

# **EMISSION VON DIOXINEN, PCBs UND PAHs AUS KLEINFEUERUNGEN**

Gerhard Thanner  
Wolfgang Moche

MONOGRAPHIEN  
Band 153  
M-153

Wien, 2002

**Projektleitung**

Gundi Lorbeer

**Autoren**

Gerhard Thanner

Wolfgang Moche

**Analytik**

MitarbeiterInnen der Abteilungen Analytik II und III

**Probenahme**

Endre Bardossy

Wolfgang Moche

**Übersetzung**

Peter Futterknecht

**Layout**

Gerhard Thanner

**Titelbild**

Warmluft-Dauerbrandofen

**Dank**

Das Umweltbundesamt bedankt sich bei der Bundesbaudirektion Wien für die unentgeltliche Bereitstellung der Meßstelle in einem, zum Abriß vorgesehenen, Wohnhaus. Insbesondere gilt der Dank den Mitarbeitern der Gebäudeverwaltung GA 5 für die hilfreiche Zusammenarbeit vor Ort.

Weitere Informationen zu Publikationen des Umweltbundesamtes finden Sie unter: <http://www.ubavie.gv.at>

**Impressum**

Medieninhaber und Herausgeber: Umweltbundesamt GmbH (Federal Environment Agency Ltd)  
Spittelauer Lände 5, A-1090 Wien (Vienna), Austria

Druck: Riegelnik, A-1080 Wien

© Umweltbundesamt GmbH, Wien, 2002  
Alle Rechte vorbehalten (all rights reserved)  
ISBN 3-85457-625-0

## ZUSAMMENFASSUNG

Eine 1997 durchgeführte Reevaluierung nationaler Emissionsbilanzen europäischer Länder ergab, daß der Hausbrand, nach Müllverbrennungsanlagen mit 25.5 % und Sinteranlagen mit 17.6 % der drittgrößte Emittent von PCDD/F ist. In Österreich, wo die Müllverbrennung nur einen geringen Anteil an der Gesamtemission von Dioxinen hat, beträgt der Anteil des Hausbrandes ca. ein Drittel. Dieser Umstand läßt sich auch in den Ergebnissen der zahlreichen Immissionsmessungen des Umweltbundesamtes, die seit 1992 unter anderem in den Ballungsräumen Wien, Linz und Graz durchgeführt wurden, mitverfolgen. So ist mit Beginn der Heizperiode ein deutlicher Anstieg der Dioxinbelastung der Luft zu verzeichnen.

Das Umweltbundesamt hat erstmals 1996 PCDD/F-Emissionsmessungen an einem Heizkessel eines Einfamilienhauses und 1997 an einem Einzelofen durchgeführt. Dabei wurden die Öfen unter realen Heizbedingungen mit Kohle und als Vergleich mit Holz befeuert. Während die PCDD/F-Emissionskonzentrationen des Heizkessels deutlich unter 0.1 ng TEQ/Nm<sup>3</sup> (0 % O<sub>2</sub>) lagen, wurden im Rauchgas des Einzelofens bei Beheizung mit Kohle Werte im Bereich von 13.8 bis 87.2 ng TEQ/Nm<sup>3</sup> (0 % O<sub>2</sub>) gemessen. Diese Meßwerte lagen weit über jenen aus der Literatur bekannten PCDD/F-Emissionsdaten von Einzelöfen.

Das vorliegende Meßprogramm umfaßt Emissionsmessungen an drei unterschiedlichen Einzelöfen. Zum Einsatz kamen ein ca. 20 Jahre alter gußeiserner Koksofen (Typ2), ein 10 Jahre alter gußeiserner Kaminofen (Typ3) mit verglaster Feuerraumtüre und ein fabriksneuer Allesbrenner (Typ1) aus dem unteren Preissegment. Die Heizversuche wurden mit handelsüblichen Brennstoffen durchgeführt, wobei neben Kohle auch Koks und Holz verwendet wurde. Die Probenahmen beinhalten eine gesamte Ofenreise, das heißt sie beginnen mit der Anbrandphase und enden mit dem Ausklingen der Verbrennung. Im Rauchgas wurden Dioxine (PCDD/F), polychlorierte Biphenyle (PCB) und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH) bestimmt. Nach jedem Heizversuch wurde zudem der Kaminruß und die Ofenasche auf PCDD/F und PCB untersucht.

Die Ergebnisse des vorliegenden Projektes bestätigen die im Jahr 1997 in Versuchen des Umweltbundesamtes an einem mit Kohle befeuerten Einzelofen gemessenen hohen PCDD/F-Emissionskonzentrationen. Für die erstmals miterfasste Stoffgruppe der polychlorierten Biphenyle (PCB) ergaben die Messungen hingegen deutlich niedrigere Emissionskonzentrationen als die PCDD/F. Die PCB-Konzentrationen im Rauchgas, betragen weniger als 10 % der entsprechenden PCDD/F-Konzentrationen. Allerdings weist auch hier die Kohlefeuerung die weitaus höchsten, die Holzfeuerung die niedrigsten Emissionskonzentrationen auf.

Der Einfluß der Bauart des Ofens war besonders bei Kohlefeuerung deutlich zu erkennen. Es zeigte sich, daß bei Ofentypen der Kategorie Allesbrenner aus dem unteren Preissegment mit deutlich höheren Schadstoffemissionen zu rechnen ist.

Im Vergleich zu den im Rauchgas enthaltenen Mengen verbleibt nur eine geringe Menge an PCDD/F und PCB im Kaminruß und in der Ofenasche. Von den bei der Verbrennung entstehenden PCDD/F und PCB gehen über 90 % in die Emission, der Rest verbleibt überwiegend im Kaminruß und nur ein verschwindend kleiner Anteil in der Ofenasche.

Die Berechnungen von brennstoffspezifischen Emissionsfaktoren für die untersuchten Einzelöfen, siehe Tabelle 2, ergaben für PCDD/F-Emissionen bei Kohle- und Koksfeuerung ein den bekannten Literaturdaten widersprechendes Bild. Die Ergebnisse dieses Meßprogrammes liegen mit mittleren Emissionsfaktoren von 7.74 ng I-TEQ/MJ für Kohle und 1.47 ng I-TEQ/MJ für Koks auf einem zehnfach höheren Niveau als aus bisher veröffentlichten Meßdaten bekannt ist. Dahingegen entsprechen die Ergebnisse bei Holzfeuerung mit einem mittleren Emissionsfaktor von 0,32 ng I-TEQ/MJ den bekannten Literaturdaten.

Tab. 1: Emissionskonzentrationen von PCDD/F, PCB und PAH bei Kleinf Feuerungen

Brennstoff	PCDD/F	PCDD/F	PCB	PAH
	TEQ(I-TEF)	TEQ(WHO)	TEQ(WHO)	16-EPA
	ng/Nm <sup>3</sup> (0 % O <sub>2</sub> )	ng/Nm <sup>3</sup> (0 % O <sub>2</sub> )	ng/Nm <sup>3</sup> (0 % O <sub>2</sub> )	mg/Nm <sup>3</sup> (0 % O <sub>2</sub> )
Holz	0.1 – 2.0	0.1 – 2.0	0.01 – 0.08	0.4 – 7.8
Kohle	7.5 – 38.7	8.0 – 41.8	1.7 – 2.4	1.6 – 21.2
Koks	0.9 – 4.4	0.9 – 4.6	0.03 – 0.2	0.1 – 0.7

Tab. 2: Brennstoffspezifische Emissionsfaktoren für PCDD/F, PCB und PAH der untersuchten Einzelöfen

Brennstoff		PCDD/F	PCB		PAH	
		I-TEQ	WHO-TEQ	Σ Ballschmitter	Σ EPA	PAK4 UN-ECE
		ng/MJ	ng/MJ	ng/MJ	mg/GJ	mg/GJ
Holz		n=8	n=3	n=3	n=8	n=8
	Median	0.27	0.01	65.2	917.5	29.0
	Mittelwert	0.32	0.01	50.3	931.2	35.2
Kohle		n=8	n=2	n=2	n=8	n=8
	Median	8.80	0.51	64.0	1188.6	67.1
	Mittelwert	7.74	0.51	64.0	2295.1	145.4
Koks		n=4	n=4	n=4	n=2	n=2
	Median	1.53	0.06	82.0	350.0	13.4
	Mittelwert	1.47	0.06	81.1	350.0	13.4

Ein ähnliches Bild ergeben die Emissionskonzentrationen der PAH. Die Meßergebnisse weisen allerdings bei allen drei verwendeten Brennstoffen eine starke Streuung auf. Es zeigt sich dennoch, daß bei Kohlefeuerung mit den höchsten PAH-Emissionen zu rechnen ist. Sie liegen mit einem Mittelwert von 145.4 mg PAK4/GJ<sup>1</sup> deutlich höher, als jene bei Holzfeuerung mit 35.2 mg PAK4/GJ. Für die Koksfeuerung ergaben die Messungen 13.4 mg PAK4/GJ, wobei allerdings nur zwei Meßwerte der Auswertung zur Verfügung standen. Die Ergebnisse liegen damit bei Kohle- und Koksfeuerung in einem Bereich wie er aus der Literatur bekannt ist. Die Ergebnisse der Holzfeuerung liegen allerdings deutlich niedriger, als aus vergleichbaren Literaturdaten zu erwarten war.

Für die Emission von PCB aus Kleinf Feuerungen sind bis dato keine Vergleichsdaten aus der Literatur bekannt. Die Ergebnisse des Meßprogrammes des Umweltbundesamtes zeigen, daß der Beitrag der dioxinähnlichen PCB (PCB WHO-TEQ) zur Gesamtemission von POPs<sup>2</sup> bei Kleinf Feuerungen von untergeordneter Rolle ist.

Die Auswertungen des vorliegenden Meßprogrammes zeigen, daß bei Emissionsmessungen an Kleinf Feuerungsanlagen mit zum Teil sehr hohen Schwankungen der Versuchsergebnisse zu rechnen ist. Dies wird, wie die Erfahrungen aus den Probenahmen zeigen, hauptsächlich durch die kaum vorhandenen Regelungsmöglichkeiten der Feuerung verursacht. Die Probleme der Probenahme selbst liegen vorallem in der Realisierung der isokinetischen Probenahme. Die Rauchgasgeschwindigkeiten bei Kleinf Feuerungen liegen in der Anbrand- und Nachlegephase bei ca. 2 m/s und sinken in der Durchbrandphase auf 1 m/s, bei Koksfeue-

1 PAK4 Summe von vier ausgewählten PAH, gemäß dem UN-ECE Protokoll

2 POPs Persistent Organic Pollutants

zung zum Teil unter 0,6 m/s ab. Die Messungen von Rauchgasgeschwindigkeiten in diesem Bereich sind ohnehin schwierig und werden noch zusätzlich durch den hohen Ruß- und Staubgehalt erschwert. Eine nähere Betrachtung von Literaturdaten zeigt, daß selbst bei Prüfstandmessungen, bei denen konstante Zugverhältnisse im Kamin eingehalten werden konnten Meßwertschwankungen von bis zu 100 % beobachtet werden können(vgl. BRÖKER G., GEUEKE K.-J. & HIESTER E., 1992; GEUEKE K.-J., GESSNER A., HIESTER E., QUASS U. & BRÖKER G., 2000). Bei Feldmessungen an realen Anlagen unter „normalen“ Heizbedingungen können bei gleicher Ofentype und gleicher Brennstoffart diese Streuungen noch erheblich größer sein. So ergab eine Meßkampagne eines privaten Meßinstitutes (HÜBNER, C. & BOOS, R., 2000) an sieben holzbefeuerten Einzelöfen PCDD/F-Emissionskonzentrationen von 0,09 bis 9,0 ng I-TEQ/Nm<sup>3</sup>.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß im Lichte der Ergebnisse des vorliegenden Meßprogrammes weitere Messungen zur Neubewertung der PCDD/F-Emissionsfaktoren für Kohle- und Koksfeuerung in Einzelöfen notwendig sind. Für die Abschätzung der PCDD/F-Emissionen aus Holzfeuerungen ist die vorhandene Datenbasis hingegen ausreichend.

## SUMMARY

A reevaluation of national emission inventories performed in 1997 showed that domestic heating is the third largest source of PCDD/F emissions exceeded only by refuse incineration plants (25,5 %) and sintering plants (17,6). Refuse incineration is only of minor importance in this context in Austria so that domestic heating accounts for approximately one third of the overall dioxin emission. This is sufficiently documented in the results of numerous samples taken by the Austrian Federal Environmental Agency in the conurbations of Vienna, Graz and Linz since 1992. These investigations have shown a significant increase in the dioxin air pollution levels with the beginning of the domestic heating period.

In 1996 the Austrian Federal Environmental Agency conducted first measurements of PCDD/F levels in emissions from the heating boiler of a detached family house and in 1997 similar data was collected from a single solid fuel stove (furnace). Considering realistic heating conditions both systems were fuelled with coal and wood respectively for reasons of comparison. Emissions from the heating boiler showed PCDD/F-concentrations well below 0.1ng TEQ/Nm<sup>3</sup> (0 % O<sub>2</sub>) whereas the values obtained while burning coal in the small heating appliance were in the range of 13.8 to 87.2ng TEQ/Nm<sup>3</sup> (0 % O<sub>2</sub>). These latter values are significantly higher than comparable values found in literature.

This reassessment comprises emission measurements from three different types of solid fuel stoves. The appliances included in this experiments were a new low-budget stove suited for all types of solid fuel (type 1), an approx. 20 year old cast-iron stove for coke (type 2) and a cast-iron stove approx. ten years old (type 3). Measurements were conducted using coal and coke as well as wood whereby all fuel was of regularly retailed quality. The samples taken comprised a complete heating-cycle i.e. starting with the kindling of the fire until the fire had burnt out. The fumes were analysed for dioxins (PCDD/F) polychlorinated biphenyls (PCB) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH); the ashes and the chimney soot were sampled after completion of each heating cycle and analysed for PCDD/F and PCB.

The results obtained from this project confirm the high PCDD/F values from a study conducted by the Austrian Federal Environmental Agency in 1997 on the emissions of an individual domestic heater fuelled with coals. The measured concentrations of PCB - for which no comparable figures are available - were noticeably lower than the PCDD/F values. While heating with coal causes the highest discharge of pollutants and wood is the least polluting fuel examined, PCB concentrations were generally below 10 % of the corresponding PCDD/F values.

The differences in construction were particularly obvious when burning coal. The results showed that the newer low-budget (type 1) stoves emit a higher concentration of the examined pollutants.

Only a small amount of the PCDD/F and PCB formed during combustion of wood and fossil fuels is found in the ashes and chimney soot; over 90 % of these pollutants are present in the gaseous and aerosol by-products. The remainder is mainly accumulated in the soot while the ashes contain only insignificant amounts.

The evaluation of the obtained measurements for a specific type of fuel as shown in Table 2 are not in agreement with literature values for PCDD/F in the case of coal and coke. The results of this project show average emissions of 7.74ng I-TEQ/MJ for coal and 1.47 ng I-TEQ/MJ of coke. These values are about the tenfold of previously published data. The average value calculated for wood-fuelling amounting to 0.32ng I-TEQ/MJ is in good agreement with available literature.

Table 1: Concentrations of PCDD/F, PCB, PAH emitted by small-scale heating appliances

Fuel	PCDD/F TEQ(I-TEF)	PCDD/F TEQ(WHO)	PCB TEQ(WHO)	PAH 16-EPA
	ng/Nm <sup>3</sup> (0 % O <sub>2</sub> )	ng/Nm <sup>3</sup> (0 % O <sub>2</sub> )	ng/Nm <sup>3</sup> (0 % O <sub>2</sub> )	mg/Nm <sup>3</sup> (0 % O <sub>2</sub> )
Wood	0.1 – 2.0	0.1 – 2.1	0.01 – 0.08	0.4 – 7.8
Coal	7.5 – 38.7	8.0 – 41.8	1.7 – 2.4	1.6 – 21.2
Coke	0.9 – 4.4	0.9 – 4.6	0.03 – 0.2	0.1 – 0.7

Table 2: Fuel-specific evaluation of data on the emission of PCDD/F, PCB and PAH from the examined heating appliances

Fuel		PCDD/F	PCB		PAH	
		I-TEQ	WHO-TEQ	Σ Ballschmitter	Σ EPA	PAK4 UN-ECE
		ng/MJ	ng/MJ	ng/MJ	mg/GJ	mg/GJ
Wood	Median	n=8 0.27	n=3 0.01	n=3 65.2	n=8 917.5	n=8 29.0
	Average	0.32	0.01	50.3	931.2	35.2
Coal	Median	n=8 8.80	n=2 0.51	n=2 64.0	n=8 1188.6	n=8 67.1
	Average	7.74	0.51	64.0	2295.1	145.4
Coke	Median	n=4 1.53	n=4 0.06	n=4 82.0	n=2 350.0	n=2 13.4
	Average	1.47	0.06	81.1	350.0	13.4

Similar results were obtained for the concentrations of emitted PAH although the measured values have a high variation. Nevertheless the highest PAH emissions result when heating with coal and amount to 145.4 mg PAH4/GJ<sup>1</sup> which is a significantly higher value than 35.2 mg PAH4/GJ as calculated for wood. Measurements for coke resulted in 13.4 mg PAH4/GJ but only two measurements could be evaluated. The figures are within the range of published data for coal and coke while the value for PAH emission from burning wood is significantly lower than previously published data.

No comparable data concerning the emission of PCB from small-scale heating appliances could be found to date. This study performed by the Austrian Federal Environmental Agency showed that the contribution of dioxin-like PCB (PCB WHO-TEQ) to the overall emission of POPs<sup>2</sup> is of minor importance in the case of small-scale heating applications.

The evaluation of the presented project indicates that the measured emissions from small-scale heating appliances are subject to a high degree of variation. This circumstance can be put down to the fact that the possibilities for regulating these appliances is only very rough. Problems concerning the sampling technique for the experimental set-up lie mainly in the realisation of iso-kinetic sampling. The flue gas velocity of the investigated devices ranges from ca. 2 m/s during ignition and refuelling down to 1m/s during the burn-down phase when using coke it will even sink to below 0.6m/s. Determination of flue gas velocity is difficult on any terms in this particular range and is further impeded by the high share of soot and other particulate matter. An examination of published data reveals that even under controlled conditions

<sup>1</sup> PAH4 Sum of four individual PAH according to UN-ECE protocol

<sup>2</sup> POPs Persistent Organic Pollutants

predominating in test stands allowing for constant flue gas velocities measurements may vary by up to 100 % (cf. BRÖKER G., GEUEKE K-J: 6 HIESTER E., 1992; GESSNER A., HIESTER E., QUASS U. & BRÖKER G., 2000). Measurements in the field with real-life appliances running under 'normal' (i.e. realistic) conditions can yield substantially higher variations using the same type of stove and identical type of fuel. PCDD/F concentrations ranging from 0.09 to 9.0ng I-TEQ/MJ were recorded in a project surveying 7 individual wood-fuelled heating devices conducted by a private institute (HÜBNER, C. & BOOS, R., 2000).

In summary, one can say that in the light of the results presented by this investigation further data on this subject is necessary to reassess the factors concerning emission of PCDD/F for single heating units fuelled with coke and coal. The available data for wood-fuelled appliances is sufficient to enable decent estimates on PCDD/F emissions.



**INHALTSVERZEICHNIS**

<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>3</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>6</b>
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>11</b>
<b>2 MESSPROGRAMM .....</b>	<b>12</b>
2.1 Meßstelle .....	12
2.2 Brennstoffe.....	12
2.3 Ofentypen .....	12
2.4 Versuchsablauf .....	14
<b>3 DURCHFÜHRUNG .....</b>	<b>15</b>
3.1 Feuerungsführung .....	15
3.2 Emissionsprobenahme.....	15
3.3 Probenahme von Kamin- und Ofenaschen .....	16
3.4 Analytik.....	16
3.4.1 PCDD/F und PCB .....	16
3.4.2 PAH .....	16
<b>4 ERGEBNISSE .....</b>	<b>17</b>
4.1 Emissionen.....	18
4.2 Kaminruß und Ofenaschen .....	21
4.3 Emissionsfaktoren .....	27
<b>5 DISKUSSION .....</b>	<b>32</b>
<b>6 LITERATUR .....</b>	<b>34</b>
<b>ANHANG A. ERGEBNISTABELLEN.....</b>	<b>35</b>
<b>A.1 EMISSIONSKONZENTRATIONEN.....</b>	<b>36</b>
PCDD/F .....	36
PCB .....	44
PAH .....	48

<b>A.2 KAMINRUSS .....</b>	<b>55</b>
PCDD/F .....	55
PCB .....	62
<b>A.3 OFENASCHEN.....</b>	<b>69</b>
PCDD/F .....	69
PCB .....	76
<b>ANHANG B. RAUCHGASPARAMETER .....</b>	<b>83</b>

## 1 EINLEITUNG

Die Ergebnisse von nationalen und internationalen Dioxin-Emissionsbilanzen zeigen, dass der Hausbrand als ein maßgeblicher Mitverursacher der Dioxinbelastung der Umwelt einzustufen ist. Die Abschätzung der Emissionbilanz für Österreich, welche im Rahmen von CORINAIR 1994 von KÖNIG G., RADUNSKY K. & RITTER M. (1997) durchgeführt wurde, ergab einen Anteil des Hausbrandes von 28,6 % an den Gesamtemissionen von Dioxinen (PCDD/F). Eine Zusammenstellung und Reevaluierung aller europäischen PCDD/F-Emissionsbilanzen, durchgeführt von QUASS, U. & FERMANN, M. (1997), weist den Hausbrand mit einem Anteil von 16,4 % aus. Damit ist der Hausbrand, europaweit gesehen, nach Müllverbrennungsanlagen mit 25,5 % und Sinteranlagen mit 17,6 % der drittgrößte Emittent von PCDD/F.

Immissionsmessungen des Umweltbundesamtes, die seit 1992 in den Ballungsräumen Wien, Linz und Graz durchgeführt wurden, zeigten im Winter einen Anstieg der Dioxinkonzentrationen in der Luft um ein Vielfaches der im Sommer gemessenen Konzentrationen. Am Probenahmestandort Graz-Süd wurde beispielsweise im Sommer-halbjahr 1993 eine mittlere Dioxinkonzentration in der Luft von 28,4 fg TEQ/Nm<sup>3</sup> gemessen, während die mittlere Konzentration im Winterhalbjahr 1992/93 mit 221,6 fg TEQ/Nm<sup>3</sup> fast achtmal so hoch war (vgl.: THANNER G. & MOCHE W., 1994 und 1996). Die schlechten Luftaustauschverhältnisse während des Winters können diesen dramatischen Anstieg nur zum Teil erklären. Die Hauptursache des Anstiegs der Dioxinbelastung der Luft während des Winters ist eindeutig ein zeitlich begrenzt aktiver Emittent, nämlich der Hausbrand.

