

Wissenschaftszentrum Weihenstephan
für Ernährung, Landnutzung und Umwelt
Lehrstuhl für Ökologische Chemie und Umweltanalytik
der Technische Universität München

**Identifikation von Indikatorverbindungen für die *on-line* Überwachung der
industriellen Altholz- und Abfallverbrennung mittels
REMPI-Lasermassenspektrometrie sowie Untersuchungen zur Bildung von
chloraromatischen Verbindungen**

Martin Blumenstock

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung,
Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen
Grades eines

Doktors der Naturwissenschaften

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. W. Huber

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Dr. h. c. (RO) A. Kettrup
2. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Dr. agr. habil. H. Parlar
3. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. R. Zimmermann, Universität Augsburg

Die Dissertation wurde am 12.03.2002 bei der Technischen Universität München eingereicht und
durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und
Umwelt am 17.06.2002 angenommen.

There is no success like failure
and failure is no success at all
(Bob Dylan)

INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS	I
VERZEICHNIS DER TABELLEN.....	IV
VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN	V
VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN.....	IX
DANKSAGUNG	XII
ZUSAMMENFASSUNG	XIV
SUMMARY	XVIII
1. EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG.....	1
2. SUBSTANZKLASSEN UND SCHADSTOFFBILDUNG	3
2.1 Substanzklassen.....	3
2.2 Eigenschaften der untersuchten Substanzklassen.....	5
2.3 Die Verteilungsverhalten der untersuchten Verbindungen im Rauchgas.....	9
2.4 Schadstoffbildungsmechanismen.....	10
2.4.1 Bildung der Chloraromaten.....	10
2.4.1.1 Gasphasenbildung.....	11
2.4.1.2 Bildung aus Vorläuferverbindungen.....	12
2.4.1.3 <i>De-novo</i> Synthese	13
2.4.2 Bildung der Aromaten.....	15
2.4.3 Einflußfaktoren auf die Schadstoffbildung	17
2.4.3.1 Temperatur und Verweilzeit.....	17
2.4.3.2 Katalysatorwirkung und Chlorgehalt	18
2.4.3.3 Verbrennungsprozeß und -qualität	21
3. MATERIAL, METHODEN UND KONZEPTE	23
3.1 Untersuchte Anlagen, Probenahmestellen und Probenumfang	23
3.1.1 Pilot-Verbrennungsanlage zur Verwertung von Holzabfällen (PVA).....	23
3.1.2 Sondermüllverbrennungsanlage (SMVA).....	24
3.1.3 Holzverbrennungsanlage (HVA)	25
3.1.4 Hausmüllverbrennungsanlage (MVA)	25
3.1.5 Probenumfang.....	26
3.2 Konventionelle Probenahme- und Analysetechnik.....	27
3.2.1 Probenahmetechnik	27
3.2.2 Aufreinigung und Analytik.....	29
3.2.2.1 Polychlorierte Benzole (PCBz), Benzol, Toluol, Xylole (BTX) und methylierte Naphthaline (MeNap).....	29
3.2.2.2 Polychlorierte Phenole (PCPh)	30

3.2.2.3 Polychlorierte Dibenzo- <i>p</i> -dioxine/Dibenzofurane (PCDD/F) und polychlorierte Biphenyle (PCB)	30
3.2.2.4 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	32
3.2.3 Qualitätssicherung und Güte des Datensatzes	32
3.2.3.1 Kriterien der Quantifizierbarkeit	32
3.2.3.2 Vergleich der PCBz-Konzentrationen aus naßchemischen Analysen mit PCBz-Konzentrationen aus der Thermodesorption	33
3.2.3.3 Wiederfindungsraten	35
3.2.3.4 Blindwerte	36
3.2.3.5 Qualität des Datensatzes (Quantifizierbarkeit und Reproduzierbarkeit)	37
3.3 Resonanzverstärkte Mehrphotonenionisation und Flugzeitmassenspektrometrie (REMPI-TOFMS) und deren Anwendung in der Müllverbrennung	40
3.3.1 Kurze Einführung in das Prinzip von Mehrphotonenionisation und Flugzeitmassenspektrometrie	40
3.3.2 Spektroskopische Eigenschaften der untersuchten Substanzen im UV-Bereich und praktische Durchführung des REMPI-Experimentes an großtechnischen Feuerungsanlagen	42
3.3.3 Das Leitparameterkonzept - Indirekter Nachweis der PCDD/F mittels Surrogatverbindungen	46
3.4 Methoden zur Interpretation des Datensatzes	50
3.4.1 Multivariate Statistik - Hauptkomponentenanalyse	50
3.4.2 Semiempirische quantenchemische Berechnungen ausgewählter Substanzen	52
4. ERGEBNISSE UND DISKUSSION	55
4.1 Die Leitbeziehungen für Chloraromaten	55
4.1.1 Holzverbrennung an einer 0.5 MW Pilotverbrennungsanlage (PVA)	55
4.1.2 Sondermüllverbrennung an einer 22 MW Sondermüllverbrennungsanlage (SMVA)	62
4.1.3 Hausmüllverbrennung an einer 22 MW Hausmüllverbrennungsanlage (MVA)	70
4.1.4 Holzverbrennung an einer 15 MW Holzverbrennungsanlage (HVA)	78
4.1.5 Chlorbenzol als Leitparameter	82
4.1.6 Zusammenfassung	86
4.2 Anwendung der Leitbeziehungen: On-line-Monitoring mit REMPI-TOFMS	89
4.3 Untersuchungen zu den Bildungsmechanismen der Chloraromaten	96
4.3.1 Hochtemperaturbildung	96
4.3.1.1 Sondermüllverbrennungsanlage (SMVA)	97
4.3.1.2 Hausmüllverbrennungsanlage (MVA)	100
4.3.2.1 Polychlorierte Benzole (PCBz) und Polychlorierte Phenole (PCPh)	112
4.3.2.2 Polychlorierte Dibenzo- <i>p</i> -dioxine (PCDD) und polychlorierte Dibenzofurane (PCDF)	119
4.3.2.3 Polychlorierte Biphenyle (PCB)	131
4.3.2 Zusammenfassung	135

4.4 <i>Memory</i> -Hochtemperatureffekte: Langfristige Konzentrationserhöhung der Emissionswerte	140
4.4.1 Pilotverbrennungsanlage (PVA)	140
4.4.2 Sondermüllverbrennungsanlage (SMVA).....	150
4.4.3 Hausmüllverbrennungsanlage (MVA)	162
4.4.4 Zusammenfassung.....	172
4.5. Holzverbrennung als Quelle chloraromatischer Verbindungen	175
5. AUSBLICK.....	182
6. LITERATUR.....	184
7. ANHANG	215
7.2 Anhang A: Anhang zu Kapitel 1 und 2.....	216
7.3 Anhang B: Anhang zu Kapitel 3.....	217
7.4 Anhang C: Anhang zu Kapitel 4	227
8. VERZEICHNIS EIGENER VERÖFFENTLICHUNGEN.....	324

VERZEICHNIS DER TABELLEN

Tabelle 2.1-1: Anzahl der Isomeren pro homologer Gruppe für die untersuchten Chloraromaten..	5
Tabelle 2.2-1: Internationale Toxizitätsäquivalenzfaktoren (I-TEF) nach NATO/CCMS und WHO für PCDD/F	6
Tabelle 2.2-2: Toxizitätsäquivalenzfaktoren (TEF) der PCB für Menschen nach Safe und WHO .	7
Tabelle 2.2-3: Überblick ausgewählter physikalisch-chemischer Eigenschaften der untersuchten Substanzen	8
Tabelle 3.1-1: Übersicht über den Probenumfang.....	26
Tabelle 3.2-1: Probenreinigung und Trennung.....	31
Tabelle 3.2-2: Partikelanteil von höher chlorierten PCBz und PCPh im Rohgas der SMVA bei circa 250°C.....	33
Tabelle 3.2-3: Wiederfindungsraten für Chloraromaten	36
Tabelle 3.2-4: Prozentanteil der nicht quantifizierbaren Werte für jede Substanzklasse	37
Tabelle 3.3-1: Auswahl möglicher niedrig chlorierter Surrogate für den I-TEQ Wert der PCDD/F mit entsprechenden REMPI-Eigenschaften.....	49
Tabelle: 4.1-1: Bestimmtheitsmaße (r^2) der Korrelationen zwischen dem I-TEQ Wert der PCDD/F und MCBz für alle untersuchten Anlagentypen und Temperaturen	86
Tabelle 4.3-1: Erklärte Varianzen der HKA für alle Substanzklassen und Chlorierungsgrade ...	108

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

Abbildung 2.1-1: Strukturformeln ausgewählter Verbindungen der untersuchten Substanzklassen ...	4
Abbildung 2.4-1: Bildungsschema für PAK nach Bockhorn	16
Abbildung 2.4-2: Dualistisches Prinzip der Bildung und Zersetzung nach Hagenmaier	18
Abbildung 3.1-1: Schematischer Aufbau der PVA	23
Abbildung 3.1-2: Schematischer Aufbau der SMVA	24
Abbildung 3.1-3: Schematischer Aufbau der HVA	25
Abbildung 3.1-4: Schematischer Aufbau der Hausmüllverbrennungsanlage	26
Abbildung 3.2-1: Schematischer Aufbau der isokinetischen Probenahme	28
Abbildung 3.2-2: Vergleich zwischen PCBz-Konzentrationen (A) und Wiederfindungsraten (B) der isotopenmarkierten Standards für die Gesamt- und Thermo-desorptionsproben	34
Abbildung 3.2-3: Vergleich der Ergebnisse dieser Arbeit mit denjenigen eines unabhängigen, akkreditierten Prüfinstitutes von zeitgleich entnommenen Proben im Rohgas (200°C) der MVA	38
Abbildung 3.3-1: Schema der REMPI-Ionisation am Beispiel von Benzol	41
Abbildung 3.3-2: Modifiziertes Jablonski-Diagramm für ein Zweifarbenexperiment	42
Abbildung 3.3-3: REMPI-Spektren von Monochlorbenzol mit effusivem („warmem“) Gaseinlaß und mit („kaltem“) Jet-Molekularstrahleinlaß	44
Abbildung 3.3-4: Schematischer Aufbau eines REMPI-TOFMS Instruments	45
Abbildung 3.4-1: Schematische Darstellung der Durchführung einer Hauptkomponentenanalyse	50
Abbildung 4.1-1: Aromaten- und Chloraromatenkonzentrationen bei circa 850°C für unter- und überstöchiometrische Verbrennungsbedingungen an der PVA	56
Abbildung 4.1-2: <i>Loading plot</i> des Datensatzes der PVA	57
Abbildung 4.1-3: <i>Score plot</i> des Datensatzes der PVA	58
Abbildung 4.1-4: Korrelationskoeffizienten (KK) zwischen den Toxizitätsäquivalenten verschiedener Substanzgruppen und den niedrig chlorierten Kongeneren und Homologen der Chloraromaten an der PVA	60
Abbildung 4.1-5: Vergleich der Chloraromatenverhältnisse im Hochtemperaturbereich von drei Anlagen (PCB, PCDD und PCDF)	61
Abbildung 4.1-6: <i>Loading plot</i> des Datensatzes der SMVA	63
Abbildung 4.1-7: <i>Score plot</i> des Datensatzes der SMVA	64
Abbildung 4.1-8: Korrelationskoeffizienten (KK) zwischen den Toxizitätsäquivalenten verschiedener Substanzgruppen mit den niedrig chlorierten Kongeneren und Homologen der Chloraromaten an den Probenahmepunkten der SMVA ..	68
Abbildung 4.1-9: <i>Loading plot</i> des Datensatzes der MVA	70

Abbildung 4.1-10: <i>Score plot</i> des Datensatzes der MVA.....	72
Abbildung 4.1-11: Korrelationskoeffizienten (KK) zwischen den Toxizitätsäquivalenten verschiedener Substanzgruppen mit den niedrig chlorierten Kongeneren und Homologen der Chloraromaten an den Probenahmepunkten der MVA	76
Abbildung 4.1-12: <i>Loading plot</i> des Datensatzes der HVA.....	78
Abbildung 4.1-13: <i>Score plot</i> des Datensatzes der HVA	79
Abbildung 4.1-14: Korrelationskoeffizienten (KK) zwischen den Toxizitätsäquivalenten verschiedener Substanzgruppen mit den niedrig chlorierten Kongeneren und Homologen der Chloraromaten an der HVA	81
Abbildung 4.1-15: Regressionsgeraden zwischen Chlorbenzol und dem I-TEQ Wert der PCDD/F im Reingas der 22 MW Hausmüllverbrennungsanlage und 22 MW Sondermüllverbrennungsanlage	83
Abbildung 4.1-16: Regressionsgeraden zwischen Chlorbenzol und dem I-TEQ Wert der PCDD/F im Rohgas bei circa 200°C an der 22 MW Sondermüll- verbrennungsanlage, der 22 MW Hausmüllverbrennungsanlage und 15 MW Holzverbrennungsanlage.....	84
Abbildung 4.1-17: Quotienten für Chloraromatenkonzentrationen im Hochtemperaturbereich der PVA, SMVA und MVA	87
Abbildung 4.2-1: REMPI-TOFMS MCBz-Konzentrationsverläufe an der SMVA und MVA.....	89
Abbildung 4.2-2: Chlorbenzolkonzentration und I-TEQ Wert an der SMVA in zeitlich aufgelösten Intervallen im Roh- und Reingas	91
Abbildung 4.2-3: MCBz-Konturplot an der SMVA.....	92
Abbildung 4.2-4: Massenspektren an der SMVA und MVA aufgenommen mit REMPI @269,82nm	93
Abbildung 4.2-5: Konzentrationsverläufe von Chlorbenzol und Naphthalin an der SMVA, aufgenommen mit REMPI @269,82nm.....	94
Abbildung 4.3-1: Konzentrationsverhältnisse ($c(260^{\circ}\text{C})/c(700^{\circ}\text{C})$) der Chloraromaten im Abhitzeessel der SMVA	97
Abbildung 4.3-2: Mittlere absolute Konzentrationen der PCDD/F, PCBz und PCPh bei 700°C und 250°C an der SMVA	98
Abbildung 4.3-3: Konzentrationsverhältnisse ($c(200^{\circ}\text{C})/c(700^{\circ}\text{C})$) der Chloraromaten im Abhitzeessel der MVA im Normalbetrieb	100
Abbildung 4.3-4: Mittlere absolute Konzentrationen der PCDD/F, PCBz und PCPh bei 600°C-700°C und 200°C an der MVA.....	101
Abbildung 4.3-5: Konzentrationsverhältnisse ($c(200^{\circ}\text{C})/c(700^{\circ}\text{C})$) der Chloraromaten im Abhitzeessel der MVA unter instationären Betriebsbedingungen	102

Abbildung 4.3-6: Mittlere absolute Konzentrationen der PCDD/F, PCBz und PCPh unter instationären Betriebsbedingungen bei 600-700°C und 200°C an der MVA ..	103
Abbildung 4.3-7: Aromatenprofile (PAK & BTX) im Abhitzekegel der MVA in Abhängigkeit der Temperatur (1100- 200°C)	104
Abbildung 4.3-8: Mit REMPI-TOFMS (@266nm) an der SMVA bei verschiedenen Temperaturen gemessene PAK-Muster und schematische Darstellung der Prozesse bei der Kondensation von PAK zu Ruß	105
Abbildung 4.3-9: Vergleich der relativen (bezogen auf den I-TEQ Wert der PCDD/F bei 200°C) I-TEQ Werte der PCDD und PCDF an der SMVA und MVA.....	106
Abbildung 4.3-10: <i>Score plot</i> der HxCDF	109
Abbildung 4.3-11: <i>Loading plot</i> der HxCDF	110
Abbildung 4.3-12: <i>Loading plot</i> für die Kongeneren aller Chloraromaten	111
Abbildung 4.3-13: <i>Score plot</i> für die Kongeneren aller Chloraromaten	112
Abbildung 4.3-14: Verteilung der Kongeneren von PCBz und PCPh	113
Abbildung 4.3-15: Vergleich der Werte für die Bildungswärmen der PCBz und PCPh	114
Abbildung 4.3-16: Bevorzugte Molekülpositionen für eine Oxidation von PCBz zu PCPh durch OH-Radikalenangriff	117
Abbildung 4.3-17: Verteilung der Kongeneren der PCDD	122
Abbildung 4.3-18: Verteilung der Kongeneren der PCDF	128
Abbildung 4.3-19: Verteilung der Kongeneren der PCB	133
Abbildung 4.3-20: Bildungsschema für Chloraromaten	136
Abbildung 4.4-1: Konzentrationen der PCBz, PCPh, PCB, PCDD/F und PAK vor, während und nach instationären Verbrennungsbedingungen in der Nachbrennkammer der PVA.....	143
Abbildung 4.4-2: PAK-Massenspuren bei den Prozeßumstellungen von Verbrennung auf Vergasung an der PVA aufgenommen mit REMPI-TOFMS	144
Abbildung 4.4-3: Konzentrationsverläufe (unquantifizierte Rohdaten) ausgewählter PAK-Massenspuren nach einer Betriebsstörung in der Nachbrennkammer der PVA aufgenommen mit REMPI-TOFMS	146
Abbildung 4.4-4: Schematischer Ablauf der Prozesse vor und während der <i>Memory</i> -Phase auf die in der Nachbrennkammer gebildeten kohlenstoffhaltigen Strukturen	148
Abbildung 4.4-5: Homologenprofile der Chloraromaten an der SMVA bei Normal-, Erdölbetrieb und in den Umstellungsphasen auf Normalbetrieb	152
Abbildung 4.4-6: Homologenprofile der Chloraromaten im Rohgas der SMVA bei 700-800°C und 250-280°C vor, während und nach provozierten CO-Spitzen.....	155

Abbildung 4.4-7: Homologenprofile der Chloraromaten im Reingas der SMVA bei 70°C vor, während und nach provozierten CO-Spitzen	158
Abbildung 4.4-8: Anlagendaten und korrespondierende REMPI-TOFMS PAK-Konzentrationsverläufe bei der Gebindeaufgabe (gestrichelte Linien) an der SMVA	161
Abbildung 4.4-9: Aromatenprofile im Rohgas der MVA bei 600°C und 200°C vor, während und nach provozierten CO-Spitzen	164
Abbildung 4.4-10: REMPI-TOFMS @269.82 nm Massenspektren im Rohgas der MVA bei circa 200°C vor und während der <i>Memory</i> -Phase	166
Abbildung 4.4-11: Konturplot einer REMPI-TOFMS Messung (Nd:YAG Laser bei 266 nm) bei 900°C während instationärer Verbrennungsbedingungen an der MVA	168
Abbildung 4.4-12: Homologenprofile der Chloraromaten im Rohgas der MVA bei 600°C und 200°C vor, während und nach provozierten CO-Spitzen.....	170
Abbildung 4.5-1: PCDD/F-Homologenmuster und Verhältnisse der PCDD/F-Homologensummen in Abhängigkeit der Brennstoffmischungen an der HVA.....	176
Abbildung 4.5-2: I-TEQ Werte der PCDD/F in Abhängigkeit der Brennstoffmischungen an der HVA	178
Abbildung 4.5-3: PCB, PCBz und PCPh Homologenmuster in Abhängigkeit der Brennstoffmischungen an der HVA	179
Abbildung 4.5-4: TEQ Werte der PCB (nach Safe) und Konzentrationsverhältnisse der ((I-)TEQ Werte und Homologensummen der PCDD/F und PCB in Abhängigkeit von den Brennstoffmischungen an der HVA	181

VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN

α	Signifikanzniveau
Acn	Acenaphthen
Ant	Anthracen
BaA	Benz[a]anthracen
BaP	Benzo[a]pyren
BbF	Benzo[b]fluoranthen
BO	Benzol
BeP	Benzo[e]pyren
BghiP	Benzo[g,h,i]perylen
BkF	Benzo[k]fluoranthen
BTX	Benzol, Toluol, Ethylbenzol und m-, p-, o-Xylol
c	Konzentration einer betrachteten Spezies ([Masse/Volumen], [mol/Volumen])
Cl _x B	Homologengruppe der polychlorierten Biphenyle ($1 \leq x \leq 10$)
Cl _x Bz	Homologengruppe der polychlorierten Benzole ($1 \leq x \leq 6$)
Cl _x DD/F	Homologengruppe der polychlorierten Dibenzo- <i>p</i> -dioxine/furane ($1 \leq x \leq 8$)
Cl _x Ph	Homologengruppe der polychlorierten Phenole ($1 \leq x \leq 5$)
Chry	Chrysen
CVD	Chemical vapor deposition
DbahA	Dibenz[ah]anthracen
DF	Dibenzofuran (unchloriert)
DD	Dibenzo- <i>p</i> -dioxin (unchloriert)
E	Energie
EO	Ethylbenzol
FA	Fluoranthen
FO	Fluoren
G	Freie Enthalpie
GPC	Gelpermeationschromatographie
H	Enthalpie
HK	Hauptkomponente
HKA	Hauptkomponentenanalyse
HOF	<i>Heat of formation</i>
HRGC/HRMS	Hochauflösende Gaschromatographie/hochauflösende Massenspektrometrie
HRGC/LRMS	Hochauflösende Gaschromatographie/niedrigauflösende Massenspektrometrie
HVA	Holzverbrennungsanlage

HWI	<i>Hazardous waste incinerator</i>
IcdP	Indeno[1,2,3-c,d]pyren
I-TEF	<i>International Toxicity Factor</i>
I-TEQ	<i>International Toxicity Equivalent (Value)</i>
I-TEQ (PCDD/F, PCB)	<i>International Toxicity Equivalent (Value)</i> (der PCDD/F, PCB)
I-TEQ (WHO)	<i>International Toxicity Equivalent (Value)</i> (der PCDD/F nach WHO berechnet)
KK	Korrelationskoeffizient
MDF	<i>Medium density fibreboard</i>
MeNap	Methylierte Naphthaline
MVA	(Haus-)Müllverbrennungsanlage
MWI	<i>Municipal waste incinerator</i>
Nap	Naphthalin
P	Leistung
p	Sättigungsdampfdruck
p.a.	pro analysis
PAH	<i>Polycyclic aromatic hydrocarbons</i>
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PCBz	Polychlorierte Benzole
PCDD/F	Polychlorierte Dibenzo- <i>p</i> -dioxine/furane, kurz:Dioxine
PCPh	Polychlorierte Phenole
Phe	Phenanthren
PIC	<i>Products of Incomplete Combustion</i>
PVA	Pilotverbrennungsanlage
PWI	<i>Pilotscale waste incinerator</i>
PY	Pyren
REMPI-TOFMS	<i>Resonance Enhanced Multiphoton Ionization-Time of Flight Mass Spectrometry</i>
r ²	Bestimmtheitsmaß der Regression
S	Entropie
SMVA	Sondermüllverbrennungsanlage
SOC	Mittelflüchtige organische Verbindungen
T	Temperatur
TD	Thermodesorption
TNV	Thermische Nachverbrennung
TO	Toluol
VOC	Flüchtige organische Verbindungen
XAD-2	Adsorbens (Polystyrol-Divinylbenzol-Kopolymer)

XO

Xylol

Präfixe:

M = Mono, Di = Di, Tri = Tri, T oder Te = Tetra, Pe = Penta, Hx = Hexa, Hp = Hepta, O = Octa; z.

B. MCDD = Monochlordibenzo-*p*-dioxin, etc.

Subskripte:

T = Temperatur

DANKSAGUNG

Der praktische Teil der vorliegenden Arbeit und die Datenerhebung wurde im Zeitraum von Februar 1997 bis September 2000 im Institut für Ökologische Chemie des GSF-Forschungszentrums für Umwelt und Gesundheit, Oberschleißheim, durchgeführt.

Herrn Prof. Dr. A. Kettrup

danke ich sehr für die Aufnahme an seinem Institut, die ausgezeichneten Arbeitsmöglichkeiten und seine große Unterstützung und Hilfsbereitschaft bei vielen organisatorischen Problemen.

Ein besonders großer Dank gilt

Herrn Prof. Dr. R. Zimmermann,

ohne dessen fachkundige Betreuung, interessante Themenstellung und wertvolle Anregungen und Motivationskünste wäre ein Großteil der hier vorgestellten Arbeit nicht denkbar gewesen wäre. Darüber hinaus möchte ich mich an dieser Stelle für seinen besonders angenehmen Führungsstil bedanken.

Für die Übernahme des Koreferats danke ich Herrn. Prof. Dr. H. Parlar

Herrn PD Dr. K.-W. Schramm danke ich für die Möglichkeit, die analytische Ausstattung des Dioxinlabors am Institut für Ökologische Chemie am GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit zu nutzen.

Herrn B. Henkelmann danke ich für die vielfältige Unterstützung bei der Untersuchung der Proben mit verschiedenartigen massenselektiven Detektoren. Ohne seine Hilfsbereitschaft wäre ein Teil der Messungen mit den hochauflösenden Massenspektrometern nicht möglich gewesen.

Meinen Kollegen vom Institut für Ökologische Chemie des GSF Forschungszentrums gilt Dank: Insbesondere Herrn M. („DOC“) Schneider, ohne dessen Beistand sowohl die fachliche als auch die „soziale“ Komponente oftmals zu kurz gekommen wäre. Zudem danke ich für die Durchsicht des Manuskripts.

Herrn R. Dorfner („Opti“), der so manches Ernste „vergnüglicher“ hat erscheinen lassen.

Herrn Th. Ferge, für die unzähligen Diskussionen über alle Fach- und Lebensthemen. Dem „Rest“ der Kollegen, welche über den gesamten Zeitraum hinweg ein hervorragendes Arbeitsklima verbreiteten und die Zeit der Doktorarbeit somit angenehm gestalteten:

Dr. H. J. Heger, F. Mühlberger, K. Hafner, Th. Hauler, K. Doods, Dr. („Chefarzt“) J. Maguhn, Dr. A. Wehrmeier, O. Klobasa, Dr. G. Severin, Dr. Ch. Klimm, Dr. A. Kaune, und Th. Wottgen.

Dank gilt auch meinen Kollegen vom Bayerischen Institut für Abfallforschung (BIfA). Besonders möchte ich mich an dieser Stelle bei Herrn H. Nordsieck für die Durchsicht des Manuskripts bedanken.

Allen meinen Freunden, welche mir in meiner Freizeit freudige Stunden „verordneten“, damit die „Ausdauer“ für die Arbeit nicht fehle, sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Bei meiner Familie, Ricarda und Jakob, bedanke ich mich an dieser Stelle dafür, daß deren Geduld und Leidensfähigkeit mit mir nicht endete.

Meiner Mutter danke ich für jede Hilfe über das letzte Jahrzehnt hinweg.

Der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) Osnabrück sei gedankt für die finanzielle Förderung der vorliegenden Arbeit innerhalb von zwei Projekten (AZ 04778& AZ 12447)

Dem Bayerischen Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen ist für die weitere Förderung der Ideen dieser Arbeit im Rahmen des Projektes „Sensorgesteuerte Verbesserung der Reststoffqualität“ (E 106) zu danken.

ZUSAMMENFASSUNG

Die zentrale Aufgabenstellung der Arbeit bestand in der Identifizierung von mittels Lasermassenspektrometrie (REMPI-TOFMS) meßbaren Surrogaten für das Toxizitätsäquivalent (I-TEQ) der polychlorierten Dibenzo-*p*-dioxine und Dibenzofurane (PCDD/F) an großtechnischen Verbrennungsanlagen, z.B. Hausmüll- und Biomassenverbrennung (Holz). Bei der Bearbeitung dieser zentralen Fragestellung ergab sich ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit im Bereich der Bildungsprozesse der untersuchten chlorierten und unchlorierten Aromaten. Insgesamt wurden in dieser Arbeit drei großtechnische Verbrennungsanlagen und eine Pilotverbrennungsanlage auf Chloraromaten (PCDD/F, PCB, PCBz und PCPh) und Aromaten (BTX und PAK) im Temperaturbereich zwischen circa 700°C und 90°C untersucht. Die Anzahl der untersuchten Proben betrug 108. Die Fragestellungen und Ergebnisse dieses Datensatzes und der REMPI-TOFMS Messungen können in vier zentrale Punkte gegliedert werden:

1. Untersuchung zu den statistischen Beziehungen chloraromatischer Spurenverbindungen im Rauchgas von unterschiedlichen Verbrennungsanlagen mit dem Ziel der Identifizierung von Leitverbindungen zur indirekten Bestimmung des I-TEQ Wertes der PCDD/F mittels *on-line* Lasermassenspektrometrie (REMPI-TOFMS) (Kapitel 4.1 und 4.2).

An allen Anlagen wurden hohe Werte für die Korrelationskoeffizienten von Einzelverbindungen, z.B. der PCBz, mit dem I-TEQ Wert der PCDD/F gefunden. Unter der Maßgabe der Eignung dieser Einzelverbindung für die Messbarkeit mit REMPI-TOMFS konnte an den vier untersuchten Anlagen Monochlorbenzol als ein geeigneter Leitparameter identifiziert werden. Darüber hinaus wurde an einer Anlage gezeigt, daß niedrig chlorierte PCDD/F unter bestimmten Anlagenbedingungen, wie z.B. geringe Chlorgehalte des Brennstoffes und hohe CO-Konzentrationen im Rauchgas, keine geeigneten Surrogate für den I-TEQ Wert darstellen (Kapitel 4.1).

An zwei Anlagen, der Sondermüllverbrennungsanlage (SMVA) und der Hausmüllverbrennungsanlage (MVA), wurde Monochlorbenzol *on-line* mit REMPI-TOFMS gemessen und damit über die bekannte statistische Abhängigkeit eine indirekte Bestimmung des I-TEQ Wertes der PCDD/F durchgeführt (Kapitel 4.2).

2. Untersuchungen zur Bildung aromatischer und chloraromatischer Verbindungen entlang des Rauchgaskanals mit dem Ziel, die unter 1. genannte statistische Beziehung der Chloraromaten zu erklären (Kapitel 4.3).

Mit den zur Bildung der Chloraromaten durchgeführten Probenahmen wurde gezeigt, daß auch oberhalb des bekannten Bildungsfensters der Chloraromaten von 300-450°C Bildungsprozesse der untersuchten Substanzen stattfinden. Die Nachbildung der untersuchten Chloraromaten zwischen circa 700°C und 200°C ist zehnmal größer als die der PAK. Im Gegensatz zu den

Chloraromaten zeigten die BTX sogar eine Konzentrationsabnahme entlang des Rauchgaskanals.

Für PCDF, PCB und PCBz wurde eine höhere Bildungsrate im Hochtemperaturbereich der Anlagen als für die PCDD und PCPh gefunden. Verglichen mit den PCDF, PCB und PCBz wiesen die PCDD und PCPh eine um den Faktor 2 höhere Nachbildung entlang des Rauchgaskanals auf. Dieses Ergebnis und der Vergleich mit dem PCDD-Kongenerenmuster aus Kondensationsreaktionen der PCPh, lassen den Schluss zu, daß die PCDD-Kongenerenverteilung in Verbrennungsprozessen stark von PCPh-Kondensationsreaktionen beeinflusst ist.

Ferner gibt das für die PCPh gefundene Kongenerenmuster einen Hinweis darauf, daß die PCPh durch einen Angriff von OH-Radikalen an den PCBz entstanden sein könnten. Wie semiempirische quantenchemische Rechnungen zeigten, unterliegen die Kongenerenmuster der PCPh und der PCBz keiner thermodynamischen Kontrolle.

Dieses Ergebnis gibt einen Hinweis auf Bildungsprozesse der Chloraromaten, welche nicht nur aus den allgemein gültigen chemischen Gesetzmäßigkeiten ableitbar sind, sondern vielmehr von Anlagenparametern wie Brennstoff, Wandbelegung und Vorhandensein von Spurenstoffen (z.B. Cu vs. Al) abhängen. Für diese Zusammenhänge hat sich der Begriff „*trace chemistry of fire*“ etabliert, der versucht, die vielen möglichen, aber z.T. nicht näher verstandenen Reaktionswege zu den Chloraromaten aufzuklären.

Aus der Analyse des PCDF-Kongenerenmusters ist z.T. mit Hilfe der Literatur die Dechlorierung von höher chlorierten Kongeneren und eine eventuelle Ringschlußreaktion der PCB zu PCDF als die das PCDF-Kongenerenmuster beeinflussenden Prozesse identifiziert worden.

Durch die kongenerenspezifische Auswertung der untersuchten Chloraromaten konnten für die verschiedenen Verbindungen mögliche Bildungswege zugeordnet werden. Diese Zuordnung zeigte, daß es für jede chloraromatische Substanzgruppe wahrscheinlich einen spezifischen Bildungsmechanismus gibt und die Bildungswege der Chloraromaten auch miteinander verbunden sein könnten.

Die gefundenen Zusammenhänge bei der Bildung der Chloraromaten ermöglichen es, die unter 1. dargestellte Korrelation zwischen dem I-TEQ Wert der PCDD/F und Chlorbenzol besser zu verstehen. Da 60 -70 % der Toxizität des I-TEQ Wertes von den PCDF getragen werden und diese in engem Zusammenhang mit der Bildung der PCBz stehen, ist es schlüssig, dass die PCBz generell gute Surrogate für den I-TEQ Wert der PCDD/F darstellen.

Die Kongenerenmuster aller untersuchten Chloraromaten zeigten eine sehr stabile Verteilung. Mit Hilfe von multivariater Statistik wurde gezeigt, dass es im Bereich der Verbindungen mit einer hohen Anzahl an Kongeneren zu einer höheren Varianz der Kongenerenverteilungen kommt. Dieses Ergebnis wurde auf die größere Anzahl der möglichen Reaktionswege für das jeweilige Kongener zurückgeführt.

Unter instationären Betriebsbedingungen, wie z.B. Spitzen der CO-Emission, weisen vor allem die ein- bis dreifach chlorierten Homologen aller chloraromatischen Verbindungen eine sehr hohe Konzentrationszunahme entlang des Rauchgaskanals auf, welche unter normalen Anlagenbedingungen nicht beobachtet werden konnte. Dieser Unterschied könnte auf eine Chlorierungsreaktion des bei hohen CO-Konzentrationen in großen Konzentrationen im Rauchgas gefundenen unchlorierten Dibenzo-*p*-dioxin und Dibenzofuran zurückzuführen sein (siehe 3.).

3. Untersuchungen zu den beobachteten *Memory*-Effekten für Chloraromaten und Aromaten mit dem Ziel, eine Erklärung sowohl für die erhöhten Konzentrationen als auch für die Musterverschiebung der Chloraromaten zu finden (Kapitel 4.4).

Um die Bildung von chlorierten und unchlorierten Aromaten bei gestörten Verbrennungsbedingungen zu untersuchen, wurde an drei Anlagen die CO-Konzentration des Rauchgases gezielt durch substöchiometrische Verbrennungsbedingungen erhöht. Sowohl bei induzierten als auch bei zufällig beobachteten CO-Spitzen wurden über mehrere Stunden erhöhte Konzentrationen aller untersuchten Verbindungen im Rauchgaskanal gemessen (*Memory*-Effekt).

Dabei zeigten die Aromaten vor allem im Bereich der dreifach und höher kondensierten Ringsysteme, wie z.B. Phenanthren und Benzo[*a*]pyren, nach den CO-Spitzen eine stark erhöhte Konzentration über Stunden hinweg, wohingegen die Konzentration der kleineren Aromaten, Benzol oder Naphthalin, nach der Betriebsstörung wieder auf normale Werte absanken. Da diese *Memory*-Effekte bereits bei Temperaturen um 700°C auftraten, wurden sie auf thermisch stabile Kohlenstoffablagerungen an den heißen Anlagenwänden in der Nachbrennzone zurückgeführt, die im Laufe der Zeit oxidiert werden.

Für die Chloraromaten zeigte sich an allen Anlagen während der CO-Spitzen vor allem ein starker Konzentrationsanstieg der ein- bis dreifach chlorierten Homologen der PCDD/F. Die Homologenkonzentrationen der übrigen untersuchten Chloraromaten wiesen einen wesentlich schwächeren Konzentrationsanstieg während der CO-Spitzen auf. Einige Stunden nach den CO-Spitzen sanken an der SMVA und MVA die Konzentrationen der ein- bis zweifach chlorierten Homologen der PCDD/F und PCB wieder ab, wohingegen für die höher chlorierten Homologen dieser Verbindungen ein deutlicher Konzentrationsanstieg beobachtet werden konnte.

An einer Pilotverbrennungsanlage (PVA) wurde ein anderes Verhalten für den Konzentrationsverlauf der niedrig chlorierten PCDD/F-Homologen nach instationären Betriebsbedingungen gefunden. Die Konzentrationen der niedrig chlorierten PCDD/F-Homologen stiegen auch Stunden nach den CO-Spitzen noch an. Der beobachtete Unterschied für die *Memory*-Effekte der niedrig chlorierten PCDD/F-Homologen zwischen der PVA und der MVA könnte auf die niedrigen Chlorkonzentrationen des Brennstoffes (Holz) und auch auf die pyrolytischen Prozeßbedingungen an der PVA zurückzuführen sein (vgl. 4.).

Im allgemeinen war das Kongenerenmuster der PCBz an allen Anlagen am wenigsten durch *Memory*-Effekte beeinflusst, was diese Substanzgruppe (PCBz) zu geeigneten Surrogaten für die Vorhersage des I-TEQ Wertes der PCDD/F macht.

Die beobachteten *Memory*-Effekte der Chloraromaten an drei Anlagen wurden, wie schon für die PAK, auf die bei hoher Temperatur in der Nachbrennzone gebildeten kohlenstoffhaltigen Ablagerungen an den Anlageinnenwänden zurückgeführt, die sowohl die Quelle für die Kohlenstoffgrundgerüste als auch eine katalytische Oberfläche für eine Chlorierungsreaktion darstellen können.

4. Untersuchung der Bildung von chloraromatischen Verbindungen bei der Holzverbrennung (Kapitel 4.5).

An zwei großtechnischen Feuerungsanlagen wurden ausschließlich Brennstoffmischungen aus Holz und Altholz verbrannt, um zu klären, ob und in welchem Ausmaß der Einsatz dieser Brennstoffe eine Auswirkung auf die Menge und die Zusammensetzung der im Rauchgas gefundenen Chloraromaten hat. Es konnte gezeigt werden, dass das Bildungspotential chloraromatischer Verbindungen in Verbrennungsprozessen mit Holz vermutlich aufgrund des niedrigen Chlorgehaltes des Brennstoffes limitiert ist. Ein steigender Chlorgehalt, z.B. durch die Zugabe von Altholz im Brennstoff, führte zu einem deutlichen Anstieg der Chloraromatenkonzentration im Rauchgas. Allerdings wurde durch die Untersuchungen auch klar, daß die Verbrennungsbedingungen für die beobachtete Konzentrationszunahme eine größere Rolle spielen als der Chlorgehalt des Brennstoffes.

Auffällig für die gefundenen Chloraromatenkonzentrationen bei der Holzverbrennung im Vergleich zur Hausmüllverbrennung ist der im Verhältnis höhere Anteil der PCDD an der Gesamtkonzentration der PCDD/F. Vermutlich treten aufgrund der höheren Konzentrationen der chlorierten Phenole, welche aus dem thermischen Abbau des Holzes stammen könnten, verstärkt Phenolkondensationsreaktionen bei der Bildung der PCDD auf (siehe 2.).

Abschließend läßt sich festhalten, daß die absoluten Konzentrationen der Chloraromaten bei der Holzverbrennung im Vergleich zur Hausmüllverbrennung deutlich niedriger lagen. Dieses Ergebnis ist im wesentlichen auf den niedrigen Chlorgehalt und zum Teil auch auf den um Größenordnungen niedrigeren Kupfergehalt des Brennstoffes zurückzuführen.

SUMMARY

The central setting of the presented work consists in the identification of suitable surrogates for the toxicity of PCDD/F that are measurable with laser-mass spectrometry (REMPI-TOFMS) at full-scale incineration plants, for example domestic refuse and biomass combustion. Further emphasis was put on the formation processes of chlorinated and unchlorinated aromatics. Three full-scale and a pilot-scale combustion plant were investigated for chlorinated (PCDD/F, PCB, PCBz and PCPh) and unchlorinated (BTX and PAH) aromatics in the temperature range between approximately 700°C and 90°C. The total number of the analyzed samples was 108. The central questions of the work and the results of the data set and the REMPI-TOFMS measurements can be divided into four central points:

1. Investigation of the statistical relationships of chlorinated aromatic trace compounds in the flue gas of different combustion plants in order to identify surrogates for the indirect determination of the I-TEQ value of the PCDD/F with on-line laser-mass-spectrometry (REMPI-TOFMS) (Chapter 4.1 and 4.2).

At all combustion plants, high values of the correlation coefficients between single chlorinated aromatic compounds and the I-TEQ value of the PCDD/F were found, for example for PCBz. Of all the investigated chlorinated aromatic compounds monochlorobenzene was identified as the most appropriate surrogate for REMPI-TOFMS measurements. Furthermore it was shown at one plant that low chlorinated PCDD/F did not represent any suitable surrogate for the prediction of the I-TEQ value under specific plant conditions, e.g. low chlorine content of the combustible and high CO-concentrations in the flue gas (**Chapter 4.1**).

At a hazardous waste (HWI) and a municipal waste (MWI) incinerator, monochlorobenzene was measured on-line with REMPI-TOFMS. Therefore an indirect calculation of the I-TEQ value of the PCDD/F with the before detected statistical relationship was possible (**Chapter 4.2**).

2. Investigations of the formation of chlorinated and unchlorinated aromatic compounds downstream the flue gas channel to find an explanation for the relationship of the chlorinated aromatics statistical mentioned under point 1 (Chapter 4.3).

It was shown that formation processes of chlorinated aromatics also occur at higher temperatures than in the known formation window between 300°C-450°C. The formation rate of chlorinated aromatics in the post-combustion region between approximately 700°C and 200°C was ten times higher than for unchlorinated aromatics. For BTX there was even found a concentration decrease in that temperature window.

A relatively higher formation rate was found in the high temperature region of the plants for PCDF, PCB and PCBz than for PCDD and PCPh. The latter mentioned showed approximately two times

higher formation rates in the post-combustion region than the others. This result and the analysis of PCDD congener pattern from condensation reactions of PCPh point out that the distribution of the PCDD congeners originating from combustion processes are strongly influenced by the condensation reactions of PCPh. The suggested formation pathway could be of great importance for chlorinated aromatics in addition to the well known *de-novo* synthesis from particular carbon.

Furthermore, the observed congener pattern of the PCPh is a hint to the possibility that this pattern originate from a radical OH-attack on the corresponding PCBz. Both patterns (PCPh and PCBz) are not controlled by thermodynamic rules, as shown by semiempirical molecular orbital calculations. The possible reaction pathway of the PCBz to the PCPh is derived from the stability of the congener patterns and the formation tendencies of the chlorinated aromatics along the flue gas channel, as it was presented in the previous paragraph.

These results point out that the formation processes are not only derivable from the universal chemical regularities but rather depend on system parameters as combustibles, wall coatings in the post-combustion region and presence of the trace metals (for example Cu vs. Al). For this observation the term "*trace chemistry of fire*" was established in literature before. It attempts to explain the amount of possible and not clearly understood reaction pathways of chlorinated aromatics.

Through the analysis of the PCDF congener pattern, dechlorination of higher chlorinated congeners and a ring closure of the PCB to PCDF were identified as possible reaction pathways for the PCDF. An evaluation of the specific congener pattern with subsequent assignment of potential formation pathways was carried out for chlorinated aromatics at full-scale incinerators, revealing big differences in the patterns. However, relationships for the formation of different chlorinated aromatic compounds were found.

The presented relationships within the chlorinated aromatics make it possible to better understand the correlations, which were described in point 1. More than 60-70% of the toxicity of the I-TEQ value is carried by the PCDF. These compounds were formed in the same ratio at the same formation window as the PCBz, and therefore the PCBz generally represent suitable surrogates for the I-TEQ value of the PCDD/F.

The congener patterns of the examined chlorinated aromatics showed a very stable distribution. Furthermore multivariate statistical methods showed greater variation in the distribution of the homologues with a high number of congeners, especially under non-optimal combustion conditions. A significantly higher number of the possible reaction pathways exists for these cases.

Under non-optimal operating conditions, for example during the occurrence of CO-peaks, especially the concentrations of the one- to threefold chlorinated homologues of all compounds increased downstream the flue gas channel (factor 20). This behaviour wasn't observed under normal combustion conditions. The found difference could be a result of chlorination reactions which take place at high CO values. During these conditions the concentrations of unchlorinated

aromatics (e.g. dibenzofuran) were very high, therefore these lower chlorinated compounds could be a result of chlorination reactions of the unchlorinated species (ref. point 3).

3. Investigation of the observed memory-effects for chlorinated and unchlorinated aromatics in order to find an explanation for their increased concentrations and for the shift in the patterns of the chlorinated aromatics (Chapter 4.4).

At three incineration plants, the CO-concentration was increased by reducing the O₂-concentration towards sub-stoichiometric ratios in order to examine the behaviour of the formation of chlorinated and unchlorinated aromatics during non-optimal combustion conditions. Increased concentrations of the investigated compounds were found over several hours in the flue gas channel during induced as well as during incidentally observed CO-peaks (memory-effect).

After the CO-peaks the aromatic compounds, especially those with three or more rings (e.g. phenanthrene and benzo[a]pyrene), were found in high concentrations for some hours. In contrast to that, the concentrations of lower or non-condensed aromatics, like benzene or naphthalene, decreased to normal concentrations after the CO-peaks. These memory-effects occurred already at temperatures around 700°C and therefore were explained by thermally stable carbonaceous deposits at the hot plant walls in the post-combustion region. These carbonaceous layers showed a oxidative degradation for hours.

At all plants, highly increased concentrations during the CO-peaks were found for the one- to threefold chlorinated homologues of the PCDD/F. Compared to the PCDD/F, the concentration increase was not as high for the other chlorinated aromatics (PCB, PCBz and PCPh). One hour after the CO-peaks the concentrations of the one- and twofold chlorinated homologues of the PCDD/F and PCB showed similar concentrations as under normal operation conditions at the HWI and the MWI. In contrast to that, the concentration of higher chlorinated homologues increased.

At a pilot scale waste incinerator (PWI), a different behaviour of the PCDD/F homologues was observed. After the CO-peaks a further concentration increase was found, and the lower chlorinated homologues became dominant in the profile (the centre of the profile are the tetrachlorinated homologues). The observed differences in the formation of chlorinated aromatics during the memory-effects of the PCDD/F at the PWI in comparison to the HWI and MWI could be due to the low chlorine content of the combustible (wood) and especially to the pyrolytic combustion conditions (gasification on a stoker system) (ref. point 4).

In general the homologue and congener patterns of the PCBz at all plants were at least influenced by memory-effects. This result makes the PCBz suitable surrogates for the prediction of the I-TEQ value of the PCDD/F (ref. point 1).

The memory-effects for the chlorinated aromatics observed at three plants were probably due to carbonaceous surfaces formed in the high temperature region, as discussed for the PAH. These carbonaceous surfaces might represent a source for the unchlorinated aromatic structure as well as a catalytic surface for a chlorination reaction.

4. Investigation of the formation of chlorinated aromatic compounds during wood combustion **(Chapter 4.5).**

In order to clarify, whether and to which extent the usage of wood and/or contaminated wood as combustibles has an influence on the amount and the composition of the chlorinated aromatics in the flue gas, mixtures of such combustibles were incinerated at two plants. It could be shown that the formation potential of the chlorinated aromatic compounds is probably limited by the low chlorine content of the combustible. A higher chlorine content, for example by adding contaminated wood to the combustibles, caused an increase of the concentration of the chlorinated aromatics. However, it also became clear that a concentration increase of the compounds is more strongly related to the combustion conditions than to the chlorine content (for example CO concentrations). This result is similar to the behaviour of the chlorinated aromatics observed during the memory-effects, where these effects are strongly dependent on the combustion conditions (ref. point 3).

For the before mentioned ratios between the chlorinated aromatic compounds during wood combustion it is remarkable that the PCDD show a higher percentage in the total amount of PCDD/F, in comparison with domestic refuse incineration. Higher concentrations of the chlorinated phenols might probably originate from the thermal breakdown of the wood. These higher concentrations might lead to enhanced condensation reactions, resulting the corresponding PCDD (ref. point 2).

Finally it can be concluded that the absolute concentrations of the chlorinated aromatics during wood combustion at similar sampling points were noticeably lower than during domestic refuse incineration. This could be a result of the low chlorine as well as the low copper content (around some orders of magnitude) of the combustibles.

1. EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG

Seit mehr als 20 Jahren wird über die Auswirkungen der Emissionen von großtechnischen Feuerungsanlagen, wie z.B. Müllverbrennungsanlagen, auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit diskutiert. Im Rahmen der Diskussion spielt neben den Schwermetallen vor allem die chemische Substanzklasse der chlorierten Aromaten, wie z.B. die polychlorierte Dibenzo-*p*-dioxine und Dibenzofurane (kurz: Dioxine), eine herausragende Rolle (1). Müllverbrennung wird zur Rückgewinnung der im Abfall enthaltenen Energie, zur Gewichts- und Volumenreduktion und vor allem wegen der Inertisierung des Mülls betrieben, da bisher weltweit keine Deponietechnik existiert, die eine langfristige leakagefreie (d.h. ohne den Anfall von Sickerwasser) Deponierung ermöglicht (1). Dieser Tatsache hat der Gesetzgeber Rechnung getragen und in der „Technischen Anleitung (TA) Siedlungsabfall“ ab 2005 ein biologisch und chemisch inertes Deponiegut vorgeschrieben, das einen Glühverlust kleiner 5% aufweisen muß (2). Dieses Kriterium kann mit einer thermischen Abfallbehandlung mittels Müllverbrennung erreicht werden (3).

In den Emissionen von großtechnischen Feuerungsanlagen wurde 1977 die Substanzklasse der polychlorierten Dibenzo-*p*-dioxine nachgewiesen, die durch den Unfall in Seveso (1976, Norditalien, (4)) weltweit bekannt wurden (5). Verbindungen dieser Substanzklasse wurden niemals gezielt für technische Anwendungen hergestellt. Sie entstanden vielmehr als Spurenstoffe bei chemischen Syntheseprozessen, in denen Herbizide, Fungizide und Insektizide aus Chlorphenolen synthetisiert worden sind (Monsanto 1949, BASF 1953 und Boehringer-Ingelheim 1956 (6)). Während des Vietnamkrieges (1962-1979) wurde ein Chlorphenolderivat als Entlaubungsmittel verwendet, in dem als Nebenprodukt Spuren des giftigsten Vertreters der Dioxine, 2,3,7,8-Tetrachlorodibenzo-*p*-dioxin (insgesamt circa 166 kg), enthalten waren (7). Diese Verbindung gilt als eines der stärksten chemischen Gifte (8). Auch über 20 Jahre nach der Entdeckung der Dioxine in Müllverbrennungsanlagen besitzt diese Substanzklasse immer noch großes wissenschaftliches Interesse, was die Trefferzahl einer Stichwortsuche nach „*polychlorinated dibenzo-p-dioxins/dibenzofurans*“ von 1472 für die Jahre 2000/2001 in den *Chemical Abstracts* (CAS) deutlich macht.

Mit Inkrafttreten der „17. Bundes-Immissionsschutzverordnung“ (17. BImSchV, 1990) gilt für bundesdeutsche Müllverbrennungsanlagen ein Grenzwert von 0,1 ng I-TEQ/m³ (Internationales Toxizitätsäquivalent) (9). Zehn Jahre nach der Einführung dieser Verordnung wurde eine Reduzierung der Emissionen um den Faktor 60-100 erzielt. (10, 11).

Die Kosten für die Verbesserung der Rauchgasreinigung (Sekundärmaßnahmen, „*end of pipe*“-Technologie) und Verbrennungstechnik (Primärmaßnahmen) im Rahmen der 17. BImSchV lagen für die Anlagenbetreiber im Bereich von circa zehn Milliarden DM (1). Diese Investitionen wurden vor dem Hintergrund einer angestrebten nachhaltigen Entwicklung der Industrienationen (*sustainable development*) getätigt, um die Ressourcen und die Umwelt der Menschheit nicht über deren Regenerationsfähigkeit hinaus zu belasten (12).

Vor allem die sog. Sekundärmaßnahmen, also der Aufbau von technischen Aggregaten zur Rauchgasreinigung (z.B. Filter und Naßwäscher), waren und sind kosten- und materialaufwendig und können beim derzeitigen Stand der Technik auch nicht mehr weiter ausgebaut werden. Um eine weitere Optimierung der eigentlichen Verbrennung zu erzielen, sind neue und intelligente Prozeßsteuerungen und Überwachungstechniken innerhalb des Brennraumes im Rahmen von Primärmaßnahmen nötig. Da diese Techniken und Maßnahmen die vorhandenen Ressourcen der Anlagen nutzen, können sie als ökoeffizient angesehen werden, d.h. sie erfordern sowohl einen geringeren Kosten- als auch Energieaufwand, um die bestehenden Grenzwerte zu einzuhalten.

In den letzten Jahren wurde ein Meßverfahren zur Anwendungsreife gebracht, das auf einer Kopplung von Laserionisation und Massenspektrometrie, der sogenannten *Resonance Enhanced Multiphoton Ionisation-Time Of Flight Mass Spectrometry (REMPI-TOFMS)*, basiert. Dieses Instrument ist in der Lage, bestimmte in Verbrennungsprozessen entstehende, organische Schadstoffe, wie z.B. polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, *on-line* in Echtzeit zu überwachen (13, 14). Mit diesem Meßverfahren können Untersuchungen zur Dynamik von Schadstoffbildungsprozessen im Rauchgas durchgeführt werden. Eine zukünftige Anwendung dieses Verfahrens könnte in einer gezielten Steuerung der Primärmaßnahmen zur Reduzierung der Schadstoffbildung bestehen.

Ein direktes On-line-Monitoring der Dioxine ist mit REMPI-TOFMS nicht möglich. Als primärer Ansatz dieser Arbeit wurden auf breiter Basis konventionelle chemische Analysen durchgeführt, durch die Leitverbindungen (Surrogate) für die toxischen PCDD/F identifiziert werden sollten. Diese Leitverbindungen sollten dann für das indirekte Monitoring des I-TEQ Wertes der PCDD/F mittels REMPI-TOFMS verwendet werden. Für die Untersuchungen wurden vier Anlagen mit unterschiedlichen Verbrennungstechniken ausgewählt, wobei an zwei Anlagen der Aspekt der Schadstoffbildung bei der Holz(mit)verbrennung im Vordergrund stand.

Bei der Holzverbrennung ist die CO₂-Bilanz der Atmosphäre ausgeglichen, wodurch sie im Sinne der nachhaltigen Entwicklung eine wünschenswerte Form der Energieerzeugung darstellt. Die Bedeutung der thermischen Verwertung von Altholz bei der Energieerzeugung wird steigen (15). Die thermische Nutzung von Holz birgt neben dem Vorteil, daß Stoffkreisläufe geschlossen werden, die Gefahr erhöhter Schadstoffemissionen in sich, da Anlagen zur Holzverbrennung nicht der 17. BImSchV unterliegen und deshalb auch ohne ein für Müllverbrennungsanlagen erforderliches Rauchgasreinigungssystem in Betrieb gehen können. In den Abgasen von Holzverbrennungsanlagen wurden deshalb eine Reihe von organischen Schadstoffen detektiert, u.a. auch Dioxine (16, 17, 18, 19).

Im Rahmen dieser Arbeit wird mit konventionellen Analysetechniken und mit Lasermassenspektrometrie die Schadstoffbildung von aromatischen und chloraromatischen Verbindungen im Temperaturbereich von 700°C bis 200°C an großtechnischen Feuerungsanlagen

unter besonderer Berücksichtigung der Holzverbrennung untersucht. Die über die Bildung der Schadstoffe gewonnenen Erkenntnisse können zu einer besseren Prozeßführung der Verbrennung und damit zu einer Reduzierung der Emissionen aus großtechnischen Feuerungsanlagen beitragen.

Somit beschäftigt sich die Arbeit mit vier Hauptaufgabenstellungen:

1. Ist es möglich, den I-TEQ Wert der PCDD/F mit Hilfe von Leitverbindungen (Surrogaten) an großtechnischen Verbrennungsanlagen vorherzusagen? (Kapitel 4.1) Eignet sich die Lasermassenspektrometrie zur Echtzeit-Überwachung dieser Leitverbindungen? (Kapitel 4.2)
2. Gibt es ein vom Anlagentyp und den Verbrennungsbedingungen unabhängiges Bildungsverhalten der untersuchten Verbindungen? (Kapitel 4.3)
3. Welchen Einfluß haben kurzfristige instationäre Verbrennungsbedingungen an großtechnischen Feuerungsanlagen auf die Bildung von Fremdstoffen? (Kapitel 4.4)
4. Wie und in welchem Umfang findet bei der Holz(mit)verbrennung im Vergleich zur Hausmüllverbrennung an großtechnischen Feuerungsanlagen eine Bildung von Chloraromaten statt? (Kapitel 4.5)

2. SUBSTANZKLASSEN UND SCHADSTOFFBILDUNG

2.1 Substanzklassen

In dieser Arbeit wurden folgende Substanzklassen untersucht:

- Polychlorierte Dibenzo-*p*-dioxine (PCDD, nach IUPAC: Dibenzo[b,e][1,4]-dioxine)
- Polychlorierte Dibenzofurane (PCDF, nach IUPAC: Dibenzo[b,d]-furane)
- Polychlorierte Biphenyle (PCB)
- Polychlorierte Benzole (PCBz)
- Polychlorierte Phenole (PCPh)
- Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)
- Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylole (BTX) und methylierte PAK (z.B. methylierte Naphthaline, MeNap)

Im Abgas von Verbrennungsprozessen wurden mehr als 250 verschiedene aliphatische und aromatische Verbindungen sowohl chloriert als auch unchloriert nachgewiesen (20). Somit stellen die hier untersuchten Substanzen nur einen kleinen Ausschnitt aus der gesamten Substanzpalette dar. Aufgrund ihrer umweltchemischen und toxischen Eigenschaften sind sie aber die am häufigsten untersuchten Spurenverbindungen im Rauchgas von Verbrennungsprozessen (Kapitel 1 und 2.2).

In der Abbildung 2.1-1 wird eine Auswahl von chemischen Strukturformeln der untersuchten Verbindungen dargestellt.

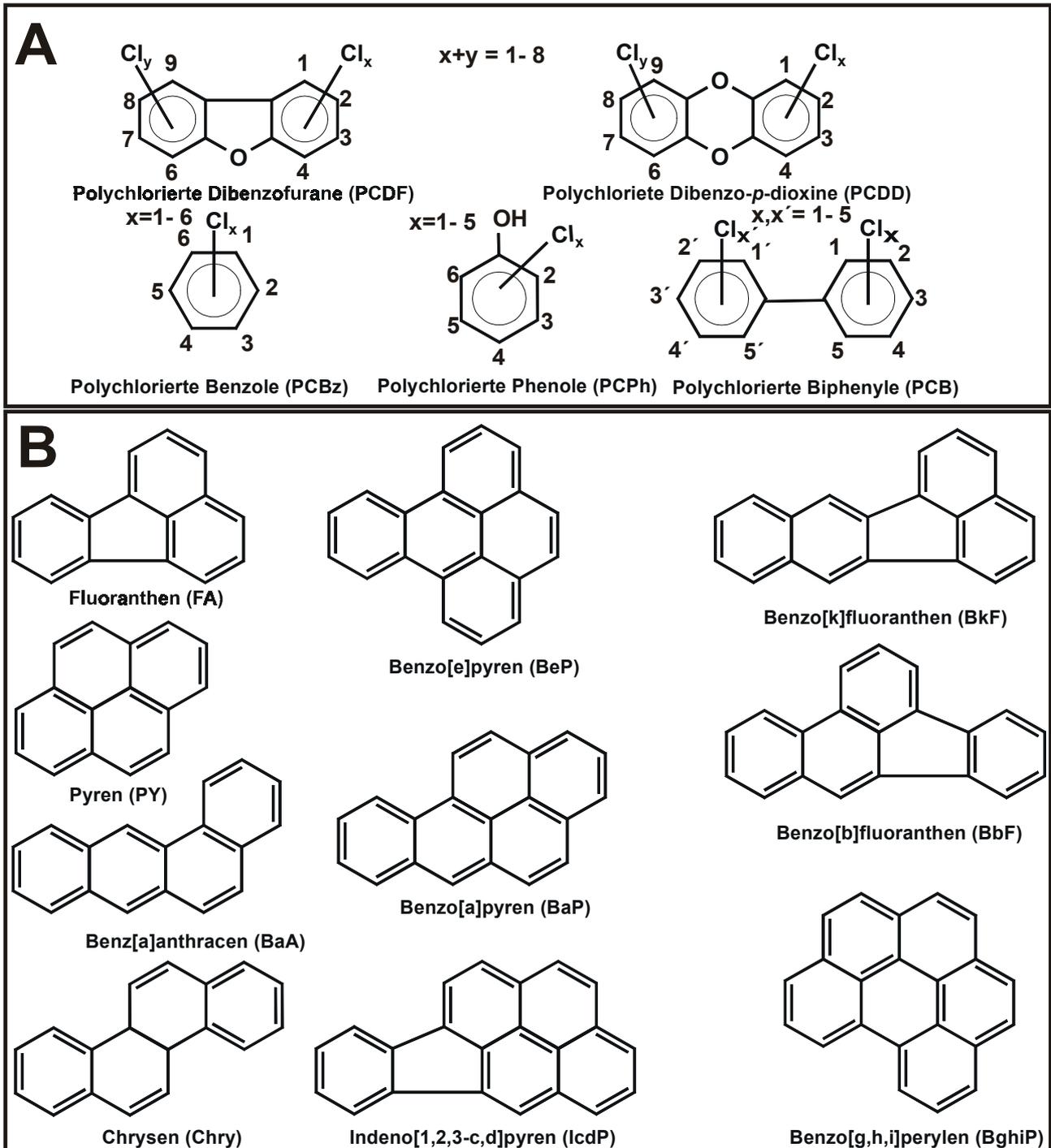


Abbildung 2.1-1: Strukturformeln ausgewählter Verbindungen der untersuchten Substanzklassen: A) Polychlorierte Verbindungen, B) Polyzyklische Aromaten

Die Homologen der polychlorierten Verbindungen unterscheiden sich um je ein Chloratom voneinander (z.B. homologe Reihe der PCB). Die Isomeren¹ eines Chlorierungsgrads unterscheiden sich nur in der Stellung der Chloratome voneinander (Stellungsisomeren). Der Begriff der Kongeneren umfaßt die Gesamtheit der Isomeren aller Homologen einer

¹ Die Deklination der Begriffe „Isomer“ und „Kongener“ erfolgt gemäß G. Wahrig: *Deutsches Wörterbuch*. 1991.

