Verluste	thermische in %	9,7	9,8	9,5	11,2	11,2	12,3	12,2
	chemische in %	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	Summe Verluste in %	9,9	9,9	9,6	11,4	11,3	12,4	12,3
Wärmeleistung	feuerungst. Wirkungsgrad in %	90,1	90,1	90,4	88,6	88,7	87,6	87,7
	FWL in kW	44,8	41,9	41,4	34,7	30,6	35,3	35,0
	WL (FWL*Wirkungsgrad) in kW	40,3	37,8	37,5	30,8	27,2	31,0	30,7

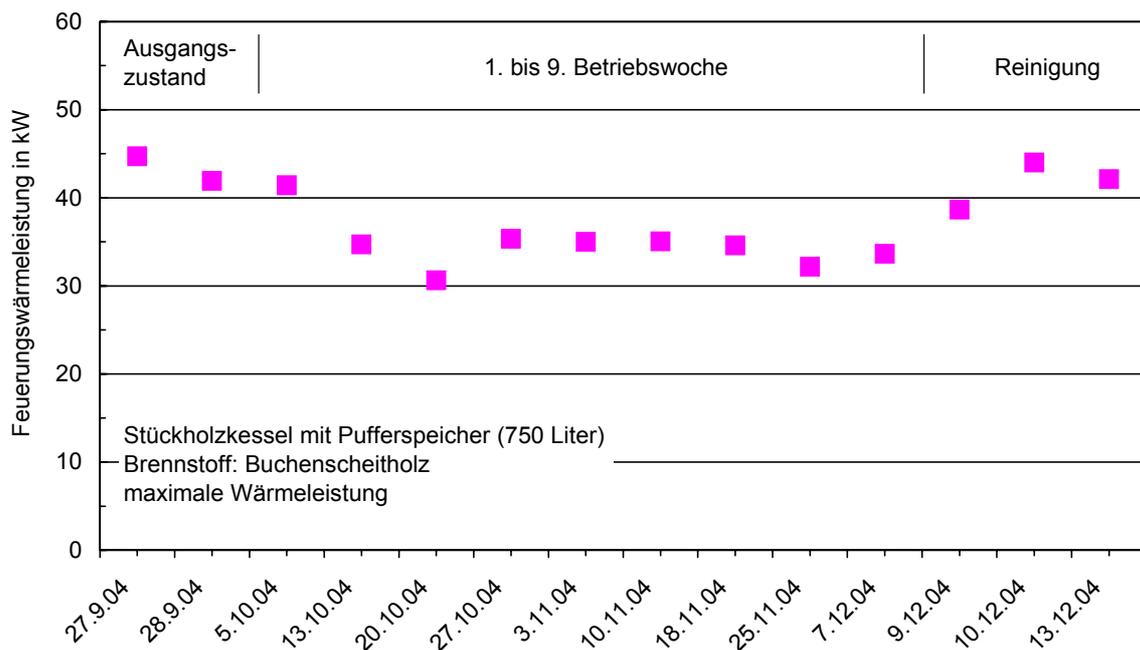
Messungen bei höchster Wärmeleistung		Messungen nach Betriebswoche				Messung nach Reinigung von		
		6	7	8	9	WT	Kessel	λ - Sonde
Datum und Dauer	Datum	10.11.04	18.11.04	25.11.04	7.12.04	9.12.04	10.12.04	13.12.04
	Versuchsdauer in min	31	32	32	32	32	32	32
Brennstoff	Holzaufgabemenge in kg	14,2	12,4	13,9	14,6	13,9	14,0	15,2
	Wassergehalt in %	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8
Kessel	Wärmeleistung in kW	30,8	30,1	28,1	29,8	33,4	38,4	37,5
	Vorlauftemperatur in °C	83	83	83	81	81	83	82
	Rücklauftemperatur in °C	69	70	70	66	65	65	65
	Schamottetemperatur in °C	362	311	367	312	337	396	351
Abgas	CO <sub>2</sub> in Vol%	12,7	12,2	12,4	12,5	12,0	11,2	12,0
	CO in mg/m <sup>3</sup> (bezogen)	81	185	71	67	178	284	165
	VOC in mgC/m <sup>3</sup> (bezogen)	3	3	5	6	4	3	5
	Abgastemperatur in °C	207	214	210	193	219	196	184
verdünntes Abgas	CO <sub>2</sub> in Vol%	2,2	2,6	2,6	2,8	1,6	1,8	2,9
	Temperatur in °C	59	56	56	45	51	51	56
	Partikel in mg/m <sup>3</sup> (bezogen)	46	33	37	30	49	39	19
Verluste	thermische in %	12,1	12,9	12,5	11,3	13,4	12,4	10,9
	chemische in %	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,3	0,1
	Summe Verluste in %	12,2	13,0	12,5	11,3	13,5	12,7	11,0
Wärmeleistung	feuerungst. Wirkungsgrad in %	87,8	87,0	87,5	88,7	86,5	87,3	89,0
	FWL in kW	35,0	34,6	32,2	33,6	38,7	44,0	42,1
	WL (FWL*Wirkungsgrad) in kW	30,8	30,1	28,1	29,8	33,4	38,4	37,5

FWL Feuerungswärmeleistung

WL Wärmeleistung

WT Wärmetauscher

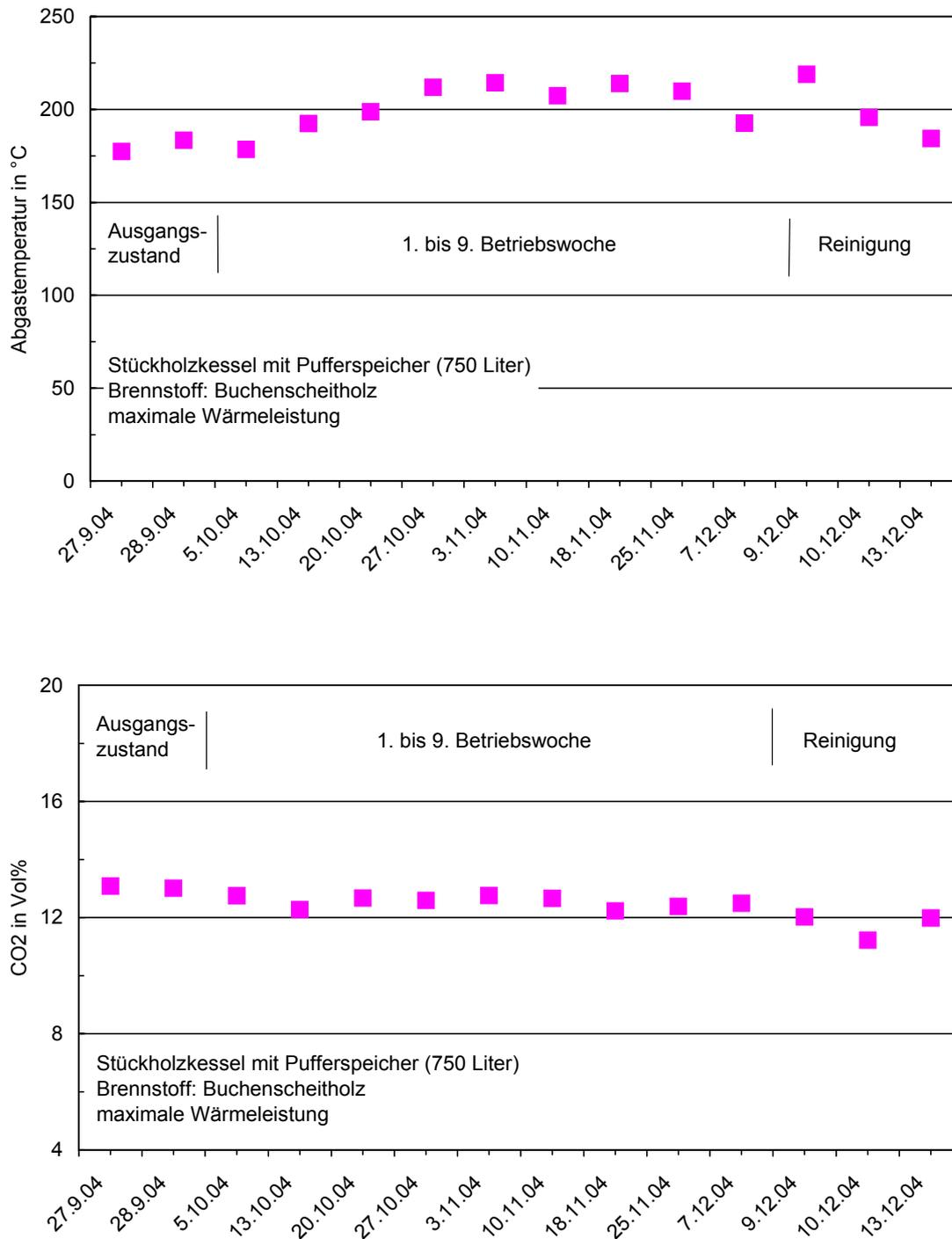
In **Bild 2.3** sind die berechneten Feuerungswärmeleistungen für die einzelnen Versuchstage als Mittelwerte der beiden Einzelversuche dargestellt. Im Ausgangszustand wurde die höchste Feuerungswärmeleistung erzielt, die dann vor allem zwischen der ersten und zweiten Betriebswoche deutlich abnahm und zwischen der 4. und 9. Betriebswoche in etwa konstant blieb. Eine Zunahme der Feuerungswärmeleistung wurde durch die einzelnen Reinigungsschritte erreicht.



**Bild 2.3:** Feuerungswärmeleistung als Mittelwert der einzelnen Versuchstage

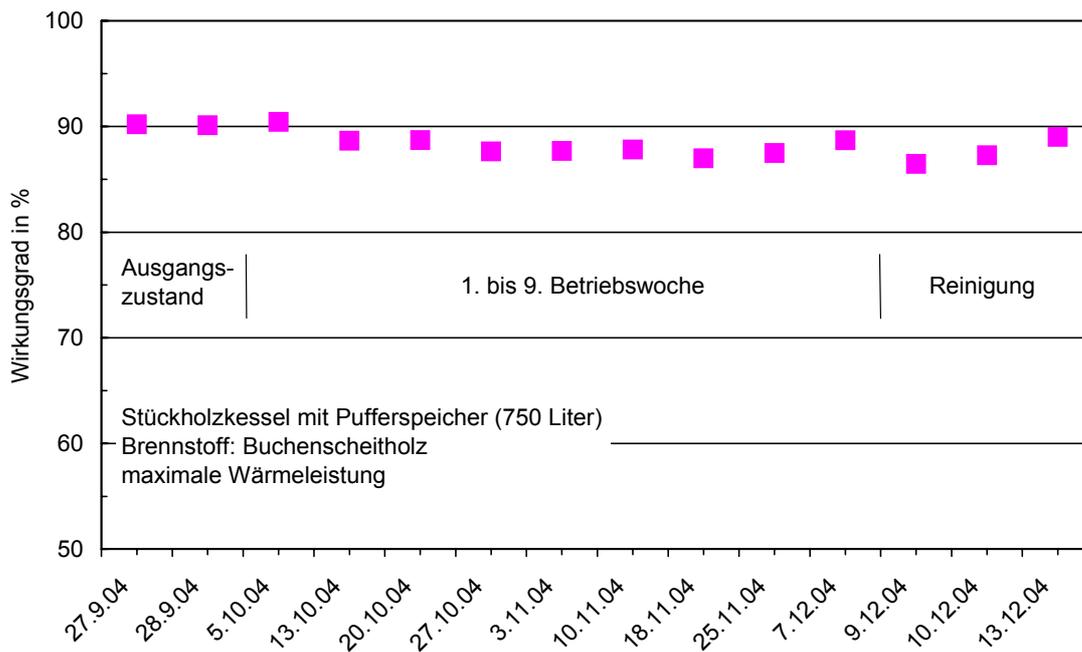
In **Bild 2.4** sind für die einzelnen Versuchstage die gemessenen Abgastemperaturen und  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen (wiederum jeweils als Mittelwerte der beiden Einzelmessungen) aufgeführt. Mit zunehmender Kesselverschmutzung steigt die Abgastemperatur ab der 2. Betriebswoche bis zur 4. Betriebswoche an und bleibt dann in etwa konstant. Weshalb sich in der Messung für die 9. Betriebswoche der relativ niedrige Wert ergeben hat ist unklar, da sowohl die Feuerungswärmeleistung als auch andere Größen nicht auffällig sind. Mit zunehmender Reinigung des Kessels geht die Abgastemperatur wieder auf die Werte des Ausgangszustandes zurück. Auffällig ist, dass eine Abreinigung des Rohrwärmetauschers mit der per Hand zu bedienenden Reinigungseinrichtung (Reinigungsspirale) zu keinem Rückgang der Abgastemperatur führt.

Die für die einzelnen Versuchstage ermittelte  $\text{CO}_2$ -Konzentration im Abgas nimmt in der Tendenz während der gesamten Betriebszeit des Stückholzkessels ab. Eine besonders niedrige Konzentration wurde nach der Reinigung des Heizkessels gemessen. Ursache hierfür war wahrscheinlich eine starke Verschmutzung der Lambda-Sonde, die auch die Umgebungssauerstoffkonzentration nicht mehr richtig gemessen hat (Anzeige auf Kesseldisplay war deutlich unter 21 Vol%  $\text{O}_2$ ). Nach deren Reinigung wurde wieder die korrekte  $\text{O}_2$ -Luftkonzentration angezeigt und in den darauffolgenden Chargenabbränden nahm die  $\text{CO}_2$ -Konzentration im Abgas wieder deutlich zu, wobei die Verhältnisse des Ausgangszustandes nicht mehr erreicht wurden.



**Bild 2.4:** Abgastemperatur und CO<sub>2</sub>-Konzentration im Abgas als Mittelwerte der einzelnen Versuchstage

Entsprechend den Mittelwerten der Abgastemperatur und CO<sub>2</sub>-Konzentration nahm auch der feuerungstechnische Wirkungsgrad des Stückholzkessels ab der 2. bis zur 4. Betriebswoche ab und blieb dann in etwa bis zur 8. Betriebswoche konstant, siehe **Bild 2.5**.

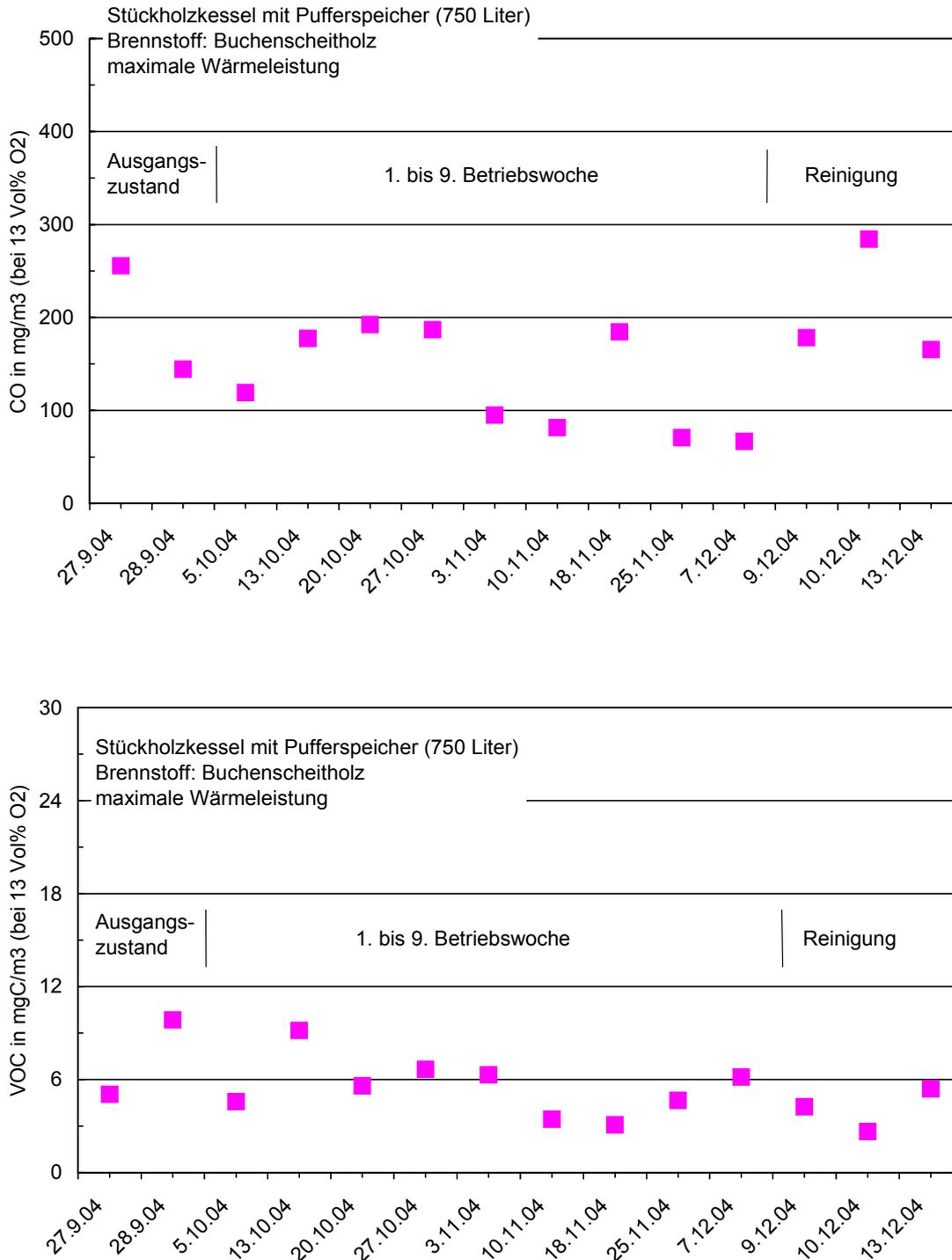


**Bild 2.5:** Berechneter feuerungstechnischer Wirkungsgrad als Mittelwerte der einzelnen Versuchstage

Die Zunahme des Wirkungsgrades in der 9. Betriebswoche erklärt sich durch die auffällig niedrige Abgastemperatur. Durch die Reinigung des Stückholzkessels und der Lambda-Sonde nimmt der feuerungstechnische Wirkungsgrad wieder zu, erreicht aber nicht ganz das Niveau im Ausgangszustand.