Das Umweltbundesamt hat erstmals 1996 PCDD/F-Emissionsmessungen an einem Heizkessel eines Einfamilienhauses durchgeführt. Dabei wurden bei Holzfeuerung PCDD/F-Rauchgaskonzentrationen im Bereich von 0,004 bis 0,018 ng TEQ/Nm<sup>3</sup> (0 %O<sub>2</sub>), bei Kohlefeuerung im Bereich von 0,017 bis 0,025 ng TEQ/Nm<sup>3</sup> (0 %O<sub>2</sub>) gemessen. Im Jahr 1997 wurden weitere Versuche mit dem Hauptaugenmerk auf dem Brennstoff Kohle durchgeführt. Dabei wurde unter realen Heizbedingungen ein Einzelofen mit Kohle und als Vergleich mit Holz befeuert. Die Messungen ergaben überraschend hohe PCDD/F-Emissionskonzentrationen bei Kohlefeuerung. Die gemessenen PCDD/F-Emissionen der Kohlefeuerungen lagen im Bereich von 13,8 bis 87,2 ng TEQ/Nm<sup>3</sup> (0 %O<sub>2</sub>). Die Vergleichsmessungen bei Holzfeuerung ergaben Konzentrationen von 0,2 bis 18,3 ng TEQ/Nm<sup>3</sup> (0 %O<sub>2</sub>), wobei die hohen Meßwerte vermutlich durch Verschleppungen aus den Versuchen mit Kohlefeuerung verursacht worden sind. Die Publikation dieser Daten, siehe MOCHE W. & THANNER G. (1998), führte zu kontroversen Diskussionen, da derart hohe PCDD/F-Emissionen bei Kohlefeuerung im Einzelofen bis dato nicht berichtet wurden.

Das vorliegende Projekt sollte der Absicherung der 1996 und 1997 gewonnenen Meßdaten dienen und zudem die Datenbasis verbreitern, indem verschiedene Ofentypen, befeuert mit verschiedenen Brennstoffen, untersucht wurden.

## 2 MESSPROGRAMM

### 2.1 Meßstelle

Die Probenahmen fanden in einem teilweise leerstehenden, dreistöckigen Wohnhaus, erbaut ca. 1900, in Wien statt. Der für die Versuche benutzte Kamin wurde vor Beginn des Meßprogrammes geschliffen um Memoryeffekte der vorhergehenden Benutzung ausschließen zu können.

Eine Wohnung im ersten Stock des Gebäudes diente als Aufstellungsort für die Öfen. Der Anschluß der Öfen an den Kamin erfolgte mit handelsüblichen Ofenrohren.

Am Dachboden des Gebäudes wurde die Probenahmestelle eingerichtet. Dazu wurde am Kamin eine speziell angefertigte Montageplatte angebracht, welche mit den passenden Stützen für die Probenahmesonden versehen war. Die Probenahmestelle am Kamin lag ca. 10 m über der Einmündungsstelle des Ofenrohres.

### 2.2 Brennstoffe

Die Brennstoffe, mit denen die Versuche durchgeführt wurden, wurden bei einem örtlichen Brennstoffhändler erworben. Die eingesetzten Brennstoffe waren wie folgt:

- Hartholz, Buche; ca. 25cm lange Scheite
- Steinkohle, laut Verpackung polnischen Ursprungs
- Koks, laut Verpackung „Ostrauer Koks“

Zum Anfachen des Feuers wurden Späne, hergestellt aus dem verwendeten Hartholz, und Zeitungspapier benutzt.

### 2.3 Ofentypen

Für das Meßprogramm wurden drei unterschiedliche Ofentypen ausgewählt. Die Abbildungen 1, 2 und 3 zeigen nicht maßstäbliche Skizzen der eingesetzten Ofenkonstruktionen.

**Ofen Typ-1** wurde eigens für das Meßprogramm angekauft. Er ist ein handelsüblicher Warmluft-Dauerbrandofen aus dem unteren Preissegment. Der Ofen ist laut Bedienungsanleitung für die Verfeuerung raucharmer Brennstoffe, wie Kohle, Koks und naturbelassenem, trockenem Holz geeignet. Die Luftzufuhr kann über einen seitlich angebrachten Regelknopf eingestellt werden. Die Einstellungsmöglichkeiten sind in Automatik und Handbetrieb unterteilt. Die fünfstufige Automatikregelung steuert die Luftzufuhr abhängig von der Ofentemperatur, während die dreistufige Handregelung fixe Luftklappenöffnungen vorgibt. Vor Beginn der Versuchsreihen wurde der Ofen zweimal für ca. vier Stunden mit Holz angeheizt, um das Nachtrocknen der Schutzlackierung zu ermöglichen.

**Ofen Typ-2** ist ein typischer gußeiserner Koksofen, der üblicherweise in einen kachelofenartigen Verbau eingemauert wird. Der Ofen war ca. 20 Jahre in Betrieb und wurde als Leihgabe zur Verfügung gestellt. Der Ofen war voll funktionsfähig, ohne erkennbare Schäden an der Schamottauskleidung.

**Ofen Typ-3** ist ein gußeiserner Kaminofen mit verglaster Feuerraumtür. Der Ofen ist hauptsächlich für die Verfeuerung von Holz gedacht, aber nach Herstellerangaben auch für Kohle und Koks geeignet. Der Ofen war seit 9 Jahren in Verwendung und wurde als Leihgabe zur Verfügung gestellt.

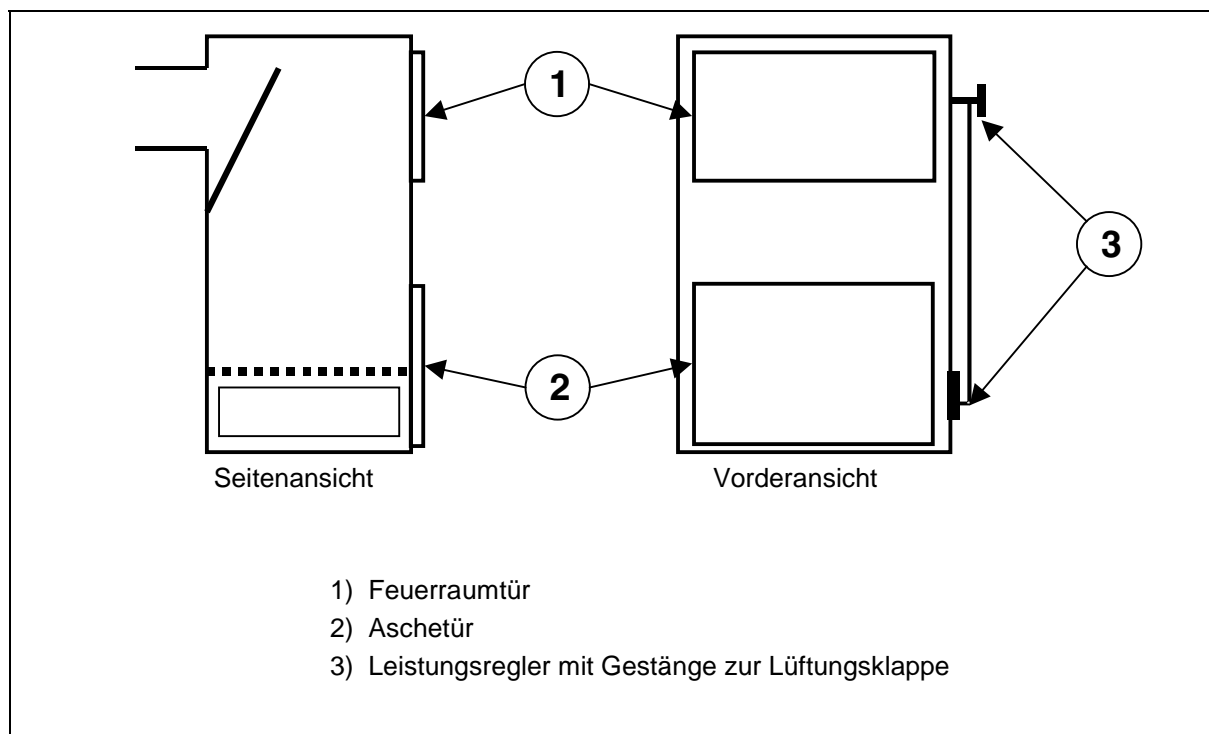


Abb. 1: Ofen Typ 1

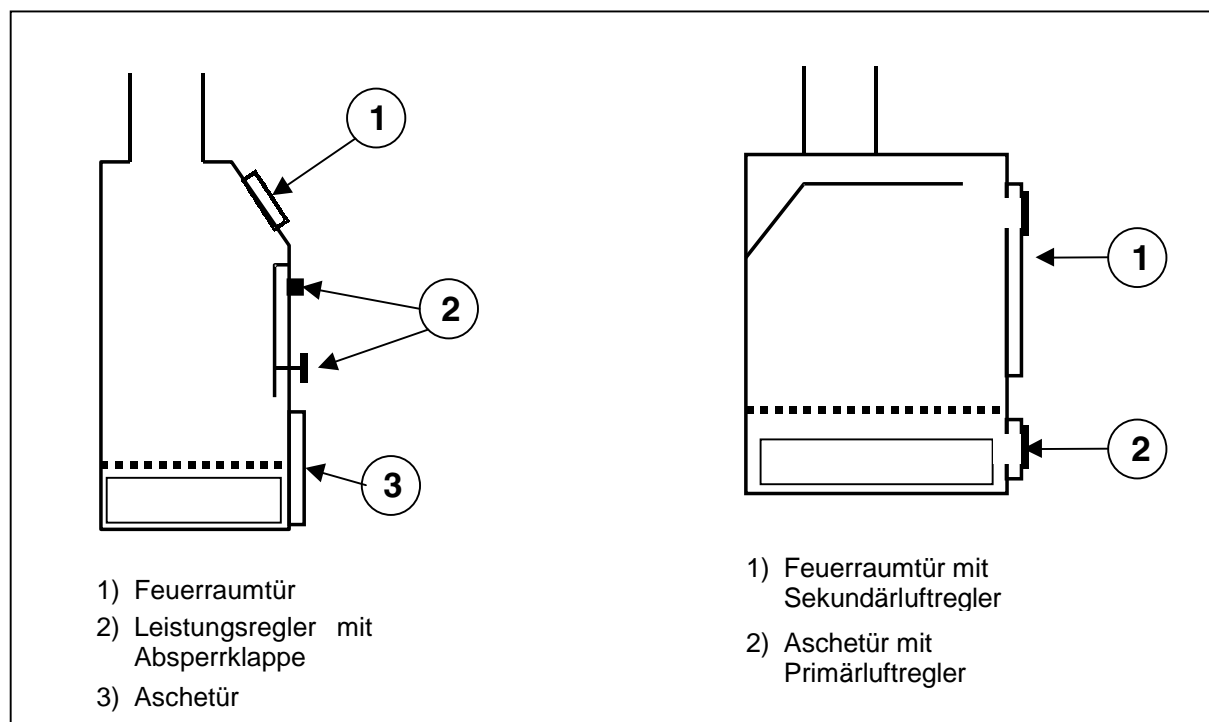


Abb. 2: Ofen Typ 2

Abb. 3: Ofen Typ 3

## 2.4 Versuchsablauf

Die Tabelle 1 gibt den chronologischen Ablauf der durchgeführten Versuche wieder. Die einzelnen Versuche sind dabei durch einen Laborcode gekennzeichnet.

Der Versuch WIM/1 diente der Überprüfung des Kamins und der Abnahme durch den Rauchfangkehrer.

Die Versuche wurden meist am Vormittag begonnen und dauerten durchschnittlich drei bis vier Stunden. Die Versuchsdauer hing dabei vom Probenahmevervolumen ab, welches mindestens 4 m<sup>3</sup> betragen sollte.

Ab Versuch WIM/4 wurde nach jedem Versuchsende der ausgekühlte Kamin von einem Rauchfangkehrer sorgfältig gekehrt, um Memoryeffekte der verschiedenen Brennstoffe weitgehend ausschließen zu können. Aus dem ausgekühlten Ofen wurde zudem nach jedem Versuch eine Ascheprobe gezogen.

Tab. 1: Chronologischer Versuchsablauf der Emissionsmessungen

Laborcode	Ofentyp	Brennstoff
WIM 2	Ofen TYP 1	Holz
WIM 3	Ofen TYP 1	Holz
WIM 4	Ofen TYP 1	Kohle
WIM 5	Ofen TYP 1	Kohle
WIM 6	Ofen TYP 1	Koks
WIM 7	Ofen TYP 1	Koks
WIM 8	Ofen TYP 2	Holz
WIM 9	Ofen TYP 2	Holz
WIM 10	Ofen TYP 2	Kohle
WIM 11	Ofen TYP 2	Kohle
WIM 12	Ofen TYP 2	Kohle
WIM 13	Ofen TYP 2	Koks
WIM 14	Ofen TYP 2	Koks
WIM 15	Ofen TYP 2	Holz
WIM 16	Ofen TYP 1	Holz
WIM 17	Ofen TYP 1	Kohle
WIM 18	Ofen TYP 1	Kohle
WIM 19	Ofen TYP 3	Holz
WIM 20	Ofen TYP 3	Holz
WIM 21	Ofen TYP 3	Kohle

### 3 DURCHFÜHRUNG

#### 3.1 Feuerungsführung

Das Feuer wurde mit Zeitungspapier, Buchenholzspänen und einer geringen Menge des jeweiligen Brennstoffes angefacht. Die eingesetzten Brennstoffmengen wurden vor Zugabe abgewogen und die Mengen protokolliert. Die Öfen wurden entsprechend den Herstellerangaben betrieben und so eingestellt, daß sie einem Betrieb unter Normallast entsprachen. Während der Probenahme wurde nach Bedarf nachgelegt, um eine möglichst kontinuierliche Brandphase zu erhalten. Bei den Versuchen mit Holzfeuerung mußte am häufigsten nachgelegt werden, insbesondere bei Ofen Typ 2 aufgrund des verhältnismäßig kleinen Feuer-raumes. Bei Koksfeuerung war es notwendig, mehrmals geringe Mengen an Brennstoff nachzulegen, um einen ausreichenden Abgasstrom zu erhalten.

#### 3.2 Emissionsprobenahme

Die Probenahme wurde in Anlehnung an die ÖNORM EN 1948 (1997) durchgeführt. Aufbauend auf Erfahrungen aus zwei Vorprojekten wurde zur Probenahme die Methode der gekühlten Sonde gewählt. Dabei wird das isokinetisch abgesaugte Rauchgas bereits in der Probenahmesonde bis knapp über dem Taupunkt abgekühlt. Die gasförmig vorliegenden PCDD/F werden in einer Impinger-Stufe und einer Polyurethanschaum-Stufe abgeschieden, wogegen die partikelgebundenen PCDD/F auf einem Quarzwollefilter und einem nachgeschalteten Planfilter abgeschieden werden. Die Abb. 4 zeigt den schematischen Aufbau der Probenahmeapparatur.

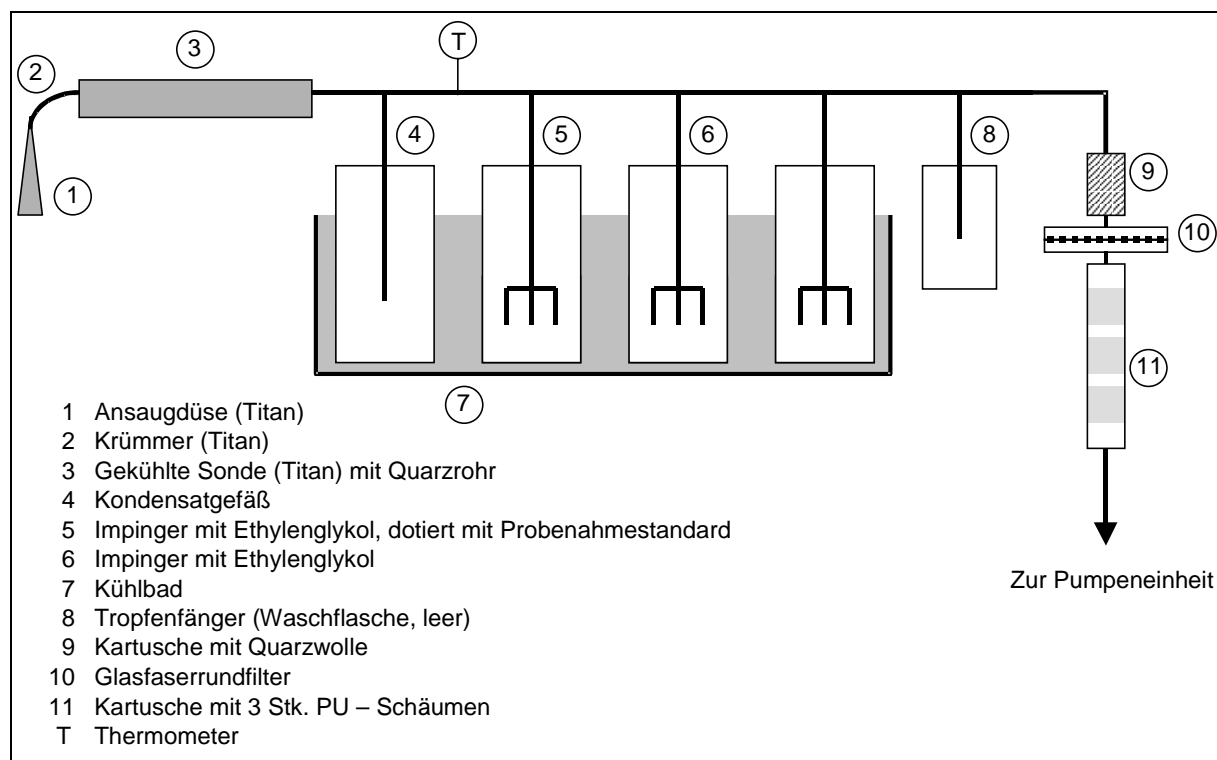


Abb. 4: Aufbau der Probenahmeapparatur nach Methode „gekühlte Sonde“

Während der PCDD/F-Probenahme wurden über einen separaten Probenahmestutzen die Rauchgaskonzentrationen an CO, CO<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> kontinuierlich gemessen und aufgezeichnet. Die grafische Darstellung dieser Meßergebnisse ist im Anhang B enthalten.

Die Rauchgasgeschwindigkeit wurde mit Hilfe eines Flügelradanemometers gemessen. Anhand dieser Meßwerte wurde die isokinetische Absaugung händisch eingeregelt. Bei stark rußhaltigen Rauchgasen, z. B. bei Kohlefeuerungen, konnte nur eine punktuelle Messung ca. alle zehn Minuten durchgeführt werden. Das Flügelradanemometer wurde vor und nach jeder Probenahme in einem eigens konstruierten Windkanal auf Richtigkeit der Meßwerte überprüft.

Die Probenahmen wurden kurz nach Anfachen des Feuers begonnen und dauerten bis zum Ausbrand der letzten eingesetzten Brennstoffcharge.

### **3.3 Probenahme von Kamin- und Ofenaschen**

Nach Beendigung des jeweiligen Heizversuches und dem Auskühlen des Ofens über Nacht wurde aus dem Feuerraum die Ofenasche quantitativ entnommen. Ebenso wurde nach der Kaminkehrung aus der Putzöffnung der Kaminruß quantitativ entnommen.

### **3.4 Analytik**

Die gesamte PCDD/F, PCB und PAH Analytik wurde im Labor des Umweltbundesamtes-Wien durchgeführt.

Die Emissionsprobenahmeapparatur wurde nach der Probenahme zerlegt und die Rauchgas führenden Teile (Sonde, Verbindungsstücke etc.) vor Ort mit Lösemittel gespült. Danach wurden im Labor die Impingerlösungen mit Toluol im Flüssig/Flüssig-Extraktor und die Filterstufen im Soxhlet-Extraktor extrahiert. Das erhaltene Extrakt wurde für die PAH und PCDD/F-PCB-Analytik geteilt.

Die Kamin- und Ofenaschen wurden im Soxhlet mit Toluol extrahiert.

#### **3.4.1 PCDD/F und PCB**

Die Bestimmung der PCDD/F und PCB-Gehalte wurde in Anlehnung an die ÖNORM EN 1948 (1997) nach der Isotopenverdünnungsmethode durchgeführt. Dabei wird die mit <sup>13</sup>C-markierten Standards versetzte Probe nach dem Extrahieren einer mehrstufigen säulenchromatographischen Aufreinigung unterzogen. Die so erhaltene Meßlösung wird danach mittels HRGC/HRMS vermessen und quantifiziert.

#### **3.4.2 PAH**

Die Bestimmung der PAH-Gehalte wurde ebenfalls nach der Isotopenverdünnungsmethode durchgeführt. Die Extrakte wurden einer Festphasenreinigung unterzogen und mittels HRGC/LRMS vermessen und quantifiziert. Die PAH wurden nur in den Emissionsproben bestimmt.



## 4 ERGEBNISSE

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurden insgesamt 20 Emissionsprobenahmen durchgeführt. Dabei wurden drei verschiedene Ofentypen mit jeweils Holz, Kohle und Koks befeuert und beprobt. Der Ofen Typ 3 konnte aus organisatorischen Gründen nur mit Holz und Kohle beprobt werden. Ab dem dritten Versuch wurden zudem nach jedem Versuch Kamin- und Ofenascheproben gezogen und analysiert.

In Tabelle 2 sind die wichtigsten Rahmenparameter der Versuchsdurchführung angegeben.

Tab. 2: Versuchparameter der Emissionsprobenahmen

Laborcode	Ofentyp	Brennstoff	PN-dauer	Brennstoff- verbrauch	PN-volumen	mittlerer O <sub>2</sub> - Gehalt im Rauchgas
			hh:mm	kg	Nm <sup>3</sup>	[%]
WIM 2	TYP 1	Holz	02:59	12.78	5.45	17.2
WIM 3	TYP 1	Holz	04:39	14.46	5.48	17.9
WIM 16	TYP 1	Holz	02:10	6.92	5.15	17.8
WIM 4	TYP 1	Kohle	04:52	5.28	5.43	17.9
WIM 5	TYP 1	Kohle	04:08	4.80	5.53	18.4
WIM 17	TYP 1	Kohle	03:40	4.24	5.35	18.2
WIM 18	TYP 1	Kohle	03:51	3.76	5.62	18
WIM 6	TYP 1	Koks	05:10	1.96	5.38	19.1
WIM 7	TYP 1	Koks	02:55	2.68	5.37	18.2
WIM 8	TYP 2	Holz	05:20	15.69	5.45	16.9
WIM 9	TYP 2	Holz	04:25	20.33	5.52	16.6
WIM 15	TYP 2	Holz	02:58	12.65	5.26	14.7
WIM 10	TYP 2	Kohle	03:35	7.22	5.41	17.1
WIM 11	TYP 2	Kohle	02:50	3.64	5.25	17.1
WIM 12	TYP 2	Kohle	02:57	5.65	5.47	17.1
WIM 13	TYP 2	Koks	03:23	3.04	5.55	18.2
WIM 14	TYP 2	Koks	05:30	2.72	5.31	16.6
WIM 19	TYP 3	Holz	04:00	10.56	5.34	16.3
WIM 20	TYP 3	Holz	03:50	11.72	5.39	16.1
WIM 21	TYP 3	Kohle	03:35	3.68	5.43	17.4

## 4.1 Emissionen

In allen Emissionsproben konnten die PCDD/F bestimmt werden. Die Tabelle 3 beinhaltet die Ergebnisse, angegeben als TEQ, berechnet nach dem I-TEF<sup>3</sup> Schema. Die Tabelle 4 beinhaltet die Ergebnisse berechnet nach dem 1997 von der WHO<sup>4</sup> vorgeschlagenen Schema.