Beispiele: „die Kongeneren“ aber „einige Kongenerer“; „die Anzahl der Kongeneren“ aber „die Anzahl einiger Kongenerer“

Substanzklasse, z.B. der PCDD. Die Numerierung der Kohlenstoffatome in den Ringsystemen erfolgt wie in Abbildung 2.1-1 dargestellt. Für die Nomenklatur der PCB wurde in dieser Arbeit die von Ballschmiter eingeführte systematische Nomenklatur (# 1-#209) verwendet (siehe Anhang A-1; (21)). Für die untersuchten Substanzen ergeben sich die in Tabelle 2.1-1 angegebenen Anzahl der Isomeren.

Tabelle 2.1-1: Anzahl der Isomeren pro homologer Gruppe für die untersuchten Chloraromaten

Anzahl der Chloratome und Präfixe (Abkürzungen)		PCDD	PCDF	PCB	PCBz	PCPh
1	mono (M)	2	4	3	1	3
2	di (Di)	10	16	12	3	6
3	tri (Tri)	14	28	24	3	6
4	tetra (T,Te)	22	38	42	3	3
5	penta (Pe)	14	28	46	1	1
6	hexa (Hx)	10	16	42	1	-
7	hepta (Hp)	2	4	24	-	-
8	octa (O)	1	1	12	-	-
9	nona (N)	-	-	3	-	-
10	deca (D)	-	-	1	-	-
Gesamtzahl der Isomeren		75	135	209	12	19

Der Begriff „Dioxin“ wird in dieser Arbeit oftmals zusammenfassend für die Substanzklassen der PCDD und PCDF verwendet.

Die Analytik der nicht chlorierten Aromaten beschränkt sich auf die Grundgerüste der 16 von der *U.S. Environmental Protection Agency* für das Umweltmonitoring vorgeschlagenen PAK (22). Neben den PAK wurden die methylierten Naphthaline und die BTX in der konventionellen Analytik erfaßt, da diese Verbindungen mit REMPI-TOFMS Lasermassenspektrometrie im Rauchgas von Verbrennungsprozessen analysiert werden können (23).

2.2 Eigenschaften der untersuchten Substanzklassen

Ein Großteil der untersuchten Substanzen weist neben ihrer Toxizität noch weitere für den Menschen und die Umwelt problematischer Eigenschaften auf: Sie sind persistent, lipophil und akkumulieren in der Nahrungskette. Substanzen mit diesen Eigenschaften werden in der englischsprachigen Literatur unter dem Begriff der *persistent organic pollutants* (POP) zusammengefaßt (11). Während das toxische Potential der PCDD/F auf die 17 Kongenere beschränkt ist, die in 2,3,7,8-Position substituiert sind, zeigen nur einige PAK, z.B. das Benzo[a]pyren, ebenfalls ein toxisches Potential (24), (25). Je nach Substitutionsmuster sind die Einzelverbindungen sehr unterschiedlich in ihrer toxischen Wirkung. Daher wird diese toxische

Wirkung der 17 2,3,7,8-substituierten Kongenere der PCDD/F in dem sogenannten I-TEQ Wert (*international toxicity equivalent*) gewichtet und aufaddiert. Die dafür nötigen Toxizitätsäquivalenzfaktoren sind in Tabelle 2.2-1 für das NATO/CCMS- und das neuere WHO-System aufgelistet (26), (27).

Tabelle 2.2-1: Internationale Toxizitätsäquivalenzfaktoren (I-TEF) nach NATO/CCMS und WHO für PCDD/F (sich unterscheidende Werte sind dick und kursiv gedruckt)

PCDD Kongener	I-TEF (NATO/CCMS)	I-TEF (WHO)	PCDF Kongener	I-TEF (NATO/CCMS)	I-TEF (WHO)
2,3,7,8-TCDD	1,0	1,0	2,3,7,8-TCDF	0,1	0,1
1,2,3,7,8-PeCDD	0,5	1,0	1,2,3,7,8-PeCDF	0,05	0,05
			2,3,4,7,8-PeCDF	0,5	0,5
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0,1	0,1	1,2,3,4,7,8-HxCDF	0,1	0,1
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0,1	0,1	1,2,3,6,7,8-HxCDF	0,1	0,1
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0,1	0,1	1,2,3,7,8,9-HxCDF	0,1	0,1
			2,3,4,6,7,8-HxCDF	0,1	0,1
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0,01	0,01	1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0,01	0,01
			1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0,01	0,01
OCDD	0,001	0,0001	OCDF	0,001	0,0001

Die neueren Toxizitätsäquivalenzfaktoren nach WHO sind nur für drei Kongenere verschieden von den älteren nach NATO/CCMS. Um den Vergleich zu erleichtern, werden in dieser Arbeit immer beide Werte für die Proben angegeben.

Ebenso wie die 17 toxischen Kongenere der PCDD/F weisen einige PCB-Kongenere ein toxisches Potential auf. Die toxische Aktivität sowohl der PCDD/F als auch der PCB steht in direktem Zusammenhang mit der Möglichkeit des Anbindens der Verbindungen an den A_h-Rezeptor im Cytosol von Zellen (28). Diese Reaktion verändert die Transkription von bestimmten Genen, und somit wird die Signaltransduktion in den Zellen gestört. In Tabelle 2.2-2 sind die Toxizitätsäquivalenzfaktoren (TEF) für PCB aufgeführt.

Tabelle 2.2-2: Toxizitätsäquivalenzfaktoren (TEF) der PCB für Menschen nach Safe (29) und WHO (1997) (11)

PCB Kongener (nach Ballschmiter)	Nach Safe (1990)	Nach WHO (1997)
2,4,4',5-TeCB (#74)	0,001	-
2,3',4,4'-TeCB (#56)	0,001	-
3,3',4,4'-TeCB (#77)	-	0,0001
3,4,4',5-TeCB (#81)	0,01	0,0001
2',3,4,4',5-TeCB (#123)	0,001	0,0001
2,3',4,4',5-PeCB (#118)	0,001	0,0001
2,3,3',5',6-PeCB (#114)	0,001	0,0005
2,3,3',4,4'-PeCB (#105)	0,001	0,0001
3,3',4,4',5-PeCB (#126)	0,1	0,1
2,3',4,4',5,5'-HxCB (#167)	-	0,00001
2,3,3',4,4',5-HxCB (#156)	0,001	0,0005
2,3,3',4,4',5'-HxCB (#157)	0,001	0,0005
3,3',4,4',5,5'-HxCB (#169)	0,05	0,01
2,2',3,4,4',5,5'-HpCB (#180)	0,00002	-
2,2',3,3',4,4',5-HpCB (#170)	0,00002	-
2,3,3',4,4',5,5'-HpCB (#189)	0,001	0,0001

Als Referenz für die Toxizitätsäquivalenzfaktoren der PCB wird das 2,3,7,8-TCDD verwendet, welches selbst den Faktor 1 besitzt, so daß z.B. das PCB #126 noch 10% (Faktor 0,1) der Toxizität von 2,3,7,8-TCDD besitzt. Vor allem die räumliche Struktur der Chloraromaten bestimmt die toxische Wirkung bei der Anbindung an den A_h-Rezeptor. Beim Menschen tritt bei akuten Vergiftungen mit Chloraromaten Chlorakne auf. Über die Langzeittoxizität niedriger Dosen ist hingegen wenig bekannt, dennoch ist für den Menschen ein kanzerogenes Potential dieser Verbindungen nicht auszuschließen (30).

Im Tierversuch zeigte sich 2,3,7,8-TCDD als eine der giftigsten Verbindungen überhaupt. So liegt die LD₅₀ von 2,3,7,8 TCDD für das Meerschweinchen bei 0,6 µg/kg und damit in der Größenordnung von Diphterietoxin (0,3 µg/kg). Im Vergleich dazu ist die LD₅₀ für den Goldhamster um den Faktor 1000 bis 10000 höher (31), (32). Diese großen Unterschiede in der Toxizität in Abhängigkeit vom Organismus und fehlende umfassende epidemiologische Langzeitstudien machen es äußerst schwierig, die wirkliche toxische Wirkung von chloraromatischen Verbindungen und Aromaten auf Mensch und Umwelt abzuschätzen. Deshalb muß der Reduktion der Immissionsbelastung höchste Wichtigkeit beigemessen werden.

Alle hier untersuchten Substanzen und Substanzklassen wirken gesundheitsschädigend auf den menschlichen Organismus. So zeigen methylierte PAK, wie z.B. das 5- oder 6-Methylchrysen ein hohes toxisches, z.T. auch kanzerogenes Potential, wohingegen das unmethylierte Molekül nicht kanzerogen ist. Für methylierte Naphthaline hingegen finden sich mit steigendem

Methylierungsgrad höhere LD₅₀ Werte (z.B.: Ratte: LD₅₀ (Naphthalin) = 1800 mg/kg; LD₅₀ (2-Methylnaphthalin) = 2860 mg/kg; LD₅₀ (2,6-Dimethylnaphthalin) = 2600 mg/kg) (33), (34), (31).

Einige physikalisch-chemische Eigenschaften und umweltrelevante Daten der untersuchten Verbindungen sind in der Tabelle 2.2-3 zusammengestellt. Ein hervorragender Überblick sowohl über das Vorkommen und die Entstehung von aromatischen und chloraromatischen Verbindungen und deren ökotoxikologische Relevanz findet sich unter (35), (36).

Tabelle 2.2-3: Überblick ausgewählter physikalisch-chemischer Eigenschaften der untersuchten Substanzen (aus: (37), (31), (38), (39))

Substanz	Schmelzpunkt (°C)	Siedepunkt (°C)	Dampfdruck (Pa) bei 25°C	log K _{ow} bei 25°C
Benzol	5	80	12680	2,13
Naphthalin	81	218	10	3,36
1-Methylnaphthalin	-22	245	8	3,87
1,4-Dimethylnaphthalin	8	268	3	4,37
1,4,5-Trimethylnaphthalin	64	285	1	4,90
Benzo-(a)pyren	177	493	1,5*10 ⁻⁵ -7,0*10 ⁻⁷	11,1
MCBz	-45	126	1560	2,84
HxCBz	227	322	0,0015	5,47
4-MCPh	42	217	28	2,39
PeCPh	190	310	2,0*10 ⁻² -9,3*10 ⁻³	5,01
2-MCB	17	284	1	4,56
3,3',4,4'-TeCB	173	360	3,0*10 ⁻⁴ -5,3*10 ⁻⁵	6,29
2,2',3',4,4',5,5'-HpCB	135	302	3,7*10 ⁻⁴ -7,8*10 ⁻⁵	7,08
2,8-DiCDF	184	375	3,9*10 ⁻⁴	5,65
2,3,7,8-TCDF	228	438	2,1*10 ⁻⁵ -2,0*10 ⁻⁶	7,10
OCDF	258	537	1,9*10 ⁻⁷ -5,0*10 ⁻¹⁰	9,96
2-MCDD	89	298	0,017	5,33
2,3,7,8-TCDD	305	447	6,0*10 ⁻⁵ -8,1*10 ⁻⁸	6,80
OCDD	330	510	8,7*10 ⁻⁶ -1,1*10 ⁻¹⁰	8,20

Die untersuchten Substanzklassen weisen ein breites Spektrum physikalisch-chemischer Eigenschaften auf. Mit steigendem Kondensierungsgrad der PAK und Chlorierungsgrad der Chloraromaten nimmt die Lipophilie zu und der Dampfdruck ab. Aufgrund der im Vergleich zu den PCDD niedrigeren Molekülsymmetrie und der damit verbundenen niedrigeren Gitterenergien der PCDF weisen die PCDF-Moleküle höhere Dampfdrücke als vergleichbare PCDD-Moleküle auf. Das PCDF-Molekül ist planar, wohingegen die PCDD (z.B. OCDD mit einem Winkel von 19° zwischen den Benzolringen) und PCB (Dihedralwinkel je nach Chlorsubstitutionsmuster) mehr oder weniger stark unplanar gebaut sind (40), (41). Die PCDD/F zeigen grundsätzlich eine hohe Lipophilie und damit verbunden eine geringe Wasserlöslichkeit. Durch das höhere Dipolmoment

sind die PCDF bei gleichem Chlorierungsgrad besser wasserlöslich als die PCDD. Eine besondere Stellung weisen alle Kongeneren der PCDD, PCDF und PCB auf, die in 2,3,7,8- bzw. in 3,3', 4,4'-Position chlosubstituiert sind. Die planare Struktur dieser Kongeneren führt zu erhöhten Schmelzpunkten (höhere Gitterenergien) und zu einer höheren thermodynamischen Stabilität. Ebenfalls steigt die thermodynamische Stabilität mit steigendem Chlorierungsgrad an (42), (43). Thermodynamische Rechnungen zeigten, daß die PCDD stabiler sind als vergleichbare PCDF (44), (45), (40). Dennoch ist damit nichts über die Reaktivität der entsprechenden Verbindungen ausgesagt. Das PCDF-Molekül weist ein über drei Ringe durchkonjugierbares π -Elektronensystem auf und stellt somit einen Aromaten gemäß der Hückel'schen Regel dar ($(4n+2)$ π -Elektronen). Diese Konjugation kann für das Elektronensystem der PCDD nicht durchgeführt werden, weshalb diese Substanzklasse nicht als ein Aromat gemäß der Hückel'schen Regel angesehen werden kann. Somit nähert sich das PCDF-Molekül bezüglich der Aromatizität näher an die PAK an, was sich auch bei UV-spektroskopischen Untersuchungen an Dibenzofuran zeigte (13), (46). Die PCDF sind damit für einen elektrophilen Angriff an ihrer Ringstruktur unempfindlicher als die PCDD (47), (48).

2.3 Die Verteilungsverhalten der untersuchten Verbindungen im Rauchgas

Unpolare organische Verbindungen verteilen sich im Rauchgas in Abhängigkeit von der Temperatur, den Partikeleigenschaften und der Partikelmasse zwischen den Partikeln und der Gasphase (49), (50), (51). In der Literatur findet sich für die Verteilung von mittel- bis schwerflüchtigen Verbindungen (sog. *semivolatile organic compounds* (= SOC); Dampfdruck (p_s) der SOC bei 25°C zwischen 10 und 10^{-7} Pa; (52)) zwischen der Gasphase und den Partikeln, folgende Gleichung gemäß der Langmuir-Isotherme (53), (54):

$$\Phi = (c_j \cdot \Theta) \cdot (p_i + c_j \cdot \Theta)^{-1} \quad (\text{Junge-Gleichung; Gleichung 1})$$

Φ = Anteil der partikelgebundenen Konzentration an der Gesamtkonzentration

c_j = Parameter der Junge-Gleichung (Pa*cm), substanz- und temperaturabhängig

Θ = Partikeloberfläche pro Luftvolumen (cm^2/cm^3)

p_i = Sättigungsdampfdruck über unterkühlter Flüssigkeit (Pa)

Der Parameter c_j beschreibt die temperaturabhängige Affinität des Partikels an den Schadstoff, welcher von den Partikeleigenschaften (Chemie und Partikelgrößenverteilung) abhängig ist und in erster Näherung mit circa 17 Pa*cm im Temperaturbereich von 10 - 200°C angenommen werden kann (53). Auch die Partikeloberfläche pro Luftvolumen im Rauchgas (Θ) kann nur als Näherung betrachtet werden. Der Wert für Θ errechnet sich aus dem Produkt von Partikelmasse pro Volumeneinheit ($5\text{g}/\text{m}^3$; Daten der Anlagenbetreiber) und der Oberfläche der Partikel pro Masseneinheit. Diese Oberfläche pro Masseneinheit wird für Immissionsproben mit $5\text{m}^2/\text{g}$

angenommen (55) und auch für die Abschätzungen in dieser Arbeit verwendet. Die größte Temperaturabhängigkeit in der Junge-Gleichung weist der Sättigungsdampfdruck über unterkühlter Flüssigkeit (p_i) auf. Mit Hilfe der Gleichung 2 kann eine näherungsweise Umrechnung des Sättigungsdampfdruckes (p_s) auf einen Sättigungsdampfdruck bei einer bestimmten Temperatur (T) über unterkühlter Flüssigkeit vorgenommen werden (56).

$$p_i = p_s * e^{(6,79*(T_m-T)/T)} \quad (\text{Gleichung 2})$$

p_i = Sättigungsdampfdruck über unterkühlter Flüssigkeit bei der Temperatur T (Pa)

p_s = Sättigungsdampfdruck bei 25°C (Pa), z.B. (37),

T_m = Schmelzpunkt (°C), z.B. (37)

T = Temperatur (°C)

Mit den angegebenen Faktoren, Gleichungen und Annahmen für die Partikeleigenschaften läßt sich z.B. abschätzen, daß HxCDF bei 200°C im Rohgas der untersuchten Anlagen zu 20 % an Partikel gebunden vorliegt. Im Gegensatz dazu ist der partikelgebundene Anteil von HxCDF bei einer Temperatur von 20°C größer als 98 % (51).

Die angenommenen Substanz- und Partikeleigenschaften sind Näherungen. Eine erste Abschätzung der Partikel-/Gasphasenverteilung kann aber verdeutlichen, wie dramatisch sich die Betriebsbedingungen der Anlagen auf diese Verteilung auswirken können. Um den partikelgebundenen Anteil der untersuchten Verbindungen an der Gesamtsubstanzkonzentration im Rauchgas richtig zu erfassen, muß die Beprobung des Rauchgases isokinetisch erfolgen (vgl. Kapitel 3.2, (57)).

2.4 Schadstoffbildungsmechanismen

Die PCDD/F wurden niemals zu industriellen Zwecken gezielt synthetisiert. Chloraromatische Verbindungen werden als sogenannte *products of incomplete combustion* (PIC) bezeichnet, welche bei unvollständiger Verbrennung in thermischen Prozessen entstehen. Erstmals wurden Dioxine in Verbrennungsanlagen 1977 nachgewiesen (5). Für 60% der gesamten PCDD/F-Emissionen in Europa werden thermische Prozesse bei der Haus- und Klinikmüllverbrennung, in Stahlwerken und in Sinteranlagen verantwortlich gemacht (11).

2.4.1 Bildung der Chloraromaten

Ein generelles Problem bei der Diskussion um Bildungswege und –theorien besteht darin, daß definierte chemische Reaktionsbedingungen nur in Laborexperimenten eingehalten werden können. In einem komplexen System, wie einer Müllverbrennungsanlage, laufen sicherlich eine Vielzahl von Reaktionen parallel ab. Ein grundsätzlicher Überblick über die im Labor

nachvollzogenen Bildungswege der Chloraromaten ist unter (58) zu finden. Dennoch sind die aus Laborexperimenten gewonnenen Bildungsmechanismen für ein besseres Verständnis der in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse sehr wichtig und werden im Folgenden kurz zusammengefaßt.

Drei Hauptwege werden in der Literatur für Chloraromatenbildung vorgeschlagen:

- **Gasphasenbildung** (homogene Reaktionen in der Gasphase)
- **Bildung aus Vorläuferverbindungen**, z.B. PCBz und PCPh (heterogene Reaktionen auf Oberflächen)
- **De-novo Synthese** aus den Elementen C, H, Cl und O (heterogene Reaktionen auf Oberflächen)

2.4.1.1 Gasphasenbildung

Die Gasphasenreaktionen sind nach der vorherrschenden Meinung in der Dioxinforschung für die Gesamtmenge der an Anlagen gebildeten PCDD/F nicht von Bedeutung, werden aber in dieser Arbeit der Übersicht wegen mit vorgestellt (59), (60).

Für die Gasphasenreaktionen zur Bildung der PCDD/F werden Reaktionen zwischen zwei Chlorphenolmolekülen oder chlorierten Aliphaten (Tri- und Tetrachlorethylen) vorgeschlagen. Diese beiden Reaktionsmechanismen verlaufen im Temperaturbereich zwischen 650°C und 900°C (59, 61, 62).

Die Kopplung von Chlorphenolen zu PCDD erfolgt über ein Phenoxyradikal, welches ein ortho-Chloratom an einem weiteren Chlorphenol abspaltet (59, 63). Der dabei entstandene Diphenylether spaltet HCl ab und es bildet sich ein PCDD. Weitere Reaktionsmechanismen aus Phenoxyradikalen und Phenolationen zu PCDD werden in der Literatur vorgeschlagen (64, 65, 66, 67).

In der Literatur wurde gezeigt, daß bei der pyrolytischen Umsetzung von Tri- und Tetrachlorethylen eine Reihe perchlorierter aliphatischer und aromatischer Verbindungen, wie z. B. Hexachlorbutadien und Hexachlorbenzol entsteht. Diese können zu PCDD/F weiterreagieren (61, 62). Ebenfalls wurde gezeigt, daß bei hohen Temperaturen (>600°C) und unter Sauerstoffmangel aus Propan und HCl sowohl PCDD/F und PCBz als auch PAK entstehen können (68). Für den Mechanismus werden Reaktionen von chlorierten Alkylradikalen diskutiert (69). In Radikalreaktionen findet ein Kettenwachstum der chlorierten Alkylradikale zu aromatischen Verbindungen statt. Den Vinyl-Radikalen und chlorierten Ethylen- und Acetyleneinheiten kommt in diesem Mechanismus besondere Bedeutung zu (70).

2.4.1.2 Bildung aus Vorläuferverbindungen

Die Bildung aus Vorläuferverbindungen (*Precursor*-Theorie) wurde erstmals 1987 von Karasek und Dickson in der Literatur erwähnt (71). Man geht davon aus, daß im Temperaturbereich von 300°C aus PCPh und PCBz die PCDD/F auf Oberflächen, z.B. Flugaschen, gebildet werden können. Als besonders gute Katalysatoren für den Umsatz der PCPh und PCBz zu PCDD/F erwiesen sich vor allem Kupfersalze (CuCl₂, CuCl, CuO, etc.) (72), (73). Für die katalytische Aktivität der Kupferspezies bei der *Precursor*-Reaktion wurde folgende Reihenfolge gefunden: Cu²⁺ << Cu⁺ < Cu (73).

Die *Precursor*-Reaktion besteht in einer Ullmann'schen Ethersynthese von in ortho-Stellung substituierten Chlorphenolen und Chlorbenzolen. In einem Zwischenschritt entstehen dabei Kupfer(I)phenoxy-Komplexe, aus denen die PCDD entstehen. Die PCDF werden über die Reaktionen von PCBz mit PCPh gebildet und in der Ullmann-Reaktion findet eine Aryl-Aryl Kopplung statt (74).

Die *Precursor*-Theorie wurde auf aliphatische und chloraliphatische Verbindungen ausgedehnt (75), (76). In den Arbeiten von Froese und Hutzinger wurde eine Reihe von Chloraliphaten (Trichlorethylen, Ethylen, Acetylen und Ethan) auf verschiedenen Modellflugaschen (SiO₂, SiO₂ mit Al₂O₃, SiO₂ mit Fe₂O₃ und SiO₂ mit CuO) bei verschiedenen Temperaturen mit O₂ und HCl umgesetzt (77), (78). Dabei wurde gefunden, daß die CuO-Modellflugasche die höchste Bildungsrate für Chloraromaten aufweist, im Gegensatz zu SiO₂, auf welchem keine Bildung stattfand. Ebenso wurden in diesen Versuchen neben den PCDD/F weitere Chloraromaten, z.B. PCBz und PCPh, gefunden. Bei höheren Temperaturen über 400°C fand eine stärkere Bildung von Chloraromaten als bei 300°C statt. An anderer Stelle wurde ebenfalls gezeigt, daß aus Propan mit HCl bei 300°C Chloraromaten gebildet werden können, und somit unter dem Einfluß eines Kupferkatalysators die Aktivierungsenergie im Vergleich zu einer reinen Gasphasenreaktion stark herabgesetzt werden kann (79). Die Chloraromatenbildung aus Vorläuferverbindungen findet bereits unterhalb einer Sekunde statt und kann im Vergleich zu der weiter unten vorgestellten *de-novo* Synthese als sehr schnell angesehen werden (79), (80).

In den Arbeiten von Wehrmeier wurde gezeigt, daß aus Dichloracetylen Chloraromaten gebildet werden können (81), (76). Zudem wurde in diesen Arbeiten ein mechanistischer Ansatz für die Zyklisierung von Dichloracetylen zu größeren chlorierten Aromaten vorgeschlagen. Mit den Ergebnissen dieser Arbeiten konnte die *Precursor*-Theorie auf aliphatische Vorläuferverbindungen ausgedehnt werden.

Als problematisch erweist sich die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus den *Precursor*-Laborexperimenten auf die Befunde an großtechnischen Verbrennungsanlagen, da keine Übereinstimmung der Homologen- und z.T. auch der Kongenerenprofile für die PCDD/F beobachtet wurde.

2.4.1.3 *De-novo* Synthese

Der Begriff der *de-novo* Synthese wird für die Bildung von Chloraromaten mit Chlor und Sauerstoff aus partikulärem Kohlenstoff unter Katalysatorwirkung verwendet und wurde erstmals 1986 näher beschrieben (82). Die *de-novo* Synthese stellte sich in den folgenden Jahren als einer der wichtigsten Bildungsmechanismen für Chloraromaten an großtechnischen Feuerungsanlagen heraus (83), (84), (72). In den in der Verbrennung gebildeten Flugstäuben findet sich ein geringer Gewichtsanteil von unverbranntem Kohlenstoff (0,2-2 %), welcher als Kohlenstoffquelle für die Chloraromatenbildung dient. Die maximale Bildung der Chloraromaten aus partikulärem Kohlenstoff findet im Temperaturbereich zwischen 250 bis 400°C statt. In Versuchen zur Bildung von Chloraromaten aus der *de-novo* Synthese konnten bereits nach einigen Sekunden erste Reaktionsprodukte nachgewiesen werden (85), (72).

Für den Reaktionsmechanismus der *de-novo* Synthese wird eine Chlorierung von Kohlenstoff mit Hilfe eines Katalysators und ein anschließendes katalytisch-oxidatives Zerbrechen des Kohlenstoffes unter Freisetzung der Chloraromaten vorgeschlagen (86). Als Katalysator sind Kupfer- oder Eisensalze nötig. Um zu zeigen, daß die PCDD/F aus der Kohlenstoffmatrix gebildet werden, wurden Konkurrenzexperimente mit markierten ^{13}C -Kohlenstoff durchgeführt. Stieglitz et al. setzten ^{13}C -Kohlenstoff mit unmarkierten 2,4,5-TriCPh um und fanden überwiegend markierte PCDF ($^{13}\text{C}_6$ $^{13}\text{C}_6$) und nur einen geringen Anteil unmarkierter PCDF ($^{12}\text{C}_6$ $^{12}\text{C}_6$). In diesen Experimenten wurden nur für die PCDD gemischte $^{13}\text{C}_6$ $^{12}\text{C}_6$ -PCDD nachgewiesen (87). Altwicker und Milligan zeigten in ihren Experimenten aus ^{12}C und ^{13}C Kohlenstoffgemischen das gleiche Ergebnis für PCDF wie Stieglitz et al., wohingegen keine gemischten $^{13}\text{C}^{12}\text{C}$ -PCDD-Kongeneren nachgewiesen werden konnten (88).

Unter konkurrierenden Reaktionsbedingungen zwischen der *de-novo* Synthese und der *Precursor*-Reaktion zeigte sich, daß die PCDD-Bildung um den Faktor 10000 in der Gegenwart eines *Precursors* (PeCPh) höher als ohne *Precursor* ist (89). Problematisch sind die gefundenen Ergebnisse vor dem Hintergrund, daß die Reaktionsbedingungen, z.B. die hohe Konzentration des vorgelegten PeCPh, nicht mit der an Anlagen vorgefundenen Menge der PeCPh und des Kohlenstoffes in den Flugstäuben übereinstimmt. Allerdings gaben die Ergebnisse aus diesen Laborexperimenten einen Hinweis darauf, daß die Bildungsmechanismen der *Precursor*-Reaktion und der *de-novo* Synthese völlig unabhängig voneinander ablaufen können.

In Konkurrenzexperimenten zwischen der *Precursor*-Reaktion und der *de-novo* Synthese wurden zehnmal höhere Konzentrationen für die PCDD-Homologen als für die PCDF-Homologen gefunden (88), (47). Diese Verteilung der PCDD/F-Homologen entspricht nicht der Verteilung an großtechnischen Anlagen. In den Konkurrenzexperimenten zwischen *Precursor*-Reaktion und *de-novo* Synthese sind die aus der *Precursor*-Reaktion gebildeten Chloraromatenmengen um den Faktor 100 bis 3000 größer als die aus der *de-novo* Synthese. Allerdings lagen die Konzentrationen der in diesen Experimenten eingesetzten Vorläuferverbindungen um einige Größenordnungen höher, als sie an großtechnischen Feuerungsanlagen gemessen worden sind.

Huang und Buekens schätzen anhand von Anlagendaten (z.B. Kohlenstoffgehalte der Flugaschen und Chlorphenolkonzentrationen der Rauchgase), daß die *de-novo* Synthese für die Gesamtmenge an gebildeten PCDD/F wesentlich bedeutsamer ist als die PCDD/F-Bildung aus Vorläufern (90).

In der Literatur wurde darüber hinaus der direkte chemische Zusammenhang zwischen der Bildung von PCDF und polychlorierten Naphthalinen aus PAK und damit aus aromatischen Kohlenstoffgerüsten, ähnlich denen im unverbrannten Kohlenstoff des Flugstaubes, gezeigt (91). Je nach PAK kommt es dabei zu einer stereoselektiven Chlorierung der Naphthaline und Dibenzofurane.

Interessant ist in diesem Zusammenhang auch das Ergebnis einer anderen Arbeit, in welcher aromatische Verbindungen, z.B. Phenanthren, Biphenyl, Xanthen, etc. auf einer Modellflugasche ohne Kohlenstoff umgesetzt wurden (92). Im Temperaturbereich von 250°C-300°C erwiesen sich die Verbindungen als die „effektivsten“ Vorläufer für die PCDF-Bildung, die eine biphenylartige Struktur hatten, z.B. Biphenylether. Aus der Literatur ist bekannt, daß PCB quantitativ zu PCDF umgesetzt werden können (93). Auffällig in der Untersuchung von Wilhelm et al. (92) war, daß alle untersuchten Aromaten eine höhere PCDF- als PCDD-Bildung zeigten. Ebenso wurde durch den Einsatz von isotope markiertem Sauerstoff im Reaktionsgas klar, daß der in den Chloraromaten gefundene Sauerstoff aus den für die Reaktion eingesetzten aromatischen Grundstrukturen stammt (94).

In den Experimenten zur *de-novo* Synthese wurden neben den PCDD/F auch große Mengen an PCBz und PCPh aus partikulärem Kohlenstoff gebildet (72). Aus diesen potentiellen Vorläuferverbindungen, z.B. PCPh, können wiederum über die *Precursor*-Reaktion PCDD entstehen (47).

Zusammenfassend läßt sich vermuten, daß es wahrscheinlich einen sehr komplexen Zusammenhang zwischen der *Precursor*-Reaktion und der *de-novo* Synthese bei der Bildung der PCDD/F gibt und eine Abschätzung der Bedeutung der einzelnen Bildungswege immer nur anhand der vorgefundenen Substanzmuster bzw. der im Experiment vorgegebenen Parameter (z.B. Temperatur, Konzentration, etc.) erfolgen kann (58).

Die in den *de-novo* Experimenten mit Flugasche beobachteten PDDD/PCDF-Verhältnisse (1:11) entsprechen denjenigen, die bei Untersuchungen an großtechnischen Feuerungsanlagen gefunden wurden (95). Für Proben aus Verbrennungsprozessen bei 300°C wurde von Wehrmeier et al. gezeigt, daß die Kongenerenmuster der PCDD/F für die vier- bis siebenfach chlorierten Kongeneren sehr stabil sind (76). Dieses Ergebnis wurde auf die thermodynamische Kontrolle der Substitutionsreaktionen und auf den oxidativen/reduktiven Abbau der einzelnen Kongeneren zurückgeführt.

Andere Autoren fanden für einfache Chlorierungsreaktionen (Kupferkatalysator bei 300°C) von Dibenzo-*p*-dioxin (DD) und Dibenzofuran (DF) eine Bevorzugung der 2,3,7,8-Positionen gemäß

der elektrophilen Substitution (96), (97). Dies ist nicht das charakteristische an großtechnischen Anlagen vorgefundene Kongenerenmuster der PCDD/F. Das Kongenerenmuster der PCDD/F ist temperaturabhängig, und bei Temperaturen über 450°C wurden keine in 2,3,7,8-Position substituierten PCDD/F gefunden (98).

Für Flugascheprobe aus Müllverbrennungsprozessen wurde für die PCDF gezeigt, daß das Kongenerenmuster der drei- bis siebenfach chlorierten Kongenere aus einer Dechlorierungsreaktion des OCDF abgeleitet werden kann (99).

Wahrscheinlich steht die Bildung aller Chlororganika in engem Zusammenhang mit der zwischen circa 350 und 650°C ablaufenden Vergasungsreaktion des Kohlenstoffes (100), (101), (102), (103). Die kohlenstoffhaltigen Strukturen, welche in diesem Temperaturbereich als Katalysatoren für die *de-novo* Synthese diskutiert werden, müssen thermisch sehr stabil sein, wie dies für die Kohlenstoffmodifikationen, z.B. Graphit, *diamond like carbon* (DCL) und vor allem *pyrocarbon*, bekannt ist (104). Der Anteil der Bildung der Chlororganika am gesamten Umsatzes des Kohlenstoffes in der Vergasungsreaktion macht nur einige Promille aus (105).

2.4.2 Bildung der Aromaten

Im Vergleich zu der Bildung der PCDD/F wird die Bildung von Aromaten in der Verbrennungsschemie einheitlich diskutiert (106). Im Gegensatz zu den PCDD/F geht man bei der Bildung der Aromaten von Radikalmechanismen aus, welche im Temperaturbereich bei der Verbrennung zwischen 1200°C -700°C ablaufen. Bockhorn (107) faßt die während der Aromatenbildung ablaufenden Prozesse in einem Schema zusammen, welches in Abbildung 2.4-1 dargestellt ist.

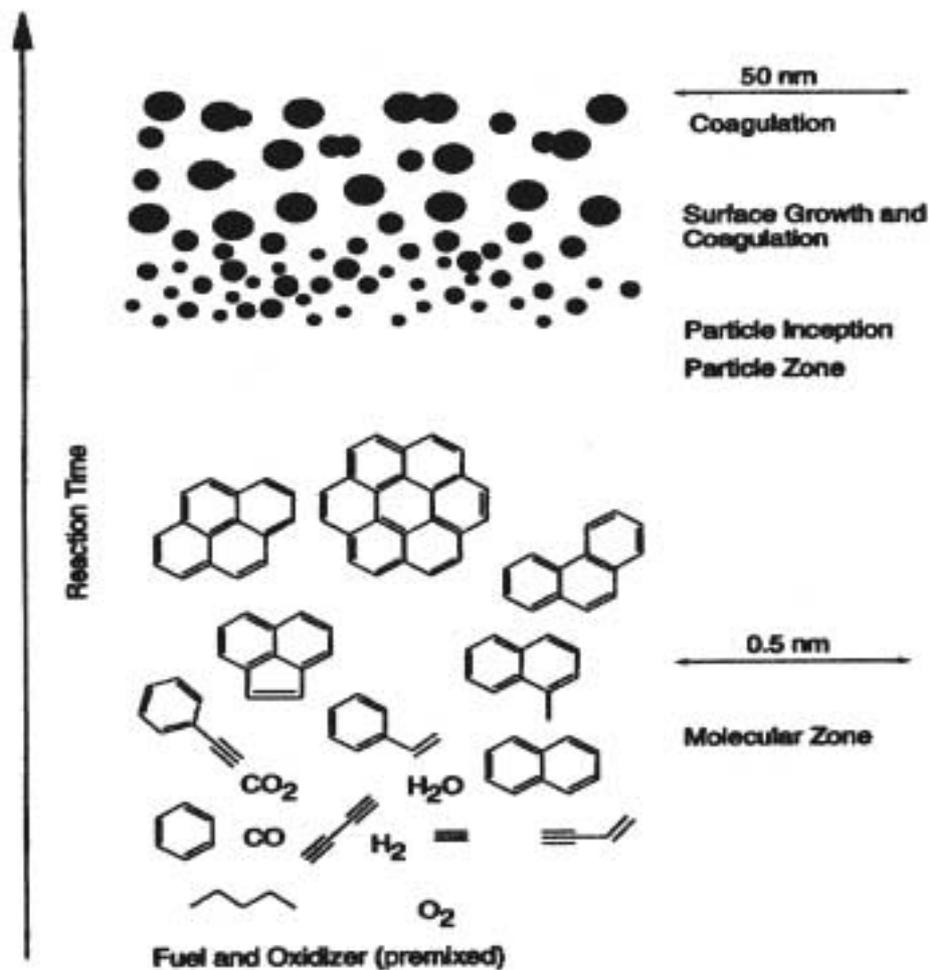


Abbildung 2.4-1: Bildungsschema für PAK nach Bockhorn (107)

Die Abbildung 2.4-1 zeigt, daß die PAK in Verbrennungsprozessen aus radikalischen C_2 -Aliphatheneinheiten bei Temperaturen über $900^\circ C$ gebildet werden. Als Startmolekül für die PAK-Bildung gilt das Acetylen, welches in den ersten Reaktionsschritten über ein Propargyl-Radikal (C_3H_3) Benzol aufbauen kann (108), (106). Für die Bildung von Naphthalin in flammenchemischen Prozessen wird die Reaktion von zwei aromatischen Cyclopentadienyl-Radikalen (C_5H_5) vorgeschlagen (109), (110). Der Verlauf dieser Reaktionen im Flammenbereich hängt sehr stark sowohl vom C/O-Verhältnis in den Flammen als auch von der eingesetzten Kohlenstoffquelle ab. Ein höheres C/O-Verhältnis in der Flamme führt zu einer stärkeren PAK-Bildung. Ferner zeigt Benzol bei gleichem C/O-Verhältnis in der Flamme ein um 100fach höheres Bildungspotential von PAK als aliphatische Brennstoffe, wie z.B. Acetylen (106). Nach der Bildung von monozyklischen Aromaten und PAK in der Flammenzone der Verbrennung findet im Hochtemperaturbereich eine weitere Aufkondensierung der Ringsysteme statt. Aus den gebildeten Aromaten entstehen im Laufe des Abkühlungsprozesses der Rauchgase durch die Prozesse der Nukleation und Aggregation Rußpartikel (107). Die dafür vorgeschlagene Reaktion ist ein Radikalenmechanismus zwischen ungesättigten aliphatischen Verbindungen mit den bereits

gebildeten aromatischen Ringsystemen (111). Bei diesen Reaktionen können PAK mit aliphatischen Resten entstehen, z.B. methylierte PAK. Der in der Flamme gebildete Ruß wird entlang des Rauchgaskanals z.T. oxidativ abgebaut und kann in oder auf Flugaschen als Kohlenstoffquelle für andere Moleküle, z.B. für PCDD/F bei der *de-novo* Synthese dienen (106), (82). Generell ist die Rußbildung in Rauchgasen mit hoher Naphthalinkonzentration stärker als in Rauchgasen mit hoher Benzolkonzentration (112).

2.4.3 Einflußfaktoren auf die Schadstoffbildung

2.4.3.1 Temperatur und Verweilzeit

Die Temperatur, die Verweilzeit und die Durchmischung der Rauchgase spielen für die Schadstoffbildung eine große Rolle. Diese drei Kriterien werden im allgemeinen als die „drei *t*“ angesprochen (*t* = *temperature*, *t* = *residence time* und *t* = *turbulence*) (10). So werden, wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben, PAK direkt aus Flammen im Hochtemperaturbereich gebildet und wachsen dann zu rußartigen Strukturen auf (113). Im Gegensatz findet die Chloraromatenbildung nur unter der katalytischen Einwirkung von bestimmten Metallspezies innerhalb von sehr genau definierten Temperaturbereichen zwischen 650°C bis 750°C und zwischen 200°C bis 400°C statt. Der Temperaturbereich der Chloraromatenbildung zwischen 200°C bis 400°C ist sehr gut untersucht und wurde als der wichtigere bezüglich der gebildeten Chloraromatenmengen identifiziert (82), (114), (83), (47), (115). Über die Bildung der Chloraromaten bei Temperaturen über 600°C existieren wenig Studien (116), (117), (118), (119), (120), (121), (122), (123). An großtechnischen Anlagen wurde in den letzten Jahren verstärkt die Bildung der Chloraromaten zwischen 500°C und 700°C untersucht. Dennoch ist es noch weitgehend unklar, welche Bildungsmechanismen für die Chloraromaten im Hochtemperaturbereich gelten. In der hier vorgestellten Arbeit wird sowohl die Hochtemperaturbildung als auch die Bildung der Chloraromaten bei der *de-novo* Synthese zwischen 250°C und 400°C untersucht (Kapitel 4.3).

Oberhalb von 1000°C werden Chloraromaten bei Verweilzeiten um 1 s total zerstört (124). Dieses Temperaturkriterium findet sich in der 17. BImSchV wieder, die für MVAs eine Verweilzeit der Rauchgase von 2 s bei mindestens 850°C und bei SMVAs von 0,5 s bei 1200°C vorschreibt (9). Dadurch soll gewährleistet werden, daß im Brenngut enthaltene Fremdstoffe komplett zersetzt werden.

Das dualistische Prinzip der Bildung und Zerstörung der Chlororganika in Abhängigkeit von der Temperatur wurde von Hagenmaier et al. in einem Schema dargestellt (Abbildung 2.4-2, (124)), wobei das zweite Bildungsfenster bei Temperaturen über 600°C in diesem Schema nicht berücksichtigt wurde.

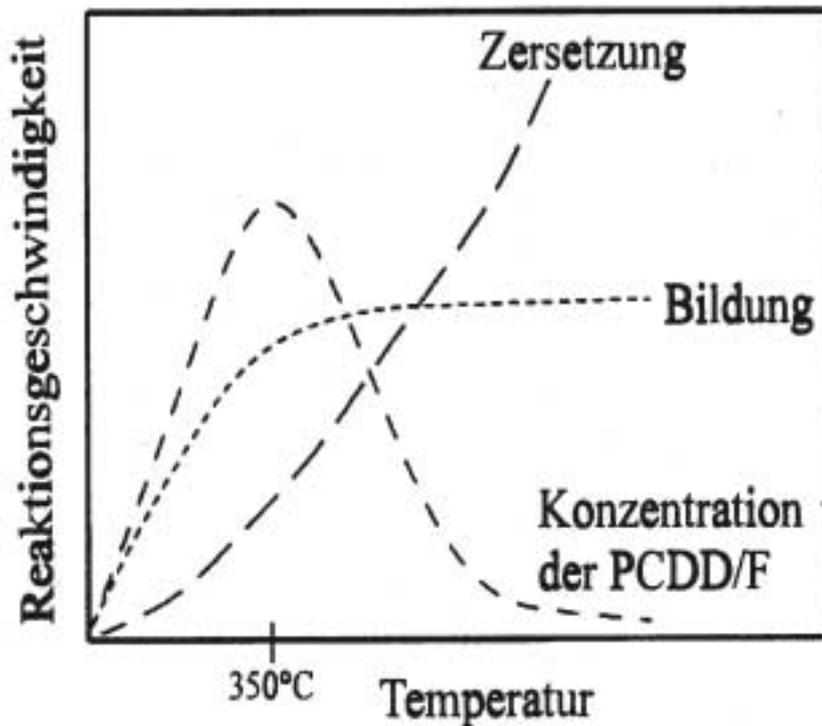


Abbildung 2.4-2: Dualistisches Prinzip der Bildung und Zersetzung nach Hagenmaier (124)

In einer Arbeit von Fängmark et al. wurde an einer Pilotanlage gezeigt, daß eine Temperatur von 340°C und eine Verweilzeit von 2.9 s zu den höchsten Konzentrationen an Chloraromaten im Rauchgas führte (125). Niedrigere Verweilzeiten in der Nachbrennzone führten zu stark reduzierten PCDD/F-Konzentrationen im Rauchgas.

2.4.3.2 Katalysatorwirkung und Chlorgehalt

Wie in Kapitel 2.4 erwähnt spielt die katalytische Aktivität von Metallen bei der Chloraromatenbildung eine wichtige Rolle (73), (78). Als effektivster Katalysator wurde Kupfer identifiziert, wobei die katalytische Aktivität der Kupferspezies in der Reihenfolge $\text{Cu} < \text{Cu}^+ \ll \text{Cu}^{2+}$ zunimmt (73).

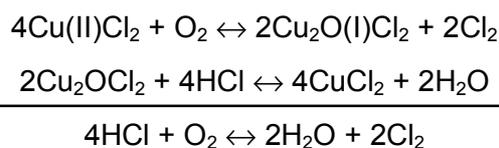
Der Kupfergehalt der Flugaschen der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Rauchgasproben betrug zwischen 2-8 g/kg. Darüber hinaus wurde in den Flugaschen Aluminium in ähnlicher Konzentration wie Kupfer gefunden, wohingegen Eisen in den Flugaschen einen Anteil von 2-12 Gew% zeigte. Trotz des hohen Anteils an Eisen und der ähnlichen Konzentration von Al und Cu in den Flugaschen, wird für die katalytische Aktivität der Flugaschen das Kupfer aufgrund seiner Elektronenkonfiguration verantwortlich gemacht (126), (127).

Der Chlorgehalt des in einer MVA verbrannten „durchschnittlichen“ Hausmülles ist kleiner als 1 Gew% und stammt zur einem Hälfte aus PVC und zur anderen Hälfte aus anorganischen Chloriden (z.B. NaCl) (1). Die Form, ob organisch oder anorganisch gebundenes Chlor, spielt für

die Menge der gebildeten Chloraromaten keine Rolle (128), (129). Die Menge der gebildeten Chloraromaten ist bei einem Chlorgehalt von 0,1 bis 1 Gew% des Brenngutes konstant (130), (129). Nur über und unter diesen für Hausmüll typischen Chlorkonzentrationen kommt es zu einer verstärkten bzw. verminderten Chloraromatenbildung, wobei hierfür noch andere Verbrennungsparameter, wie z.B. die CO-Konzentration, eine Rolle spielen können (130), (131).

Mehr als 90 % des gesamten Chlors im Rauchgas liegt bei Temperaturen zwischen 200°C bis 300°C als HCl vor (132). Dieses Molekül kann allerdings nicht als chlorierendes Agens wirken, so daß Cl₂ als Chlorierungsmittel bei der Chloraromatenbildung dient (133), (134). Einen weiteren Einfluß auf die Bildung von Chloraromaten hat die Chlorradikalkonzentration im Hochtemperaturbereich (über 600°C). So wurde durch Modellrechnungen gezeigt, daß bei Temperaturen über 700°C zwischen 1 und 3% des gesamten im Rauchgas befindlichen Chlors als Chlorradikale vorliegen (135). Der Einfluß einer höheren Chlorradikalkonzentration auf die Homologenprofile der PCDD/F wurde ebenfalls untersucht (85). Es zeigte sich in den dazu durchgeführten Modellrechnungen zur Bestimmung der Chlorradikalkonzentration, daß diese vor allem durch den Brennstoff der Flamme, z.B. H₂ oder CH₄, beeinflusst wird (136). Eine Methanflamme weist eine Reihe von Verbindungen (CO, CO₂, OH, etc.) auf, die in den Berechnungen zu einer niedrigen Chlorradikalkonzentration im Gasraum führte. Im Gegensatz dazu zeigten die Chlorradikale bei den Rechnungen für Wasserstoffflammen Konzentrationen im ppm-Bereich (v/v). Diese berechneten Unterschiede in der Chlorradikalkonzentration zeigten sich in den experimentellen Ergebnissen durch eine stärkere Bildung der Hx-OCDD/F in den Laborversuchen, wo Wasserstoffflammen zum Einsatz kamen.

Das kupferkatalysierte Gleichgewicht zwischen Cl₂ und HCl kann als *Deacon*-Reaktion aufgefasst werden (133):



Damit steht elementares Chlor zur Chlorierung aromatischer Moleküle bereit:



Ohne Kupfer als Katalysator ist die Einstellung des Reaktionsgleichgewichtes im für die *de-novo* Synthese relevanten Temperaturbereich aus kinetischen Gründen nicht möglich (133). Wahrscheinlich stellt diese Reaktion die Hauptquelle für Cl₂ im Rauchgas von Verbrennungsanlagen dar (133). Ferner wurde gezeigt, daß die *Deacon*-Reaktion nur mit kupferhaltigen Metallspezies zu einer Bildung von Cl₂ führt, wohingegen mit Eisen keine Reaktion

einsetzte (126). Das Maximum der Cl₂-Bildung aus der *Deacon*-Reaktion liegt bei einer Temperatur von 400°C.

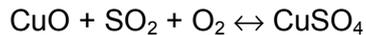
Aufgrund der Feststellung, daß die Anbindung des Cl₂ aus der Gasphase an den Kohlenstoff nicht der die Reaktionsgeschwindigkeit bestimmende Schritt bei der PCDD/F-Bildung ist, wurde in der Literatur ein anderer Mechanismus vorgeschlagen (72), (137), (127). Bei diesem Mechanismus wirkt CuCl₂ als chlorierendes Agens, und es ergibt sich damit folgende Nettoreaktion:



Das Cu⁺ wird in einer weiteren Reaktionsfolge über O₂ wieder zurückoxidiert und damit regeneriert. Da dieser Mechanismus bis zu Temperaturen um 150°C hinab abläuft, kann er vor allem bei niedrigeren Temperaturen im Bildungsfenster der *de-novo* Synthese zwischen 250°C bis 450°C von Bedeutung sein.

Elementares Chlor kann zu einer Deaktivierung der Kohlenstoffstrukturen im partikulärem Kohlenstoff und damit zu einer niedrigen Bildungsrate von PAK führen (138), (139). Eine hohe Chlorkonzentration im Rauchgas kann einerseits zu einer verminderten PAK-Bildung führen und andererseits eine gesteigerte Chloraromatenbildung durch die *de-novo* Synthese zur Folge haben. Darauf weisen auch die Ergebnisse von Laborversuchen zum Bildungsverhalten der Chloraromaten hin, in welchen gezeigt wurde, daß eine höhere Chlorkonzentration im Rauchgas zu einer verminderten PAK-Konzentration führt (140).

Die zentrale Rolle der katalytischen Wirkung der Metalle bei der Entstehung von Chloraromaten wird auch durch Inhibierungsexperimente mit stickstoff- und schwefelhaltigen Verbindungen deutlich (74), (141), (142), (143), (144). In der Literatur finden sich eine Reihe von Versuchen mit unterschiedlichen organischen und anorganischen Verbindungen (EDTA, Na₂S, Ethanolamine, und Sulfonamide), die eingedüst in das Rauchgas bei Temperaturen um 400°C oder dem Müll in geringen Mengen zugemischt, die PCDD/F-Bildung reduzierten. Dafür wird generell die Blockierung der katalytischen Zentren der Flugasche (v.a. Kupfer) verantwortlich gemacht. Für die Schadstoffreduzierung an großtechnischen Feuerungsanlagen sind diese Laborergebnisse nicht von großer Bedeutung, da diesbezügliche Maßnahmen mit hohen Mehrkosten z.B. für den Inhibitor oder eine veränderte Verbrennungstechnik, verbunden sind. Es wurde gezeigt, daß es bei einer Mitverbrennung von stark schwefelhaltigen Kohlen an MVA zu einer Reduzierung der PCDD/F-Konzentrationen im Rauchgas bis zu 60% kommen kann (145), (141). Dieses Ergebnis wurde auf die den Katalysator inhibierende Wirkung der Schwelverbindungen zurückgeführt. Darüber hinaus kann die Reaktion von Cl₂ mit SO₂ zu HCl gemäß den untenstehenden Reaktionsgleichgewichten ebenfalls zu verminderten PCDD/F-Konzentrationen aufgrund der erniedrigten Cl₂-Konzentration im Rauchgas führen (133), (146).



Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die katalytische Aktivität des Kupfers bei der Chloraromatenbildung eine zentrale Rolle einnimmt. Das Kupfer kann durch verschiedene Katalysatorgifte (z.B. SO_3) inhibiert werden kann.

2.4.3.3 Verbrennungsprozeß und -qualität

Im Verbrennungsprozeß werden generell Kohlenstoff, Wasserstoff, Schwefel und Stickstoff aus dem Brenngut zu Kohlendioxid, Wasser, Schwefeldioxid und verschiedenen Stickstoffoxiden umgesetzt. Prinzipiell entsteht aus dem Kohlenstoff und dem Sauerstoff im ersten Schritt Kohlenmonoxid, und im zweiten, geschwindikeitsbestimmenden Schritt wird das Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid weiteroxidiert. Darüber hinaus spielt der Sauerstoff bei der Chloraromatenbildung eine wichtige Rolle. Der Sauerstoff ist an der Bildung der chlorierenden Spezies (Cl_2) und an dem Abbau des Kohlenstoffes durch die *de-novo* Synthese beteiligt (Kapitel 2.4.3.2 und 2.4.1.3, (114), (133), (147)).

In der Literatur wurde gezeigt, daß es im wesentlichen keinen Zusammenhang zwischen der Bildung von Schwefeldioxid und Stickoxiden und der Bildung von Chloraromaten und Aromaten gibt, weshalb der Einfluß der Konzentration dieser Gase auf die Chloraromatenbildung in dieser Arbeit nicht näher untersucht wurde (130), (148), (125), (120), (121), (122).

Ein wichtiger Parameter für die Güte der Verbrennung ist das Kohlenmonoxid (CO), welches bei unvollständiger Verbrennung im Prozentbereich in den Rauchgasen auftreten kann.

Als Gütemaß der Verbrennung wird der λ -Wert (Lamda) angegeben, der auch als Luft(überschuß)zahl bezeichnet wird. Dieser ist über das Verhältnis des aktuellen zum stöchiometrischen Massenverhältnis von Luft zu Brennstoff definiert (1):

$$\text{Luftzahl } \lambda = \left(\frac{m_{\text{Luft}}}{m_{\text{Brennstoff}}} \right)_{\text{aktuell}} / \left(\frac{m_{\text{Luft}}}{m_{\text{Brennstoff}}} \right)_{\text{stöchiometrisch}}$$

Unter stöchiometrischen Verbrennungsbedingungen wird λ gleich 1. Ist der λ -Wert größer 1 so kann der sog. Ausbrand des Brenngutes als gewährleistet angesehen werden. Falls die λ -Werte unter 1 liegen (z.B. während CO -Spitzen), muß mit erhöhten organischen Belastungen in den Reststoffen und Emissionen gerechnet werden (1).

Die Qualität des Verbrennungsprozesses wird durch die Temperatur, die Verweilzeit und die Turbulenz im Brennraum charakterisiert (10). Die Temperatur und die Verweilzeit im Hochtemperaturbereich von MVAs bzw. SMVAs sind in der 17. BImSchV geregelt und liegen im Bereich von 850°C bzw. 1200°C und einer Mindestverweilzeit von 2 s bzw. 0.8 s (9).

Im Abgas von großtechnischen Feuerungsanlagen findet sich ein Sauerstoffgehalt von 7-9 Vol%. Dieser Wert wird angestrebt, weil dadurch sichergestellt werden kann, daß die Verbrennung mit einem hohen O₂-Überschuß stattfindet. Darüber hinaus wird dadurch eine kurze Verweilzeit im für die Bildung relevanten Temperaturbereich und ein niedriger CO-Gehalt des Rauchgases erzielt (149), (150).

Für die Bildung von Chloraromaten finden sich in der Literatur Hinweise, daß ein guter Ausbrand, also ein niedriger CO-Wert, zu niedrigen Konzentration der Chloraromaten im Abgas führt (151), (130), (150), (152). Auf der anderen Seite stellen niedrige CO-Konzentrationen und hohe O₂-Gehalte im Abgas keine Garantie für eine geringe Chloraromatenbildung dar (149), (153), (154). Eine Reihe weiterer Parameter, wie z.B. die Häufigkeit des Auftretens von CO-Spitzen und die Höhe der jeweiligen CO-Spitzen entscheiden darüber, ob eine verstärkte Chloraromatenbildung stattfindet (155), (156), (157).

Interessant ist hierbei auch die Rolle des Sauerstoffes. So führte ein hoher Sauerstoffgehalt bei der Umsetzung von Flugaschen zu einer erhöhten Bildung von Chloraromaten (158). Bei einer unter Sauerstoffmangel (O₂-Konzentration kleiner 5 Vol%) durchgeführten thermischen Behandlung von Flugaschen zeigte sich eine starke Dechlorierung der auf der Flugasche befindlichen PCDD/F (83). Dieses Ergebnis wurde durch Laborexperimente bestätigt, bei welchen eine Reduzierung des Sauerstoffgehaltes der Verbrennung zugeführten Luft von 10 auf 1 Vol% eine Halbierung der PCDD/F-Konzentration zur Folge hatte (159).

Für PAK wurde gezeigt, daß hohe CO-Konzentrationen zu einer verstärkten PAK-Bildung im Rauchgas führen (148), (160), (122).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die Bildung der untersuchten Substanzen von verschiedenen Verbrennungsparametern unterschiedlich stark beeinflusst wird und somit eine Beschreibung der Bildungsmechanismen aufgrund der komplexen bisher z.T. nicht verstandenen Zusammenhänge sehr schwierig ist.

3. MATERIAL, METHODEN UND KONZEPTE

3.1 Untersuchte Anlagen, Probenahmestellen und Probenumfang

Um eine Aussage über den Bildungsprozeß von Fremdstoffen treffen zu können, sind im Rahmen dieser Arbeit die Probenahmen hauptsächlich im Rohgas, also vor der ersten Rauchgasreinigungsstufe der jeweiligen untersuchten Anlage, durchgeführt worden. Zusätzlich dazu wurden auch Probenahmen im Reingas der Anlagen vorgenommen, um das Verteilungsverhalten der Fremdstoffe an den Anlagen besser verstehen zu können. Als Reingas wird das Abgas bezeichnet, welches in die Umwelt nach allen Reinigungsschritten emittiert wird.

3.1.1 Pilot-Verbrennungsanlage zur Verwertung von Holzabfällen (PVA)

Die Probenahmen an der PVA (Feuerungswärmeleistung: $P_{\text{therm}} = 0,5 \text{ MW}$) wurden am Ende der Nachbrennkammer im Temperaturbereich zwischen 650°C und 870°C durchgeführt. Den schematischen Aufbau der Anlage gibt Abbildung 3.1-1 wieder.

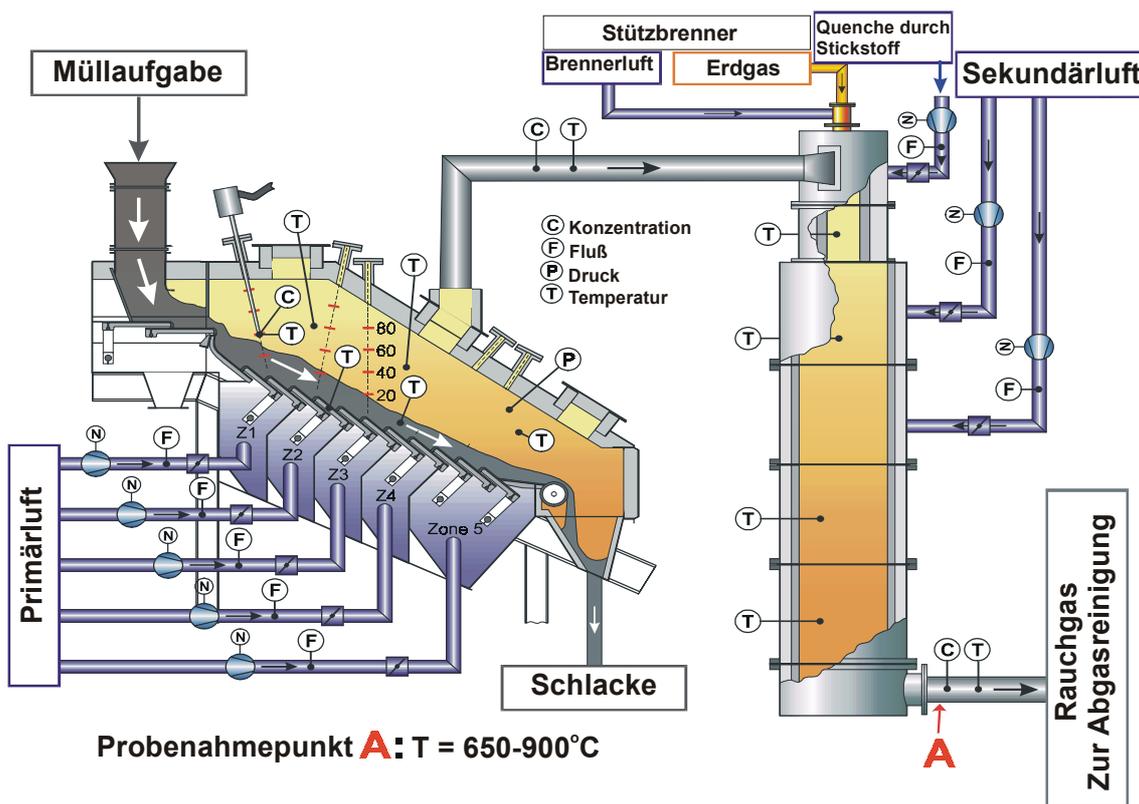


Abbildung 3.1-1: Schematischer Aufbau der PVA

Die Abbildung 3.1-1 zeigt die räumliche Trennung zwischen Rückschubrost und Nachbrennkammer an der PVA, welche eine bessere Anlagensteuerung (z.B. gezielte Primärmaßnahmen) ermöglichen soll.

Der an der PVA eingesetzte Brennstoff bestand aus zerkleinerten Holzstückchen von Euroindustriepaletten mit einer Spanlänge von circa 3-5cm. Der Durchsatz der Anlage lag zwischen 100 kg bis 150 kg Brennstoff pro Stunde.

Der Prozeß auf dem Rost wurde zwischen Verbrennung im Sauerstoffüberschuß bis zu einer Vergasung mit sehr niedrigen Sauerstoffgehalten im Pyrolysegas (1-2 Vol%) variiert. Zudem wurde, um eine geringere Temperatur in der Nachbrennkammer zu erzielen, eine Verdünnung (Quenchen) des Pyrolysegases mit Stickstoff am Kopf der Nachbrennkammer durchgeführt. Das Quenchen diente zu einer Abkühlung des Pyrolysegases und führt damit zu einer geringeren thermischen Belastung der Nachbrennkammer. Ebenso sollte durch das Quenchen die Verweilzeit der Rauchgase bei hoher Temperatur verkürzt und dadurch die Schadstoffbildung reduziert werden.