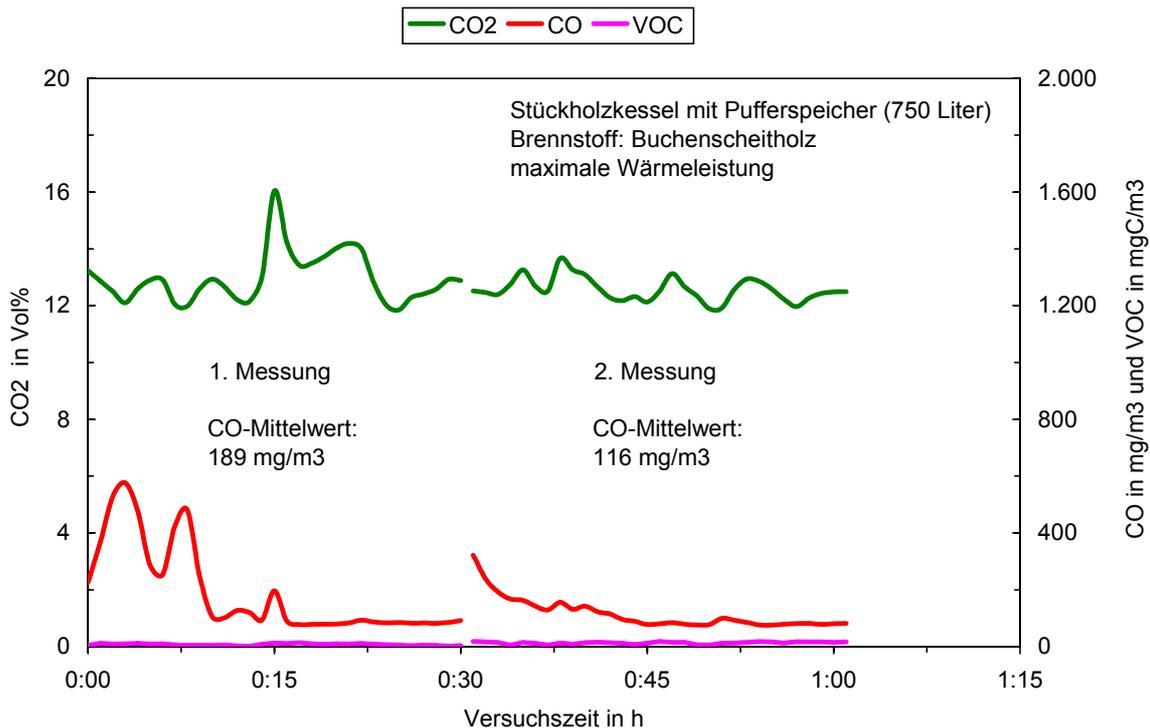
Sowohl die Mittelwerte der CO- als auch der VOC-Konzentrationen für die einzelnen Versuchstage streuen vergleichsweise stark und ohne erkennbares Muster, wie in **Bild 2.6** gezeigt. Hierbei liegen die Mittelwerte der CO-Konzentrationen zwischen 80 und knapp 300 mg/m<sup>3</sup> (bei 13 Vol% O<sub>2</sub>) und der VOC-Konzentrationen zwischen 3 und 10 mgC/m<sup>3</sup> (bei 13 Vol% O<sub>2</sub>). Somit liegen bei dem jeweils gemessenen Betriebszustand des Kessels (weitgehend stationär, heiße Brennkammer, maximale Wärmeleistung) die VOC-Emissionen auf sehr geringem Niveau und sind unabhängig vom Wartungszustand. Dies gilt im Prinzip auch, vielleicht mit Ausnahme der Messungen am 10.12.04 (Kesselreinigung), für die CO-Emissionen, obwohl hier die Streuung der Messwerte deutlich höher liegt.

Die Verschmutzung der Lambda-Sonde und die hieraus sich ergebenden falschen oder zumindest stark verzögerten Messsignale könnte die Ursache für die hohen CO-Konzentrationen bei beiden Abbränden nach der Kesselreinigung sein. Insgesamt lässt sich dies nicht eindeutig nachvollziehen, da die Messwerte der Lambda-Sonde nicht aus der Kesselregelung abgegriffen bzw. ausgelesen werden konnten.



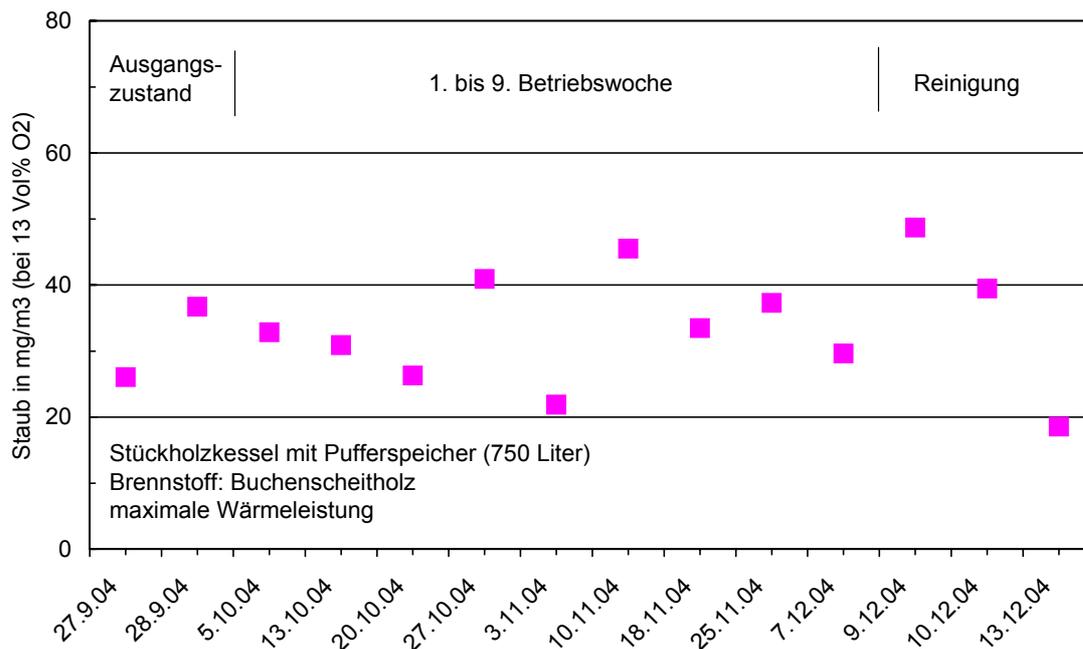
**Bild 2.6:** CO- und VOC-Konzentrationen als Mittelwerte der einzelnen Versuchstage

Die stärkeren Messwertschwankungen der CO-Konzentrationen werden durch Störungen im Verbrennungsablauf verursacht, die zwar zu einem kurzzeitigem Anstieg der CO-Konzentration führen, sich aber auf die VOC-Konzentration nicht oder nicht im selben Maße auswirken. Dies ist am Beispiel der Abbrände für die Messungen der 5. Betriebswoche in **Bild 2.7** dargestellt.



**Bild 2.7:** Verläufe der CO<sub>2</sub>-, CO- und VOC-Konzentrationen bei den beiden Messungen der 5. Betriebswoche

Die ermittelten Staubkonzentrationen (siehe **Bild 2.8**) liegen für die Versuchstage in einem Bereich von 19 bis 49 mg/m<sup>3</sup> (bei 13 Vol% O<sub>2</sub>) und streuen ähnlich stark wie die gemessenen CO-Konzentrationen. Nach der vollständigen Kesselreinigung zu Beginn der Versuche (27.9.2004) wurden mit die geringste Staubkonzentration ermittelt. Am zweiten Betriebstag zur Ermittlung des Ausgangszustandes stieg die Staubkonzentration an und nahm dann in den folgenden 1. bis 3. Betriebswochen kontinuierlich ab. In den Betriebswochen 4 bis 9 traten mit zunehmender Kesselverschmutzung relativ große Schwankungen ohne erkennbare Tendenz auf. Nach Reinigung der Wärmetauscherrohre mit der vorhandenen Reinigungseinrichtung lag die gemessene Staubkonzentration am höchsten, nahm dann mit der Kesselreinigung und Reinigung der Lambda-Sonde wieder ab und lag am letzten Versuchstag sogar etwas unterhalb des Ausgangszustandes vom 27.9.2004.

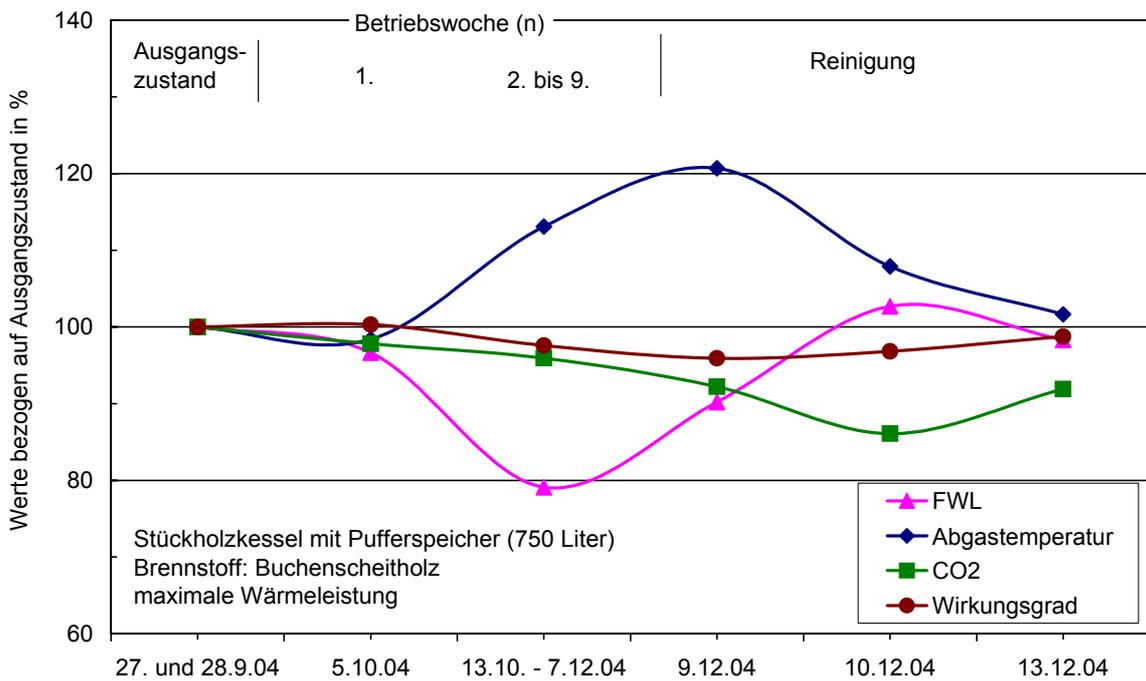
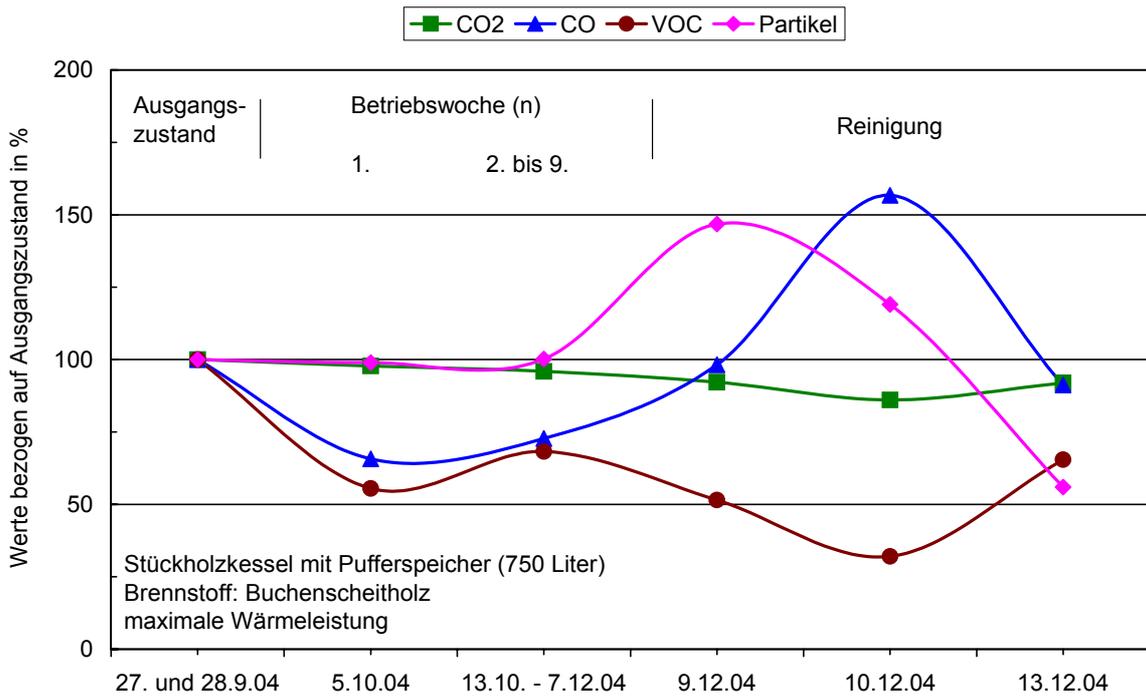


**Bild 2.8:** Staubkonzentrationen als Mittelwerte der einzelnen Versuchstage

Bildet man für die einzelnen Betriebsphasen Ausgangszustand, 1. Betriebswoche, 2. bis 9. Betriebswoche und die drei Reinigungszustände Mittelwerte für die diskutierten Größen und bezieht diese auf den Ausgangszustand, so ergeben sich die in **Bild 2.9** gezeigten Verhältnisse.

Für VOC und CO sind über die Betriebszeit des Stückholzkessels keine eindeutigen Tendenzen vorhanden. Die mittlere Staubkonzentration blieb während der 9 Wochen Betriebszeit konstant, wurde aber durch die anschließend durchgeführten Reinigungen deutlich beeinflusst. Die mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentration nimmt während der Betriebszeit und bis zur Reinigung der Lambda-Sonde kontinuierlich ab, was sich vor allem auf den feuerungstechnischen Wirkungsgrad auswirkt. Dieser verläuft allerdings nicht genau parallel zur CO<sub>2</sub>-Konzentration, sondern wird durch die sich ändernde Abgastemperatur auch noch beeinflusst, die während der 2. bis 9. Betriebswoche aufgrund der zunehmenden Verschmutzung der Wärmetauscherflächen ansteigt und nach der Kesselreinigung wieder abnimmt.

Die Feuerungswärmeleistung nimmt demgegenüber ab und steigt mit den einzelnen Stufen der Anlagenreinigung wieder an. Da Feuerungswärmeleistung, Abgastemperatur und Wirkungsgrad unmittelbar zusammenhängen und sich alle drei Größen während der Betriebszeiten in unterschiedliche Richtung verändert haben, werden die tendenziellen Änderungen nicht besonders deutlich.



**Bild 2.9:** Mittelwerte für den Ausgangszustand, die 1. Betriebswoche, die 2. bis 9. Betriebswoche und die Stufen der Anlagenreinigung bezogen auf die Werte des Ausgangszustandes (FWL: Feuerungswärmeleistung)

### 1.6 Zusammenfassende Bewertung beim Stückholzkessel

Insgesamt war bei diesem modernen Stückholzkessel mit Leistungs- und Verbrennungsregelung das Verbrennungsverhalten während der gesamten Betriebszeit von 9 Wochen überraschend stabil und wurde nur wenig von der zunehmenden Kesselverschmutzung beeinflusst. Für die gemessenen Emissionen von CO, VOC und Partikel ergaben sich während dieser Zeit keine eindeutig ansteigenden Werte. In Abhängigkeit der schrittweise durchgeführten Reinigung der Feuerung (Wärmetauscher – Heizkessel insgesamt – Lambda-Sonde) ergaben sich allerdings Änderungen der CO- und Partikelkonzentrationen. Diese Änderungen waren aber nicht dramatisch und lagen teils sogar im Streubereich der Messergebnisse während des Dauerversuchs, weshalb hier auch eher von Tendenzen ausgegangen werden sollte.

Den größten Einfluss auf das Emissionsverhalten hatte demnach der schleichende Wirkungsgradverlust, der sich aufgrund abnehmender CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Abgas und zunehmender Abgastemperaturen ergibt. Aufgrund des dann ansteigenden Brennstoffverbrauchs nehmen die Emissionen insgesamt zu. Aber auch diese Änderung bleibt in engen Grenzen und liegt im Bereich von maximal rund 2 bis 3 %-Punkten.

## 2 Messungen am Kachelofen-Heizeinsatz - Betreiberverhalten

An einem Kachelofen-Heizeinsatz soll der Einfluss des Betreiberhaltens auf die Emissionen anhand eines standardisierten Heizprogramms untersucht werden. Dieses Heizprogramm deckt den üblichen Leistungsbereich und damit die üblichen Betriebsbedingungen der Einzelfeuerstätte ab. Auf Basis der gemessenen Konzentrationen in den einzelnen Betriebsbereichen und deren anteiligen Gewichtung an der gesamten jährlichen Heizleistung sollen die Jahresemissionen modellhaft berechnet werden. Außerdem soll ein Vergleich mit Emissionen, die sich unter den Randbedingungen der Normprüfung ergeben, durchgeführt werden. Als Brennstoff wird Buchenholz eingesetzt.

Kachelofen-Heizeinsätze sind überwiegend als Durchbrandfeuerungen ausgeführt, wobei weder die Verbrennungsluft noch das Abgas in der Regel mit Gebläsen gefördert wird. Dieser Naturzugbetrieb hat einige Nachteile, wie z.B.:

- Verbrennungsbedingungen hängen von den Zugbedingungen im Schornstein ab
- weniger zuverlässige und reproduzierbare Dosierung von Primär- und Sekundärluft
- in der Feuerung können nur geringe Druckverluste überwunden werden.

Die Beschickung der Heizeinsätze mit Scheithölzern (oder auch Kohlebrennstoffen) erfolgt durch auf der Frontseite angebrachte Fülltüren, die meist mit Sichtscheiben versehen sind. Die Reaktionszonen sind meist mit Schamottmaterial oder ähnlichem ausgekleidet, um die Verbrennungstemperatur zu erhöhen. Ein wesentlicher Teil der Wärmeabgabe findet über den Heizeinsatz direkt statt. Zur weiteren Abkühlung der Heizgase wird dem Heizeinsatz ein zusätzliche Wärmetauscher aus Metall oder aus Schamottesteinen nachgeschaltet. Die Wärmeabgabe des Heizeinsatzes und damit des gesamten Kachelofens kann über die Brennstoffaufgabemenge, die Nachlegeintervalle und über die zugeführte Verbrennungsluftmenge geregelt werden. Vor allem im letzteren Fall kann die Leistungsregelung zu einem drastischen Anstieg der Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung führen.