Aufgrund von Problemen bei der Aufreinigung der zum Teil extrem verschmutzten Probenextrakte konnten insgesamt nur neun Emissionsproben auf PCB analysiert werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 als TEQ nach dem WHO<sup>1</sup> Schema und in Tabelle 6 als Summe der sechs Ballschmitter-Kongenere angegeben.

Die PAH-Konzentrationen konnten aufgrund analytischer Probleme in zwei Emissionsproben nicht bestimmt werden. Zusätzlich zu den 16 von der EPA vorgeschlagenen PAHs wurden weitere vier PAHs bestimmt. Die Tabelle 7 beinhaltet die Ergebnisse als Summe aller 20 bestimmten PAH und Tabelle 8 als Summe der EPA-PAH.

Die detaillierten Ergebnistabellen, welche die Einzelergebnisse aller bestimmten PCDD/F-, PCB- und PAH-Kongenere enthalten, sind im Anhang A enthalten.

Die Ergebnisse zeigen deutlich erhöhte PCDD/F-Emissionskonzentrationen bei Kohlefeuerung bei allen drei Ofentypen. Die gemessenen PCDD/F-Konzentrationen, im Bereich von 7.5 bis 38,7 ng TEQ (I-TEF, 0 % O<sub>2</sub>)/Nm<sup>3</sup>, liegen dabei um zum Teil mehr als das Zehnfache über jenen Werten die bei Holzfeuerung gemessen wurden. Selbst bei Koksfeuerungen betrug die höchste PCDD/F-Konzentration nur 4.4 ng TEQ (I-TEF, 0 % O<sub>2</sub>)/Nm<sup>3</sup>.

Der Einfluß des Ofentyps trat bei Kohlefeuerung am Deutlichsten hervor. Hier zeigte der Typ 1 die höchsten PCDD/F-Emissionen, der Typ 2 die zweithöchsten und Typ 3 die niedrigsten. Bei Holzfeuerung waren hingegen keine Unterschiede zwischen den Ofentypen zu erkennen. Alle drei Öfen lieferten Emissionskonzentrationen im Bereich von 0.1 bis 2.0 ng TEQ (I-TEF, 0 % O<sub>2</sub>)/Nm<sup>3</sup>.

Die Auswertung der PCDD/F-Homologenprofile ergab einen Anteil der Tetrachlor-Furane von 60 bis 70 % und der Pentachlor-furane von 10 bis 20 % an der Summe der PCDD/F. Die Anteile der höher chlorierten Furane sowie der Tetra- bis Octachlordioxine lagen unter 10 %. Es konnten keine signifikanten Abhängigkeiten der Homologenprofile von Brennstoff und Ofentyp festgestellt werden. Die Abbildung 5 zeigt exemplarisch das Homologenprofil der PCDD/F-Emissionen des Ofen Typ1 bei Kohlefeuerung.

Die Ergebnisse der PCB-Messungen zeigten ein ähnliches Bild wie die PCDD/F-Ergebnisse, allerdings ist nur für den Ofen Typ 1 ein vollständiger Datensatz verfügbar. Auch hier liegen die Emissionswerte bei Kohlefeuerung mit 1.65 bzw. 2.39 ng TEQ (WHO, 0 % O<sub>2</sub>) deutlich über jenen bei Holz- (0.01 bis 0.08 ng TEQ-WHO, 0 % O<sub>2</sub>) und Koksfeuerung (0.03 bis 0.19 ng TEQ-WHO, 0 % O<sub>2</sub>).

Weniger deutlich wird der Unterschied zwischen den Brennstoffen beim Vergleich der PCB-Emissionskonzentrationen, berechnet als  $\Sigma$ -Ballschmitter. Hierbei liegen die Konzentrationen bei Holz- und Kohlefeuerung mit durchschnittlich 250 ng TEQ (WHO, 0 % O<sub>2</sub>)/Nm<sup>3</sup> in einem ähnlichen Bereich, jene bei Koksfeuerung ca. 30 % darunter.

---

<sup>3</sup> North Atlantic Treaty Organization (NATO), Committee on the Challenges of Modern Society. *International Toxicity Equivalency Factor (I-TEF) Method of Risk Assessment for Complex Mixtures of Dioxins and Related Compounds*, Pilot study on international information exchange on dioxins and related compounds, Report No. 176, 1-26, 1988.

<sup>4</sup> M. Van den Berg, L. Birbaum, ATC. Bosveld, B. Brunström, et al. Toxic equivalency factors (TEFs) for PCBs, PCDDs, PCDFs for humans and wildlife. *Environ Health Perspect* 106:775-92, 1998.

Die PAH-Emissionskonzentrationen waren bei Kohlefeuerung mit 1.7 bis 22.2 mg  $\Sigma$  PAH/Nm<sup>3</sup> (0 % O<sub>2</sub>) deutlich höher als bei Holzfeuerung mit 0.4 bis 8.1 mg  $\Sigma$  PAH/Nm<sup>3</sup> (0 % O<sub>2</sub>). Die geringsten PAH-Emissionen zeigte die Koksfeuerung mit 0.1 bzw. 0.7 mg  $\Sigma$  PAH/Nm<sup>3</sup> (0 % O<sub>2</sub>). Allerdings sind für diesen Brennstoff nur Daten des Ofen Typ 2 verfügbar.

Tab. 3 PCDD/F-Konzentrationen angegeben als TEQ nach I-TEF

TEQ (I-TEF)	ng/Nm <sup>3</sup>			ng/Nm <sup>3</sup> (0 % O <sub>2</sub> )		
	Holz	Kohle	Koks	Holz	Kohle	Koks
Ofen: TYP 1	0.1	5.1	0.3	0.3	34.6	3.6
	0.01	4.8	0.6	0.1	38.7	4.4
	0.3	4.0		2.0	30.0	
		3.3			22.9	
Ofen: TYP 2	0.1	3.3	0.4	0.3	17.5	2.7
	0.3	1.5	0.2	1.5	7.9	0.9
	0.4	3.7		1.2	20.0	
Ofen: TYP 3	0.3	1.3		1.1	7.5	
	0.1			0.6		

Tab. 4: PCDD/F-Konzentrationen angegeben als TEQ nach WHO

TEQ (WHO)	ng/Nm <sup>3</sup>			ng/Nm <sup>3</sup> (0 % O <sub>2</sub> )		
	Holz	Kohle	Koks	Holz	Kohle	Koks
Ofen: TYP 1	0.1	5.4	0.4	0.3	36.7	3.9
	0.01	5.2	0.6	0.1	41.8	4.6
	0.3	4.3		2.1	32.5	
		3.5			24.7	
Ofen: TYP 2	0.1	3.4	0.4	0.4	18.5	2.9
	0.3	1.6	0.2	1.6	8.6	0.9
	0.4	4.0		1.2	21.4	
Ofen: TYP 3	0.3	1.4		1.2	8.0	
	0.1			0.6		

Tab. 5: PCB-Konzentrationen angegeben als TEQ nach WHO

TEQ (WHO)	ng/Nm <sup>3</sup>			ng/Nm <sup>3</sup> (0 % O <sub>2</sub> )		
	Holz	Kohle	Koks	Holz	Kohle	Koks
Ofen: TYP 1	0.01	0.24	0.02	0.04	1.65	0.17
	0.002	0.30	0.03	0.01	2.39	0.19
	0.01			0.08		
Ofen: TYP 2			0.01			0.09
			0.01			0.03
Ofen: TYP 3						

Tab. 6: PCB-Konzentrationen angegeben als  $\Sigma$ -Ballschmitter (6 Kongenere)

$\Sigma$ Ballschmitter	ng/Nm <sup>3</sup>			ng/Nm <sup>3</sup> (0 % O <sub>2</sub> )		
	Holz	Kohle	Koks	Holz	Kohle	Koks
Ofen: TYP 1	57.0	32.2	14.4	315.2	218.3	159.0
	8.8	36.1	13.0	59.4	291.3	97.7
	28.3			185.5		
Ofen: TYP 2			22.7			170.5
			25.3			120.6
Ofen: TYP 3						

Tab. 7: PAH-Konzentrationen angegeben als Summe aller 20 bestimmten Kongenere

$\Sigma$ PAH	ng/Nm <sup>3</sup>			ng/Nm <sup>3</sup> (0 % O <sub>2</sub> )		
	Holz	Kohle	Koks	Holz	Kohle	Koks
Ofen: TYP 1	0.08	0.43		0.43	2.92	
	0.25	0.20		1.72	1.65	
	0.25	0.28		1.63	2.08	
		0.29			2.01	
Ofen: TYP 2	0.37	1.12	0.01	1.87	6.03	0.10
	1.69	4.12	0.14	8.09	22.21	0.68
	0.84	1.22		2.81	6.57	
Ofen: TYP 3	0.94	0.67		4.19	3.90	
	0.65			2.78		

Tab. 8: PAH-Konzentrationen angegeben als Summe der 16 EPA-PAH

$\Sigma$ PAH (US EPA)	ng/Nm <sup>3</sup>			ng/Nm <sup>3</sup> (0 % O <sub>2</sub> )		
	Holz	Kohle	Koks	Holz	Kohle	Koks
Ofen: TYP 1	0.08	0.41		0.42	2.80	
	0.25	0.20		1.69	1.60	
	0.24	0.27		1.61	2.02	
		0.28			1.97	
Ofen: TYP 2	0.36	1.07	0.01	1.82	5.75	0.10
	1.64	3.93	0.14	7.83	21.17	0.67
	0.82	1.16		2.72	6.27	
Ofen: TYP 3	0.91	0.64		4.06	3.76	
	0.64			2.73		

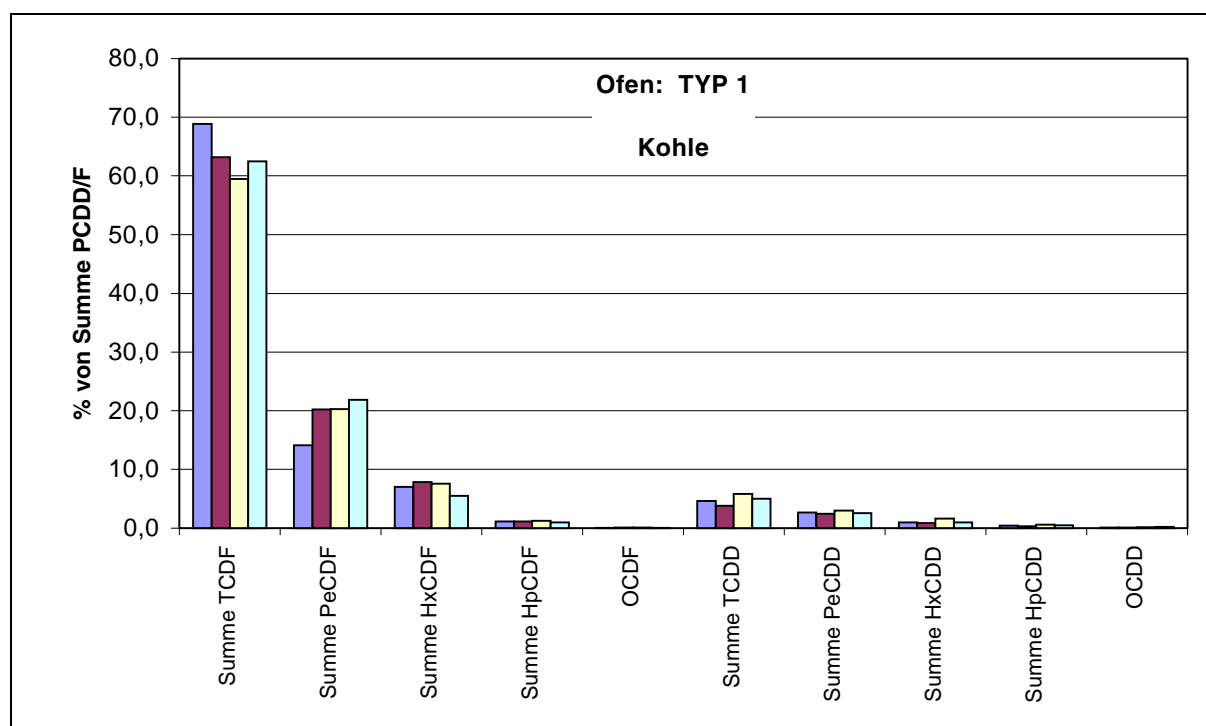


Abb. 5: Homologenprofil der PCDD/F-Emissionen des Ofen Typ 1 bei Kohlefeuerung; Ergebnisse von vier Versuchen

## 4.2 Kaminruß und Ofenaschen

Nach jedem Versuch wurde aus dem erkalteten Ofen die Asche quantitativ herausgekehrt und die Menge abgewogen. Zusätzlich wurde ab dem dritten Versuch (WIM/4) nach der erfolgten Kehrung der Ruß quantitativ herausgekehrt und ebenfalls abgewogen. Die erhaltenen Asche- bzw. Rußmengen sind in Tabelle 9 angegeben. Zudem ist die, während des Versuches eingesetzte, Brennstoffmenge angegeben.

In allen Kaminruß- und Ofenascheproben wurde der Gehalt an PCDD/F und PCB bestimmt. Auf die Bestimmung von PAH in den Proben wurde verzichtet.

Die Kaminruß- und Ofenaschenproben der Versuche WIM/19 und WIM/20 wurden von der Meßstelle, gemeinsam mit den Öfen und den Brennstoffproben, entwendet und standen der Analytik nicht zur Verfügung.

Aufgrund von Problemen bei der Probenaufbereitung konnten aus zwei Kaminrußproben weder PCDD/F noch PCB, aus einer weiteren Kaminrußprobe keine PCB analysiert werden.

In den Tabellen 10 bis 13 sind die Ergebnisse nach Ofentyp und Brennstoff geordnet dargestellt. Die PCDD/F-Ergebnisse sind analog zu den Emissionsergebnissen als TEQ, sowohl berechnet nach I-TEF als auch nach WHO, angegeben. Die PCB-Ergebnisse sind als TEQ nach WHO und als  $\Sigma$  Ballschmitter angegeben. Die Tabellen enthalten zudem die PCDD/F- bzw. PCB-Menge bezogen auf die Menge des eingesetzten Brennstoffes.

Die Meßergebnisse von Holz- und Koksfeuerung ergaben in den Ofenaschen relativ geringe PCDD/F-Konzentrationen im Bereich von 0.13 bis 3.49 ng TEQ(I-TEF)/kg. Bei Kohlefeuerung zeigte sich, daß insbesondere bei den Versuchen mit dem Ofen Typ 1 deutlich höhere PCDD/F-Konzentrationen zu beobachten waren. Hier lagen die PCDD/F-Konzentrationen in der Ofenasche bei Ofen Typ 1 im Bereich von 9.90 bis 42.93 ng TEQ(I-TEF)/kg, bei den Öfen Typ 2 und 3 im Bereich von 1.89 bis 12.63 ng TEQ(I-TEF)/kg.

Die Untersuchungen der Kaminrußproben ergaben stark streuende Gehalte an PCDD/F im Bereich von 107.94 bis 917.69 ng TEQ(I-TEF)/kg. Eindeutige Abhängigkeiten vom Ofentyp sind aus den vorliegenden Daten nicht abzuleiten, allerdings scheinen die Kaminruß- und Ofenascheproben bei Kohle/Koks-Feuerung tendenziell höher belastet zu sein, als bei Holzfeuerung.

Eine bayernweite Studie, durchgeführt von VIERLE O., THOMA H. und DUMLER-GRADL (1995) ergab für Einzelöfen, die mit Holz und Kohle im Mischbetrieb befeuert wurden, eine Belastung der Kaminrußproben im Bereich von 77 bis 10065 ng TEQ(I-TEF)/kg. Dabei lagen 35.7 % der Proben unter 1000 ng TEQ(I-TEF)/kg, wohingegen bei ausschließlicher Holzfeuerung 66.7 % der Meßwerte unter dieser Marke lagen. Die PCDD/F-Gehalte im Kaminruß, wie sie in der bayerischen Studie angeführt werden, sind tendenziell höher als im vorliegenden Meßprogramm ermittelt. Dabei ist aber zu bedenken, daß VIERLE O. et al. in ihrer Studie Haushalte beprobt haben, deren Hausbrandfeuerungen zehn oder mehr Jahre in Betrieb waren.

Die Auswertung der PCDD/F-Gehalte der Kaminruß- und Ofenaschegehalte bezogen auf die eingesetzte Brennstoffmenge ergab, daß bei Kohle und Koksfeuerung durchschnittlich Kaminruß mit ca. 5 ng TEQ(I-TEF) pro kg Brennstoff entsteht, bei Holzfeuerung durchschnittlich nur 1 ng TEQ(I-TEF) pro kg Brennstoff. Die brennstoffspezifischen PCDD/F-Gehalte der Ofenaschen liegen mit wenigen Ausnahmen deutlich unter 1 ng TEQ(I-TEF)/kg.

Die Auswertung der PCDD/F-Homologenprofile der Kaminrußproben ergab ein den Homologenmustern der Emissionsproben ähnliches Bild. Die Tetrachlorfurane mit 60 bis 70 % und die Pentachlorfurane mit 10 bis 20 % stellen den Hauptanteil an der Summe der PCDD/F. Abhängigkeiten von Brennstoff oder Ofentyp sind dabei nicht erkennbar. Deutlich unterschiedlich stellt sich die Homologenverteilung in den Ofenaschen dar. Hier ist eine deutliche Abhängigkeit vom Brennstoff erkennbar. Bei Holzfeuerung dominieren die Octadioxine mit einem Anteil von ca. 70 % das Homologenprofil, wohingegen bei Kohlefeuerung das Profil jenen der Emissions- bzw. Kaminrußproben gleicht. Bei Koksfeuerung nimmt der Anteil der PCDF von Tetrachlor- zu Octachlorhomologen ab, jener der PCDD nimmt von Tetrachlor- zu Octachlorhomologen zu. In Abbildung 6 sind die Homologenprofile der Ofenaschen bei Holz-, Kohle- sowie Koksfeuerung des Ofen Typ 1 dargestellt.

Die Ergebnisse der PCB-Analysen, zusammengefaßt in Tabelle 12 und Tabelle 13, zeigen ein ähnliches Bild wie die PCDD/F-Ergebnisse. Auch hier sind die Kaminruß- als auch die Ofenascheproben bei Kohle/Koksfeuerung tendenziell höher belastet, als jene bei Holzfeuerung. Signifikante Abhängigkeiten vom Ofentyp sind aber auch hier nicht zu erkennen. Bezogen auf den TEQ, berechnet nach dem WHO-Schema, zeigt sich, daß die Höhe der PCB-Konzentrationen in der Kaminruß nur ca. 5 % jener der PCDD/F-Konzentrationen betragen, wohingegen sie bei Ofenaschen im selben Konzentrationsbereich liegen. Vergleichsdaten bezüglich PCB-Gehalten von Kaminruß und Ofenaschen aus Hausbrandfeuerung sind aus der Fachliteratur keine bekannt.

Tab. 9: Aufstellung der angefallenen Kaminruß- und Ofenaschemengen

			Ruß-/Aschenmengen		Brennstoffver- brauch
			Kaminruß	Ofenasche	
Code	Ofentyp	Brennstoff	g	g	kg
Wim/2	Ofen Typ 1	Holz		101	12.78
Wim/3	Ofen Typ 1	Holz		149	14.46
Wim/16	Ofen Typ 1	Holz	28	121	6.92
Wim/8	Ofen Typ 2	Holz	42	229	15.69
Wim/9	Ofen Typ 2	Holz	52	300	20.33
Wim/15	Ofen Typ 2	Holz	13	161	12.65
Wim/4	Ofen Typ 1	Kohle		315	5.28
Wim/5	Ofen Typ 1	Kohle	164	354	4.80
Wim/17	Ofen Typ 1	Kohle	15	312	4.24
Wim/18	Ofen Typ 1	Kohle	12	277	3.76
Wim/10	Ofen Typ 2	Kohle	30	370	7.22
Wim/11	Ofen Typ 2	Kohle	35	572	3.64
Wim/12	Ofen Typ 2	Kohle	39	401	5.65
Wim/21	Ofen Typ 3	Kohle	21	301	3.68
Wim/6	Ofen Typ 1	Koks	121	205	1.96
Wim/7	Ofen Typ 1	Koks	44	229	2.68
Wim/13	Ofen Typ 2	Koks	19	307	3.04
Wim/14	Ofen Typ 2	Koks	16	433	2.72

Tab. 10: PCDD/F-Konzentrationen in Kaminruß und Ofenaschen und bezogen auf die Menge des eingesetzten Brennstoffes als TEQ nach I-TEF

Werte als TEQ (I-TEF)			PCDD/F-Gehalte		PCDD/F-Gehalte bezogen auf eingesetzte Brennstoffmenge	
			Kaminruß	Ofenaschen	Kaminruß	Ofenaschen
Code	Ofentyp	Brennstoff	ng/kg	ng/kg	ng/kg	ng/kg
Wim/2	Ofen Typ 1	Holz	n.a.	0.13		0.001
Wim/3	Ofen Typ 1	Holz	n.a.	0.23		0.002
Wim/16	Ofen Typ 1	Holz	555.38	1.56	2.25	0.03
Wim/8	Ofen Typ 2	Holz	381.05	0.73	1.02	0.01
Wim/9	Ofen Typ 2	Holz	237.74	0.23	0.61	0.003
Wim/15	Ofen Typ 2	Holz	648.80	0.33	0.67	0.004
Wim/4	Ofen Typ 1	Kohle	107.94	39.95		2.38
Wim/5	Ofen Typ 1	Kohle	169.85	9.90	5.80	0.73
Wim/17	Ofen Typ 1	Kohle	753.36	42.93	2.66	3.16
Wim/18	Ofen Typ 1	Kohle	595.11	24.39	1.90	1.80
Wim/10	Ofen Typ 2	Kohle	369.08	1.89	1.53	0.10
Wim/11	Ofen Typ 2	Kohle	612.45	12.63	5.89	1.98
Wim/12	Ofen Typ 2	Kohle	917.69	7.66	6.33	0.54
Wim/21	Ofen Typ 3	Kohle	673.14	7.01	3.48	0.57
Wim/6	Ofen Typ 1	Koks	291.25	3.49	17.96	0.36
Wim/7	Ofen Typ 1	Koks	285.07	0.87	4.68	0.07
Wim/13	Ofen Typ 2	Koks	743.16	0.68	4.64	0.07
Wim/14	Ofen Typ 2	Koks	655.65	1.12	3.86	0.18

Tab. 11: PCDD/F-Konzentrationen in Kaminruß und Ofenaschen und bezogen auf die Menge des eingesetzten Brennstoffes als TEQ nach WHO