3.1.2 Sondermüllverbrennungsanlage (SMVA)

Die untersuchte Anlage hat eine Feuerungswärmeleistung von 22 MW und dient zur Beseitigung von flüssigem, pastösem und festem Sondermüll. Die durchschnittlich pro Stunde entsorgte Menge Sondermüll liegt bei 15 t. Der Anlagenaufbau und die Probenahmestellen mit entsprechenden Temperaturen sind in Abbildung 3.1-2 dargestellt.

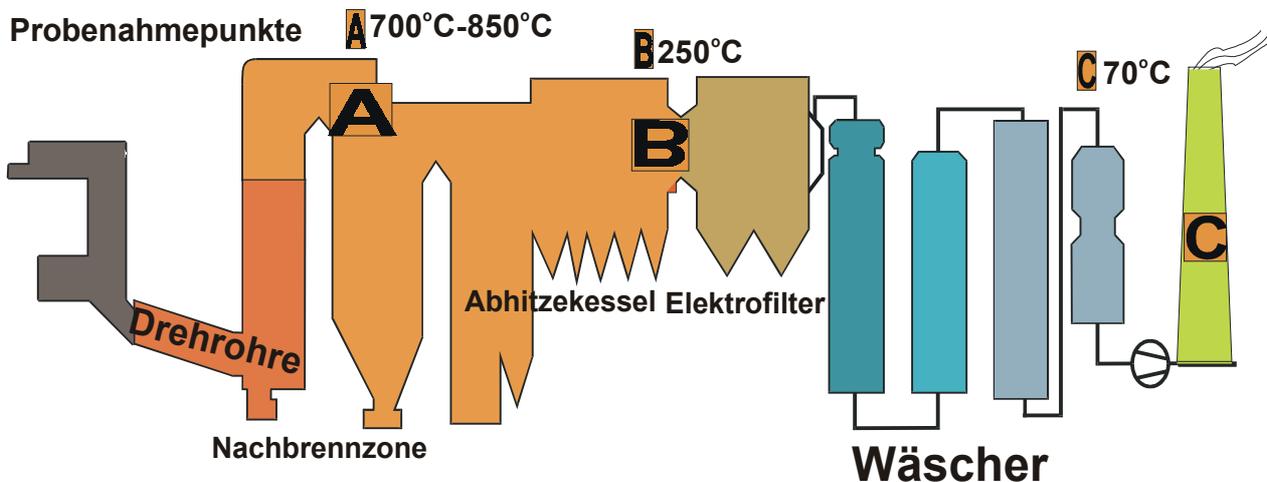


Abbildung 3.1-2: Schematischer Aufbau der SMVA

Für die in Abbildung 3.1-2 gezeigte Anlage betrug die Temperatur in den Drehrohren ca. 900°C und die der Nachbrennkammer ca. 1100°C. Variationen im Verbrennungsprozeß wurden durch die Aufgabe von unterschiedlichen Abfallarten (z.B. ausschließlich pastöser Sondermüll) oder Einzelbinden in die Drehrohre bei gleichzeitig erhöhter oder reduzierter Luftzufuhr erzielt. Der Abhitzekeessel bestand aus 11 Zügen, die mit Wärmetauschern ausgestattet waren. Diese wurden täglich mit Hilfe von Druckluft von den Flugstäuben gereinigt.

3.1.3 Holzverbrennungsanlage (HVA)

In Abbildung 3.1-3 ist die Holzverbrennungsanlage ($P_{\text{therm}} = 15 \text{ MW}$), welche mit einem Vorschubrost ausgestattet ist, dargestellt.

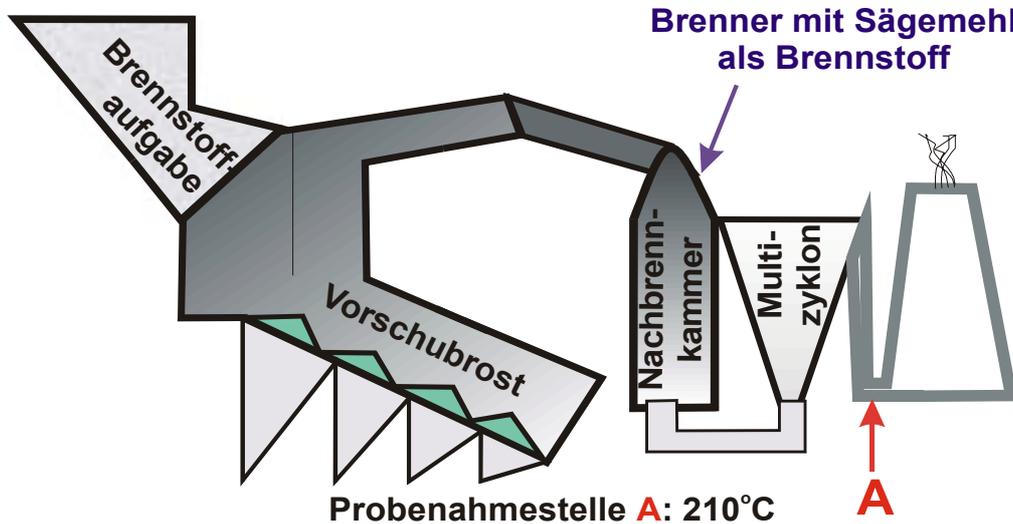


Abbildung 3.1-3: Schematischer Aufbau der HVA

Die in der Abbildung 3.1-3 gezeigte Probenahmestelle an der HVA befand sich nach dem Multizyklon zur Grobstaubabscheidung. Die zweite Brennkammer, welche an ihrem Kopf mit einem Brenner zur thermischen Verwertung von Sägemehl aus der Preßspanplattenproduktion ausgestattet war, kann als Nachbrennkammer angesehen werden. Die Anlage befindet sich im Ausland, so daß die Ausführungen zur Rauchgasreinigung nicht der 17. BImSchV entsprechen. Der Durchsatz der Anlage betrug auf dem Rost circa 2t/h und in der Nachbrennkammer circa 1t/h. Die Zusammensetzung des Brenngutes auf dem Rost wurde variiert, und so wurden behandeltes Altholz (imprägnierte Bahnschwellen), Holzkohle, naturbelassenes Pinienholz, Preßspäne und Mischungen aus diesen Materialien verbrannt (siehe Kapitel 5). Die Temperatur in circa 1 m Höhe über dem Rost betrug 1300°C und am Kopf der Nachbrennkammer circa 1250°C .

3.1.4 Hausmüllverbrennungsanlage (MVA)

In der Bundesrepublik Deutschland werden jährlich circa 10 Millionen Tonnen Hausmüll verbrannt. Deshalb stellt dieser Prozeß einen der wichtigsten thermischen Prozesse für den Eintrag der PCDD/F in die Umwelt dar (1). In Abbildung 3.1-4 findet sich der schematische Aufbau der untersuchten Anlage ($P_{\text{therm}} = 22 \text{ MW}$).

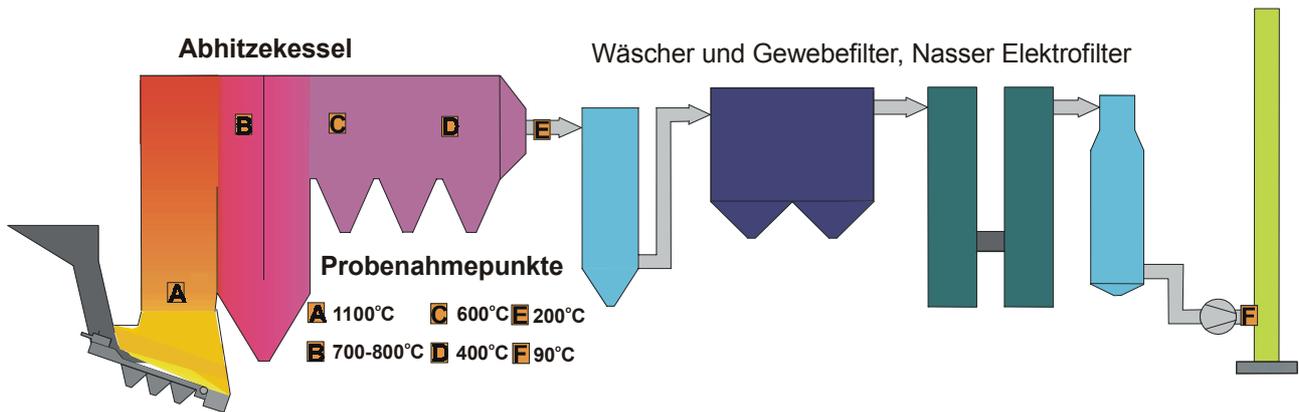


Abbildung 3.1-4: Schematischer Aufbau der Hausmüllverbrennungsanlage

Für die in der Abbildung 3.1-4 gezeigte Anlage lag der Mülldurchsatz bei circa 10 t/h. Der Kessel zur Erzeugung von Dampf ist ein sogenannter Dackelkessel, der nicht aus verschiedenen Zügen, sondern aus einem durchgehenden Zug mit darin befindlichen Wärmetauschern besteht. Diese Wärmetauscher werden mit mechanischen Klopferwerken im Turnus von zwei Stunden von den angebackenen Flugstäuben befreit. Die „17. BImSchV Ebene“ (2s Aufenthaltszeit bei mehr als 850°C) liegt in acht Meter Höhe über dem Rost. Die der Verbrennung durch den Rost zugeführte Luft wird als Primärluft, die über das Brenngut geblasene Luft als Sekundärluft bezeichnet.

3.1.5 Probenumfang

In Tabelle 3.1-1 wird ein Überblick über die an den unterschiedlichen Anlagen entnommenen Proben gegeben.

Tabelle 3.1-1: Übersicht über den Probenumfang

Probenahmestelle	PVA	SMVA	HVA	MVA
Ende der Nachbrennkammer	9	7	-	-
Über Rost	-	-	-	1
1. Zug über dem Rost	-	-	-	7
Anfang des Abhitzekessels	-	-	-	4
Mitte des Abhitzekessels	-	-	-	3
Ende des Abhitzekessels	-	28	-	14
Reingas	-	14	12	9
Summe	9	49	12	38

Insgesamt wurden in dieser Arbeit 108 Emissionsproben auf Chloraromaten und Aromaten untersucht. Im Anhang 7.4 (C-1) sind die Ergebnisse der Analysen aller Proben aufgeführt.

3.2 Konventionelle Probenahme- und Analysentechnik

Für Probenahme und Analytik von leicht- bis mittelflüchtigen Verbindungen gibt es eine Reihe von Standards und Vorschriften. Die Qualität der verwendeten Adsorbentien, Lösungsmittel etc. wird im Anhang B in einer Tabelle zusammengefasst (Anhang B-1).

3.2.1 Probenahmetechnik

Die untersuchten Analyten verteilen sich im Rauchgas gemäß ihren physikalisch-chemischen Eigenschaften zwischen den Partikeln und der Gasphase (siehe Kapitel 2.3). Diesem Verteilungsverhalten wird durch eine isokinetische Probenahme Rechnung getragen (57), (161). Bei einer isokinetischen Probenahme wird eine Gasprobe in der Geschwindigkeit des strömenden Rauchgases aus dem Rauchgaskanal entnommen.

Für Verbindungen mit einem niedrigen Dampfdruck, z.B. niedrig chlorierte PCBz, PCPh und BTX, wurden die Proben nach Partikelabscheidung auf einem Quarzfaserfilter auf verschiedenen Adsorbentien gesammelt (siehe 7.3 Anhang B, Anhang B-1). Der Quarzfaserfilter und die Probenahmeeinheit wurde bei einer Temperatur von 70°C betrieben. Dieses Vorgehen war nötig, um die gesammelten Proben ohne Vorreinigung in der Thermodesorption (PCBz und BTX) einsetzen zu können. In Vorversuchen wurde gezeigt, daß bei einer Temperatur über 200°C entnommenes Rauchgas für ein- bis dreifach chlorierte Verbindungen der PCBz und PCPh nur einen sehr kleinen (weniger als 10% der Gesamtmenge) partikelgebundenen Anteil dieser Verbindungen enthielt (siehe auch Kapitel 3.2.3.2).

Der Aufbau der isokinetischen Probenahme ist in Abbildung 3.2-1 dargestellt.

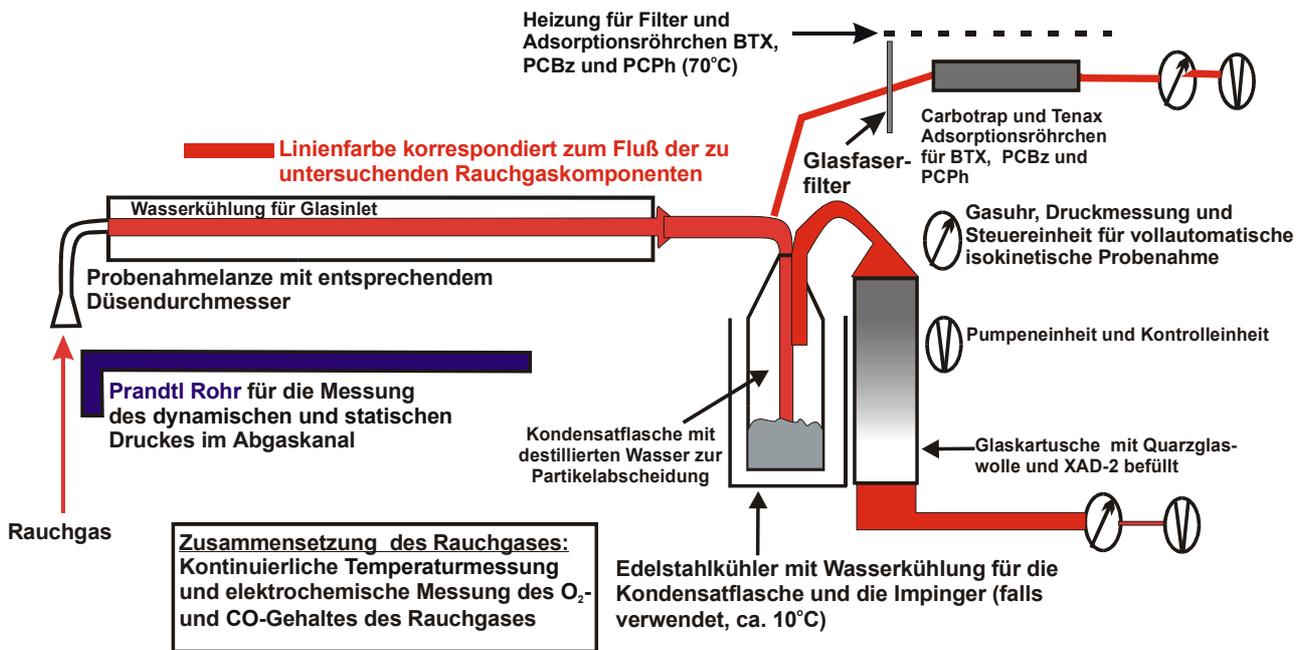


Abbildung 3.2-1: Schematischer Aufbau der isokinetiche Probenahme

Die Kühlung der Probenahme in Abbildung 3.2-1 ist wichtig, um ein schnelles Durchlaufen des Bildungsfenster (200°C-700°C) der untersuchten Substanzen zu gewährleisten. Um eine bessere Partikelabscheidung zu erreichen und damit ein Durchbrechen von Partikeln auf das Adsorbens zu verhindern, wurde die Kondensatflasche mit destilliertem Wasser gefüllt und eine mit gereinigter Quarzglaswolle gefüllte Kartusche dem Adsorbens vorgeschaltet.

Die Probenahme erfolgte für die SOC (*semivolatile organic compounds*) gemäß den Vorschriften der VDI DIN 3499 Blatt 1-3 bzw. VDI DIN 2066 1-8 (57), (162). Als Berechnungsgrundlage für eine isokinetiche Probenahme wird die Abgasdichte, errechnet aus der Abgasfeuchte und Abgaszusammensetzung, die Abgastemperatur und der dynamische und statische Druck im Abgaskanal benötigt. Die im Probenahmesystem regulierbaren Größen sind der Unterdruck und der Durchmesser der Probenahmedüse (8-12 mm). Eine ausführliche Beschreibung der hier verwendeten vollautomatischen isokinetiche Probenahme und der damit verbundenen Problematik findet sich in der Literatur (161).

Für die leichter flüchtigen Verbindungen PCBz, PCPh und BTX wurde die Probenahme in einem Bypass zur gekühlten Lanze durchgeführt. Der Filterhalter bestand aus einem Quarzglasrohr, in das eine Fritte eingeschmolzen war, um den Planfilter und die Glaswolle zu fixieren (Filtermaterial siehe 7.3 Anhang B, Anhang B-1). Dieser Bypass war mit einer Heizmanschette auf 70°C beheizt, um die Kondensation von im Rauchgas befindlichen Wasser zu verhindern. Für jede Probenahme wurden alle Glasteile und Adsorberkartuschen erneuert, so daß nicht die Gefahr von Verschleppungen der untersuchten Substanzen in die nachfolgenden Proben bestand.

Das für die Probenahme der SOC verwendete XAD-2 (ein vernetztes Polystyrol-Divinylbenzol-Kopolymer) zeigt über einen breiten Siedepunktbereich der untersuchten Substanzen qualitativ hohe Adsorptionsraten. Vor allem im Bereich der flüchtigeren SOC ist es dem empfohlenen Adsorbens für die Emissionsprobenahme, Polyurethan, überlegen (163). Die abgesaugten Gasvolumina für die SOC lagen zwischen 0,5 und 2,5 m³. Die Probenahme der SOC an der PVA erfolgte mit zwei parallelen Impingerstraßen, welche mit 2-Ethoxyethanol (2-Ethylenglykolmonoethylether) befüllt waren.

Die karbonisierten Adsorptionsmaterialien (Carbotrap, Carboxen) für die Probenahme der PCBz, PCPh und BTX zeigen vor allem wegen ihrer großen inneren Oberfläche für feuchtes und heißes Rauchgas gute Adsorptionseigenschaften und große Durchbruchvolumina (164), (165), (163), (166). Ebenfalls ist bekannt, daß XAD-2 bei sauren und heißen Abgasen, wie diese in Verbrennungsprozessen auftreten, ein vermindertes Rückhaltevermögen für PCBz zeigt (167). Da die Konzentrationen der PCBz, PCPh und BTX im Rauchgas um den Faktor 1000-100000 höher liegen als die der PCDD/F, waren Probenahmenvolumina von 2 bis 20 l zur Bestimmung der Konzentrationen dieser Verbindungen ausreichend.

Die Verluste der Analyten, z.B. aufgrund von Durchbruch oder chemischer Zersetzung während und nach der Probenahme, wurde über die Wiederfindung von isotoopenmarkierten Standards bestimmt (siehe Kapitel 3.2.3).

Um eine Vergleichbarkeit der gemessenen Konzentrationen zu gewährleisten, wurden die abgesaugten Volumina auf Normalbedingungen (0°C, 1013 mbar, 11 Vol% O₂ und 0 Vol% Feuchte) umgerechnet.

3.2.2 Aufreinigung und Analytik

Ein Überblick der in dieser Arbeit verwendeten Aufreinigung und Analytik für die untersuchten Substanzen findet sich in der Literatur (168), (169). Im nächsten Kapitel wird nochmals ausführlicher die Aufreinigungstechnik und anschließende Analytik erläutert.

3.2.2.1 Polychlorierte Benzole (PCBz), Benzol, Toluol, Xylol (BTX) und methylierte Naphthaline (MeNap)

Als Analysensystem für die PCBz, BTX und MeNap kam eine Kopplung aus Thermodesorption (TD), hochauflösender Gaschromatographie (HRGC) und niedrig auflösender Massenspektrometrie (LRMS) zum Einsatz. Die genauen Geräte- und Analysenparameter finden sich unter 7.3 Anhang B (Anhang B-2). Eine spezielle Aufreinigung der Proben für diese Substanzklassen wurde nicht durchgeführt. Der Thermodesorber arbeitet mit einer inneren Kryotrap, welche mit TENAX TA (Supelco) gefüllt ist, um eine Fokussierung der Analyten vor der chromatographischen Trennung zu erzielen (166).

Im Falle der Probenahme an der PVA wurde Aktivkohle als Adsorbens für PCBz und BTX verwendet und eine naßchemische Aufarbeitung der Proben mit CS₂ nach NIOSH 1501 vorgenommen (170).

Die Quantifizierung von PCBz und BTX erfolgte über die Isotopenverdünnungsmethode, die hierfür verwendeten Isotope sind unter 7.3 Anhang B (Anhang B-3) aufgeführt. Die isotopenmarkierten Standards wurden **vor** der Probenahme auf die Probenahmeröhrchen aufgegeben, so daß die im Kapitel 3.2.3 angegebene Wiederfindung die Substanzverluste der Probenahme, Lagerung und Desorption umfaßt (Wiederfindungsstandard: ²H₁₀-Ethylbenzol). Die Konzentrationen der methylierten Naphthaline, wie auch die der unchlorierten Grundgerüste der PCDD/F (DD und DF) wurden über ²H₆-Naphthalin unter Verwendung von Responsefaktoren bestimmt. Deuterierte Standards wurden in deuteriertem *n*-Hexan aufbewahrt, um einen H-Austausch zu verhindern.

3.2.2.2 Polychlorierte Phenole (PCPh)

Chlorphenole müssen aufgrund ihrer Polarität zur Aufreinigung und Vermessung mit HRGC/LRMS einer Derivatisierung unterzogen werden. Für die Derivatisierung der PCPh bietet sich eine Silylierung oder Acetylierung an. Die Acetylierung der Chlorphenole wurde in Anlehnung an in der Literatur näher beschriebene Methoden durchgeführt (171), (172). Die isotopenmarkierte Standardlösung zur Bestimmung der Konzentrationen der Chlorphenole wurde vor der Probenahme auf die Probenröhrchen aufgegeben (7.3 Anhang B, Anhang B-3).

Die auf Carbotrap angereicherten Chlorphenole wurden für die ein- bis dreifach chlorierten Homologen nach der Vorschrift unter 7.3 Anhang B (Anhang B-4) aufgearbeitet. Die vier- bis fünffach chlorierten Phenole wurden aus dem Toluolextrakt der PCDD/F- und PCB-Proben mittels der Vorschrift unter 7.3 Anhang B (Anhang B-4) derivatisiert.

3.2.2.3 Polychlorierte Dibenzo-*p*-dioxine/Dibenzofurane (PCDD/F) und polychlorierte Biphenyle (PCB)

Für die PCDD/F und PCB wurde die Probenvorbereitung gemäß der VDI-Richtlinie, DIN 3499 Blatt 1-3, durchgeführt ((57), Standards, Adsorbentien, etc. siehe 7.3 Anhang B). Im Anschluß an die Probenahme wurden die XAD-2 Kartuschen nach der Zugabe des Aufarbeitungsstandards im Soxhlet für 24h mit Toluol extrahiert (7.3 Anhang B, Anhang B-3). Von dem so gewonnenen Extrakt wurden 40 Gew% für weitere Analysen (z. B. PAK) zurückgestellt. Die übrigen 60 Gew% wurden nach vorheriger Abtrennung der PCPh (vgl. Kapitel 3.2.2.2) einer Probenreinigung unterzogen, die in der Tabelle 3.2-1 zusammenfassend dargestellt ist. Der genaue Aufbau der Aufreinigungs- und Chromatographiesäulen ist unter 7.3 Anhang B (Anhang B-5) beschrieben.

Tabelle 3.2-1: Probenreinigung und Trennung

Substanzklasse	Reinigungsschritt	Beschreibung (a)Prinzip (b)Material (c) Elutionsmittel und Fraktionen
PCDD/F	Saure Säule; (Saure-basische Säule)	(a) Zerstörung/Adsorption der Matrix (b) Neutrales Kieselgel, H ₂ SO ₄ /aktives Kieselgel, neutrales Kieselgel (c) Hexan/Dichlormethan
	Alox-Säule nach Hagenmaier (H-Alox)	(a) Adsorptionschromatographie (b) basisches Aluminiumoxid (Alox)/Na ₂ SO ₄ (c) Benzol, Hexan:Dichlormethan (98:2 Vol%) [enthält PCB/PCBz]; Hexan:Dichlormethan (1:1) [enthält PCDD/F]
	Mini-Alox Säule; (Florisil Säule)	(a) Adsorptionschromatographie (b) basisches Alox/Na ₂ SO ₄ (c) Hexan; (Dichlormethan)
PCB, PCBz	Gelpermeationschromatographie (der ersten zwei Fraktionen aus der H-Alox Säule)	(a) Größenausschlußtrennung (b) Bio-Beads SX-8 (c) Laufmittel Toluol

Für die PCB und PCBz stand ein isotoopenmarkierter Standard zur Verfügung, der zu jedem Chlorierungsgrad mindestens ein ¹³C₁₂ bzw. ¹³C₆ Isotop enthielt (7.3 Anhang B, Anhang B-3). Zur Zeit der praktischen Durchführung der Arbeit gab es noch keine isotoopenmarkierten Standards für einige Chlorierungsgrade der PCDD/F (MCDD/F und TriCDF). Deshalb wurde, um für diese Homologen eine möglichst exakte Quantifizierung zu erreichen, eine Reihe von Vorversuchen mit den entsprechenden unmarkierten Kongeneren durchgeführt. Es zeigte sich, daß die in der Arbeit verwendete Aufreinigung für die ein- bis dreifach chlorierten Kongeneren zu Verlusten von 10 % bis 20 % führte. Die beobachtete Abnahme der Konzentrationen liegt im Bereich der Meßgenauigkeit der HRGC/HRMS-Analytik. Die Konzentration der MCDD/F bis TriCDD/F wurde aufgrund dieser Ergebnisse mit Hilfe von Responsefaktoren mit der bekannten Mengen an isotoopenmarkierten DiCDD/F und TriCDD bestimmt.

Die Zuordnung der ein- bis dreifach chlorierten Kongeneren in den Chromatogrammen erfolgte mit Hilfe der Literatur (21), (8), (173), (174), (175), (176).

Für bestimmte Kongenere der PCDD/F und PCB wurden in der Literatur unabhängig vom Chlorierungsgrad Verluste nachgewiesen (177), (178), (8). Im Rahmen der hier vorgestellten

Arbeit konnten die Ergebnisse aus der Literatur nicht oder nur im geringen Ausmaß bestätigt werden. In Vorversuchen zur Aufreinigung und Analytik wurde gezeigt, daß die Wiederfindungsraten für die niedrig chlorierten PCDD/F-, PCB- und PCBz-Homologen aufgrund des Einsatzes der sauren Säule sanken. Dabei stellte sich heraus, daß vor allem die Polarität des Elutionsmittels (*n*-Hexan) einen entscheidenden Einfluß auf die Wiederfindungsraten der niedrig chlorierten PCDD/F hat. Durch Zugabe von 2 Vol% Dichlormethan in das Elutionsmittel konnten die Wiederfindungsraten z.T. bis zu 20% gesteigert werden. Diese Ergebnisse führten zu modifizierten Aufreinigungsvorschriften, so wie diese unter 7.3 Anhang B (Anhang B-5) beschrieben sind.

Um die Substanzverluste bei der Probenahme und der Aufarbeitung beschreiben zu können, wurde den PCDD/F- und PCB-Proben am Ende der Aufreinigung $^{13}\text{C}_{12}$ 1,2,3,4-TCDD als Wiederfindungsstandard zugegeben.

3.2.2.4 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Für die PAK wurde als Trennungs- und Detektionsmethode in dieser Arbeit eine Kopplung aus HPLC und Fluoreszenzdetektion verwendet (siehe 7.3 Anhang B, Anhang B-2). Diese Methode hat im Vergleich zur Analytik mit HRGC/LRMS den Vorteil, daß für die hier untersuchten Proben keine zusätzliche Aufreinigung nötig war. Aus dem Probenextrakt der Soxhletextraktion wurde 1 Gew% entnommen und mit dem Wiederfindungsstandard (9,10-Dimethylantracen und 6-Methylchrysen) versehen. Als Lauf- und Lösungsmittel wurde Acetonitril verwendet. Die genauen Analysenparameter und eine Beschreibung der Methode findet sich unter 7.3 Anhang B (Anhang B-2) und in der Literatur (179).

3.2.3 Qualitätssicherung und Güte des Datensatzes

Der Qualitätssicherung kommt bei Analysen im Spuren- und Ultraspurenbereich für die Belastbar- und Vergleichbarkeit der Ergebnisse besondere Bedeutung zu. So werden in den nächsten Kapiteln folgende Gesichtspunkte erläutert:

- Kriterien der Quantifizierbarkeit
- Vergleich der PCBz-Konzentration aus naßchemischen Analysen mit der PCBz-Konzentration aus der Thermodesorption
- Wiederfindungsraten
- Blindwerte
- Qualität des Datensatzes (Quantifizierbarkeit und Reproduzierbarkeit)

3.2.3.1 Kriterien der Quantifizierbarkeit

Im folgenden werden die Kriterien für die Quantifizierung der Analyten aufgelistet:

1. Übereinstimmung der relativen Retentionszeiten der Analyten mit Standardmessungen

2. Chlorisotopen- bzw. Kohlenstoffisotopenverhältnisse der untersuchten Substanzen im Bereich von +/- 15 % vom theoretischen Wert
3. Wiederfindungsraten: Die Wiederfindung der untersuchten Substanzklassen soll im Bereich 50 % -120 % liegen (180)
4. Verhältnis Signal zu Rauschen ≥ 3
5. Substanzmenge in der Probe ≥ 3 facher Wert der zugehörigen Blindwertprobe

Falls eines oder mehrere dieser Kriterien nicht erfüllt sein sollte, wurde die Substanz als nicht nachgewiesen betrachtet. Die Konzentrationen wurden mit n.n. in den entsprechenden Tabellen gekennzeichnet (7.4 Anhang C, Anhang C-1).

3.2.3.2 Vergleich der PCBz-Konzentrationen aus naßchemischen Analysen mit PCBz-Konzentrationen aus der Thermodesorption

In einer speziellen Versuchsreihe wurden auf der einen Seite das Kondensat und eine mit Quarzglaswolle gefüllte Kartusche (Partikelanteil) und auf der anderen Seite die mit XAD-2 befüllte Kartusche (Gasphasenanteil) getrennt untersucht. In Tabelle 3.2-2 ist der Partikelanteil für PeCBz, HxCBz und PeCPh für diese isokinetische Probenahme aus dem Rauchgas der SMVA bei 250°C aufgeführt. Die Temperatur der Probenahmen betrug dabei über 120°C. Aus den Ergebnissen wird ersichtlich, daß ein Anteil von weniger als 10 % der Gesamtprobe (Partikel- + Gasphasenanteil) der höher chlorierten PCBz unter diesen Probenahmebedingungen partikulär gebunden vorgefunden wurde.

Tabelle 3.2-2: Partikelanteil von höher chlorierten PCBz und PCPh im Rohgas der SMVA bei circa 250°C

Substanz	Partikelanteil (Kondensat- + Quarzwolleanteil)/ΣGesamtprobe
PeCBz	6
HxCBz	8
PeCPh	13

Die Tabelle 3.2-2 zeigt, daß auch für PeCPh der partikelgebundene Anteil kleiner als 15 % der Gesamtkonzentration ist. Damit ist klar, daß auch für die höher chlorierten PCBz und PCPh bei diesen Probenahmetemperaturen eine isokinetische Probenahme nicht zwingend erforderlich ist, da der Fehler in der Konzentrationsbestimmung durch eine **nicht** isokinetische Probenahme im Bereich des Fehlers bei der Quantifizierung liegt (siehe Kapitel 3.2.2.3 und 3.2.3.5).

Ergänzend wurde die Übereinstimmung der Ergebnisse für die Analysen der Gesamtprobe und der Thermodesorptionsprobe überprüft. Die Abbildung 3.2-2 zeigt einen Vergleich zwischen den

Wiederfindungsraten der isotenmarkierten Standards für TeCBz, PeCBz und HxCBz der Gesamtprobe und den Proben aus der Thermodesorption.

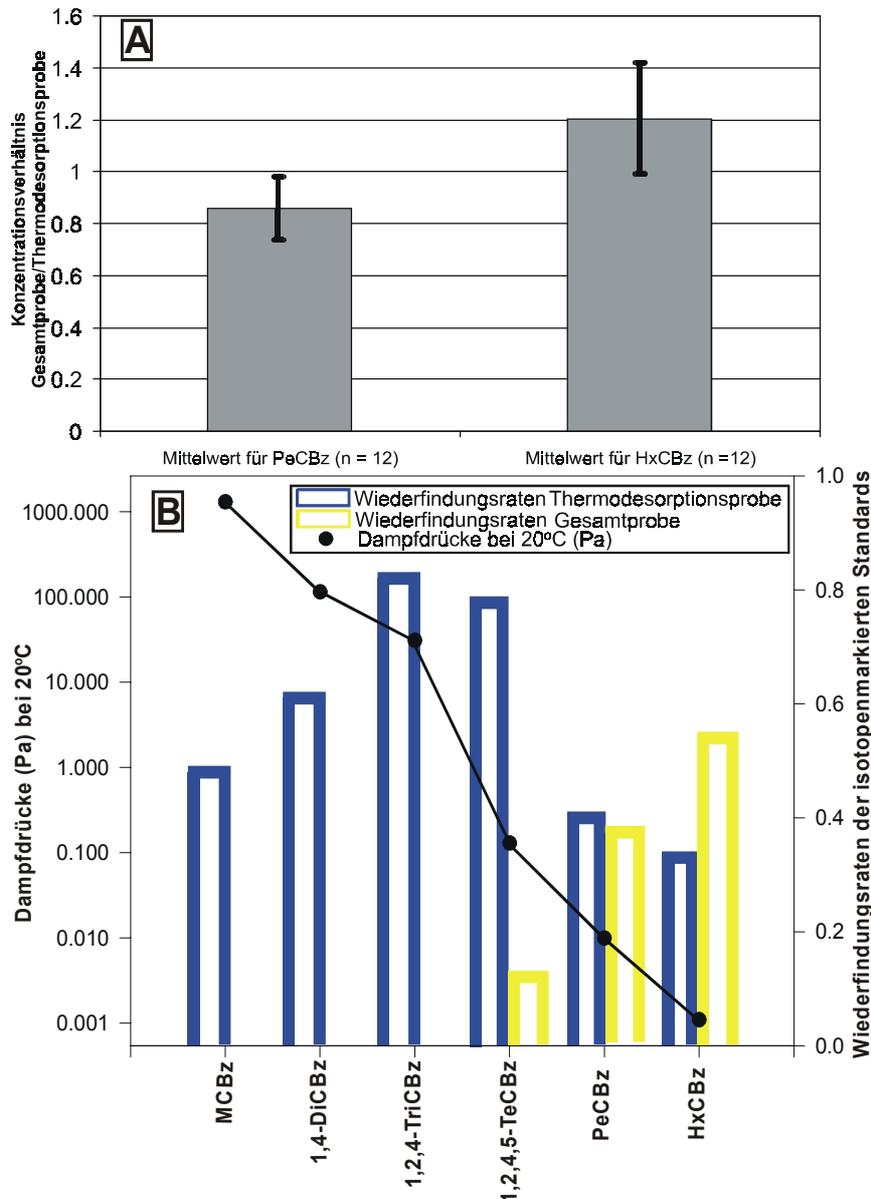


Abbildung 3.2-2: Vergleich zwischen PCBz-Konzentrationen (A) und Wiederfindungsraten (B) der isotenmarkierten Standards für die Gesamt- und Thermodesorptionsproben (n = 12)

Die Abbildung 3.2-2 (A) zeigt, daß die Konzentrationen von HxCBz in der Gesamtprobe um circa 20% höher als die Werte für die Thermodesorptionsprobe liegen. Diese höheren Konzentrationen von HxCBz in der Gesamtprobe sind vermutlich auf dessen im Vergleich zu PeCBz geringere Flüchtigkeit und damit schlechtere Desorbierbarkeit und den auf den Thermodesorptionsröhrchen nicht erfassten partikelgebundenen Anteil zurückzuführen. Schließt man die vorgefundenen Schwankungsbreite der Analytik mit in die Betrachtung ein, welche im Bereich von +/- 20 % liegt, so ist dennoch eine brauchbare Übereinstimmung der Konzentrationen aus beiden Methoden erzielt worden.

In der Abbildung 3.2-2 (B) findet sich ein Vergleich der Wiederfindungsraten für die $^{13}\text{C}_6$ -markierten internen Standards. Nur für HxCBz ist die Wiederfindungsrate der Gesamtprobe höher als die der Thermodesorptionsprobe. Man kann die in der Thermodesorption gefundenen Wiederfindungen der PCBz als Funktion des Dampfdruckes (Punkte in der Abbildung) ansehen: Je schwerer flüchtig eine Verbindung (z. B. HxCBz), desto schwieriger läßt sich diese wieder von der karbonisierten Grundmatrix des Adsorbers desorbieren. Die Thermodesorption zeigt die höchsten Wiederfindungsraten im Bereich von DiCBz bis TeCBz. Für das MCBz nimmt aufgrund des hohen Dampfdruckes die Wiederfindungsrate im Vergleich zu den höheren Chlorierungsgraden der PCBz ab.

Insgesamt können die mit der Thermodesorption gemessenen Konzentrationen als ausreichend sicher und statistisch belastbar angesehen werden. Damit ist eine einfache und schnelle Konzentrationsbestimmung der niedrig chlorierten Benzole aus den Rauchgasen von großtechnischen Verbrennungsprozessen möglich.

3.2.3.3 Wiederfindungsraten

Von der US EPA wird vorgeschlagen, daß die Wiederfindungsraten in der Spurenanalytik für Aromaten und Chloraromaten zwischen 40 % bis 120 % liegen sollten (180). Eine exakte Aussage über die Wiederfindung ist durch Zusatz eines isotoopenmarkierten Standards mit gleicher chemischer Struktur möglich. Die Wiederfindungsrate eines isotoopenmarkierten Standards ist das Verhältnis zwischen diesem Standard mit einem der Probe vor der Detektion zugesetzten weiteren (isotoopenmarkierten) Standard. Da in dieser Arbeit aber nur ein Wiederfindungsstandard pro Substanzklasse verwendet wurde und dieser nicht immer der Substanzklasse selbst angehört hat, kann nur anhand von vorherigen Messungen der Responsefaktoren der isotoopenmarkierten Standards eine Wiederfindungsrate angegeben werden. Die Tabelle 3.2-3 zeigt die Wiederfindungsraten für die untersuchten Substanzklassen angegeben. Die zur Bestimmung der Wiederfindungsraten eingesetzten Standards aller Substanzklassen finden sich unter 7.3 Anhang B (Anhang B-3).

Tabelle 3.2-3: Wiederfindungsraten für Chloraromaten (n (PCDD/F) = 104; n (PCB) = 98; n (PCBz) = 98; n (PCPh) = 51; n (BTX) = 42; n (PAK) = 23)

Analyt	Isotopenmarkierte interne Standards	Wiederfindungsrate (%)
PCDD/F	DiCDD - OCDD; TriCDF – OCDF	45 - 132
PCB	MCB - DCB	41 - 96
PCBz	MCBz - HxCBz	37 - 85
PCPh	MCPPh - PeCPh	35 - 78
BTX	Benzol, Toluol, Naphthalin, <i>p</i> -Xylol	22 - 72
PAK	6-Methylchrysen	41 - 62

Die Wiederfindungsraten der untersuchten Substanzen in der Tabelle 3.2-3 liegen im Bereich der von der *US-EPA* vorgeschlagenen Größenordnung. Einige Ausnahmen und generelle Tendenzen werden im folgendem Abschnitt diskutiert.

Für die Probenahmestandards der PCDD/F lagen die Wiederfindungsraten nahe 100% und häufig sogar über 100%. Für die Berechnung der Wiederfindungsraten sind Responsefaktoren nötig, die sich als über die Zeit nicht konstant erwiesen haben. Im allgemeinen lagen die Wiederfindungsraten für leichter flüchtige (z.B. niedrig chlorierte) Verbindungen niedriger als für schwerer flüchtige. Auch für siebenfach und höher chlorierte Aromaten waren die Wiederfindung geringer, da diese Substanzen aufgrund ihrer physikalisch-chemischen Eigenschaften eine hohe Adsorption an dem verwendeten Labormaterial (Glasgeräte und Adsorbentien) zeigten.

Die Ausbeute der für die PCPh durchgeführte Acetylierungsreaktion ist nicht für alle Isomeren eines Chlorierungsgrades gleich hoch, weshalb auch hier die angegebene Wiederfindung nur für das jeweilige isotopenmarkierte Isomer des Standards gilt.

Der Einsatz von internen Standards (z.B. methyliertes Chrysen) für die PAK-Analytik mittels HPLC ist umstritten, da deren chemisches Verhalten bei der Probenvorbereitung oftmals nicht mit dem der unsubstituierten PAK übereinstimmt. (181).

3.2.3.4 Blindwerte

Um zu zeigen, daß keine nennenswerten, das Meßergebnis verfälschenden Kontaminationen der Probenahme, Glasgeräte, Adsorbentien, etc. aus dem Laborbereich vorliegen, wurde zu jeder Meßkampagne und zu jeder Substanzklasse mindestens ein Blindwert aufgearbeitet. Nur in den Proben an der PVA war der Blindwert für zwei der drei DiCBz-Isomeren so hoch, daß diese in der Auswertung der Daten nicht berücksichtigt werden konnten. Aus dem gleichen Grund konnten auch zwei Chlorphenolisomere an der PVA nicht ausgewertet werden (siehe Anhang 7.4 Anhang C, Anhang C-1).

Bei allen übrigen Proben führte das Kriterium aus 3.2.3.1 Meßwert \geq 3-facher Blindwert zu keinem Ausschluß von Daten bei der Auswertung.

3.2.3.5 Qualität des Datensatzes (Quantifizierbarkeit und Reproduzierbarkeit)

Zur Abschätzung der Qualität des Datensatzes werden in der Tabelle 3.2-4 die Anteile der nicht quantifizierbaren Werte aller Analysedaten für die jeweilige Substanzklasse angegeben.

Tabelle 3.2-4: Prozentanteil der nicht quantifizierbaren Werte für jede Substanzklasse

Substanzklasse	Anteil der nicht quantifizierbaren Werte (%)
PCDD/F	4,3
PCB	4,7
PCBz	2,1
PCPh	3,2
BTX	1,5
PAK	2,5

Der höhere Anteil der nicht quantifizierbaren PCB- und PCDD/F-Werte in der Tabelle 3.2-4 läßt sich vor allem auf den um eine Größenordnung niedrigeren Konzentrationsbereich dieser Substanzklassen in den Proben erklären. Das Signal/Rauschverhältnis wird mit abnehmenden Konzentrationen der Verbindungen kleiner, so daß eine sichere Quantifizierung immer schwieriger wird.

Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse der Analysen bezieht sich sowohl auf die Probenaufreinigung als auch auf die Analyse selbst. Die Reproduzierbarkeit der Probenahme kann nicht beurteilt werden, da Anlagen niemals unter ständig gleichbleibenden Betriebsbedingungen arbeiten können. Um einen Eindruck über die Reproduzierbarkeit von Probenahme und Analytik zu erhalten, sind in der Abbildung 3.2-3 die Ergebnisse dieser Arbeit mit denjenigen eines unabhängigen, akkreditierten Prüfinstitut von zeitgleich entnommenen Proben an der MVA verglichen.

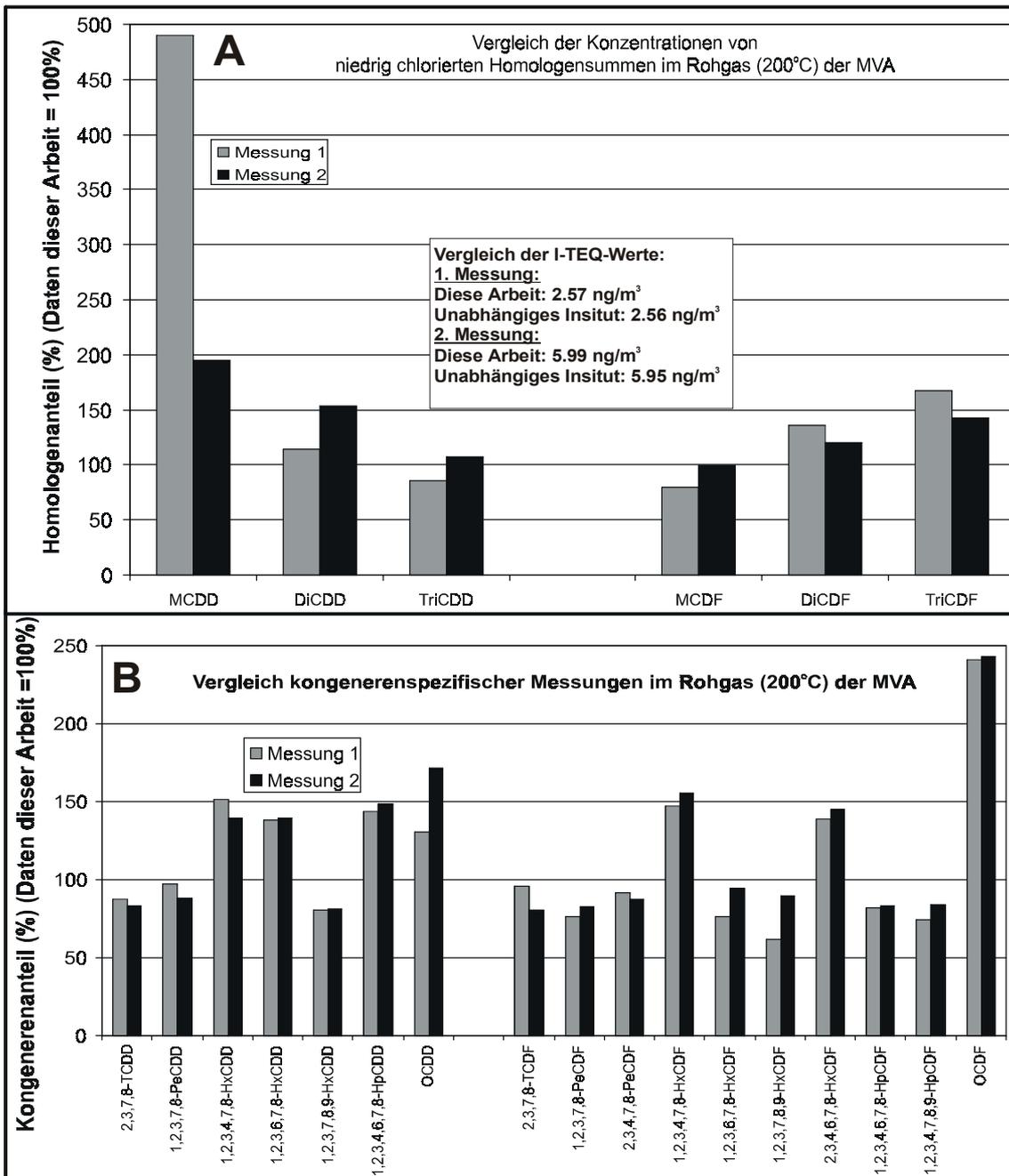


Abbildung 3.2-3: Vergleich der Ergebnisse dieser Arbeit mit denjenigen eines unabhängigen, akkreditierten Prüfinstitutes von zeitgleich entnommenen Proben im Rohgas (200°C) der MVA

Die Übereinstimmung der niedrig chlorierten Homologenkonzentrationen und der I-TEQ Werte in der Abbildung 3.2-3 (A) ist als zufriedenstellend anzusehen. Die Abweichungen der Konzentrationen für die einzelnen 2,3,7,8-substituierten Kongeneren liegt vor allem für die höher chlorierten Kongeneren z.T. im Bereich von mehr als 50 %. Diese Abweichungen sind vor allem durch die kongenerenspezifische Analytik der PCDD/F erklärbar. Im Vergleich zu dem zertifizierten Analysenlabor wurde in dieser Arbeit nicht mit einer DB Dioxin-Säule gearbeitet, sondern mit einer RTX 2330, um die Anzahl der analytisch trennbaren PCDD/F-Kongeneren zu erhöhen. Diese Säule weist im Bereich der sieben- und achtfach chlorierten Kongeneren in der

Regel eine schlechteren Response als die DB Dioxin auf, weshalb sich die Analysewerte dieser Kongeneren am stärksten von denjenigen des externen Labors unterscheiden.

Ein weiterer wichtiger Unterschied zwischen beiden Messungen besteht in der Quantifizierung des 1,2,3,7,8,9-HxCDD. Dieses Isomer wurde in der hier vorgestellten Arbeit nicht gegen einen Einzelstandard sondern gegen den Mittelwert der zwei übrigen 2,3,7,8-substituierten Einzelstandards vermessen. Insgesamt kann die Vergleichbarkeit der Ergebnisse über den gesamten Bereich der Probenahme und Analytik trotz der Unterschiede von 20-40 % (mit Ausnahme der OCDD/F) als sehr zufriedenstellend angesehen werden und es kann von einer ausreichenden Genauigkeit der Ergebnisse ausgegangen werden.

Wurde eine Probe dreimal hintereinander aufgearbeitet, ergaben sich Konzentrationsabweichungen für einzelne Homologenkonzentrationen von bis zu +/- 25 %. Dieser Wert liegt höher als die Abweichungen, die für ein mehrmaliges Vermessen der gleichen Proben mit HRGC/HRMS gefunden wurden (+/-15 %). Dennoch können die für die Reproduzierbarkeit der Aufarbeitung gefundenen Ergebnisse als gut eingestuft werden, da sich diese etwa im Bereich der Reproduzierbarkeit der HRGC/HRMS-Analysen bewegen (182).

Die Qualität des erhobenen Datensatzes ist für den untersuchten Konzentrationsbereich als ausreichend für die statistische Auswertung anzusehen.

3.3 Resonanzverstärkte Mehrphotonenionisation und Flugzeitmassenspektrometrie (REMPI-TOFMS) und deren Anwendung in der Müllverbrennung

In diesem Kapitel soll die für diese Anwendung relativ neue Analysetechnik der Lasermassenspektrometrie näher vorgestellt werden. In der Literatur sind zu diesem Thema eine Reihe von Arbeiten zu finden, die einen tiefergehenden Einblick in die Methodik vermitteln können (13), (14), (23), (183), (184), (185).

3.3.1 Kurze Einführung in das Prinzip von Mehrphotonenionisation und Flugzeitmassenspektrometrie

Die resonanzverstärkte Mehrphotonenionisation (*Resonance Enhanced Multiphoton Ionization* = REMPI) gekoppelt mit der Flugzeitmassenspektrometrie (*Time of Flight Mass Spectrometry* TOFMS) stellt eine zweidimensionale Analyseverfahren dar. Die erste Dimension ist die Wellenlänge des eingestrahnten Laserlichts und die zweite Dimension die Masse des ionisierten Moleküls. Stimmt die Photonenenergie (d.h. die Laserwellenlänge) mit der Anregungsenergie eines Molekülzustandes überein, absorbieren die Moleküle sehr effizient Photonen. Dabei werden die Moleküle elektronisch angeregt. Dieser Prozeß wird als Resonanzabsorption bezeichnet. Wenn das angeregte Molekül ein zweites Photon absorbiert und die Gesamtenergie beider Photonen größer als die Ionisierungsenergie ist, findet eine Ionisierung des Moleküls statt. Das Schema dieser 1+1 Zweiphotonenionisation ist in Abbildung 3.3-1 dargestellt. Der S_1 -Zustand des Moleküls muß für ein Einfarbenexperiment (eine festfrequente Wellenlänge des Lasers) größer oder gleich der Hälfte des Ionisationspotentials sein. Die im REMPI-Prozeß gebildeten Ionen werden mit Flugzeitmassenspektrometrie detektiert.

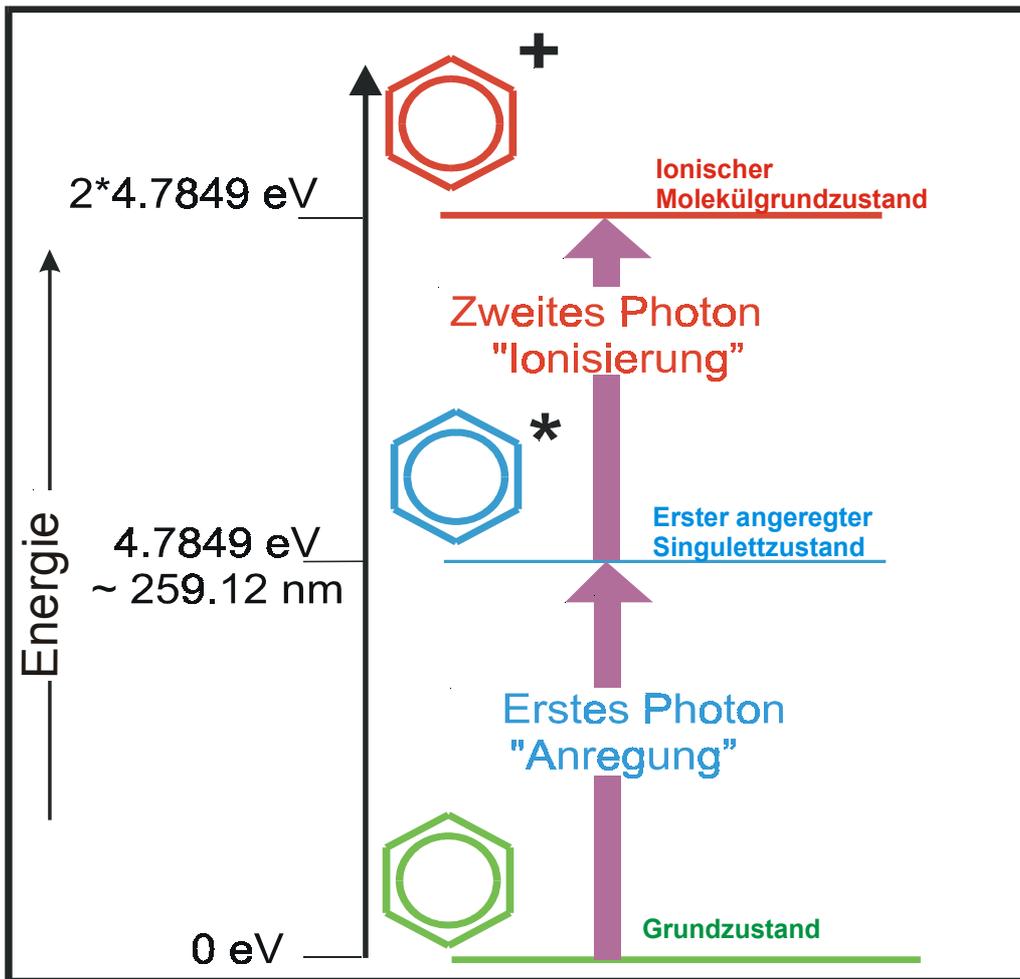


Abbildung 3.3-1: Schema der REMPI-Ionisation am Beispiel von Benzol (aus: (14))

Im Vergleich mit der konventionellen Elektronenstoßionisation hat der REMPI-Prozeß drei große Vorteile:

1. Selektive Ionisation von Substanzklassen (186)
2. Fragmentarme Ionisation von Substanzklassen (186), (187)
3. Effizienter Ionisationsprozeß mit Ionenausbeuten im Bereich von einigen Prozent (188)

Durch eine auf die Ionisation der jeweilige Substanzklassen abgestimmte Laserwellenlänge (Selektivität) erfolgt diese fragmentfrei oder zumindest sehr fragmentarm. Die im Vergleich dazu hohen zugeführten Energien bei der Elektronenstoßionisation von 60-70 eV führen zu einer starken Fragmentation der Moleküle durch die über das Ionisierungspotential hinaus zugeführte Exzeßenergie. Die Effizienz des REMPI-Prozesses ist aufgrund der Selektivität im Bereich von einigen Prozent angesiedelt, so zeigt z.B. Benzol Ionenausbeuten von etwa 3 % (188).

In der hier vorgestellten Arbeit wurde mit einer Pulsbreite des verwendeten Lasers im Bereich von Nanosekunden und einer Pulsleistung von $< 0.9 \cdot 10^7 \text{ W/cm}^2$ gearbeitet.

Als schneller massenselektiver Detektor wird die scanfreie Methode der Flugzeitmassenspektrometrie verwendet. Dabei ist die Flugzeit (t) der Ionen proportional zur Quadratwurzel der Ionenmasse.

$$t = L \cdot (m/2qV)^{1/2}$$

mit: L = Flugstrecke; q = Ladungszahl der Ionen; V = angelegtes Potential

Die Flugzeit der Ionen liegt für die hier durchgeführten Experimente zwischen 10-30 μ s.

3.3.2 Spektroskopische Eigenschaften der untersuchten Substanzen im UV-Bereich und praktische Durchführung des REMPI-Experimentes an großtechnischen Feuerungsanlagen

Die REMPI-Eigenschaften eines Moleküls hängen sehr stark von seinen chromophoren Eigenschaften ab. Im Jablonski-Diagramm werden einige photophysikalische Reaktionen für die Absorption von UV-Licht (1. Photon des REMPI Prozesses) für ein Zweifarbenexperiment schematisch dargestellt.

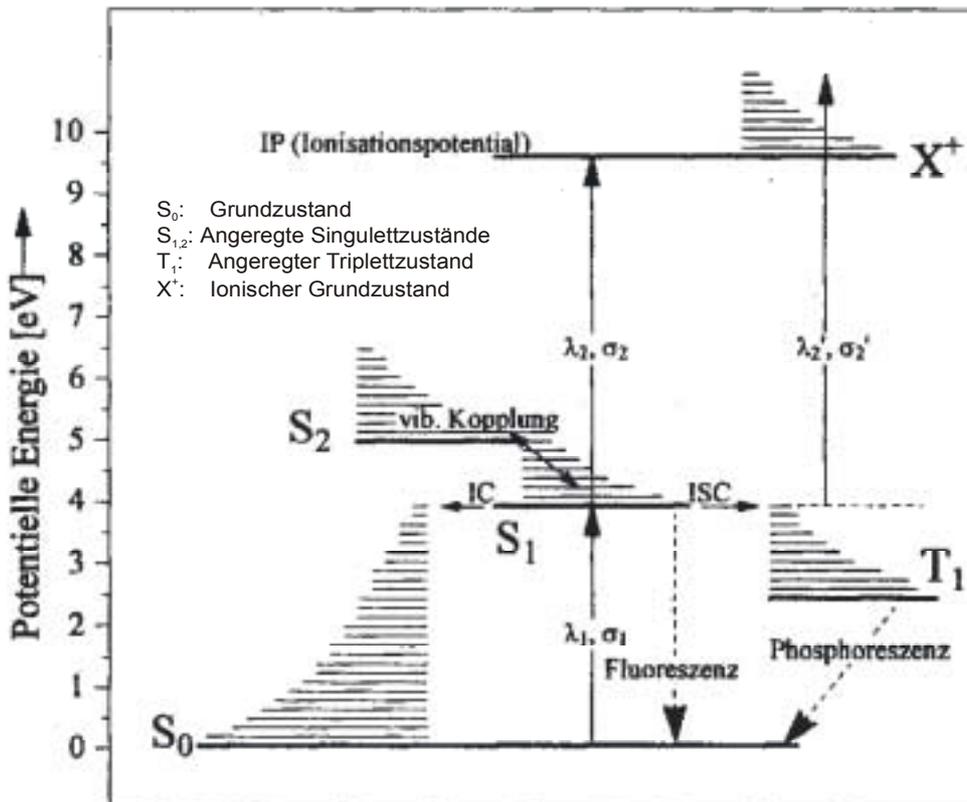


Abbildung 3.3-2: Modifiziertes Jablonski-Diagramm für ein Zweifarbenexperiment (Erläuterungen siehe Text, aus: (13))

Das Jablonski-Diagramm in Abbildung 3.3-2 zeigt für das durch die Photonen angeregte Molekül zwei Möglichkeiten die Energie abzugeben: 1. Fluoreszenz aus dem angeregten S_1 -Zustand und 2. Phosphoreszenz aus dem angeregten T_1 -Zustand. Moleküle, die in hohem Maße ihre Energie aus dem S_1 -Zustand in Form von Fluoreszenz abgeben können bzw. sich in dieser Weise anregen lassen, sind gut für den REMPI-Prozeß geeignet. Dies liegt darin begründet, daß die Ionisation des im S_1 -Zustands befindlichen Moleküls mit einem weiteren Photon im Nanosekundenbereich erfolgen kann, da die Lebensdauer eines Moleküls im S_1 -Zustand, welches durch Fluoreszenz in den Grundzustand zurückkehren kann, im Bereich mehrerer Nanosekunden liegt.

Die Prozesse von *internal crossing* (IC) und *inter system crossing* (ISC) führen gemäß des Jablonski-Diagramms in der Abbildung 3.3-2 zu einer Reduzierung der Anzahl der Moleküle im angeregten Zustand und damit zu einer Verminderung der Effizienz des REMPI-Prozesses. Mit Zunahme der Chlorsubstitution an den Aromaten nimmt die Wahrscheinlichkeit für einen ISC-Übergang in den verbotenen (Pauli-Verbot) langlebigen Tripletzustand zu.

Die Überlappungen der vibratorischen Feinstrukturen, bzw. die Geometrie von deren Potentialkurven, schlägt sich im sog. Franck-Condon Prinzip wieder (189). Die Schwingungswellenfunktion des vibratorisch hoch angeregten T_1 -Zustands zeigt nur einen geringen Überlapp mit der Nullpunktsschwingungswellenfunktion des ionischen X^+ -Zustandes (geringer Franck-Condon Überlapp). Als Folge davon ist eine größere Energie für den Übergang $T_1 \leftarrow X^+$ als bei $S_1 \leftarrow X^+$ nötig ist. Für die Effektivität des REMPI-Prozesses sind also nicht nur die Gesamtintensitäten der elektronischen Übergänge, sondern auch die photophysikalischen Eigenschaften der angeregten Zustände entscheidend. Durch die molekülspezifischen Parameter von Chloraromaten wird mit zunehmender Chlorsubstitution die Energie für das für die Ionisation nötige Photon größer und damit ein sog. Zweifarbenexperiment erforderlich (siehe Abbildung 3.3-2; $\lambda_1, \sigma_1 \ll \lambda_2, \sigma_2$; (190), (191)). Dabei werden zwei verschiedene Wellenlängen in die Ionenquelle eingestrahlt, um die Wahrscheinlichkeit des $X^+ \leftarrow T_1$ Übergangs zu erhöhen.