### 2.1 Vorgehensweise

Der Einfluss des Betreiberhaltens auf die Emissionen eines Kachelofen-Heizeinsatzes soll anhand eines standardisierten Heizprogramms untersucht werden. Hierzu wurden 3 Heizlastkurven festgelegt, die kalte, mittlere und milde Wintertage repräsentieren sollen. Bei der Festlegung der Heizlastkurven wurde von folgenden Annahmen ausgegangen:

- Heizeinsatz wird als Zusatzheizung und damit nur stundenweise betrieben
- alle Verbrennungsvorgänge (auch Anheizen mit feinem Holz) werden erfasst
- die Leistungsregelung erfolgt im wesentlichen über die Holzaufgabemenge
- grobe Fehlbedienungen durch den Betreiber finden nicht statt (z.B. Verbrennungsluft schließen bei vollem Füllraum)
- das Speichervermögen des Kachelofen-Heizsystems wird bei den Nachlegeintervallen und den Holzaufgabemengen beachtet.

Darüber hinaus wurden die Emissionen des Heizeinsatzes auch noch unter normähnlichen Randbedingungen ermittelt. In **Tabelle 3.1** sind die vorgegebenen Holzaufgabemengen für die Heizlastkurven und für die normähnlichen Versuche bei Nennwärmeleistung des Heizgerätes aufgelistet.

**Tabelle 3.1:** Anhaltswerte der Holzaufgabemengen für die 3 Heizlastkurven und bei den normähnlichen Abbrandversuchen beim Kachelofen-Heizeinsatz

Kachelofen-Heizeinsatz Betreiberverhalten		Heizlastkurve für Wintertag			normähnlicher Abbrand
		kalt	mittel	mild	
Heizeinsatztemperatur Versuchsbeginn		kalt	kalt	kalt	heiß
Holzaufgabemengen in kg:	Anfeuern	0,5	0,5	0,5	-
	1. Aufgabe	4,5	4,5	4,5	4,5
	2. Aufgabe	4,5	2,5		(4,5)
	3. Aufgabe	3,5	2,0		
	4. Aufgabe	2,5	1,5		

Bei den Versuchen für die unterschiedlichen Heizlastkurven wurde jeweils bei kaltem Heizgerät mit wenig Anfeuerholz eine Grundglut erzeugt, auf die dann die erste Holzaufgabe erfolgte. Nach dem Abbrand dieser Holzaufgabe wurden dann ggf. weitere Holzaufgaben auf die vorhandene Grundglut vorgenommen.

Die Holzmenge zum Anfeuern ist ausreichend, um eine gute Grundglut für die erste Holzaufgabe zu erzeugen und ein sicheres Zünden zu erreichen. Die erste Holzaufgabemenge wurde jeweils so gewählt, dass bei diesem Chargenabbrand in etwa Nennwärmeleistung erreicht wurde. Dies ist in der Praxis sicher üblich, da der Heizeinsatz und der Kachelofen insgesamt noch kalt sind. Für den Wintertag 'mild' wurde angenommen, dass der geringe Wärmebedarf dann mit der zweiten Holzaufgaben gedeckt werden kann. Bei den anderen Wintertagen erfolgen allerdings noch weitere Holzaufgaben, wobei die Holzaufgabemengen sofort oder während des weiteren Betriebs abnehmen. Hierbei wird davon ausgegangen, dass der Kachelofen als Zusatzheizung und nur stundenweise am Tag (z.B. in den Abendstunden) in Betrieb ist.

Die insgesamt im Jahr erreichten Betriebszeiten bei den einzelnen Belastungen teilen sich auf die einzelnen Heiztage entsprechend der Bandbreite und Häufigkeit der jährlichen Außentemperaturverteilung und des täglichen Außentemperaturverlaufs auf. Die derart festgelegten Wintertage umfassen gewisse Bandbreiten der Außentemperaturen und repräsentieren somit auch die Jahresstunden, in denen diese Temperaturen auftreten. Somit lassen sich die Anteile der so definierten Wintertage an den insgesamt vorhandenen Jahresstunden, an denen die Heizgrenztemperatur unterschritten wird, berechnen. In **Tabelle 3.2** sind für die definierten Wintertage die Außentemperaturbereiche mit Jahresstunden und jährlichen Anteile am Beispiel meteorologischer Daten für Stuttgart aufgelistet.

**Tabelle 3.2:** Außentemperaturbereiche, Jahresstunden und Anteile für die definierten Wintertage aus meteorologischen Daten (meteorologische Daten nach VDI 2067, 1989)

definierter Wintertag	aus meteorologischen Daten		
	Bereich der Außentemperaturen	Jahresstunden für Stuttgart	Anteil an Gesamtjahresstunden in %
<b>kalt</b>	< -13 bis -1	1.336	<b>20</b>
<b>mittel</b>	> -1 bis 8	2.808	<b>41</b>
<b>mild</b>	> 8 bis 15	2.663	<b>39</b>
Summe		6.807	<b>100</b>

## 2.2 Untersuchungsprogramm

Für die Untersuchungen zum Einfluss des Betreiberverhaltens auf die Emissionen und auf den feuerungstechnischen Wirkungsgrad wurde ein Kachelofen-Heizeinsatz mit nachgeschaltetem Guss-Wärmetauscher verwendet. Als Brennstoff wurden Buchenholzscheite eingesetzt. Zum Anfeuern wurde fein gespaltenes Anfeuerholz (Nadelholz) verwendet. Wichtige Angaben zum eingesetzten Kachelofen-Heizeinsatz sind in **Tabelle 3.3** enthalten.

**Tabelle 3.3:** Angaben zum eingesetzten Kachelofen-Heizeinsatz

Hersteller	Buderus
Typ	Kandern WB 25
NWL in kW	8
Baujahr	1998
geeignete Brennstoffe	Scheitholz, Braun- und Steinkohlenbriketts
Beschreibung	einfach aufgebauter Durchbrand-Heizeinsatz mit nachgeschaltetem Guss-Wärmetauscher, 3 Verbrennungsluftschieber und Brennstoffwähler

NWL Nennwärmeleistung

Der verwendete Durchbrand-Heizeinsatz entspricht in seiner Konstruktion einer einfach aufgebauten Durchbrandfeuerung. Im oberen Bereich des Feuerraumes ist ein Deckenstein aus Schamotte angebracht, durch den die Verbrennungsgase beim Austritt aus dem Feuerraum umgelenkt werden. Das Gerät besitzt 3 unabhängig voneinander einzustellende Verbrennungsluftschieber und einen Brennstoffwähler. Die Primärluft wird über zwei Schieber in der Aschentür unter und oberhalb des Rostes zugeführt. Im oberen Teil des Feuerraumes wird in die Verbrennungsgase noch Sekundärluft zugeführt, die unterhalb der Sichtscheibe in den Feuerraum eintritt. Der Heizeinsatz ist sowohl für die Verbrennung von Holz- als auch Kohlenbrennstoffe geeignet. Bei Holzbrennstoffen findet der Abbrand auf einem Schamotteboden statt, wobei Verbrennungsluft durch einen Schlitz zwischen den Steinen einströmt. Der Brennstoffwähler und die Verbrennungsluftschieber wurden für die Abbrandversuche entweder nach oder in Anlehnung an die Herstellerangaben eingestellt.

Beim Einschichten des Holzes wurde von einem üblichen Betreiber ausgegangen, der die Anlage nicht mit übertriebener Sorgfalt sondern routinemäßig bedient und nur Dinge beachtet, die direkt die problemlose Nutzung betreffen.

Beim verfeuerten Buchenholz wurde nur der Wassergehalt ermittelt, der bei 14,8 % lag. Für Berechnungen, z.B. des Heizwertes, wurde eine mittlere Zusammensetzung des Buchenholzes aus Pfeiffer und Struschka et al. (2000) verwendet.

### 2.3 Versuchsaufbau und Messtechnik

Der Kachelofen-Heizeinsatz wurde über einen Guss-Wärmetauscher an einen etwa 5 m hohen gemauerten Schornstein, in dem sich ein natürlicher Schornsteinzug einstellt, im Technikum des Instituts angeschlossen. Im Abgas wurden die Konzentrationen an CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO und VOC sowie die Abgastemperatur kontinuierlich gemessen. Mit der ebenfalls gemessenen Abgasgeschwindigkeit erfolgte eine Gewichtung der zeitgleich gemessenen Emissionskonzentrationen, damit aussagefähige Mittelwerte für die Heizlastkurven berechnet werden können. In **Tabelle 3.4** sind die verwendeten Messgeräte und die Prüfgaskonzentrationen aufgelistet.

**Tabelle 3.4:** Angaben zur verwendeten Messtechnik

Messgröße (Messprinzip) Messgerätetyp, Hersteller	Messbereich	Prüfgaskonzentration <sup>2</sup> Filtersubstrate	Größe
CO <sub>2</sub> (nicht dispersive Infrarotabsorption)	0-20 Vol%	11,8 Vol% CO <sub>2</sub> in N <sub>2</sub>	Vol%
CO (nicht dispersive Infrarotabsorption): BINOS-Reihe. Fisher-Rosemount	0-3 Vol%	0,77 Vol% CO in N <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup>
O <sub>2</sub> (Paramagnetische Eigenschaften): Oxy- nos-Reihe. Fisher-Rosemount	0-25 Vol%	8,0 Vol% O <sub>2</sub> in N <sub>2</sub>	Vol %
VOC (Flammenionisation) <sup>1</sup> : FID RS 55. Ratfish	0-1.000 ppm v/v	83 ppm v/v Propan in N <sub>2</sub>	mgC/m <sup>3</sup>
Temperaturen (Thermoelektrizität): Ni-CrNi- Thermoelemente	0-490 °C	-	°C
Abgasgeschwindigkeit (Flügelradanemometer): Flügelrad-Strömungssensor Fa. Höntzsch	0,4 – 20 m/s	-	m/s

<sup>1</sup> bei den VOC-Messungen wurde eine beheizte Probenahmeleitung verwendet. Diese Leitung und der FID waren auf ca. 160 °C beheizt. Im FID ist ein Feinfilter vorhanden. Gemessen wurde die Summe der flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) im feuchten Abgas, es wird die Kohlenstoffmasse angegeben

<sup>2</sup> die Überprüfung der Nullpunkte der Gasanalysatoren erfolgte mit Stickstoff 5.0

## 2.4 Versuchsauswertung

Zur Auswertung der Versuchsergebnisse wurden alle registrierten 1-Minuten-Mittelwerte ab Messbeginn (CO<sub>2</sub>-Konzentration beim Abbrand des Anfeuerholzes erreicht erstmals etwa 1,5 - 2 Vol%) bis zum Messende (CO<sub>2</sub>-Konzentration beim Abbrand der letzten Holzcharge erreicht wiederum etwa 1,5 - 2 Vol%) verwendet. Bei den Abbränden unter normähnlichen Bedingungen erfolgte die Versuchsauswertung mit allen 1-Minuten-Mittelwerten von etwa 2 bis wieder 2 Vol% CO<sub>2</sub> im Abgas. Der feuerungstechnische Wirkungsgrad wurde in guter Näherung nach der indirekten Methode ermittelte (DIN EN 303-5 und DIN EN 304). Hierzu wurden aus Abgasdaten die Verluste durch freie Wärme der Abgase und durch unvollständiger Verbrennung berechnet, Verluste durch unvollständig verbrannten Brennstoff blieben unberücksichtigt.

Die Umrechnung der gemessenen CO-, VOC-Konzentrationen auf einen einheitlichen Bezugssauerstoffgehalt von 13 Vol% erfolgte nach Gleichung 2.1.

## 2.5 Ergebnisse beim Kachelofen-Heizeinsatz - Betreiberverhalten

In der folgenden **Tabelle 3.5** sind die Messergebnisse der Prüfstandsmessungen zum Betreiberverhalten für den Kachelofen-Heizeinsatz aufgelistet.

**Tabelle 3.5:** Ergebnisse für den Kachelofen-Heizeinsatz – Betreiberverhalten als Mittelwerte der einzelnen Heizlastkurven und für normähnliche Bedingungen (Bezugssauerstoffgehalt: 13 Vol%)

Kachelofen-Heizeinsatz / Verbraucherverhalten		normähnliche Bedingungen <sup>1)</sup>	Heizlastkurve für Wintertag			Mittelwert für Heizperiode
			kalt	mittel	mild	
<b>Dauer und Brennstoff</b>	Versuchsdauer in min	93	395	422	206	
	Holzaufgabemenge in kg	4,9	21,8	14,0	7,1	12,8
	Wassergehalt in %	14,8	14,8	14,8	14,8	
<b>Abgas</b>	CO <sub>2</sub> in Vol%	6,2	6,0	5,1	5,6	
	CO in mg/m <sup>3</sup> (bezogen)	3.174	3.192	5.763	5.909	5.316
	VOC in mgC/m <sup>3</sup> (bezogen)	149	135	216	318	240
	Abgastemperatur in °C	229	225	170	175	
<b>Verluste</b>	thermische in %	24,9	25,4	21,3	19,9	
	chemische in %	2,1	2,2	3,9	4,0	
	Summe Verluste in %	27,0	27,6	25,2	23,9	
<b>Wärme- leistung</b>	feuerungst. Wirkungsgrad in %	73,0	72,4	74,8	76,1	74,8
	FWL in kW	13,2	13,7	8,2	8,6	
	WL (FWL*Wirkungsgrad) in kW	9,6	9,9	6,2	6,5	
	auf NWL bezogene WL in %	107	110	68	72	78

<sup>1)</sup> Mittelwert aus zwei Abbränden. Die normähnliche Bedingungen und die Berechnung der auf NWL bezogenen WL wurden so gewählt, als ob die NWL bei 9 kW liegen würde, da der Heizeinsatz beim Betrieb mit 8 kW ein ungünstiges Verbrennungsverhalten aufweist.

FWL Feuerungswärmeleistung WL Wärmeleistung NWL Nennwärmeleistung

Die Abbranddauer von rund 400 Minuten bei den Heizlastkurven 'kalt' und 'mittel' wird von Betreibern erreicht, die das Heizgerät intensiv als Zusatzheizung, z.B. vom späten Nachmittag an, nutzen. Für Kachelöfen ist diese (tägliche) Betriebszeit durchaus realistisch, da eine

längere Aufheizzeit des Heizsystems, im Vergleich z.B. zu Kaminöfen, aufgrund der relativ großen Massen von Heizeinsatz, Wärmetauscher und Kachelmantel vorliegt. Die mittlere Wärmeleistung bei der Heizlastkurve 'kalt' liegt im Bereich der Nennwärmeleistung und bei der Heizlastkurve 'mittel' bei knapp 70 % der Nennwärmeleistung.

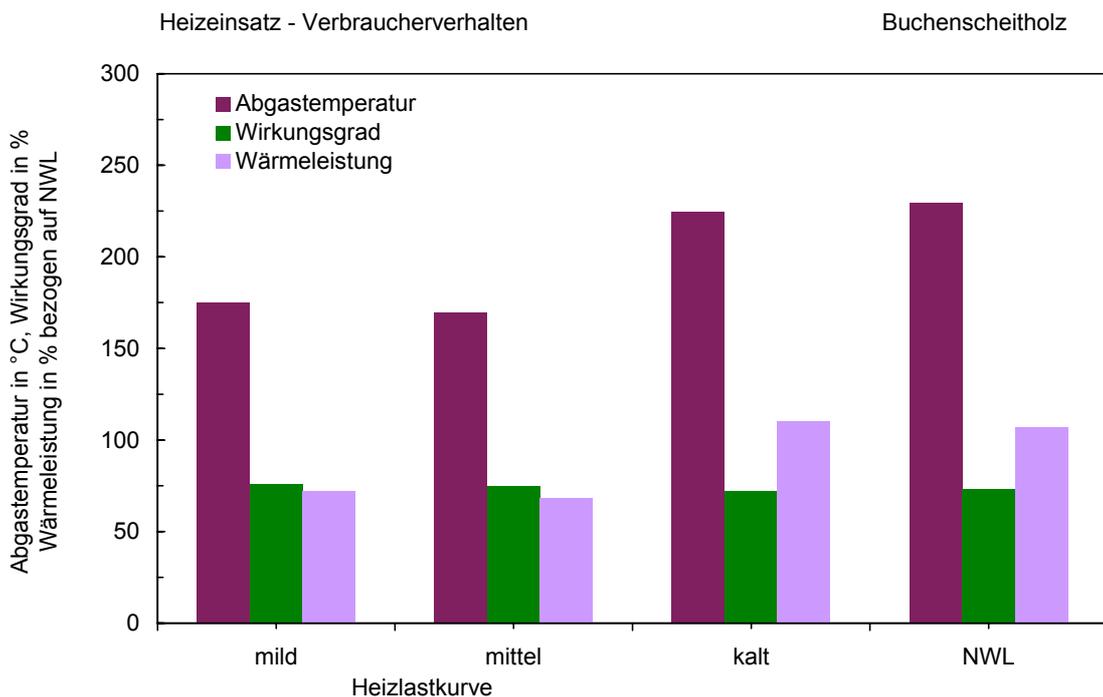
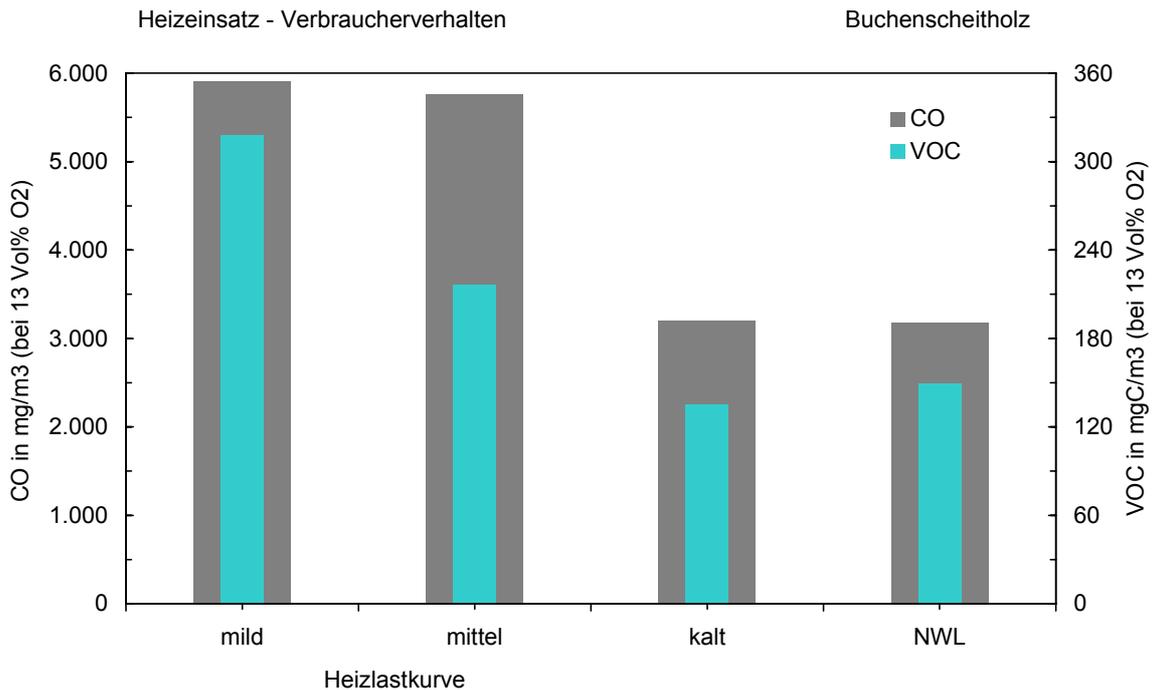
Die relativ hohe Wärmeleistung für den Wintertag 'mild' rührt daher, dass, neben dem Anfeue-  
ervorgang, nur ein Abbrand durchgeführt wurde, bei dem die Holzaufgabemenge und die  
Schieberstellung während der Hauptverbrennungsphase den Vorgaben zum Erreichen der  
Nennwärmeleistung entsprachen. Bei dieser Heizlastkurve wurde dann angenommen, dass  
der geringe Wärmebedarf für die restliche Nutzungszeit der Zusatzheizung durch die Abküh-  
lung des aufgewärmten Heizsystems gedeckt werden kann.