Werte als TEQ (WHO)			PCDD/F-Gehalte		PCDD/F-Gehalte bezogen auf eingesetzte Brennstoffmenge	
			Kaminruß	Ofenaschen	Kaminruß	Ofenaschen
Code	Ofentyp	Brennstoff	ng/kg	ng/kg	ng/kg	ng/kg
Wim/2	Ofen Typ 1	Holz	n.a.	0.10		0.001
Wim/3	Ofen Typ 1	Holz	n.a.	0.14		0.001
Wim/16	Ofen Typ 1	Holz	592.02	1.55	2.39	0.03
Wim/8	Ofen Typ 2	Holz	407.50	0.71	1.09	0.01
Wim/9	Ofen Typ 2	Holz	254.01	0.22	0.65	0.003
Wim/15	Ofen Typ 2	Holz	695.57	0.31	0.71	0.004
Wim/4	Ofen Typ 1	Kohle	115.63	41.51		2.47
Wim/5	Ofen Typ 1	Kohle	181.91	10.30	6.21	0.76
Wim/17	Ofen Typ 1	Kohle	808.21	44.76	2.86	3.29
Wim/18	Ofen Typ 1	Kohle	636.01	25.41	2.03	1.87
Wim/10	Ofen Typ 2	Kohle	393.93	1.85	1.64	0.09
Wim/11	Ofen Typ 2	Kohle	656.49	13.11	6.31	2.06
Wim/12	Ofen Typ 2	Kohle	978.81	7.86	6.75	0.56
Wim/21	Ofen Typ 3	Kohle	738.75	7.29	4.21	0.60
Wim/6	Ofen Typ 1	Koks	310.10	3.46	19.12	0.36
Wim/7	Ofen Typ 1	Koks	304.23	0.85	4.99	0.07
Wim/13	Ofen Typ 2	Koks	797.51	0.65	4.98	0.07
Wim/14	Ofen Typ 2	Koks	704.63	1.21	4.15	0.19

Tab. 12: PCB-Konzentrationen in Kaminruß und Ofenaschen und bezogen auf die Menge des eingesetzten Brennstoffes als TEQ nach WHO

Werte als TEQ (WHO)			PCB-Gehalte		PCB-Gehalte bezogen auf eingesetzte Brennstoffmenge	
			Kaminruß	Ofenaschen	Kaminruß	Ofenaschen
Code	Ofentyp	Brennstoff	ng/kg	ng/kg	ng/kg	ng/kg
Wim/2	Ofen Typ 1	Holz	n.a.	0.23	n.a.	0.002
Wim/3	Ofen Typ 1	Holz	n.a.	0.23	n.a.	0.002
Wim/16	Ofen Typ 1	Holz	15.45	0.16	0.06	0.003
Wim/8	Ofen Typ 2	Holz	15.67	0.23	0.04	0.003
Wim/9	Ofen Typ 2	Holz	9.41	0.34	0.02	0.005
Wim/15	Ofen Typ 2	Holz	16.04	0.19	0.02	0.002
Wim/4	Ofen Typ 1	Kohle	5.20	0.80	n.a.	0.05
Wim/5	Ofen Typ 1	Kohle	7.04	0.25	0.24	0.02
Wim/17	Ofen Typ 1	Kohle	24.16	0.68	0.09	0.05
Wim/18	Ofen Typ 1	Kohle	19.12	0.29	0.06	0.02
Wim/10	Ofen Typ 2	Kohle	10.82	0.23	0.04	0.01
Wim/11	Ofen Typ 2	Kohle	n.a.	0.38	n.a.	0.06
Wim/12	Ofen Typ 2	Kohle	20.62	0.17	0.14	0.01
Wim/21	Ofen Typ 3	Kohle	38.02	0.28	0.22	0.02
Wim/6	Ofen Typ 1	Koks	11.51	0.25	0.71	0.03
Wim/7	Ofen Typ 1	Koks	12.52	0.22	0.21	0.02
Wim/13	Ofen Typ 2	Koks	19.82	0.19	0.12	0.02
Wim/14	Ofen Typ 2	Koks	18.32	0.17	0.11	0.03



Tab. 13: PCB-Konzentrationen in Kaminruß und Ofenaschen und bezogen auf die Menge des eingesetzten Brennstoffes als  $\Sigma$  Ballschmitter

Werte als $\Sigma$ Ballschmitter			PCB-Gehalte		PCB-Gehalte bezogen auf eingesetzte Brennstoffmenge	
			Kaminruß	Ofenaschen	Kaminruß	Ofenaschen
Code	Ofentyp	Brennstoff	ng/kg	ng/kg	ng/kg	ng/kg
Wim/2	Ofen Typ 1	Holz	n.a.	1721		13.600
Wim/3	Ofen Typ 1	Holz	n.a.	1670		17.206
Wim/16	Ofen Typ 1	Holz	10504	3173	42.48	55.46
Wim/8	Ofen Typ 2	Holz	10732	2990	28.73	43.64
Wim/9	Ofen Typ 2	Holz	8231	5078	21.06	74.940
Wim/15	Ofen Typ 2	Holz	11024	3130	11.33	39.825
Wim/4	Ofen Typ 1	Kohle	4859	2096		125.00
Wim/5	Ofen Typ 1	Kohle	6120	2295	208.98	169.15
Wim/17	Ofen Typ 1	Kohle	11499	2194	40.67	161.44
Wim/18	Ofen Typ 1	Kohle	11101	3979	35.40	292.94
Wim/10	Ofen Typ 2	Kohle	12348	1935	51.32	99.21
Wim/11	Ofen Typ 2	Kohle	n.a.	2866	n.a.	450.30
Wim/12	Ofen Typ 2	Kohle	9956	2237	68.70	158.71
Wim/21	Ofen Typ 3	Kohle	21510	3443	122.62	281.31
Wim/6	Ofen Typ 1	Koks	5806	2586	358.08	270.23
Wim/7	Ofen Typ 1	Koks	6125	2271	100.53	194.00
Wim/13	Ofen Typ 2	Koks	13409	2183	83.75	220.32
Wim/14	Ofen Typ 2	Koks	16080	2495	94.69	397.57

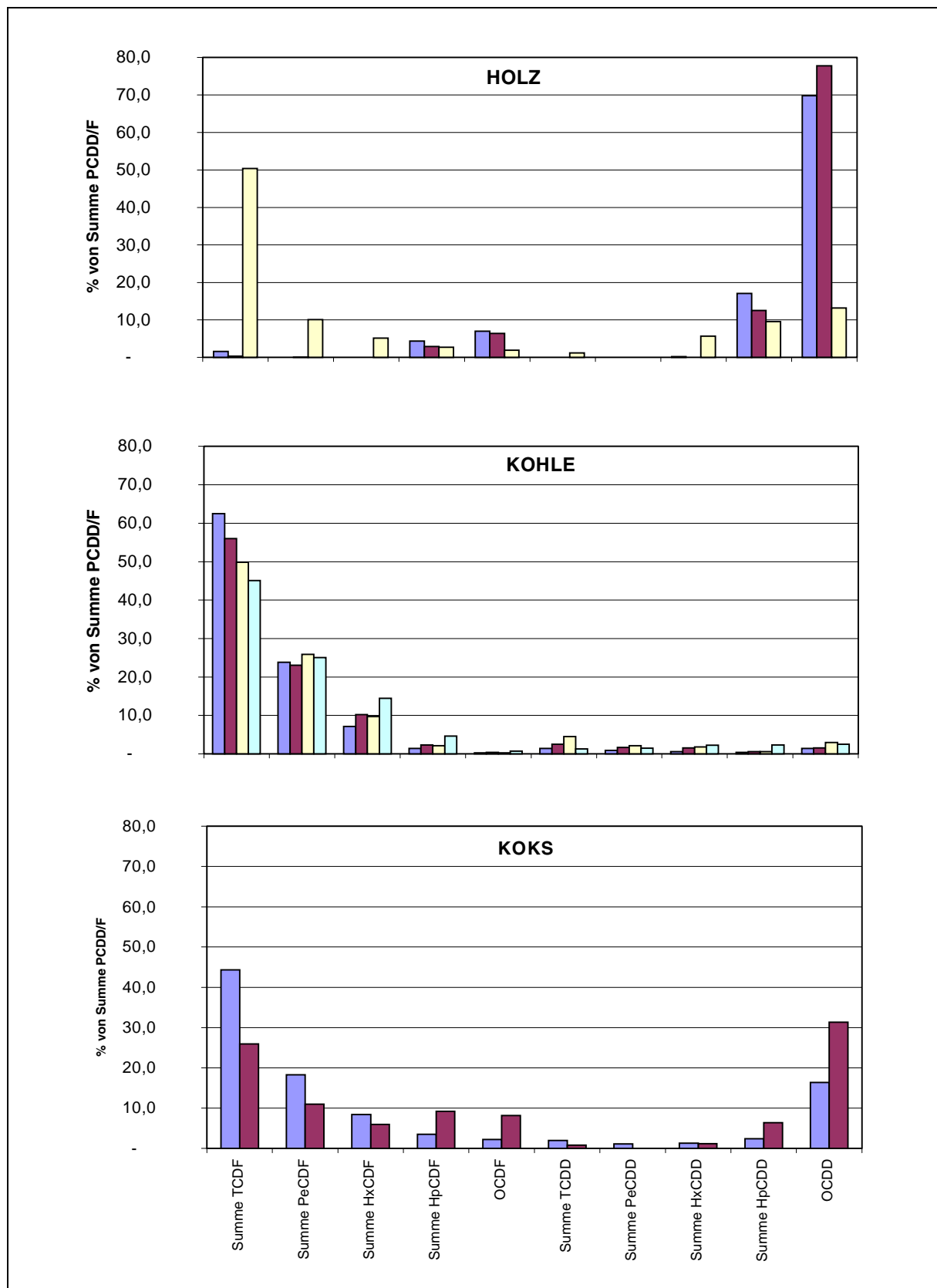


Abb. 6: PCDD/F-Homologenprofile von Ofenaschen des Ofen Typ 1 bei Feuerung mit Holz, Kohle und Koks

### 4.3 Emissionsfaktoren

Aus den gemessenen PCDD/F-, PCB- und PAH-Emissionskonzentrationen wurden für jeden Versuch Emissionsfaktoren berechnet. Die Emissionsfaktoren, die aus diesen Versuchen abgeleitet wurden, gelten streng genommen nur für die untersuchten Öfen und die eingesetzten Brennstoffe. Für die Berechnung wurden zwei vereinfachte Methoden angewendet.

Die erste Methode geht davon aus, daß die Probenahme vollständig isokinetisch durchgeführt werden konnte. Damit läßt sich über das Flächenverhältnis zwischen Kaminquerschnitt und Absaugdüsenquerschnitt, dem Probenahmenvolumen, der eingesetzten Brennstoffmenge und der Emissionskonzentration der Emissionsfaktor berechnen. Die Gleichung (1) zeigt den Rechengang.

$$EF = \frac{\frac{\text{Düsenfläche}}{\text{Kaminfläche}} \times PN - \text{Volumen} \times \text{Abgaskonzentration}}{\text{Brennstoffverbrauch}}$$

Gleichung 1: Methode „Isokinetik“

Bei der zweiten Methode werden die spezifischen Abgasvolumina der verschiedenen Brennstoffe herangezogen und mit den auf 0 % O<sub>2</sub> normierten Emissionskonzentrationen multipliziert. Die brennstoffspezifischen Abgasvolumina wurden aus der Literatur entnommen (NETZ H., 1982 zitiert nach BRÖKER G., GEUEKE K.-J. & HIESTER E.;1992). Der Rechengang ist in Gleichung (2) dargestellt.

$$EF = \text{Abgaskonzentration}(0\%O_2) \times \text{spez.Volumen}$$

Gleichung 2: Methode „spezifisches Abgasvolumen“

Die Tabellen 3 bis 8 enthalten die für die Berechnungen herangezogenen Emissionsdaten. In Tabelle 14 sind die für die Berechnung nach beiden Methoden zusätzlich benötigten Daten enthalten.

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in den Tabellen 15 bis 18 zusammengefasst. Die nach der zweiten Methode berechneten Emissionsfaktoren sind in Klammern angegeben. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse nach beiden Rechenmodellen. Die größten Abweichungen sind bei Koksfeuerung zu beobachten. Dies erklärt sich durch die, bei Koksfeuerung relativ geringen Abgasgeschwindigkeiten von 0.6 bis maximal 1.1 m/s (Anbrandphase), welche an der unteren Grenze des Meßbereiches des eingesetzten Flügelradanemometers lagen.

Bei Holz- und Kohlefeuerung konnten Abgasgeschwindigkeiten im Bereich von 1 bis 2 m/s beobachtet werden. In diesem Meßbereich ist eine isokinetische Probenahme mit ausreichender Meßgenauigkeit durchführbar.

Die höchsten PCDD/F-Emissionsfaktoren wurden für die Kohlefeuerungen berechnet. Die Emissionsfaktoren liegen dabei in einem Bereich von 90.49 bis 338.75 ng TEQ(I-TEF)/kg. Deutlich ist dabei auch ein Unterschied der Ofentypen zu erkennen. Die PCDD/F-Emissionsfaktoren des Ofens Typ 1 liegen deutlich über jenen der anderen zwei Ofentypen.

Bei Holz- und Koksfeuerung sind hingegen keine Einflüsse des Ofentyps zu erkennen. Die PCDD/F-Emissionsfaktoren für Holz liegen im Bereich von 0.24 bis 10.68 ng TEQ(I-TEF)/kg, für Koks zwischen 24.38 und 56.41 ng TEQ(I-TEF)/kg.

Die PCB-Emissionsfaktoren zeigen ein ähnliches Bild wie es für die PCDD/F beobachtet wurde. Die Emissionsfaktoren für Kohle liegen mit 0.98 bis 16.40 ng TEQ(WHO)/kg deutlich über jenen für Koks (1.65 bis 2.05 ng TEQ(WHO)/kg) und Holz (0.03 bis 0.19 ng TEQ(WHO)/kg). Einflüsse des Ofentyps auf die Emission von PCB können aufgrund der geringeren Datenlage nicht abgeleitet werden.

Die PAH-Emissionsfaktoren zeigen insofern ein abweichendes Bild, daß der Ofentyp 1 die geringsten Emissionswerte aufweist. Allerdings sind auch hier für alle Ofentypen die höchsten Emissionsfaktoren bei Kohlefeuerung zu beobachten, wo sie im Bereich von 11.31 bis 285.67 mg  $\Sigma$  PAH/kg liegen. Für Holzfeuerung wurden Emissionsfaktoren von 1.52 bis 31.81 mg  $\Sigma$  PAH/kg und für Koksfeuerung von 1.65 bzw. 18.74 mg  $\Sigma$  PAH/kg berechnet.

Tab. 14: Parameter für die Berechnung der Emissionsfaktoren nach Methode „Isokinetik“ und Methode „spezifisches Abgasvolumen“

Code	Ofentyp	Brennstoff			PN-Volumen Nm <sup>3</sup>	Kaminfl. cm <sup>2</sup>	Ø Düse mm	Düsenfl. cm <sup>2</sup>	Düsenfl./ Kaminfl.
		Art	spez. Vol.	Verbrauch					
			m <sup>3</sup> /kg	kg					
WIM 2	Typ 1	Holz	5.6	12.78	5.45	255	26	5.31	0.0208
WIM 3	Typ 1	Holz	5.6	14.46	5.48	255	26	5.31	0.0208
WIM 16	Typ 1	Holz	5.6	6.92	5.15	255	26	5.31	0.0208
WIM 8	Typ 2	Holz	5.6	15.69	5.45	255	26	5.31	0.0208
WIM 9	Typ 2	Holz	5.6	20.33	5.52	255	26	5.31	0.0208
WIM 15	Typ 2	Holz	5.6	12.65	5.26	255	22	3.80	0.0149
WIM 19	Typ 3	Holz	5.6	10.56	5.34	255	22	3.80	0.0149
WIM 20	Typ 3	Holz	5.6	11.72	5.39	255	22	3.80	0.0149
WIM 4	Typ 1	Kohle	8.43	5.28	5.43	255	26	5.31	0.0208
WIM 5	Typ 1	Kohle	8.43	4.80	5.53	255	26	5.31	0.0208
WIM 17	Typ 1	Kohle	8.43	4.24	5.35	255	22	3.80	0.0149
WIM 18	Typ 1	Kohle	8.43	3.76	5.62	255	22	3.80	0.0149
WIM 10	Typ 2	Kohle	8.43	7.22	5.41	255	26	5.31	0.0208
WIM 11	Typ 2	Kohle	8.43	3.64	5.25	255	26	5.31	0.0208
WIM 12	Typ 2	Kohle	8.43	5.65	5.47	255	22	3.80	0.0149
WIM 21	Typ 3	Kohle	8.43	3.68	5.43	255	26	5.31	0.0208
WIM 6	Typ 1	Koks	7.7	1.96	5.38	255	26	5.31	0.0208
WIM 7	Typ 1	Koks	7.7	2.68	5.37	255	26	5.31	0.0208
WIM 13	Typ 2	Koks	7.7	3.04	5.55	255	22	3.80	0.0149
WIM 14	Typ 2	Koks	7.7	2.72	5.31	255	22	3.80	0.0149

Tab. 15: PCDD/F-Emissionsfaktoren, berechnet nach Methode „Isokinetik“ und „spezifisches Abgasvolumen“ (Werte in Klammern)

Ofentyp	Brennstoff	PCDD/F-Emissionsfaktor			
		TEQ (I-TEF)		TEQ (WHO)	
		ng/kg		ng/kg	
Ofen Typ 1	Holz	1.03	(1.56)	1.11	(1.68)
Ofen Typ 1	Holz	0.24	(0.50)	0.26	(0.53)
Ofen Typ 1	Holz	10.68	(10.98)	11.42	(11.74)
Ofen Typ 2	Holz	1.13	(1.94)	1.22	(2.09)
Ofen Typ 2	Holz	4.07	(8.35)	4.32	(8.85)
Ofen Typ 2	Holz	9.77	(6.54)	10.31	(6.90)
Ofen Typ 3	Holz	8.49	(6.26)	8.90	(6.57)
Ofen Typ 3	Holz	4.17	(3.24)	4.44	(3.45)
Ofen Typ 1	Kohle	251.67	(291.36)	267.08	(309.20)
Ofen Typ 1	Kohle	265.02	(326.06)	286.64	(352.65)
Ofen Typ 1	Kohle	338.75	(253.28)	366.15	(273.77)
Ofen Typ 1	Kohle	327.67	(193.13)	352.64	(207.84)
Ofen Typ 2	Kohle	117.21	(147.67)	123.80	(155.98)
Ofen Typ 2	Kohle	101.84	(66.74)	110.14	(72.18)
Ofen Typ 2	Kohle	241.32	(168.88)	257.53	(180.22)
Ofen Typ 3	Kohle	90.49	(62.88)	96.59	(67.13)
Ofen Typ 1	Koks	42.66	(27.58)	46.40	(30.00)
Ofen Typ 1	Koks	56.41	(33.88)	59.52	(35.74)
Ofen Typ 2	Koks	44.45	(20.97)	47.31	(22.32)
Ofen Typ 2	Koks	24.38	(6.83)	26.05	(7.30)

Tab. 16: PCB-Emissionsfaktoren, berechnet nach Methode „Isokinetik“ und „spezifisches Abgasvolumen“ (Werte in Klammern)

Ofentyp	Brennstoff	PCB-Emissionsfaktor			
		TEQ (WHO)		Σ Ballschmitter	
		ng/kg		ng/kg	
Ofen Typ 1	Holz	0.14	(0.21)	1167.53	(1765.01)
Ofen Typ 1	Holz	0.03	(0.06)	159.77	(332.79)
Ofen Typ 1	Holz	0.41	(0.43)	1010.73	(1038.70)
Ofen Typ 2	Holz				
Ofen Typ 2	Holz				
Ofen Typ 2	Holz				
Ofen Typ 3	Holz				
Ofen Typ 3	Holz				
Ofen Typ 1	Kohle	12.02	(13.92)	1589.61	(1840.33)
Ofen Typ 1	Kohle	16.40	(20.18)	1996.06	(2455.74)
Ofen Typ 1	Kohle				
Ofen Typ 1	Kohle				
Ofen Typ 2	Kohle				
Ofen Typ 2	Kohle				
Ofen Typ 2	Kohle				
Ofen Typ 3	Kohle				
Ofen Typ 1	Koks	2.05	(1.32)	1893.11	(1223.97)
Ofen Typ 1	Koks	2.44	(1.47)	1252.84	(752.32)
Ofen Typ 2	Koks	1.54	(0.73)	2782.77	(1312.97)
Ofen Typ 2	Koks	0.89	(0.25)	3312.17	(928.56)

Tab. 17: PAH-Emissionsfaktoren, berechnet nach Methode „Isokinetik“ und „spezifisches Abgasvolumen“ (Werte in Klammern)

Ofentyp	Brennstoff	PAH-Emissionsfaktor			
		Σ PAH		Σ PAH (16-EPA)	
		mg/kg		mg/kg	
Ofen Typ 1	Holz	1.6	(2.4)	1.6	(2.4)
Ofen Typ 1	Holz	4.6	(9.6)	4.5	(9.4)
Ofen Typ 1	Holz	8.9	(9.1)	8.8	(9.0)
Ofen Typ 2	Holz	6.1	(10.5)	5.9	(10.2)
Ofen Typ 2	Holz	22.1	(45.3)	21.4	(43.8)
Ofen Typ 2	Holz	23.5	(15.8)	22.8	(15.2)
Ofen Typ 3	Holz	31.8	(23.5)	30.8	(22.8)
Ofen Typ 3	Holz	20.0	(15.6)	19.7	(15.3)
Ofen Typ 1	Kohle	21.3	(24.6)	20.4	(23.6)
Ofen Typ 1	Kohle	11.3	(13.9)	10.9	(13.5)
Ofen Typ 1	Kohle	23.4	(17.5)	22.8	(17.0)
Ofen Typ 1	Kohle	28.7	(16.9)	28.1	(16.6)
Ofen Typ 2	Kohle	40.3	(50.8)	38.4	(48.4)
Ofen Typ 2	Kohle	285.7	(187.2)	272.3	(178.4)
Ofen Typ 2	Kohle	79.1	(55.4)	75.5	(52.9)
Ofen Typ 3	Kohle	47.3	(32.9)	45.6	(31.7)
Ofen Typ 1	Koks				
Ofen Typ 1	Koks				
Ofen Typ 2	Koks	1.7	(0.8)	1.6	(0.8)
Ofen Typ 2	Koks	18.7	(5.3)	18.3	(5.1)

Tab. 18: Mittlere Emissionsfaktoren für Einzelofenheizung, berechnet nach Methode „Isokinetik“

	PCDD/F	PCB	PCB	PAH
	TEQ (I-TEF)	TEQ (WHO)	Σ Ballschmitter	Σ EPA
	ng/kg	ng/kg	ng/kg	mg/kg
Kohle	216.7	9.8	5975.7	64.3
Koks	42.0	2.0	6126.3	10.0
Holz	4.9	0.1	2032.3	14.4

Zum besseren Vergleich mit Literaturdaten wurden die berechneten Emissionsfaktoren, bezogen auf Brennstoffmenge, zusätzlich auf energiespezifische Emissionsfaktoren umgerechnet. Die für diese Umrechnung benötigten Heizwerte der eingesetzten Brennstoffe wurden der Literatur entnommen, da zum Zeitpunkt der Auswertung die Originalbrennstoffe für eine Untersuchung nicht mehr zur Verfügung standen. Die verwendeten Heizwerte sind der Tabelle 19 zu entnehmen.