Ein solcher Aufbau ist für Feldanwendungen nicht praktikabel, weshalb in dieser Arbeit auf ein indirektes On-line-Monitoring der PCDD/F zurückgegriffen wurde (siehe Kapitel 3.3.3).

Es wurde gezeigt, daß das Ionisationspotential der Kongeneren der PCBz annähernd konstant bleibt und nur das Energieniveau für den S_1 -Zustand absinkt, wodurch ein Zweifarbenexperiment mit steigender Chlorierung nötig wird (192), (187), (13). Für Monochlorbenzol (MCBz) liegt der S_1 -Zustand noch über der Hälfte des Ionisierungspotentials, so daß ein Einfarbenexperiment zur Ionisation möglich ist. In Abbildung 3.3-3 sind zwei REMPI-Spektren von MCBz dargestellt, welche mit einem abstimmbaren Farbstofflaser aufgenommen wurden. Die Spektren zeigen den $S_1 \leftarrow S_0$ Übergang dieser Verbindung.

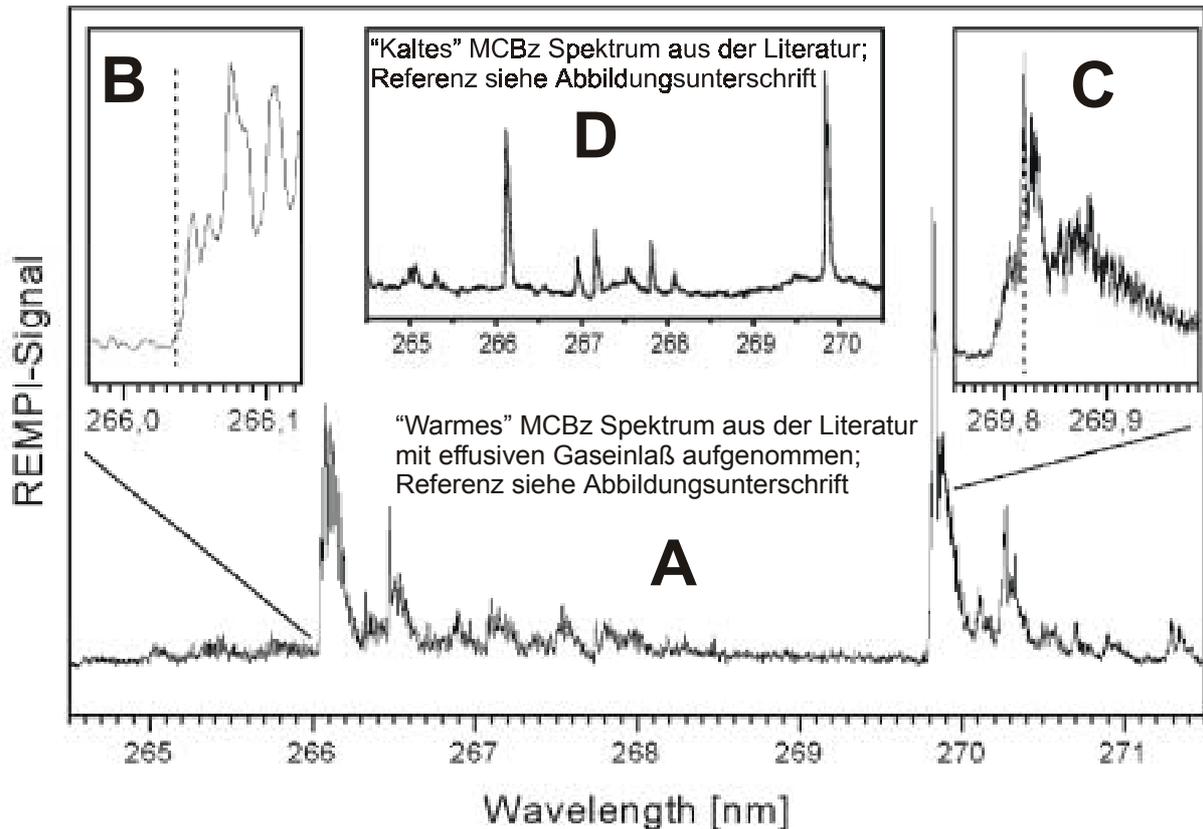


Abbildung 3.3-3: REMPI-Spektren von Monochlorbenzol mit effusivem („warmem“) Gaseinlaß aus (14), (193) (Inserts A,B,C) und mit („kaltem“) Jet-Molekularstrahleinlaß aus (194) (Insert D)

Das Spektrum von MCBz in der Abbildung 3.3-3 weist eine sehr scharfe Struktur auf, was auf die bei Raumtemperatur im Vergleich zu den PAK kleine Anzahl von Schwingungszuständen des Moleküls zurückzuführen ist. Das Maximum des $S_1 \leftarrow S_0$ Übergangs liegt bei 269,82 nm (vibrationsloser O_0^0 Übergang) und diese Wellenlänge wurde deshalb auch für das On-line-Monitoring von MCBz verwendet. Das Spektrum im Insert D in der Abbildung 3.3-3 ist aus der Literatur entnommen und zeigt eine ähnliche Feinstruktur wie die des „warmen“ Spektrums mit einem effusiven Einlaß (194).

Für viele aromatische Verbindungen erweist sich ein Einfarbenexperiment im REMPI-Prozeß als leicht durchführbar. Für einkernige Aromaten (BTX) besitzt der Übergang von $S_1 \leftarrow S_0$ (bei PAK der $S_n \leftarrow S_0$ Übergang) eine relativ hohe Lebensdauer, weshalb eine Ionisation wahrscheinlicher wird. Die interne Rotation einer Methylgruppe, z.B. bei methylierten Aromaten, führt zu einer Verbreiterung der Banden im Spektrum (195).

Für höher kondensierte aromatische Systeme gilt, daß das Energieniveau sowohl des S_1 -Zustandes als auch des Ionisationspotentials (IP) absinkt. Ebenso liegt der S_1 -Zustand dieser Verbindungen relativ zum IP niedriger als bei Benzol. Energetisch höher gelegene angeregte Molekülzustände weisen bei PAK mit mehr als drei Benzolringen eine dichte Vibrationsstruktur auf. Zusätzlich zeigen diese Moleküle bei Raumtemperatur eine starke Rotationsstruktur, was neben

den Vibrationszuständen die Absorptionsbanden breiter werden läßt (14). Aus den breiten Absorptionsbanden der PAK ergibt sich der in dieser Arbeit verwendete UV-Wellenbereich zur Laserionisation von 248- 270 nm, welcher es ermöglicht, alle hier untersuchten PAK und BTX substanzklassenspezifisch zu ionisieren.

Wenn eine substanzspezifische Ionisation gewünscht wird, ist eine Kühlung des Molekülstrahls mit Hilfe spezieller Düsen („Jet-Einlaß“) nötig, um die Rotationsstruktur der jeweiligen Verbindung auszuschalten (196), (14).

In Abbildung 3.3-4 ist der Aufbau eines REMPI-TOFMS Instruments schematisch dargestellt

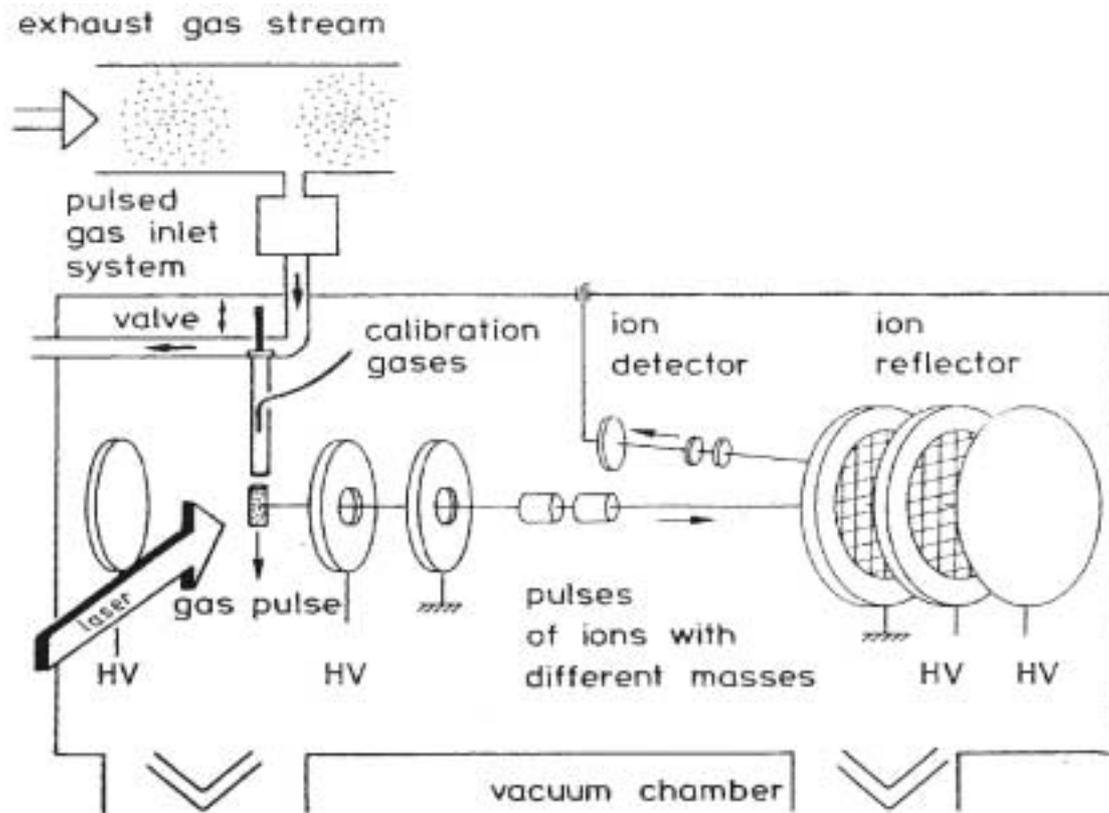


Abbildung 3.3-4: Schematischer Aufbau eines REMPI-TOFMS Instruments (aus: (197))

Wie in der Abbildung 3.3-4 gezeigt, wird der zu analysierende Gasstrahl in Abhängigkeit der untersuchten Substanzklassen entweder mit einem Überschallmolekularstrahl- oder mit einem Effusiveinlaß in das REMPI-TOFMS System eingelassen. Die Ionisation der Zielsubstanzen erfolgt mit dem Laser. Im Anschluß daran werden die gebildeten Ionen im TOFMS detektiert und die Massen der Verbindungen über die Flugzeiten errechnet.

Im folgenden Abschnitt wird der an großtechnischen Feuerungsanlagen verwendete REMPI-TOFMS Aufbau vorgestellt. Detaillierte Beschreibungen dieses Aufbaus finden sich in der Literatur (14), (198), (199).

Ein REMPI-TOFMS Aufbau an großtechnischen Anlagen muß zwei Kriterien erfüllen:

1. **Robustheit**

2. **Mobilität**

Das erste Kriterium wurde durch einen vergleichsweise einfachen Laser-, Einlaß- und TOFMS-Aufbau erfüllt. So kamen bei der *on-line* Überwachung im wesentlichen robuste festfrequente Nd:YAG- (4. Harmonische bei 266 nm) oder KrF-Excimer (248 nm) Laser zum Einsatz. Zum Nachweis von chlorierten Verbindungen, z.B. MCBz, ist allerdings der Einsatz eines durchstimmbaren Farbstofflasers (Farbstoff: Coumarin 153) mit nichtlinearen Frequenzverdopplern und einem Nd:YAG Laser als Pumplaser (355 nm) nötig.

Der massenselektive Detektor sollte möglichst klein konzipiert werden, um die Mobilität des Gesamtsystems zu gewährleisten. Für Flugzeitmassenspektrometer gibt es prinzipiell zwei mögliche Bauweisen, nämlich einen linearen oder einen reflekttronischen Aufbau. In der linearen Bauweise werden Ionenquelle und Multiplier auf eine Ebene gelegt, wohingegen im reflekttronischen Aufbau der Ortsfokus durch einen Ionenspiegel auf den Detektor abgebildet wird. Im allgemeinen zeigt ein lineares TOF eine höhere Transmission und damit größere Peakflächen, als ein TOF im reflekttronischen Aufbau. Der Reflekttronaufbau hat v.a. den Vorteil einer höheren Massenauflösung bei einer besseren Kompensation von hohen Ionendichten. Für die Messungen in der hier vorgestellten Arbeit wurden beide Arten des TOFMS-Aufbaus eingesetzt.

Das Einlaßsystem für das zu untersuchende Rauchgas darf keine Retentions- und Adsorptionseffekte für die Analyten aufweisen. Um die Blindwerte der Probenahme möglichst gering zu halten, wurde mit einer beheizten (300°C) Probenahme aus Quarzglas gearbeitet. Der Gaseinlaß wurde mit einem effusiven, nicht gekühlten Molekularstrahl realisiert, da sich dieses System bezüglich der Robustheit am geeignetsten herausgestellt hat (23), (184).

Die Quantifizierung der Zielsubstanzen erfolgte durch externe Kalibrierung des REMPI-TOFMS Instruments mit Hilfe von selbst hergestellten Permeations- und Diffusionsstandards. Bei konstanter Temperatur und konstantem Konzentrationsgradient ist die Diffusionsrate einer Substanz durch eine semipermeable Membran konstant. Aufgrund dieser konstanten Diffusionsraten sind auch die Konzentrationen der untersuchten Verbindungen in der Gasphase bekannt. Vor jeder REMPI-TOFMS Messung wurde eine Kalibration des Instrumentes mit Hilfe der Permeationsstandards durchgeführt.

3.3.3 Das Leitparameterkonzept - Indirekter Nachweis der PCDD/F mittels Surrogatverbindungen

Im vorangegangenen Abschnitt wurde dargestellt, daß wegen des hohen spektroskopischen Aufwandes (Zweifarbexperiment) und der großen Anzahl der Kongeneren ein direktes On-line-Monitoring der PCDD/F und des I-TEQ Wertes an großtechnischen Feuerungsanlagen mit REMPI-TOFMS wenn überhaupt, dann nur mit sehr großem Aufwand möglich ist (14), (200).

Deshalb wurde versucht, wie dies im Kapitel 4.1 vorgestellt werden wird, ein mit REMPI-TOFMS meßbares „Stellvertretermolekül“ (Surrogat) für die Emissionen der PCDD/F und für die Toxizität dieser Verbindungen zu finden. Die Messung von Surrogaten mit unterschiedlichen *off-line* Techniken wurde mit Kopplungen von HPLC/MS oder GC/MS bereits realisiert (201), (202), (203), (204), (205).

Bereits 1986 wurde Monochlorbenzol (MCBz) als Surrogat für die Chloraromatenemission in Verbrennungsprozessen vorgeschlagen (206). Aus der Literatur ist zudem bekannt, daß ein statistischer Zusammenhang zwischen Emissionen von TCDD und HxCBz im Reingas von Hausmüllverbrennungsanlagen besteht (207). Ein ähnlicher Zusammenhang wurde für die Gesamtkonzentration der PCDD/F und HxCBz gefunden und es wurde vorgeschlagen, HxCBz als Indikator oder (Leit-)„Parameter“ für die PCDD/F-Konzentration zu verwenden (208). Allerdings ist in diesem Zusammenhang der Begriff (Leit-)„Parameter“ für die Konzentration einer Verbindung irreführend, da es sich nicht um eine unbekannte Konstante in einer Gleichung oder einem Modell handelt.

In den folgenden Jahren wurden weitere statistische Zusammenhänge zwischen niedrig chlorierten PCBz, PCPh und PCB und dem I-TEQ Wert der PCDD/F etabliert (209), (210). Diese Korrelationen wurden für unterschiedliche Anlagen sowohl im Rohgas als auch im Reingas gefunden. Etwa zur gleichen Zeit wurde gezeigt, daß zwischen den Konzentrationen der Chloraliphaten (z.B. Trichlorethylen) und der PCDD/F im Rohgas an großtechnischen Anlagen ebenfalls ein statistischer Zusammenhang besteht (211). In einer Vielzahl von Arbeiten wurden Leitbeziehungen zwischen den PCDD/F-Konzentrationen bzw. den I-TEQ Wert und folgenden Verbindungen bestätigt bzw. neu etabliert: PCBz (212), (213), PCPh (214), 2,3,4,7,8-PeCDF (215), PCN (216).

Für das REMPI-TOFMS On-line-Monitoring sind vor allem die Untersuchungen von großer Bedeutung, in denen niedrig chlorierte Verbindungen als Surrogate identifiziert wurden, wie z.B. niedrig chlorierte PCDD/F (217). Da die niedrig chlorierten PCDD/F für das REMPI-TOFMS Monitoring ungünstige spektroskopische Eigenschaften aufweisen (siehe auch Tabelle 3.3-1), werden in der hier vorgestellten Arbeit vor allem die Surrogateigenschaften der niedrig chlorierten PCBz und PCPh untersucht (169), (200).

Für das REMPI-TOFMS On-line-Monitoring einer Surrogatverbindung sind eine Reihe von Moleküleigenschaften und weiteren Parametern von großer Bedeutung, die sich im wesentlichen in sechs Punkte gliedern lassen:

- 1) Die Möglichkeit eines Einfarben-REMPI-Nachweises im S_1 -Bereich (ja = +, nein = -, in Tabelle 3.3-1). Ein Einfarben-REMPI-Ionisationsschema erleichtert die Anwendbarkeit des REMPI-TOFMS Verfahrens sehr stark. Außerdem treten bei Mehrfarben-REMPI-Ionisationsschemata häufig Selektivitätsprobleme auf (Ionisation von mehreren Verbindungsklassen durch die kürzere Laserwellenlänge).

2) Das Vorkommen von orthoständigen Chlorsubstitutionen (verringern die REMPI-Nachweisempfindlichkeit, daher: ja = -, nein = +, in Tabelle 3.3-1). Spektroskopische Untersuchungen an chlorierten **Benzolen** zeigen ein vermehrtes Auftreten niederfrequenter vibronischer Moden im REMPI-Spektrum und eine verringerte Ionisationseffizienz bei benachbarten Chlorsubstituenten (13).

3) Das Vorkommen von orthoständigen Sauerstoff- und Chlorsubstitutionen (stören REMPI-Nachweis, daher: ja = -, nein = +, in Tabelle 3.3-1). Spektroskopische Untersuchungen an chlorierten **Dibenzo-p-dioxinen** zeigen eine starke Verringerung der Ionisationseffizienz und Verbreiterung der vibronischen Struktur, wenn eine Chlorierung in Nachbarschaft zum Sauerstoff erfolgt (z.B. in der 1-Position) (218).

4) Masseninterferenz mit PAK (daher: ja = -, nein = +, in Tabelle 3.3-1). Im Wellenlängenbereich 330-250 nm, in dem die S_1 -Übergänge der hier untersuchten I-TEQ Surrogate liegen, liegen auch höhere Zustände mehrkerniger PAK. Eine direkte Masseninterferenz zwischen einer Surrogatverbindung und einem prominenten PAK führt daher zwangsläufig zu Selektivitätsproblemen.

5) Chlorierungsgrad (Chlorsubstituenten verringern REMPI-Nachweisempfindlichkeit, diese fällt pro Chlorsubstituent um etwa eine Größenordnung (daher: Chlorierungsgrad ≤ 2 = +, Chlorierungsgrad > 2 = -, in Tabelle 3.3-1). Die Chlorsubstitution führt zu einer Verstärkung der Spin-Bahn-Wechselwirkung und damit zu spinverbotenen, strahlungslosen Übergängen (*inter system crossing*), welche die Anregung des Zwischenzustands quenchen und damit die Ionisationseffizienz reduzieren (197).

6) Das Vorhandensein von REMPI-spektroskopischen Informationen (daher: ja = +, nein = -, in Tabelle 3.3-1).

Diese sechs Punkte werden in der Tabelle 3.3-1 zusammengefaßt.

Tabelle 3.3-1: Auswahl möglicher niedrig chlorierter Surrogate für den I-TEQ Wert der PCDD/F mit entsprechenden REMPI-Eigenschaften (aus: (200))

<i>Mögliche Leitverbindung</i>	<i>Einfarben-REMPI möglich</i>	<i>Kein Cl – Cl in ortho-Position</i>	<i>Kein Cl-O in ortho-Position</i>	<i>Keine Masseninterferenz (PAK)</i>	<i>Niedriger Chlorierungsgrad</i>	<i>REMPI Spektrum vorhanden</i>
MCBz	+	+	+	+	+	+
1,2-DiCBz	+	-	+	+	+	+
1,4-DiCBz	+	+	+	+	+	-
1,2,3-TriCBz	-	-	+	+	-	+
1,2,3,4-TetraCBz	-	-	+	+	-	+
PeCBz	-	-	+	+	-	-
HxCBz	-	-	+		-	-
2,4-DiCPh	+	+	-	+	+	+
2,4,6-TriCPh	+	+	-	+	-	-
2,3,4-TriCPh	+	-	-	+	-	-
2,3,5,6-TetraCPh	?	-	-	+	-	-
2,3,4,6-TetraCPh	?	-	-	+	-	-
PeCPh	-	-	-		-	-
1,3DiCDD	(-)	+	-	- (252 m/z)	+	
1,7,8-TriCDD	(-)	-	-		-	-
1,2,3-TriCDD	(-)	-	-		-	-
1,4,7-TriCDD	(-)	+	-		-	-
1,2,9-TriCDD	(-)	-	-		-	-
1,4,6-TriCDD	(-)	+	-		-	-
1,2,6-TriCDD	(-)	-	-		-	-
1-MCDF	?	+	+	- (202 m/z)	+	-
2,4,6-TriCDF	-	+	-		-	-

Neben den in Tabelle 3.3-1 zusammengefaßten REMPI-Eigenschaften von chlorierten Aromaten finden sich weitere Grundlagen über die REMPI-Spektroskopie dieser Verbindungen in der Literatur (41, 190, 197, 218, 219, 220).

Am Beginn dieser Arbeit lagen keinerlei Meßwerte vor, die über eine statistische Beziehung von niedrig chlorierten Aromaten mit dem I-TEQ der PCDD/F Auskunft geben konnten. So ist die Motivation dieser Arbeit vor allem durch die Suche nach mit REMPI-TOFMS meßbaren Surrogaten für den I-TEQ Wert der PCDD/F im Rauchgas von Verbrennungsanlagen gegeben (Kapitel 4.1). Aus den dabei gewonnenen statistischen Zusammenhängen der untersuchten Verbindungen lassen sich eine Reihe neuer Erkenntnisse für die Chloraromatenbildung an großtechnischen Feuerungsanlagen ableiten (Kapitel 4.3 und 4.4).

3.4 Methoden zur Interpretation des Datensatzes

Zur Interpretation der Daten wurden zwei Methoden, eine statistische und eine quantenchemische, verwendet, die im folgenden mit einer kurzen Einführung vorgestellt werden.

3.4.1 Multivariate Statistik - Hauptkomponentenanalyse

Um statistische Zusammenhänge innerhalb der Substanzklassen in Abhängigkeit von den Anlagenbedingungen aufzudecken, wurde ein Verfahren aus der multivariaten Statistik eingesetzt. Das hier verwendete varianzanalytische Verfahren ist die sogenannte Hauptkomponentenanalyse (HKA), die im wesentlichen zwei Ziele verfolgt (221):

- Aufzeigen von Beziehungen innerhalb der untersuchten Variablen
- Konzentrierung der im Datensatz enthaltenen Information durch die erzeugten Hauptkomponenten

In der Abbildung 3.4-1 ist das Verfahren der HKA schematisch dargestellt (222).

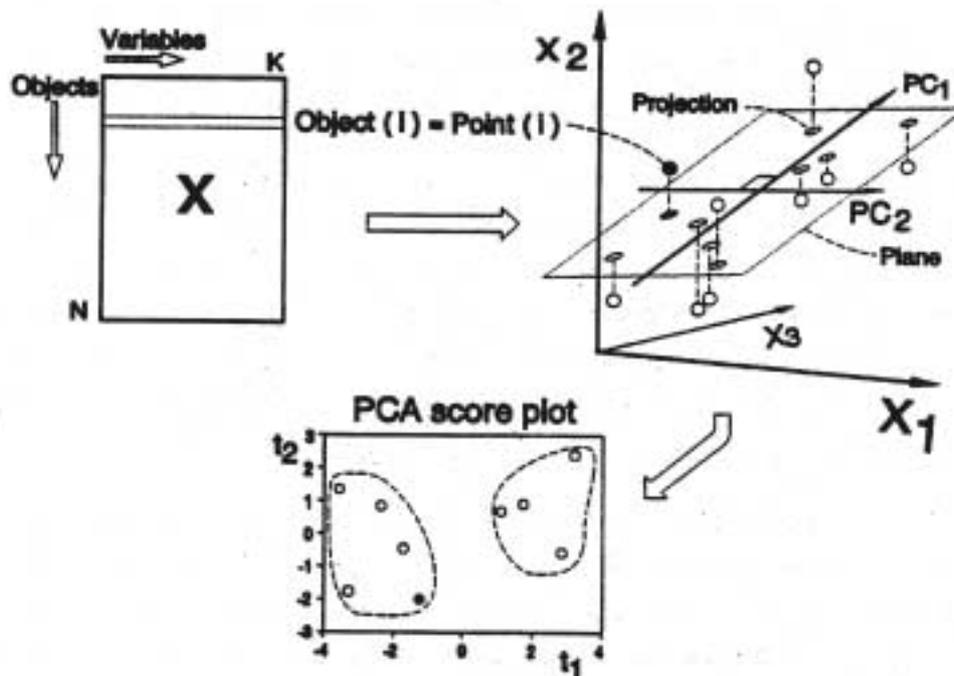


Abbildung 3.4-1: Schematische Darstellung der Durchführung einer Hauptkomponentenanalyse (aus: (222))

Die in der Abbildung 3.4-1 dargestellte Datenmatrix (X) besteht aus N Objekten (hier: Verschiedene Messungen) und K Variablen (hier: Meßwerte der Substanzen). Mit einem Algorithmus wird nun im nächsten Schritt der Vektor (1. Hauptkomponente) bestimmt, der den größten Anteil der Varianz des Datensatzes erklären kann. Im zweiten Schritt wird orthogonal dazu ein Vektor bestimmt, der den größtmöglichen Anteil der verbleibenden Varianz des

Datensatzes beschreibt. Durch die Anzahl der Variablen (K) ist die maximale Anzahl der Vektoren vorgegeben, welche die Gesamtvarianz des untersuchten Datensatzes erklären. Je einheitlicher das Verhalten der Variablen bezüglich von äußeren Einflußgrößen (z.B. Prozeßbedingungen) ist, desto größer wird der Anteil der Varianz des Datensatzes, der mit wenigen Hauptkomponenten beschrieben werden kann.

Im sogenannten *loading plot* werden die *loads* der Variablen auf die mit dem oben beschriebenen Verfahren extrahierten Hauptkomponenten abgebildet. Der *score plot* gibt Auskunft darüber, welche Ereignisse (Messungen) für das Verhalten der Variablen verantwortlich sind.

Die Durchführung einer Hauptkomponentenanalyse setzt die Normalverteilung der analysierten Daten voraus (223). Um eine Normalverteilung der Daten zu erzielen, gibt es eine Reihe von Normierungsmöglichkeiten. Die einfachste Methode, einen normalverteilten Datensatz zu erhalten, stellt die Logarithmierung der Werte dar. Für die in dieser Arbeit durchgeführten linearen Regressionsanalysen, für welche ebenfalls eine Normalverteilung der Werte erforderlich ist, wurde die logarithmische Darstellung der Werte gewählt (224). Durch die Logarithmierung der Daten dieser Arbeit wurde auf einem Signifikanzniveau (α) von $\leq 8\%$ (*student-t-Test*) eine Normalverteilung der Werte gefunden.

Um Musteränderungen sowohl in den Homologen- als auch in den Kongenerenprofilen möglichst deutlich werden zu lassen, wurden für die in dieser Arbeit durchgeführten HKA alle Konzentrationen normiert. Die Konzentration der Homologen der PCDD wurden auf die Gesamtkonzentrationen der PCDD bezogen, bzw. die des Kongeneres auf die Homologenkonzentration des jeweiligen Chlorierungsgrades. Dabei wurden in den multivariaten Analysen zur Aufklärung der Bildungsmechanismen der Kongeneren (Kapitel 4.3) die koeluierten Kongeneren nicht berücksichtigt, da dies zu höheren erklärten Varianzen der Hauptkomponenten und damit zu einer Vereinheitlichung der Datenstruktur führte.

Eine Normierung der Konzentration des Kongeneres durch die Wurzel der Quadratsumme der Konzentrationen aller Kongeneren, wie z.B. in der Arbeit von Wehrmeier, wurde nicht angewendet (76). Diese Art der Normierung glättet sehr stark rechts- und linkslastige Datenverteilungen und führt damit zu einer starken Vereinheitlichung der Kongenerenmuster bei der HKA. Dadurch können wertvolle Informationen zur Variabilität der untersuchten Daten verloren gehen.

Nicht quantifizierbare Werte des Datensatzes wurden nicht durch Null ersetzt. Im Falle von nicht quantifizierbaren Werten wurde die Nachweisgrenze der entsprechenden Verbindung für die statistische Analysen verwendet (225). Bei einem Ersatz fehlender Werte durch Null kommt es zu höheren Werten für die erklärten Varianzen der Hauptkomponenten bis in den Prozentbereich hinein.

Zur Durchführung aller statistischen Berechnungen wurde das Programm STATISTICA 5.1 für Windows der Firma STATSOFT verwendet (222).

3.4.2 Semiempirische quantenchemische Berechnungen ausgewählter Substanzen

Um einen Eindruck von dem Einfluß der Thermodynamik auf die Verteilung der Kongeneren von den PCBz und PCPh zu erhalten, wurden deren Bildungswärmen (*heat of formation* = HOF) mit Hilfe von semiempirischen quantenchemischen Rechnungen ermittelt. In der Literatur finden sich berechnete Werte für die HOF der PCDD/F-Kongeneren (40), (76).

In der Quantenchemie sind zwei Verfahren zur Bestimmung physikochemischer Kenngrößen von Verbindungen bekannt: *Ab-initio* und semiempirische quantenchemische Berechnungen. Die Grundidee dieser zwei Methoden ist die Lösung der stationären Schrödinger-Gleichung (226), (227), (228). Allerdings kann diese mit mehr als zwei Teilchen nicht mehr exakt gelöst werden, so daß die Lösung mit der Hartree-Fock-Roothaan SCF (*Self Consistent Field*) Methode erfolgt (228). *Ab-initio* Verfahren beschreiben unabhängig vom jeweiligen Basissatz die Lösung der SCF-Methode ohne eine Parametrisierung bestimmter Moleküleigenschaften, so daß Schwingungen und Molekülgeometrien gut erklärt werden. Für größere Moleküle müssen höhere Basissätze (6-31G* und höher) verwendet werden, um ein zuverlässiges Ergebnis zu erhalten (229), (227), (230). Dies erhöht den Rechenaufwand und v.a. die Rechenzeit enorm, so daß für die Berechnung der HOF der PCBz und PCPh in dieser Arbeit semiempirische quantenchemische Methoden verwendet wurden.

Als Verfahren zur Berechnung der HOF der PCBz und PCPh kam die NDDO-Näherung (*neglect of differential diatomic overlap*) zum Einsatz (231). Als Parametrisierungsmethoden wurden AM1 (*Austin Model 1*) und PM3 (*Parametric Model 3*) verwendet, welche im Vergleich zu der MNDO-Methode (*modified neglect of diatomic overlap*) die van-der-Waals-Kräfte nicht überbewerten (232). Die so erhaltenen Ergebnisse für die Bildungswärmen der PCBz und PCPh stellen keine absoluten Werte dar, sondern sind vielmehr als relative Werte zueinander zu sehen und können mit experimentellen kalorimetrischen Werten nur bedingt verglichen werden.

Bei der semiempirischen Berechnung der HOF wird die Geometrie des Moleküls nach der Boyden-Flechter-Golfarb-Shanno-(BFGS) Methode optimiert, so daß sich für die *self consistent field* Energie (E_{SCF}) ein Minimum ergibt (228), (233). Die E_{SCF} entspricht der Standardbildungsenthalpie bei 298 K (ΔH_{298}) und umfaßt die Energien der elektronischen, rotatorischen, translatorischen und vibratorischen Zustände des Moleküls (234).

$$\Delta H_{298} = E_{\text{SCF}} = H_{298} - H_0 \text{ (Gleichung 1)}$$

Mit den hier verwendeten Methoden kann nur eine relative Aussage über die Standardbildungsenthalpie bei 298 K getroffen werden (siehe *Gleichung 1*). Die fehlenden Aussagen über S_0 (vibronische Struktur der Verbindung zur Berechnung der Nullpunktsentropie) führt zu einer relativen Angabe der freien Enthalpie für eine bestimmte Temperatur (ΔG_T) mit *Gleichung 2* (Standardbildungsentropie der Verbindung nicht berechenbar):

$$\Delta G_T (-T \cdot S_0) = H_T - H_{298} + E_{SCF} - T \cdot S_T \text{ (Gleichung 2)}$$

mit: S_T = Entropie bei der Temperatur T; H_T = Enthalpie bei der Temperatur T

Zur Berechnung der in dieser Arbeit vorgestellten Bildungswärmen der PCPh und PCBz wurden die geometrischen Strukturen der Verbindungen im Programm Hyperchem 3.0 voroptimiert (235). Die so erhaltene voroptimierte Z-Matrix wurde in MOPAC 7.0 eingelesen und mit dem oben beschriebenen Verfahren die relativen Bildungswärmen errechnet.

4. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Im Kapitel 1 wurden die Ziele dieser Arbeit vorgestellt. Anhand der dort ausgeführten Aufgabenstellungen erfolgt in den folgenden Kapiteln die Diskussion der Ergebnisse.

4.1 Die Leitbeziehungen für Chloraromaten

Wie im Kapitel 3.3.3 dargestellt, wurden im Rauchgas von großtechnischen Feuerungsanlagen mit REMPI-TOFMS meßbare Surrogate zur *on-line* Überwachung der PCDD/F-Emissionen, speziell des I-TEQ Wertes, gesucht. Vor allem niedrig chlorierte Verbindungen sind aus spektroskopischen Gründen für diese Art des On-line-Monitorings geeignet und werden deshalb in diesem Kapitel besonders berücksichtigt (Kapitel 3.3, (200)).

4.1.1 Holzverbrennung an einer 0.5 MW Pilotverbrennungsanlage (PVA)

Der Messpunkt am Ende der Nachbrennkammer der PVA zeigte sowohl aufgrund der hohen Probenahmetemperaturen (700°C bis 900°C) als auch wegen des verwendeten Brennstoffes (Holz) im Vergleich zu den Proben aus der Nachbrennzone der SMVA und MVA sehr niedrige Konzentrationen der PCDD/F (Faktor 10-1000; 7.4 Anhang C, Anhang C-1). In der bis 1997/98 veröffentlichten Literatur wird davon ausgegangen, daß eine Bildung von Chloraromaten nur unter 500°C in größerem Umfang stattfindet (siehe Kapitel 2.4.3). An der PVA konnte erstmalig Chloraromatenbildung im Hochtemperaturbereich außerhalb von Laborexperimenten nachgewiesen werden.

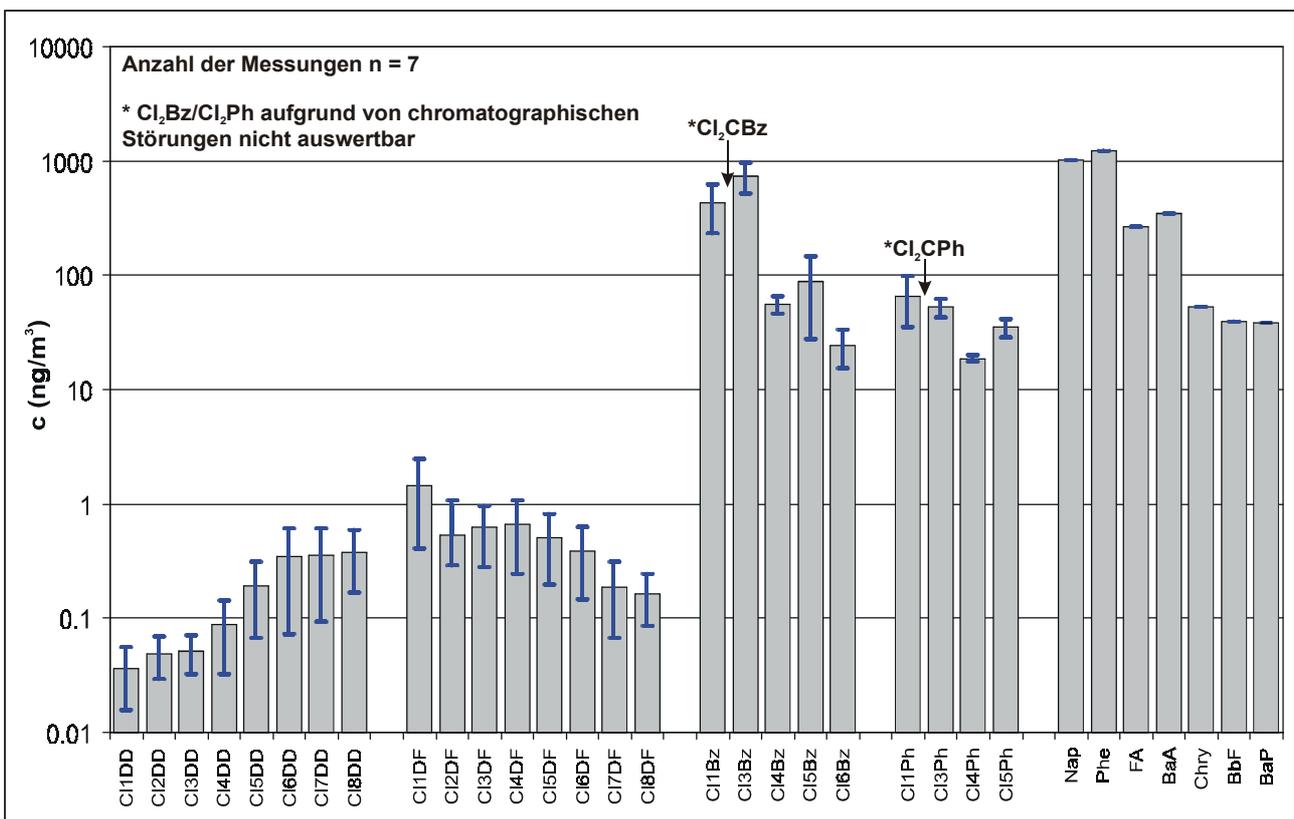


Abbildung 4.1-1: Aromaten- und Chloraromatenkonzentrationen bei circa 850°C für unter- und überstöchiometrische Verbrennungsbedingungen an der PVA (λ -Wert des gesamten Verbrennungsprozesses auf dem Rost und in der Nachbrennkammer von 0,85 bis 1,65)

Die Abbildung 4.1-1 zeigt deutlich, daß Aromaten und Chloraromaten bereits bei hohen Temperaturen am Ende der Nachbrennkammer der PVA gebildet wurden (siehe auch Kapitel 4.3.1). Vor allem die PAK liegen in hohen Konzentrationen vor, was auf deren Bildung in der Flammenzone der Anlage zurückgeführt werden kann (vgl. Abbildung 4.3-7 und Kapitel 2.4.2) (107), (35), (36).

Um Musterverschiebungen innerhalb und zwischen den untersuchten Substanzgruppen zu erkennen, wurde für die Daten der PVA eine HKA durchgeführt. Dabei erfolgte die Normierung der Homologenkonzentrationen der Chloraromaten gemäß Kapitel 3.4.1 und die der Aromatenkonzentrationen auf die Gesamtsumme der PAK bzw. BTX. Auch die Anlagenparameter (z.B. Temperatur) wurden auf den Mittelwert aller Messungen normiert. In Abbildung 4.1-2 ist das Ergebnis dieser HKA im *loading plot* dargestellt.

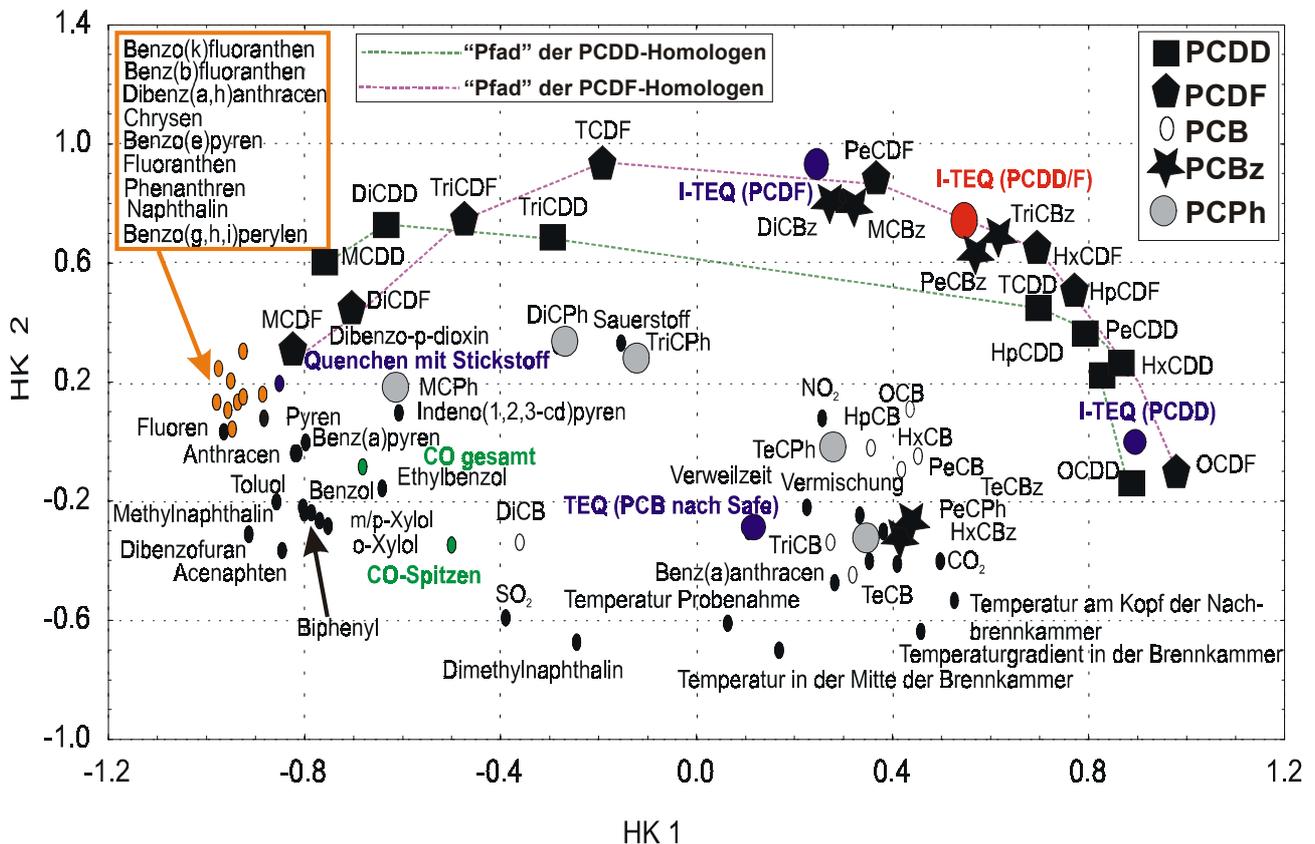


Abbildung 4.1-2: Loading plot des Datensatzes der PVA (erklärte Varianzen der Hauptkomponenten HK1: 42%, HK2: 18%)

In Abbildung 4.1-2 beschreibt die erste Hauptkomponente (HK 1) den Unterschied zwischen der Aromaten- und der Chloraromatenbildung. Die zweite Hauptkomponente (HK 2) wird von dem Unterschied innerhalb der Chloraromaten bestimmt (z.B. PCB und PCDD/F). Die Bildung der Aromaten wird an der PVA klar von der CO-Konzentration bzw. von den CO-Spitzen beeinflusst. In der Literatur wird der Zusammenhang zwischen CO-Gehalten des Abgases und Chloraromatenbildung stets kontrovers diskutiert (151), (130) (148). In den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit findet sich an den untersuchten Anlagen eine z.T. sehr starke Abhängigkeit der Chloraromatenkonzentrationen und Kongenerenmuster von der CO-Konzentration der Rauchgase.

In der Abbildung 4.2-1 liegen die Datenpunkte für die ein- bis dreifach chlorierten Homologen der PCDD/F in der Nähe der Datenpunkte der PAK, und somit wird deren Bildung wahrscheinlich von ähnlichen Verbrennungsbedingungen (hier: CO-Konzentration bei der Quenche mit Stickstoff) beeinflusst (120), (236). Diese Beobachtung gilt nur für niedrig chlorierte PCDD/F, z.T. auch für die PCB, aber nicht für PCBz.

Die verschiedenfarbigen Linien in der Abbildung 4.1-2 verbinden die PCDD und PCDF unterschiedlicher Chlorierungsgrade miteinander („Pad“ der PCDD/F-Homologen). Diese Linien geben einen Hinweis auf das unterschiedliche Bildungsverhalten der PCDD/F unterschiedlicher

Chlorierungsgrade, d.h. in Abhängigkeit des Chlorierungsgrades könnte die Bildung der PCDD/F verschiedenartigen Mechanismen unterliegen.

Die im *loading plot* gemachten Beobachtungen legen nahe, daß Chlorierungs-/Dechlorierungsprozesse unter veränderten Anlagenbedingungen sich unterschiedlich stark auf die Bildung der verschiedenen Chloraromaten auswirken könnten. Dieses Ergebnis könnte im Zusammenhang mit den extrem niedrigen Chlorgehalten des Brennstoffes an der PVA stehen (7.4 Anhang C, Anhang C-2) (237), (185). Auch die teilweise pyrolytischen ($\lambda < 1$) Prozeßbedingungen auf dem Rost, die an keiner anderen der untersuchten Anlagen auftraten, könnten zu einer Verschiebung der Verhältnisse der Substanzklassen untereinander führen und somit auch zu den deutlich höheren Konzentrationen der nicht sauerstoffhaltigen Chloraromaten (PCB und PCBz) beitragen (siehe auch Abbildung 4.1-5).

Die monozyklischen (BTX) und polyzyklischen (PAK) Aromaten sind im *loading plot* im gleichen Bereich gruppiert. Dieser Befund könnte ein Hinweis auf ein sehr ähnliches Bildungsverhalten dieser Substanzklassen im Hochtemperaturbereich an der PVA sein. Im Gegensatz zu den PCDD/F wurden für die untersuchten Aromaten keine Musterverschiebungen in Abhängigkeit der Prozeßbedingungen, z.B. CO-Konzentration, gefunden (siehe Abbildung 4.1-3).

Im *score plot* (Abbildung 4.1-3) für die Daten der PVA zeigt sich eine Gruppierung der Fälle in Abhängigkeit von den Anlagenbedingungen (Anlagenbedingungen siehe 7.4 Anhang C, Anhang C-3).

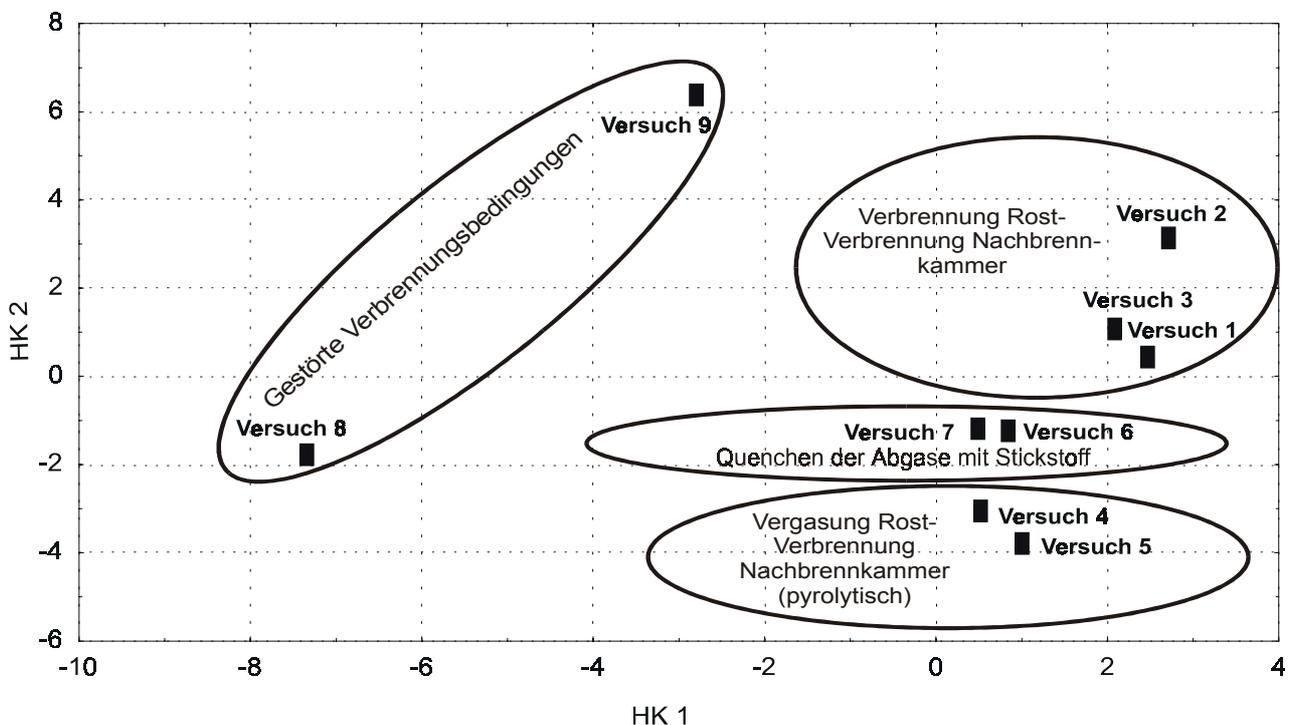


Abbildung 4.1-3: Score plot des Datensatzes der PVA

Die klare Gruppierung der Proben in Abbildung 4.1-3 macht deutlich, daß die Homologen- und Gesamtsubstanzprofile sehr stark von den Betriebsbedingungen der Anlage abhängig sind. Der größte, durch die erste Hauptkomponente beschriebene Unterschied in den Substanzprofilen besteht somit zwischen den Fällen unter gestörten und kontrollierten Verbrennungsbedingungen. Wechselnde Prozeßbedingungen, wie z.B. die Umstellung der Rostfeuerung von Verbrennung auf Vergasung, haben auch einen großen Einfluß auf die Substanzprofile, was durch die zweite Hauptkomponente gezeigt wird. Wie für den *loading plot* in Abbildung 4.1-2 diskutiert, werden diese Unterschiede bezüglich der zweiten Hauptkomponente vor allem in Bezug auf die Bildung von sauerstoffhaltigen (PCDD/F) und nicht sauerstoffhaltigen (PCB und PCBz) Chloraromaten deutlich.

Die Änderungen der Substanzmuster bei variierenden Prozeßbedingungen könnten für eine Beurteilung der Güte der Verbrennung angewendet werden. Hierfür sind schnelle *on-line* Meßsysteme (z.B. REMPI-TOFMS) nötig, die Leitsubstanzen aus den Substanzprofilen erfassen können. Diese Leitverbindungen können zu einer effektiven Nachsteuerung der Anlage und damit zur Minimierung der Emissionen verwendet werden (14), (238).

Aus der Abbildung 4.1-2 ist ersichtlich, daß an der PVA die PAK keine Surrogate für die PCDD/F darstellen. In der Abbildung 4.1-4 wird ein graphischer Überblick der Korrelationskoeffizienten (KK) zwischen den niedrig chlorierten Aromaten und der Toxizität (I-TEQ bzw. TEQ) der PCDD/F und PCB gegeben. Dabei sind speziell die niedrig chlorierten Verbindungen berücksichtigt, da nur diese Verbindungen für ein On-line-Monitoring mit REMPI-TOFMS geeignet sind (siehe Kapitel 3.3). Die Zuordnung der Homologen und Kongeneren findet sich in 7.4 Anhang C (Anhang C-4).

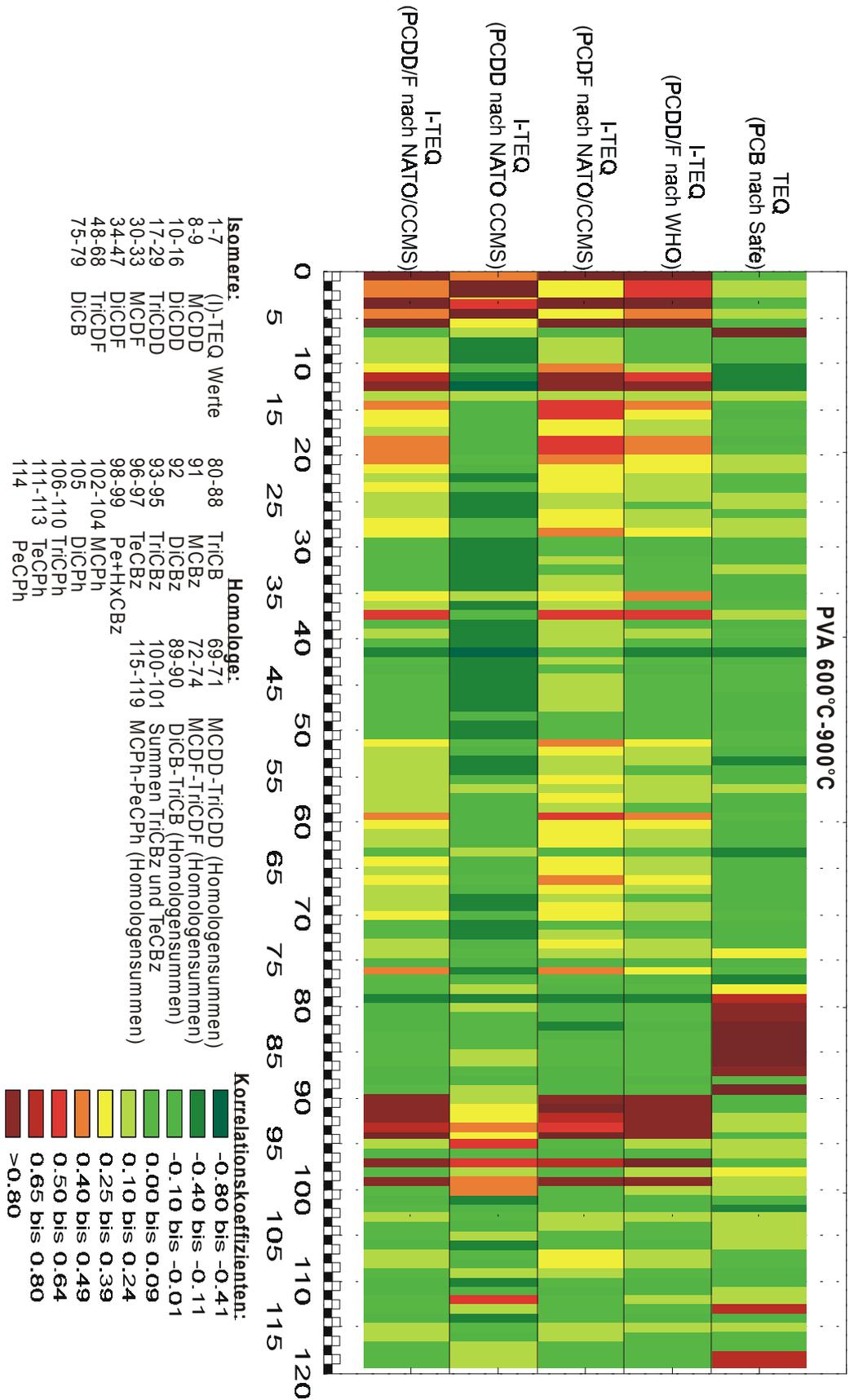


Abbildung 4.1-4: Korrelationskoeffizienten (KK) zwischen den Toxizitätsäquivalenten (gewichtet nach unterschiedlichen Toxizitätsfaktoren, vgl. Tabelle 2.2-1 und 2.2-2) verschiedener Substanzgruppen und den niedrig chlorierten Kongeneren und Homologen der Chloraromaten an der PVA

In der Abbildung 4.1-4 wird deutlich, daß nur wenige niedrig chlorierte Kongenere und Homologe eine hohe Korrelation zu den Toxizitätsäquivalenten der PCDD/F zeigen (siehe 7.4 Anhang C, Anhang C-5 und Anhang C-6). Die höchsten Korrelationskoeffizienten (KK) zur Beschreibung des I-TEQ der PCDD/F werden von den PCBz erzielt, wohingegen die Toxizität der PCB sehr gut mit den Konzentrationen der niedrig chlorierten PCB korreliert ist. Der I-TEQ Wert der PCDD (PCDD nach NATO/CCMS) zeigt die niedrigsten Werte für die KK in Abbildung 4.1-4, was seine Vorhersage durch Surrogate erschwert. Diese Ergebnisse müssen vor folgendem Hintergrund betrachtet werden: Bei mehr als 95% der in dieser Arbeit untersuchten PCDD/F-Proben wird ein Anteil von mehr 60% der Gesamtoxizität der PCDD/F (I-TEQ) von der Toxizität der PCDF (I-TEQ (PCDF)) getragen. Darüber hinaus wurde gefunden, daß das 2,3,4,7,8-PeCDF einen Anteil von mehr 25% an der Gesamtoxizität der PCDF (I-TEQ (PCDF)) hat. Ein ähnliches Ergebnis ergab sich auch bei verschiedenen in der Literatur belegten Studien (201), (215). Problematisch bei der Betrachtung der statistischen Beziehungen der niedrig chlorierten Verbindungen zum I-TEQ Wert der PCDD/F ist auch, daß diese Verbindungen unter gestörten Verbrennungsbedingungen ein von den übrigen Chlorierungsgraden unterschiedliches Verhalten zeigen (Abbildung 4.1-2).

Ein Vergleich der Toxizität der PCDD/F und PCB an der PVA zeigt, daß der Wert der PCB (TEQ nach Safe) den Wert der PCDD/F (I-TEQ nach NATO/CCMS) um circa den Faktor zwanzig übertrifft (Abbildung 4.1-5).

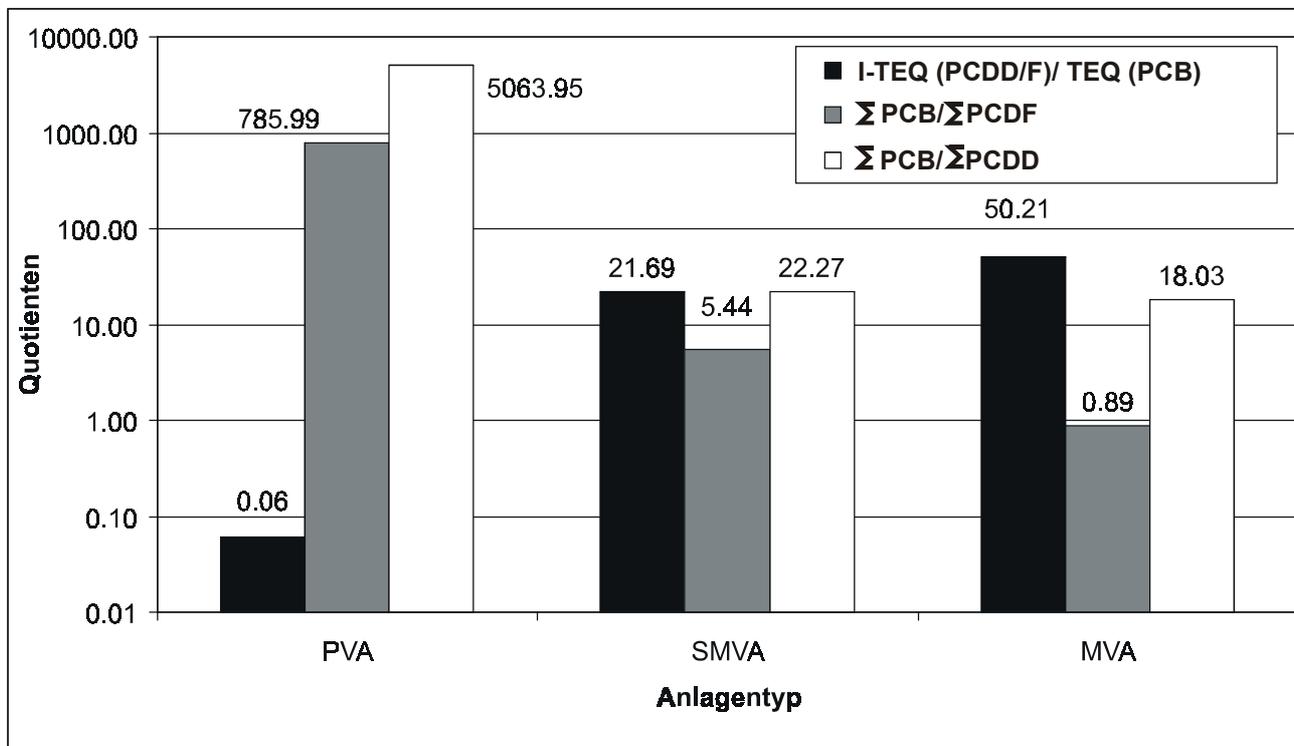


Abbildung 4.1-5: Vergleich der Chloraromatenverhältnisse im Hochtemperaturbereich von drei Anlagen (PCB, PCDD und PCDF)

Aus der Abbildung 4.1-5 wird deutlich, daß sich die Bildung der Chloraromaten im Hochtemperaturbereich an der PVA stark von derjenigen an der MVA und SMVA unterscheidet. Im Hochtemperaturbereich ist grundsätzlich an allen drei Anlagen die gebildete Menge an PCB größer als die der PCDF und PCDD, wobei die Mengen an PCDF deutlich größer sind als die der PCDD (vgl. Kapitel 4.3). Die an der PVA gefundenen, im Vergleich zu den PCDD/F-Konzentrationen um Größenordnungen höheren PCB-Konzentrationen könnten auf die teilweise pyrolytischen Prozeßbedingungen (Fall 4 bis 7) zurückzuführen sein. An der SMVA und MVA waren die Verbrennungsbedingungen in der Nachbrennzone überstöchiometrisch, wohingegen an der PVA in vier Fällen (Fall 4 bis 7) eine Vergasung des Holzes auf dem Rost erfolgte.

In der Literatur findet sich als ein grober Schätzwert für die Toxizität der PCB im Rauchgas von Verbrennungsprozessen 10-15 % des I-TEQ Wertes der PCDD/F (239), (240). Dieser Wert wurde außer für die Proben von der PVA für alle in dieser Arbeit untersuchten Proben bestätigt. Dieses Ergebnis ist vermutlich auf die teilweise pyrolytischen Prozeßbedingungen an der PVA zurückzuführen.