Bei allen letzten Abbränden für die unterschiedlichen Heizlastkurven wurden die Luftschieber  
während des Holzkohleabbrandes nahezu geschlossen. Hierdurch verlängern sich die Ab-  
brandzeiten deutlich, was sich vor allem bei Wintertag 'mild' bemerkbar macht. Entsprechend  
nimmt auch die Wärmeleistung, die als Mittelwert für die ganze Betriebszeit des Heizeinsatz-  
es berechnet wurde, ab.

Durch die abnehmenden Abgastemperaturen bei geringeren Wärmeleistungen als der  
Nennwärmeleistung nimmt der feuerungstechnische Wirkungsgrad des Heizeinsatzes zu.  
Demgegenüber steigen die CO- und VOC-Emissionen im Teillastbereich des Heizeinsatzes  
deutlich an.

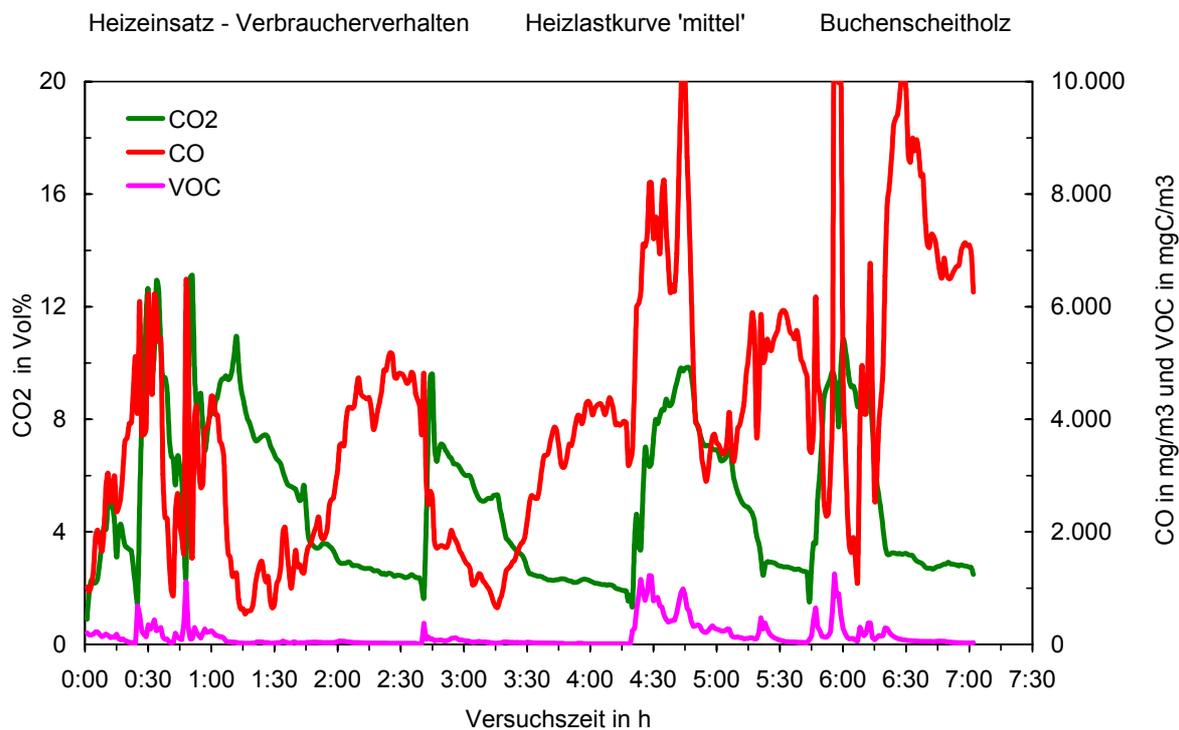
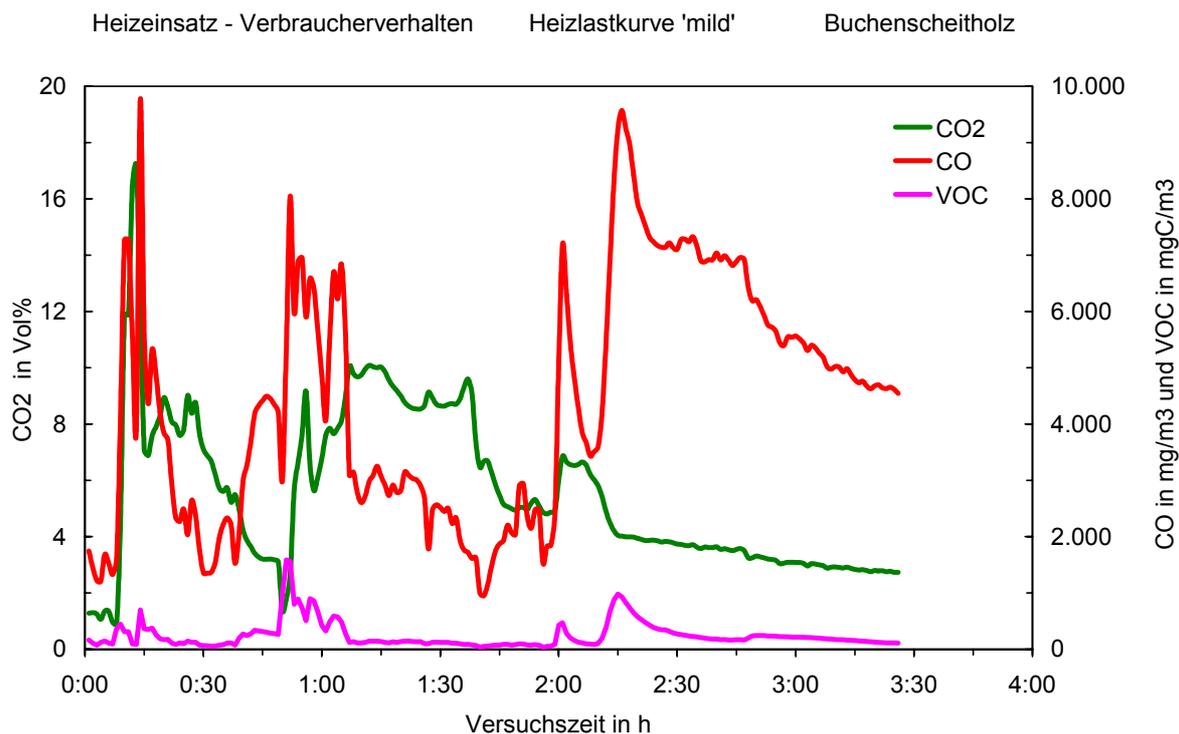
Mittelwerte für die gesamte Heizperiode wurde aus den einzelnen Mittelwerten der drei Heiz-  
lastkurven durch Gewichtung mit den jeweiligen Anteilen an den Gesamtjahresstunden nach  
Tabelle 3.2 berechnet. Auf diese Weise ergibt sich als mittlere CO-Konzentration einer Heiz-  
periode ein Wert von 5.316 mg/m<sup>3</sup> (bei 13 Vol% O<sub>2</sub>). Dies stellt ein Anstieg gegenüber den  
Messungen unter normähnlichen Bedingungen, hier liegt die CO-Konzentration bei 3.174  
mg/m<sup>3</sup> (bei 13 Vol% O<sub>2</sub>), um den Faktor 1,7 dar. Die VOC-Konzentration nimmt von 149 auf  
240 mgC/m<sup>3</sup> (bei 13 Vol% O<sub>2</sub>) oder um den Faktor 1,6 zu. Diese Zunahmen sind als Min-  
destwerte zu betrachten, die sich aufgrund der praxisüblichen Nutzung der Heizgeräte erge-  
ben. Liegen grobe Bedienungsfehler vor, z.B. völlig falsche Einstellung der Verbrennungs-  
luftschieber oder Verwendung von ungeeignetem Brennstoff, so ist mit einem deutlich stärkeren  
Anstieg der CO- und VOC-Emissionen zu rechnen.

In **Bild 3.1** sind die mittleren Werte für CO, VOC, Abgastemperatur, Wirkungsgrad und  
Wärmeleistung bei den unterschiedlichen Heizlastkurven im Vergleich zu den Ergebnissen  
unter normähnlichen Bedingungen dargestellt.

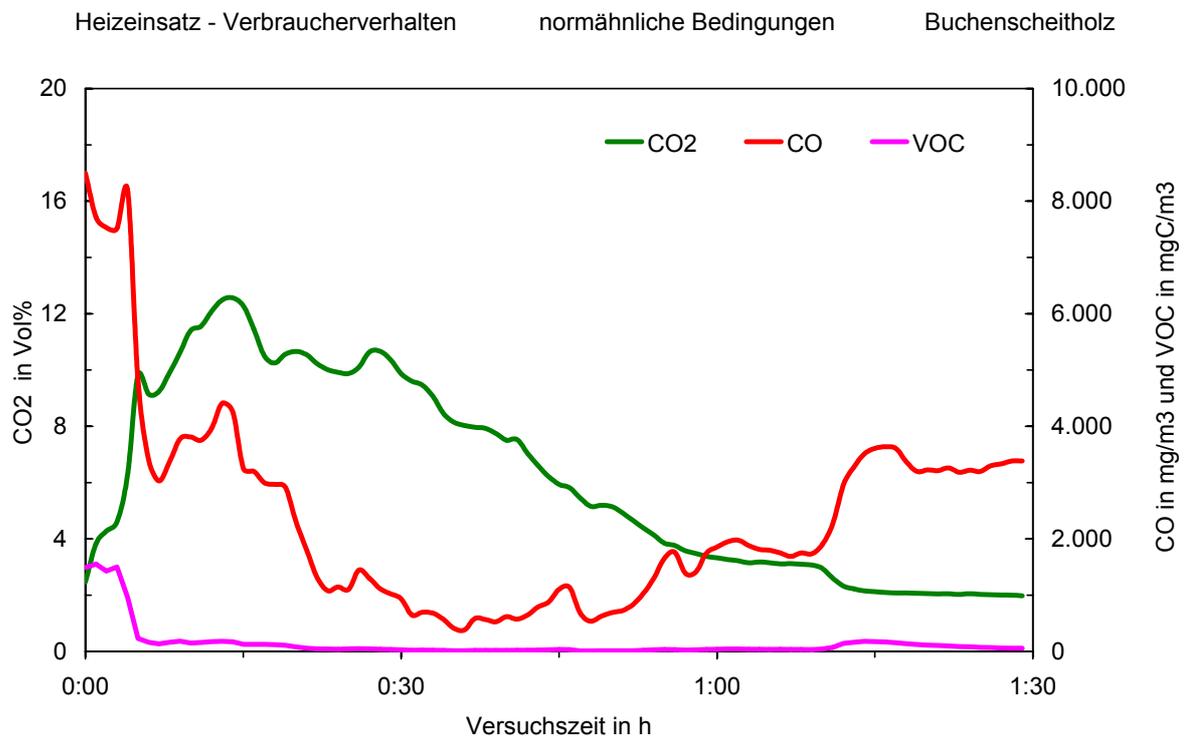
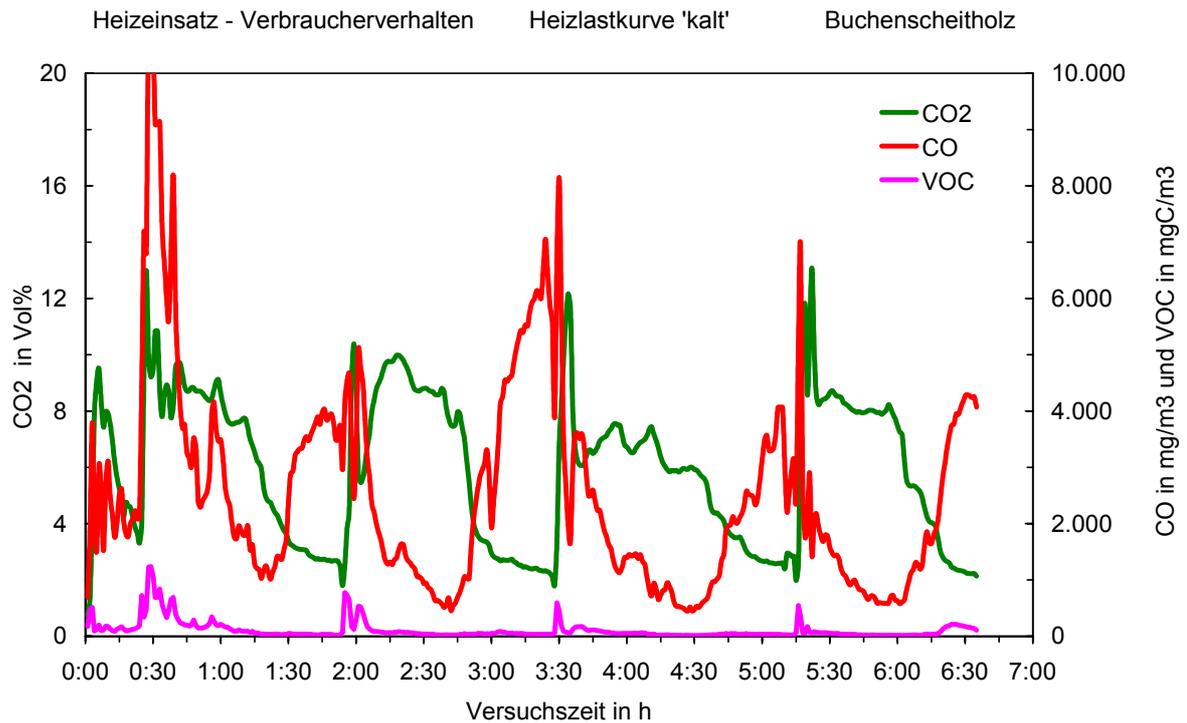


**Bild 3.1:** CO- und VOC-Konzentration sowie Abgastemperatur, Wirkungsgrad und Wärmeleistung als Mittelwerte der einzelnen Heizlastkurven und der Messungen unter normähnlichen Bedingungen (NWL: Nennwärmeleistung)

In den **Bildern 3.2 und 3.3** sind die Verläufe der gemessenen CO<sub>2</sub>-, CO- und VOC-Konzentrationen für die Heizlastkurven 'mild', 'mittel' und 'kalt' sowie bei den normähnlichen Abbränden dargestellt.



**Bild 3.2:** Verläufe der CO<sub>2</sub>-, CO- und VOC-Konzentration im Abgas für die Heizlastkurven 'mild' und 'mittel'



**Bild 3.3:** Verläufe der CO<sub>2</sub>-, CO- und VOC-Konzentration im Abgas für die Heizlastkurve 'kalt' und für einen Abbrand unter normähnlichen Bedingungen

### 2.6 Zusammenfassende Bewertung beim Heizeinsatz - Betreiberverhalten

Die CO- und VOC-Emissionen beim Heizeinsatz werden vom Betreiberverhalten deutlich beeinflusst. So nehmen beide Emissionskomponenten bei der praxisüblichen Nutzung des Heizgerätes, im Vergleich zu Abbränden unter normähnlichen Bedingungen, in etwa um den Faktor 1,6 zu. Bei dieser praxisüblichen Nutzung wurden die Emissionen des Heizeinsatzes für verschiedene Heizlastkurven, die den Wärmebedarf von kalten, mittleren und milden Wintertagen repräsentieren, ermittelt und mit den Jahresanteilen der Heizlastkurven gewichtet.

Bei den Abbrandversuchen wurde von einem Betreiber ausgegangen, der sich bei den Holzaufgabemengen und Schieberstellungen für die Verbrennungsluft an der Bedienungsanleitung bzw. am aktuellen Wärmebedarf orientiert. Grobe Bedienungsfehler, z.B. völlig falsche Einstellungen der Verbrennungsluftschieber oder Verwendung von ungeeignetem oder zu viel Brennstoff, wurden hierbei nicht unterstellt. Hierbei ist mit einem weitaus drastischeren Anstieg der CO- und VOC-Emissionen zu rechnen.