Für die PAH-Emissionswerte wurde zusätzlich der, in internationalen Emissionsbilanzen übliche, PAK4-Wert nach dem UN-ECE-Protokoll berechnet. Der PAK4-Wert ist die Summe der Emissionskonzentrationen von vier ausgewählten PAH, nämlich Benzo(b)fluoroanthen, Benzo(k)fluoroanthen, Benz(a)pyren und Indeno(1,2,3-c,d)pyren.

In Tabelle 20 sind die Einzelwerte der energiespezifischen Emissionsfaktoren, geordnet nach Brennstoff und Ofentyp, für die analysierten Schadstoffe angegeben. Zusätzlich sind die Mittelwerte und Mediane je Brennstoff angegeben.

Tab. 19: Heizwerte ausgewählter Brennstoffe (Literaturangaben)

Brennstoff	Heizwert [MJ/kg]
Holz	15,5
Kohle	28
Koks	28,5

Tab. 20: Brennstoffspezifische Emissionsfaktoren für PCDD/F, PCB und PAH

Ofentyp	Brennstoff	PCDD/F	PCB		PAH	
		I-TEQ ng/MJ	WHO-TEQ ng/MJ	Σ Ballschmitter ng/MJ	Σ EPA mg/GJ	PAK4 UN-ECE mg/GJ
Ofen Typ 1	Holz	0.07	0.01	75.3	100.5	3.0
Ofen Typ 1	Holz	0.02	0.002	10.3	292.7	6.4
Ofen Typ 1	Holz	0.69	0.03	65.2	564.7	13.0
Ofen Typ 2	Holz	0.07			382.7	13.9
Ofen Typ 2	Holz	0.26			1379.1	55.8
Ofen Typ 2	Holz	0.63			1470.3	46.8
Ofen Typ 3	Holz	0.55			1989.6	98.7
Ofen Typ 3	Holz	0.27			1270.3	44.2
Ofen Typ 1	Kohle	8.99	0.43	56.8	728.9	50.2
Ofen Typ 1	Kohle	9.47	0.59	71.3	390.6	23.4
Ofen Typ 1	Kohle	12.10			813.5	40.1
Ofen Typ 1	Kohle	11.70			1004.1	50.0
Ofen Typ 2	Kohle	4.19			1373.0	87.8
Ofen Typ 2	Kohle	3.64			9724.9	647.3
Ofen Typ 2	Kohle	8.62			2697.6	180.1
Ofen Typ 3	Kohle	3.23			1628.0	83.9
Ofen Typ 1	Koks	1.50	0.07	66.4		
Ofen Typ 1	Koks	1.98	0.09	44.0		
Ofen Typ 2	Koks	1.56	0.05	97.6	57.1	1.5
Ofen Typ 2	Koks	0.86	0.03	116.2	642.8	25.2
Holz		n=8	n=3	n=3	n=8	n=8
	Median	0.27	0.01	65.2	917.5	29.0
	Mittelwert	0.32	0.01	50.3	931.2	35.2
Kohle		n=8	n=2	n=2	n=8	n=8
	Median	8.80	0.51	64.0	1188.6	67.1
	Mittelwert	7.74	0.51	64.0	2295.1	145.4
Koks		n=4	n=4	n=4	n=2	n=2
	Median	1.53	0.06	82.0	350.0	13.4
	Mittelwert	1.47	0.06	81.1	350.0	13.4

## 5 DISKUSSION

Die Ergebnisse des vorliegenden Projektes bestätigen die im Jahr 1997 in Versuchen des Umweltbundesamtes (MOCHE W. & THANNER G., 1998) an einem mit Kohle befeuerten Einzelofen gewonnenen Emissionsdaten. Die Meßwerte ergaben damals PCDD/F-Emissionskonzentrationen im Bereich von 13.8 bis 87.2 ng TEQ(I-TEF)/Nm<sup>3</sup>. Sie lagen damit weit über den aus der Literatur bekannten Daten. So berichteten BRÖKER G., GEUEKE K.-J. & HIESTER E. (1992) bei Kohlefeuerung von PCDD/F-Emissionskonzentrationen im Bereich von 0.04 bis 0.62 ng TEQ(I-TEF)/Nm<sup>3</sup>. Selbst neueste Literaturdaten, siehe dazu GEUEKE K.-J. et al. (2000) berichten von PCDD/F-Emissionskonzentrationen von Kohle befeuerten Einzelöfen im Bereich von 0.5 bis 3.1 ng TEQ(I-TEF)/Nm<sup>3</sup>. Im Vergleich dazu liegen die jüngsten Ergebnisse des Umweltbundesamtes im Bereich von 7.5 bis 38.7 ng TEQ(I-TEF)/Nm<sup>3</sup> bei Kohlefeuerung.

Die Ergebnisse bei Holzfeuerung mit PCDD/F-Emissionskonzentrationen von 0.1 bis 2.0 ng TEQ(I-TEF)/Nm<sup>3</sup> liegen, im Gegensatz zu den Ergebnissen der Kohlefeuerung, durchaus in einem Bereich der in der Literatur berichtet wird. So ergab eine Untersuchung eines privaten Meßinstitutes im Jahre 1997/98 an verschiedenen, mit Holz befeuerten, Dauerbrandöfen und Küchenherden in Österreich Emissionswerte im Bereich von 0.09 bis 9.0 ng TEQ(I-TEF)/Nm<sup>3</sup>.

Eine mögliche Erklärung für die Unterschiede zwischen den Meßwerten des Umweltbundesamtes und Literaturdaten könnte darin liegen, daß bei den Versuchen des Umweltbundesamtes die Anbrandphase bewußt mitbeprobte wurde. Dabei konnte insbesondere bei Kohle/Koks-Feuerung beobachtet werden, daß während der ersten Minuten der Anbrandphase das Abgas sehr hohe Anteile an Ruß und teerähnlichen Substanzen enthält. Da bei diesen Bedingungen die Abgasgeschwindigkeit mit herkömmlichen Methoden sehr schwierig zu messen ist, wählen viele Probenehmer eine überkinetische Probenahme mit Absauggeschwindigkeiten von 3 bis 4 m/s. Im vorliegenden Meßprogramm wurde dennoch eine isokinetische Probenahme angestrebt. Das dabei eingesetzte Flügelradanemometer ermöglichte bei gewissenhafter Benutzung, selbst unter den schweren Bedingungen der Kohlefeuerung, eine ausreichend genaue Messung der Abgasgeschwindigkeit.

Diese Versuchsführung wurde gewählt, weil gerade Einzelöfen, welche der Wohnraumbeheizung dienen, nicht über einen längeren Zeitraum bei gleichbleibender Last betrieben werden. Der übliche Gebrauch eines Einzelofens liegt im täglichen Anfachen des Feuers, in einer über einige Stunden währenden starken Heizphase und einer Abklingphase üblicherweise in den Abend- und Nachtstunden. Diesen Betrieb nachzustellen, war das Ziel des vorliegenden Projektes.

Der Einfluß der Bauart des Ofens war besonders bei Kohlefeuerung deutlich zu erkennen. Es zeigte sich, daß bei Ofentypen der Kategorie Allesbrenner aus dem unteren Preissegment mit deutlich höheren Schadstoffemissionen zu rechnen ist.

Im Vergleich zu den im Rauchgas enthaltenen Mengen verbleibt nur eine geringe Menge an PCDD/F im Kaminruß und in der Ofenasche. So ist bei Kohlefeuerung mit PCDD/F-Emissionen im Bereich von 100 bis 300 ng TEQ(I-TEF)/kg zu rechnen, während im Kaminruß ca. 5 ng TEQ(I-TEF)/kg und in der Ofenasche ca. 1 ng TEQ(I-TEF)/kg verbleiben.

Die Berechnungen der PCDD/F-Emissionsfaktoren aus den vorliegenden Meßergebnissen ergaben für Kohle- und Koksfeuerung ein den bekannten Literaturdaten widersprechendes Bild. So geht eine vom Umweltbundesamt in Auftrag gegebene Studie (UMWELTBUNDESAMT, 2001) von einem Emissionsfaktor von 0.75 ng I-TEQ(I-TEF)/MJ für Holz-, Kohle- und Koksfeuerung in Einzelöfen aus. Die Ergebnisse dieses Meßprogrammes ergeben hingegen mittlere Emissionsfaktoren von 7.74 ng I-TEQ(I-TEF)/MJ für Kohle und 1.47 ng I-TEQ(I-TEF)/MJ für Koks und liegen damit bis zu einem Faktor zehn darüber. Dahingegen lassen die Ergebnisse bei Holzfeuerung mit einem mittleren Emissionsfaktor von 0.32 ng I-TEQ(I-TEF)/MJ die Angaben in oben erwähnter Studie plausibel erscheinen.



Die Stoffgruppe der polychlorierten Biphenyle (PCB) zeigt beim Hausbrand wesentlich niedrigere Emissionskonzentrationen als die PCDD/F. Die PCB-Konzentrationen im Rauchgas, berechnet nach WHO, betragen weniger als 10 % der zugehörigen PCDD/F-Werte. Allerdings weist auch hier die Kohlefeuerung mit 1.65 bzw. 2.39 ng TEQ(WHO)/Nm<sup>3</sup> die weitaus höchsten, die Holzfeuerung mit 0.01 bis 0.08 ng TEQ(WHO)/Nm<sup>3</sup> die niedrigsten Emissionskonzentrationen auf. Die Emissionsfaktoren für PCB liegen damit für Holz deutlich unter 1 ng TEQ(WHO)/kg, für Koks in der Größenordnung von 2ng TEQ(WHO)/kg und für Kohle im Bereich von 12 bis 16 ng TEQ(WHO)/kg. Verglichen mit den Rauchgaskonzentrationen verbleibt nur ein geringer Anteil der bei der Verbrennung entstandenen PCB im Kaminruß und in der Ofenasche zurück. So betragen die PCB-Gehalte bezogen auf die eingesetzte Brennstoffmenge im Kaminruß zwischen 0.02 und 0.71 ng TEQ(WHO)/kg und in der Ofenasche 0.002 bis 0.06 ng TEQ(WHO)/kg.

Im vorliegenden Meßprogramm wurden zusätzlich zu PCDD/F und PCB auch die Emissionskonzentrationen der PAH erfaßt. Die gemessenen Konzentrationen, berechnet als  $\Sigma$  PAH nach EPA, lagen für Holz im Bereich von 0.4 bis 7.8 mg/Nm<sup>3</sup>, für Koks bei 0.1 bzw. 0.7 mg/Nm<sup>3</sup> und für Kohle im Bereich von 1.6 bis 21.2 mg/Nm<sup>3</sup>. Die daraus berechneten Emissionsfaktoren betragen 1.6 bis 30.8 mg/kg für Holz, 1.6 bzw. 18.3 mg/kg für Koks und 10.9 bis 272.3 mg/kg für Kohle. Im Vergleich mit bisher aus Literaturdaten bekannten Emissionsfaktoren, wie sie für die kürzlich fertiggestellte Emissionsinventur für Österreich (UMWELTBUNDESAMT, 2001) verwendet wurden, liegen die PAH-Emissionswerte dieses Meßprogrammes für Kohle und Koks in einem ähnlichen Bereich, jedoch für Holz um den Faktor fünf tiefer.

Die Ergebnisse des vorliegenden Meßprogrammes zeigen, daß bei Emissionsmessungen an Kleinfeuerungsanlagen mit zum Teil sehr hohen Schwankungen der Versuchsergebnisse zu rechnen ist. Dies ist aus den Erfahrungen der Probenahme hauptsächlich in den kaum vorhandenen Regelungsmöglichkeiten der Feuerung begründet. Die Probleme der Probenahme selbst liegen vor allem in der Realisierung der isokinetischen Probenahme. Die Rauchgasgeschwindigkeiten bei Kleinfeuerungen liegen in der Anbrand- und Nachlegephase bei 2 m/s und sinken in der Durchbrandphase auf 1 m/s, bei Koksfeuerung zum Teil unter 0,6 m/s ab. Die Messungen von Rauchgasgeschwindigkeiten in diesem Bereich sind ohnehin schwierig und werden noch zusätzlich durch den hohen Ruß- und Staubgehalt erschwert. Eine nähere Betrachtung von Literaturdaten zeigt, daß selbst bei Prüfstandmessungen, bei denen konstante Zugverhältnisse im Kamin eingehalten werden konnten, Meßwertschwankungen von bis zu 100 % beobachtet werden können (vgl. BRÖKER G., GEUEKE K.-J. & HIESTER E., 1992; GEUEKE K.-J., GESSNER A., HIESTER E., QUASS U. & BRÖKER G., 2000). Bei Emissionsmessungen an realen Anlagen unter „normalen“ Heizbedingungen können bei gleicher Ofentyp und gleicher Brennstoffart diese Streuungen noch erheblich größer sein. So ergab eine Meßkampagne eines privaten Meßinstitutes an sieben holzbefeuerten Einzelöfen PCDD/F-Emissionskonzentrationen von 0.09 bis 9.0 ng I-TEQ/Nm<sup>3</sup> (HÜBNER, C. & BOOS, R., 2000).

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß im Lichte der Ergebnisse des vorliegenden Meßprogrammes weitere Messungen zur Neubewertung der PCDD/F-Emissionsfaktoren für Kohle- und Koksfeuerung in Einzelöfen notwendig sind. Für die Abschätzung der PCDD/F-Emissionen aus Holzfeuerungen ist die vorhandene Datenbasis hingegen ausreichend.

## 6 LITERATUR

- BRÖKER G., GEUEKE K.-J. & HIESTER E. (1992): Emission polychlorierter Dibenzo-p-dioxine und -furane aus Hausbrand-Feuerungen. LIS-Berichte Nr. 103, Landesanstalt für Immissionsschutz Nordrhein-Westfalen.
- EPA (1997): Locating and Estimating Air Emissions from Sources of Polyaromatic Organic Matter (POM). U.S. Environmental Protection Agency, September 1997.
- GEUEKE K.-J., GESSNER A., HIESTER E., QUASS U. & BRÖKER G. (2000): The DG ENV European Dioxin Emission Inventory – Stage II: Elevated Emissions of Dioxins and Furans from Domestic Single Stove Coal Combustion. *Organohalogen Compounds*, Vol. 46, 272-275.
- HÜBNER, C. & BOOS, R. (2000): PCDD/F-Emissionen aus mit Festbrennstoffen betriebenen Kleinf Feuerungsanlagen (<=50 kW) der urbanen und ländlichen Haushalte. FTU – Forschungsgemeinschaft Technischer Umweltschutz GmbH, August 2000.
- KÖNIG G., RADUNSKY K. & RITTER M. (1997): Austrian Air Emission Inventory 1994. Reports R-140, Umweltbundesamt-Wien.
- MOCHE W. & THANNER G. (1998): PCDD/F-Emissions from Coal Combustion in Small Residential Plants. *Organohalogen Compounds*, Vol. 36, 329-332.
- ÖNORM EN 1948-1 (1997): Emissionen aus stationären Quellen, Bestimmung der Massenkonzentrationen von PCDD/F; Teil 1: Probenahme.
- ÖNORM EN 1948-2 (1997): Emissionen aus stationären Quellen, Bestimmung der Massenkonzentrationen von PCDD/F; Teil 2: Extraktion und Reinigung.
- ÖNORM EN 1948-3 (1997): Emissionen aus stationären Quellen, Bestimmung der Massenkonzentrationen von PCDD/F; Teil 3: Identifizierung und Quantifizierung.
- UMWELTBUNDESAMT (2001): Österreichische Emissionsinventur für POPs 1985-1999. Interne Berichte IB-650, Umweltbundesamt-Wien.
- ÖSTAT (1998): Energieverbrauch der Haushalte 1996/97. Ergebnisse des Mikrozensus, Juni 1997. Beiträge zur österreichischen Statistik, Heft Nr. 1.279, ÖSTAT – Österreichisches Statistisches Zentralamt.
- QUASS, U. & FERMANN, M. (1997): Identification of Relevant Industrial Sources of Dioxins and Furans in Europe. Materialien No. 43; Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen.
- THANNER G. & MOCHE W. (1994): Dioxine in der Luft von Ballungsräumen; Meßergebnisse aus Graz, Linz, Steyregg und Wien, Teil 1. Monographie, Bd. 50; Umweltbundesamt.
- THANNER G. & MOCHE W. (1996): Dioxine in der Luft von Ballungsräumen; Meßergebnisse aus Graz, Linz, Steyregg und Wien, Teil 2. Monographie, Bd. 76; Umweltbundesamt.
- VIERLE O., THOMA H. & DUMLER-GRADL (1995): Ergebnisse des bayernweiten Untersuchungsprogramms über Dioxin- und Furangehalte im Ruß von Hausbrandfeuerungen. Tätigkeitsbericht 1994, 210-213, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz.

## Anhang A. Ergebnistabellen

Im folgenden sind die detaillierten Einzelergebnisse der PCDD/F-, PCB- und PAH-Analysen angegeben. Die Meßergebnisse sind nach Ofentyp und Brennstoff geordnet. Zur Einordnung in den Meßplan, siehe dazu Kapitel 2.4, sind die Tabellen mit den entsprechenden Laborcodes gekennzeichnet.

Die Emissionskonzentrationen sind auf Normkubikmeter bezogen angegeben (0 °C, 1013 hPa) und **nicht** auf 0 % O<sub>2</sub> umgerechnet.

Die Konzentrationsangaben der Kamin- und Ofenaschen beziehen sich auf die lufttrockene Probe.

**A.1 Emissionskonzentrationen****PCDD/F**

Ofen Typ-1, Brennstoff: Holz

Versuch	WIM/2	WIM/3	WIM/16
2378-Isomere	pg/Nm <sup>3</sup>	pg/Nm <sup>3</sup>	pg/Nm <sup>3</sup>
2378-TCDD	8.40	3.40	55.80
12378-PeCDD	7.70	1.50	41.50
123478-HxCDD	2.20	n.n.	9.60
123678-HxCDD	2.90	1.10	13.10
123789-HxCDD	2.00	n.n.	11.70
1234678-HpCDD	12.00	4.80	40.20
OCDD	32.60	16.70	94.90
Summe TCDD	171.10	36.10	832.20
Summe PeCDD	98.50	13.20	300.30
Summe HxCDD	38.90	8.80	153.20
Summe HpCDD	29.80	27.40	84.60
2378-TCDF	131.20	39.40	647.80
12378-PeCDF	32.10	8.00	216.50
23478-PeCDF	38.70	7.90	232.30
123478-HxCDF	13.30	2.90	78.50
123678-HxCDF	10.40	1.80	97.30
234678-HxCDF	7.40	1.90	71.30
123789-HxCDF	0.60	n.n.	4.40
1234678-HpCDF	10.90	3.00	127.70
1234789-HpCDF	1.10	n.n.	9.70
OCDF	5.30	6.30	28.10
Summe TCDF	1131.50	354.70	9833.30
Summe PeCDF	363.20	67.60	2590.20
Summe HxCDF	117.40	21.30	828.10
Summe HpCDF	16.00	6.30	187.20
<b>Summe PCDD</b>	<b>370.90</b>	<b>102.20</b>	<b>1465.20</b>
<b>Summe PCDF</b>	<b>1633.40</b>	<b>456.20</b>	<b>13466.90</b>
<b>Summe PCDD/PCDF</b>	<b>2004.30</b>	<b>558.40</b>	<b>14932.10</b>
<b>Summe 2378-Isomere</b>	<b>318.80</b>	<b>98.70</b>	<b>1780.40</b>
<b>TEQ (ITEF)</b>	<b>50.48</b>	<b>13.31</b>	<b>298.79</b>
<b>TEQ (WHO)</b>	<b>54.30</b>	<b>14.04</b>	<b>319.43</b>

## Ofen Typ-1, Brennstoff: Kohle

Versuch	WIM/4	WIM/5	WIM/17	WIM/18
2378-Isomere	pg/Nm <sup>3</sup>	pg/Nm <sup>3</sup>	pg/Nm <sup>3</sup>	pg/Nm <sup>3</sup>
2378-TCDD	742.80	705.60	646.20	375.60
12378-PeCDD	625.50	781.70	648.70	499.40
123478-HxCDD	208.10	168.40	152.10	104.10
123678-HxCDD	221.40	136.80	200.10	151.50
123789-HxCDD	180.60	152.20	149.10	102.10
1234678-HpCDD	604.20	376.90	392.50	321.70
OCDD	250.40	158.80	259.00	297.10
Summe TCDD	10158.20	7645.10	8210.10	7244.20
Summe PeCDD	5863.70	4903.10	4250.10	3698.90
Summe HxCDD	2134.00	1750.30	2313.50	1411.00
Summe HpCDD	938.30	666.90	859.20	666.50
2378-TCDF	10213.80	10185.70	7863.70	7145.10
12378-PeCDF	4477.10	4149.30	3153.30	2872.70
23478-PeCDF	4433.90	3842.60	3406.10	3007.90
123478-HxCDF	2053.20	1824.80	1117.70	889.20
123678-HxCDF	1627.80	1674.10	1206.20	812.40
234678-HxCDF	1222.60	1183.60	815.00	607.70
123789-HxCDF	67.50	89.00	56.20	40.20
1234678-HpCDF	1875.30	1648.10	1360.50	1040.30
1234789-HpCDF	107.40	148.10	86.00	69.00
OCDF	107.00	164.50	109.10	88.30
Summe TCDF	150568.60	126787.50	83856.70	90569.00
Summe PeCDF	30959.20	40553.50	28568.00	31681.10
Summe HxCDF	15304.10	15732.30	10652.70	7913.90
Summe HpCDF	2493.70	2335.20	1806.70	1386.70
<b>Summe PCDD</b>	<b>19344.60</b>	<b>15124.20</b>	<b>15891.90</b>	<b>13317.70</b>
<b>Summe PCDF</b>	<b>199432.60</b>	<b>185573.00</b>	<b>124993.20</b>	<b>131639.00</b>
<b>Summe PCDD/PCDF</b>	<b>218777.20</b>	<b>200697.20</b>	<b>140885.10</b>	<b>144956.70</b>
<b>Summe 2378-Isomere</b>	<b>29018.60</b>	<b>27390.20</b>	<b>21621.50</b>	<b>18424.30</b>
<b>TEQ (ITEF)</b>	<b>5102.08</b>	<b>4788.73</b>	<b>4006.03</b>	<b>3272.81</b>
<b>TEQ (WHO)</b>	<b>5414.51</b>	<b>5179.29</b>	<b>4330.05</b>	<b>3522.16</b>