Die an der PVA gefundenen Ergebnisse geben einen ersten Hinweis auf das unterschiedliche Bildungsverhalten von verschiedenen Chloraromaten bei Verbrennungsprozessen im Hochtemperaturbereich (vgl. Kapitel 4.3, (241), (236)).

4.1.2 Sondermüllverbrennung an einer 22 MW Sondermüllverbrennungsanlage (SMVA)

Wie unter 3.1.2 beschrieben, wurden an der SMVA mehrere Meßstellen bei unterschiedlichen Temperaturen zeitgleich beprobt, um eine tiefere Erkenntnis über das Bildungsverhalten der Substanzgruppen entlang des Rauchgasweges zu erhalten. Im nachfolgenden Kapitel werden in Analogie zur Darstellung der Ergebnisse an der PVA die Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse und der Korrelationsrechnungen für die unterschiedlichen Probenahmestellen an der SMVA vorgestellt.

Um zu klären, ob Parameter wie z.B. die Probenahmestelle und Anlagenbedingungen einen Einfluß auf die Muster der Chloraromaten haben, werden die Daten aller Probenahmepunkte in einer HKA untersucht (Abbildung 4.1-6; Normierung der Homologensummen gemäß Kapitel 3.4.1). Aus dem *score plot* kann abgelesen werden, welche Parameter die Gruppierung der Chloraromaten im *loading plot* hervorruft (Abbildung 4.1-7).

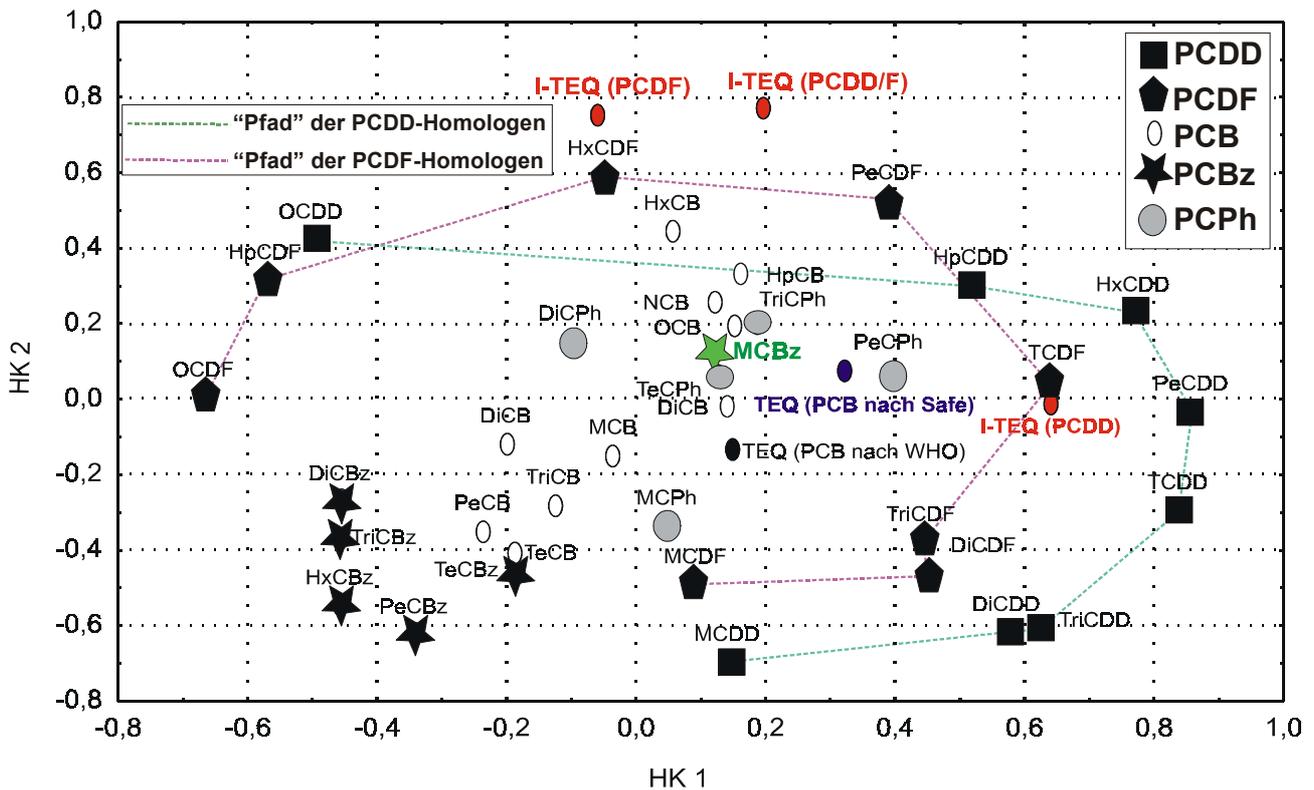


Abbildung 4.1-6: Loading plot des Datensatzes der SMVA (erklärte Varianzen der Hauptkomponenten HK1: 36%, HK2: 17%)

Die ersten beiden Hauptkomponenten in der Abbildung 4.1-6 erklären 53% der gesamten Varianz des Datensatzes. Dieser Wert ist der niedrigste für alle hier betrachteten Anlagen und gibt einen Hinweis darauf, daß an der SMVA sehr große Unterschiede in den Homologenmuster der Proben auftraten. Durch den *loading plot* der HKA in der Abbildung 4.1-6 wird klar, daß v.a. die Homologenprofile der PCDD/F an der SMVA als instabil angesehen werden müssen und deshalb die Homologen dieser Substanzgruppen als Surrogate zur Vorhersage des I-TEQ Wertes wahrscheinlich nicht in Frage kommen.

In der Abbildung 4.1-6 wird durch die erste Hauptkomponente vor allem der Unterschied zwischen den PCBz und PCB einerseits und den übrigen Chloraromaten andererseits beschrieben, was auf unterschiedliche Bildungswege für diese Substanzklassen hinweist. Die zweite Hauptkomponente trennt vor allem die niedrig chlorierten (einfach- bis dreifach chloriert) Verbindungen von den höher chlorierten Verbindungen ab. Dennoch ist die erklärte Varianz für die erste Hauptkomponente deutlich höher als für die zweite Hauptkomponente. Auffallend ist die Nähe der Datenpunkte von den vier- und fünffach chlorierten Homologen zu den I-TEQ Wert der PCDD/F bzw. dem I-TEQ der PCDF. Wie schon im vorherigen Kapitel für die PVA beschrieben, ist dies darauf zurückzuführen, daß die PCDF mehr als 60% der Gesamtoxizität des I-TEQ Wertes der PCDD/F tragen.

In Analogie zu den Ergebnissen an der PVA lassen sich die Datenpunkte der PCDD/F-Homologen entsprechend ihres Chlorierungsgrades entlang der ersten Hauptkomponenten mit Linien

verbinden („Pfad“ der PCDD/F-Homologen). Anhand dieser Linien und durch den *score plot* (Abbildung 4.1-7) wird deutlich, daß die Homologenmuster der PCDD/F sehr stark von den jeweiligen Fällen (z.B. Prozeßbedingungen) beeinflusst werden. Dieses Ergebnis gibt einen Hinweis darauf, daß auch an der SMVA die niedrig chlorierten PCDD/F-Homologen vermutlich ein von den höher chlorierten PCDD/F-Homologen unterschiedliches Bildungsverhalten zeigen.

Chlorbenzol kommt in der Abbildung 4.1-6 von den niedrig chlorierten Verbindungen dem I-TEQ der PCB und PCDF räumlich am nächsten. Dieses Ergebnis ist ein Hinweis auf die Eignung dieser Verbindung als Surrogat (siehe Kapitel 4.1.5 und 4.2).

Um die Einflüsse, z.B. Probenahmestelle oder Anlagenbedingungen, auf die Gruppierung der Homologen im *loading plot* verstehen zu können, ist in Abbildung 4.1-7 der *score plot* der Hauptkomponentenanalyse für die Daten der SMVA dargestellt.

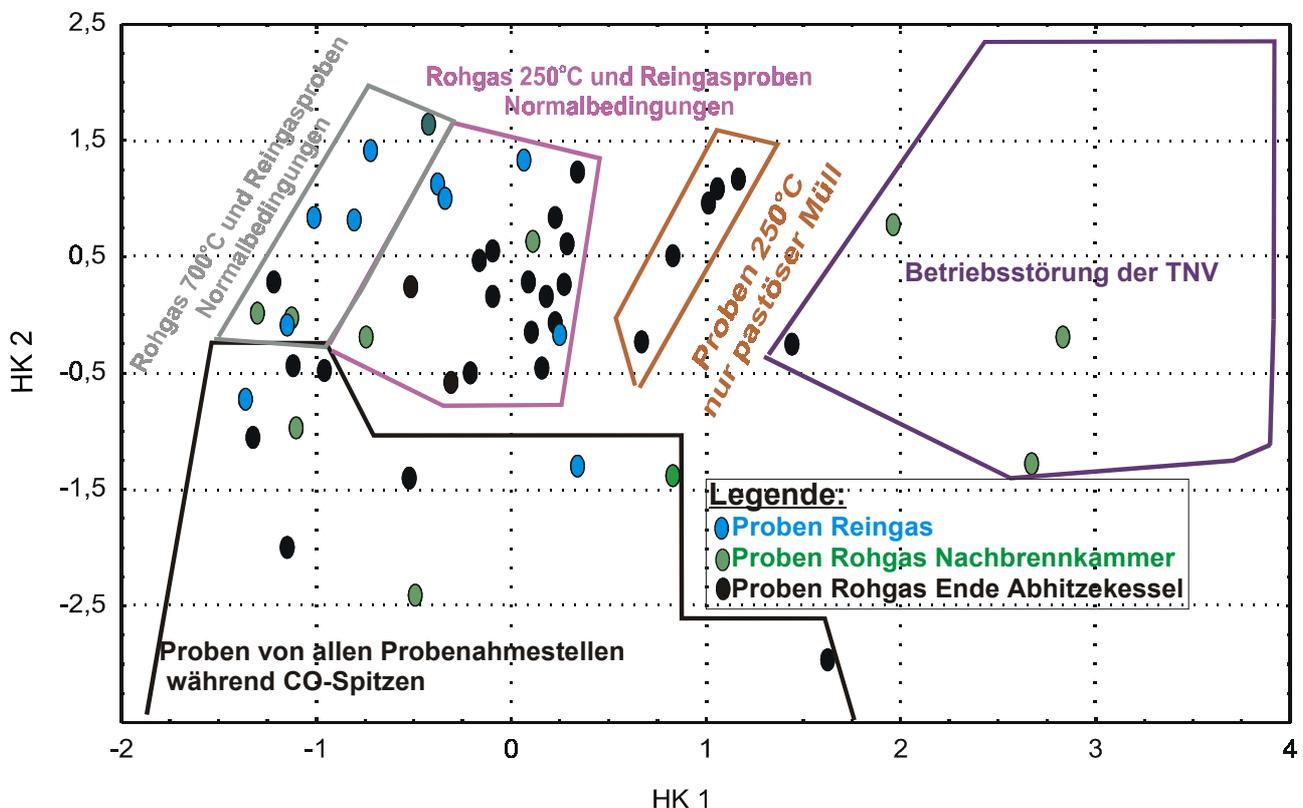
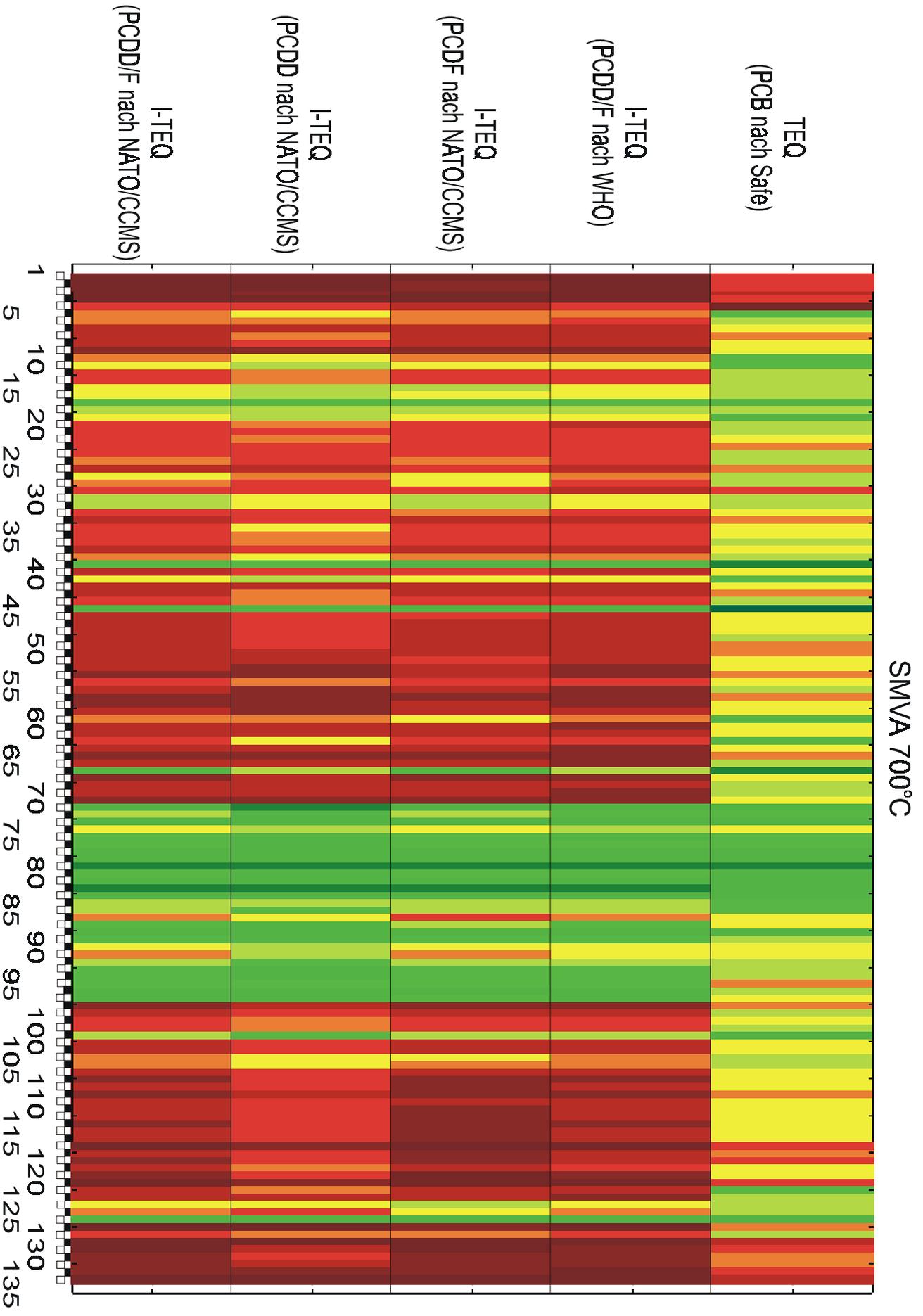
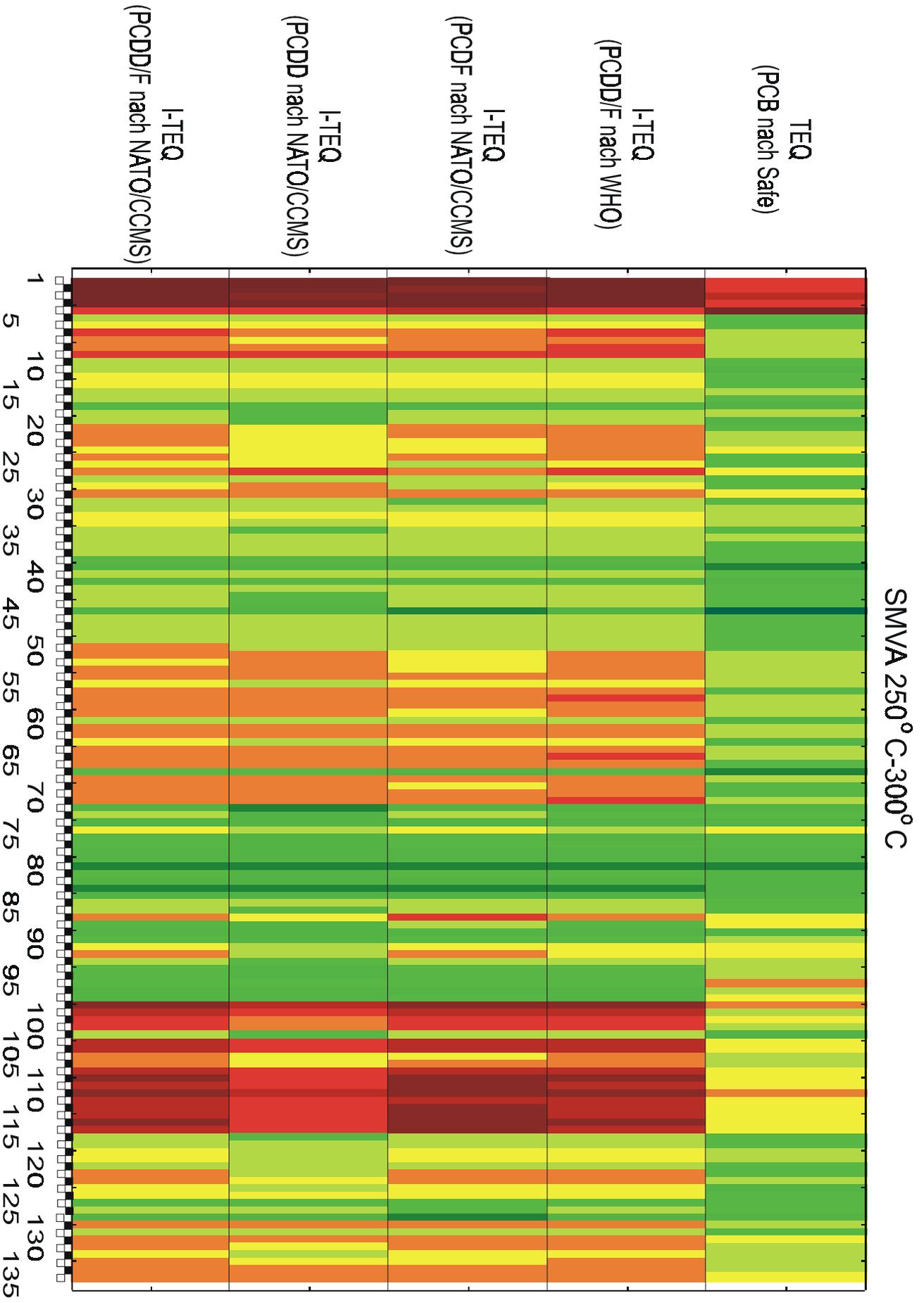


Abbildung 4.1-7: *Score plot* des Datensatzes der SMVA

Am *score plot* in der Abbildung 4.1-17 ist zu erkennen, daß die Gruppierung der Fälle nicht durch die Probenahmestellen, sondern vielmehr durch die Betriebsbedingungen der Anlage beeinflusst wird. Dieses Ergebnis verdeutlicht, daß die Homologenprofile der PCDD/F sehr empfindlich auf veränderte Verbrennungsbedingungen reagieren, wie dies auch an der PVA gezeigt wurde (Abbildung 4.1-3). Ähnliche Einflüsse von Betriebsbedingungen auf die Homologenmuster, insbesondere von erhöhten CO-Konzentrationen im Rauchgas, wurden in der Literatur auch an Laborreaktoren gefunden (148), (236).

Die Abbildung 4.1-8 gibt einen Überblick der Korrelationskoeffizienten zwischen den (I)-TEQ Werten und den niedrig chlorierten Kongeneren und Homologen der Chloraromaten an den unterschiedlichen Probenahmepunkten der SMVA. Im Anhang 7.4 Anhang C (Anhang C-4) findet sich die Zuordnung der Nummerierung für die Verbindungen in Abbildung 4.1-8.





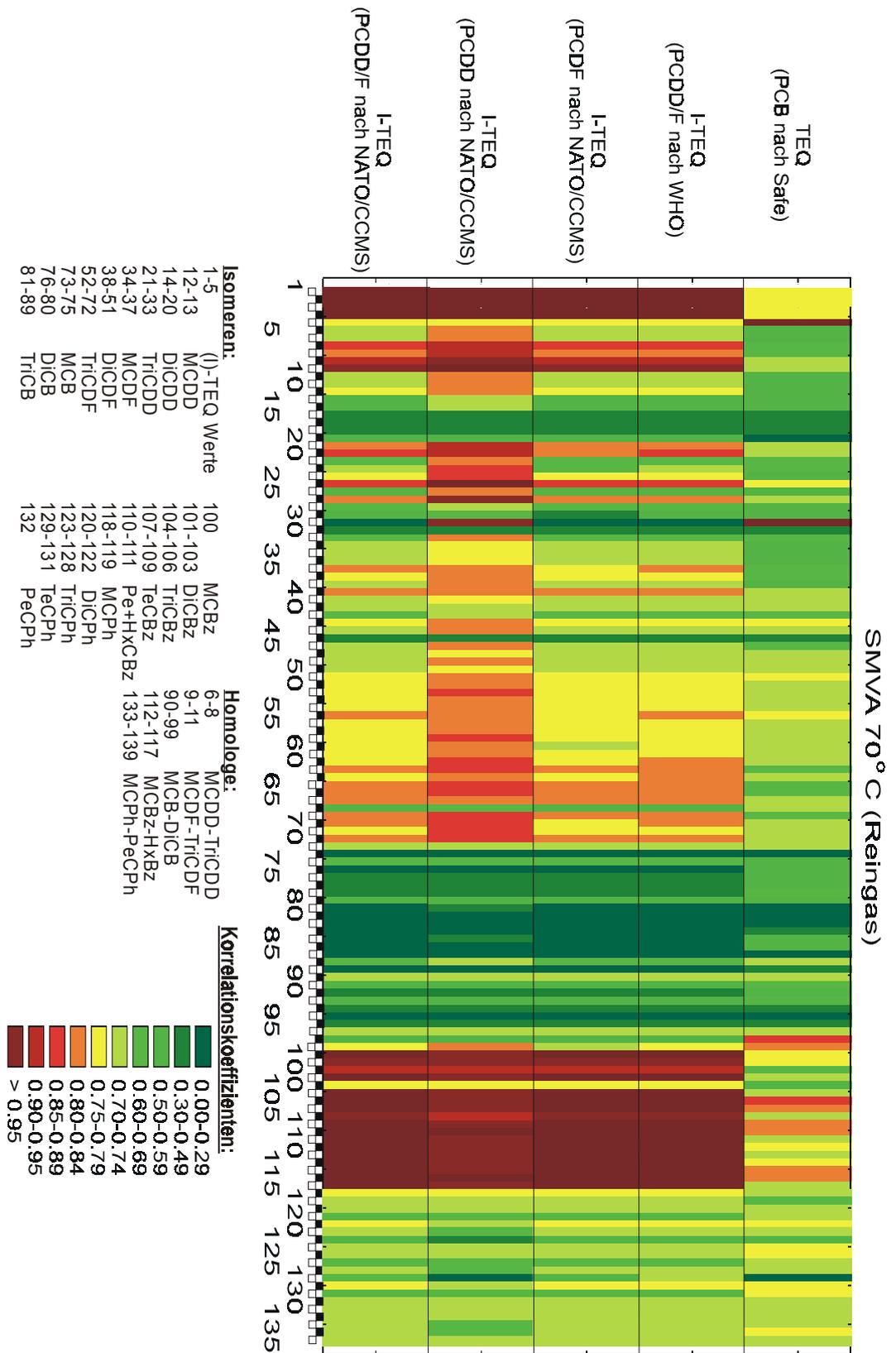


Abbildung 4.1-8: Korrelationskoeffizienten (KK) zwischen den Toxizitätsäquivalenten (gewichtet nach unterschiedlichen Toxizitätsfaktoren, vgl. Tabelle 2.2-1 und 2.2-2) verschiedener Substanzgruppen mit den niedrig chlorierten Kongeneren und Homologen der Chloraromaten an den Probenahmepunkten der SMVA (Anzahl der Messungen: n (700°C) = 7; n (250-300°C) = 28; n (70°C) = 14)

An der Abbildung 4.1-8 ist zu erkennen, daß die KK zwischen den Kongeneren (und Homologen) und den I-TEQ Werten im Hochtemperaturbereich (700°C) höher als die KK an den anderen Probenahmepunkten (Rohgas bei 250°C und Reingas) sind. Tendenziell ist zum Ende des Abhitzekeessels hin ein Absinken der Werte der KK aller Substanzgruppen mit Ausnahme für die PCPh sichtbar. Das für die PCPh beobachtete Verhalten kann vermutlich auf die im Vergleich zu den PCBz und PCDF stärkere Nachbildung dieser Verbindungen entlang des Rauchgaskanals zurückgeführt werden (vgl. Kapitel 4.3). Da auch die PCDD-Homologen eine den PCPh-Homologen ähnliche Nachbildungsrate entlang des Rauchgaskanals zeigten (vgl. Kapitel 4.3), sind die PCPh an der SMVA gute Indikatoren für den I-TEQ der PCDD.

Aus der Abbildung 4.1-8 geht hervor, daß die Toxizität der PCB schlechter als die Toxizität der PCDD/F durch Surrogate vorhergesagt werden kann. Das kann ein Hinweis auf die vielfältigen Reaktionswege innerhalb der PCB wie auch auf deren Sonderstellung innerhalb der betrachteten Chloraromaten sein (siehe Kapitel 4.3, (48), (242)).

Von den für REMPI-TOFMS geeigneten niedrig chlorierten Surrogaten für den I-TEQ Wert sind an dieser Anlage einige PCDD-, PCDF- und PCBz-Kongeneren identifiziert worden (7.4 Anhang C, Anhang C-5). Darunter befinden sich auch einige bereits in der Literatur als Surrogate beschriebene niedrig chlorierten PCDD/F-Kongeneren (217). Jedoch sind diese Verbindungen für eine *on-line* Messung mit REMPI-TOFMS aufgrund der Ausführungen unter 3.3.3 nur bedingt geeignet.

Die niedrig chlorierten PCDF zeigen höhere Werte für die KK als die PCDD des gleichen Chlorierungsgrades und liegen etwa in der gleichen Größenordnung wie die der PCBz. Dieses Ergebnis wurde in einer ersten Studie über die SMVA in dieser Form nicht gefunden (200). Die Daten der vorliegenden Arbeit und die Daten in der Literatur sind unter 7.4 Anhang C (Anhang C-7) miteinander verglichen. Die bereits in der Literatur publizierten Werte für die KK der PCBz und auch die der anderen Verbindungen (PCDD und PCPh) sind den Werten der vorliegenden Arbeit sehr ähnlich. Die größten Unterschiede bezüglich der Werte der KK zwischen den Ergebnissen der vorgestellten Arbeit und den Literaturdaten zeigen sich für die niedrig chlorierten PCDF. Dennoch dürfen die scheinbar hohen Werte (KK = 0.5-0.8) nicht überbewertet werden, da diese bezogen auf das Bestimmtheitsmaß (r^2) der jeweiligen Verbindung keine sichere Vorhersage der Toxizität erlauben. Der Anstieg der Werte für die KK der PCDF steht vor allem damit im Zusammenhang, daß die zusätzlich analysierten Daten von Proben stammen, welche unter instationären Betriebsbedingungen aus dem Rauchgas entnommen wurden. In diesen Fällen steigt sowohl der I-TEQ Wert als auch die Konzentration der niedrig chlorierten PCDF an (vgl. Kapitel 4.4.2). Allerdings bieten die im Anlagennormalzustand nur in geringen Konzentrationen detektierten niedrig chlorierten PCDF kein hohes Maß für die Vorhersagewahrscheinlichkeit des I-TEQ Wertes unter normalen Verbrennungsbedingungen.

Aus den gewonnenen Ergebnissen für die statistischen Zusammenhänge zwischen den Chloraromaten und dem I-TEQ Wert einen Bildungsmechanismus abzuleiten, ist oftmals problematisch, da die (I)-TEQ Werte einen nach toxischen Wirkungsmechanismen gewichteten Summenparameter einer Substanzklasse darstellen (siehe Kapitel 4.3).

Abschließend läßt sich festhalten, daß an der SMVA die PCBz hohe KK mit dem I-TEQ Wert der PCDD/F zeigen und MCBz als Vertreter der niedrig chlorierten Kongeneren ebenfalls gut mit dem I-TEQ Wert korreliert.

4.1.3 Hausmüllverbrennung an einer 22 MW Hausmüllverbrennungsanlage (MVA)

Die Abhängigkeit der Substanzmuster von den Verbrennungsbedingungen wird an der MVA - in Analogie zu den Datenanalysen an der PVA und SMVA - mit einer HKA untersucht. Es wird ferner ein graphischer Überblick über die KK der niedrig chlorierten Homologen und Kongeneren mit den (I)-TEQ Werten gegeben.

Die Abbildung 4.1-9 zeigt den *loading plot* der HKA für die an der MVA untersuchten Aromaten und Chloraromaten.

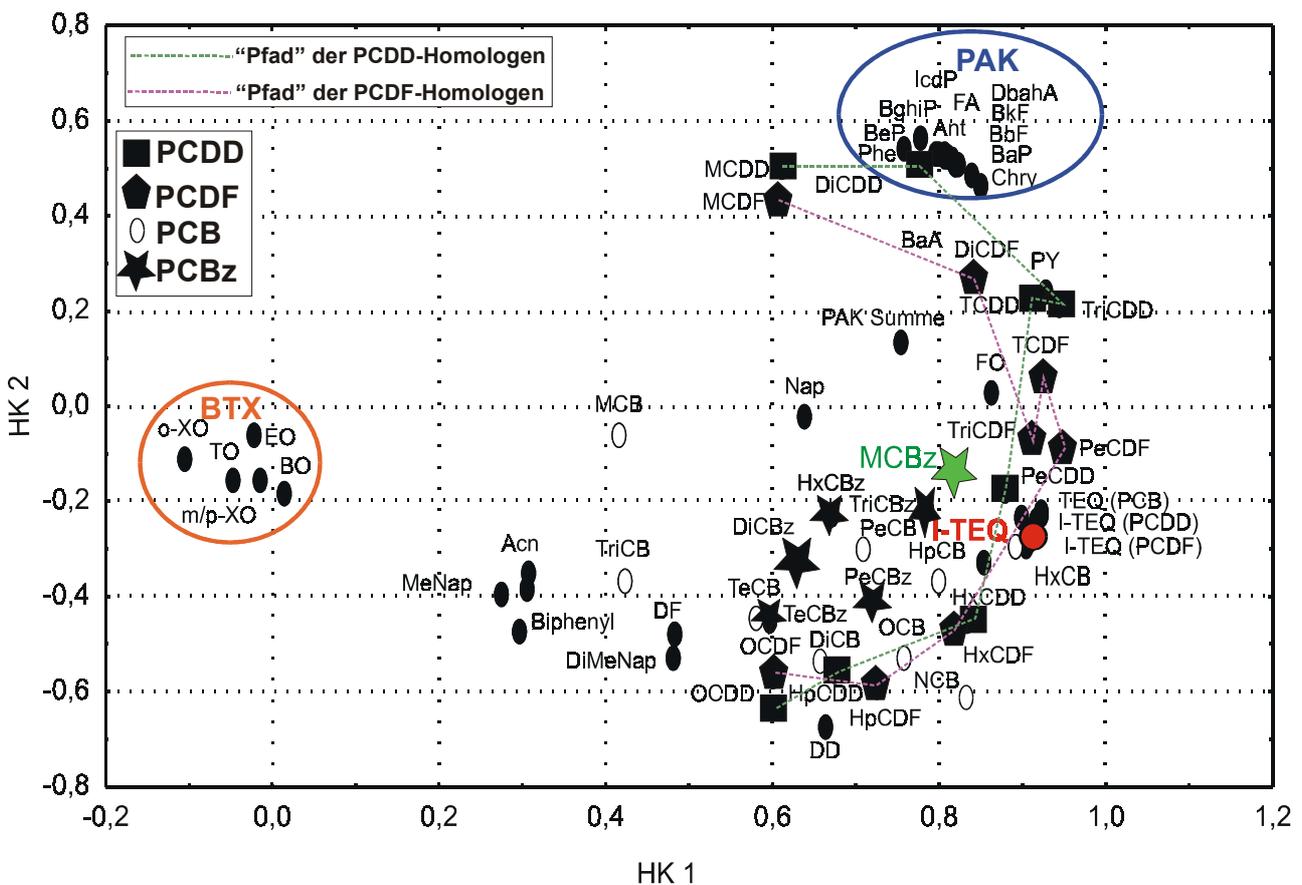


Abbildung 4.1-9: *Loading plot* des Datensatz der MVA (erklärte Varianzen der Hauptkomponenten HK1: 53%, HK2: 16%)

Im *loading plot* für die Daten der MVA in der Abbildung 4.1-2 finden sich zwei große Gruppen von Datenpunkten: Chloraromaten und Aromaten. Die erste Hauptkomponente trennt vor allem die kleinen Aromaten (BTX) von den Chloraromaten und Aromaten ab und erklärt mehr als 50% der Gesamtvarianz des Datensatzes. Im Gegensatz zu den Ergebnissen aus dem *loading plot* für die Daten der PVA, in welchem die Datenpunkte für die BTX und PAK zusammen gruppiert sind (Kapitel 4.1.1, Abbildung 4.1-2), findet sich im *loading plot* für die MVA eine deutliche Trennung der Datenpunkte der monozyklischen (BTX) und polyzyklischen (PAK) Aromaten. Diese Trennung der beiden Substanzgruppen in der HKA für die MVA steht wahrscheinlich im engen Zusammenhang mit der unterschiedlichen Probenahmetemperatur an den beiden Anlagen. An der PVA lag die Probenahmetemperatur zwischen 670°C und 900°C und damit deutlich über den Probenahmetemperaturen an der MVA (200°C bzw. 700°C). Die Bildung der Aromaten beginnt bereits in der Flammenzone der Verbrennung, und das dabei gebildete Substanzmuster unterliegt einer weiteren Differenzierung entlang des Rauchgaskanals (siehe Kapitel 2.4.2; (107), (35), (14), (122)). Die im *loading plot* der MVA analysierten BTX- und PAK-Muster sind im Gegensatz zu den Mustern an der PVA bereits stark von den in der Nachbrennzone stattfindenden Bildungs- bzw. Abbauprozessen beeinflusst (siehe Kapitel 4.3.1.2, Abbildung 4.3-7).

Im *loading plot* für die Daten der MVA (Abbildung 4.1-9) trennt die erste HK die PCBz und PCB innerhalb der Chloraromaten von den PCDD/F ab, was auf unterschiedliche Bildungswege dieser Verbindungen hinweisen könnte. Die zweite HK trennt innerhalb der Chloraromaten die hoch chlorierten (Hp/OCDD/F) Kongeneren von den niedrig chlorierten ab. Dieses unterschiedliche Verhalten in Abhängigkeit des Chlorierungsgrades wird in der Abbildung 4.1-9 durch verschiedenfarbige Linien („Pfad“ der PCDD/F-Homologen) verdeutlicht.

Ferner werden im *loading plot* für die Daten der MVA die höher kondensierten Aromaten (PAK mit mehr als drei Benzolringen) von den Chloraromaten durch die zweite HK getrennt. Ein ähnliches Verhalten der Chloraromaten und Aromaten wurde auch im *loading plot* für die Daten der PVA beobachtet (Kapitel 4.1.1; Abbildung 4.1-3).

Betrachtet man den *score plot* für die Daten der MVA, so wird klar, daß sich das unterschiedliche Verhalten der Variablen im *loading plot* auf die unterschiedlichen Betriebszustände an der MVA zurückführen läßt (Abbildung 4.1-10).

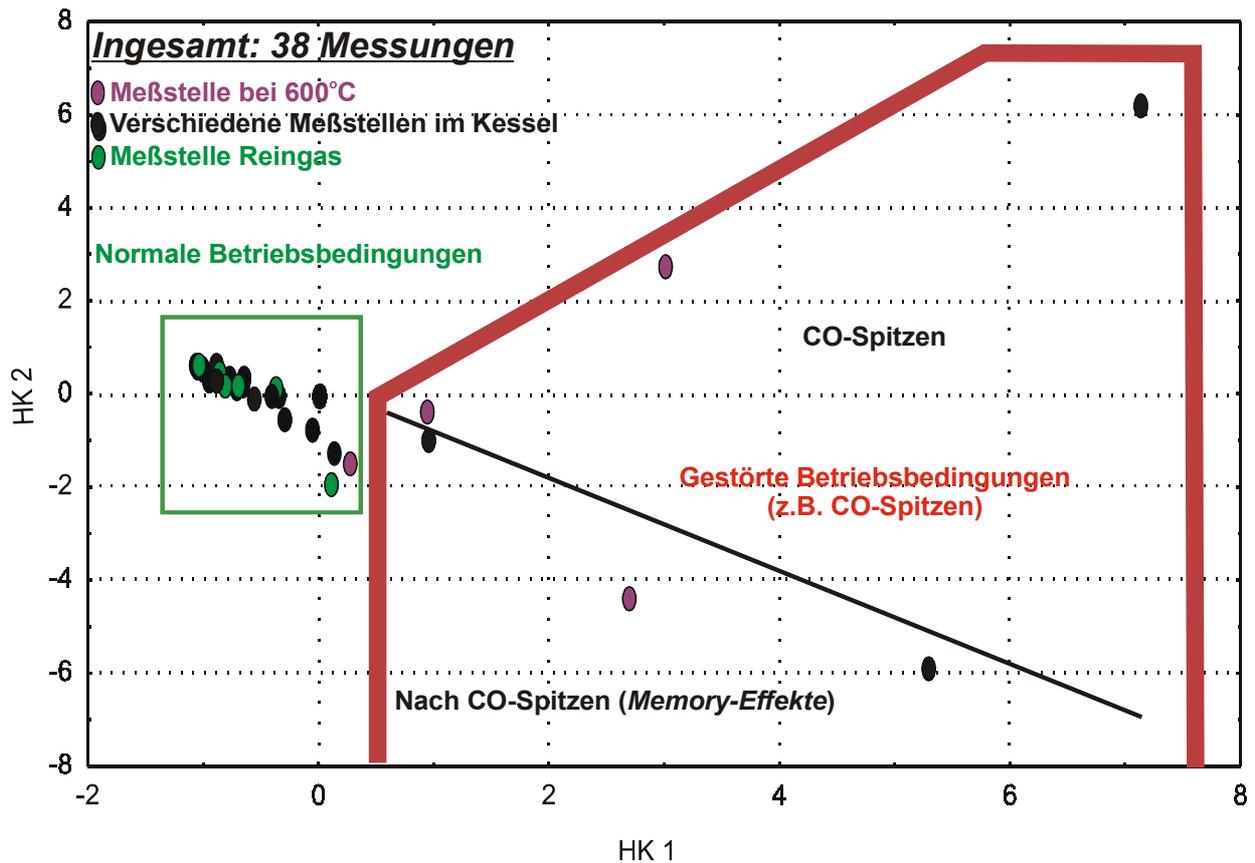
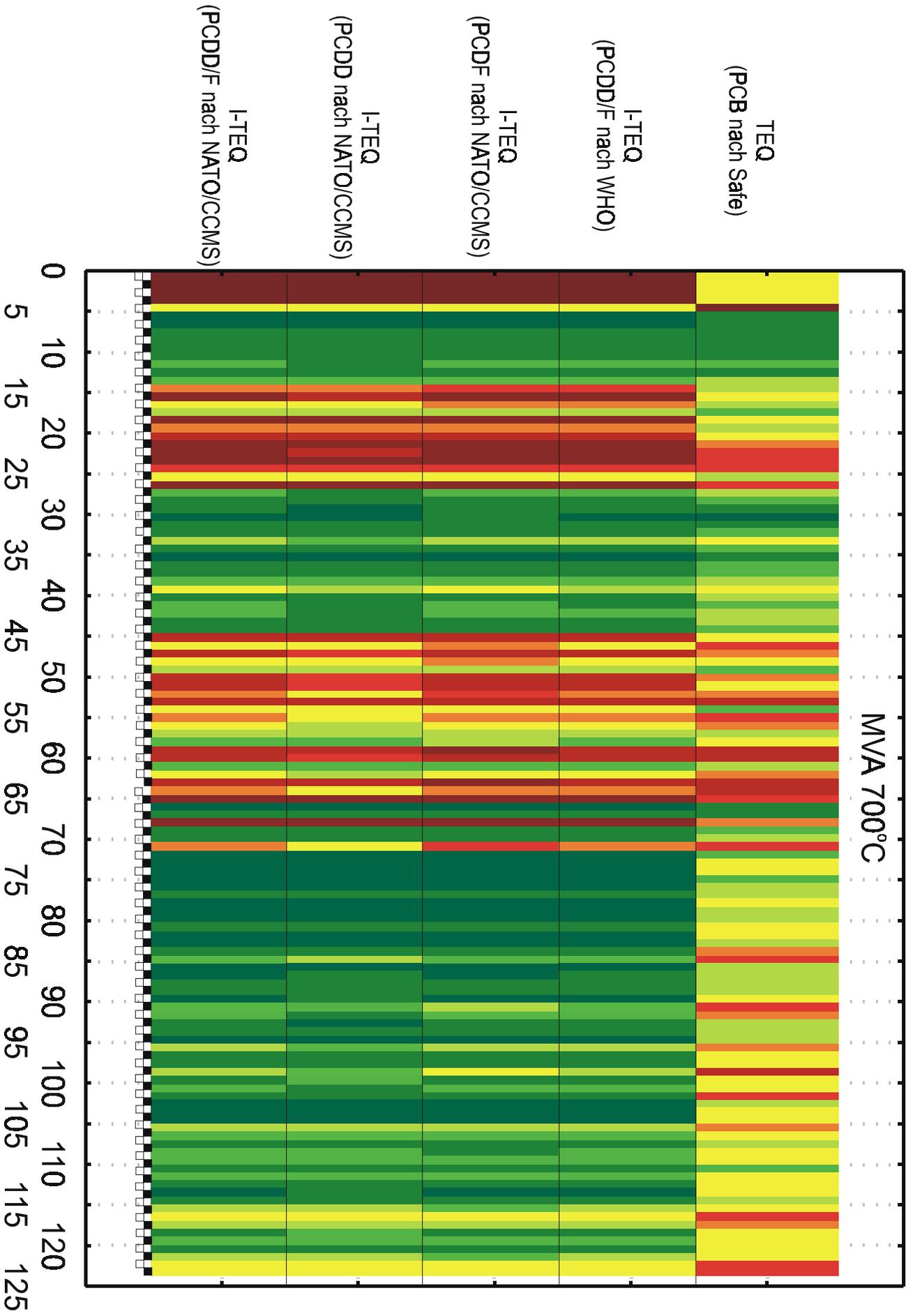


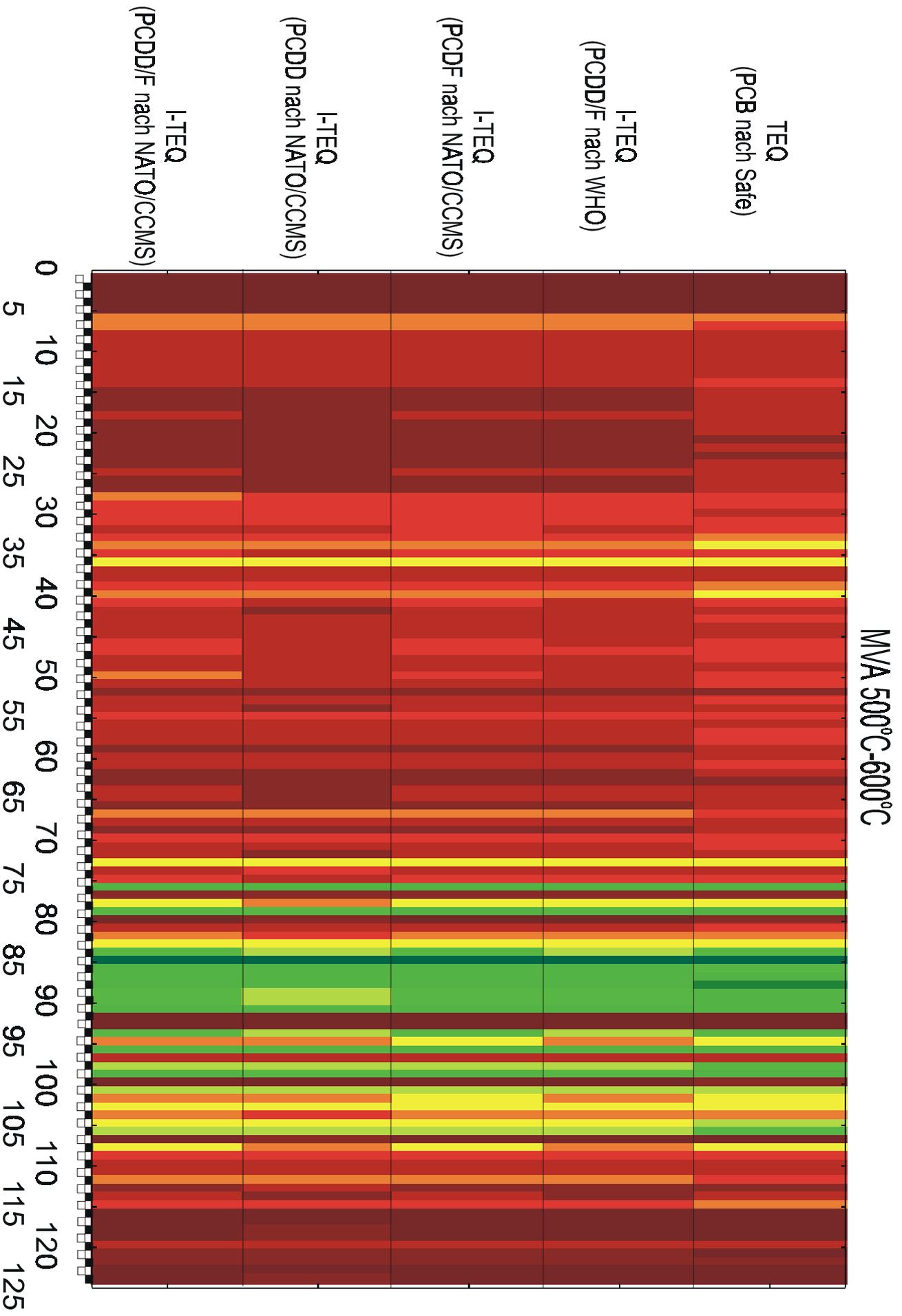
Abbildung 4.1-10: Score plot des Datensatzes der MVA

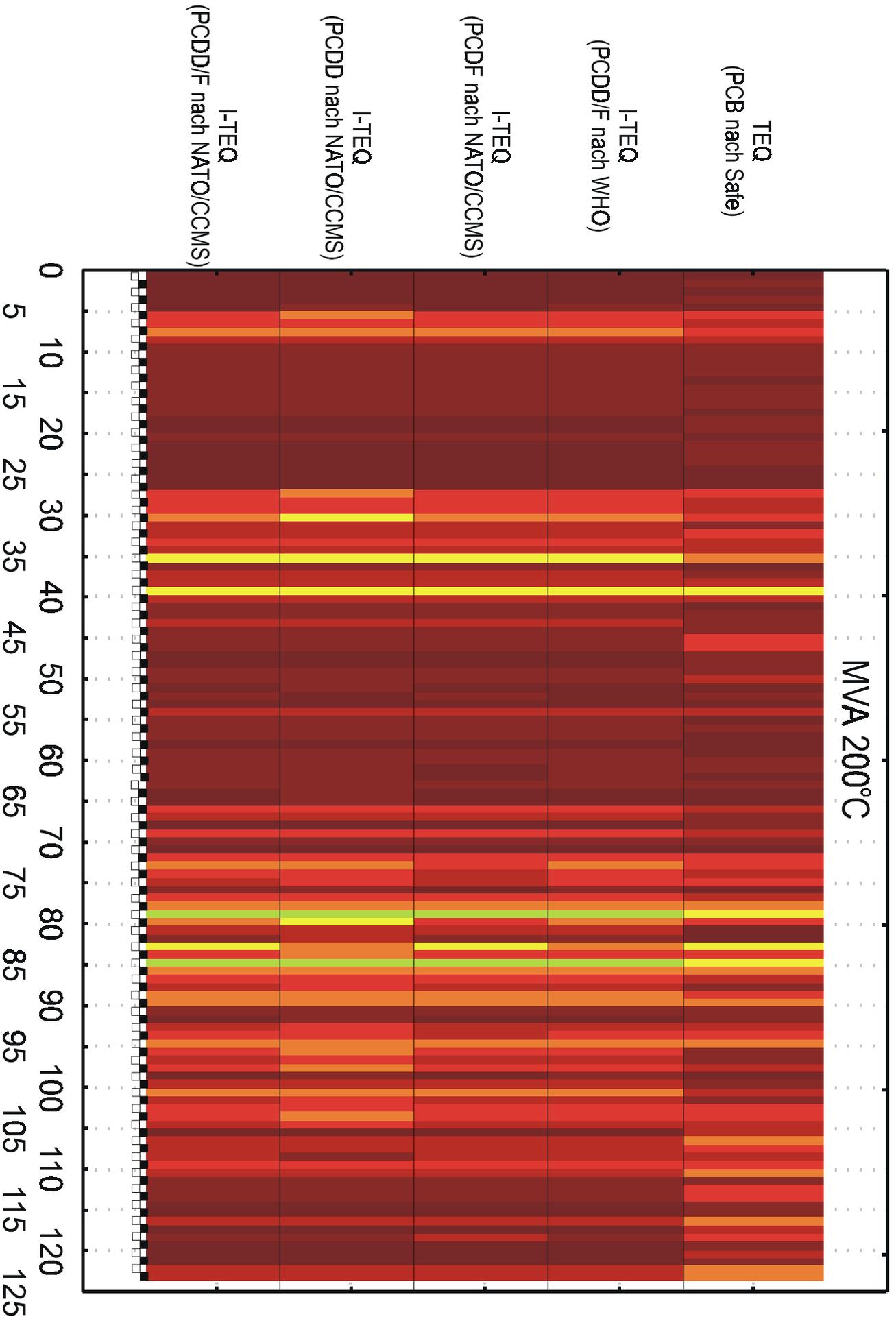
Im score plot in der Abbildung 4.1-10 werden die Fälle unter normalen Betriebsbedingungen deutlich von denjenigen unter gestörten Verbrennungsbedingungen (CO-Spitzen) abgetrennt. Die Fälle unter gestörten Betriebsbedingungen lassen sich nochmals auf der zweiten Hauptkomponente in die Fälle während der CO-Spitzen und des darauf folgenden *Memory-Effektes*, welcher eine länger andauernde (2-4h) Konzentrationserhöhung der Schadstoffe zur Folge hat, unterteilen (vgl. Kapitel 4.4). Eine Betriebsstörung an der MVA hatte eine längerfristig erhöhte Schadstoffbildung zur Folge, und dadurch wurde auch die spurenchemische Zusammensetzung der Rauchgase stark beeinflusst (siehe auch Kapitel 4.4).

Die unterschiedlich hohen Anteile der durch die ersten zwei Hauptkomponenten erklärten Varianzen in der HKA für die Datensätze der SMVA und MVA zeigen, daß die Homologenprofile der Chloraromaten aufgrund von Variationen in den Betriebsbedingungen an der SMVA stärkere Schwankungen aufweisen als an der MVA (Kapitel 4.4.2 und 4.4.3).

Um einen geeigneten Leitparameter für das REMPI-TOFMS-Monitoring zu finden, sind in der Abbildung 4.1-11 die KK zwischen den (I-)TEQ Werten und den niedrig chlorierten Homologen und Kongeneren der Chloraromaten dargestellt.







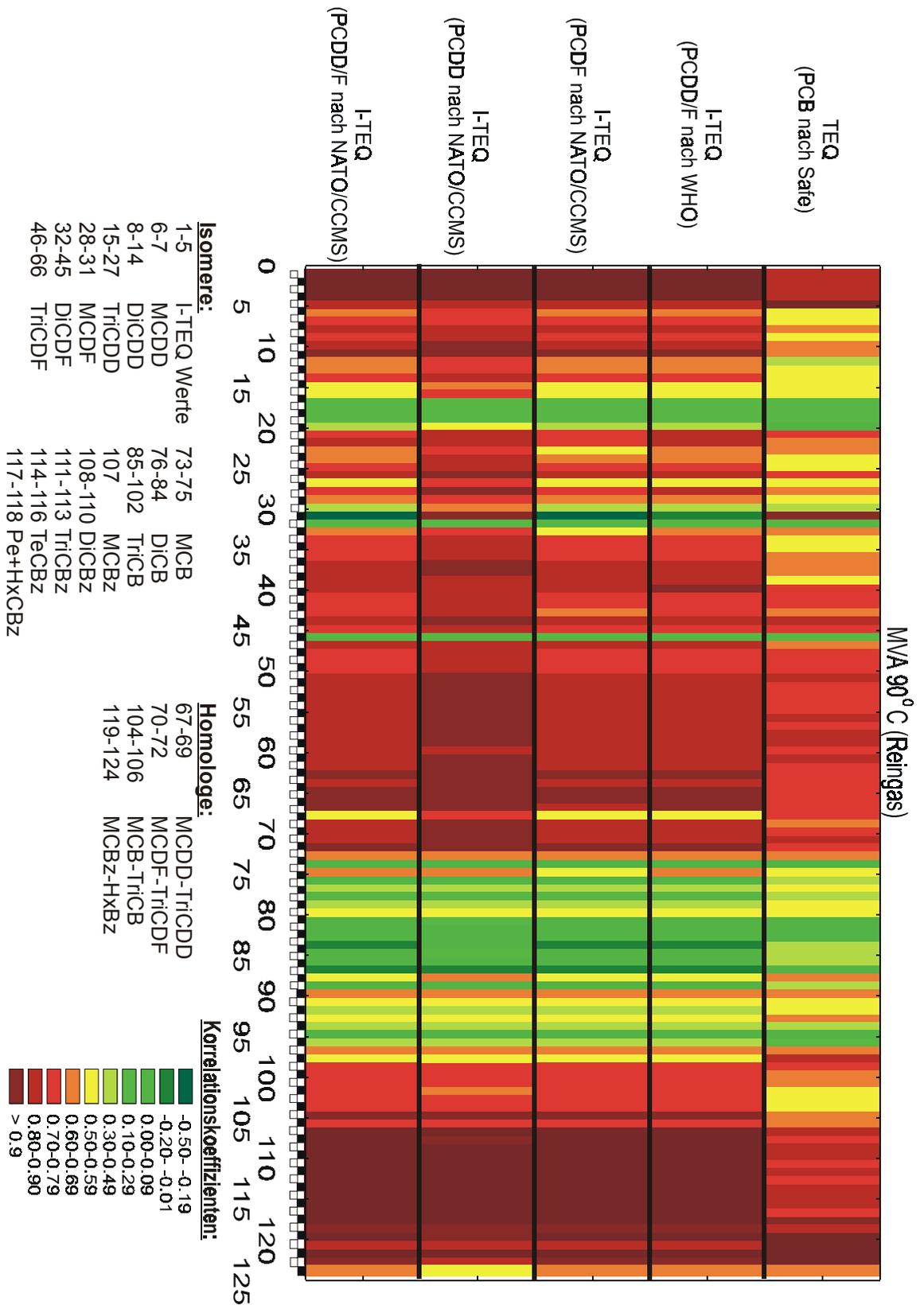


Abbildung 4.1-11: Korrelationskoeffizienten (KK) zwischen den Toxizitätsäquivalenten (gewichtet nach unterschiedlichen Toxizitätsfaktoren, vgl. Tabelle 2.2-1 und 2.2-2) verschiedener Substanzgruppen mit den niedrig chlorierten Kongeneren und Homologen der Chloraromaten an den Probenahmepunkten der MVA (Anzahl der Messungen: n (700°C) = 7; n (500-600°C) = 7; n (200°C) = 14; n (90°C) = 9)

Ein Vergleich der KK für die MVA aus der Abbildung 4.1-11 mit den KK für die SMVA (Abbildung 4.1-8) zeigt, daß im Hochtemperaturbereich der MVA von circa 700°C die KK niedriger liegen und etwa mit den Werten an der PVA vergleichbar sind, was wahrscheinlich auf den ähnlichen Temperaturbereich der Probenahme an der PVA und der MVA zurückzuführen ist. Dennoch bestehen zwei wesentliche Unterschiede zwischen der Verbrennung an der PVA und der MVA: Erstens ist der Chlorgehalt des Abgases an der MVA aufgrund des Brennstoffes um den Faktor 1000 höher als an der PVA (vgl. 7.4 Anhang C, Anhang C-2). Zweitens befand sich die Probenahme an der MVA bei circa 700°C noch im Bereich der Flammen, d.h. die Spitze der Probenahmelanze hatte zeitweisen Kontakt zu den Flammen. Es kann vermutet werden, daß diese speziellen Probenahmebedingungen die Werte der KK sehr stark beeinflussten. Wie bereits an der PVA und SMVA beobachtet, findet die Chloraromatenbildung auch an der MVA bei sehr hohen Rauchgastemperaturen statt (siehe auch Kapitel 4.3).

Ebenso wie an der SMVA nehmen an der MVA die Werte für die KK entlang des Rauchgaskanals bis zum Reingas tendenziell ab. Für dieses Ergebnis könnten die physikalisch-chemischen Eigenschaften (z.B. Dampfdruck und Wasserlöslichkeit) der Substanzgruppen, welche zu einem unterschiedlich starken Substanzaustrag der Verbindungen durch die Rauchgasreinigung führen, verantwortlich sein.

Wie aus der Tabelle im Anhang C-6 (7.4 Anhang C) zu entnehmen ist, stellen an der MVA die dreifach chlorierten PCDD/F die Substanzgruppe mit den höchsten Werten für die KK dar. Dies ist auch aus dem *loading plot* der Homologen ersichtlich (Abbildung 4.1-9), in dem diese Homologen sehr nahe am I-TEQ Wert liegen. Im Unterschied zu der SMVA weisen im Hochtemperaturbereich der MVA niedrig chlorierte Verbindungen aller Substanzklassen niedrige Werte für die KK auf. Durch die Abkühlung des Rauchgases und der damit verbundenen größeren Reaktionszeit werden auch für diese Verbindungen höhere, d.h. $KK \geq 0.80$, gefunden (Probenahmestellen bei 600°C, 200°C und 90°C).

Wie an der PVA und SMVA nimmt die Vorhersage des TEQ der PCB (nach Safe) durch Surrogate eine Sonderstellung ein. So ist es auffällig, daß zwischen dem TEQ der PCB und den MCDF- und DiCDF-Kongeneren eine höhere Korrelation besteht als zwischen dem I-TEQ der PCDD/F und den MCDF- und DiCDF-Kongeneren. Dies weist auf eventuell ähnliche Bildungsmechanismen dieser Substanzklassen (PCB, PCDF) hin (vgl. Kapitel 4.3).

Zusammenfassend läßt sich für die Ergebnisse an der MVA feststellen, daß ähnlich wie an der SMVA und der PVA niedrig chlorierte PCBz als Leitverbindungen für den I-TEQ Wert der PCDD/F identifiziert wurden. Unter diesen Surrogaten für den I-TEQ Wert der PCDD/F finden sich im Gegensatz zu den Ergebnissen an der PVA ein- und zweifach chlorierte und eine Reihe dreifach chlorierter Kongenerer der PCDD/F.

4.1.4 Holzverbrennung an einer 15 MW Holzverbrennungsanlage (HVA)

Wie in den vorangegangenen Kapiteln über die PVA, SMVA und MVA werden die Veränderungen der Substanzmuster in den Proben der HVA mit multivariater Statistik untersucht. Im Anschluß daran wird ein graphischer Überblick der KK der niedrig chlorierten Homologen und Kongeneren mit den (I-)TEQ Werten gegeben. In der Abbildung 4.1-12 ist der *loading plot* der Hauptkomponentenanalyse für die Homologen der Chloraromaten an der HVA dargestellt.