### 3 Messungen am Kachelofen-Heizeinsatz mit Katalysator

Am selben Kachelofen-Heizeinsatz der für die Messungen zum Betreiberverhalten eingesetzt wurde, soll die Wirksamkeit eines einfachen Abgaskatalysators untersucht werden. Hierzu wurde der Oxidationskatalysator direkt nach dem Stutzen des Heizeinsatzes in das Verbindungsstück zum nachgeschalteten Guss-Wärmetauscher eingebaut. Anhand unterschiedlicher Wärmeleistungen soll die katalytisch bewirkte CO- und VOC-Minderung ermittelt werden. Als Brennstoffe werden Buchenholz und Braunkohlenbriketts eingesetzt.

Ergänzend hierzu wurden von der UMEG (Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit Baden-Württemberg, Karlsruhe) weitere Messungen am Katalysator durchgeführt. Hierbei wurden neben den Staubemissionen u.a. auch die Konzentrationen von anorganischen Chlorverbindungen, aliphatischen Aldehyden, organischen Einzelkomponenten und polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe bestimmt. Die Vorgehensweise und die Versuchsergebnisse im einzelnen sind in einem Messbericht der UMEG ausführlich beschreiben (UMEG, 2005). Die zusammengefassten Ergebnisse und die Bewertung im Zusammenhang mit den eigenen Messungen sind in diesem Kapitel enthalten.

#### 3.1 Vorgehensweise

Die Wirksamkeit des Katalysator auf die CO- und VOC- Emissionen des Kachelofen-Heizeinsatzes wurde bei unterschiedlichen Wärmeleistungen in 4 Versuchsreihen untersucht. Diese wurden durch unterschiedliche Brennstoffaufgabemengen und Nachlegeintervalle eingestellt. Vor Versuchsbeginn wurde der Heizeinsatz mit einer Brennstoffcharge aufgeheizt. Die Brennstoffaufgabe erfolgte in den Versuchsreihen dann jeweils auf eine vorhandene Grundglut. In **Tabelle 4.1** sind die Brennstoffaufgabemengen für die durchgeführten 4 Versuchsreihen aufgelistet.

**Tabelle 4.1:** Brennstoffaufgabemengen für die Versuchsreihen beim Kachelofen-Heizeinsatz mit Katalysator

Kachelofen-Heizeinsatz mit Katalysator		Versuchsreihe 1	Versuchsreihe 2	Versuchsreihe 3	Versuchsreihe 4
Heizeinsatztemperatur bei Versuchsbeginn		heiß	heiß	heiß	heiß
Buchscheitholz in kg:	1. Abbrand	5,1	3,4	2,0	-
	2. Abbrand	4,6	3,9	2,0	-
Braunkohlenbriketts in kg	1. Aufgabe				7,0

### 3.2 Untersuchungsprogramm

Für die Untersuchungen zur CO- und VOC-Minderung mit Hilfe eines Abgaskatalysators wurde ein Kachelofen-Heizeinsatz mit nachgeschaltetem Guss-Wärmetauscher verwendet. Als Brennstoff wurden Buchenholzscheite und Braunkohlenbriketts eingesetzt. Wichtige Angaben zum eingesetzten Kachelofen-Heizeinsatz und zum Katalysator sind in **Tabelle 4.2** enthalten.

Der verwendete Durchbrand-Heizeinsatz entspricht in seiner Konstruktion einer einfach aufgebauten Durchbrandfeuerung. Im oberen Bereich des Feuerraumes ist ein Deckenstein aus Schamotte angebracht, durch den die Verbrennungsgase beim Austritt aus dem Feuerraum umgelenkt werden.

**Tabelle 4.2:** Angaben zum eingesetzten Kachelofen-Heizeinsatz und zum Katalysator

<b>Kachelofen-Heizeinsatz</b>	Hersteller	Buderus
	Typ	Kandern WB 25
	NWL in kW	8
	Baujahr	1998
	geeignete Brennstoffe	Scheitholz, Braun- und Steinkohlenbriketts
	Beschreibung	einfach aufgebauter Durchbrand-Heizeinsatz mit nachgeschaltetem Guss-Wärmetauscher, drei Verbrennungsluftschieber und ein Brennstoffwähler
<b>Katalysator</b>	Hersteller	moreCat® GmbH Metall Katalysatoren, Kamp-Lintfort
	Durchmesser / Höhe	180 mm / ca. 60 mm
	Gewicht der Füllung	ca. 950 g
	Beschreibung	Schüttung aus gereinigten Edelmetallspänen, auf denen katalytisch aktive Substanzen aufgebracht sind, in einem runden Gehäuse mit Metallgitter auf Ober- und Unterseite

NWL            Nennwärmeleistung

Das Gerät besitzt 3 unabhängig voneinander einzustellende Verbrennungsluftschieber und einen Brennstoffwähler. Die Primärluft wird über zwei Schieber in der Aschentür unter und oberhalb des Rostes zugeführt. Im oberen Teil des Feuerraumes wird in die Verbrennungsgase noch Sekundärluft zugeführt, die unterhalb der Sichtscheibe in den Feuerraum eintritt. Der Heizeinsatz ist sowohl für die Verbrennung von Holz- als auch für Kohlenbrennstoffe geeignet. Der Brennstoffwähler und die Verbrennungsluftschieber wurden für die Abbrandversuche entweder nach oder in Anlehnung an die Herstellerangaben eingestellt.

Beim Einschichten des Brennstoffes wurde von einem üblichen Betreiber ausgegangen, der die Anlage nicht mit übertriebener Sorgfalt sondern routinemäßig bedient und nur Dinge beachtet, die direkt die problemlose Nutzung betreffen.

Der Abgaskatalysator wurde unmittelbar am Heizgeräteausgang senkrecht in ein gerades Abgasrohr eingebaut. Hierzu wurde das übliche Verbindungsstück zwischen Heizeinsatz und Guss-Wärmetauscher beidseitig um dieses gerade Abgasrohr verlängert. Der Katalysator

lässt sich zum Anheizen, bei zu geringem Schornsteinzug, senkrecht stellen und wird dann nicht von Heizgasen durchströmt. Ist der Heizeinsatz aufgewärmt bzw. wird ein ausreichender Schornsteinzug erreicht, damit auch der Druckabfall des Katalysators überwunden werden kann, wird dieser waagrecht gestellt und somit von Heizgasen durchströmt. Bei den Versuchen stellte sich allerdings heraus, dass aufgrund der Wärmeausdehnung des Katalysatorgehäuses das Aus- bzw. Einschwenken im laufenden Betrieb nicht mehr möglich war, da sich dieses im Abgasrohr verklemmte.

Beim verfeuerten Buchenholz wurde nur der Wassergehalt ermittelt, der bei 14,8 % lag. Für Berechnungen, z.B. des Heizwertes, wurde eine mittlere Zusammensetzung des Buchenholzes aus Pfeiffer und Struschka et al. (2000) verwendet. Heizwert und Wassergehalt der 7" Braunkohlenbriketts aus dem Rheinischen Revier wurden aus Herstellerangaben entnommen.

### 3.3 Versuchsaufbau und Messtechnik

Der Kachelofen-Heizeinsatz wurde über einen Guss-Wärmetauscher an einen etwa 5 m hohen gemauerten Schornstein, in dem sich ein natürlicher Schornsteinzug einstellt, im Technikum des Instituts angeschlossen. Im Abgas vor und nach Katalysator wurden zeitgleich die Konzentrationen an CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO und VOC sowie die Abgastemperatur kontinuierlich gemessen. Zu Einstell- und Kontrollzwecken wurde nach dem Katalysator der Unterdruck im Abgasrohr kontinuierlich bestimmt. In **Tabelle 4.3** sind die verwendeten Messgeräte und die Prüfgaskonzentrationen aufgelistet.

**Tabelle 4.3:** Angaben zur verwendeten Messtechnik

Messgröße (Messprinzip) Messgerätetyp, Hersteller	Messbereich	Prüfgaskonzentration <sup>2</sup> Filtersubstrate	Größe
CO <sub>2</sub> (nicht dispersive Infrarotabsorption)	0-20 Vol%	11,8 Vol% CO <sub>2</sub> in N <sub>2</sub>	Vol%
CO (nicht dispersive Infrarotabsorption): BINOS-Reihe. Fisher-Rosemount	0-3 Vol%	0,77 Vol% CO in N <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup>
O <sub>2</sub> (Paramagnetische Eigenschaften): Oxy- nos-Reihe. Fisher-Rosemount	0-25 Vol%	8,0 Vol% O <sub>2</sub> in N <sub>2</sub>	Vol %
VOC (Flammenionisation) nach Katalysator <sup>1</sup> : FID RS 55. Rattfisch	0-1.000 ppm v/v	83 ppm v/v Propan in N <sub>2</sub>	mgC/m <sup>3</sup>
VOC (Flammenionisation) vor Katalysator <sup>1</sup> : FID 123. Testa	0-1.000 ppm v/v	83 ppm v/v Propan in N <sub>2</sub>	mgC/m <sup>3</sup>
Temperaturen (Thermoelektrizität): Ni-CrNi- Thermoelemente	0-490 °C	-	°C
Unterdruck im Abgasrohr (piezoelektrische Sensoren): PTLN-K250, Airflow Lufttechnik	0-250 Pa	-	Pa

<sup>1</sup> bei den VOC-Messungen wurde eine beheizte Probenahmeleitung verwendet. Diese Leitung und der FID waren auf ca. 160 °C beheizt. Im FID ist ein Feinfilter vorhanden. Gemessen wurde die Summe der flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) im feuchten Abgas, es wird die Kohlenstoffmasse angegeben

<sup>2</sup> die Überprüfung der Nullpunkte der Gasanalytoren erfolgte mit Stickstoff 5.0

Die Messstelle vor Katalysator befand sich unmittelbar nach dem Abgasausgang (Stutzen) des Heizgerätes im Verbindungsrohr zum Guss-Wärmetauscher. Hier wird, bedingt durch die einfache Konstruktion des Heizeinsatzes, nicht immer eine homogene Gas- und Temperaturverteilung über den Querschnitt des Verbindungsrohres vorliegen. Die Messstelle nach Katalysator befand sich am Ausgang des Guss-Wärmetauschers, hier liegen wesentlich homogenere Mischungsverhältnisse vor.

### 3.4 Versuchsauswertung

Zur Auswertung der Versuchsergebnisse wurden alle registrierten 1-Minuten-Mittelwerte ab Messbeginn (CO<sub>2</sub>-Konzentration ~ 1,5 - 2 Vol%) bis zum Messende (CO<sub>2</sub>-Konzentration wiederum ~ 1,5 - 2 Vol%) verwendet. Der feuerungstechnische Wirkungsgrad wurde in guter Näherung nach der indirekten Methode ermittelt (DIN EN 303-5 und DIN EN 304). Die Umrechnung der gemessenen CO-, VOC-Konzentrationen auf einen einheitlichen Bezugssauerstoffgehalt von 13 Vol% erfolgte nach Gleichung 2.1.

### 3.5 Ergebnisse beim Kachelofen-Heizeinsatz mit Katalysator

In der folgenden **Tabelle 4.4** sind die Messergebnisse der Prüfstandsmessungen für den Kachelofen-Heizeinsatz mit Katalysator aufgelistet.

**Tabelle 4.4:** Ergebnisse als Mittelwerte der einzelnen Versuchsreihen für den Kachelofen-Heizeinsatz mit Katalysator (Bezugssauerstoffgehalt: 13 Vol%)

Kachelofen-Heizeinsatz mit Katalysator		Versuchsreihe <sup>1)</sup>				alle Versuche
		1	2	3	4	
<b>Gas vor Katalysator</b>	CO <sub>2</sub> _vK in Vol%	7,1	6,9	6,5	6,8	6,9
	CO_vK in mg/m <sup>3</sup> (bezogen)	3.037	2.869	3.455	5.901	4.200
	VOC_vK in mgC/m <sup>3</sup> (bezogen)	63	199	183	409	255
	Gastemperatur in °C	428	417	406	409	415
<b>Abgas nach Katalysator</b>	CO <sub>2</sub> _nK in Vol%	5,8	5,6	5,4	6,2	5,9
	CO_nK in mg/m <sup>3</sup> (bezogen)	1.819	2.254	2.709	4.841	3.427
	VOC_nK in mgC/m <sup>3</sup> (bezogen)	25	95	79	209	130
	Abgastemperatur in °C	213	204	200	167	190
<b>Wärmeleistung</b>	feuerungst. Wirkungsgrad in %	74,5	75,0	74,7	81,1	78,7
	FWL in kW	12,2	14,6	10,3	7,2	10,3
	WL (FWL*Wirkungsgrad) in kW	9,1	11,0	7,7	5,9	8,1
	auf NWL bezogene WL in %	101	122	86	65	90
<b>Minderung</b>	<b>CO in %</b>	<b>40</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>18</b>	<b>18</b>
	<b>VOC in %</b>	<b>60</b>	<b>52</b>	<b>57</b>	<b>49</b>	<b>49</b>

<sup>1)</sup> Mittelwert aus zwei Abbränden für die Versuchsreihen 1 bis 3. Die Berechnung der auf NWL bezogenen WL wurden so gewählt, als ob die NWL bei 9 kW liegen würde, da der Heizeinsatz beim Betrieb mit 8 kW ein ungünstiges Verbrennungsverhalten aufweist.

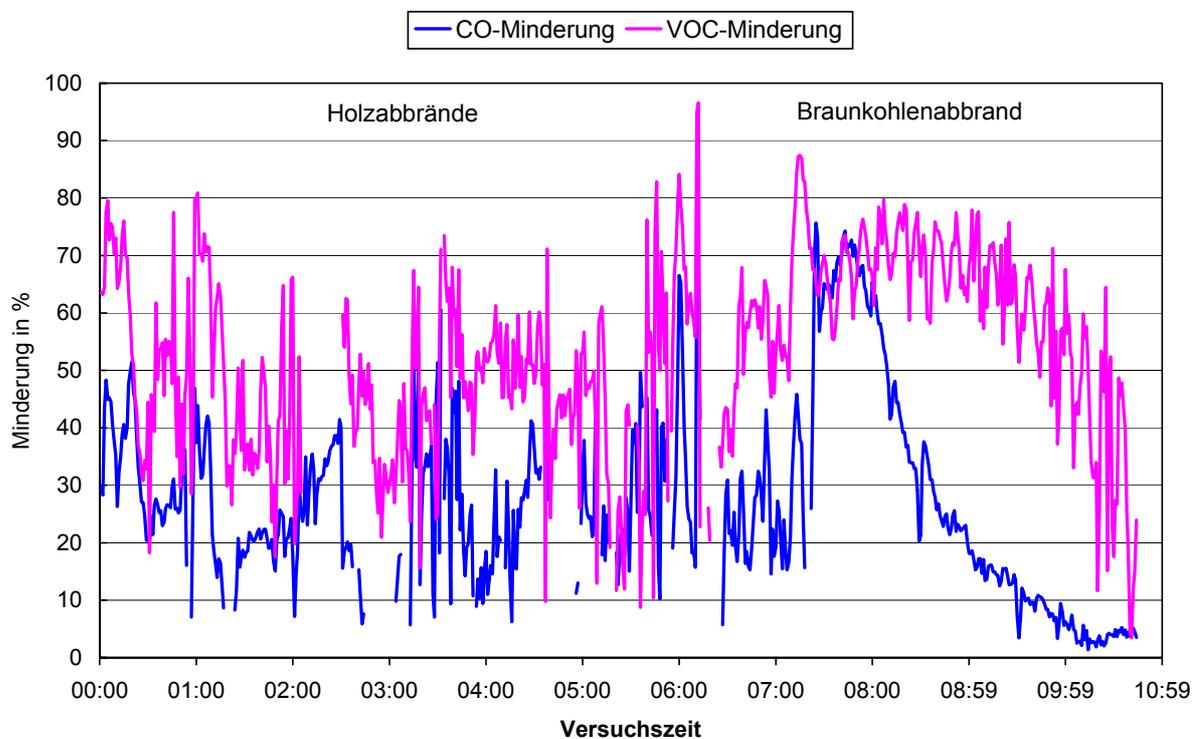
FWL Feuerungswärmeleistung WL Wärmeleistung NWL Nennwärmeleistung

Vor Katalysator werden durchweg höhere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, und damit niedrigere O<sub>2</sub>-Konzentrationen gemessen als nach Katalysator. Ursache hierfür sind geringe Undichtigkei-

ten im Verbindungsrohr und im nachgeschalteten Guss-Wärmetauscher, durch die eine gewisse Menge Verdünnungsluft in das Heizgas einströmt.

Die bezogenen CO- und VOC-Konzentrationen vor Katalysator liegen im Mittel über den Konzentrationen im Abgas. Für CO ergeben sich Minderungen zwischen 19 und 39 %. Bei den VOC lagen die erreichten Minderungen zwischen 47 und 60 % und damit merklich höher als beim CO.

Insgesamt ist die CO- und VOC-Minderung am Katalysator während des Chargenabbrandes nicht konstant, sondern großen Schwankungen unterworfen. Dies liegt daran, dass sich die Gastemperatur und die O<sub>2</sub>-Konzentration während des Abbrandverlaufes stark ändern. In **Bild 4.1** sind die CO- und VOC-Minderungen als Verläufe für die durchgeführten Versuchsreihen dargestellt.