Ofen Typ-1, Brennstoff: Koks

Versuch	WIM/6	WIM/7
2378-Isomere	pg/Nm <sup>3</sup>	pg/Nm <sup>3</sup>
2378-TCDD	63.50	119.60
12378-PeCDD	56.90	64.60
123478-HxCDD	15.50	11.30
123678-HxCDD	12.90	10.40
123789-HxCDD	15.30	10.70
1234678-HpCDD	42.60	26.80
OCDD	32.40	29.60
Summe TCDD	931.60	1080.60
Summe PeCDD	407.70	402.90
Summe HxCDD	155.50	119.40
Summe HpCDD	71.30	47.50
2378-TCDF	560.60	1338.20
12378-PeCDF	235.40	447.70
23478-PeCDF	257.10	469.70
123478-HxCDF	111.80	142.20
123678-HxCDF	96.90	135.20
234678-HxCDF	79.20	99.70
123789-HxCDF	7.00	9.30
1234678-HpCDF	128.90	131.80
1234789-HpCDF	14.10	13.40
OCDF	22.80	17.50
Summe TCDF	7142.30	12553.90
Summe PeCDF	2746.40	4095.90
Summe HxCDF	949.30	1326.80
Summe HpCDF	196.90	186.00
<b>Summe PCDD</b>	<b>1598.50</b>	<b>1680.00</b>
<b>Summe PCDF</b>	<b>11057.70</b>	<b>18180.10</b>
<b>Summe PCDD/PCDF</b>	<b>12656.20</b>	<b>19860.10</b>
<b>Summe 2378-Isomere</b>	<b>1752.90</b>	<b>3077.70</b>
<b>TEQ (ITEF)</b>	<b>324.10</b>	<b>586.60</b>
<b>TEQ (WHO)</b>	<b>352.50</b>	<b>618.86</b>

## Ofen Typ-2, Brennstoff: Holz

Versuch	WIM/8	WIM/9	WIM/15
2378-Isomere	pg/Nm <sup>3</sup>	pg/Nm <sup>3</sup>	pg/Nm <sup>3</sup>
2378-TCDD	15.30	74.50	58.60
12378-PeCDD	8.10	38.40	39.30
123478-HxCDD	2.40	6.40	7.40
123678-HxCDD	6.10	9.20	11.50
123789-HxCDD	4.30	6.30	11.20
1234678-HpCDD	38.50	59.50	29.30
OCDD	87.50	319.40	83.20
Summe TCDD	234.80	1112.40	492.40
Summe PeCDD	61.90	277.10	155.80
Summe HxCDD	45.60	90.00	107.90
Summe HpCDD	64.50	106.90	51.20
2378-TCDF	198.10	891.60	786.70
12378-PeCDF	45.40	234.30	305.80
23478-PeCDF	52.50	205.60	290.00
123478-HxCDF	12.50	46.80	105.70
123678-HxCDF	12.10	37.20	105.10
234678-HxCDF	9.80	27.50	64.30
123789-HxCDF	2.10	4.10	8.80
1234678-HpCDF	14.60	27.20	96.10
1234789-HpCDF	2.40	4.50	12.20
OCDF	9.70	20.60	25.60
Summe TCDF	3191.30	15629.50	7861.30
Summe PeCDF	330.00	2075.40	1880.20
Summe HxCDF	92.80	398.00	542.80
Summe HpCDF	22.30	45.90	158.20
<b>Summe PCDD</b>	<b>494.30</b>	<b>1905.80</b>	<b>890.50</b>
<b>Summe PCDF</b>	<b>3646.10</b>	<b>18169.40</b>	<b>10468.10</b>
<b>Summe PCDD/PCDF</b>	<b>4140.40</b>	<b>20075.20</b>	<b>11358.60</b>
<b>Summe 2378-Isomere</b>	<b>521.40</b>	<b>2013.10</b>	<b>2040.80</b>
<b>TEQ (ITEF)</b>	<b>73.26</b>	<b>312.38</b>	<b>350.09</b>
<b>TEQ (WHO)</b>	<b>73.03</b>	<b>331.27</b>	<b>369.65</b>

Ofen Typ-2, Brennstoff: Kohle

Versuch	WIM/10	WIM/11	WIM/12
2378-Isomere	pg/Nm <sup>3</sup>	pg/Nm <sup>3</sup>	pg/Nm <sup>3</sup>
2378-TCDD	402.60	42.70	400.70
12378-PeCDD	367.20	240.30	500.40
123478-HxCDD	76.30	137.20	93.90
123678-HxCDD	115.70	222.10	138.60
123789-HxCDD	104.20	125.80	122.70
1234678-HpCDD	353.40	445.70	302.60
OCDD	488.10	203.50	206.00
Summe TCDD	5650.80	2302.50	4720.40
Summe PeCDD	2205.10	3945.10	2619.30
Summe HxCDD	1198.20	2341.00	1436.60
Summe HpCDD	620.70	914.70	562.60
2378-TCDF	6509.00	2423.70	6885.00
12378-PeCDF	3587.40	1167.80	3601.50
23478-PeCDF	2891.20	1435.20	3403.90
123478-HxCDF	1204.50	855.30	1842.60
123678-HxCDF	1248.30	613.10	1624.00
234678-HxCDF	847.70	717.80	873.50
123789-HxCDF	100.60	34.20	87.80
1234678-HpCDF	1513.70	1325.30	1534.40
1234789-HpCDF	203.00	46.90	203.50
OCDF	240.30	88.70	182.70
Summe TCDF	96310.10	47963.20	83318.00
Summe PeCDF	30388.40	11666.10	25254.90
Summe HxCDF	13510.10	8778.80	12129.40
Summe HpCDF	2295.60	1720.00	2226.80
<b>Summe PCDD</b>	<b>10162.90</b>	<b>9706.80</b>	<b>9544.90</b>
<b>Summe PCDF</b>	<b>142744.50</b>	<b>70216.80</b>	<b>123111.80</b>
<b>Summe PCDD/PCDF</b>	<b>152907.40</b>	<b>79923.60</b>	<b>132656.70</b>
<b>Summe 2378-Isomere</b>	<b>20253.20</b>	<b>10125.30</b>	<b>22003.80</b>
<b>TEQ (ITEF)</b>	<b>3253.23</b>	<b>1470.23</b>	<b>3720.53</b>
<b>TEQ (WHO)</b>	<b>3436.17</b>	<b>1590.12</b>	<b>3970.38</b>



## Ofen Typ-2, Brennstoff: Koks

Versuch	WIM/13	WIM/14
2378-Isomere	pg/Nm <sup>3</sup>	pg/Nm <sup>3</sup>
2378-TCDD	45.50	29.50
12378-PeCDD	47.00	25.70
123478-HxCDD	14.30	5.30
123678-HxCDD	11.70	8.80
123789-HxCDD	12.60	7.60
1234678-HpCDD	44.90	34.00
OCDD	109.60	80.70
Summe TCDD	570.30	370.10
Summe PeCDD	327.50	190.40
Summe HxCDD	128.90	98.70
Summe HpCDD	64.30	64.20
2378-TCDF	654.70	359.50
12378-PeCDF	370.20	175.50
23478-PeCDF	329.80	158.20
123478-HxCDF	151.20	60.80
123678-HxCDF	143.50	63.80
234678-HxCDF	88.70	36.30
123789-HxCDF	9.00	4.20
1234678-HpCDF	142.30	61.90
1234789-HpCDF	13.90	5.50
OCDF	23.20	13.00
Summe TCDF	12327.70	6408.20
Summe PeCDF	4401.90	1610.20
Summe HxCDF	1254.30	522.80
Summe HpCDF	179.80	92.40
<b>Summe PCDD</b>	<b>1200.60</b>	<b>804.10</b>
<b>Summe PCDF</b>	<b>18186.90</b>	<b>8646.60</b>
<b>Summe PCDD/PCDF</b>	<b>19387.50</b>	<b>9450.70</b>
<b>Summe 2378-Isomere</b>	<b>2212.10</b>	<b>1130.30</b>
<b>TEQ (ITEF)</b>	<b>363.12</b>	<b>185.96</b>
<b>TEQ (WHO)</b>	<b>386.50</b>	<b>198.73</b>

## Ofen Typ-3, Brennstoff Holz

Versuch	WIM/19	WIM/20
2378-Isomere	pg/Nm <sup>3</sup>	pg/Nm <sup>3</sup>
2378-TCDD	39.90	24.20
12378-PeCDD	24.30	17.70
123478-HxCDD	8.40	3.30
123678-HxCDD	8.70	4.70
123789-HxCDD	7.40	4.20
1234678-HpCDD	25.30	18.10
OCDD	72.30	109.60
Summe TCDD	768.90	373.20
Summe PeCDD	220.20	135.30
Summe HxCDD	127.50	48.90
Summe HpCDD	45.50	32.50
2378-TCDF	677.40	430.50
12378-PeCDF	214.00	111.60
23478-PeCDF	197.10	89.10
123478-HxCDF	68.80	27.00
123678-HxCDF	68.00	25.50
234678-HxCDF	37.40	16.30
123789-HxCDF	4.20	2.70
1234678-HpCDF	58.50	21.60
1234789-HpCDF	6.50	2.70
OCDF	17.70	16.90
Summe TCDF	6918.30	4133.80
Summe PeCDF	1711.10	846.10
Summe HxCDF	562.30	237.00
Summe HpCDF	86.10	34.10
<b>Summe PCDD</b>	<b>1234.40</b>	<b>699.50</b>
<b>Summe PCDF</b>	<b>9295.50</b>	<b>5267.90</b>
<b>Summe PCDD/PCDF</b>	<b>10529.90</b>	<b>5967.40</b>
<b>Summe 2378-Isomere</b>	<b>1535.90</b>	<b>925.70</b>
<b>TEQ (ITEF)</b>	<b>250.32</b>	<b>135.15</b>
<b>TEQ (WHO)</b>	<b>262.39</b>	<b>143.89</b>

## Ofen Typ-3, Brennstoff: Kohle

Versuch	WIM/21
2378-Isomere	pg/Nm <sup>3</sup>
2378-TCDD	184.10
12378-PeCDD	172.80
123478-HxCDD	50.90
123678-HxCDD	80.50
123789-HxCDD	50.60
1234678-HpCDD	123.90
OCDD	106.80
Summe TCDD	2762.50
Summe PeCDD	1696.20
Summe HxCDD	964.70
Summe HpCDD	242.20
2378-TCDF	3064.40
12378-PeCDF	1039.10
23478-PeCDF	1073.30
123478-HxCDF	355.20
123678-HxCDF	272.10
234678-HxCDF	245.10
123789-HxCDF	27.00
1234678-HpCDF	324.50
1234789-HpCDF	45.10
OCDF	37.00
Summe TCDF	33479.30
Summe PeCDF	7899.90
Summe HxCDF	2992.10
Summe HpCDF	424.20
<b>Summe PCDD</b>	<b>5772.40</b>
<b>Summe PCDF</b>	<b>44832.50</b>
<b>Summe PCDD/PCDF</b>	<b>50604.90</b>
<b>Summe 2378-Isomere</b>	<b>7252.40</b>
<b>TEQ (ITEF)</b>	<b>1278.76</b>
<b>TEQ (WHO)</b>	<b>1365.03</b>

**PCB**

Ofen Typ-1, Brennstoff: Holz

Versuch	Wim/2	Wim/3	Wim/16
	pg/Nm <sup>3</sup>	pg/Nm <sup>3</sup>	pg/Nm <sup>3</sup>
<b>TE-PCB (WHO)</b>			
coplanare PCBs			
#77	943.0	95.8	824.7
#81	135.6	16.5	106.3
#126	61.2	14.8	110.1
#169	6.9	3.9	14.6
mono-ortho PCBs			
# 105	866.1	217.8	550.9
# 114	80.5	30.8	38.8
# 118	2172.0	409.6	1239.6
# 123	63.0	52.1	82.0
# 156	450.1	107.3	205.8
# 157	61.4	16.5	38.6
# 167	258.8	41.6	92.9
# 189	46.5	9.7	25.4
TEQ (PCB)	6.9	1.7	11.6

Ballschmitter PCBs	pg/Nm <sup>3</sup>	pg/Nm <sup>3</sup>	pg/Nm <sup>3</sup>
# 28	20048.9	2587.9	9046.2
# 52	11870.3	1504.2	5758.4
# 101	7957.9	1376.6	4761.3
# 138	6271.9	1486.8	3884.0
# 153	8148.2	1274.4	3728.7
# 180	2735.4	542.4	1085.4
Σ Ballschmitter	57032.7	8772.4	28264.0
PCB-Gesamtkonz. berechnet	285163.7	43862.0	141319.8

## Ofen Typ-1, Brennstoff: Kohle

Versuch	Wim/4	Wim/5
	pg/Nm <sup>3</sup>	pg/Nm <sup>3</sup>
TE-PCB (WHO)		
coplanare PCBs		
#77	11411.5	14457.3
#81	1185.3	1578.0
#126	2391.6	2907.1
#169	207.5	241.6
mono-ortho PCBs		
# 105	2235.6	2873.1
# 114	219.7	265.0
# 118	3457.6	3583.1
# 123	124.8	94.2
# 156	655.2	1129.6
# 157	279.7	401.5
# 167	350.6	459.1
# 189	137.2	188.6
TEQ (PCB)	243.7	296.3

Ballschmitter PCBs	pg/Nm <sup>3</sup>	pg/Nm <sup>3</sup>
# 28	9969.9	11525.6
# 52	5965.1	6255.7
# 101	5065.1	5650.4
# 138	5560.4	5508.8
# 153	3983.6	4943.0
# 180	1682.3	2183.4
Σ Ballschmitter	32226.4	36066.8
PCB-Gesamtkonz. berechnet	161131.9	180334.2

Ofen Typ-1, Brennstoff: Koks

Versuch	Wim/6	Wim/7
	pg/Nm <sup>3</sup>	pg/Nm <sup>3</sup>
TE-PCB (WHO)		
coplanare PCBs		
#77	734.4	1352.3
#81	106.3	171.7
#126	150.1	247.5
#169	16.2	18.6
mono-ortho PCBs		
# 105	431.7	508.9
# 114	44.3	48.7
# 118	745.1	763.8
# 123	70.4	36.9
# 156	258.9	240.9
# 157	54.6	55.4
# 167	98.3	94.4
# 189	27.4	28.5
TEQ (PCB)	15.6	25.4

Ballschmitter PCBs	pg/Nm <sup>3</sup>	pg/Nm <sup>3</sup>
# 28	3313.0	3561.2
# 52	1984.1	2168.3
# 101	1995.4	1670.6
# 138	3448.0	2635.7
# 153	2518.6	2107.7
# 180	1122.7	883.6
Σ Ballschmitter	14381.8	13027.2
PCB-Gesamtkonz. berechnet	71908.9	65135.8

Ofen Typ-2, Brennstoff: Koks

Versuch	Wim/13	Wim/14
	pg/Nm <sup>3</sup>	pg/Nm <sup>3</sup>
TE-PCB (WHO)		
coplanare PCBs		
#77	766.9	514.9
#81	109.1	54.5
#126	119.9	63.4
#169	14.1	8.2
mono-ortho PCBs		
# 105	672.1	508.2
# 114	54.2	49.4
# 118	1316.5	1081.1
# 123	74.0	61.8
# 156	182.3	147.9
# 157	40.1	28.4
# 167	81.7	62.6
# 189	25.0	17.4
TEQ (PCB)	12.6	6.8

Ballschmitter PCBs	pg/Nm <sup>3</sup>	pg/Nm <sup>3</sup>
# 28	8638.8	11269.7
# 52	5272.4	4995.5
# 101	3336.1	3226.9
# 138	2518.0	2735.6
# 153	2229.8	2288.3
# 180	740.3	751.0
Σ Ballschmitter	22735.4	25267.0
PCB-Gesamtkonz. berechnet	113676.8	126335.2

## PAH

Ofen Typ-1, Brennstoff: Holz

Versuch		WIM / 2	WIM / 3	WIM / 16
		ng/Nm <sup>3</sup>	ng/Nm <sup>3</sup>	ng/Nm <sup>3</sup>
Naphthalin	EPA	35712	137425	137555
Acenaphthylen	EPA	9141	38833	29671
Acenaphthen	EPA	321	1483	1466
Fluoren	EPA	1659	8104	7637
Phenanthren	EPA	12359	28147	28039
Anthracen	EPA	1806	5421	5113
Fluoranthen	EPA	5413	9425	12113
Pyren	EPA	5132	9033	11936
Benzo(b)naphtho(2,1-d)thiophen		25.6	n.n.	< 147
Cyclopenta(c,d)pyren		756	2367	1725
Benzo(a)anthracen	EPA	755	2213	2153
Chrysen	EPA	776	1812	1943
Benzo(b)fluoranthen	EPA UN-ECE	810	1705	1461
Benzo(k)fluoranthen	EPA UN-ECE	329	823	885
Benzo(e)pyren		516	1196	1455
Benzo(a)pyren	EPA UN-ECE	552	1574	1806
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	EPA UN-ECE	600	1361	1462
Dibenzo(a,h)anthracen	EPA	181	390	197
Benzo(g,h,i)perylene	EPA	547	1355	1334
Coronen		290	531	438
<b>Σ PAH</b>		<b>77681</b>	<b>253197</b>	<b>248535</b>
<b>Σ US EPA 16 PAH</b>		<b>76094</b>	<b>249103</b>	<b>244771</b>
<b>Σ PAK4 (UN-ECE)</b>		<b>2291</b>	<b>5462</b>	<b>5613</b>



## Ofen Typ-1, Brennstoff: Kohle

Versuch		WIM / 4	WIM / 5	WIM / 17	WIM / 18
		ng/Nm <sup>3</sup>	ng/Nm <sup>3</sup>	ng/Nm <sup>3</sup>	ng/Nm <sup>3</sup>
Naphthalin	EPA	151426	93624	108184	112800
Acenaphthylen	EPA	65114	24146	40130	41105
Acenaphthen	EPA	2640	1026	1784	2188
Fluoren	EPA	21074	7759	12060	12673
Phenanthren	EPA	55498	22556	38436	41198
Anthracen	EPA	15560	6244	10240	10595
Fluoranthen	EPA	26767	10907	18929	19759
Pyren	EPA	22574	8443	14162	15100
Benzo(b)naphtho(2,1-d)thiophen		173	< 147	< 147	< 147
Cyclopenta(c,d)pyren		8413	2647	2932	1670
Benzo(a)anthracen	EPA	9080	4280	5134	4461
Chrysen	EPA	5922	2430	3850	3964
Benzo(b)fluoranthen	EPA UN-ECE	8234	4398	4477	5455
Benzo(k)fluoranthen	EPA UN-ECE	4002	1473	2022	2201
Benzo(e)pyren		6017	2603	3268	3014
Benzo(a)pyren	EPA UN-ECE	7874	2641	3545	3303
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	EPA UN-ECE	8404	3307	3220	3038
Dibenzo(a,h)anthracen	EPA	3006	1224	569	511
Benzo(g,h,i)perylen	EPA	6590	3149	2633	2468
Coronen		3108	1373	973	952
<b>Σ PAH</b>		<b>431474</b>	<b>204377</b>	<b>276694</b>	<b>286603</b>
<b>Σ US EPA 16 PAH</b>		<b>413764</b>	<b>197607</b>	<b>269374</b>	<b>280819</b>
<b>Σ PAK4 (UN-ECE)</b>		<b>28514</b>	<b>11819</b>	<b>13263</b>	<b>13996</b>

## Ofen Typ-2, Brennstoff: Holz

Versuch		WIM / 8	WIM / 9	WIM / 15
		ng/Nm <sup>3</sup>	ng/Nm <sup>3</sup>	ng/Nm <sup>3</sup>
Naphthalin	EPA	191060	772109	394077
Acenaphthylen	EPA	49248	262978	145008
Acenaphthen	EPA	3002	8511	3938
Fluoren	EPA	9472	46348	22799
Phenanthren	EPA	35194	203983	92640
Anthracen	EPA	8913	45737	18335
Fluoranthen	EPA	16779	90306	47978
Pyren	EPA	17730	90052	44739
Benzo(b)naphtho(2,1-d)thiophen		< 147	< 147	< 147
Cyclopenta(c,d)pyren		6590	32845	18085
Benzo(a)anthracen	EPA	4596	18238	8071
Chrysen	EPA	3540	15048	6972
Benzo(b)fluoranthen	EPA UN-ECE	3330	16805	7228
Benzo(k)fluoranthen	EPA UN-ECE	1782	8528	3903
Benzo(e)pyren		2912	13714	6473
Benzo(a)pyren	EPA UN-ECE	4700	21496	8236
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	EPA UN-ECE	3075	19455	6619
Dibenzo(a,h)anthracen	EPA	373	4229	147
Benzo(g,h,i)perylene	EPA	2664	15778	6058
Coronen		885	8065	2364
<b>Σ PAH</b>		<b>365991</b>	<b>1694371</b>	<b>843818</b>
<b>Σ US EPA 16 PAH</b>		<b>355457</b>	<b>1639600</b>	<b>816748</b>
<b>Σ PAK4 (UN-ECE)</b>		<b>12887</b>	<b>66284</b>	<b>25986</b>

## Ofen Typ-2, Brennstoff: Kohle

Versuch		WIM / 10	WIM / 11	WIM / 12
		ng/Nm <sup>3</sup>	ng/Nm <sup>3</sup>	ng/Nm <sup>3</sup>
Naphthalin	EPA	395969	1439082	419075
Acenaphthylen	EPA	179170	694101	184983
Acenaphthen	EPA	2755	26299	5056
Fluoren	EPA	41586	224091	48537
Phenanthren	EPA	136429	439211	152674
Anthracen	EPA	33326	185122	47686
Fluoranthen	EPA	82089	232538	85477
Pyren	EPA	70554	186202	76484
Benzo(b)naphtho(2,1-d)thiophen		476	2158	479
Cyclopenta(c,d)pyren		31063	113721	30368
Benzo(a)anthracen	EPA	21282	104536	25400
Chrysen	EPA	14664	61164	16574
Benzo(b)fluoranthen	EPA UN-ECE	19586	84237	20631
Benzo(k)fluoranthen	EPA UN-ECE	10417	31784	10991
Benzo(e)pyren		13388	54035	15993
Benzo(a)pyren	EPA UN-ECE	17031	77757	22908
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	EPA UN-ECE	21178	67900	23227
Dibenzo(a,h)anthracen	EPA	5875	24404	7007
Benzo(g,h,i)perylene	EPA	15102	52688	17792
Coronen		7699	23178	8760
<b>Σ PAH</b>		<b>1119640</b>	<b>4124210</b>	<b>1220103</b>
<b>Σ US EPA 16 PAH</b>		<b>1067014</b>	<b>3931118</b>	<b>1164503</b>
<b>Σ PAK4 (UN-ECE)</b>		<b>68212</b>	<b>261678</b>	<b>77757</b>