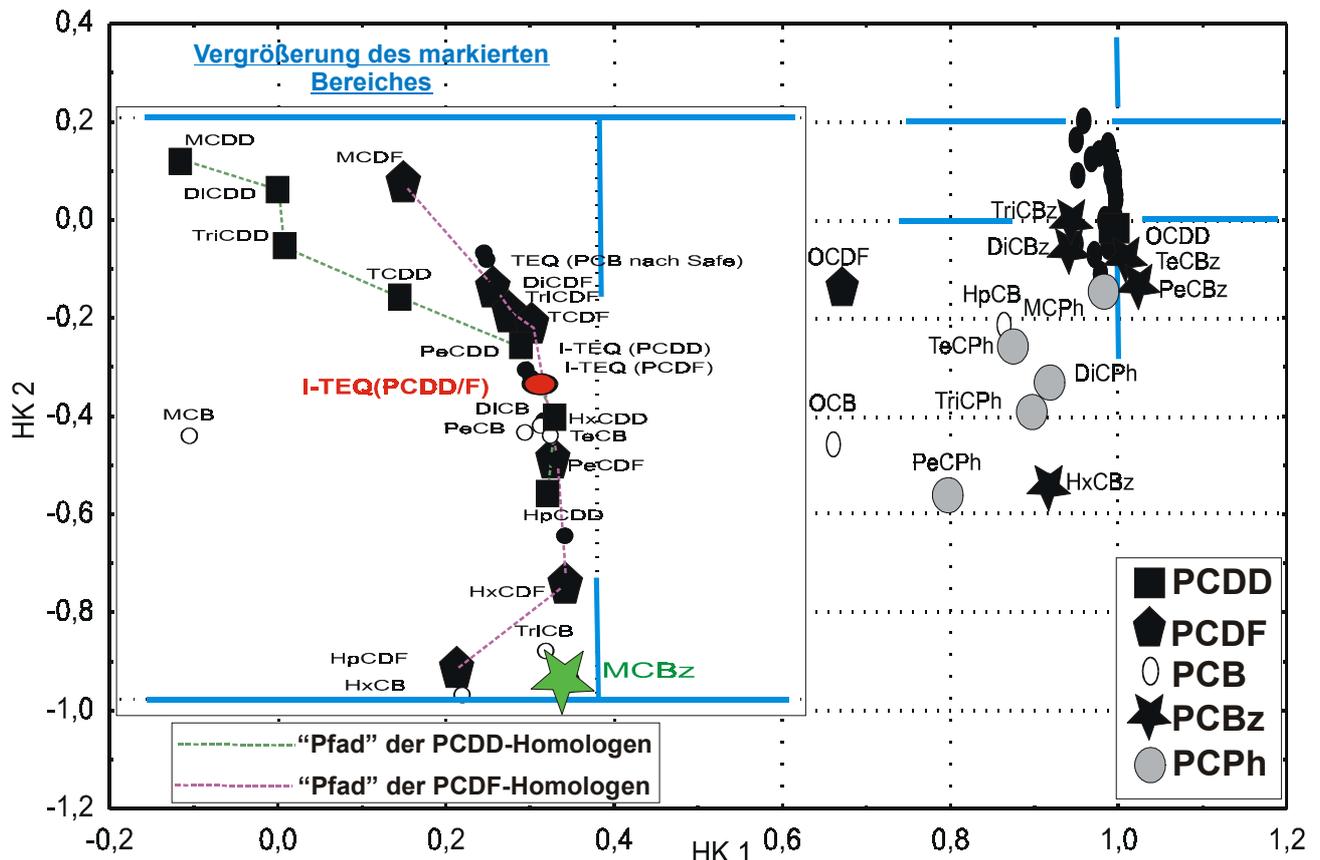


Abbildung 4.1-12: Loading plot des Datensatzes der HVA (erklärte Varianzen der Hauptkomponenten HK1: 77% , HK2: 13%)

Die erklärte Varianz der ersten zwei HK für die HKA an der HVA in Abbildung 4.1-12 beträgt 90% und stellt damit den höchsten Wert aller hier durchgeführten HKA dar. Daraus läßt sich ableiten, daß sich die Homologenmuster der Chloraromaten gemäß der ersten Hauptkomponente sehr ähnlich verhalten. Die zweite HK trennt vor allem die PCPh und PCBz von den PCDD/F ab. Dieses Ergebnis läßt den Schluß zu, daß sich die Homologenmuster der PCDD/F in den hier untersuchten Fällen (z.B. variierende Brennstoffmischungen oder Betriebsparameter) anders als die der PCBz und PCPh verhalten. Die Ergebnisse der HKA für die HVA stimmen mit den an der PVA gemachten Beobachtungen überein und könnten durch die Verwendung eines ähnlichen Brennstoffes (Holz) an beiden Anlagen verursacht sein. Phenolische Strukturen sind in den Brennstoffen an der PVA und HVA im Vergleich zu den Brennstoffgemischen an der SMVA und MVA stärker vorgelegt. Eine thermische Zersetzung dieser Grundstruktur führt zu einer Bildung

von phenolischen Verbindungen, wie dies in der Literatur für Guajacole und Phenole bereits gezeigt wurde (243), (16), (244).

Die zweite Hauptkomponente in der Abbildung 4.1-12 trennt niedrig chlorierte PCDD/F von den höher chlorierten Homologen und den übrigen Substanzklassen (PCB, PCB und PCPh) ab. Wie an den übrigen untersuchten Anlagen auch nehmen die niedrig chlorierten PCDD/F eine Sonderstellung bei der Chloraromatenbildung ein. Diese Sonderstellung wurde in der Abbildung 4.1-12 nochmals durch Linien hervorgehoben, welche den „Pfad“ der PCDD/F-Bildung verdeutlichen sollen. Am *score plot* in Abbildung 4.1-13 kann die Abhängigkeit der Bildung der niedrig chlorierten PCDD/F von den Betriebsbedingungen abgelesen werden (Zusammensetzung der Brennstoffgemische siehe Kapitel 3.1.3 und Anhang 7.4 Anhang C, Anhang C-1).

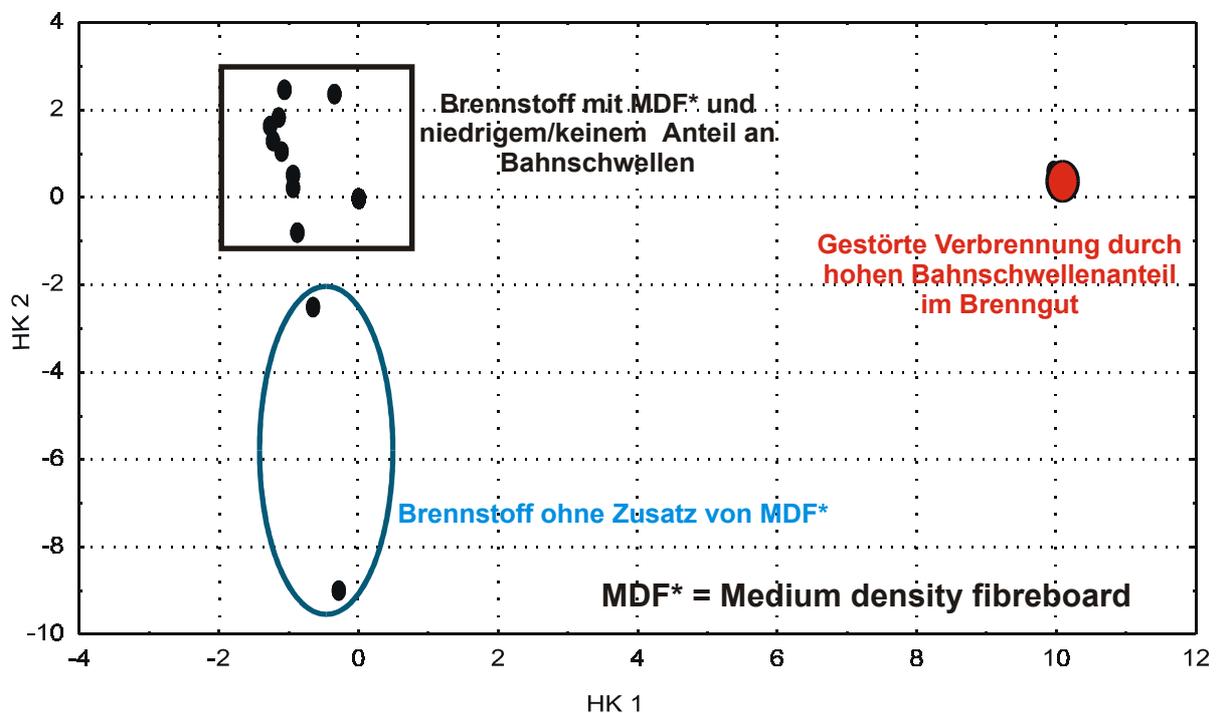


Abbildung 4.1-13: *Score plot* des Datensatzes der HVA

Die Brennstoffzusammensetzung stellt den wichtigsten Einflußfaktor bei der Gruppierung der Fälle im *score plot* in Abbildung 4.1-13 dar. Vor allem die gestörten Verbrennungsbedingungen, die vor allem bei einem hohen Anteil an behandeltem Altholz (imprägnierte Bahnschwellen) im Brennstoffgemisch auftraten (siehe Kapitel 4.5), führen auf der 1. HK zu einer starken Auftrennung der untersuchten Fälle. Ein weiterer wichtiger Parameter für die Varianz der Homologenprofile der Chloraromaten im *loading plot* ist der Einsatz von MDF (MDF = *medium density fibreboard*; preßspanplattenähnliches Material) im Brennstoffgemisch, wie dies die 2. HK im *score plot* zeigt. Der Einsatz von stickstoffhaltigem MDF im Brennstoff führte zu einer Reduzierung der Chloraromatenemissionen und einer Verschiebung der PCDD/F-Homologenmuster (19). Eventuell ist dies auf den Gehalt an stickstoffhaltigen

anorganischen Verbindungen im MDF zurückzuführen (5 Gew% Stickstoff), welcher zu einer Inhibierung der für die Chloraromatenbildung verantwortlichen katalytischen Zentren (Kupfer) in den Flugstäuben führen kann (Kapitel 2.4.3.2).

Ein weiterer limitierender Faktor für die Chloraromatenbildung bei der Holzverbrennung ist der Chlorgehalt im Brennstoff (7.4 Anhang C, Anhang C-2). Wird durch den Brennstoff, z.B. behandeltes Altholz, der Verbrennung Chlor zugeführt, so steigen die Emissionen für die Chloraromaten stark an. Ebenso führte ein zu hoher Anteil des kontaminierten Altholzes im Brennstoff zu Problemen bei der Steuerung des Abbrandes des Brennbettes auf dem Vorschubrost, was sich auch an den sehr hohen Werten (mehrere 10000 ppm) für die CO-Konzentration im Rauchgas ablesen läßt.

Um sich eine Übersicht über die für das On-line-Monitoring mit REMPI-TOFMS geeigneten niedrig chlorierten Surrogate für den I-TEQ Wert der PCDD/F zu verschaffen, werden in Abbildung 4.1-14 die KK zwischen den (I-)TEQ Werten und den niedrig chlorierten Kongeneren und Homologen an der HVA dargestellt.

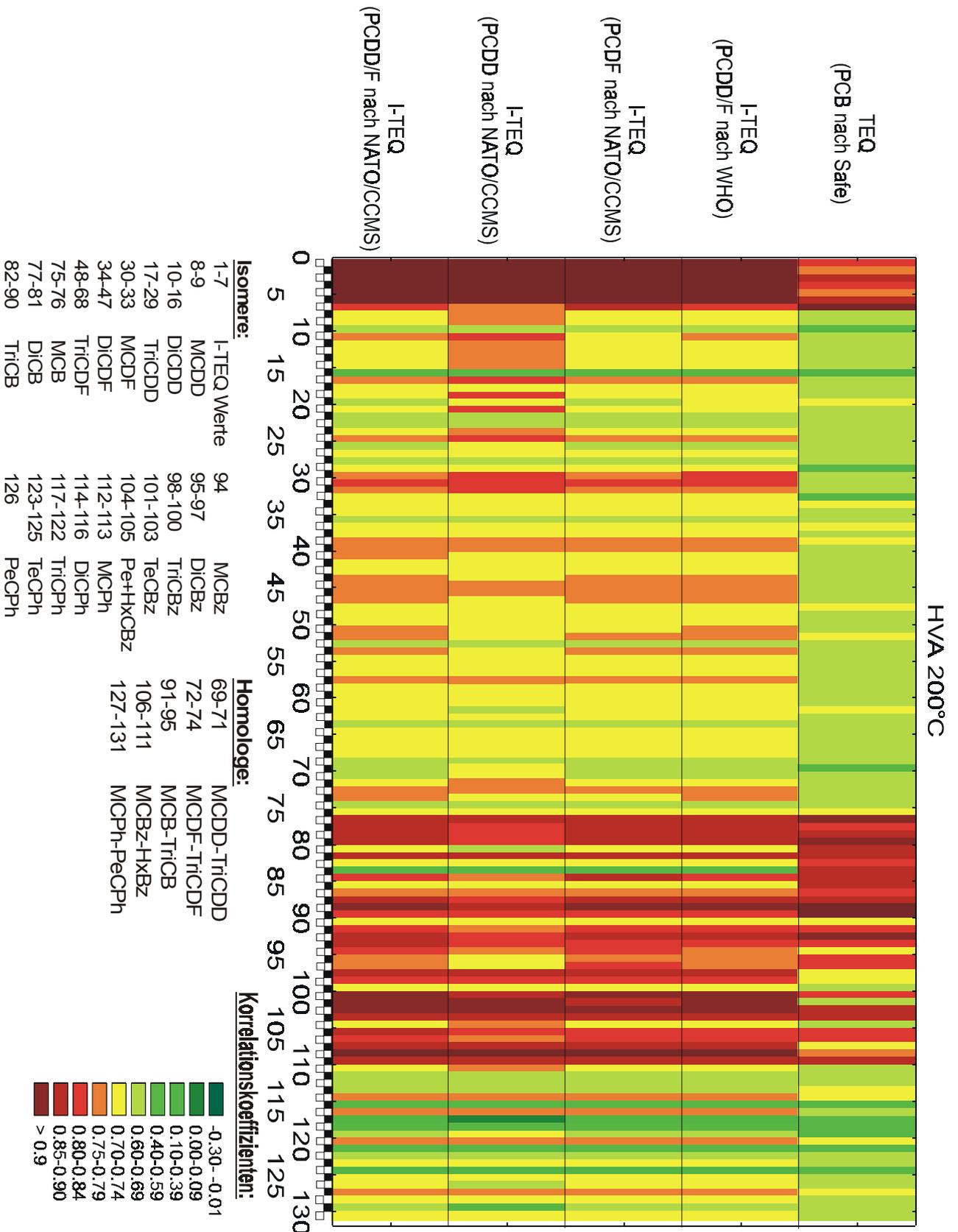


Abbildung 4.1-14: Korrelationskoeffizienten (KK) zwischen den Toxizitätsäquivalenten (gewichtet nach unterschiedlichen Toxizitätsfaktoren, vgl. Tabelle 2.2-1 und 2.2-2) verschiedener Substanzgruppen mit den niedrig chlorierten Kongeneren und Homologen der Chloraromaten an der HVA

Aus der Abbildung 4.1-14 geht hervor, daß einige Kongenere der Di/TriCDF gute Surrogate für den I-TEQ Wert der PCDD/F sind (7.4 Anhang C, Anhang C-6). Die PCPh zeigen ebenfalls hohe Werte für die KK. Im Gegensatz zu den Ergebnissen an der SMVA und der MVA finden sich an der HVA - in Analogie zu den Ergebnissen an der PVA - keine niedrig chlorierten PCDD als Surrogate für den I-TEQ Wert der PCDD/F. Dieses Ergebnis könnte ein Hinweis auf den Einfluß des Brennstoffes (Holz) auf die Korrelationen zwischen den Surrogaten und dem I-TEQ Wert der PCDD/F sein.

Die ein- bis zweifach chlorierten Benzole sind mögliche Surrogate für ein indirektes On-line-Monitoring des I-TEQ Wertes der PCDD/F mit REMPI-TOFMS (siehe Tabelle 3.3-1). Auch an der HVA wurde MCBz als Surrogat für die Konzentration des I-TEQ Wertes der PCDD/F identifiziert, und zwar wie an allen untersuchten Anlagen im Temperaturbereich zwischen 200°C bis 300°C, (siehe 7.4 Anhang C, Anhang C-5 und C-6). In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen Leitbeziehungen des I-TEQ Wertes der PCDD/F mit MCBz vorgestellt und Ergebnisse zu den ersten *on-line* Messungen dieser Verbindung mit REMPI-TOFMS an großtechnischen Anlagen gezeigt.

4.1.5 Chlorbenzol als Leitparameter

Wie im Kapitel 3.3.2 und 3.3.3 dargestellt wurde, kommen nur ein- bis maximal dreifach chlorierte Surrogatverbindungen mit Rauchgaskonzentrationen von mehr als 10 µg/m³ für das indirekte On-line-Monitoring des I-TEQ Wertes der PCDD/F mit REMPI-TOFMS in Betracht.

Da die niedrig chlorierten PCDD/F und PCB in Konzentrationen unterhalb von 10µg/m³ im Rauchgas gefunden wurden, scheidet diese Verbindungen nicht nur aufgrund ihrer z.T. ungünstigen spektroskopischen Eigenschaften, sondern eben auch wegen ihrer zu niedrigen Konzentration für ein On-line-Monitoring mit REMPI-TOFMS aus (vgl. Kapitel 3.3.3, Tabelle 3.3-1). Werden die spektroskopischen Eigenschaften, also die Konzentrationen und das Maß der Korrelationen der für ein REMPI-TOFMS Monitoring in Frage kommenden Surrogateverbindungen betrachtet, so erweisen sich die PCBz und hier insbesondere das MCBz als besonders geeignete Surrogate für den I-TEQ Wert der PCDD/F.

Bei einer Temperatur von 200°C ist im Rohgas die Bildung der Chloraromaten abgeschlossen, und die Konzentrationen der Verbindungen haben ein Maximum erreicht (245). Um sicherstellen, daß für das On-line-Monitoring mit REMPI-TOFMS eine für den Nachweis ausreichend hohe Substanzkonzentration im Rauchgas vorliegt, wurde das On-line-Monitoring von MCBz bei diesen Temperaturen durchgeführt. Die für die Anlagen bei circa 200°C gezeigten Leitbeziehungen in Abbildung 4.1-16 ermöglichen es, aus den mit REMPI-TOFMS gemessenen MCBz-Konzentrationen den I-TEQ Wert der PCDD/F zu errechnen.

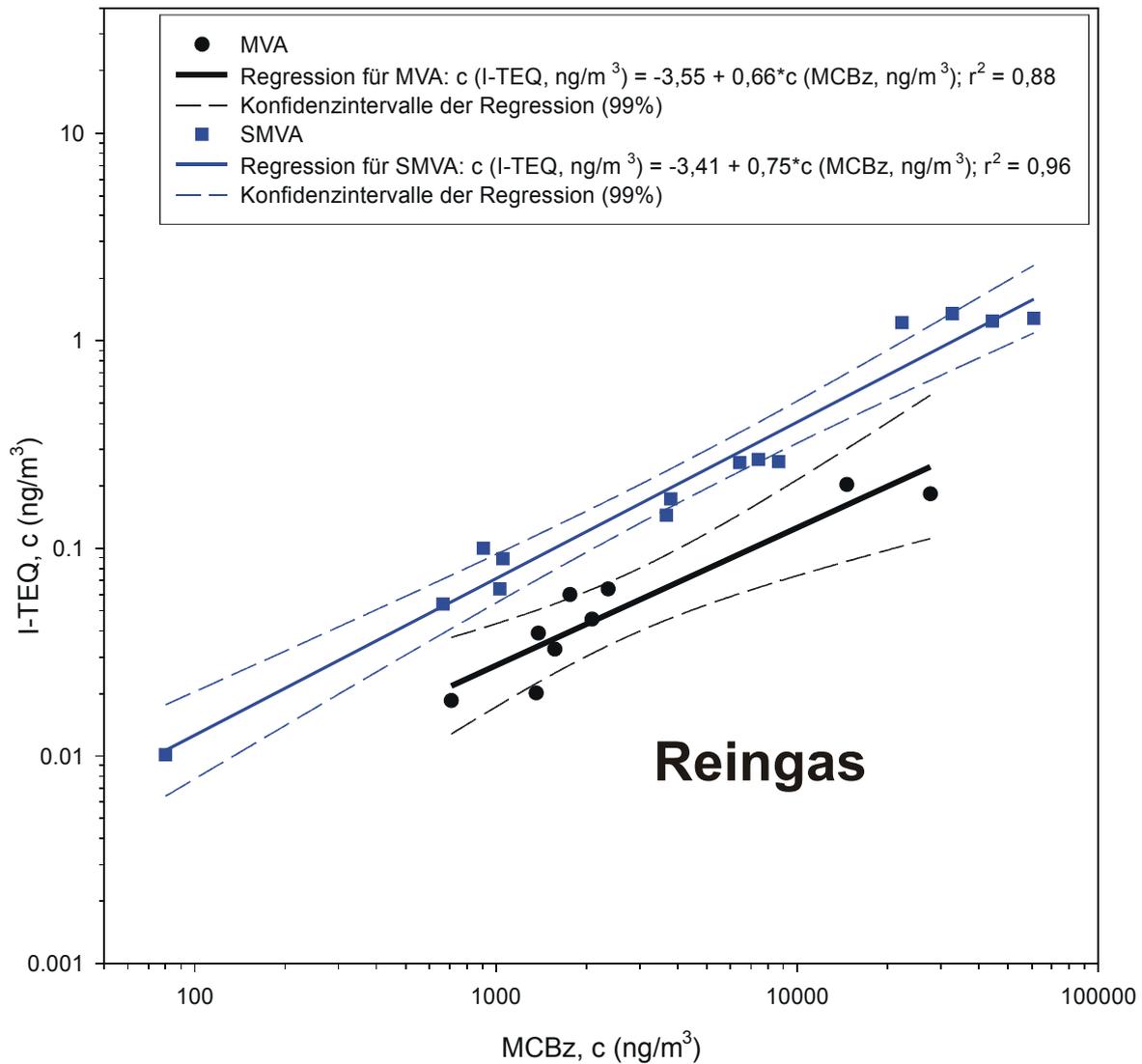


Abbildung 4.1-15: Regressionsgeraden zwischen Chlorbenzol und dem I-TEQ Wert der PCDD/F im Reingas der 22 MW Hausmüllverbrennungsanlage und 22 MW Sondermüllverbrennungsanlage

Aus der Abbildung 4.1-15 wird ersichtlich, daß der Konzentrationsbereich der Emissionen im Reingas der SMVA deutlich größer als an der MVA ist. Die Ursache hierfür ist in den unterschiedlichen Anlagentypen begründet. An der SMVA werden neben flüssigem und pastösem Sondermüll auch Fässer in den Drehrohröfen verbrannt. Falls mehrere dieser Fässer einen Müll enthalten, welcher schlagartig O₂ im Drehrohr verbraucht, so daß eine CO-Spitze in der Anlage entsteht, kommt es zu einer vermehrten Schadstoffbildung in der Anlage. Die Nachbrennkammer und die Abgasreinigungsaggregate der Anlage können derartige Konzentrationsspitzen nicht kompensieren, so daß sich diese in abgeschwächter Form bis in das Reingas fortpflanzen (Kapitel 3.1.2). Im Gegensatz dazu wird der Rost an der MVA kontinuierlich mit festem Hausmüll chargiert. Diese Art der Beschickung der MVA führt, eine relativ einheitliche Hausmüllzusammensetzung vorausgesetzt, nur gelegentlich zu Konzentrationsspitzen der untersuchten Substanzgruppen. Der relativ enge Konzentrationsbereich der ermittelten Wertepaare an der MVA hat zur Folge, daß

aufgrund der stärkeren Streuung der Meßwerte das Bestimmtheitsmaß der Regression (r^2) abnimmt.

Es muß erwähnt werden, daß nur ein sehr geringer Anteil der Reingasproben einer Probenahme nach VDI DIN 3499 entsprechen (57), da der dort vorgeschlagene Probenahmezeitraum von 6h z.T. auf 1h reduziert wurde, um kurzfristige Änderungen in den Emissionswerten zu erfassen (vgl. Abbildung 4.2-2). Diese kurzzeitige Probenahme kann auch zu einer stärkeren Streuung des Meßwertbereiches beitragen, wie dies an der SMVA beobachtet wurde.

In der Abbildung 4.1-16 sind die Regressionsgeraden zwischen MCBz und dem I-TEQ Wert der PCDD/F im Rohgas der SMVA, MVA und HVA bei 200°C dargestellt.

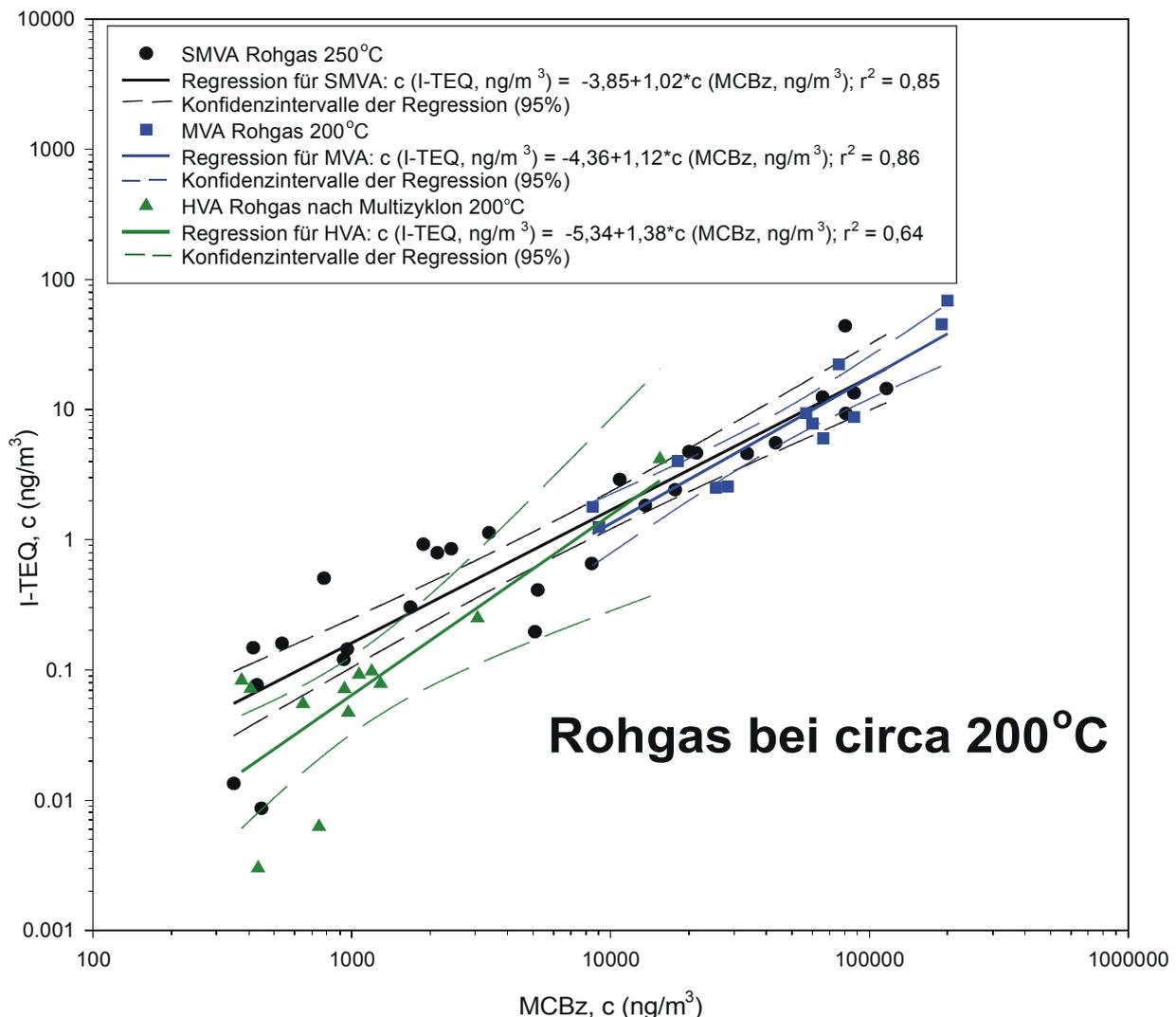


Abbildung 4.1-16: Regressionsgeraden zwischen Chlorbenzol und dem I-TEQ Wert der PCDD/F im Rohgas bei circa 200°C an der 22 MW Sondermüllverbrennungsanlage, der 22 MW Hausmüllverbrennungsanlage und 15 MW Holzverbrennungsanlage

An allen drei Anlagen weisen die in der Abbildung 4.1-16 angegebenen Regressionskoeffizienten unterschiedliche Werte auf, was die Abhängigkeit der Korrelationen von den Anlagentypen und -parametern zeigt. Für die Regressionsgeraden im Rohgas wird deutlich, daß die

Regressionsgerade der SMVA den größten Wertebereich der untersuchten Substanzen abdeckt. Bei niedrigen Werten für MCBz und den I-TEQ Wert ist die Streuung der Werte an allen Anlagen größer. Die höchsten in der Abbildung 4.1-16 aufgetragenen I-TEQ Werte an allen Anlagen entsprechen Probenahmen, während derer CO-Spitzen durch eine Reduzierung der Luftmengen provoziert worden sind, d.h. also Bedingungen wie sie äußerst selten im Normalbetrieb auftreten. Die dargestellten Konfidenzintervalle der Regressionsgeraden für das Rohgas beruhen auf einem Signifikanzniveau von 5%, was sich im Vergleich zu den Reingasmessungen ($\alpha = 1\%$) in den sehr schmalen Vertrauensbereichen für die Regressionsgeraden im Rohgas der SMVA und MVA zeigt. Für die HVA fallen die Flächen der Konfidenzintervalle der Regressionsgerade in der Abbildung 4.1-16 breiter aus, da die Daten sehr stark streuen.

Zusammenfassend kann aus den für das Rein- und Rohgas abgebildeten Regressionsgeraden gefolgert werden, daß Chlorbenzol eine sehr gute Leitverbindung für den I-TEQ Wert der PCDD/F im Rauchgas der untersuchten Anlagen darstellt. Vor allem für höhere Konzentrationen, d.h. während provozierter CO-Spitzen, ist der statistische Zusammenhang zwischen MCBz und dem I-TEQ sehr stark und damit stellt MCBz ein relativ sensibles Surrogat für das Auftreten von Anlagenstörungen dar. Bei niedrigen Konzentrationen des MCBz besteht eine größere Unsicherheit bei der Vorhersage des I-TEQ Wertes. Diese niedrigen MCBz-Konzentrationen entsprechen den Anlagennormalbedingungen unter denen keinerlei Primärmaßnahmen nötig sind, um den Grenzwert des I-TEQ Wertes von 0.1 ng/m^3 einzuhalten.

Um einen Überblick für die Gültigkeit der Leitbeziehungen zwischen dem I-TEQ Wert der PCDD/F und MCBz zu erhalten, werden die Bestimmtheitsmaße (r^2) der statistischen Beziehungen dieser beiden Verbindungen für alle Probenahmepunkte an der PVA, der SMVA und der MVA in der Tabelle 4.1-1 aufgelistet.

Tabelle: 4.1-1: Bestimmtheitsmaße (r^2) der Korrelationen zwischen dem I-TEQ Wert der PCDD/F und MCBz für alle untersuchten Anlagentypen und Temperaturen

Anlagentyp	Bestimmtheitsmaß (r^2)
PVA	0.73
SMVA (700°C)	0.98
SMVA (250-300°C)	0.85
SMVA (70°C; Reingas)	0.96
MVA (700°C)	0.05
MVA (550-600°C)	0.85
MVA (200°C)	0.86
MVA (90°C; Reingas)	0.88
HVA	0.64

Auffallend für die in der Tabelle 4.1-1 gezeigten Bestimmtheitsmaße ist, daß sich der statistische Zusammenhang für MCBz und dem I-TEQ bereits im Hochtemperaturbereich der Anlagen findet. Dieses Ergebnis gibt einen Hinweis auf die bereits bei hohen Temperaturen ablaufenden Bildungsprozesse der Chloraromaten (siehe Kapitel 4.3).

4.1.6 Zusammenfassung

Durch die konventionellen Messungen konnte an vier unterschiedlichen Verbrennungsanlagen gezeigt werden, daß eine Reihe von niedrig chlorierten Verbindungen stark mit dem I-TEQ Wert der PCDD/F korreliert ist. Im Gegensatz zu der Literatur zeigen die in der hier vorgestellten Arbeit gefundenen Ergebnisse, daß sowohl die Homologenprofile der Chloraromaten als auch die Regressionsgeraden vom Anlagentyp abhängig sind. Die PCDD/F-Homologenkonzentrationen weisen, wie es aus der Literatur bekannt ist, keine oder nur eine sehr schlechte Korrelation mit dem I-TEQ Wert der PCDD/F auf (217), (169), (200). Durch multivariate Regression, d.h. durch die Vorhersage des I-TEQ Wertes der PCDD/F durch mehrere Surrogate, wurden in der Literatur sehr hohe Werte für das Bestimmtheitsmaß gefunden (217). Diese Ergebnisse sind für die Zielsetzung dieser Arbeit, d.h. für eine Messung der Surrogate mit REMPI-TOFMS, nur von geringer Bedeutung, da der apparative Aufwand für die Messung von mehreren Surrogaten mit REMPI-TOFMS unter Anlagenbedingungen zu groß ist. Die in der Literatur als Surrogate im Reingas an drei unterschiedlichen großtechnischen Feuerungsanlagen identifizierten PCDD/F-Kongeneren (1,2,3+2,4,6-TriCDF (217)) stellen sowohl im Roh- als auch im Reingas der SMVA und der MVA in der hier vorgestellten Arbeit ebenfalls Surrogate für den I-TEQ Wert dar. Die Homologenprofile der PCDD/F werden an allen Anlagen durch die Anlagenbedingungen (z.B. CO-Spitzen) beeinflusst. Vor allem die niedrig chlorierten PCDD/F sind empfindliche Parameter für verschlechterte Verbrennungsbedingungen und weisen mit Ausnahme der PVA auf einen hohen I-TEQ Wert der PCDD/F im Rauchgas hin (121), (120).

Einzelne höher chlorierte PCBz und PCPh wurden als Surrogate für die Emissionen der PCDD/F bzw. des I-TEQ Wertes an allen Anlagen gefunden. Vor allem wird eine Reihe niedrig chlorierter Kongenerer der PCBz und PCPh an den untersuchten Anlagen als Surrogate identifiziert (208), (209), (169), (212). In den Ergebnissen der hier vorgestellten Arbeit wird gezeigt, daß die niedrig chlorierten PCBz und vor allem MCBz hervorragende Surrogate für den I-TEQ Wert der PCDD/F sind.

Die Ergebnisse der Messungen an der PVA nehmen bezüglich der Verhältnisse der Chloraromaten untereinander eine Sonderstellung ein. Vergleicht man die Verhältnisse der Konzentrationen zwischen PCBz (PCB) und PCDD/F an der PVA mit denjenigen aus dem Hochtemperaturbereich der übrigen Anlagen, so ist auffällig, daß diese Verhältnisse an der PVA um den Faktor 2 ($\Sigma\text{PCBz}/\Sigma\text{PCDD/F}$) bzw. 134 ($\Sigma\text{PCB}/\Sigma\text{PCDD/F}$) größer sind (Abbildung 4.1-17).

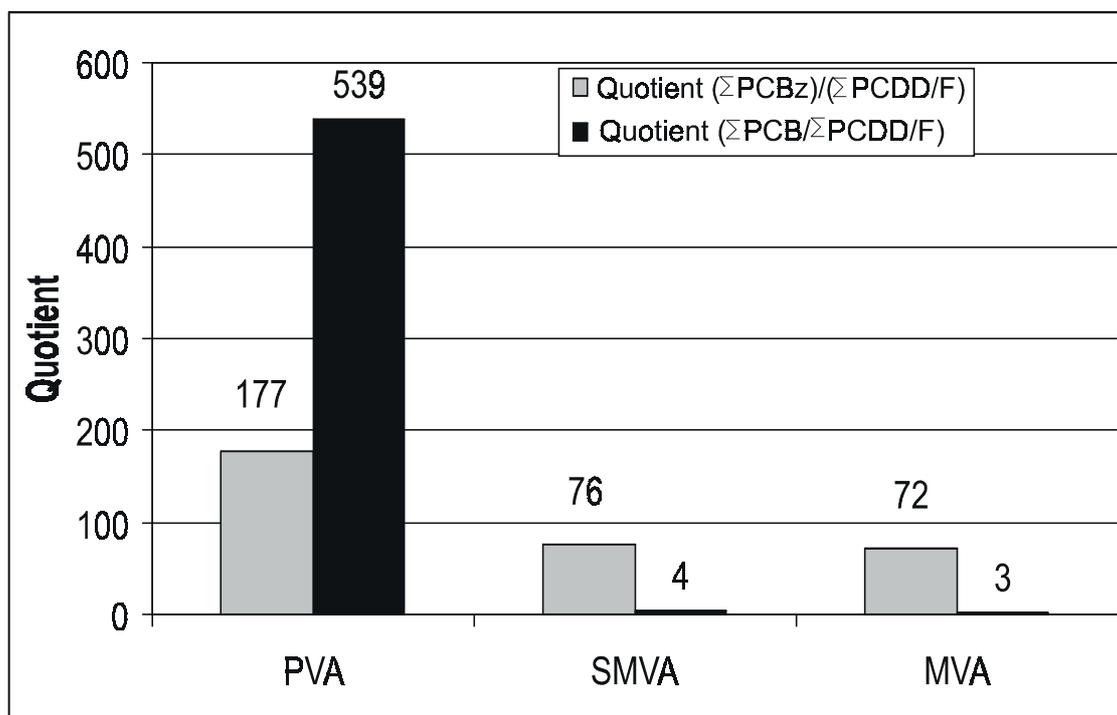


Abbildung 4.1-17: Quotienten für Chloraromatenkonzentrationen (Summe über alle Homologenkonzentrationen der PCBz, PCDD/F und PCB) im Hochtemperaturbereich der PVA, SMVA und MVA

Das in Abbildung 4.1-17 gezeigte Ergebnis, die im Vergleich zu der MVA und SMVA an der PVA sehr hohen relativen PCBz- und PCB-Konzentrationen, kann mit Hilfe der speziellen Betriebsbedingungen an der PVA erklärt werden: Auf dem Rost der PVA wurde in sechs der neun untersuchten Fälle eine Pyrolyse des Holzes durchgeführt. Durch diese unterstöchiometrischen Verbrennungsbedingungen findet die primäre Bildung der untersuchten Verbindungen unter Sauerstoffmangel statt. Sauerstoffhaltige Verbindungen, wie PCDD/F, werden dabei in geringerem Ausmaß gebildet werden, wie dies auch aus der Literatur hervorgeht (158), (159). Als Ergebnis findet sich an der PVA ein Chloraromatenprofil, welches sich stark von dem an der SMVA und MVA beobachteten unterscheidet.

Am Probenahmepunkt im Rohgas der PVA stellen die niedrig chlorierten PCDD/F im Gegensatz zu allen anderen Anlagen keine Surrogate für den I-TEQ Wert der PCDD/F dar. Gestörte Anlagenbedingungen führen zu einem Konzentrationsanstieg der niedrig chlorierten PCDD/F über Größenordnungen, was wahrscheinlich auf eine Chlorierung der während instationären Betriebsbedingungen in hohen Konzentrationen vorhandenen unchlorierten Grundgerüste der PCDD/F zurückzuführen sein könnte. Im Gegensatz dazu zeigen die den I-TEQ tragenden höher chlorierten PCDD/F keinen Konzentrationsanstieg unter instationären (vgl. Kapitel 4.4.1) (122), (185). Die Konzentrationen der PCBz und PCB, sowohl der hoch als auch der niedrig chlorierten Kongeneren, bewegen sich vor und während der instationären Betriebsbedingungen in der gleichen Größenordnung (vgl. Kapitel 4.4.1).

Der Chlorgehalt stellt ebenfalls einen wichtigen Parameter bei der Chloraromatenbildung dar (vgl. Kapitel 2.4.3.2) (130), (129). Der HCl-Gehalt im Rauchgas der PVA lag bei 20-50 mg/m³ und weist damit den niedrigsten Wert im Rauchgas aller untersuchten Anlagen auf (7.4 Anhang C, Anhang C-2). Dieser niedrige Chlorgehalt kann dazu beitragen, daß zwar niedrig chlorierte, aber keine oder nur in niedrigen Konzentrationen höher chlorierten Verbindungen während der instationären Betriebsbedingungen gebildet werden können.

Das an der PVA beobachtete Verhalten bei der Bildung der untersuchten Chloraromaten zeigt deutlich, daß die Ultrapurenchemie der Verbrennung oftmals eigenen physikalisch-chemischen Gesetzen gehorcht und deshalb als *trace chemistry of fire* angesprochen wird (246).

4.2 Anwendung der Leitbeziehungen: On-line-Monitoring mit REMPI-TOFMS

In diesem Abschnitt werden Ergebnisse aus den *on-line* REMPI-TOFMS Messungen von Chlorbenzol an der SMVA und MVA dargestellt. Ein Überblick der Möglichkeiten des Einsatzes dieser Analysetechnik für die *on-line* Überwachung ist in der Literatur zu finden (13), (23), (14), (183). Die gezeigten Messungen wurden ausschließlich im Rohgas von Anlagen bei Temperaturen von circa 200°C durchgeführt. In Abbildung 4.2-1 werden die mit REMPI-TOFMS auf der Massenspur m/z 112 an der SMVA und MVA gemessenen Chlorbenzolkonzentrationsverläufe gegenübergestellt.

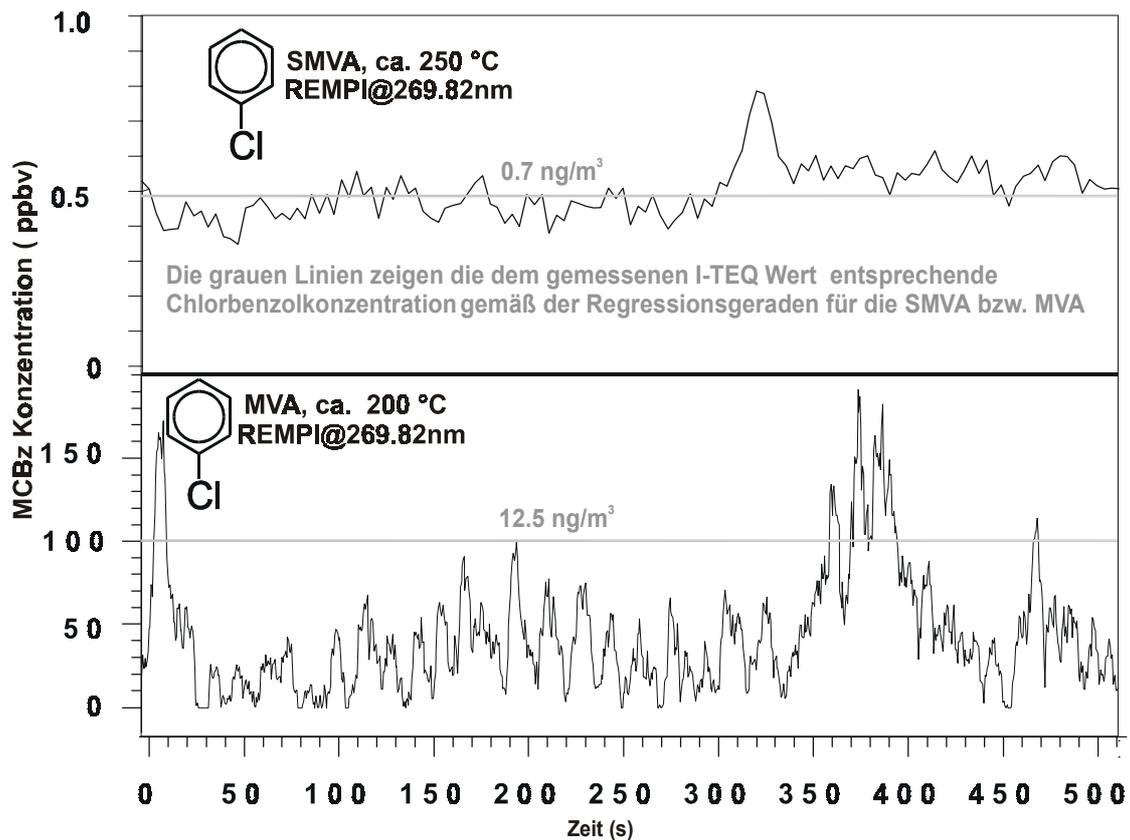


Abbildung 4.2-1: REMPI-TOFMS MCBz-Konzentrationsverläufe an der SMVA und MVA (aus: (247))

Die unterschiedlichen MCBz-Konzentrationsniveaus der SMVA und MVA sind in der Abbildung 4.1-1 deutlich zu erkennen. An beiden untersuchten Anlagen waren während der Aufnahme des MCBz-Konzentrationsverlaufs die Verbrennungsbedingungen optimal, so daß die Konzentrationsänderungen des MCBz als prozeßabhängige Fluktuationen im Normalbetrieb angesehen werden müssen. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, daß die Konzentration von MCBz an der SMVA aufgrund der um circa 400°C höheren Temperaturen in der Nachbrennzone im Vergleich zur MVA (SMVA circa 1200°C, MVA circa 800°C) niedriger sind. Ein weiteres Kriterium für das Ausmaß der Bildung von Chloraromaten in Verbrennungsprozessen stellt die Verweilzeit der Rauchgase in dem für die Bildung entscheidenden Temperaturbereich

zwischen 700°C bis 200°C dar. Die Verweilzeit der Rauchgase in diesem Temperaturbereich war an der hier untersuchten MVA um circa 30% höher als an der SMVA. Wahrscheinlich sind die beobachteten Unterschiede in den Konzentrationsniveaus von MCBz an der SMVA und MVA auf die hohen Temperaturen in der Nachbrennkammer an der SMVA und die längeren Verweilzeiten der Rauchgase im Temperaturbildungsfenster der Chloraromaten an der MVA zurückzuführen.

Die Unterschiede in der Dynamik der Konzentrationsverläufe für MCBz zwischen der SMVA und MVA sind in der Abbildung 4.2-1 deutlich zu erkennen. Diese Ergebnisse stehen im Zusammenhang mit dem höheren Konzentrationsniveau von MCBz an der MVA, welches es ermöglicht, die Mittelung der Konzentrationen von MCBz über kleinere Zeitintervalle durchzuführen und damit einen zeitlich hoch aufgelösten Konzentrationsverlauf darzustellen.

In der Abbildung 4.2-1 kann mit Hilfe der Regressionsgeraden der SMVA und MVA aus Abbildung 4.1-16 ein mittleres Konzentrationsniveau für die zu den MCBz-Konzentrationen korrelierten I-TEQ Werte angegeben werden.

Durch zeitgleiche konventionelle Probenahmen im Roh- (bei 200°C) und Reingas (bei ca. 70°C) konnte an der SMVA gezeigt werden, daß die Konzentrationsverläufe der PCBz auch in kürzeren Zeitintervallen (15 Minuten) mit dem Konzentrationsverlauf des I-TEQ Wertes der PCDD/F übereinstimmen (Abbildung 4.2-2).

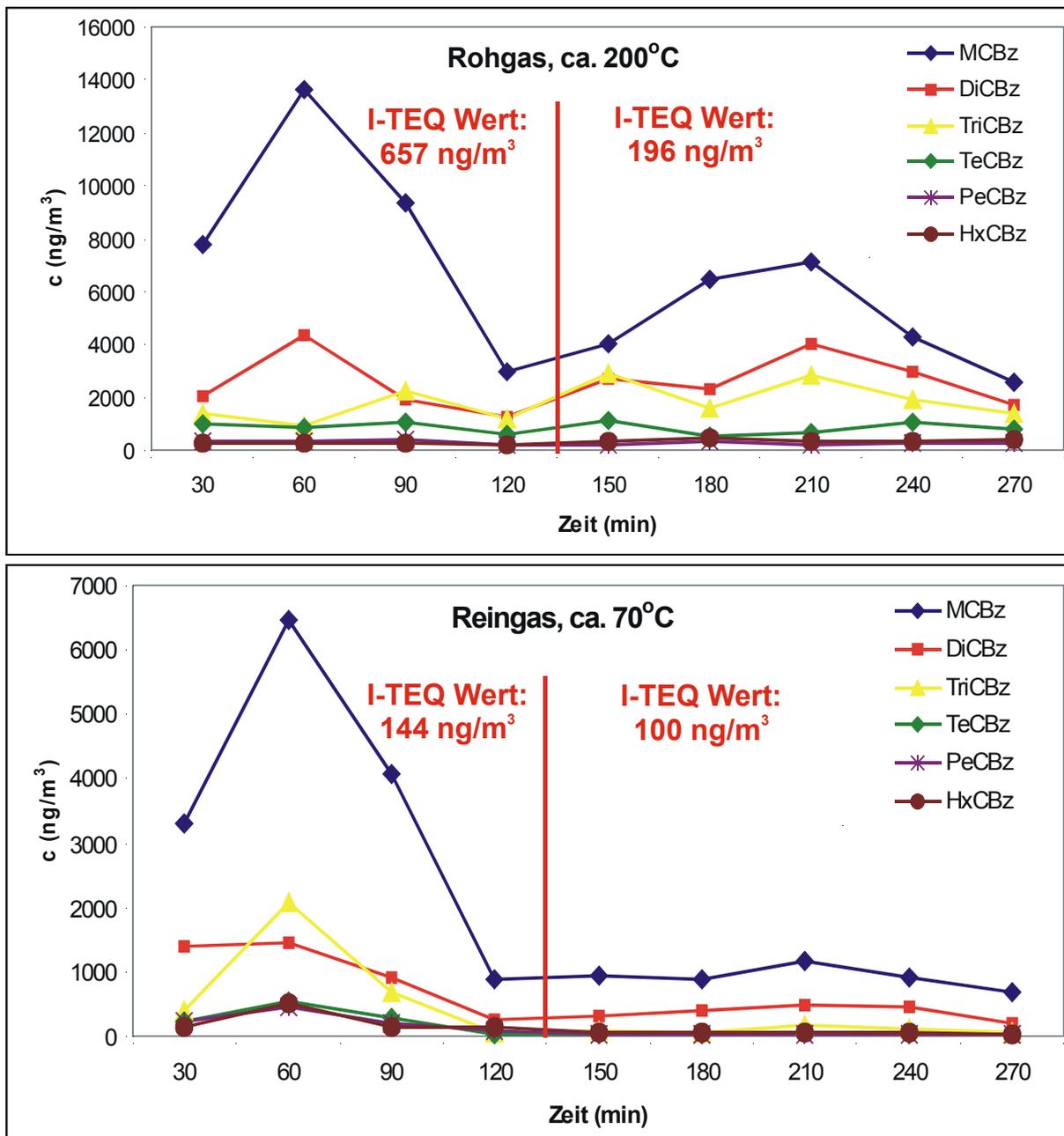


Abbildung 4.2-2: Chlorbenzolkonzentration und I-TEQ Wert an der SMVA in zeitlich aufgelösten Intervallen im Roh- und Reingas (konventionelle Messungen)

In der Abbildung 4.2-2 ist gut erkennbar, daß Konzentrationsspitzen in den Konzentrationsverläufen der PCBz und des I-TEQ Wertes parallel im Roh- und Reingas auftreten. Der zeitgleiche Anstieg der PCBz-Konzentrationen und des I-TEQ Wertes der PCDD/F im Bereich von Minuten legt die Vermutung nahe, daß die Leitbeziehungen auch für kürzere Zeitintervalle Gültigkeit besitzen, z.B. bei REMPI-TOFMS Messungen.

Zur Verifikation des MCBz Signals (m/z 112) bei dem On-line-Monitoring mit REMPI-TOFMS wird neben der Molekülmasse auch die m/z 114 (³⁷Cl-Isotop von MCBz) aufgezeichnet (Abbildung 4.2-3).

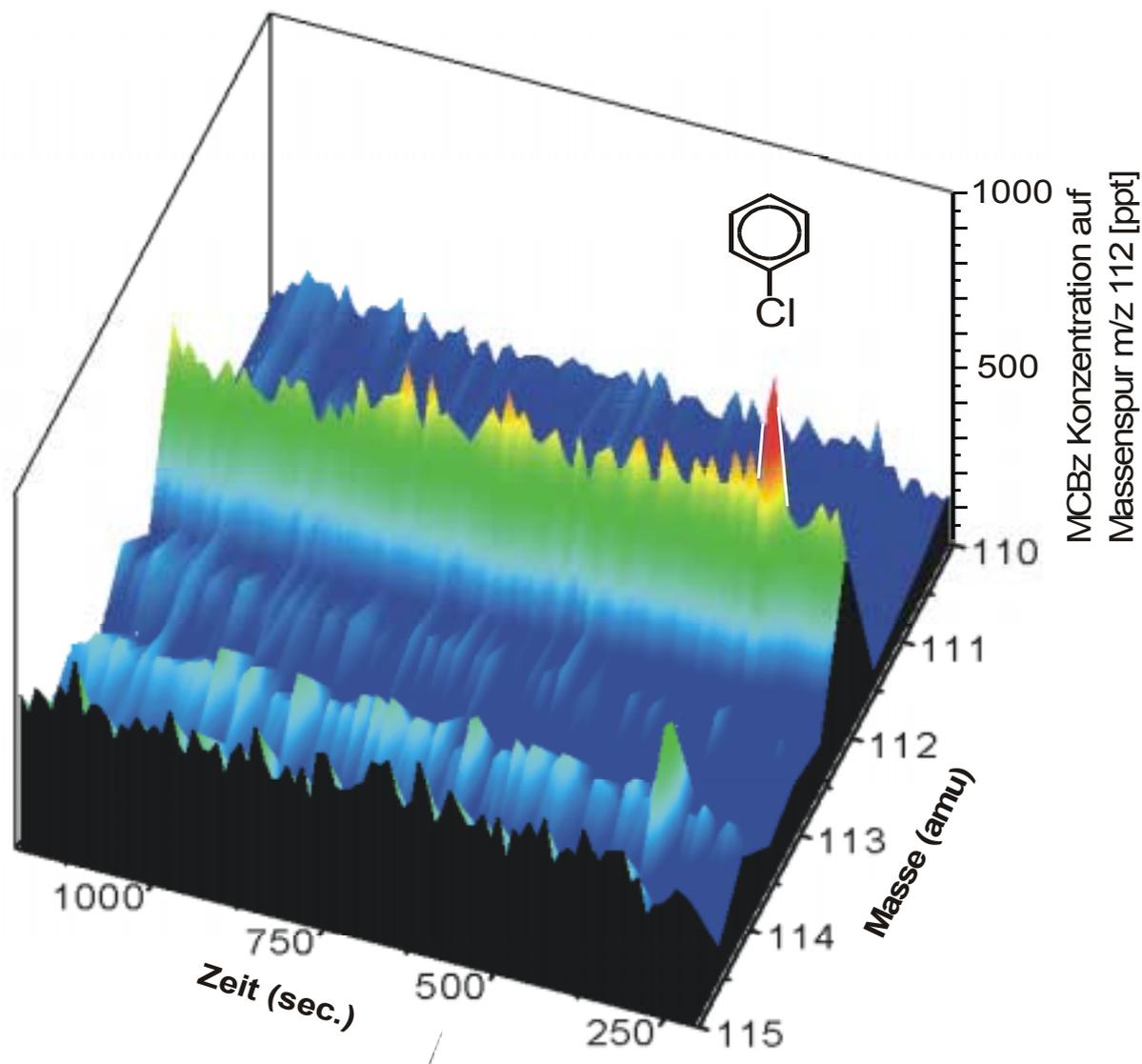


Abbildung 4.2-3: MCBz-Konturplot an der SMVA (aus: (14))

Der Konturplot in Abbildung 4.2-3 zeigt für MCBz die beiden Massenspuren m/z 112 und 114. Das Chlorisotopenverhältnis der beiden Massenspuren (m/z 112 und m/z 114) des MCBz von 70 zu 30 kann aus der Abbildung 4.2-3 abgelesen werden. Im Vergleich zu den niedrig chlorierten Kongeneren der PCDD/F weisen die Massenspuren von MCBz keinerlei Störungen von isobaren Massenspuren auf (vgl. Kapitel 3.3.3, Tabelle 3.3-1).

Die für das On-line-Monitoring von MCBz gezeigten Ergebnisse im Rohgas der MVA und SMVA legen nahe, daß diese Substanz als Einzelkomponente zur Überwachung des I-TEQ Wertes der PCDD/F verwendet werden kann.

In Abbildung 4.2-4 wird für die MVA und die SMVA ein Massenspektrum im Rohgas bei circa 200°C gezeigt.

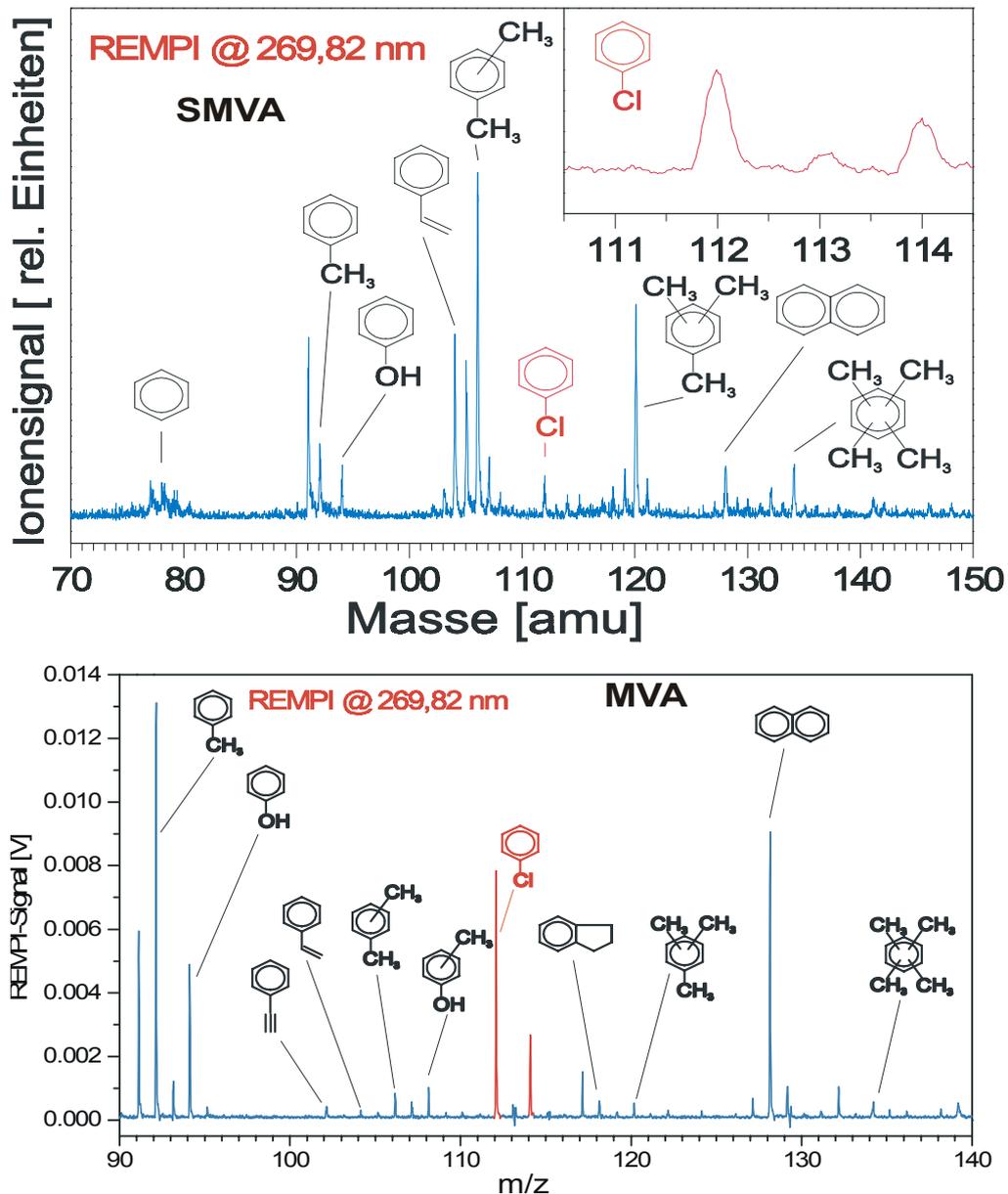


Abbildung 4.2-4: Massenspektren an der SMVA und MVA aufgenommen mit REMPI @269,82nm (aus: (14), (184))

Die MCBz-Massenspuren sind neben einer Reihe weiterer Massenspuren wie die der für den Verbrennungsprozeß typischen Verbindungen, Toluol und Phenol, in der Abbildung 4.2-4 gut zu erkennen. An der MVA und SMVA finden in den Massenspektren ähnliche aromatische Verbindungen, allerdings ist das Muster dieser Verbindungen an den beiden Anlagen stark von den spezifischen Anlagenbedingungen, z.B. der CO-Konzentration, beeinflusst (107).

Obwohl aromatische und chloraromatische Verbindungen immer nebeneinander in Verbrennungsprozessen anzutreffen sind, kann im allgemeinen nicht davon ausgegangen werden, daß aromatische Verbindungen ebenfalls Surrogate für die Chloraromatenbildung darstellen. Unter instationären Verbrennungsbedingungen konnte in der hier vorgestellten Arbeit für die Daten der MVA gezeigt werden, daß die Konzentrationen einiger PAK mit dem I-TEQ Wert der

PCDD/F korrelieren (siehe Kapitel 4.4.3). Im Gegensatz dazu ließ sich an der PVA unter instationären Verbrennungsbedingungen kein statistischer Zusammenhang zwischen den PAK-Konzentrationen und dem I-TEQ Wert der PCDD/F finden (siehe Kapitel 4.1.1). Auch die in der Literatur bisher veröffentlichten Ergebnisse über einen statistischen Zusammenhang zwischen den PAK-Konzentrationen und dem I-TEQ Wert der PCDD/F zeigen einerseits eine starke positive Korrelation (151) und andererseits keine oder sogar eine negative Korrelation (148). Die Bildung der Chloraromaten und Aromaten im Rauchgas wird wahrscheinlich durch eine Reihe von weiteren Parametern, z.B. durch die Chlorkonzentration und durch die Konzentration von anorganischen Verbindungen (SO_2 und NO_x), stark beeinflusst, so daß eine Aussage über die statistischen Zusammenhänge zwischen beiden Substanzklassen zusätzlich erschwert wird (vgl. Kapitel 2.4.3, (148), (144)).

Um die unterschiedliche Dynamik der Bildung von Aromaten und Chloraromaten im Rauchgas aufzuzeigen, wurden in Abbildung 4.2-5 die Konzentrationsverläufe von Chlorbenzol und Naphthalin an der SMVA dargestellt.

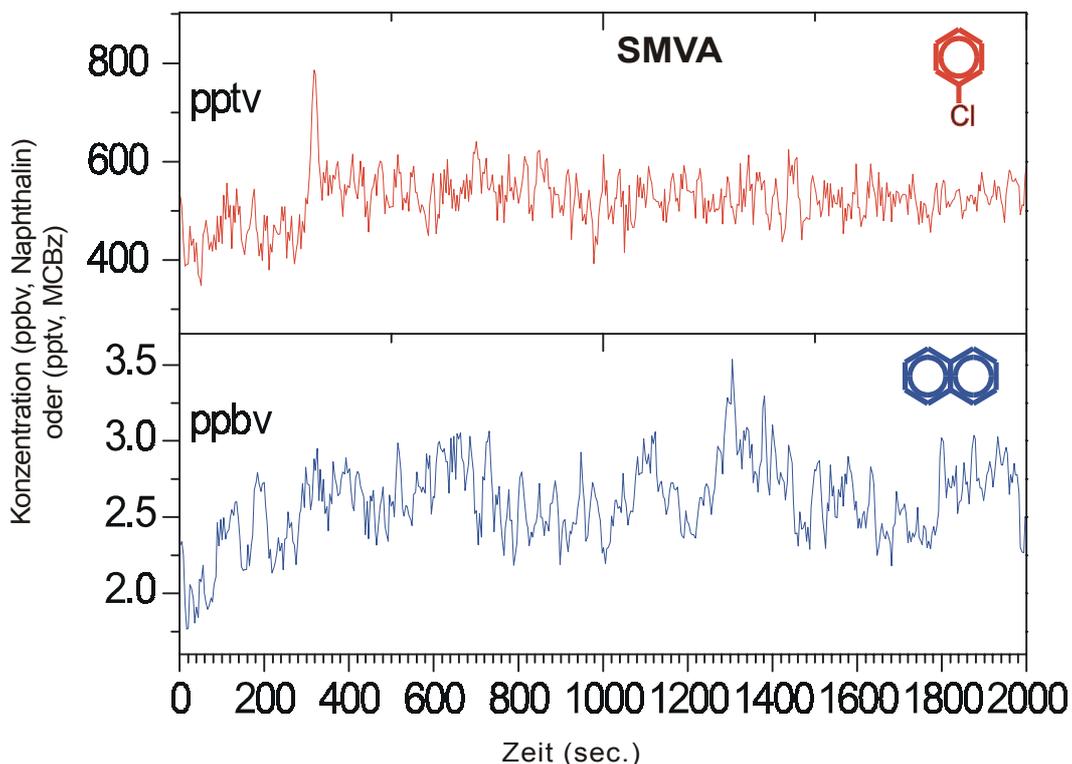


Abbildung 4.2-5: Konzentrationsverläufe von Chlorbenzol und Naphthalin an der SMVA, aufgenommen mit REMPI @269,82nm

Die Konzentrationsspitzen von MCBz haben keine Entsprechungen auf der Naphthalinmassenspur. Im Beispiel der MVA (ohne Abbildung) ist sogar ein gegenläufiges Verhalten der Konzentrationen von beiden Substanzen bei REMPI-TOFMS Messungen beobachtet worden (184). Aufgrund der in Kapitel 4.1.3 (Abbildung 4.1-9) gezeigten HKA und dem Konzentrationsverlauf aus Abbildung 4.2-5 wird klar, daß die PAK unter

Anlagennormalbedingungen keine geeigneten Leitverbindungen für die Chloraromatenbildung darstellen. Die hohe zeitliche Auflösung der Massenspektren in Abbildung 4.2-5 macht deutlich, mit welcher Dynamik die Schadstoffbildung im Spurenbereich abläuft.