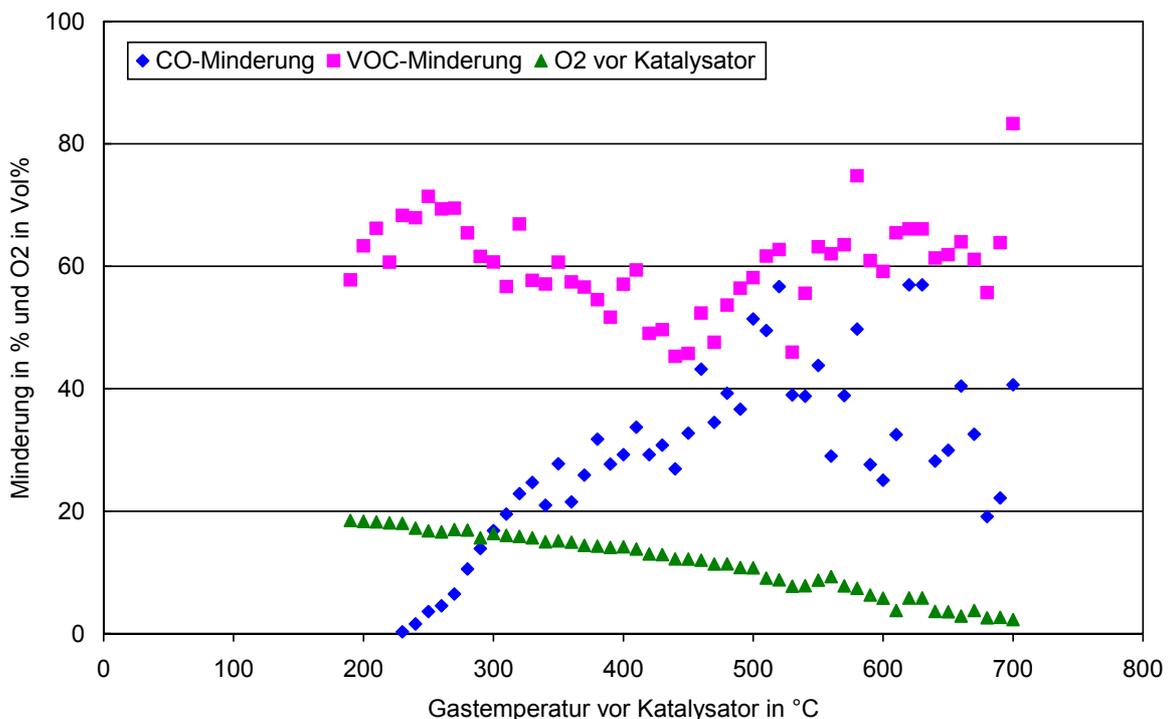


**Bild 4.1:** Verlauf der CO- und VOC-Minderung bei den einzelnen Versuchsreihen (Minderung aus den bezogenen 1-Minuten-Mittelwerten berechnet)

Je nach Gaszustand (Temperatur und O<sub>2</sub>-Konzentration) beträgt die CO-Minderung zwischen nahezu null und über 70 %. Auch die VOC-Minderung unterliegt großen Schwankungen, die zwischen rund 10 bis über 80 % liegen. Lücken in der Darstellung der Minderungskurven stellen meist negative Werte dar, die bei der Auswertung nicht weiter berücksichtigt wurden. Diese ergaben sich zum einen bei schnellen Konzentrationsänderungen durch die unterschiedliche Totzeiten der beiden Gasmessstrecken vor und nach Katalysator. Zum anderen wirkte sich in manchen Verbrennungsphasen auch die inhomogene Gasverteilung an der Messstelle vor Katalysator aus. Abgasstrahlen mit sehr geringen oder, seltener, sehr

hohen Konzentrationen, die z.T. bei der Gasprobenahme erfasst wurden, führten zu negativen oder sehr hohen (~ 100 %) und damit unrealistischen CO- und VOC-Minderungen.

Im **Bild 4.2** sind die CO- und VOC-Minderungen in Abhängigkeit der Gastemperatur (Temperatur unmittelbar vor Katalysator) dargestellt. Mit eingezeichnet sind die entsprechenden O<sub>2</sub>-Konzentrationen. Die dargestellten Werte der Minderungen stellen Mittelwerte für den Temperaturbereich (jeweils 10 K) aus allen Versuchen dar, wobei nur positive Minderungen berücksichtigt wurden. Die dargestellten Minderungen wurden für CO und VOC jeweils anhand der auf 13 Vol% bezogenen 1-Minuten-Messwerte berechnet. Die in Tabelle 4.4 aufgeführten Werte für die Minderung wurde aus den auf 13 Vol% bezogenen Mittelwerte für CO und VOC der Versuchsreihe berechnet. Aufgrund der unterschiedlichen Berechnungsverfahren (bezogenen 1-Minuten-Mittelwerte oder Mittelwert für Gesamtabbrand der dann auf 13 Vol% bezogen wird) lassen sich die Minderungen nicht unmittelbar vergleichen.

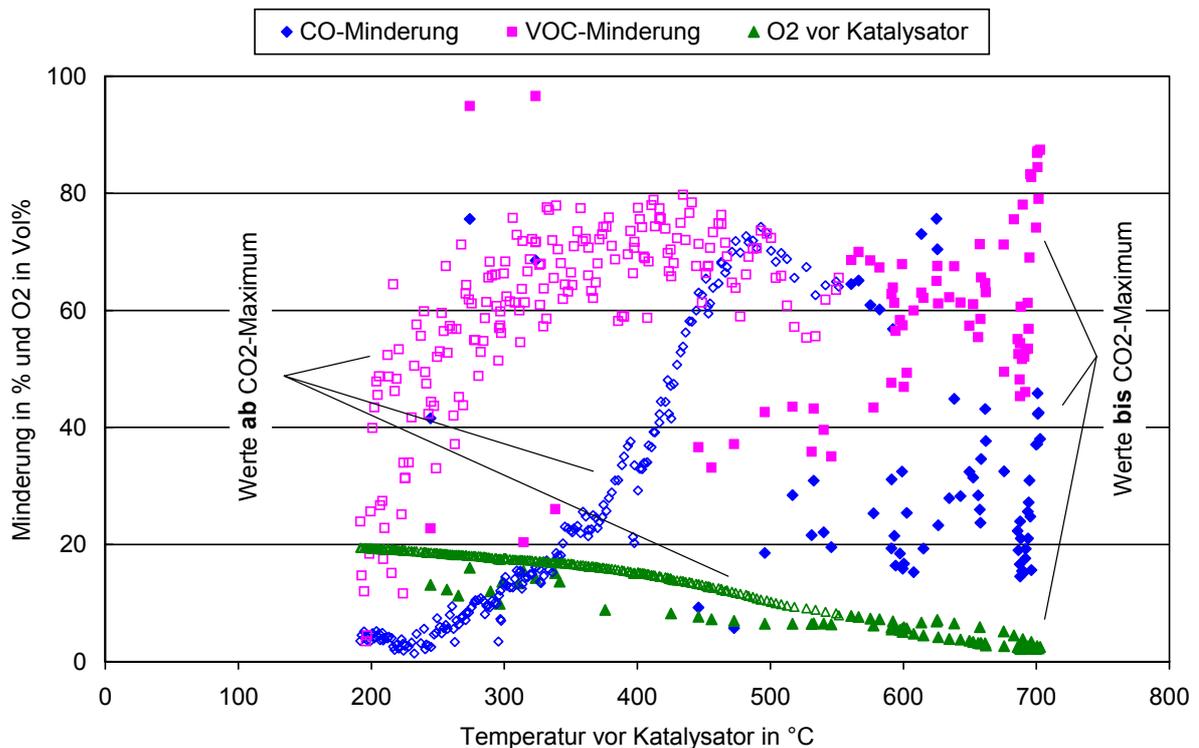


**Bild 4.2:** CO- und VOC-Minderung in Abhängigkeit der Gastemperatur sowie zugehörige Sauerstoffkonzentration, jeweils vor Katalysator, als Mittelwerte für alle Versuchsreihen

Die CO-Minderung ist stark von der Gastemperatur und damit von der sich hieraus ergebenden Katalysatortemperatur abhängig. Bei Temperaturen unterhalb von 300 °C ergeben sich nur geringe CO-Umsetzungsraten. Bei hohen Gastemperaturen, ab etwa 500 bis 600 °C werden im Katalysator bis zu 60 % des CO oxidiert. Hemmend auf die Umsetzungsrate wirkt sich bei diesen hohen Temperaturen allerdings die geringe Sauerstoffkonzentration aus. Es scheint, dass bei O<sub>2</sub>-Konzentrationen unterhalb von 10 Vol% die CO-Minderung, trotz ausreichend hoher Temperatur, in einem geringeren Umfang stattfindet.

Die Minderung bei den flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) ist dagegen weit weniger von der Temperatur und der Sauerstoffkonzentration abhängig. Bereits bei Temperaturen von 200 °C werden die VOC im Katalysator zu 60 % oxidiert. Diese Umsetzungsrate nimmt auch bei höheren Temperaturen nicht mehr weiter zu, was an der gleichzeitig abnehmenden Sauerstoffkonzentration liegen könnte.

Durch die Mittelwertbildung über die verschiedenen Versuchsreihen werden die Zusammenhänge allerdings etwas verwischt. Deshalb sind in **Bild 4.3** die Verhältnisse nochmals am Beispiel des Braunkohlenabbrandes dargestellt. Hier wird noch unterschieden zwischen den Werten bis und ab der maximalen CO<sub>2</sub>-Konzentration des Abbrandes. Nach der Brennstoffaufgabe, bei einer Gastemperatur von ca. 200 °C, steigt diese rasch auf die höchsten Werte des Abbrandes an. Die VOC-Minderung nimmt mit der Temperatur zu. Werte von rund 90 % werden bei etwa 700 °C Gastemperatur und niedrigster O<sub>2</sub>-Konzentration erreicht. Die VOC-Minderung wird hierbei nur wenig von der abnehmenden Sauerstoffkonzentration beeinflusst.



**Bild 4.3:** CO- und VOC-Minderung in Abhängigkeit der Gastemperatur sowie zugehörige Sauerstoffkonzentration, jeweils vor Katalysator, als Mittelwerte für die Versuchsreihe 4 (Abbrand mit Braunkohlenbriketts)

Deutlich zeigt sich dieser Einfluss allerdings bei der CO-Minderung, die selbst bei hohen Gastemperaturen nur Werte im Bereich von 40 % oder weniger erreicht. Mit fortschreitendem Abbrand nimmt die Sauerstoffkonzentration im Abgas wieder zu. Dies führt zu einem Anstieg der CO-Umsetzung im Katalysator. In dieser Verbrennungsphase werden bis nahezu 80 % des CO im Katalysator oxidiert. Mit abnehmender Gastemperatur gegen Abbrandende nimmt auch die CO-Umsetzung ab.

### 3.6 Messergebnisse der UMEG

Bei diesen Messungen konnte die Probenahme vor und nach Katalysator nicht zeitgleich vorgenommen werden. Untersucht wurden deshalb die beiden Betriebszustände Betrieb ohne Katalysator (Katalysator aus der Gasströmung geschwenkt) und Betrieb mit Katalysator. Die Probenahme für beide Betriebszustände erfolgte nach dem Abgasausgang (Stutzen) des nachgeschalteten Guss-Wärmetauschers im Verbindungsrohr zum Schornstein. Ergänzend wurden vom IVD kontinuierlich vor und nach Katalysator (siehe Kapitel 4.3) die Konzentrationen von CO<sub>2</sub>, CO und VOC bestimmt. Die Ergebnisse können ebenfalls zur Interpretation der Messungen der UMEG herangezogen werden.

In jedem Betriebszustand wurden drei Abbrände (Einzelmessungen) nacheinander durchgeführt. Bei betriebswarmem Ofen wurde dazu jeweils rund 3 kg Buchenscheitholz aufgelegt. Nachdem sich das Holz entzündet hatte und weitgehend stabile Verbrennungsbedingungen vorlagen, wurde die 15-minütige Messung gestartet. Danach wurde abgewartet bis das Feuer auf eine Grundglut abgebrannt war, bevor der nächste Versuchsdurchgang gestartet wurde. Aus den Ergebnissen der Einzelmessungen wurde für jeden Betriebszustand ein Mittelwert berechnet. Wesentliche Ergebnisse sind als Mittelwerte der beiden Betriebszustände in **Tabelle 4.5** dargestellt.

Da eine zeitgleiche Probenahme vor und nach Katalysator nicht vorgenommen werden konnte, erschweren die unvermeidlichen Schwankungen der Emissionskonzentrationen bei diesen Feuerstätten die Interpretation der Messergebnisse. Außerdem wird durch den Katalysator das Abbrandverhalten des Heizeinsatzes beeinflusst, da zum einen dessen zusätzlicher Druckverlust überwunden werden muss und zum anderen sich die Strömungsverhältnisse direkt am Ausgang des Heizgerätes ändern.

Der Druckverlust des Katalysators wurde weitgehend dadurch ausgeglichen, dass der Schornsteinzug von 7 auf 11 Pa erhöht wurde. Trotzdem konnte nicht exakt das selbe Abbrandverhalten des Heizeinsatzes wie beim Betrieb ohne Katalysator erreicht werden. Dies zeigt sich z.B. an der O<sub>2</sub>-Konzentrationen (UMEG) für die Messstelle 'nach Katalysator'. Beim Betrieb ohne Katalysator wurden hier im Mittel 13,5 Vol% ermittelt, beim Betrieb mit Katalysator lag die Konzentration bei 10,3 Vol%. Auch ein Vergleich der berechneten CO-Minderung für die Messungen des IVD (61% bei zeitgleicher Messung vor und nach Katalysator) mit den Ergebnissen der UMEG (31 %) zeigt, dass die beiden Betriebszustände nicht vollkommen identisch waren.

Trotz dieser Einschränkung zeigt sich, dass die Minderung auch für aliphatische Aldehyde, organische Einzelkomponenten (z.B. Benzol) und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe zumindest im Bereich von 50 bis 60 % liegt.

**Tabelle 4.5:** Messergebnisse der UMEG als Mittelwerte der beiden Betriebszustände für den Kachelofen-Heizeinsatz mit und ohne Katalysator (Bezugssauerstoffgehalt: 13 Vol%)

<b>Kachelofen-Heizeinsatz mit Katalysator</b> (Mittelwerte aus jeweils 2 bzw. 3 Einzelmessungen)		Betriebszustand		
		ohne Katalysator *	mit Katalysator **	
<b>Wärmeleistung</b>	feuerungst. Wirkungsgrad in %	65,7	77,6	
	FWL in kW	21,2	18,3	
	WL (FWL*Wirkungsgrad) in kW	13,9	14,2	
	auf NWL bezogene WL in %	155	158	
<b>Messungen der UMEG</b>	<b>Messstelle nach Katalysator</b>	O <sub>2</sub> in Vol%	13,5	10,3
		CO in g/m <sup>3</sup>	1,8	1,3
		Staub in mg/m <sup>3</sup>	124	54
		HCl in mg/m <sup>3</sup>	4,8	1,3
		HF in mg/m <sup>3</sup>	0,2	0,1
		Summe PAK (16 EPA PAK) in mg/m <sup>3</sup>	2,91	1,20
		Benzo(a)pyren in mg/m <sup>3</sup>	0,02	0,01
		Summe Aldehyde in mg/m <sup>3</sup>	12,1	5,5
	Benzol in mg/m <sup>3</sup>	11,2	5,7	
	<b>Minderung</b>	<b>CO in %</b>		<b>31</b>
		<b>Staub in %</b>		<b>56</b>
		<b>HCl in %</b>		<b>72</b>
		<b>Summe PAK (16 EPA PAK) in %</b>		<b>64</b>
		<b>Benzo(a)pyren in %</b>		<b>59</b>
<b>Summe Aldehyde in %</b>			<b>51</b>	
	<b>Benzol in %</b>		<b>55</b>	
<b>Messungen des IVD</b>	<b>Messstelle vor Katalysator</b>	CO <sub>2_vK</sub> in Vol%		12,5
		CO_vK in mg/m <sup>3</sup> (bezogen)		2.924
		VOC_vK in mgC/m <sup>3</sup> (bezogen)		197
		Gastemperatur in °C		664
	<b>Messstelle nach Katalysator</b>	CO <sub>2_nK</sub> in Vol%	6,7	8,9
		CO_nK in mg/m <sup>3</sup> (bezogen)	1.716	1.152
		VOC_nK in mgC/m <sup>3</sup> (bezogen)	79	68
		Abgastemperatur in °C	303	238
	<b>Minderung</b>	<b>CO in %</b>		<b>61</b>
		<b>VOC in %</b>		<b>65</b>

\* Mittelwert aus drei Einzelmessungen

\*\* Mittelwert aus zwei Einzelmessungen (bei Staub nur eine Messung). Bei einem Versuch konnten die Ergebnisse aufgrund unterschiedlicher Verbrennungsbedingungen (Schornsteinzug war zu gering) nicht zur Mittelwertbildung herabgezogen werden, bei einer Messung fiel zusätzlich das Staubmessgerät aus

PAK Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe

Da höhersiedende organische Komponenten, die bei niedrigeren Temperaturen kondensieren und als Partikel oder Tröpfchen vorliegen, auch zu Staubkonzentration beitragen, geht auch die Staubkonzentration beim Katalysatorbetrieb zurück. Da hier mit Katalysator nur ein Messwert vorliegt, ist die Aussagekraft allerdings eingeschränkt. Auffällig ist auch, dass die HCl-Konzentration durch den Katalysator deutlich reduziert wird.

### 3.7 Zusammenfassende Bewertung beim Heizeinsatz mit Katalysator

Die CO- und VOC-Emissionen des Heizeinsatzes können durch den Einsatz eines Oxidationskatalysators reduziert werden. Wird der Heizeinsatz in einem Leistungsbereich betrieben, bei dem die Gastemperatur vor Katalysator rasch auf über 300 °C ansteigt, so lassen sich die CO-Emissionen eines Chargenabbrandes im Mittel um rund **20 %** (Bandbreite 19 bis 39 %) und die VOC-Emissionen um nahezu **50 %** (Bandbreite 47 bis 60 %) mindern. Diese Mittelwerte wurden aus 3 Versuchsreihen mit Holzbrennstoffen und einer Versuchsreihe mit Braunkohlenbriketts berechnet. Werden nur die Versuche mit Buchenscheitholz betrachtet, so sind die Minderungen etwas höher (CO bei rund 23 % und VOC bei 54 %).

Im Prinzip werden diese Ergebnisse durch ergänzende Messungen der UMEG bestätigt, wobei eine Emissionsminderung von mindestens 50 % auch für organische Einzelkomponenten (Benzol), polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, Staub und HCl nachgewiesen wurde.

Voraussetzung ist allerdings in allen Fällen (außer vielleicht für HCl), vor allem für eine effektive CO-Minderung, dass auch in der Hauptverbrennungsphase noch ausreichend Sauerstoff im Heizgas vor Katalysator enthalten ist.

## 4 Literatur

1. BImSchV. 2001.

Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BImSchV) vom 15. Juli 1988 (BGBl. I, S. 1059), zuletzt geändert am 27. Juli 2001 (BGBl. I, S. 1950)

DIN EN 303-5. Juni 1999.

Heizkessel. Teil 5: Heizkessel für feste Brennstoffe, hand- und automatisch beschickte Feuerungen, Nenn-Wärmeleistung bis 300 kW. Beuth Verlag GmbH, Berlin

DIN EN 304. August 1998.