Ofen Typ-2, Brennstoff: Koks

Versuch		WIM / 13	WIM / 14
		ng/Nm <sup>3</sup>	ng/Nm <sup>3</sup>
Naphthalin	EPA	6522	78494
Acenaphthylen	EPA	678	14682
Acenaphthen	EPA	119	1070
Fluoren	EPA	498	3690
Phenanthren	EPA	2377	14737
Anthracen	EPA	236	2689
Fluoranthen	EPA	1150	7069
Pyren	EPA	1002	7281
Benzo(b)naphtho(2,1-d)thiophen		< 7	12
Cyclopenta(c,d)pyren		60	1417
Benzo(a)anthracen	EPA	151	1622
Chrysen	EPA	142	1417
Benzo(b)fluoranthen	EPA UN-ECE	107	1325
Benzo(k)fluoranthen	EPA UN-ECE	63	808
Benzo(e)pyren		98	1318
Benzo(a)pyren	EPA UN-ECE	79	1817
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	EPA UN-ECE	90	1538
Dibenzo(a,h)anthracen	EPA	10	182
Benzo(g,h,i)perylene	EPA	84	1340
Coronen		26	444
<b>Σ PAH</b>		<b>13498</b>	<b>142953</b>
<b>Σ US EPA 16 PAH</b>		<b>13307</b>	<b>139762</b>
<b>Σ PAK4 (UN-ECE)</b>		<b>339</b>	<b>5488</b>

## Ofen Typ-3, Brennstoff: Holz

Versuch		WIM / 19	WIM / 20
		ng/Nm <sup>3</sup>	ng/Nm <sup>3</sup>
Naphthalin	EPA	404101	333758
Acenaphthylen	EPA	136860	78255
Acenaphthen	EPA	4665	3602
Fluoren	EPA	30863	15762
Phenanthren	EPA	118078	83243
Anthracen	EPA	23535	13029
Fluoranthen	EPA	57052	37033
Pyren	EPA	57155	34505
Benzo(b)naphtho(2,1-d)thiophen		< 147	< 147
Cyclopenta(c,d)pyren		14903	4167
Benzo(a)anthracen	EPA	11046	5425
Chrysen	EPA	11077	6374
Benzo(b)fluoranthen	EPA UN-ECE	15190	7768
Benzo(k)fluoranthen	EPA UN-ECE	6354	3412
Benzo(e)pyren		9228	4567
Benzo(a)pyren	EPA UN-ECE	12626	5712
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	EPA UN-ECE	10939	5287
Dibenzo(a,h)anthracen	EPA	998	517
Benzo(g,h,i)perylene	EPA	9156	4374
Coronen		4379	1897
<b>Σ PAH</b>		<b>938350</b>	<b>648835</b>
<b>Σ US EPA 16 PAH</b>		<b>909693</b>	<b>638057</b>
<b>Σ PAK4 (UN-ECE)</b>		<b>45108</b>	<b>22180</b>

Ofen Typ-3, Brennstoff: Kohle

Versuch		WIM / 21
		ng/Nm <sup>3</sup>
Naphthalin	EPA	250981
Acenaphthylen	EPA	102082
Acenaphthen	EPA	3410
Fluoren	EPA	25887
Phenanthren	EPA	90224
Anthracen	EPA	21962
Fluoranthen	EPA	45401
Pyren	EPA	41985
Benzo(b)naphtho(2,1-d)thiophen		213
Cyclopenta(c,d)pyren		14084
Benzo(a)anthracen	EPA	11848
Chrysen	EPA	9320
Benzo(b)fluoranthen	EPA UN-ECE	9652
Benzo(k)fluoranthen	EPA UN-ECE	4827
Benzo(e)pyren		7718
Benzo(a)pyren	EPA UN-ECE	10073
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	EPA UN-ECE	8657
Dibenzo(a,h)anthracen	EPA	1093
Benzo(g,h,i)perylen	EPA	6804
Coronen		2487
<b>Σ PAH</b>		<b>668706</b>
<b>Σ US EPA 16 PAH</b>		<b>644205</b>
<b>Σ PAK4 (UN-ECE)</b>		<b>33208</b>

## A.2 Kaminruß

### PCDD/F

Ofen Typ-1, Brennstoff: Holz

Versuch	Wim/16
2378-Isomere	ng/kg
2378-TCDD	88.08
12378-PeCDD	73.53
123478-HxCDD	25.48
123678-HxCDD	25.27
123789-HxCDD	27.18
1234678-HpCDD	82.52
OCDD	104.70
Summe TCDD	1107.34
Summe PeCDD	512.94
Summe HxCDD	304.54
Summe HpCDD	151.74
2378-TCDF	1082.46
12378-PeCDF	546.58
23478-PeCDF	425.78
123478-HxCDF	284.90
123678-HxCDF	250.30
234678-HxCDF	153.49
123789-HxCDF	16.15
1234678-HpCDF	250.72
1234789-HpCDF	32.32
OCDF	31.71
Summe TCDF	13633.06
Summe PeCDF	5973.56
Summe HxCDF	1791.28
Summe HpCDF	382.96
<b>Summe PCDD</b>	<b>2181.26</b>
<b>Summe PCDF</b>	<b>21812.57</b>
<b>Summe PCDD/PCDF</b>	<b>23993.83</b>
<b>Summe 2378-Isomere</b>	<b>3501.17</b>
<b>TEQ (ITEF)</b>	<b>555.38</b>
<b>TEQ (WHO)</b>	<b>592.02</b>

## Ofen Typ-1, Brennstoff: Kohle

Versuch	Wim/4	Wim/5	Wim/17	Wim/18
2378-Isomere	ng/kg	ng/kg	ng/kg	ng/kg
2378-TCDD	19.30	25.70	97.44	80.10
12378-PeCDD	15.89	24.23	109.92	82.00
123478-HxCDD	4.54	6.00	39.65	27.20
123678-HxCDD	5.42	6.66	34.19	34.36
123789-HxCDD	4.66	6.16	22.22	28.19
1234678-HpCDD	59.21	25.75	90.08	85.48
OCDD	267.10	55.50	91.88	81.78
Summe TCDD	258.82	259.94	1756.54	1048.28
Summe PeCDD	122.82	181.96	843.44	693.16
Summe HxCDD	63.96	90.34	388.78	383.44
Summe HpCDD	102.20	48.56	172.94	160.38
2378-TCDF	214.26	332.98	1425.30	1046.94
12378-PeCDF	87.15	142.76	720.74	552.59
23478-PeCDF	85.50	146.49	647.60	506.18
123478-HxCDF	37.28	61.76	328.40	279.17
123678-HxCDF	30.51	50.89	299.06	273.83
234678-HxCDF	24.25	38.54	199.72	183.60
123789-HxCDF	2.11	3.98	15.78	18.06
1234678-HpCDF	38.19	57.83	329.96	289.29
1234789-HpCDF	3.21	5.88	36.63	29.53
OCDF	7.60	7.21	35.23	30.14
Summe TCDF	3536.30	4345.50	17686.18	23442.22
Summe PeCDF	659.80	1133.00	8590.04	2915.22
Summe HxCDF	272.80	469.50	2583.76	2276.22
Summe HpCDF	54.60	82.68	459.06	400.28
<b>Summe PCDD</b>	<b>814.90</b>	<b>636.30</b>	<b>3253.58</b>	<b>2367.04</b>
<b>Summe PCDF</b>	<b>4531.10</b>	<b>6037.89</b>	<b>29354.27</b>	<b>29064.08</b>
<b>Summe PCDD/PCDF</b>	<b>5346.00</b>	<b>6674.19</b>	<b>32607.85</b>	<b>31431.12</b>
<b>Summe 2378-Isomere</b>	<b>906.18</b>	<b>998.32</b>	<b>4523.80</b>	<b>3628.44</b>
<b>TEQ (ITEF)</b>	<b>107.94</b>	<b>169.85</b>	<b>753.36</b>	<b>595.11</b>
<b>TEQ (WHO)</b>	<b>115.63</b>	<b>181.91</b>	<b>808.21</b>	<b>636.01</b>



## Ofen Typ-1, Brennstoff: Koks

Versuch	Wim/6	Wim/7
2378-Isomere	ng/kg	ng/kg
2378-TCDD	53.59	26.26
12378-PeCDD	37.88	38.52
123478-HxCDD	9.56	10.39
123678-HxCDD	9.60	10.52
123789-HxCDD	9.58	10.63
1234678-HpCDD	40.33	39.65
OCDD	91.70	94.44
Summe TCDD	766.84	877.34
Summe PeCDD	308.10	235.70
Summe HxCDD	111.24	131.74
Summe HpCDD	73.48	74.54
2378-TCDF	555.72	632.60
12378-PeCDF	231.32	245.58
23478-PeCDF	247.68	267.09
123478-HxCDF	91.62	106.14
123678-HxCDF	78.02	83.40
234678-HxCDF	58.35	62.02
123789-HxCDF	6.44	6.51
1234678-HpCDF	82.87	90.30
1234789-HpCDF	8.87	9.74
OCDF	9.80	10.68
Summe TCDF	7243.40	6901.90
Summe PeCDF	1661.02	2498.68
Summe HxCDF	655.32	747.68
Summe HpCDF	114.22	128.52
<b>Summe PCDD</b>	<b>1351.36</b>	<b>1413.76</b>
<b>Summe PCDF</b>	<b>9683.76</b>	<b>10287.46</b>
<b>Summe PCDD/PCDF</b>	<b>11035.12</b>	<b>11701.22</b>
<b>Summe 2378-Isomere</b>	<b>1622.93</b>	<b>1744.47</b>
<b>TEQ (ITEF)</b>	<b>291.25</b>	<b>285.07</b>
<b>TEQ (WHO)</b>	<b>310.10</b>	<b>304.23</b>

Ofen Typ-2, Brennstoff: Holz

Versuch	Wim/8	Wim/9	Wim/15
2378-Isomere	ng/kg	ng/kg	ng/kg
2378-TCDD	51.86	38.60	72.64
12378-PeCDD	53.43	32.73	93.80
123478-HxCDD	14.26	8.89	29.38
123678-HxCDD	22.05	10.35	35.24
123789-HxCDD	18.04	9.13	30.68
1234678-HpCDD	112.42	42.09	98.16
OCDD	272.43	98.12	105.69
Summe TCDD	940.92	514.94	979.18
Summe PeCDD	377.26	280.42	627.24
Summe HxCDD	249.14	132.78	378.14
Summe HpCDD	205.40	81.70	185.32
2378-TCDF	772.10	486.66	1058.76
12378-PeCDF	312.00	185.20	506.80
23478-PeCDF	324.05	197.68	597.86
123478-HxCDF	154.07	85.00	338.70
123678-HxCDF	126.91	72.73	286.34
234678-HxCDF	99.24	54.56	196.22
123789-HxCDF	9.54	5.10	25.11
1234678-HpCDF	163.07	82.47	340.63
1234789-HpCDF	17.87	8.26	41.17
OCDF	27.30	11.16	43.45
Summe TCDF	8751.04	5851.24	18008.12
Summe PeCDF	2560.90	2668.68	6734.58
Summe HxCDF	1113.84	649.12	2446.26
Summe HpCDF	242.28	120.48	499.98
<b>Summe PCDD</b>	<b>2045.15</b>	<b>1107.96</b>	<b>2275.57</b>
<b>Summe PCDF</b>	<b>12695.36</b>	<b>9300.68</b>	<b>27732.39</b>
<b>Summe PCDD/PCDF</b>	<b>14740.51</b>	<b>10408.64</b>	<b>30007.96</b>
<b>Summe 2378-Isomere</b>	<b>2550.64</b>	<b>1428.73</b>	<b>3900.63</b>
<b>TEQ (ITEF)</b>	<b>381.05</b>	<b>237.74</b>	<b>648.80</b>
<b>TEQ (WHO)</b>	<b>407.50</b>	<b>254.01</b>	<b>695.57</b>

## Ofen Typ-2, Brennstoff: Kohle

Versuch	Wim/10	Wim/11	Wim/12
2378-Isomere	ng/kg	ng/kg	ng/kg
2378-TCDD	34.42	80.00	95.25
12378-PeCDD	49.94	88.48	122.52
123478-HxCDD	20.12	39.28	38.05
123678-HxCDD	24.97	30.72	32.88
123789-HxCDD	21.80	28.60	39.00
1234678-HpCDD	86.08	146.95	109.93
OCDD	99.72	153.58	93.61
Summe TCDD	614.94	1234.16	1328.56
Summe PeCDD	394.00	560.68	758.52
Summe HxCDD	289.20	315.54	382.26
Summe HpCDD	164.00	258.14	186.00
2378-TCDF	540.58	1517.42	1582.74
12378-PeCDF	290.81	573.16	810.13
23478-PeCDF	370.66	400.68	848.75
123478-HxCDF	176.51	350.74	483.34
123678-HxCDF	155.53	275.34	412.28
234678-HxCDF	113.26	252.68	276.08
123789-HxCDF	11.27	28.68	31.56
1234678-HpCDF	217.04	460.99	481.76
1234789-HpCDF	24.73	56.51	62.82
OCDF	32.69	67.16	71.61
Summe TCDF	8105.44	25676.76	21737.50
Summe PeCDF	3287.26	6509.84	5176.78
Summe HxCDF	1135.90	2828.66	3090.12
Summe HpCDF	324.82	641.90	719.30
<b>Summe PCDD</b>	<b>1561.86</b>	<b>2522.10</b>	<b>2748.95</b>
<b>Summe PCDF</b>	<b>12886.11</b>	<b>35724.32</b>	<b>30795.31</b>
<b>Summe PCDD/PCDF</b>	<b>14447.97</b>	<b>38246.42</b>	<b>33544.26</b>
<b>Summe 2378-Isomere</b>	<b>2270.13</b>	<b>4550.97</b>	<b>5592.31</b>
<b>TEQ (ITEF)</b>	<b>369.08</b>	<b>612.45</b>	<b>917.69</b>
<b>TEQ (WHO)</b>	<b>393.93</b>	<b>656.49</b>	<b>978.81</b>

Ofen Typ-2, Brennstoff: Koks

Versuch	Wim/13	Wim/14
2378-Isomere	ng/kg	ng/kg
2378-TCDD	85.34	69.28
12378-PeCDD	109.07	98.16
123478-HxCDD	36.30	28.14
123678-HxCDD	43.23	25.50
123789-HxCDD	41.45	33.04
1234678-HpCDD	133.14	76.44
OCDD	140.23	78.32
Summe TCDD	1113.26	1696.90
Summe PeCDD	778.46	729.20
Summe HxCDD	513.70	335.40
Summe HpCDD	251.58	158.52
2378-TCDF	1169.42	1092.28
12378-PeCDF	702.29	595.19
23478-PeCDF	657.03	628.49
123478-HxCDF	404.66	275.30
123678-HxCDF	359.51	264.82
234678-HxCDF	247.13	158.68
123789-HxCDF	29.96	16.68
1234678-HpCDF	437.68	264.16
1234789-HpCDF	58.01	32.96
OCDF	57.58	27.68
Summe TCDF	14195.36	12606.54
Summe PeCDF	4671.90	7442.82
Summe HxCDF	2944.94	1994.10
Summe HpCDF	629.26	381.12
<b>Summe PCDD</b>	<b>2797.23</b>	<b>2998.34</b>
<b>Summe PCDF</b>	<b>22499.04</b>	<b>22452.26</b>
<b>Summe PCDD/PCDF</b>	<b>25296.27</b>	<b>25450.60</b>
<b>Summe 2378-Isomere</b>	<b>4712.03</b>	<b>3765.12</b>
<b>TEQ (ITEF)</b>	<b>743.16</b>	<b>655.65</b>
<b>TEQ (WHO)</b>	<b>797.51</b>	<b>704.63</b>

## Ofen Typ-3, Brennstoff: Kohle

Versuch	Wim/21
<b>2378-Isomere</b>	<b>ng/kg</b>
2378-TCDD	n.n.
12378-PeCDD	131.57
123478-HxCDD	52.73
123678-HxCDD	52.16
123789-HxCDD	54.00
1234678-HpCDD	190.90
OCDD	152.70
Summe TCDD	3142.70
Summe PeCDD	873.86
Summe HxCDD	624.90
Summe HpCDD	404.80
2378-TCDF	954.36
12378-PeCDF	705.36
23478-PeCDF	709.94
123478-HxCDF	340.88
123678-HxCDF	355.89
234678-HxCDF	265.78
123789-HxCDF	19.90
1234678-HpCDF	496.33
1234789-HpCDF	47.85
OCDF	47.46
Summe TCDF	19541.64
Summe PeCDF	5045.70
Summe HxCDF	2637.92
Summe HpCDF	644.54
<b>Summe PCDD</b>	<b>5198.96</b>
<b>Summe PCDF</b>	<b>27917.26</b>
<b>Summe PCDD/PCDF</b>	<b>33116.22</b>
<b>Summe 2378-Isomere</b>	<b>4577.81</b>
<b>TEQ (ITEF)</b>	<b>673.14</b>
<b>TEQ (WHO)</b>	<b>738.75</b>

**PCB**

Ofen Typ-1, Brennstoff: Holz

Versuch	WIM/16
	ng/kg
<b>TE-PCB (WHO)</b>	
coplanare PCBs	
#77	541.0
#81	55.3
#126	149.9
#169	17.8
mono-ortho PCBs	
# 105	258.0
# 114	18.2
# 118	531.4
# 123	38.3
# 156	210.3
# 157	42.5
# 167	122.1
# 189	34.0
TEQ (PCB)	15.5

Ballschmitter PCBs	
# 28	1984.1
# 52	894.1
# 101	1330.0
# 138	1903.0
# 153	2920.3
# 180	1472.4
Σ Ballschmitter	10503.9
PCB-Gesamtkonz. berechnet	52519.4

## Ofen Typ-1, Brennstoff: Kohle

Versuch	WIM/4	WIM/5	WIM/17	WIM/18
	ng/kg	ng/kg	ng/kg	ng/kg
<b>TE-PCB (WHO)</b>				
coplanare PCBs				
#77	236.7	311.1	899.5	723.0
#81	24.5	33.2	95.8	73.6
#126	50.3	68.2	235.3	185.8
#169	4.8	6.0	27.6	22.1
mono-ortho PCBs				
# 105	112.1	146.4	331.1	297.2
# 114	8.0	10.0	24.0	20.5
# 118	279.4	339.3	588.1	553.5
# 123	18.9	16.6	73.1	16.4
# 156	92.4	127.1	219.7	233.5
# 157	14.1	18.7	50.7	49.1
# 167	47.4	63.8	128.6	121.0
# 189	10.4	15.6	39.4	37.5
TEQ (PCB)	5.2	7.0	24.2	19.1
Ballschmitter PCBs				
# 28	856.1	1214.7	2645.5	2309.7
# 52	330.6	445.4	1060.2	1048.4
# 101	818.5	879.4	1375.0	1283.5
# 138	836.8	1014.6	1916.4	1867.8
# 153	1562.5	1897.3	3058.4	3117.4
# 180	454.9	668.8	1443.9	1474.2
Σ Ballschmitter	4859.3	6120.3	11499.3	11101.0
PCB-Gesamtkonz. berechnet	24296.7	30601.3	57496.5	55505.2

Ofen Typ-1, Brennstoff: Koks

Versuch	WIM/6	WIM/7
	ng/kg	ng/kg
<b>TE-PCB (WHO)</b>		
coplanare PCBs		
#77	468.9	520.9
#81	49.8	52.5
#126	112.2	122.1
#169	9.5	10.5
mono-ortho PCBs		
# 105	180.4	198.4
# 114	10.9	13.9
# 118	355.0	368.7
# 123	18.5	18.4
# 156	128.3	140.6
# 157	22.1	25.2
# 167	60.9	64.6
# 189	17.3	19.1
TEQ (PCB)	11.5	12.5

Ballschmitter PCBs		
# 28	1224.3	1371.4
# 52	448.8	659.9
# 101	808.5	764.4
# 138	972.7	927.7
# 153	1746.6	1741.4
# 180	605.3	660.7
Σ Ballschmitter	5806.2	6125.4
PCB-Gesamtkonz. berechnet	29031.0	30626.9



## Ofen Typ-2, Brennstoff: Holz

Versuch	WIM/8	WIM/9	WIM/15
	ng/kg	ng/kg	ng/kg
<b>TE-PCB (WHO)</b>			
coplanare PCBs			
#77	605.8	380.0	546.5
#81	61.5	40.1	55.6
#126	151.6	90.8	155.4
#169	14.5	9.2	19.8
mono-ortho PCBs			
# 105	359.7	223.5	279.5
# 114	23.3	14.8	19.2
# 118	730.5	498.9	569.6
# 123	41.2	29.1	50.1
# 156	282.3	191.5	221.9
# 157	47.9	30.7	44.2
# 167	139.9	96.4	125.5
# 189	40.3	27.8	37.0
TEQ (PCB)	15.7	9.4	16.0
<b>Ballschmitter PCBs</b>			
# 28	1582.9	998.4	1818.3
# 52	865.6	655.4	1102.7
# 101	1414.3	1200.0	1406.3
# 138	2024.1	1561.5	1890.9
# 153	3416.2	2730.8	3290.7
# 180	1429.2	1084.6	1515.1
Σ Ballschmitter	10732.3	8230.8	11024.0
PCB-Gesamtkonz. berechnet	53661.5	41153.8	55119.9

Ofen Typ-2, Brennstoff: Kohle

Versuch	WIM/10	WIM/12
	ng/kg	ng/kg
<b>TE-PCB (WHO)</b>		
coplanare PCBs		
#77	460.6	684.0
#81	41.6	75.6
#126	102.7	200.6
#169	15.3	23.0
mono-ortho PCBs		
# 105	423.7	288.5
# 114	26.6	21.7
# 118	758.0	438.4
# 123	45.4	100.2
# 156	362.4	251.9
# 157	53.3	46.7
# 167	172.5	126.6
# 189	57.7	52.1
TEQ (PCB)	10.8	20.6

Ballschmitter PCBs		
# 28	2134.4	2109.2
# 52	1078.2	941.4
# 101	1538.4	1213.8
# 138	2402.8	1290.4
# 153	3212.6	2940.6
# 180	1981.3	1460.9
Σ Ballschmitter	12347.8	9956.4
PCB-Gesamtkonz. berechnet	61738.9	49781.8

## Ofen Typ-2, Brennstoff: Koks

Versuch	WIM/13	WIM/14
	ng/kg	ng/kg
<b>TE-PCB (WHO)</b>		
coplanare PCBs		
#77	673.2	674.1
#81	70.2	64.2
#126	191.3	176.4
#169	25.0	25.4
mono-ortho PCBs		
# 105	443.3	392.2
# 114	30.1	25.9
# 118	647.2	744.7
# 123	64.0	55.1
# 156	379.2	361.2
# 157	67.9	63.3
# 167	192.0	194.6
# 189	68.4	61.7
TEQ (PCB)	19.8	18.3

Ballschmitter PCBs		
# 28	2737.0	2725.5
# 52	1259.3	1319.4
# 101	1630.7	1889.2
# 138	1946.8	2928.9
# 153	3341.6	4647.4
# 180	2493.8	2569.6
Σ Ballschmitter	13409.2	16080.1
PCB-Gesamtkonz. berechnet	67045.8	80400.5