Prinzipiell läßt sich feststellen, daß Chlorbenzol mit REMPI-TOFMS an großtechnischen Feuerungsanlagen gemessen werden kann. Aufgrund sowohl seiner spektroskopischen Eigenschaften (Kapitel 3.3.3, Tabelle 3.3-1) als auch aufgrund seines hohen Korrelationskoeffizienten mit dem I-TEQ Wert der PCDD/F stellt es an den untersuchten Anlagen das am besten geeignete Surrogat für den I-TEQ Wert der PCDD/F dar.

Durch das On-line-Monitoring mit REMPI-TOFMS kann die hohe zeitliche Dynamik der Bildung von aromatischen und chloraromatischen Verbindungen in Verbrennungsprozessen sehr gut erfaßt werden.

4.3 Untersuchungen zu den Bildungsmechanismen der Chloraromaten

Im folgenden Kapitel werden Untersuchungen zur Bildung der Chloraromaten im Rauchgaskanal der SMVA und der MVA vorgestellt. Um eine Aussage über die Chloraromatenbildung in der Nachbrennzone machen zu können, wurden zeitgleiche Messungen an verschiedenen Probenahmepunkten im Rauchgaskanal durchgeführt. Die Proben wurden sowohl an der SMVA als auch an MVA bei Temperaturen von circa 700°C und circa 200°C aus dem Rauchgas entnommen (vgl. Kapitel 3.1.2 bzw. 3.1.4). Mit diesen Messungen sollen erstmalig an großtechnischen Verbrennungsanlagen die Bildungsprozesse der Chloraromaten detaillierter untersucht werden. Die aus Laborexperimenten, in welchen z.B. Flugaschen 30 Minuten thermisch behandelt werden, gewonnenen Ergebnisse bezüglich der Chloraromatenbildung können nur schwierig auf die schnell ablaufenden Bildungsprozesse an großtechnischen Anlagen übertragen werden.

Neben der Chloraromatenbildung entlang des Rauchgaskanals werden für die einzelnen Chloraromaten ausgehend von den vorgestellten Kongenerenmustern mögliche Bildungswege untersucht.

Die Daten zu den in diesem Kapitel angestellten Betrachtungen finden sich unter 7.4 Anhang C-1.

4.3.1 Hochtemperaturbildung

Wie im vorhergehenden Kapitel gezeigt, wird ein Teil der im Rauchgas bei 200°C befindlichen Chloraromaten nicht erst im bekannten Temperaturbildungsfenster der PCDD/F zwischen 300°C bis 400°C durch die *de-novo* Synthese gebildet (Kapitel 2.4.1.3, (82), (114)). Je nach Chlorierungsgrad, Substanzklasse und Betriebszustand der Anlage (SMVA und MVA) sind 10-40 % der bei 200°C gefundenen Substanzmenge bereits zwischen 600°C und 700°C nachweisbar. Die Bildung von chlorierten Verbindungen oberhalb von 400°C wird im folgenden als **Hochtemperaturbildung** bezeichnet, während die **Nachbildung** der Chloraromaten zwischen 200°C-400°C mit der in Literatur beschriebenen *de-novo* Synthese übereinstimmt (114).

Die Hochtemperaturbildung der Chloraromaten wurde in Laborreaktoren bereits gezeigt (vgl. Kapitel 2.4.3.1, (121)). Für die Hochtemperaturbildung der Chloraromaten ist in der Literatur die Vergasung von unverbranntem Kohlenstoff aus Flugaschen verantwortlich gemacht worden (100), (102). Durch die Anwesenheit eines Katalysators kann die Reaktionstemperatur der Kohlenstoffvergasung um mehr als 200°C gesenkt werden. Die in den Flugaschen aus Verbrennungsprozessen gefundenen kohlenstoffhaltigen Strukturen und das ebenfalls in den Flugaschen enthaltene Kupfer lassen vermuten, daß der Prozeß der Kohlenstoffvergasung auch eine wichtige Rolle für die zwischen 200°C und 350°C ablaufende *de-novo* Synthese spielt (siehe Kapitel 2.4.1.3, 2.4.2 und 2.4.3).

Die untersuchten Chloraromaten verhalten sich was die beschriebenen Bildungsprozesse, nämlich Hochtemperaturbildung (600-700°C) und *de-novo* Synthese (200-400°C), betrifft an der SMVA und der MVA nicht einheitlich, wie dies in den nächsten Abschnitten dargestellt wird.

4.3.1.1 Sondermüllverbrennungsanlage (SMVA)

Die in Abbildung 4.3-1 gezeigten Konzentrationsverhältnisse der Chloraromaten entlang des Abhitzekessels der SMVA wurden aus sechs zeitgleichen Messungen bei circa 700°C und 250°C berechnet (n = 12 Messungen). Dabei handelt es sich in fünf Fällen um Messungen während derer instationäre Betriebszustände an der SMVA herrschten. Die Konfidenzintervalle (Signifikanzniveau (α) von 5%) der Mittelwerte der Konzentrationsverhältnisse sind trotz der Variationen in den Betriebszuständen sehr klein.

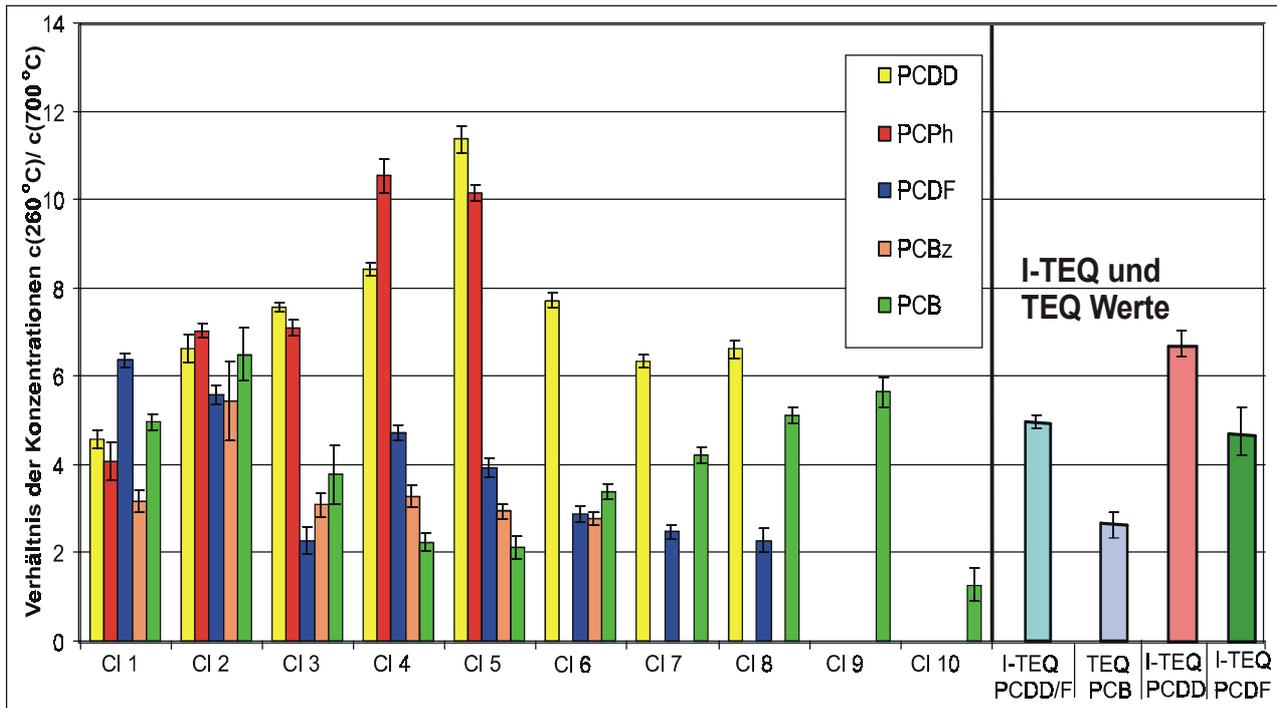


Abbildung 4.3-1: Konzentrationsverhältnisse ($c(260^\circ\text{C})/c(700^\circ\text{C})$) der Chloraromaten im Abhitzekessel der SMVA (Fehlerbalken entsprechen dem Konfidenzintervall des Mittelwertes, $\alpha = 5\%$, $n = 12$; I-TEQ (PCDD/F) nach NATO/CCMS; TEQ (PCB) nach Safe)

Die Abbildung 4.3-1 zeigt, daß sich die PCDD und PCPh einerseits sowie die PCDF, PCBz und PCB andererseits bezüglich ihres Nachbildungsverhaltens zwischen 700°C und 260°C sehr ähnlich sind. Ein ähnliches Ergebnis wurde bereits in Laborexperimenten gefunden (236), (115), (48), (248). Die Nachbildung für die höher chlorierte (CI \geq 3) Homologen der PCDD/PCPh ist in Abbildung 4.3-1 höher als für die Homologen der PCDF/PCBz und PCB. Für die ein- und zweifach chlorierten Homologen aller Chloraromaten sind die Konzentrationsverhältnisse ähnlich. Damit läßt sich vermuten, daß für die Bildung der niedrig chlorierten Homologen andere Bildungswege offenstehen als für die Bildung der höher chlorierten Homologen. Ein ähnliches Ergebnis wurde auch bei Untersuchungen für die Vorhersage der Verteilungen der PCDD/F-Kongeneren Proben aus Verbrennungsprozessen gefunden (249), (250). Dabei wurde gezeigt, daß das für die MVA typische Kongenerenmuster der ein- bis dreifach chlorierten PCDD/F dem bei einer Chlorierung

der unchlorierten Grundgerüste (DD/DF) gefundenen Kongenerenmuster sehr ähnlich ist. (siehe auch Kapitel 4.3.2).

Die absoluten mittleren Konzentrationen der PCDD/F, PCBz und PCPh bei 700°C und 250°C sind in Abbildung 4.3-2 dargestellt.

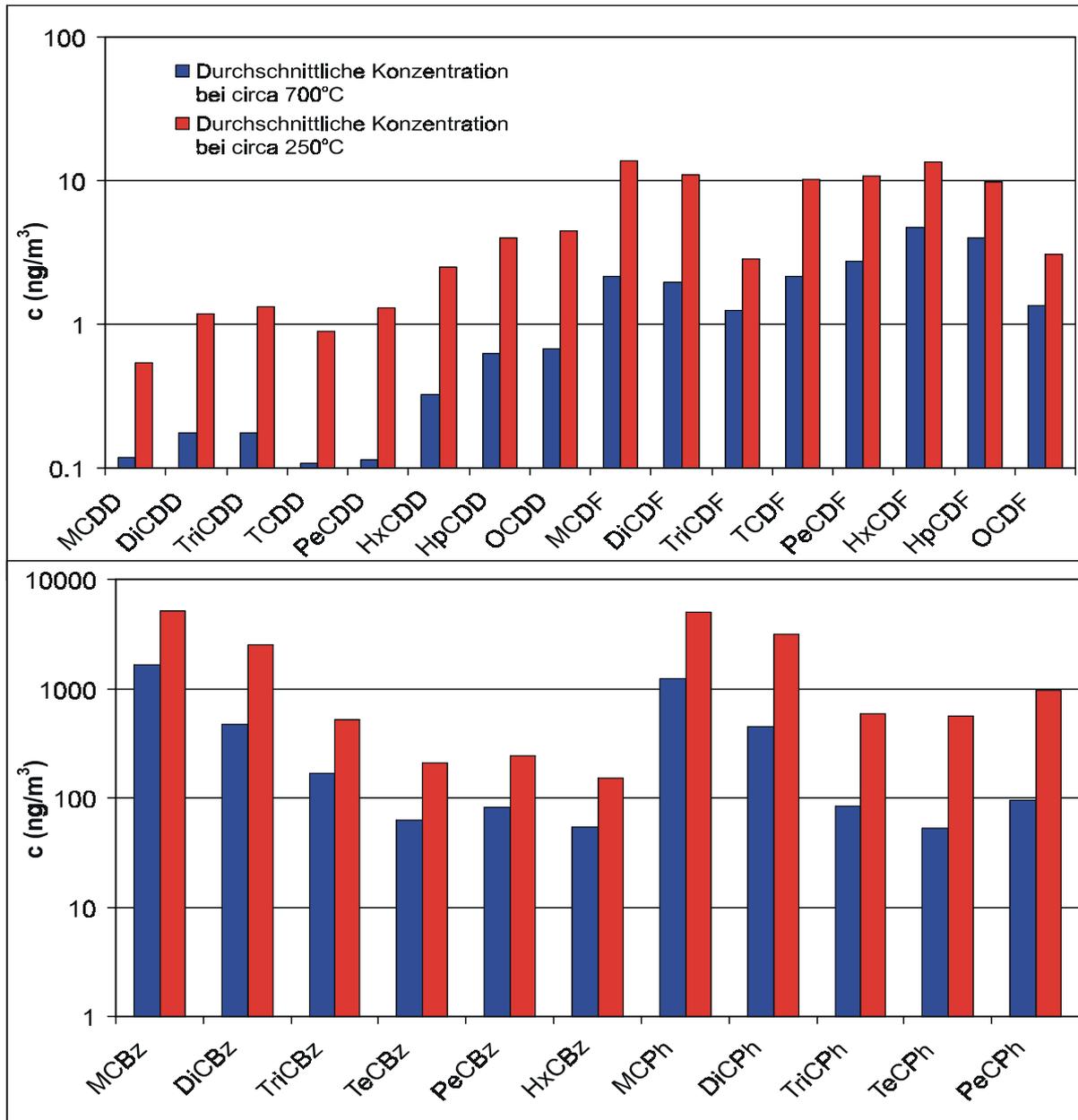


Abbildung 4.3-2: Mittlere absolute Konzentrationen der PCDD/F, PCBz und PCPh bei 700°C und 250°C an der SMVA (durchschnittliche Probenahmezeit circa 60 Minuten; n = 12)

Obwohl sich die Konzentrationen der untersuchten Chloraromaten in Abbildung 4.3-2 um Größenordnungen unterscheiden, ist das Verhalten bezüglich der Nachbildung für die PCDD/PCPh einerseits und die PCDF/PCBz andererseits sehr ähnlich.

Für die drei- bis fünffach chlorierten Homologen zeigen sich die Ähnlichkeiten für die Nachbildungsraten zwischen PCDF und PCBz einerseits und PCDD und PCPh andererseits am stärksten. Das ähnliche Verhalten der PCDD/PCPh und PCDF/PCBz bezüglich der Nachbildung könnte zum Verständnis der hohen Korrelation zwischen PCBz und dem I-TEQ der PCDD/F beitragen. Die in 2,3,7,8-Position substituierten Kongeneren der PCDF tragen einen hohen Anteil am I-TEQ Wert der PCDD/F (nach (202), (215): 57-71%; Mittelwert dieser Arbeit 62%). Das ähnliche Nachbildungsverhalten der PCDF und PCBz legt die Vermutung von parallel verlaufenden Bildungsmechanismen für diese Substanzgruppen nahe. Ferner geben die ähnlichen Nachbildungsraten der PCDD und PCPh in den Abbildungen 4.3-1 und 4.3-2 einen Hinweis darauf, daß die PCPh Vorläuferverbindungen für die Bildung der PCDD sein können (siehe auch Kapitel 4.3.2.2; (47), (251)).

Das Konzentrationsverhältnis von PCDF zu PCDD beträgt trotz der höheren Nachbildung der PCDD etwa 10 zu 1. Dieses Ergebnis könnte auf die höhere Stabilität der PCDF im Vergleich zu den PCDD zurückzuführen sein (48). Diese Stabilität wird durch den aromatischen Charakter des zusätzlichen Fünfrings der PCDF verursacht. Auch anhand von hochaufgelösten UV-Spektren wurden die Unterschiede bezüglich der Aromatizität zwischen PCDD und PCDF deutlich (13).

4.3.1.2 Hausmüllverbrennungsanlage (MVA)

In der Abbildung 4.3-3 finden sich die Konzentrationsverhältnisse der untersuchten Chloraromaten zwischen 200°C und 700°C bei normalen Betriebsbedingungen an der MVA.

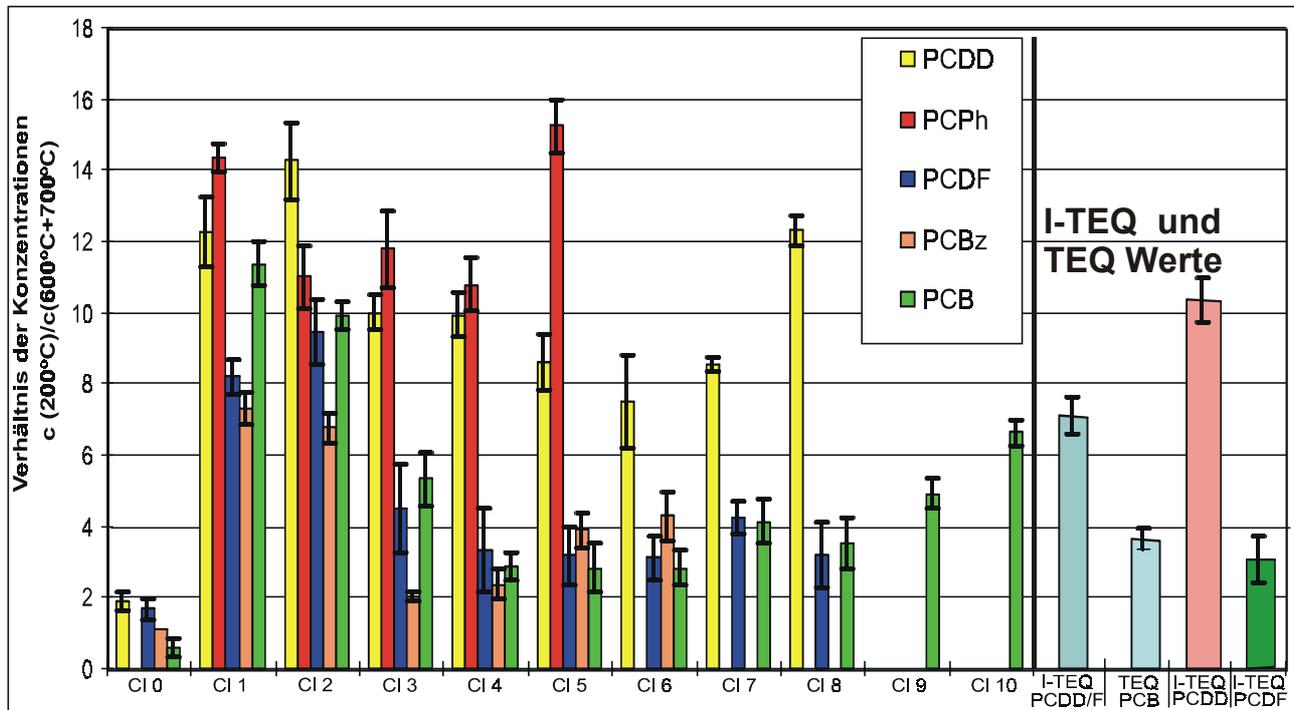


Abbildung 4.3-3: Konzentrationsverhältnisse ($c(200^\circ\text{C})/c(700^\circ\text{C})$) der Chloraromaten im Abhitzekegel der MVA im Normalbetrieb (Fehlerbalken entsprechen dem Konfidenzintervall des Mittelwertes, $\alpha = 5\%$, $n = 10$; I-TEQ (PCDD/F) nach NATO/CCMS; TEQ (PCB) nach Safe)

Die in der Abbildung 4.3-3 gezeigten Konzentrationsverhältnisse der Chloraromaten an der MVA bestätigen die an der SMVA gefundenen Ergebnisse bezüglich der Nachbildungsrate. So zeigen die PCDD/PCPh einerseits und die PCDF/PCBz andererseits ein sehr ähnliches Nachbildungsverhalten entlang des Rauchgaskanals. Generell ist die Nachbildung aller Chloraromaten an der MVA stärker ausgeprägt als an der SMVA.

Die ein- und zweifach chlorierten Homologen aller Chloraromaten zeigen in der Abbildung 4.3-3 sehr ähnliche Konzentrationsverhältnisse. Dieser Befund ist ein Hinweis auf ähnliche Bildungsmechanismen der niedrig chlorierten Homologen im Rauchgas der MVA. Ein möglicher Bildungsweg wäre die Chlorierung der in hohen Konzentrationen im Rauchgas vorhandenen unchlorierten Grundgerüste (Cl 0) der entsprechenden Verbindung. Diese Vermutung konnte durch die Analyse des Kongenerenmusters der niedrig chlorierten Homologen z.T. bestätigt werden (Kapitel 4.3.2.1-4.3.2.3).

Die unchlorierten Grundgerüste (Cl 0) der Chloraromaten zeigen im Vergleich zu den chlorierten Verbindungen für die betrachteten Messungen keine oder nur eine geringe Nachbildung entlang des Rauchgaskanals, wohingegen die Konzentrationen einiger PAK eine Konzentrationsabnahme

aufweisen (siehe auch Abbildung 4.3-7). In der Literatur wurde ebenfalls eine Konzentrationsabnahme von unchlorierten Aromaten entlang des Temperaturgradienten (700°C-200°C) in der Nachbrennzone beobachtet (35), (36), (14). Die Ursache für diese Konzentrationsabnahme könnte in engem Zusammenhang mit dem Wachstum der Flugaschepartikel stehen, welches zu einer Abnahme der Konzentrationen der PAK entlang des Rauchgaskanals führen kann (107). Im Gegensatz dazu werden die chlorierten Aromaten vermutlich z.T. auf und aus diesem Kohlenstoff der Flugasche durch die *de-novo* Synthese gebildet (82), (95).

Die mittleren absoluten Konzentrationen der PCDD/F, PCBz und PCPh an der SMVA bei 600°C-700°C und 200°C sind in der Abbildung 4.3-4 dargestellt.

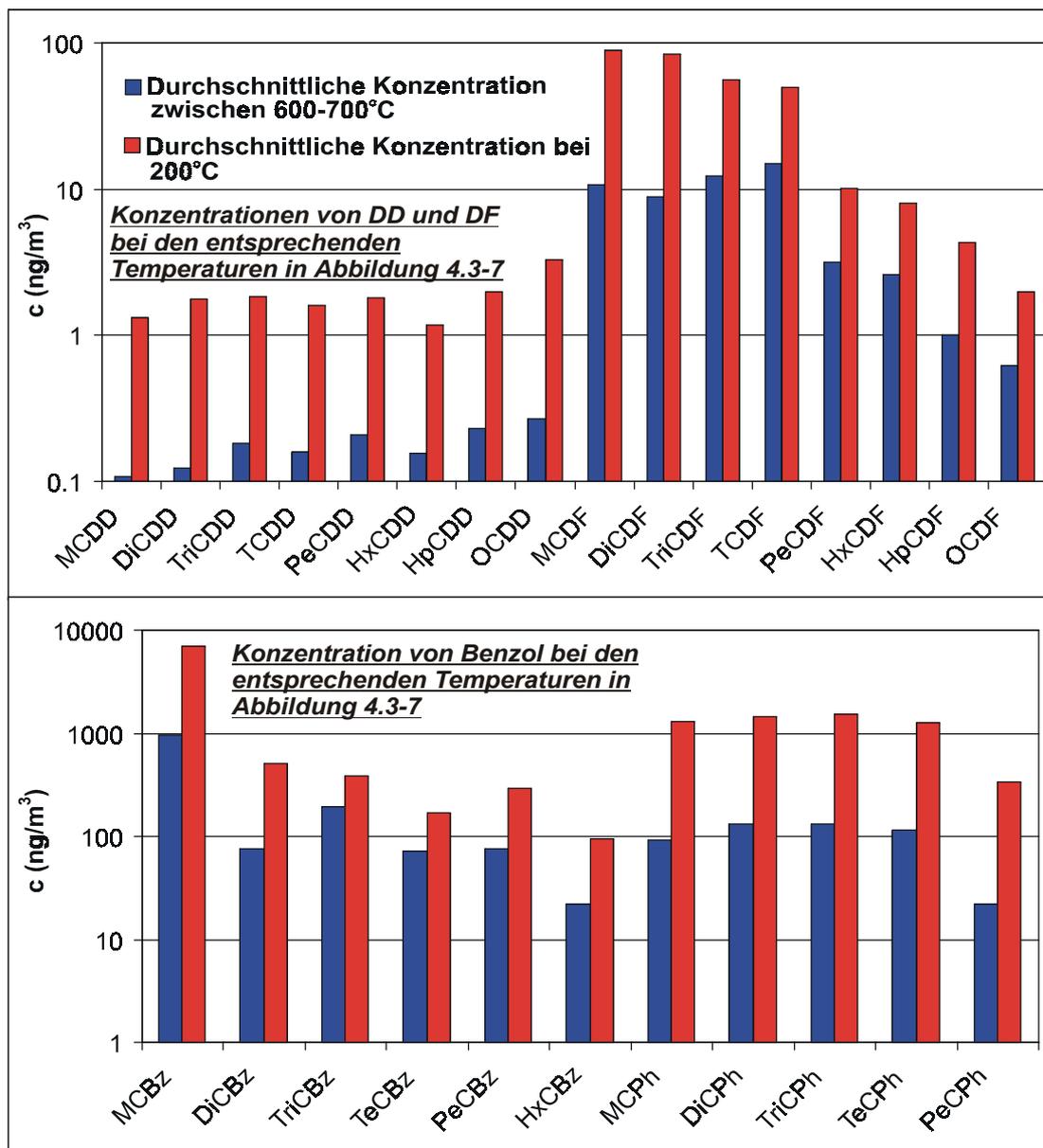


Abbildung 4.3-4: Mittlere absolute Konzentrationen der PCDD/F, PCBz und PCPh bei 600°C-700°C und 200°C an der MVA (durchschnittliche Probenahmezeit circa 60 Minuten; n = 10)

In der Abbildung 4.3-4 werden für die PCBz und PCPh, wie auch an der SMVA (Abbildung 4.3-2), um den Faktor 100 bis 1000 höhere Konzentrationen gefunden als für die PCDD/F. Das Nachbildungsverhalten für die PCDD/PCPh und die PCDF/PCBz ist trotz dieses Unterschieds sehr ähnlich.

In der Abbildung 4.3-5 sind die Konzentrationsverhältnisse der Chloraromaten zwischen 200°C und 600°C an der MVA unter instationären Verbrennungsbedingungen (z.B. CO-Spitzen) dargestellt.

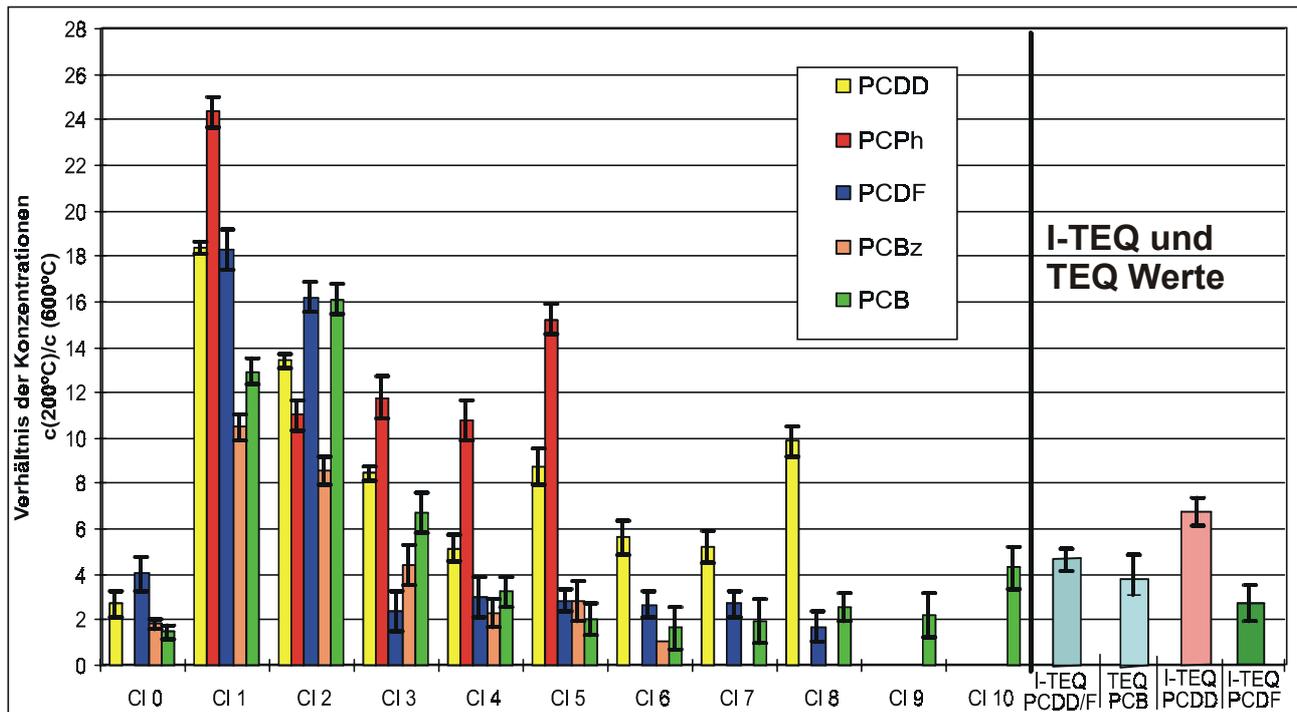


Abbildung 4.3-5: Konzentrationsverhältnisse ($c(200^\circ\text{C})/c(700^\circ\text{C})$) der Chloraromaten im Abhitzekegel der MVA unter instationären Betriebsbedingungen (Fehlerbalken entsprechen dem Konfidenzintervall des Mittelwertes, $\alpha = 5\%$, $n = 8$; I-TEQ (PCDD/F) nach NATO/CCMS; TEQ (PCB) nach Safe)

Deutlich sind in der Abbildung 4.3-5 die Ähnlichkeiten der Nachbildungsraten zwischen PCDD/PCPh einerseits und PCDF/PCBz andererseits für die drei- bis fünffach chlorierten Homologen zu erkennen. Sowohl die Konzentrationsverhältnisse der unchlorierten Grundgerüste (CI 0) als auch die der höher chlorierten Homologen werden durch instationäre Betriebsbedingungen nur wenig beeinflusst (vgl. Abbildung 4.3-3). Nur die ein- bis zweifach chlorierten Homologen aller Verbindungen zeigen unter instationären Betriebsbedingungen höhere Werte für die Konzentrationsverhältnisse als unter Normalbedingungen. Somit kann davon ausgegangen werden, daß unter instationären Verbrennungsbedingungen an der MVA für die höher chlorierten Aromaten ähnliche Bildungswege wie unter Normalbedingungen gelten. Für die ein- bis zweifach chlorierten Homologen könnten, wie dies bereits anhand der Ergebnisse der SMVA diskutiert wurde (Kapitel 4.3.1.1), andere Bildungswege offenstehen. Eine mögliche

Reaktion wäre z.B. die Chlorierung von unchlorierten Grundgerüsten, welche während instationärer Verbrennungsbedingungen in hohen Konzentrationen im Rauchgas der MVA gemessen wurden. In der Literatur finden sich Arbeiten, die ebenfalls auf die unterschiedlichen Bildungswege der Chloraromaten in Abhängigkeit ihres Chlorierungsgrades hinweisen (47), (97), (99), (252).

Die mittleren absoluten Konzentrationen der Chloraromaten im Rauchgas liegen unter den instationären Betriebsbedingungen um den Faktor 100-200 höher als unter Normalbedingungen, wie dies ein Vergleich der Abbildung 4.3-6 mit der Abbildung 4.3-4 zeigt.

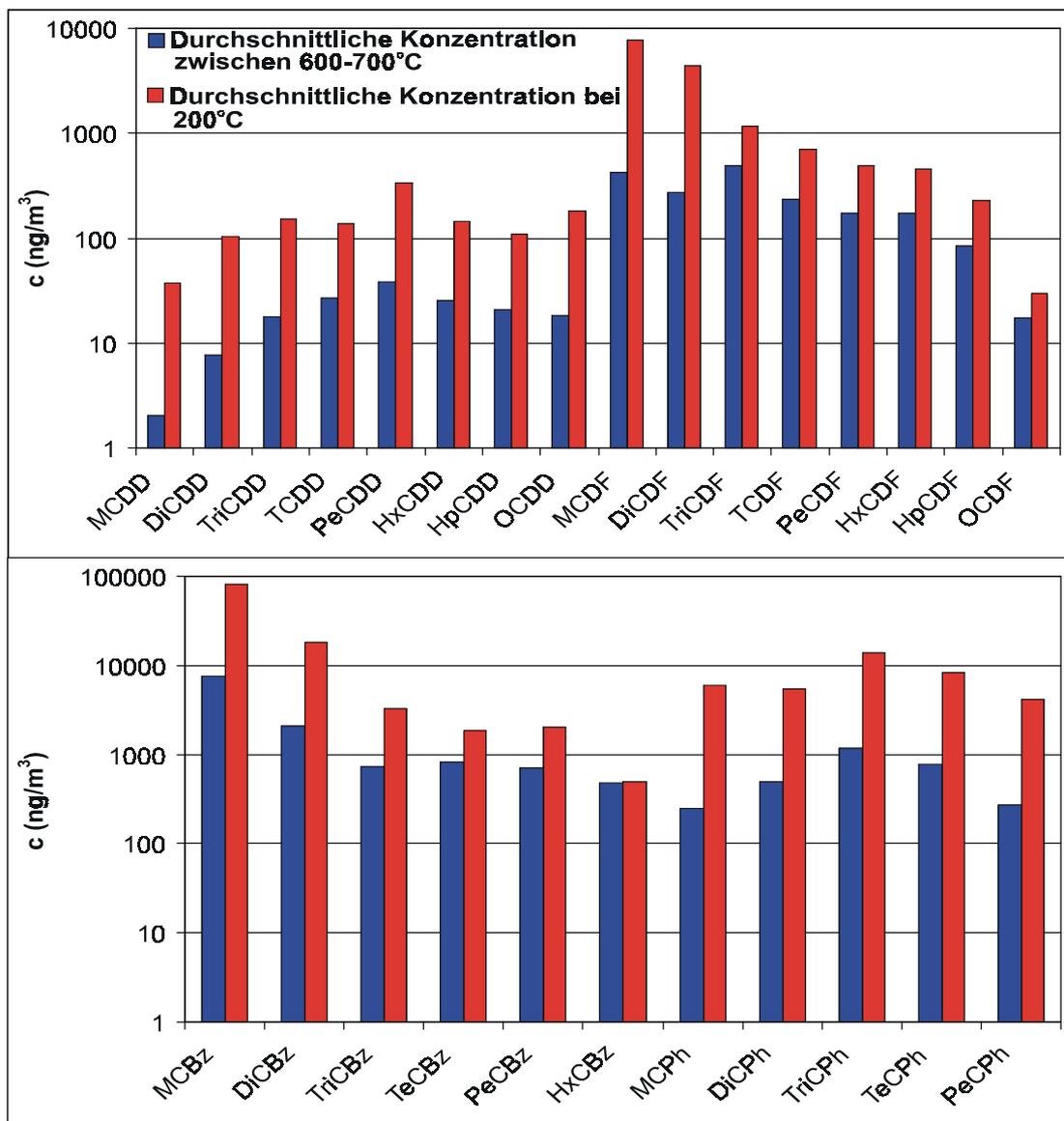


Abbildung 4.3-6: Mittlere absolute Konzentrationen der PCDD/F, PCBz und PCPh unter instationären Betriebsbedingungen bei 600-700°C und 200°C an der MVA (durchschnittliche Probenahmezeit 60 Minuten; n = 8)

Auch die Homologenmuster der Chloraromaten in Abbildung 4.3-6 werden von den niedrig chlorierten Homologen dominiert. Diese Verschiebung der Homologenmuster (241), (253) wurde auch in Laborexperimenten beobachtet (236), (115).

Um die Bildung von unchlorierten Aromaten entlang des Abhitzekessels der MVA zu verfolgen, sind Aromatenmuster bei verschiedenen Probenahmetemperaturen in der Abbildung 4.3-7 dargestellt. Da die Bildung der PAK im Rahmen dieser Arbeit nicht in dem Umfang wie die der Chloraromaten untersucht wurde, handelt es sich bei den abgebildeten Werten um Einzelwerte oder um Mittelwerte aus wenigen Messungen (**KEINE** zeitgleichen Messungen). Die dargestellten Ergebnisse und REMPI-TOFMS Messungen lassen mit Hilfe der Literatur ein besseres Verständnis der PAK-Bildung in der Nachverbrennungszone von großtechnischen Feuerungsanlagen zu (107), (35), (36), (23).

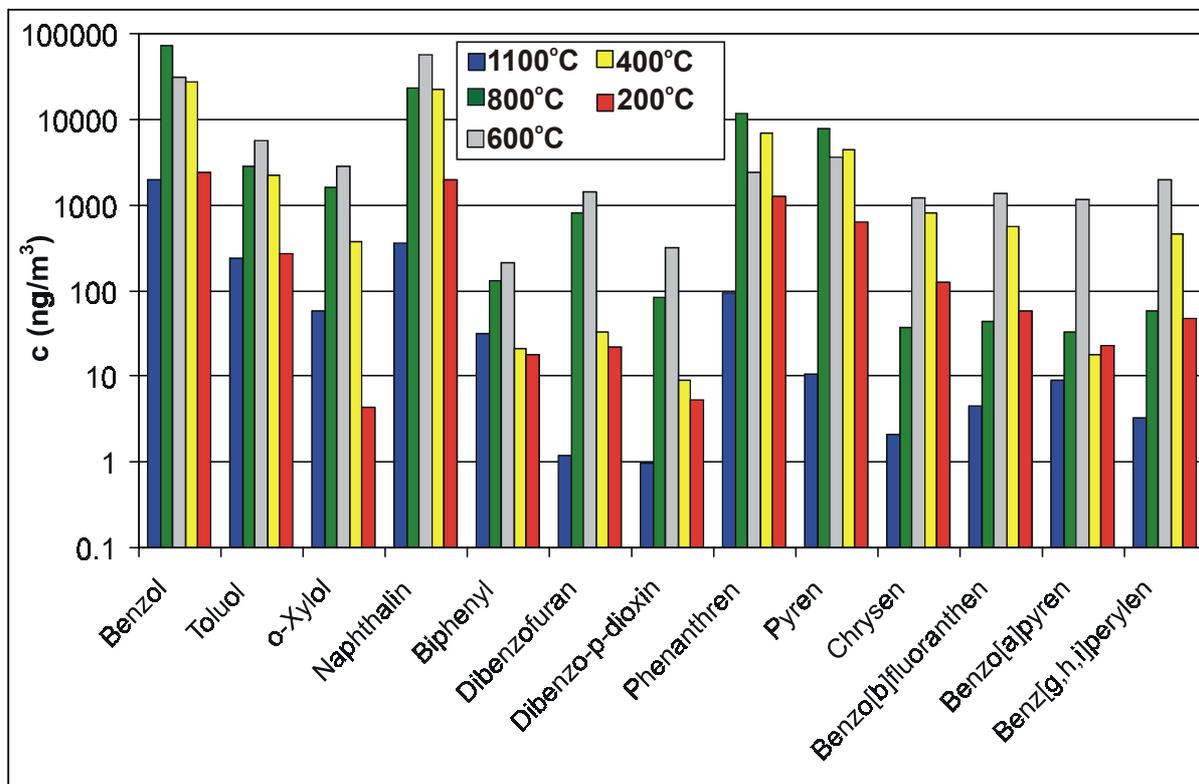


Abbildung 4.3-7: Aromatenprofile (PAK & BTX) im Abhitzekessel der MVA in Abhängigkeit der Temperatur (1100- 200°C)

Die Abbildung 4.3-7 zeigt, daß die Konzentrationen aller Aromaten entlang des Abhitzekessels zuerst ansteigen und dann zum Kesselende hin wieder absinken. Dabei ist auffällig, daß die monozyklischen Aromaten (BTX) ihre maximalen Konzentrationen bei höheren Temperaturen (circa 800°C) als die höherkernigen Aromaten (z.B. Benzo[a]pyren; circa 600°C) zeigen. Dieses Verhalten steht vermutlich in engem Zusammenhang mit der Bildung der aromatischen Verbindungen aus aliphatischen Vorläufern, die im Temperaturfenster über 800°C abläuft. Aus

den dabei gebildeten aromatischen Verbindungen entsteht durch die Prozesse der Kondensation und Aggregation Ruß (vgl. Kapitel 2.4.2) (107). Diese Prozesse und der thermische Abbau der Aromaten entlang des Abhitzekeessels führen zu den in Abbildung 4.3-7 gezeigten Konzentrationsverläufen.

Auch das unchlorierte Dibenzo-*p*-dioxin und Dibenzofuran zeigen in Abbildung 4.3-7 ihre höchsten Konzentrationen bei circa 600°C im Rauchgaskanal und stützen damit die These, daß die während instationären Verbrennungsbedingungen gefundenen großen Mengen der niedrig chlorierten Homologen der PCDD/F durch eine Chlorierung der unchlorierten Grundgerüste entstanden sein könnten (Abbildung 4.3-7). Somit müßten die Kongeneren dieser Chlorierungsgrade ein für die Chlorierung typisches Muster aufweisen (250), wie dies im Kapitel 4.3.2 durch die Betrachtung der Kongenerenverteilungen der Chloraromaten bestätigt wurde.

Die Bildung der PAK entlang des Abhitzekeessels der SMVA wurden mit REMPI-TOFMS untersucht (Abbildung 4.3-8).

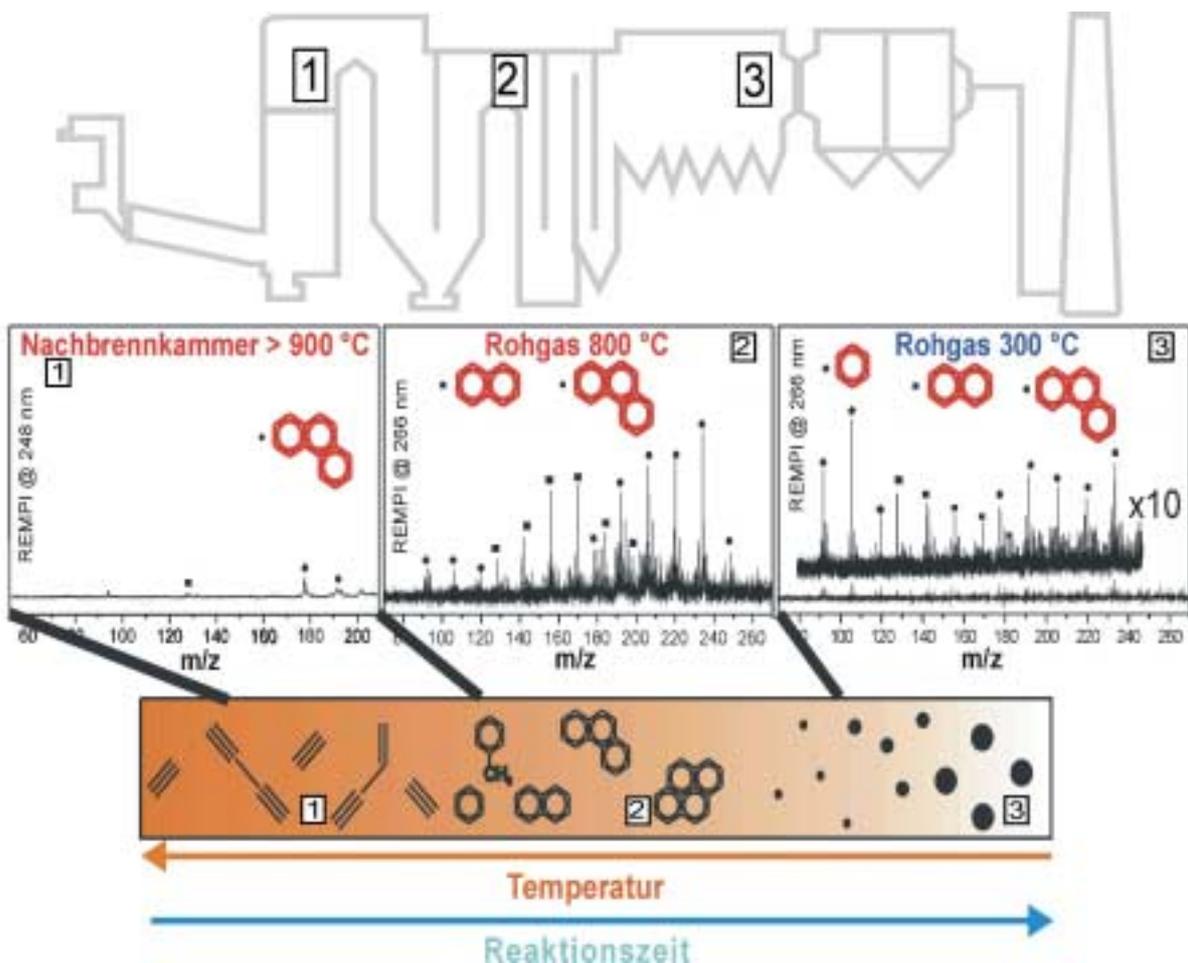


Abbildung 4.3-8: Mit REMPI-TOFMS (@266nm) an der SMVA bei verschiedenen Temperaturen gemessene PAK-Muster und schematische Darstellung der Prozesse bei der Kondensation von PAK zu Ruß (aus: (198))

In der Abbildung 4.3-8 zeigen die kleineren Aromaten von Benzol bis Pyren ein Konzentrationsmaximum zwischen 600°C und 800°C. Für die größere Aromaten als Phenanthren findet sich ein Konzentrationsmaximum in einem niedrigeren Temperaturbereich (vgl. Abbildung 4.3-7 und Abbildung 4.3-8). Vermutlich kann die entlang des Abhitzekeessels der SMVA und MVA gefundene Bildung der PAK auf die in der Abbildung 4.3-8 schematisch gezeigte Aufkondensation der Aromaten zum Ruß zurückgeführt werden.

Um zu zeigen, welchen Einfluß die Nachbildung der Chloraromaten im Abhitzekeessel auf die I-TEQ Werte der PCDD/F hat, sind in Abbildung 4.3-9 die relativen I-TEQ Werte bezogen auf den I-TEQ Wert der PCDD/F bei 200°C dargestellt.

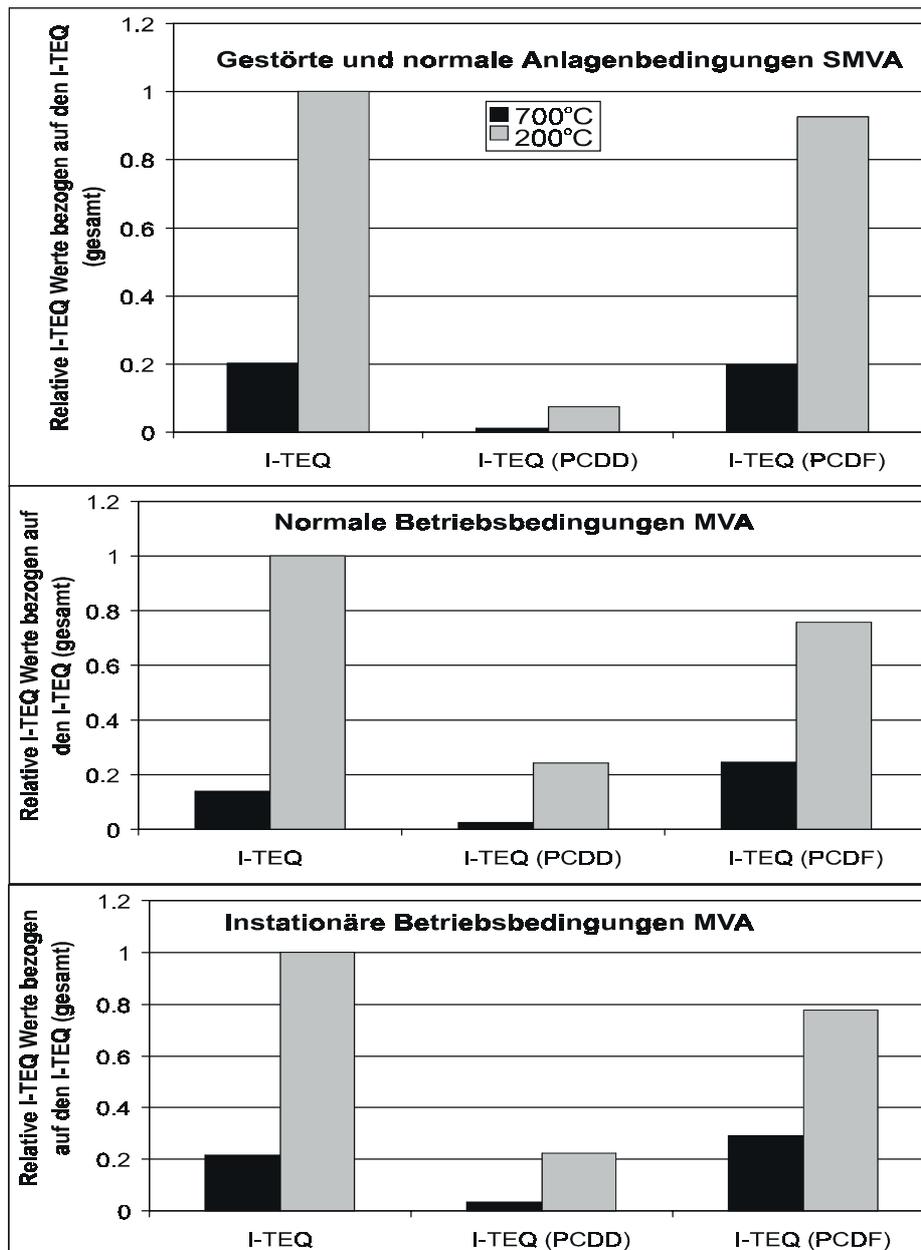


Abbildung 4.3-9: Vergleich der relativen (bezogen auf den I-TEQ Wert der PCDD/F bei 200°C) I-TEQ Werte der PCDD und PCDF an der SMVA und MVA

Aus der Abbildung 4.3-9 wird deutlich, daß die Toxizität der PCDD/F entlang des Rauchgaskanals an den untersuchten Anlagen zunimmt. Wie in den Abbildungen 4.3-1, -3 und -5 dargestellt, zeigen die Verhältnisse der I-TEQ Werte zwischen circa 200°C und 700°C ähnliche Werte für die Nachbildungsraten wie die TCDD bis HxCDD bzw. TCDF bis HxCDF, welche ihrerseits den größten Anteil an der Toxizität an dem I-TEQ Wert der PCDD/F tragen. Der relative Anstieg der Toxizität entlang des Rauchgaskanals ist für die PCDD und PCDF an der SMVA und MVA sehr ähnlich. Ein Unterschied zwischen der SMVA und MVA findet sich bezüglich der Verteilung der Gesamtoxizität der PCDD/F auf die unterschiedlichen Substanzklassen. Die Ergebnisse der Messungen an der SMVA zeigen einen höheren Anteil der Toxizität der PCDF am I-TEQ Wert der PCDD/F als an der MVA. Eine Erklärung hierfür ist, daß auch die fünf- und sechsfach chlorierten Homologen der PCDF an der SMVA (absolute Konzentrationen siehe Abbildungen 4.3-4 bzw. 4.3-2) einen höheren Anteil an der Gesamtmenge der PCDD/F als an der MVA aufweisen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß an der MVA wie auch in der SMVA, PCDD und PCPh einerseits und PCDF, PCB und PCBz andererseits ein ähnliches Verhalten bezüglich ihrer Nachbildungsraten entlang des Abhitzekeessels zeigen. Die Bildung der PCDF, PCB, PCBz ist im Hochtemperaturbereich (600-700°C) der Anlagen ausgeprägter als die der PCDD und PCPh. Letztgenannte Verbindungen zeigen eine stärkere Nachbildung entlang des Abgaskanals als die PCDF, PCB und PCBz. Ob es einen Zusammenhang zwischen der Bildung einzelner Chloraromatenspezies, z.B. PCDD und PCPh, gibt, kann durch eine Analyse des Kongenerenmusters der jeweiligen Substanzklassen weiter aufgeklärt werden (Kapitel 4.3.2).

Weiterhin ermöglichen es die in der hier vorgestellten Arbeit gefundenen Ergebnisse bezüglich der Nachbildung der Chloraromaten im Abhitzekeessel, die gute Vorhersagbarkeit des I-TEQ Wertes der PCDD/F durch die Konzentration der PCBz besser zu verstehen. Der I-TEQ Wert der PCDD/F wird zu mehr als 32% (Grundlage 102 Emissionsproben) von den in 2,3,7,8-Position substituierten PeCDF-Kongeneren getragen. Die PeCDF und auch die TCDF werden in ähnlichem Umfang wie die Kongeneren bzw. Homologen der PCBz entlang des Rauchgaskanals nachgebildet und stellen somit ein Maß für die PCDF-Toxizität dar.

4.3.2 Stellungsisomeren der Chloraromaten

Um zu klären, wie groß die Varianz der Kongenerenmuster aller untersuchter Chloraromaten, wurde für jeden Chlorierungsgrad und jede Substanzklasse eine Hauptkomponentenanalyse durchgeführt. Die erklärten Varianzen der ersten zwei Hauptkomponenten (HK 1/HK 2) dieser Analysen sind in der Tabelle 4.3-1 zusammengefaßt. Die Normierung der Kongenerenkonzentrationen erfolgte gemäß Kapitel 3.4.1.

Tabelle 4.3-1: Erklärte Varianzen der HKA für alle Substanzklassen und Chlorierungsgrade (HK 1 = 1. Hauptkomponente, HK 2 = 2. Hauptkomponente)

Varianz HK1/HK2 (%)/(%)	Substanzklassen				
	Chlorierungsgrad	PCDD	PCDF	PCB	PCPh
1	92/8	87/9	55/34	74/26	-
2	59/23	55/22	51/24	68/18	75/18
3	67/15	65/17	78/7	50/16	72/20
4	56/22	64/17	62/14	63/32	80/15
5	69/15	72/15	73/8	-	-
6	85/11	74/12	79/8	-	-
7	98/2	96/3	74/12	-	-
8	-	-	62/17	-	-
9	-	-	82/12	-	-

Die Werte für die erklärten Varianzen der Hauptkomponenten in der Tabelle 4.3-1 zeigen für alle Chloraromaten im Bereich der drei- bis fünffach chlorierten Kongeneren die kleinsten Werte und damit die größte Varianz in den untersuchten Daten. Ein Vergleich mit den Ergebnissen einer anderen Studie macht deutlich, daß die in der hier vorgestellten Arbeit untersuchten Kongenerenmuster eine größere Varianz als die Kongenerenmuster dieser Studie aufweisen (76). Die Unterschiede zwischen diesen Ergebnissen müssen vor folgendem Hintergrund betrachtet werden: Die Normierung der Daten für die HKA erfolgte in der zitierten Studie mit einem speziellen Verfahren, welches zu einer stärkeren Gleichverteilung der Kongeneren und damit zu höheren erklärten Varianzen der HK führte (vgl. Kapitel 3.4.1). Ein weiterer wichtiger Unterschied bei der Durchführung der HKA der hier vorgestellten Arbeit und in der zitierten Studie besteht darin, daß in der hier vorgestellten Arbeit die koeluzierenden Kongeneren von der statistischen Betrachtung ausgeschlossen wurden. Bei einer statistischen Betrachtung eines Kongenerenmusters mit koeluzierenden Kongeneren wird die statistische Aussagekraft der HKA bezüglich möglicher Bildungswege reduziert. Oftmals dominieren die koeluzierenden Kongeneren das Muster, so daß bei einer statistischen Auswertung des Kongenerenmusters mit den koeluzierenden Kongeneren eine Vereinheitlichung der Datenstruktur stattfinden kann.

Vermutlich lassen sich die kleineren Anteile der erklärten Varianzen der Hauptkomponenten für die drei- bis fünffach chlorierten Kongeneren in Tabelle 4.3-1 direkt aus der höheren Anzahl der Kongeneren dieser Chlorierungsgrade und der damit verbundenen größeren Anzahl der

Bildungswege für ein Kongener ableiten. Im Gegensatz zu den PCDD/F und PCB weisen die PCBz mit einer niedrigeren Anzahl von Kongeneren pro Chlorierungsgrad die höchsten Werte für die erklärten Varianzen auf. Existiert nur eine geringe Anzahl von Bildungsweisen für die Stellungsisomeren, z.B. HpCDD/F, so ist der Anteil der erklärten Varianzen der ersten beiden HK hoch. Vermutlich stehen die gefundenen Ergebnisse im engen Zusammenhang mit den für eine Chlorierung bzw. Dechlorierung nötigen Reaktionsenthalpien. Bei einer größeren Anzahl von Isomeren sind die Beträge zwischen den Reaktionsenthalpien für die Bildung eines Isomeres des entsprechenden Chlorierungsgrades kleiner (76), (99), (252). Dadurch könnte es bei der Bildung der Isomeren, für welche eine große Anzahl möglicher Bildungswege offenstehen, die sehr ähnliche Reaktionsenthalpien aufweisen, zu einer stärkeren Verteilung dieser Isomeren im Isomerenmuster kommen.

Betrachtet man den *score plot* einer einzelnen HKA z.B. für HxCDF (Abbildung 4.3-10), so läßt sich erkennen, daß die zweite Hauptkomponente vor allem die Proben unter normalen von denjenigen unter instationären Verbrennungsbedingungen abtrennt.

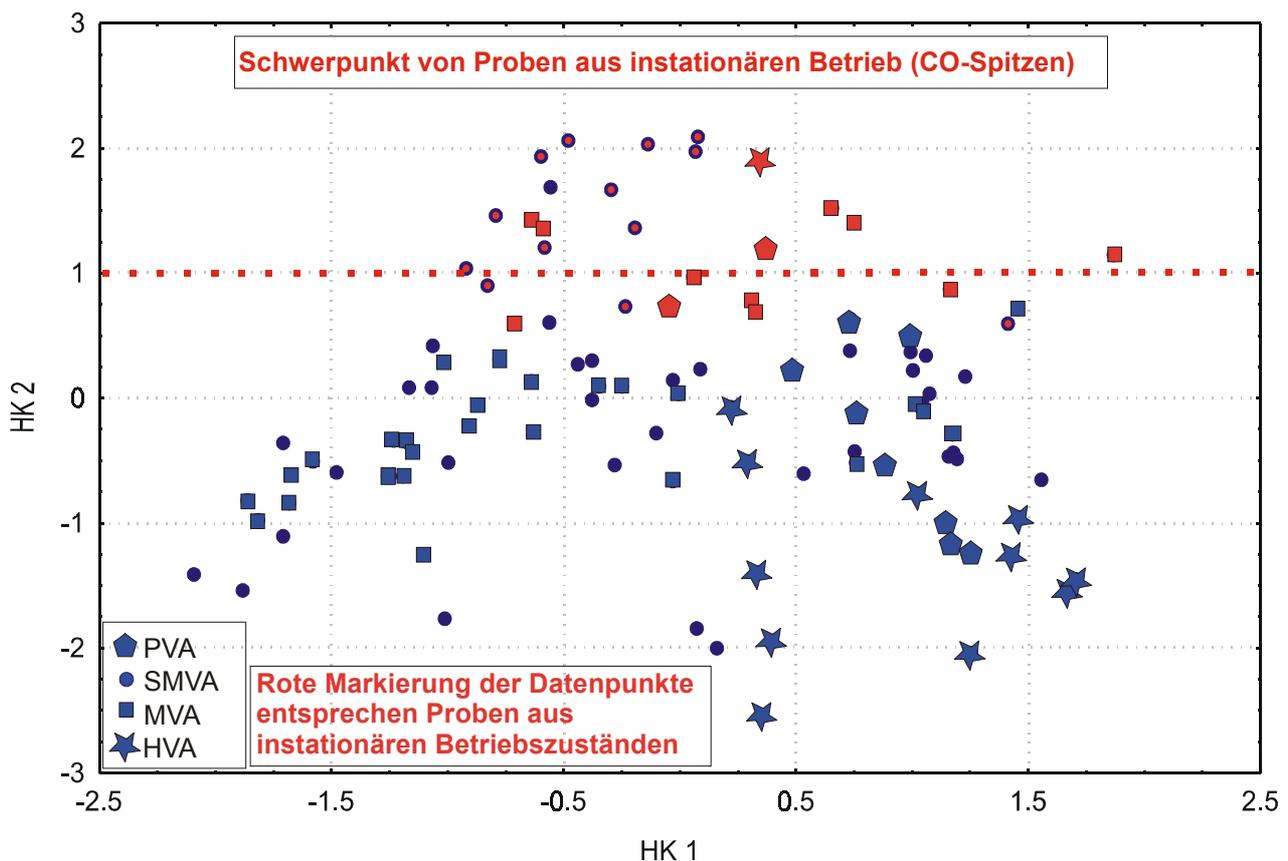


Abbildung 4.3-10: *Score plot* der HxCDF (erklärte Varianz 1.HK: 74%, 2HK: 12%, n = 106)

Die instationären Verbrennungsbedingungen haben in der Abbildung 4.3-10 einen Einfluß auf das Isomerenmuster der HxCDF. Das Isomerenmuster erweist sich allerdings als wesentlich stabiler gegenüber variierenden Verbrennungsbedingungen als die Homologenmuster, was sich daran

zeigt, daß bei den HKA für die Homologen die 1.HK zu einer Trennung der Proben bezüglich der Verbrennungsbedingungen führt (Abbildung 4.1-3, 4.1-7, 4.1-10, 4.1-13). Im Gegensatz dazu wird bei der HKA für das Isomerenmuster der HxCDF der Einfluß der Verbrennungsbedingungen nur durch die 2. HK abgebildet.