Heizkessel. Prüfregele für Heizkessel mit Ölzerstäubungsbrennern. Beuth Verlag GmbH, Berlin

Struschka, M., Pfeiffer, F., Lepel, F. von, Baumbach, G. 2000.

Start- und Stopp-Emissionen von Öl- und Gasfeuerungen. Erdöl Erdgas Kohle, Heft 3, S. 121-122

Struschka, M.; Zuberbühler, U.; Dreiseidler, A.; Dreizler, D. und Baumbach, G. 2003.

Ermittlung und Evaluierung der Feinstaubemissionen aus Kleinf Feuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher sowie Ableitung von geeigneten Maßnahmen zur Emissionsminderung. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben 299 44 140. Erschienen in der Reihe UBA-TEXTE als Nr. 41-03, Umweltbundesamt, Berlin

UMEG, 2005.

Emissionsmessungen an einem holzbefeuerten Kachelofen-Heizeinsatz. UMEG, Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit Baden-Württemberg, Messbericht-Nr. 43-04/05, Karlsruhe

VDI 2066.

Blätter 1 und 7: Messen von Partikeln. VDI Handbuch Reinhaltung der Luft. Beuth Verlag GmbH, Berlin, jeweils aktuellste Fassung

VDI 2067, Blatt 6. 1989.

Berechnung der Kosten von Wärmeversorgungsanlagen. Wärmepumpen. Partikeln. VDI Handbuch Heizungstechnik / Lüftungstechnik. Beuth Verlag GmbH, Berlin

**10.8 Unterbericht „Ermittlung des Emissionsaufkommens und der zukünftigen Entwicklung für krebserzeugende und weitere besonders gesundheitsgefährdende Stoffe bei Kleinfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe“**

**Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen**

Direktor: Prof. Dr. techn. G. Scheffknecht

**Abteilung Reinhaltung der Luft**

Prof. Dr.-Ing. Günter Baumbach

Pfaffenwaldring 23, 70569 Stuttgart



## **Ermittlung des Emissionsaufkommens und der zukünftigen Entwicklung für krebserzeugende und weitere besonders gesundheitsgefährdende Stoffe bei Kleinfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe**

Teilbericht im Forschungsvorhaben:

Ermittlung und Minderung der Emissionen krebserzeugender und weiterer besonders gesundheitsgefährdender Stoffe bei Kleinfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe

von

Dr.-Ing. Michael Struschka

Prof. Dr.-Ing. Günter Baumbach

Universität Stuttgart

Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD)

IM AUFTRAG DER

LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG

Referat 31, Umwelttechnologie

Hertzstraße 173, 76187 Karlsruhe

Juni 2005

## Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>265</b>
<b>2 Vorgehensweise .....</b>	<b>266</b>
<b>3 Bestand und Struktur der Feuerungsanlagen .....</b>	<b>268</b>
<b>4 Endenergieverbrauch der Haushalte und Kleinverbraucher .....</b>	<b>269</b>
4.1 Gerätebezogener Energieverbrauch der Feuerungsanlagen .....	270
<b>5 Ermittlung der Emissionsfaktoren .....</b>	<b>271</b>
5.1 Differenzierung der Emissionsfaktoren .....	272
<b>6 Berechnung des Emissionsaufkommens .....</b>	<b>272</b>
6.1 Prognose der Emissionsentwicklung .....	272
<b>7 Literatur .....</b>	<b>275</b>

## 1 Einleitung

Im Rahmen des Vorhabens „Ermittlung und Minderung der Emissionen krebserzeugender und weiterer besonders gesundheitsgefährdender Stoffe bei Kleinf Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe“ (FKZ 203 44 358) des Umweltbundesamtes sollen das Emissionsaufkommen und anhand zweier Szenarien die zukünftige Entwicklung des Emissionsaufkommens abgeschätzt werden.

Hierzu soll auf Basis aktueller Emissionsfaktoren das Emissionsaufkommen berechnet werden. Anhand der Entwicklung des Brennstoffmarktes (Zunahme beim Einsatz von Holzbrennstoffen, Stagnation bzw. weiterer Rückgang bei Braunkohlenbriketts und Steinkohlenbrennstoffen) soll die Entwicklung des Emissionsaufkommens abgeschätzt werden. In einem zweiten Szenario soll der mögliche Einfluss von Minderungsmaßnahmen auf die Emissionsentwicklung abgeschätzt werden. Hierbei werden globale Annahmen über die Entwicklung des Anlagenbestandes bzw. der Marktdurchdringung derartiger Maßnahmen getroffen.

Die Berechnung der Emissionsfaktoren, des Emissionsaufkommens und der Prognosen erfolgt in Excel-Dateien. An dieser Stelle wird im wesentlichen auf den Rechengang und die Ermittlung der Eingangsgrößen eingegangen, die Detailergebnisse liegen dann digital vor.

## 2 Vorgehensweise

Bei der Ermittlung der Emissionsfaktoren und des Emissionsaufkommens für die betrachteten Komponenten aus Feuerungsanlagen im Geltungsbereich der 1. BImSchV (2001) für feste Brennstoffe bei Haushalten und Kleinverbrauchern wird im Grundsatz entsprechend den abgeschlossenen Vorhaben "Ermittlung der mittleren Emissionsfaktoren zur Darstellung der Emissionsentwicklung aus Feuerungsanlagen im Bereich Haushalte und Kleinverbraucher" und "Ermittlung und Evaluierung der Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher sowie Ableitung von geeigneten Maßnahmen zur Emissionsminderung" (Pfeiffer et al., 2000 und Struschka et al., 2003) vorgegangen.

Unter Haushalte werden alle privaten Haushalte zusammengefasst. Im Bereich der Kleinverbraucher sind die unterschiedlichsten Verbrauchergruppen enthalten. Der Bereich der Kleinverbraucher kann in die Verbrauchergruppen Landwirtschaft und Gartenbau, Handel (Einzel- und Großhandel), Gastgewerbe, Handwerk (z.B. Metall-, Holz- und Baugewerbe), Wäscher und Reiniger, Banken, Versicherungen, Dienstleistungen von Unternehmen und freien Berufen, Öffentliche Einrichtungen und private Organisationen ohne Erwerbscharakter und industrielle Kleinbetriebe gegliedert werden. In Energiebilanzen wird dieser Bereich in der Regel durch einen negativen Ausschluss abgegrenzt, d.h. derjenige Endenergieverbrauch, der nicht eindeutig den Bereichen Haushalte, Verkehr, Energieumwandlung oder Industrie zugeordnet werden kann, wird den Kleinverbrauchern zugewiesen.

Die Emissionsfaktoren und das Emissionsaufkommen liegen mit einem hohen Differenzierungsgrad für Deutschland vor. Die Strukturierung der Emissionsfaktoren orientiert sich hierbei an den verschiedenen Feuerungsbauarten (Gerätebauarten), dem Alter der Feuerungsanlage (unterschieden werden jeweils zwei Altersstufen), den Leistungsbereichen und den typischen Betriebsweisen der Feuerungsanlagen. Die Angaben zur Alters- und Leistungsstruktur sowie zur Betriebsweise der Anlagen wurden aus den Vorhaben von 2000 bzw. 2003 übernommen, die Zahlen des Anlagenbestandes (Daten von LfU bereitgestellt, ergänzt um eigene Schätzungen für gewerbliche Holzfeuerungen) wurden für das Jahr 2003 aktualisiert.

Zur Ermittlung des Emissionsaufkommens sind Angaben zu den gerätespezifischen Energieverbräuchen notwendig, die aus dem Endenergieverbrauch berechnet werden. Anhand der Endenergiebilanz des Jahres 2003 für Deutschland (Daten von LfU bereitgestellt), ergänzt um Daten zum Energieverbrauch gewerblicher Holzfeuerungen (Merten et al. (2004) erfolgt die Ermittlung des Endenergieverbrauchs im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher (GHD – Gewerbe, Handel, Dienstleistungen) strukturiert nach Gerätebauarten und Leistungsbereichen.

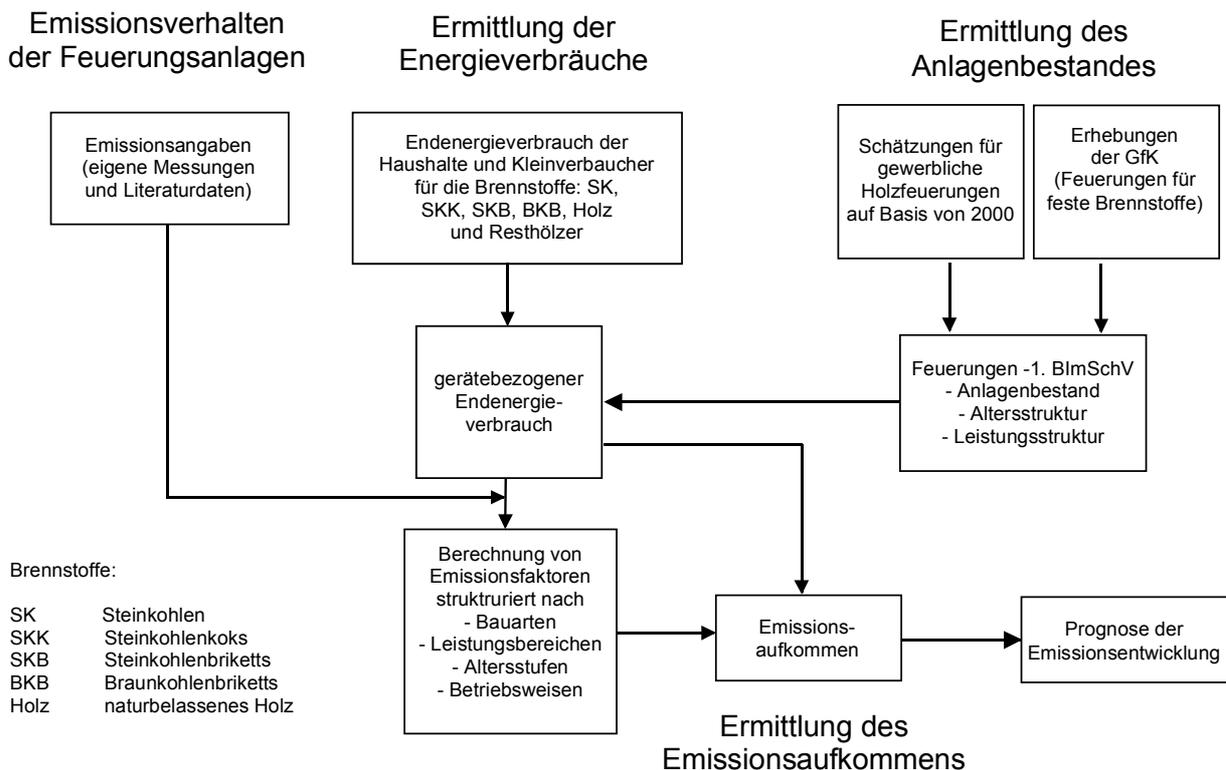
Eine Aufteilung des Endenergieverbrauchs für die betrachteten Brennstoffe auf die verschiedenen Gerätebauarten erfolgt durch Gegenrechnung aus dem Bestand an Feuerungsanlagen, der Anzahl der Vollbenutzungsstunden und der mittleren Feuerungswärmeleistungen

der installierten Feuerungen. Am Ende der Berechnungen steht ein gerätebezogener Endenergieverbrauch mit einem hohen Detaillierungsgrad.

Die Ermittlung der Emissionen der Feuerstätten erfolgte durch eine Literaturlauswertung und durch ergänzende Emissionsmessungen im Rahmen des Vorhabens. Die Daten wurden von der LfU gesammelt, aufbereitet und für die Berechnung zusammengestellt. Bei der Erhebung der Emissionsdaten wird zwischen den Bauarten der Feuerungen, dem Leistungsbereich, dem Baujahr und der Betriebsweise unterschieden.

Anhand der ermittelten Emissionsfaktoren erfolgt die Berechnung des Emissionsaufkommens für Feuerungsanlagen im Geltungsbereich der 1. BImSchV für Haushalte und Kleinverbraucher mit Stand des Jahres 2003 unter den zuvor festgelegten Randbedingungen. Das Emissionsaufkommen wird für Deutschland angegeben. In einer Emissionsprognose wird die Entwicklung des Emissionsaufkommens bis zum Jahr 2020 abgeschätzt.

Die Struktur und Bearbeitungstiefe des Vorhabens ist sehr stark durch die zur Verfügung stehende Datenbasis vorgegeben. Wesentliche Teilprojekte sowie Bearbeitungsschritte und deren Verknüpfungen sind in **Bild 2.1** schematisch dargestellt.



**Bild 2.1:** Vorgehensweise bei der Berechnung der Emissionsfaktoren und des Emissionsaufkommens

### 3 Bestand und Struktur der Feuerungsanlagen

Die Tiefe der Klassifizierung und die Ermittlung der Anlagenstruktur der installierten Feuerungsanlagen orientiert sich an der Struktur und den Ergebnissen der Emissionsfaktoren-Vorhaben aus den Jahren 2000 und 2003 (Pfeiffer et al., 2000 und Struschka et al., 2003). Aktualisierungen wurden, soweit Daten zugänglich waren, durchgeführt.

Die Anzahl der in Deutschland installierten Feuerstätten für feste Brennstoffe (Dauerbrandöfen, Kachelöfen, Kamine, Kaminöfen, Heizkessel, Badeöfen und Herde) wurde anhand von Erhebungen der GfK (GfK, 2005) festgelegt. Für Heizkessel erfolgt in dieser Statistik keine Untergliederung in hand- bzw. mechanisch beschickte Anlagen. Die Aufteilung des Anlagenbestandes auf Haushalte und Kleinverbraucher erfolgte entsprechend den Angaben von Struschka et al. (2003).

Eigene Abschätzungen wurden für die im gewerblichen Bereich (Holz- und Baugewerbe, sowie Glaser) installierten Holzfeuerungsanlagen durchgeführt, die auf den Berechnungen für das Jahr 2000 (Struschka et al., 2003) aufbauen. Hierbei wurde davon ausgegangen, dass aufgrund einer insgesamt leicht abnehmenden thermischen Nutzung von Resthölzern die Anzahl der installierten Anlagen im selben Verhältnis abnimmt.

In **Tabelle 3.1** ist der Bestand an installierten Feuerstätten der Haushalte und Kleinverbrauchern im Geltungsbereich der 1. BImSchV für das Jahr 2003 zusammengefasst dargestellt.

**Tabelle 3.1:** Bestand an installierten Feuerstätten im Geltungsbereich der 1. BImSchV in Haushalten und bei Kleinverbrauchern in Deutschland im Jahr 2003

Energieträger	Bezeichnung der Feuerstätte	Deutschland
Festbrennstoffe (Kohlen- und Holz- brennstoffe)	Heizkessel <sup>1</sup> (Zentral- und Etagenheizungen)	544.852
	Dauerbrandöfen <sup>2</sup>	1.986.167
	Kachelöfen <sup>2</sup> (mit Heizeinsatz oder als Grundofen)	3.920.928
	Kaminöfen <sup>2</sup>	3.018.370
	Kamine <sup>2</sup> (mit offenem oder geschlossenem Feuerraum)	3.022.243
	Badeöfen <sup>2</sup>	121.488
	Herde (und Heizungsherde) <sup>2</sup>	1.353.358
	<b>Summe *</b>	<b>13.967.407</b>
<b>Gesamtbestand der Feuerstätten</b>		<b>22.568,0</b>

<sup>1</sup> GfK (2005) und eigene Schätzungen für Heizkessel im Bereich der Kleinverbraucher, Heizkessel (hand- und mechanisch beschickt) einschließlich gewerbliche Holzfeuerungen

<sup>2</sup> GfK (2005)

Zur Berechnung der Emissionsfaktoren sind die in Haushalten und bei Kleinverbrauchern installierten Feuerungsanlagen für die unterschiedlichen Gerätebauarten nach Leistungsbe-  
reichen und Altersstufen zu untergliedern. Außerdem werden die mittleren installierten  
Nennwärmeleistungen der Bauarten benötigt, die in die Berechnung des Endenergie-  
verbrauchs und der gerätespezifischen Verbräuche eingehen.

### 4 Endenergieverbrauch der Haushalte und Kleinverbraucher

Den Rahmen für die Aufteilung des Endenergieverbrauchs stellt die von der Arbeitsgemein-  
schaft Energiebilanzen mit Stand 10/04 (AGEB, 2004) erstellte Energiebilanz für die Bundes-  
republik Deutschland im Jahr 2003 dar, die nur beim Verbrauch von Holzbrennstoffen bei  
Kleinverbrauchern im Bereich Landwirtschaft und Gartenbau für naturbelassenes Holz sowie  
im Bereich der gewerblichen Holzfeuerungen für Resthölzer durch Angaben von Merten et  
al. (2004) ergänzt wurde. Bei Kleinverbrauchern wird in der Energiebilanz bisher überhaupt  
kein Verbrauch von Holzbrennstoffen ausgewiesen.

Die revierbezogenen Angaben zu Braunkohlenbriketts wurden anhand von Angaben der  
Statistik der Kohlenwirtschaft e.V. ermittelt (Kohlenwirtschaft, 2005).

In **Tabelle 4.1** ist der berechnete Endenergieverbrauch an Stein-, Braun- und Holzbrennstof-  
fen für Deutschland im Jahr 2003 zusammengestellt.

**Tabelle 4.1:** Endenergieverbrauch der Haushalte und Kleinverbraucher in Deutschland im  
Jahr 2003

Endenergieverbrauch im Jahr 2003 in Deutschland (in TJ)	Haushalte	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	Summe
Steinkohlen	6.000	6.000	12.000
Steinkohlenkoks	3.000	3.000	6.000
Steinkohlenbriketts	3.000	0	3.000
Braunkohlenbriketts	18.000	0	18.000
<i>davon Rheinisches Revier</i>	9.018	0	9.018
<i>davon Lausitzer Revier</i>	6.534	0	6.534
<i>davon Mitteldeutsches Revier</i>	810	0	810
<i>davon Importe</i>	1.638	0	1.638
Holzbrennstoffe	190.355	38.206	228.561
<i>davon naturbelassenes Holz</i>	190.355	8.989	199.344
<i>davon Resthölzer</i>	0	29.217	29.217
<b>Summe</b>	<b>220.355</b>	<b>47.206</b>	<b>267.561</b>

'0' kein Energieeinsatz

Holzbrennstoffe: in Form von naturbelassenem Holz (eingesetzt in Haushalten und im Bereich Land-  
wirtschaft und Gartenbau) und Resthölzern, die sich aus Resten von Holzwerkstof-  
fen und naturbelassenem Holz zusammensetzen

### 4.1 Gerätebezogener Energieverbrauch der Feuerungsanlagen

Der Endenergieverbrauch im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher wurde strukturiert nach Gerätegruppen und Leistungsbereiche aufgeschlüsselt. Dieser gerätebezogene Endenergieverbrauch wird zur Berechnung des Emissionsaufkommens einer Gerätebauart, z.B. Dauerbrandöfen, im Jahr 2003 herangezogen. Die Struktur des gerätebezogenen Endenergieverbrauchs ist auf die Bearbeitungstiefe der Anlagenstruktur und der Emissionsfaktoren abgestimmt. Durch Multiplikation des strukturiert erstellten Energieverbrauchs mit den Emissionsfaktoren kann dann das aktuelle Emissionsaufkommen für das Jahr 2003 für Feuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher berechnet werden.