Ofen Typ-3, Brennstoff: Kohle

Versuch	WIM/21
	ng/kg
<b>TE-PCB (WHO)</b>	
coplanare PCBs	
#77	1199.5
#81	123.5
#126	368.2
#169	41.4
mono-ortho PCBs	
# 105	706.2
# 114	46.2
# 118	922.7
# 123	225.9
# 156	760.8
# 157	106.9
# 167	284.5
# 189	110.1
TEQ (PCB)	38.0

Ballschmitter PCBs	
# 28	4716.5
# 52	2093.6
# 101	2305.6
# 138	2963.4
# 153	5994.5
# 180	3437.0
Σ Ballschmitter	21510.5
PCB-Gesamtkonz. berechnet	107552.4

### A.3 Ofenaschen

#### PCDD/F

Ofen Typ-1, Brennstoff: Holz

Versuch	Wim/2	Wim/3	Wim/16
2378-Isomere	ng/kg	ng/kg	ng/kg
2378-TCDD	n.n.	n.n.	0.20
12378-PeCDD	n.n.	n.n.	n.n.
123478-HxCDD	0.12	n.n.	n.n.
123678-HxCDD	n.n.	n.n.	0.80
123789-HxCDD	n.n.	n.n.	0.26
1234678-HpCDD	5.25	9.10	4.88
OCDD	33.61	93.73	13.49
Summe TCDD	n.n.	n.n.	1.24
Summe PeCDD	n.n.	n.n.	n.n.
Summe HxCDD	0.12	n.n.	5.80
Summe HpCDD	8.20	15.10	9.76
2378-TCDF	0.24	0.26	2.92
12378-PeCDF	n.n.	0.08	1.16
23478-PeCDF	n.n.	n.n.	1.25
123478-HxCDF	n.n.	n.n.	0.80
123678-HxCDF	n.n.	n.n.	0.56
234678-HxCDF	n.n.	n.n.	0.56
123789-HxCDF	n.n.	n.n.	n.n.
1234678-HpCDF	0.56	0.84	2.49
1234789-HpCDF	n.n.	n.n.	0.28
OCDF	3.37	7.74	2.00
Summe TCDF	0.78	0.40	51.40
Summe PeCDF	n.n.	0.08	10.26
Summe HxCDF	n.n.	n.n.	5.28
Summe HpCDF	2.08	3.52	2.77
<b>Summe PCDD</b>	<b>41.93</b>	<b>108.83</b>	<b>30.29</b>
<b>Summe PCDF</b>	<b>6.23</b>	<b>11.74</b>	<b>71.71</b>
<b>Summe PCDD/PCDF</b>	<b>48.16</b>	<b>120.57</b>	<b>102.00</b>
<b>Summe 2378-Isomere</b>	<b>43.15</b>	<b>111.75</b>	<b>31.65</b>
<b>TEQ (ITEF)</b>	<b>0.13</b>	<b>0.23</b>	<b>1.56</b>
<b>TEQ (WHO)</b>	<b>0.10</b>	<b>0.14</b>	<b>1.55</b>

## Ofen Typ-1, Brennstoff: Kohle

Versuch	Wim/4	Wim/5	Wim/17	Wim/18
2378-Isomere	ng/kg	ng/kg	ng/kg	ng/kg
2378-TCDD	2.30	0.66	3.27	1.19
12378-PeCDD	3.18	0.82	3.78	2.12
123478-HxCDD	0.76	0.26	1.16	1.93
123678-HxCDD	1.01	0.46	1.32	1.80
123789-HxCDD	0.76	0.42	1.79	2.17
1234678-HpCDD	3.99	1.86	7.04	15.35
OCDD	27.07	8.94	59.69	29.76
Summe TCDD	26.66	14.88	90.50	15.78
Summe PeCDD	17.54	9.80	43.58	17.88
Summe HxCDD	11.70	9.30	36.02	26.38
Summe HpCDD	7.18	3.58	12.18	27.06
2378-TCDF	82.62	15.48	76.66	27.52
12378-PeCDF	40.26	11.56	45.36	22.65
23478-PeCDF	40.51	9.34	42.07	24.40
123478-HxCDF	16.24	6.44	20.77	17.38
123678-HxCDF	19.29	6.11	20.19	15.92
234678-HxCDF	12.13	4.25	15.35	12.51
123789-HxCDF	2.30	1.19	2.98	2.96
1234678-HpCDF	17.26	7.89	26.56	33.47
1234789-HpCDF	3.29	1.40	4.00	5.67
OCDF	6.13	2.30	6.57	9.11
Summe TCDF	1190.44	327.34	1001.52	531.26
Summe PeCDF	453.60	135.02	518.88	295.06
Summe HxCDF	136.02	59.92	195.80	170.70
Summe HpCDF	28.18	13.70	42.62	54.82
<b>Summe PCDD</b>	<b>90.15</b>	<b>46.50</b>	<b>241.97</b>	<b>116.86</b>
<b>Summe PCDF</b>	<b>1814.37</b>	<b>538.28</b>	<b>1765.39</b>	<b>1060.95</b>
<b>Summe PCDD/PCDF</b>	<b>1904.52</b>	<b>584.78</b>	<b>2007.36</b>	<b>1177.81</b>
<b>Summe 2378-Isomere</b>	<b>279.10</b>	<b>79.38</b>	<b>338.56</b>	<b>225.91</b>
<b>TEQ (ITEF)</b>	<b>39.95</b>	<b>9.90</b>	<b>42.93</b>	<b>24.39</b>
<b>TEQ (WHO)</b>	<b>41.51</b>	<b>10.30</b>	<b>44.76</b>	<b>25.41</b>

## Ofen Typ-1, Brennstoff: Koks

Versuch	Wim/6	Wim/7
2378-Isomere	ng/kg	ng/kg
2378-TCDD	0.33	n.n.
12378-PeCDD	n.n.	n.n.
123478-HxCDD	0.12	n.n.
123678-HxCDD	n.n.	0.18
123789-HxCDD	0.22	0.10
1234678-HpCDD	2.29	2.89
OCDD	30.52	25.43
Summe TCDD	3.64	0.64
Summe PeCDD	2.06	n.n.
Summe HxCDD	2.46	0.96
Summe HpCDD	4.52	5.18
2378-TCDF	5.52	1.64
12378-PeCDF	3.22	0.72
23478-PeCDF	3.61	0.72
123478-HxCDF	1.82	0.66
123678-HxCDF	1.73	0.64
234678-HxCDF	1.51	0.50
123789-HxCDF	n.n.	n.n.
1234678-HpCDF	3.89	4.12
1234789-HpCDF	0.73	0.46
OCDF	4.09	6.67
Summe TCDF	82.52	21.08
Summe PeCDF	34.04	8.96
Summe HxCDF	15.62	4.82
Summe HpCDF	6.58	7.46
<b>Summe PCDD</b>	<b>43.20</b>	<b>32.21</b>
<b>Summe PCDF</b>	<b>142.85</b>	<b>48.99</b>
<b>Summe PCDD/PCDF</b>	<b>186.05</b>	<b>81.20</b>
<b>Summe 2378-Isomere</b>	<b>59.60</b>	<b>44.73</b>
<b>TEQ (ITEF)</b>	<b>3.49</b>	<b>0.87</b>
<b>TEQ (WHO)</b>	<b>3.46</b>	<b>0.85</b>

Ofen Typ-2, Brennstoff: Holz

Versuch	Wim/8	Wim/9	Wim/15
2378-Isomere	ng/kg	ng/kg	ng/kg
2378-TCDD	n.n.	n.n.	n.n.
12378-PeCDD	n.n.	n.n.	n.n.
123478-HxCDD	n.n.	n.n.	n.n.
123678-HxCDD	0.12	n.n.	1.04
123789-HxCDD	n.n.	n.n.	0.67
1234678-HpCDD	4.48	1.04	5.92
OCDD	28.69	6.06	15.65
Summe TCDD	0.32	n.n.	1.60
Summe PeCDD	n.n.	n.n.	n.n.
Summe HxCDD	1.08	n.n.	6.62
Summe HpCDD	7.42	1.04	12.78
2378-TCDF	1.36	0.58	0.56
12378-PeCDF	0.69	0.22	0.14
23478-PeCDF	0.72	0.28	n.n.
123478-HxCDF	0.42	n.n.	0.12
123678-HxCDF	0.32	n.n.	n.n.
234678-HxCDF	0.33	n.n.	n.n.
123789-HxCDF	n.n.	n.n.	n.n.
1234678-HpCDF	0.82	0.24	0.77
1234789-HpCDF	n.n.	n.n.	n.n.
OCDF	1.37	n.n.	1.07
Summe TCDF	20.94	8.84	3.24
Summe PeCDF	10.24	1.00	0.14
Summe HxCDF	2.28	n.n.	0.66
Summe HpCDF	1.48	0.24	0.90
<b>Summe PCDD</b>	<b>37.51</b>	<b>7.10</b>	<b>36.65</b>
<b>Summe PCDF</b>	<b>36.31</b>	<b>10.08</b>	<b>6.01</b>
<b>Summe PCDD/PCDF</b>	<b>73.82</b>	<b>17.18</b>	<b>42.66</b>
<b>Summe 2378-Isomere</b>	<b>39.32</b>	<b>8.42</b>	<b>25.94</b>
<b>TEQ (ITEF)</b>	<b>0.73</b>	<b>0.23</b>	<b>0.33</b>
<b>TEQ (WHO)</b>	<b>0.71</b>	<b>0.22</b>	<b>0.31</b>



## Ofen Typ-2, Brennstoff: Kohle

Versuch	Wim/10	Wim/11	Wim/12
2378-Isomere	ng/kg	ng/kg	ng/kg
2378-TCDD	0.16	1.04	0.55
12378-PeCDD	n.n.	1.08	0.74
123478-HxCDD	0.12	0.51	0.61
123678-HxCDD	0.14	0.64	0.73
123789-HxCDD	0.21	0.50	0.76
1234678-HpCDD	n.n.	6.39	36.81
OCDD	41.80	53.09	170.64
Summe TCDD	0.88	17.98	10.14
Summe PeCDD	n.n.	10.48	5.04
Summe HxCDD	0.47	11.92	12.96
Summe HpCDD	9.12	12.60	45.98
2378-TCDF	3.56	22.32	9.20
12378-PeCDF	2.18	12.12	6.63
23478-PeCDF	1.72	11.99	6.96
123478-HxCDF	1.15	7.07	2.86
123678-HxCDF	1.01	5.89	3.92
234678-HxCDF	0.75	4.34	3.18
123789-HxCDF	n.n.	0.74	1.25
1234678-HpCDF	1.99	10.46	9.98
1234789-HpCDF	n.n.	1.24	1.59
OCDF	5.65	10.03	18.73
Summe TCDF	73.82	372.68	275.16
Summe PeCDF	29.86	188.92	113.34
Summe HxCDF	7.98	67.28	32.34
Summe HpCDF	4.78	19.66	16.36
<b>Summe PCDD</b>	<b>52.27</b>	<b>106.07</b>	<b>244.76</b>
<b>Summe PCDF</b>	<b>122.09</b>	<b>658.57</b>	<b>455.93</b>
<b>Summe PCDD/PCDF</b>	<b>174.36</b>	<b>764.64</b>	<b>700.69</b>
<b>Summe 2378-Isomere</b>	<b>60.44</b>	<b>149.45</b>	<b>275.14</b>
<b>TEQ (ITEF)</b>	<b>1.89</b>	<b>12.63</b>	<b>7.66</b>
<b>TEQ (WHO)</b>	<b>1.85</b>	<b>13.11</b>	<b>7.86</b>

Ofen Typ-2, Brennstoff: Koks

Versuch	Wim/13	Wim/14
2378-Isomere	ng/kg	ng/kg
2378-TCDD	n.n.	n.n.
12378-PeCDD	n.n.	0.20
123478-HxCDD	n.n.	0.15
123678-HxCDD	0.20	0.65
123789-HxCDD	0.16	0.52
1234678-HpCDD	3.22	4.28
OCDD	24.98	11.02
Summe TCDD	0.52	8.14
Summe PeCDD	n.n.	3.32
Summe HxCDD	0.36	7.28
Summe HpCDD	5.72	8.76
2378-TCDF	2.58	1.52
12378-PeCDF	0.46	0.64
23478-PeCDF	0.34	0.99
123478-HxCDF	0.50	0.62
123678-HxCDF	0.36	0.38
234678-HxCDF	0.28	0.38
123789-HxCDF	n.n.	n.n.
1234678-HpCDF	1.52	1.61
1234789-HpCDF	0.16	n.n.
OCDF	4.22	1.00
Summe TCDF	14.60	31.00
Summe PeCDF	4.62	10.40
Summe HxCDF	1.72	3.24
Summe HpCDF	3.14	2.42
<b>Summe PCDD</b>	<b>31.58</b>	<b>38.52</b>
<b>Summe PCDF</b>	<b>28.30</b>	<b>48.06</b>
<b>Summe PCDD/PCDF</b>	<b>59.88</b>	<b>86.58</b>
<b>Summe 2378-Isomere</b>	<b>38.98</b>	<b>23.96</b>
<b>TEQ (ITEF)</b>	<b>0.68</b>	<b>1.12</b>
<b>TEQ (WHO)</b>	<b>0.65</b>	<b>1.21</b>

## Ofen Typ-3, Brennstoff: Kohle

Versuch	Wim/21
2378-Isomere	ng/kg
2378-TCDD	0.63
12378-PeCDD	0.60
123478-HxCDD	0.20
123678-HxCDD	0.22
123789-HxCDD	0.34
1234678-HpCDD	2.21
OCDD	16.46
Summe TCDD	5.10
Summe PeCDD	2.06
Summe HxCDD	2.36
Summe HpCDD	3.66
2378-TCDF	16.68
12378-PeCDF	7.31
23478-PeCDF	6.28
123478-HxCDF	2.66
123678-HxCDF	2.49
234678-HxCDF	2.00
123789-HxCDF	0.32
1234678-HpCDF	3.41
1234789-HpCDF	0.58
OCDF	1.81
Summe TCDF	180.10
Summe PeCDF	63.44
Summe HxCDF	19.82
Summe HpCDF	5.68
<b>Summe PCDD</b>	<b>29.64</b>
<b>Summe PCDF</b>	<b>270.85</b>
<b>Summe PCDD/PCDF</b>	<b>300.49</b>
<b>Summe 2378-Isomere</b>	<b>64.20</b>
<b>TEQ (ITEF)</b>	<b>7.01</b>
<b>TEQ (WHO)</b>	<b>7.29</b>

**PCB**

Ofen Typ-1, Brennstoff: Holz

Versuch	WIM/2	WIM/3	WIM/16
	ng/kg	ng/kg	ng/kg
<b>TE-PCB (WHO)</b>			
coplanare PCBs			
#77	17.6	11.6	21.9
#81	1.6	1.3	1.4
#126	2.0	2.0	1.2
#169	0.6	0.4	0.6
mono-ortho PCBs			
# 105	42.1	30.4	50.8
# 114	3.6	2.7	4.4
# 118	65.2	56.2	87.7
# 123	2.0	4.5	3.1
# 156	23.6	20.0	33.0
# 157	3.5	3.2	n.n.
# 167	10.9	10.4	15.3
# 189	4.0	3.9	3.9
TEQ (PCB)	0.2	0.2	0.2

Ballschmitter PCBs	pg/Nm <sup>3</sup>	pg/Nm <sup>3</sup>	pg/Nm <sup>3</sup>
# 28	669.4	676.5	1442.0
# 52	294.5	426.2	493.0
# 101	230.9	282.2	404.5
# 138	138.5	145.7	225.3
# 153	253.1	n.n.	425.3
# 180	134.0	138.9	182.9
Σ Ballschmitter	1720.5	1669.6	3173.1
PCB-Gesamtkonz. berechnet	8602.5	8347.8	15865.3

## Ofen Typ-1, Brennstoff: Kohle

Versuch	WIM/4	WIM/5	WIM/17	WIM/18
	ng/kg	ng/kg	ng/kg	ng/kg
<b>TE-PCB (WHO)</b>				
coplanare PCBs				
#77	45.7	18.3	45.2	31.2
#81	3.7	1.4	3.2	2.3
#126	7.6	2.2	6.2	2.3
#169	1.1	0.8	1.0	0.8
mono-ortho PCBs				
# 105	43.9	33.5	66.2	59.5
# 114	3.4	2.8	6.9	6.6
# 118	64.7	56.2	122.1	170.3
# 123	4.6	12.2	4.9	7.8
# 156	25.7	21.5	35.2	44.4
# 157	4.9	2.9	5.1	5.2
# 167	11.4	10.4	14.8	21.7
# 189	4.1	2.8	4.4	4.9
TEQ (PCB)	0.8	0.3	0.7	0.3

Ballschmitter PCBs	pg/Nm <sup>3</sup>	pg/Nm <sup>3</sup>	pg/Nm <sup>3</sup>	pg/Nm <sup>3</sup>
# 28	753.2	1056.1	624.8	1035.1
# 52	453.3	434.7	315.7	520.8
# 101	289.9	284.5	333.9	747.5
# 138	152.7	136.2	311.1	518.5
# 153	295.8	256.0	410.2	892.4
# 180	151.5	127.4	198.8	265.1
Σ Ballschmitter	2096.4	2295.0	2194.4	3979.5
PCB-Gesamtkonz. berechnet	10482.2	11474.9	10972.1	19897.4

Ofen Typ-1, Brennstoff: Koks

Versuch	WIM/6	WIM/7
	ng/kg	ng/kg
TE-PCB (WHO)		
coplanare PCBs		
#77	14.9	27.3
#81	1.0	1.4
#126	2.3	1.8
#169	n.n.	0.8
mono-ortho PCBs		
# 105	28.7	35.3
# 114	1.8	3.4
# 118	49.5	63.6
# 123	0.8	4.6
# 156	18.5	25.7
# 157	3.6	4.0
# 167	8.1	11.2
# 189	3.2	4.0
TEQ (PCB)	0.3	0.2

Ballschmitter PCBs	pg/Nm <sup>3</sup>	pg/Nm <sup>3</sup>
# 28	1436.5	985.0
# 52	430.7	438.7
# 101	265.2	255.2
# 138	116.7	150.7
# 153	222.3	290.1
# 180	115.0	151.7
Σ Ballschmitter	2586.3	2271.3
PCB-Gesamtkonz. berechnet	12931.7	11356.4

## Ofen Typ-2, Brennstoff: Holz

Versuch	WIM/8	WIM/9	WIM/15
	ng/kg	ng/kg	ng/kg
TE-PCB (WHO)			
coplanare PCBs			
#77	16.8	21.9	22.0
#81	1.2	1.4	0.8
#126	2.0	3.0	1.5
#169	0.6	0.9	0.7
mono-ortho PCBs			
# 105	35.7	45.2	46.0
# 114	2.8	3.4	3.5
# 118	63.5	78.4	75.6
# 123	10.2	5.0	7.1
# 156	24.8	26.8	29.6
# 157	3.6	3.8	3.9
# 167	11.0	11.7	13.1
# 189	3.5	3.2	3.8
TEQ (PCB)	0.2	0.3	0.2

Ballschmitter PCBs	pg/Nm <sup>3</sup>	pg/Nm <sup>3</sup>	pg/Nm <sup>3</sup>
# 28	1528.4	3139.0	1430.5
# 52	472.7	844.2	466.9
# 101	305.3	428.3	374.1
# 138	157.2	175.1	204.6
# 153	371.5	336.6	476.4
# 180	154.6	154.6	177.5
Σ Ballschmitter	2989.7	5077.7	3130.1
PCB-Gesamtkonz. berechnet	14948.7	25388.5	15650.6

## Ofen Typ-2, Brennstoff: Kohle

Versuch	WIM/10	WIM/11	WIM/12
	ng/kg	ng/kg	ng/kg
TE-PCB (WHO)			
coplanare PCBs			
#77	25.6	34.1	20.5
#81	1.5	2.3	1.2
#126	1.9	3.4	1.3
#169	0.6	0.4	0.9
mono-ortho PCBs			
# 105	39.0	53.3	44.0
# 114	3.8	4.0	3.6
# 118	64.4	86.1	75.0
# 123	3.4	3.6	2.3
# 156	23.1	32.4	27.6
# 157	3.1	4.7	3.8
# 167	10.7	14.6	12.2
# 189	3.6	5.3	3.9
TEQ (PCB)	0.2	0.4	0.2

Ballschmitter PCBs	pg/Nm <sup>3</sup>	pg/Nm <sup>3</sup>	pg/Nm <sup>3</sup>
# 28	697.4	1120.7	803.5
# 52	411.2	564.5	350.6
# 101	279.6	362.5	335.8
# 138	137.4	194.9	183.3
# 153	271.2	436.5	415.8
# 180	138.6	186.6	148.0
Σ Ballschmitter	1935.4	2865.6	2237.0
PCB-Gesamtkonz. berechnet	9676.9	14327.8	11185.2



## Ofen Typ-2, Brennstoff: Koks

Versuch	WIM/13	WIM/14
	ng/kg	ng/kg
TE-PCB (WHO)		
coplanare PCBs		
#77	19.0	20.5
#81	1.5	1.7
#126	1.6	1.3
#169	n.n.	n.n.
mono-ortho PCBs		
# 105	44.5	53.7
# 114	3.6	4.0
# 118	75.3	87.6
# 123	5.8	8.9
# 156	28.2	37.1
# 157	4.3	4.1
# 167	12.3	16.5
# 189	3.9	4.2
TEQ (PCB)	0.2	0.2

Ballschmitter PCBs	pg/Nm <sup>3</sup>	pg/Nm <sup>3</sup>
# 28	794.5	836.3
# 52	349.8	378.3
# 101	336.1	386.7
# 138	199.7	237.2
# 153	340.3	448.0
# 180	162.7	208.3
Σ Ballschmitter	2183.1	2494.7
PCB-Gesamtkonz. berechnet	10915.6	12473.4

Ofen Typ-3, Brennstoff: Kohle

Versuch	WIM/21
	ng/kg
TE-PCB (WHO)	
coplanare PCBs	
#77	25.7
#81	2.1
#126	2.3
#169	0.9
mono-ortho PCBs	
# 105	41.6
# 114	5.7
# 118	132.4
# 123	4.1
# 156	38.3
# 157	4.3
# 167	18.7
# 189	4.0
TEQ (PCB)	0.3

Ballschmitter PCBs	pg/Nm <sup>3</sup>
# 28	993.4
# 52	489.3
# 101	611.1
# 138	403.8
# 153	726.0
# 180	219.4
Σ Ballschmitter	3443.0
PCB-Gesamtkonz. berechnet	17215.1

## **Anhang B. Rauchgasparameter**

Die folgenden Diagramme zeigen den zeitlichen Verlauf der CO, CO<sub>2</sub> und O<sub>2</sub>-Konzentrationen während der Emissionsprobenahmen. Die Konzentrationen sind als Prozentwerte angegeben. O<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> beziehen sich auf die linke Skala des jeweiligen Diagrammes, die CO-Werte auf die rechte Skala.