Die Aufteilung des Endenergieverbrauchs auf die verschiedenen Gerätebauarten erfolgt, getrennt für die betrachteten Brennstoffe, durch Gegenrechnung aus dem Bestand an Feuerstätten einer Bauart, der Anzahl an Vollbenutzungsstunden und der mittleren Leistung der installierten Feuerungen. Die mittleren (Nennwärme-) Leistungen der installierten Anlagen wurden aus den Nennwärmeleistungen der Geräte.

Die Anzahl der installierten Feuerstätten einer Bauart beinhaltet alle Geräte, die betriebsbereit in Haushalten oder bei Kleinverbrauchern eingebaut sind, unabhängig davon, ob diese z.B. regelmäßig oder nie betrieben werden. Vor allem im Bereich der festen Brennstoffe gibt es eine nicht unerhebliche Zahl an Feuerstätten, die nur selten oder gelegentlich genutzt werden, da sie ausschließlich als Zusatz- oder Komfortheizung dienen. Innerhalb einer Bauart wird die über den Anlagenbestand gemittelte Nutzungshäufigkeit der Feuerstätten durch die festgelegte Anzahl der Vollbenutzungsstunden berücksichtigt.

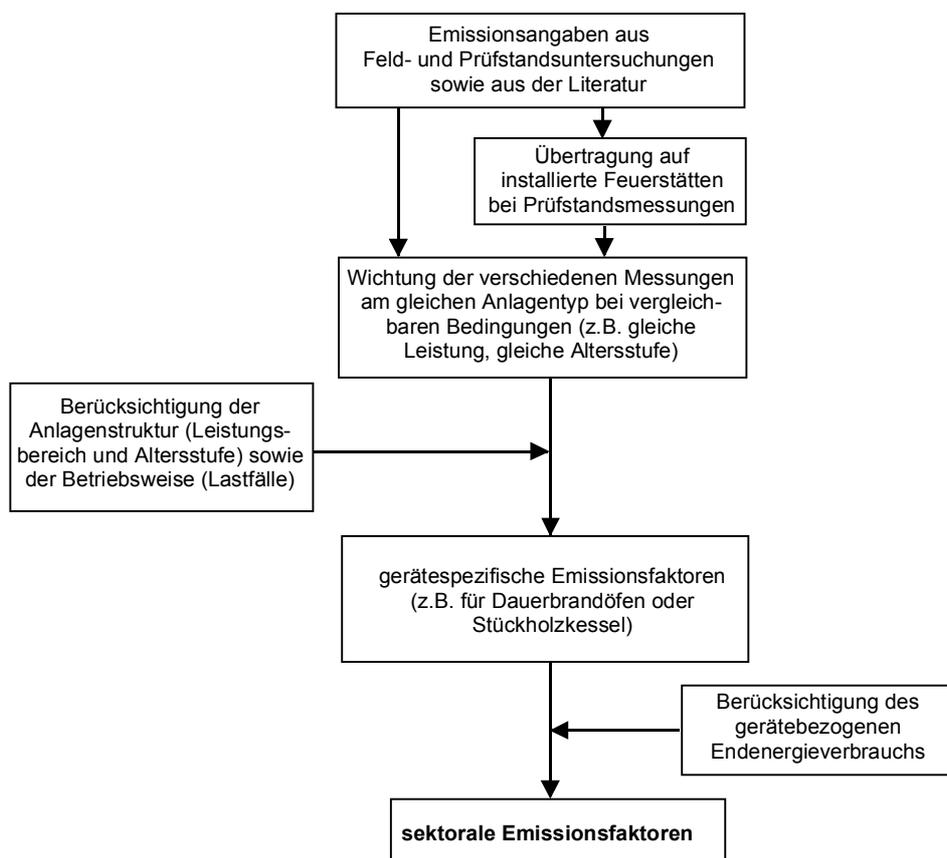
Die Anzahl der jährlichen Vollbenutzungsstunden gibt die Betriebsdauer der Feuerstätte pro Jahr bei Nennwärmeleistung an. Unter der jährlichen Betriebsdauer wird die Summe der Zeiträume verstanden, während denen Verbrennungsvorgänge in der Feuerstätte stattfinden. Dies ist z.B. bei chargenweise beschickten Holzfeuerungen die Summe der Zeiträume, in denen ein Chargenabbrand stattfindet. Je nach Bau- und Ausführungsart der Feuerung setzen sich die Vollbenutzungsstunden u.U. aus Zeiträumen unterschiedlicher Wärmeleistungen, z.B. bei handbeschickten Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe, zusammen. Um die Berechnung des gerätebezogenen Endenergieverbrauchs zu vereinfachen, sind alle Zeiträume entsprechend ihren Wärmeleistungen in der Rechengröße "Vollbenutzungsstunden" enthalten. Die Vollbenutzungsstunden entsprechen nur dann der Betriebsdauer der Feuerstätte, wenn diese immer bei Nennwärmeleistung betrieben wird. Wird die Feuerstätte mit Wärmeleistungen kleiner der Nennwärmeleistung betrieben, so ist die effektive jährliche Betriebsdauer entsprechend länger. Da die Rechengröße "Vollbenutzungsstunden" u.U. nicht das tatsächliche Betriebsverhalten der installierten Feuerstätten wiedergibt, erfolgt die Berechnung der Emissionsfaktoren und des Emissionsaufkommens ggf. unter Berücksichtigung verschiedener Wärmeleistungen (Lastfälle). Hierzu wird in einem weiteren Berechnungsschritt für alle betrachteten Bauarten von Feuerungen deren gerätebezogener Endenergieverbrauch auf die spezifischen Lastfälle verteilt.

## 5 Ermittlung der Emissionsfaktoren

Ausgangspunkt für die Berechnung der Emissionsfaktoren bilden Emissionsangaben. Aus den Emissionsangaben werden, unter Berücksichtigung der Betriebsweise der Feuerung und der Altersstufe, die gerätespezifischen Emissionsfaktoren für die unterschiedlichen Feuerungsbauarten und Leistungsbereiche ermittelt. Die Emissionsfaktoren werden für Deutschland für die verschiedenen Brennstoffen angegeben.

Aus den gerätebezogenen Emissionsfaktoren werden für die betrachteten Brennstoffe in Verbindung mit dem anteiligen Endenergieverbrauch, sektorale Emissionsfaktoren für die Bereiche Haushalte und Kleinverbraucher (jeweils nur nicht genehmigungsbedürftige Feuerungsanlagen im Geltungsbereich der 1. BImSchV) berechnet.

**Bild 5.1** zeigt schematisch die Vorgehensweise zur Ermittlung der gerätespezifischen und sektoralen Emissionsfaktoren.



**Bild 5.1:** Vorgehensweise zur Ermittlung der Emissionsfaktoren

### 5.1 Differenzierung der Emissionsfaktoren

Emissionsfaktoren werden für die in Haushalten und bei Kleinverbrauchern eingesetzten Brennstoffe Braunkohlenbriketts, Steinkohlen (verfügbare Emissionsangaben umfassen meist nur Anthrazit), Steinkohlenkoks, Steinkohlenbriketts, naturbelassenes Holz und Resthölzer (Produktionsreste von naturbelassenem Holz und von Holzwerkstoffen) ermittelt.

Die Strukturierung der Emissionsfaktoren bezüglich der Feuerungsbauarten orientiert sich für jeden Brennstoff an der üblicherweise eingesetzten und in großer Anzahl im Bestand vorhandenen Gerätetechnik. Bei Feuerstätten für feste Brennstoffe wurden die Bezeichnungen in Anlehnung an die zutreffenden DIN-Normen festgelegt. Die Strukturierung der Emissionsfaktoren entspricht in ihrem Differenzierungsgrad der Bestandsstruktur der installierten Feuerungsanlagen und der Struktur des gerätebezogenen Endenergieverbrauchs.

Die Berechnung der Emissionsfaktoren für feste Brennstoffe im Bereich der Haushalte basiert auf Emissionsangaben für handbeschickte Feuerungen, in denen Stein- und Braunkohlenbrennstoffe und naturbelassenes Holz verbrannt wurde. Der Einsatz von Holzbriketts in den hierfür geeigneten Feuerungsanlagen kann aufgrund der Datenlage nicht separat betrachtet werden, da weder ausreichende Angaben zum Brennstoffverbrauch (insgesamt und gerätespezifisch) noch zum Emissionsverhalten der Feuerungen vorliegen. Auch für den Einsatz von Holzpellets in hierfür vorgesehenen Feuerungsanlagen können keine Emissionsfaktoren in der beschriebenen Tiefe und Struktur genannt werden, da auch für diesen Bereich keine detaillierten Daten zum (gerätespezifischen) Endenergieverbrauch und zum Gerätebestand vorliegen. Aufgrund des derzeit noch relativ geringen Anlagenbestandes und damit verhältnismäßig geringen Endenergieverbrauchs kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss dieser Bauarten (z.B. Pelletkessel oder Kaminöfen) auf die mittleren oder sektoralen Emissionsfaktoren und auf das Emissionsaufkommen noch gering ist.

## 6 Berechnung des Emissionsaufkommens

Die Berechnungsgrundlage für die Ermittlung des Emissionsaufkommens in den Sektoren Haushalte und Kleinverbraucher für das Jahr 2003 bilden die gerätebezogenen Endenergieverbräuche sowie die ermittelten gerätebezogenen Emissionsfaktoren. Aus dem gerätebezogenen Emissionsaufkommen wird dann durch Addition das sektorale Emissionsaufkommen in den Bereichen Haushalte und Kleinverbraucher für Deutschland berechnet.

### 6.1 Prognose der Emissionsentwicklung

Das Szenario einer möglichen Emissionsentwicklung im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher wird bis zum Jahr 2020 berechnet. Ausgangspunkt ist das ermittelte Emissionsaufkommen der betrachteten Komponenten im Jahr 2003. Der betrachtete Zeitraum für die Prognose erstreckt sich somit über 17 Jahre.

Berücksichtigt wurde in dieser Prognose die vermutete Entwicklung der Endenergieverbräuche und ein höherer Anteil an modernen mechanisch beschickten Holzfeuerungen.

In **Tabelle 6.1** ist die vermutete Entwicklung des Endenergieverbrauchs in Deutschland bis zum Jahr 2020 für die Bereiche Haushalte und Kleinverbraucher dargestellt.

**Tabelle 6.1:** Annahme zur Entwicklung des Endenergieverbrauchs in Deutschland für die Bereiche Haushalte und Kleinverbraucher bis zum Jahr 2020

Endenergieverbrauch (Prognose)	Endenergieverbrauch in TJ in den Jahren 2003 bis 2020 Haushalte und Kleinverbraucher in Deutschland				
	2003	2005	2010	2015	2020
Steinkohlen und -briketts	15.000	13.314	9.568	6.766	4.498
Steinkohlenkoks	6.000	5.245	3.642	2.472	1.543
Braunkohlenbriketts	18.000	15.993	12.008	9.625	7.370
Brennholz	228.561	236.876	256.301	263.328	274.550
<b>Summe</b>	<b>267.561</b>	<b>271.429</b>	<b>281.520</b>	<b>282.192</b>	<b>287.961</b>

Basis für die Ableitung dieser Verbrauchsentwicklung ist eine Studie der Prognos AG zur Entwicklung der Energiemärkte in Deutschland für die Jahre 1995 bis 2020 (Prognos, 1995). Da die in dieser Studie prognostizierten Endenergieverbräuche für das Jahr 2000 zum großen Teil bereits nicht mehr mit den tatsächlichen Gegebenheiten übereinstimmen, können die Prognosewerte nicht direkt übernommen werden. Statt dessen wurde die Entwicklung des Endenergieverbrauchs mit den Daten aus dem Jahr 2003 und den prozentualen Änderungen von 2000 bis 2020 aus der Prognos-Studie abgeschätzt.

Bei Feuerungsanlagen für Holzbrennstoffe wurde bei der Berechnung der Emissionsentwicklung angenommen, dass sich der Anteil von Holzbrennstoffen, die in hand- und vor allem in mechanisch beschickten Anlagen mit relativ geringen Emissionen verfeuert werden, deutlich erhöht. Dies kann z.B. durch den Ersatz von Feuerungen mit veralteter Verbrennungstechnik durch moderne hand- und mechanisch beschickte Feuerungen, durch die Bestandserweiterung mit im wesentlichen mechanisch beschickten Anlagen und durch eine verstärkte Nutzung von Holzpellets erreicht werden. Durch eine Realisierung dieser Maßnahmen wurde für das Szenario abgeschätzt, dass sich eine Minderung der Emission um 40 % bis zum Jahr 2020 ergeben könnte.

Mit den Prognosen zum Endenergieverbrauch und zu den Emissionsfaktoren ergibt sich die in **Tabelle 6.2** aufgeführte Entwicklung des Emissionsaufkommens bis 2020.

Insgesamt wird die Entwicklung des Emissionsaufkommens vom Verbrauch an Holzbrennstoffen, vornehmlich im Bereich der Haushalte, und dem prognostizierten Verlauf der Emissionsfaktoren für diese Feuerungen bestimmt. Wird keine wesentliche Änderung im Emissionsverhalten des Gerätebestandes bis zum Jahr 2020 angenommen (d.h. Emissionsfaktor bleibt unverändert), nehmen die Emissionen aus Holzfeuerungen zu (Prognose 1).

**Tabelle 6.2:** Entwicklung des Emissionsaufkommens ausgewählter Komponenten aus Feuerungsanlagen im Bereich Haushalte und Kleinverbraucher in Deutschland bis zum Jahr 2020

<b>Prognose 1</b>	<b>Emissionsaufkommen in t in den Jahren 2003 bis 2020</b>				
	<b>Haushalte und Kleinverbraucher in Deutschland</b>				
	<b>2003</b>	<b>2005</b>	<b>2010</b>	<b>2015</b>	<b>2020</b>
Benzol in t	1.274	1.321	1.430	1.472	1.540
Benzo(a)pyren in t	5,7	5,8	6,0	6,0	6,2
PAK (16) in t	678	687	711	715	731
PAK (4) in t	20	21	22	21	22
PCDD/F in g	27	27	28	27	27
HCl in t	306	307	310	307	307
Partikel in t	26.207	26.819	28.294	28.677	29.588

<b>Prognose 2</b>	<b>Emissionsaufkommen in t in den Jahren 2003 bis 2020</b>				
	<b>Haushalte und Kleinverbraucher in Deutschland</b>				
	<b>2003</b>	<b>2005</b>	<b>2010</b>	<b>2015</b>	<b>2020</b>
Benzol in t	1.274	1.259	1.196	1.058	926
Benzo(a)pyren in t	5,7	5,5	5,1	4,4	3,8
PAK (16) in t	678	659	606	529	455
PAK (4) in t	20	20	18	16	13
PCDD/F in g	27	26	23	20	17
HCl in t	306	295	266	230	194
Partikel in t	26.207	25.657	23.882	20.890	18.049

Prognose 1: keine zeitliche Entwicklung für die Emissionsfaktoren angenommen

Prognose 2: Bestand von Holzfeuerungen mit geringen Partikelemissionen (z.B. Pelletfeuerungen und moderne hand- und mechanisch beschickte Kessel) nimmt deutlich zu

Bei einem stark zunehmenden Bestand an Holzfeuerungen mit relativ günstigem Emissionsverhalten (z.B. Pelletfeuerungen und moderne hand- und mechanisch beschickte Kessel) würde sich trotz des zunehmenden Holzverbrauchs ein deutlicher Rückgang der Emissionen ergeben.

## 7 Literatur

1. BImSchV. 2001.

Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BImSchV) vom 15. Juli 1988 (BGBl. I, S. 1059), zuletzt geändert am 27. Juli 2001 (BGBl. I, S. 1950).

AGEB. 2004.

Tabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland von 1990 bis 2003. Stand 10/2004, Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, Berlin.

Kohlenwirtschaft. 2005.

Kohlenabsatz-Statistiken für Braunkohlen und Braunkohlenprodukte. Statistik der Kohlenwirtschaft e.V., Essen.

Merten, D.; Falkenberg, D.; Nill, M.; Kaltschmitt M. 2004.

Wärmegewinnung aus Biomasse. Anlagenband zum Abschlussbericht Energieverbrauch der privaten Haushalte und des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistung (GHD), Projektnummer 17/02. Leipzig 2004

Pfeiffer, F., Struschka, M. und Baumbach, G. 2000.

Ermittlung der mittleren Emissionsfaktoren zur Darstellung der Emissionsentwicklung aus Feuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben 295 46 364. Erschienen in der Reihe UBA-TEXTE als Nr. 14-00, Umweltbundesamt, Berlin.

Prognos. 1995.

Die Energiemärkte Deutschlands im zusammenwachsenden Europa - Perspektiven bis zum Jahr 2020. Bericht im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft. Prognos AG - Europäisches Zentrum für Wirtschaftsforschung und Strategieberatung, Basel, Schweiz.

GfK. 2005.

Der Festbrennstoffmarkt in Deutschland 2003, GfK, Nürnberg.

Struschka, M., Zuberbühler, U., Dreiseidler, A., Dreizler, D. und Baumbach, G, 2003.

Ermittlung und Evaluierung der Feinstaubemissionen aus Kleinf Feuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher sowie Ableitung von geeigneten Maßnahmen zur Emissionsminderung. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben 299 44 140. Erschienen in der Reihe UBA-TEXTE als Nr. 41-03, Umweltbundesamt, Berlin.