Die 1. HK im *score plot* in Abbildung 4.3-10 trennt die Proben bezüglich des Brennstoffes auf, so daß die Datenpunkte, welche den Anlagen mit Brennstoff Holz zugeordnet sind, in der rechten Hälfte der Abbildung zu finden sind. Der Einfluß des Brennstoffes Holz auf das Homologen- bzw. Kongenerenmuster der Chloraromaten, der vermutlich in den niedrigen Chlorgehalten des Brennstoffes begründet ist, wird im Kapitel 4.5 dargestellt.

Um zu klären, welches Chlorsubstitutionsmuster der HxCDF unter instationären Verbrennungsbedingungen zu finden ist, wird in der Abbildung 4.3-11 der *loading plot* der entsprechenden HKA dargestellt.

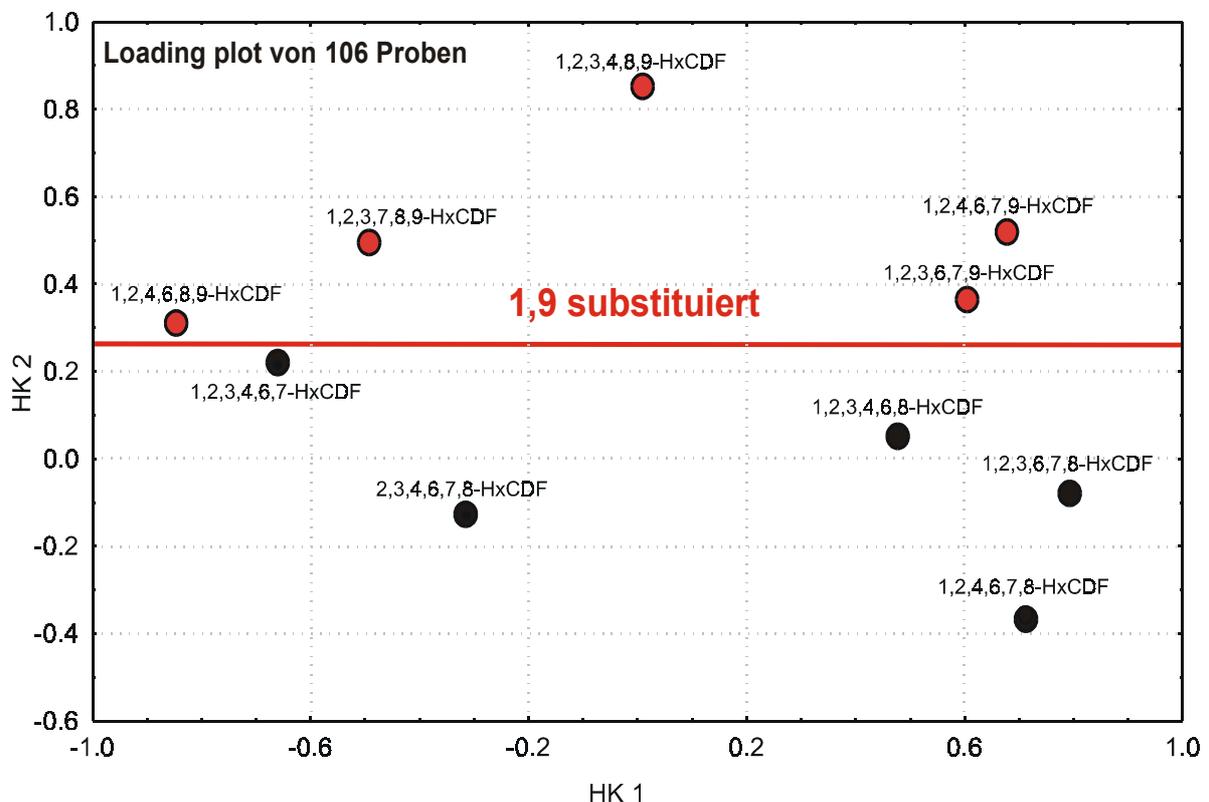


Abbildung 4.3-11: Loading plot der HxCDF (erklärte Varianz 1.HK: 74%, 2HK: 12%, n = 106)

Mit Hilfe des *score plots* für die HxCDF (Abbildung 4.3-10) läßt sich aus der Abbildung 4.3-11 ableiten, daß durch instationäre Verbrennungsbedingungen vor allem Veränderungen bezüglich der in 1- und 9-Position chlorsubstituierten Isomeren im Isomerenmuster der HxCDF hervorgerufen werden. Die Chlorsubstitution in 1- und 9-Position führt durch die Annäherung der Chloratome im PCDF-Molekül zu einem sterisch gespannten Molekülaufbau (siehe Kapitel 4.3.2.2). Dies könnte ein Hinweis darauf sein, daß unter instationären Verbrennungsbedingungen auch thermodynamisch nicht bevorzugte Kongenere verstärkt gebildet werden können. Betrachtet

man die Stabilität des Isomerenmusters des HxCDF im Kapitel 4.3.2.2 (Abbildung 4.3-18) und die niedrige erklärte Varianz der 2.HK von 12% in der Abbildung 4.3-11, so ist allerdings der Einfluß der instationären Verbrennungsbedingungen auf die HxCDF-Isomerenmuster als gering einzustufen. Die hohe Stabilität der Kongenerenmuster der Chloraromaten auch bei instationären Verbrennungsbedingungen wurde bereits in der Literatur gezeigt (81), (254), (255), (123).

In einer HKA werden die 282 analysierten Kongeneren der Chloraromaten für alle Proben untersucht (Abbildung 4.3-12).

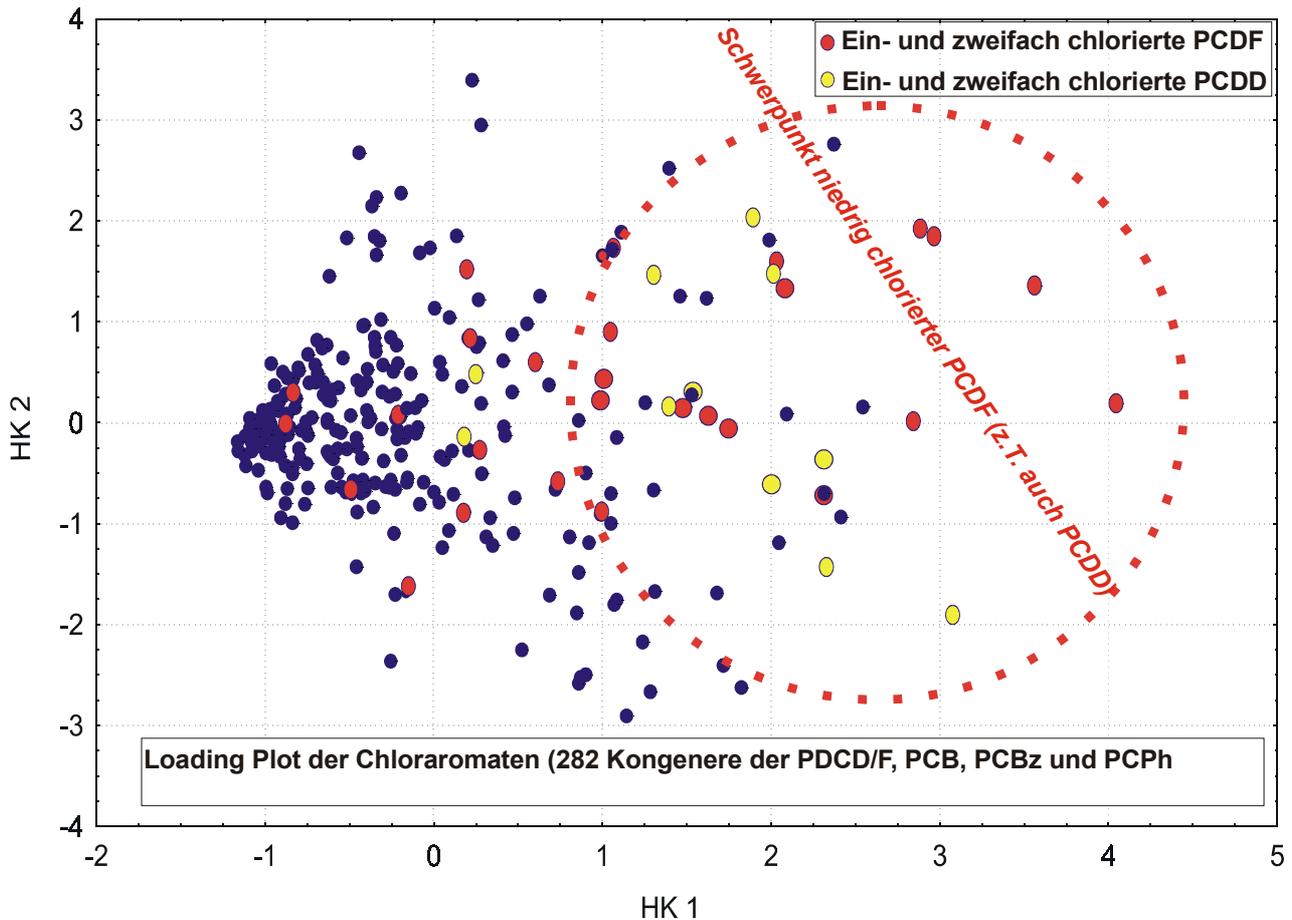


Abbildung 4.3-12: *Loading plot* für die Kongeneren aller Chloraromaten (erklärte Varianz 1.HK: 72%, 2HK: 7%, $n = 282$)

Die hohen Anteile der erklärten Varianzen beider HK (72%; 7%) in der Abbildung 4.3-12 bestätigen, daß die Kongenerenmuster aller Chloraromaten an allen Anlagen mit Ausnahme der niedrig chlorierten PCDF und PCDD als äußerst stabil anzusehen sind. Die niedrig chlorierten Kongeneren der PCDD/F zeigen bei instationären Verbrennungsbedingungen (z.B. CO-Spitzen) unabhängig vom Anlagentyp ein zu den anderen Chloraromaten unterschiedliches Verhalten (siehe auch Kapitel 4.1 und Kapitel 4.4), wie dies der entsprechende *score plot* in Abbildung 4.3-13 bestätigt.

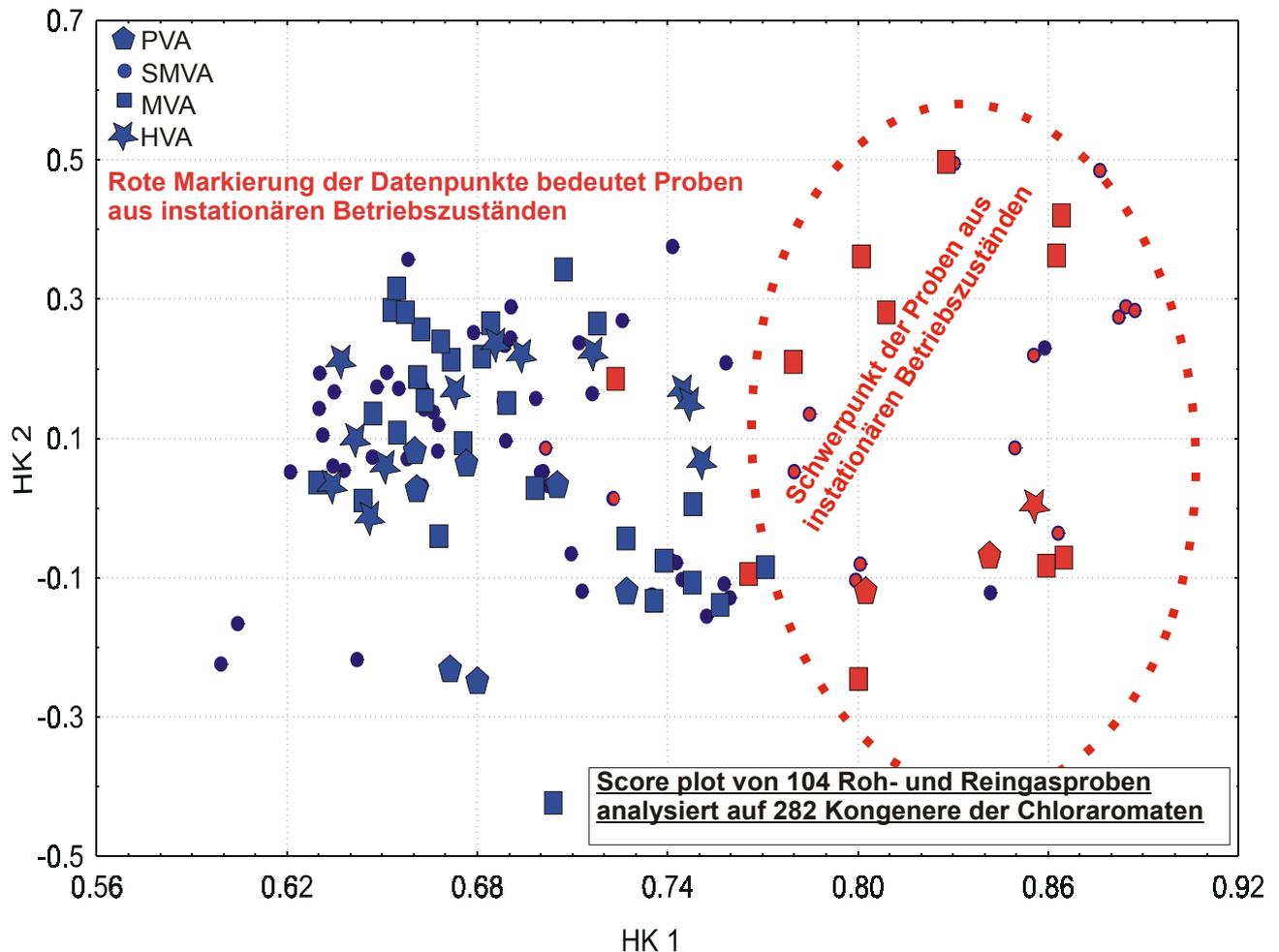


Abbildung 4.3-13: Score plot für die Kongenere aller Chloraromaten (erklärte Varianz 1.HK: 72%, 2HK: 7%, $n = 104$)

Im score plot der Abbildung 4.3-13 findet sich keine Gruppierung der Datenpunkte bezüglich der Anlagentypen, so daß wahrscheinlich ähnliche Bildungsprozesse der Chloraromaten an allen untersuchten Anlagen anzutreffen sind.

Zusammenfassend betrachtet, erweisen sich die Kongenerenmuster der Chloraromaten gegenüber instationären Verbrennungsbedingungen als äußerst stabil. Im folgenden Kapitel werden die Regelmäßigkeiten in den Kongenerenmustern der untersuchten Chloraromaten ausführlich dargestellt und daraus ein Bildungsschema entworfen.

4.3.2.1 Polychlorierte Benzole (PCBz) und Polychlorierte Phenole (PCPh)

In der Abbildung 4.3-14 werden die Verteilungen der PCBz- und PCPh-Kongenere in relativen Konzentrationen dargestellt. Die Normierung auf die relative Kongenerenkonzentration erfolgte

durch eine Division der absoluten Kongenerenkonzentration durch die absolute Homologenkonzentration des jeweiligen Chlorierungsgrades.

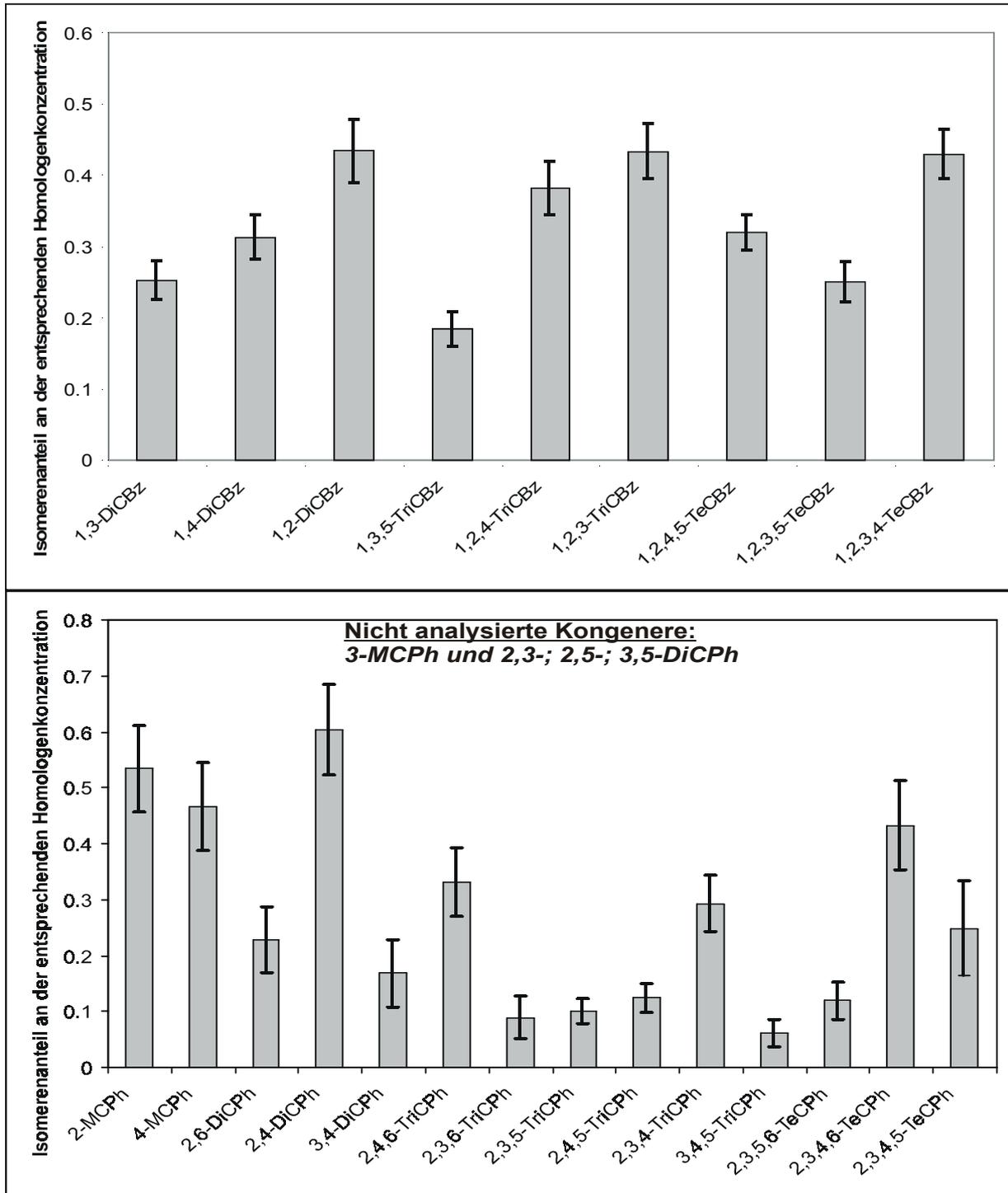


Abbildung 4.3-14: Verteilung der Kongeneren von PCBz und PCPh (Fehlerbalken entsprechen den Konfidenzintervallen der Mittelwerte, $\alpha = 5\%$, $n = 104$ für PCBz; $n = 51$ für PCPh)

In Abbildung 4.3-14 treten in den Kongenerenmustern der PCBz und der PCPh einige Kongenere deutlich hervor. Das PCBz-Kongenerenmuster weist verstärkt Kongenere mit nachbarständigen Chloratomen auf. Im PCPh-Kongenerenmuster zeigen das 2,4-DiCPh, 2,4,6-TriCPh und 2,3,4,6-TeCPh die höchsten relativen Konzentrationen. Ein Vergleich mit Literaturdaten bestätigt die Verteilung der Kongenere in den für diese Arbeit dargestellten Kongenerenmuster der PCBz und PCPh (256), (48), (236).

Um festzustellen, ob die Verteilung der Kongenere der PCPh und PCBz von der Thermodynamik beeinflusst wird, wurden semiempirische quantenchemische Rechnungen durchgeführt (vgl. Kapitel 3.4.2). Die Ergebnisse dieser Berechnungen wurden in der Abbildung 4.3-15 mit experimentellen Daten und Daten aus *ab-initio* Rechnungen (vgl. Kapitel 3.4.2) verglichen (257), (258), (259), (260), (261), (262), (42), (263), (264).

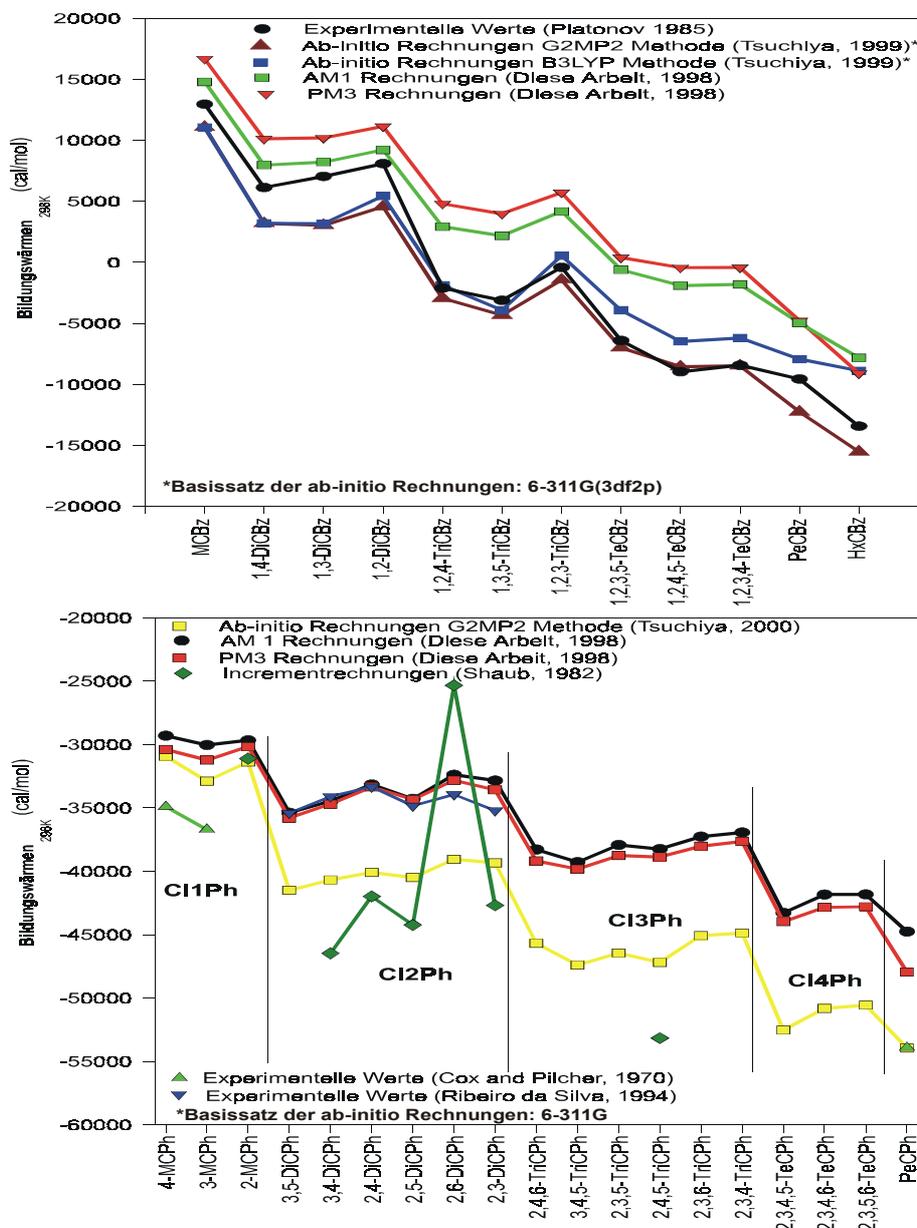


Abbildung 4.3-15: Vergleich der Werte für die Bildungswärmen der PCBz und PCPh (Erläuterungen siehe Text)

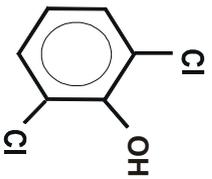
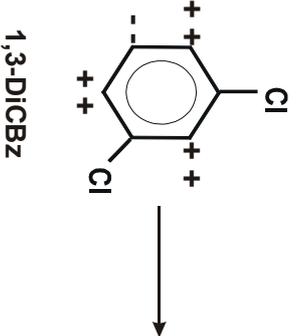
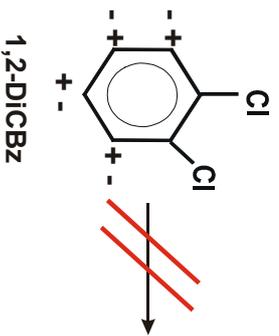
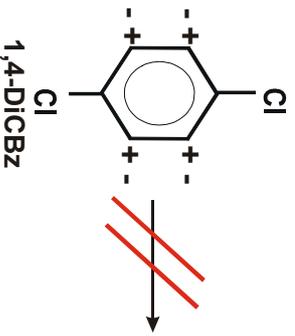
In der Abbildung 4.3-15 zeigen die experimentellen und alle berechneten Werte für die Bildungswärmen der PCBz und PCPh den gleichen Trend innerhalb eines Chlorierungsgrades. Der Vergleich der experimentellen Werte mit den aus den *ab-initio* und semiempirischen Berechnungen gewonnenen Werten ergibt, daß die AM1 und PM3 Rechnungen die experimentellen Werte über- und die *ab-initio* Rechnungen die experimentellen Werte unterschätzen. Die unterschiedlichen Werte für die Bildungswärmen der PCPh aus den AM1 und PM3 Rechnungen sind vor allem auf die unterschiedliche Berechnung der Cl-OH Wechselwirkung zurückzuführen (265).

Aus den Werten der quantenchemischen Rechnungen kann abgelesen werden, daß höher chlorierte Verbindungen thermodynamisch stabiler sind als niedrig chlorierte. Außerdem zeigt sich das PCPh thermodynamisch stabiler sind als die PCBz des gleichen Chlorierungsgrades.

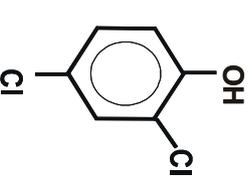
Die Verteilung der Kongeneren der PCBz und PCPh ist nicht thermodynamisch kontrolliert, da die Kongeneren mit den höchsten relativen Konzentrationen in der Abbildung 4.3-14 nicht mit den Kongeneren in Abbildung 4.3-15 übereinstimmen, welche die niedrigsten Werte für die Bildungswärmen zeigen.

Die im Kapitel 4.3.1 gezeigten Nachbildungsraten für PCPh und PCBz entlang des Rauchgaskanals der SMVA und der MVA und die dabei im Vergleich zu den PCBz gefundene höhere Nachbildungsrate der PCPh könnte darauf zurückzuführen sein, daß die PCPh Oxidationsprodukte der bereits gebildeten PCBz sind. Mögliche Reaktionen der PCBz unter den aktivierenden Eigenschaften von o,p- und den deaktivierenden Eigenschaften von m-substituierten Cl-Atomen sind in der Abbildung 4.3-16 gezeigt (-I und +M Effekt der Chlorsubstituenten). Als weitere die Konzentration der PCPh-Kongeneren beeinflussende Parameter wurden die Symmetrie des PCBz-Kongeneres (Anzahl der Orte mit gleicher Ladungsdichte im PCBz-Molekül; grün markiert) und die Wechselwirkung zwischen OH- und Cl-Atomen (Einfluß der Elektronendichten; rot markiert) qualitativ in die Bewertung einbezogen.

Elektronisch (de-)aktivierte Positionen im PCBz-Kongener (+ oder -)



+



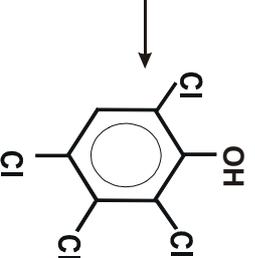
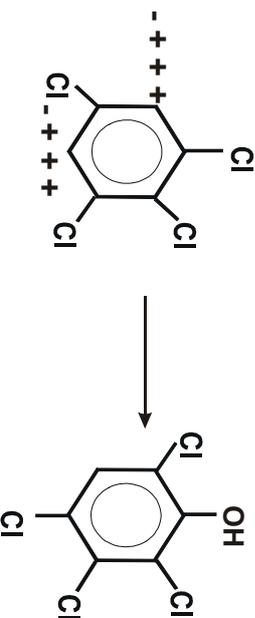
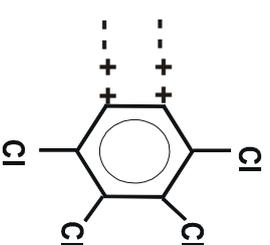
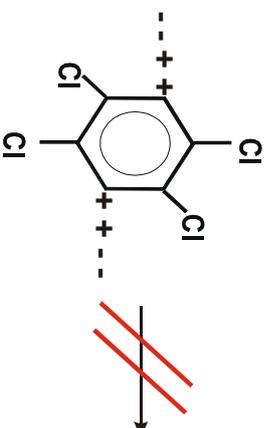
2,6-DiCBz-(0.5)

2,4-DiCBz (*2)

Resultierende DiCBz-Konzentrationsreihenfolge:

c (2,4-DiCBz) > c (2,6-DiCBz)

PCPh-Konzentration beeinflussenden Parameter:
Symmetrische Einflüsse
 Sterische Wechselwirkungen (Elektronendichten,
 z.B. Cl-OH-Cl ortho-Substitution)

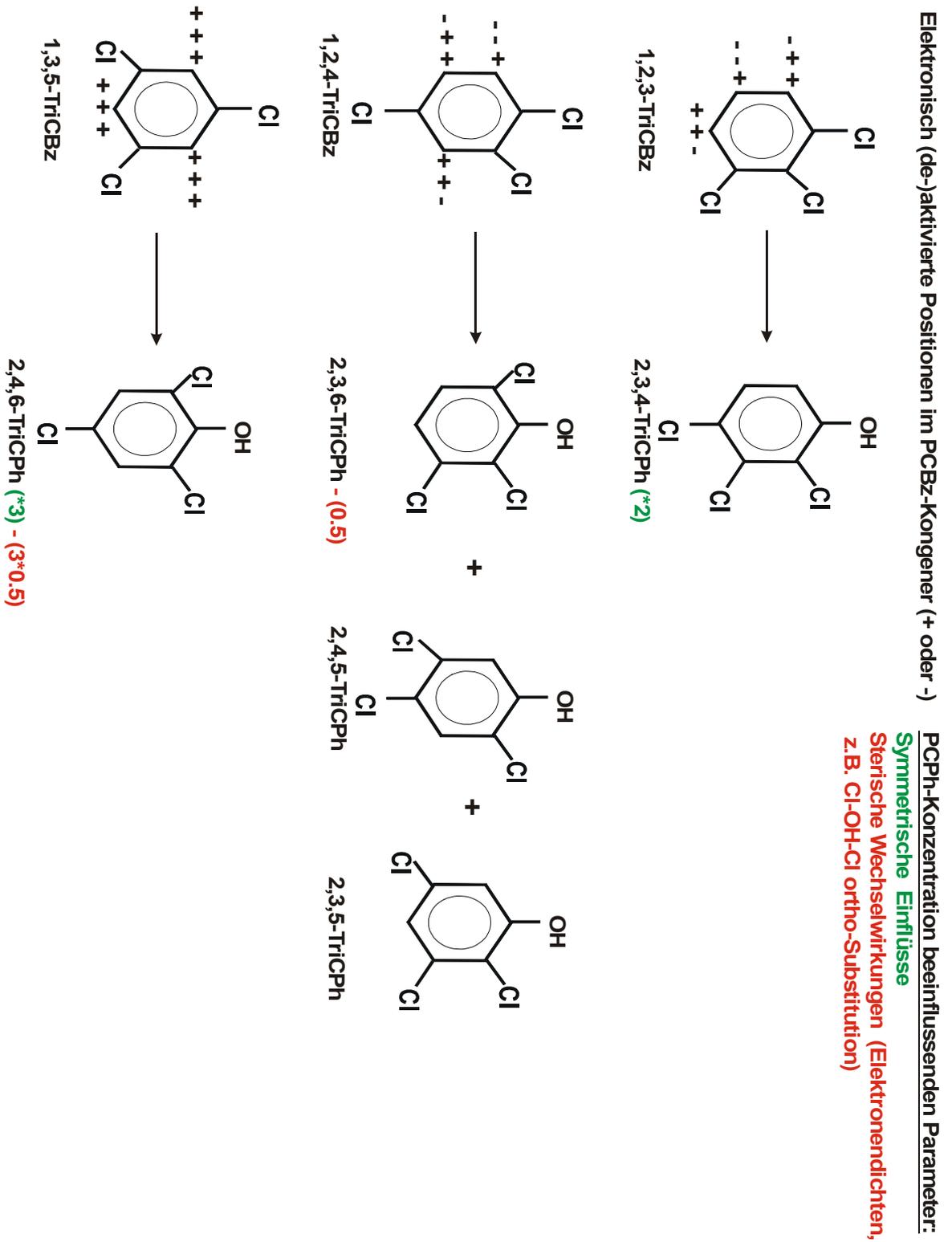


1,2,3,5-TeCBz

2,3,4,6-TeCBz (*2)-(0.5)

Resultierende TeCBz-Konzentrationsreihenfolge:

c (2,3,4,6-TeCBz) > c (2,3,4,5-TeCBz)



Resultierende TricPh-Konzentrationsreihenfolge: c (2,4,6-TricPh) >> c (2,3,4-TricPh) > c (2,3,6+2,4,5 TricPh)

Abbildung 4.3-16: Bevorzugte Molekülpositionen für eine Oxidation von PCBz zu PCPh durch OH-Radikalenangriff (Erklärungen der aktivierenden und deaktivierenden Moleküleigenschaften: siehe Text vor der Abbildung)

Aus den theoretischen Betrachtungen in Abbildung 4.3-16 lassen sich für die folgende PCPh-Kongeneren die höchsten relativen Konzentrationen ableiten: 2,4-DiCPh; 2,4,6- + 2,3,4-TriCPh und 2,3,4,6-TeCPh. Diese PCPh-Kongeneren zeigen auch die höchsten Konzentrationen in dem PCPh-Kongenerenmuster an den untersuchten Anlagen (Abbildung 4.3-14).

Betrachtet man die reaktivsten PCBz-Kongeneren aus Abbildung 4.3-14, so sind das die thermodynamisch stabilsten PCBz-Kongeneren in der Abbildung 4.3-15. Ein Grund für die niedrigen relativen Konzentrationen der thermodynamisch stabilen PCBz im PCBz-Kongenerenmuster könnte somit die Reaktion zu den PCPh gemäß Abbildung 4.3-16 sein. In der Literatur wurde dieser Einfluß auf das Kongenerenmuster der PCBz und PCPh ebenfalls postuliert (256), (48). Ein ähnliches Verhalten zeigte sich auch bei der Bildung der PCDD-Kongeneren (76). In dieser Studie wurde gefunden, daß die niedrigen relativen Konzentrationen der thermodynamisch stabilen Kongeneren im Kongenerenmuster auf deren höhere Reaktivität zurückgeführt werden können.

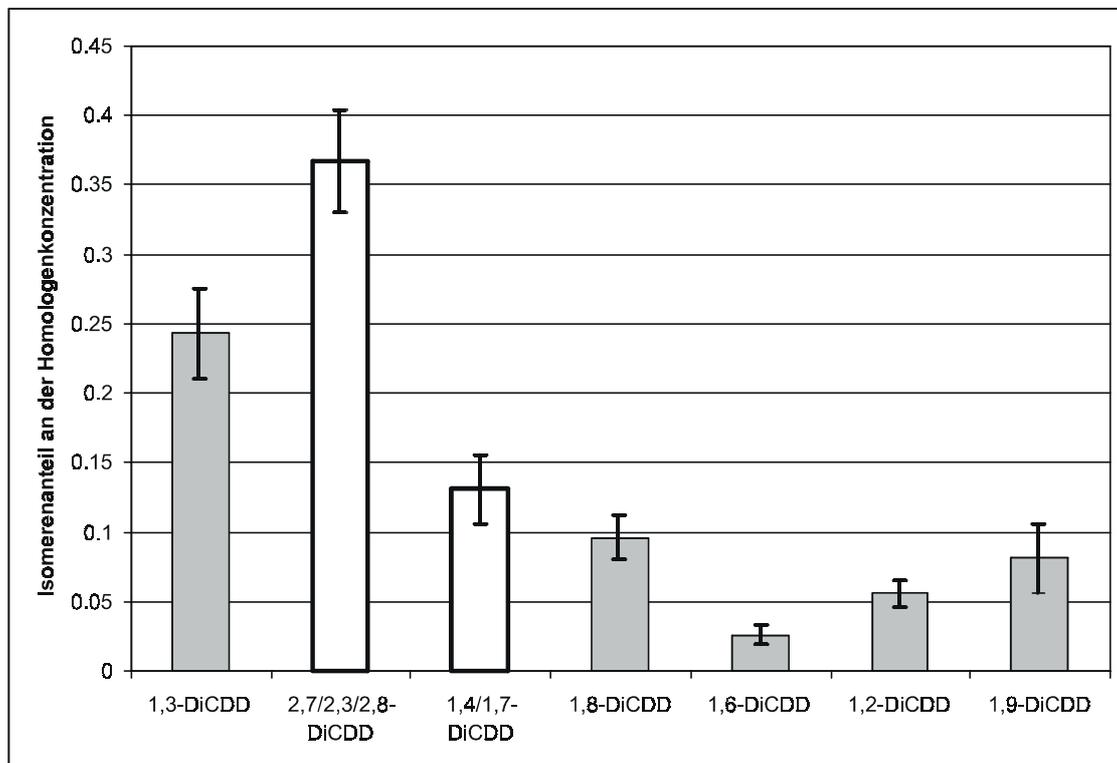
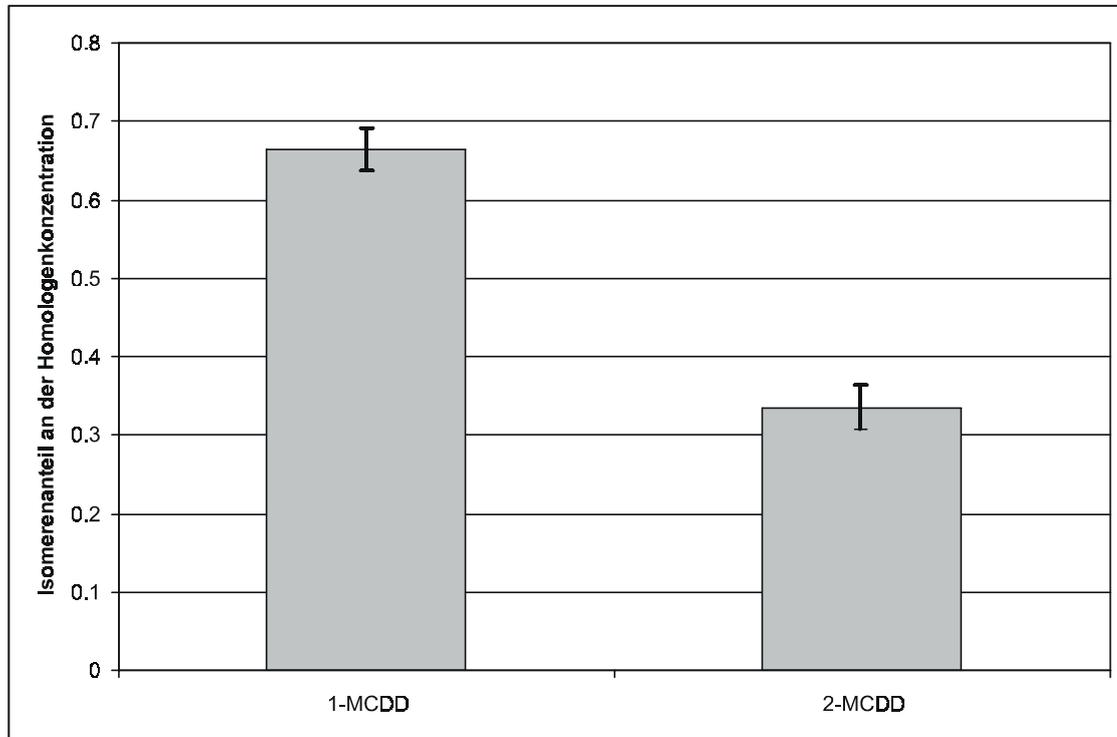
Die Stereoselektivität des OH-Radikalangriffs an den PCBz wird durch die HOMO-Elektronendichte (= *highest occupied molecular orbital*) der PCBz-Kongeneren gesteuert, was durch quantenchemische Rechnungen gezeigt werden konnte (266), (267). Die quantenchemischen Rechnungen sowie Literaturdaten (268) weisen darauf hin, daß die HOMO-Elektronendichten der PCBz-Kongeneren an denjenigen Molekülpositionen die höchsten Werte erreichen, gemäß der Abbildung 4.3-16 die reaktivsten Molekülpositionen darstellen.

Es ist bekannt, daß bei der Verbrennung und Pyrolyse von PCBz bevorzugt PCPh entstehen (269), (58). Aus neueren Laboruntersuchungen geht hervor, daß die PCPh im Temperaturbereich 500 bis 700°C das chlorierte Hauptprodukt beim thermischen Umsatz von PCBz darstellen (270), (271), (272). Die wichtigste Reaktion für diesen Bildungsweg ist die Oxidation der PCBz durch OH-Radikale. Diese OH-Radikale weisen thermodynamischen Berechnungen zufolge ebenfalls zwischen 500°C und 700°C ein Konzentrationsmaximum auf (265).

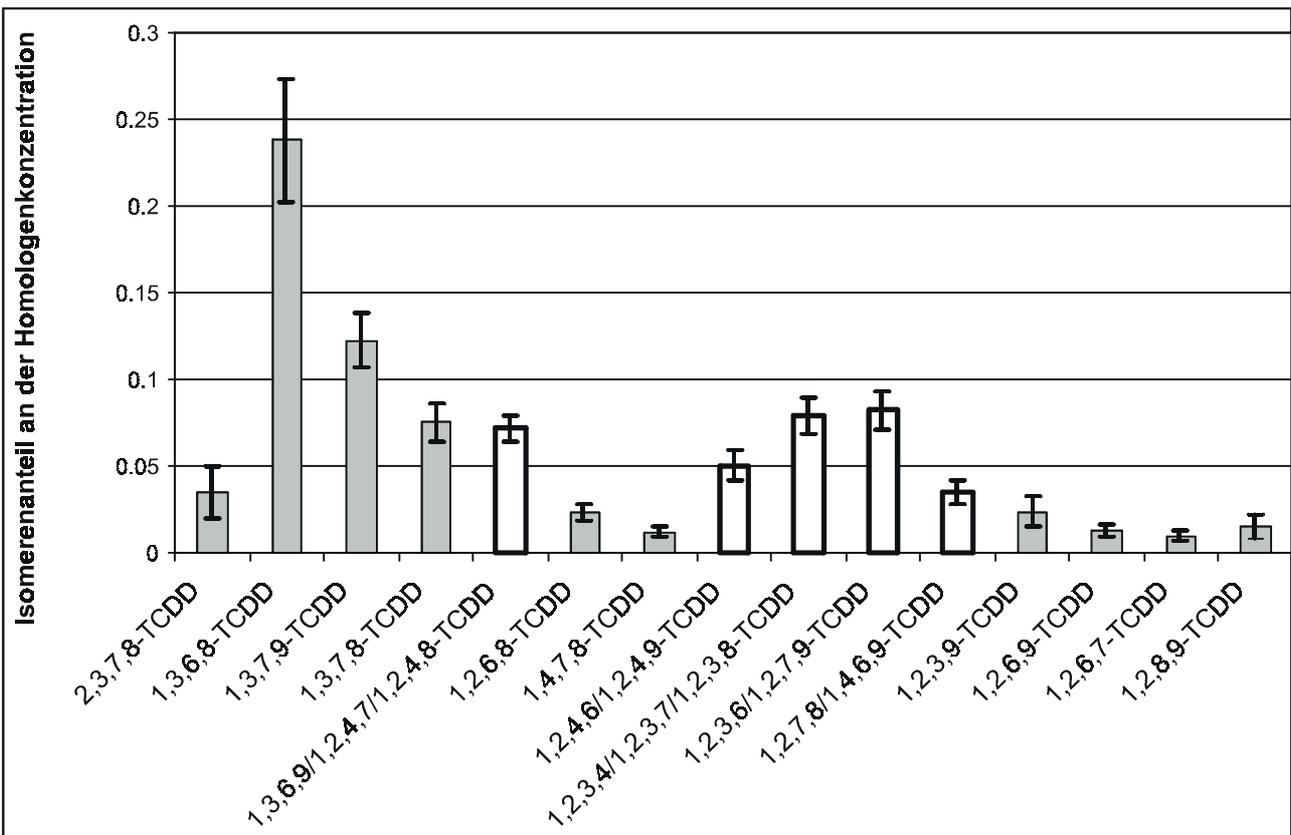
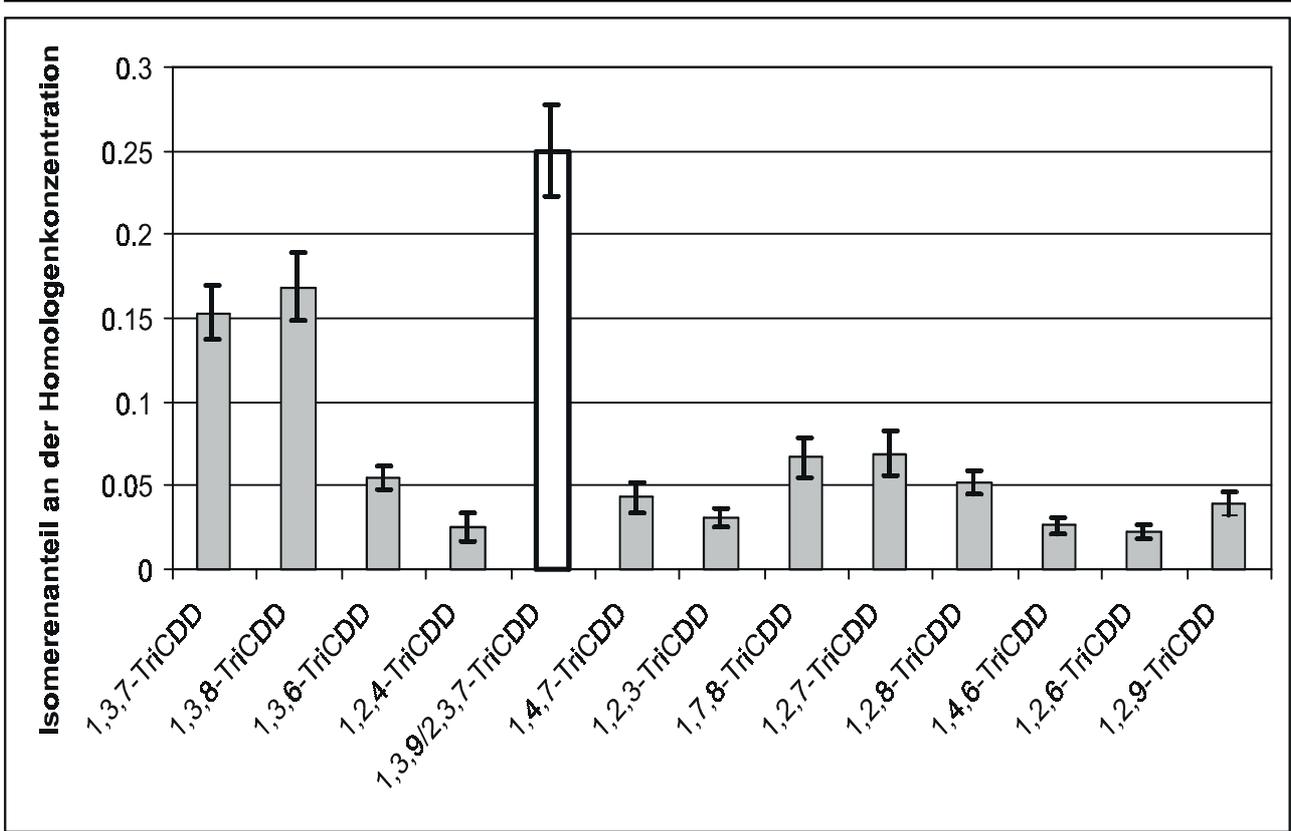
Die zitierten Studien und die Ergebnisse der hier vorgestellten Arbeit geben einen Hinweis auf eine mögliche Bildung der PCPh aus PCBz an großtechnischen Feuerungsanlagen. Sowohl der Temperaturbereich als auch die heterogene Oberfläche (z.B. kohlenstoffhaltige Strukturen mit Metalleinlagerungen) der Flugasche werden bei den in der Literatur beschriebenen Laborexperimenten als wichtige Parameter für die Bildung der PCPh aus PCBz betrachtet (273), (271). Es bleibt festzuhalten, daß für die Bildung der PCPh sicherlich auch eine Reihe anderer Bildungswege verantwortlich ist, aber für großtechnische Anlagen im Rahmen dieser Arbeit nicht aufgeklärt werden kann.

4.3.2.2 Polychlorierte Dibenzo-*p*-dioxine (PCDD) und polychlorierte Dibenzofurane (PCDF)

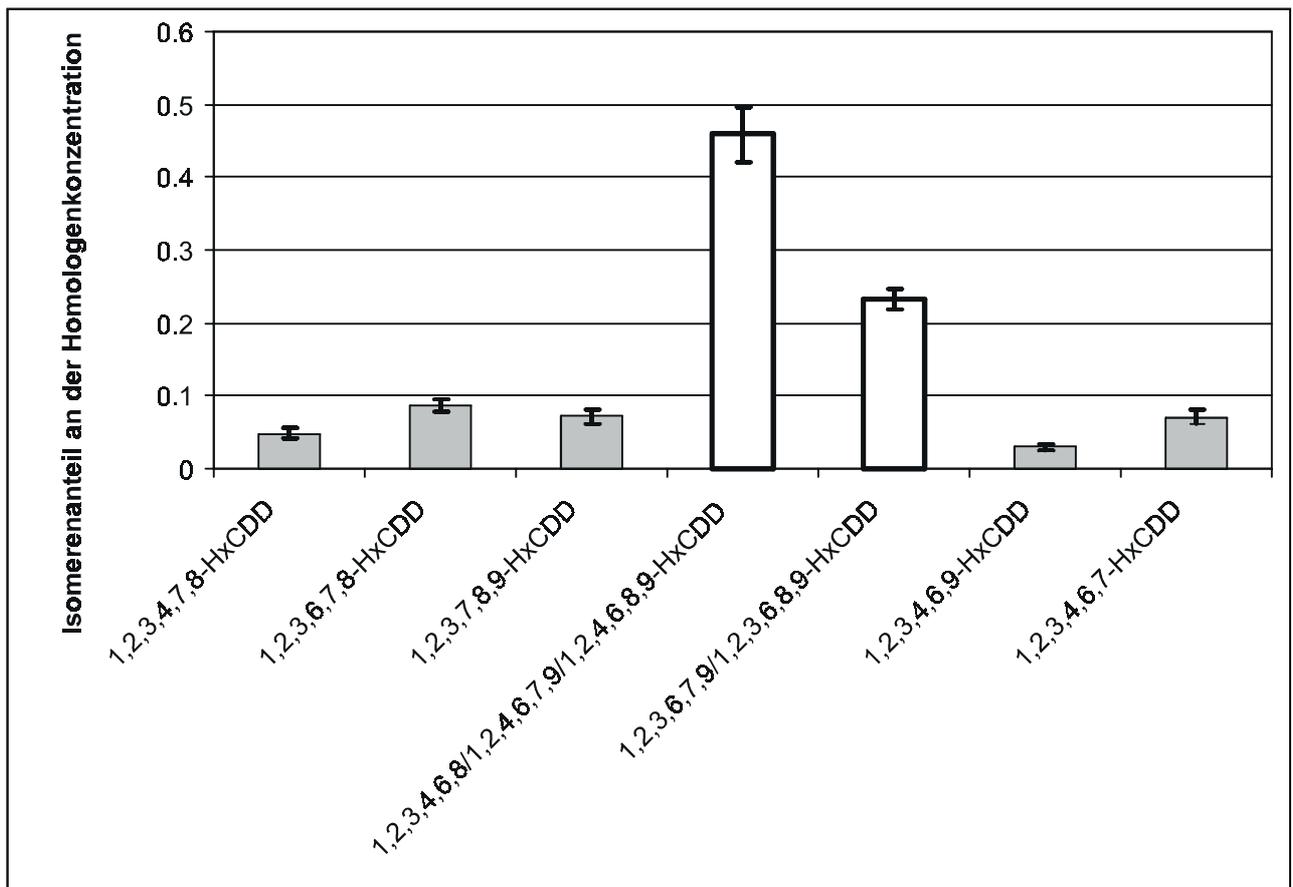
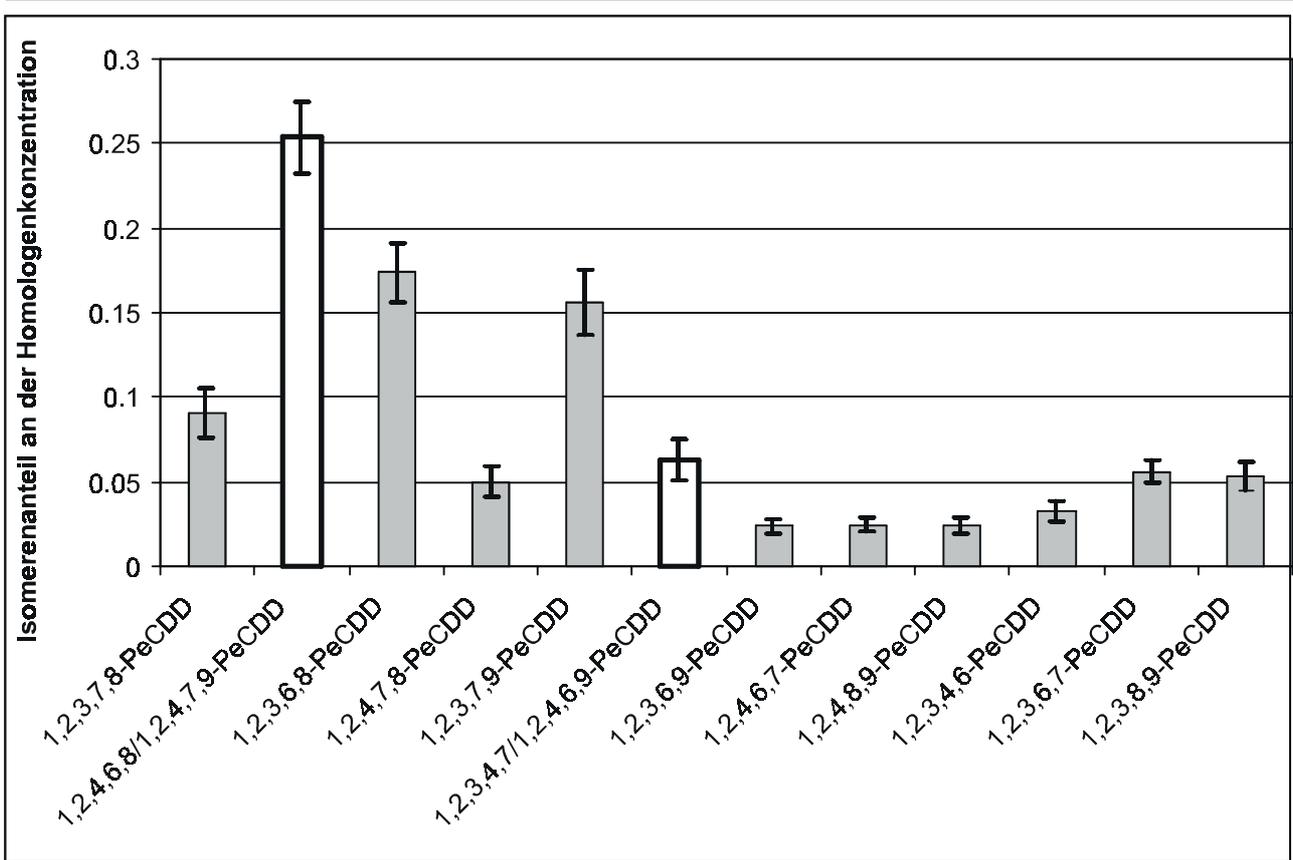
Die Abbildung 4.3-17 zeigt die in den untersuchten Proben gemessene Kongenerenverteilung der PCDD. Bei der GC-Analyse konnten verschiedene Isomere nicht getrennt werden (Koelution). Um das eigentliche PCDD-Kongenerenmuster deutlicher werden zu lassen, wurden diese koeluzierenden Kongeneren in den folgenden Bildern weiß dargestellt.



4. Ergebnisse und Diskussion



4. Ergebnisse und Diskussion



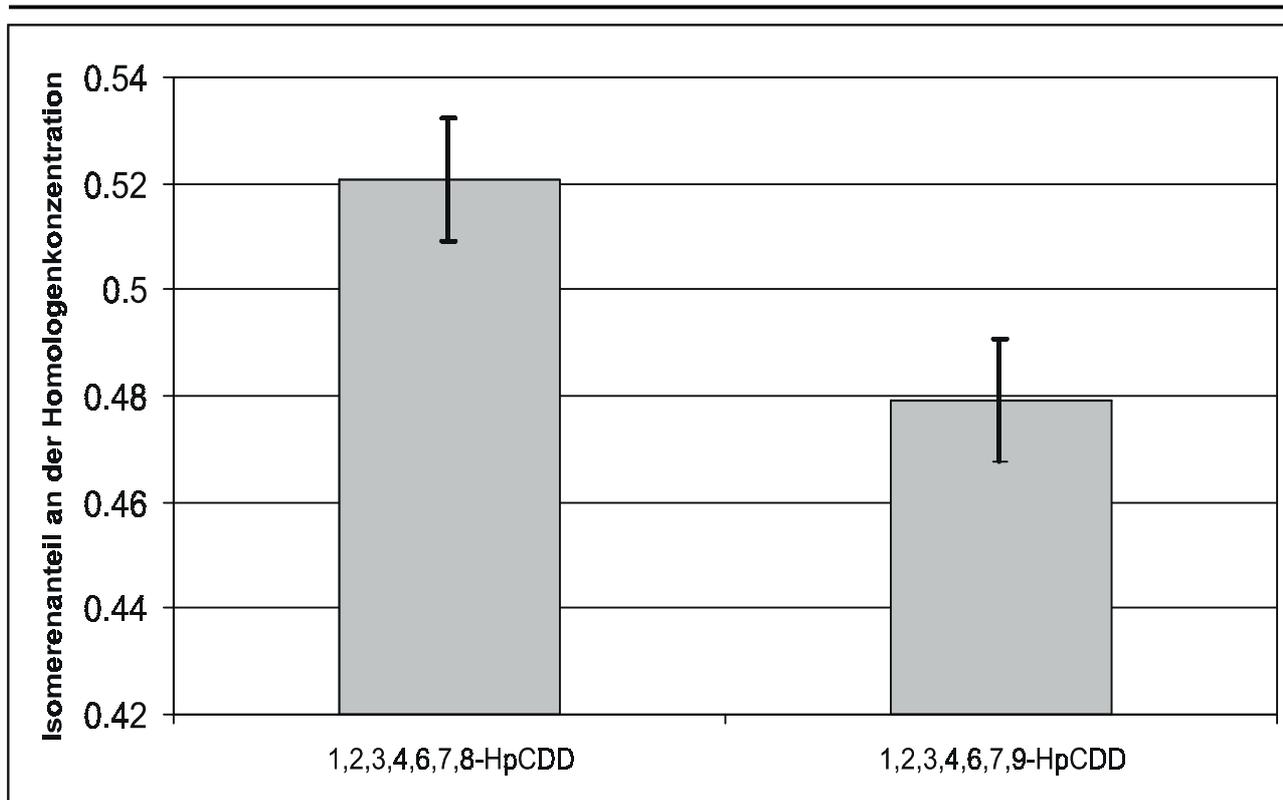


Abbildung 4.3-17: Verteilung der Kongeneren der PCDD (Fehlerbalken entsprechen den Konfidenzintervallen der Mittelwerte, $\alpha = 5\%$, $n = 104$)

Aus der Literatur ist bekannt, daß die in meta-Stellung (1- und 3-Position) chloresubstituierten PCDD-Kongeneren verstärkt im PCDD-Kongenerenmuster aus Verbrennungsprozessen gefunden werden („meta-Regel“) (274), (275). Auch das in der Abbildung 4-3-17 dargestellte PCDD-Kongenerenmuster dieser Arbeit bestätigt die „meta-Regel“, z.B. 1,3,6,8- und 1,3,7,9-TCDD. Auch bei den höher chlorierten Kongeneren, wie z.B. den HxCDD, wird das Isomer bevorzugt gebildet, welches an einem Benzolring vollständig chloriert ist und die Chlorierung am zweiten Benzolring der oben beschriebenen „meta-Regel“ gehorcht (1,2,3,4,6,8-HxCDD). Die bei der Bildung am wenigsten favorisierten Kongeneren sind die mehrfach in den Positionen 1,4,6,9 substituierten Kongeneren. Für diesen Befund sind vor allem die elektronischen Wechselwirkungen der Chloratome mit den Sauerstoffatomen verantwortlich („ortho-Effekt“).

In der Literatur wurde versucht, die Entstehung des Kongenerenmusters der PCDD aus einem Wechselspiel zwischen Thermodynamik und Kinetik der Bildungs- bzw. Zersetzungsmechanismen abzuleiten (276), (277), (81). So wurden die in 2,3,7,8-Position substituierten Kongeneren als die thermodynamisch stabilsten Verbindungen identifiziert, welche aber gleichzeitig die höchste Reaktivität gemäß den Betrachtungen der HOMO-LUMO Elektronendichten aufweisen. Durch eine qualitative Zuordnung dieser molekülspezifischen Eigenschaften zu jedem PCDD-Kongener konnte die oben dargestellte „meta-Regel“ erklärt werden (81). Dieser monokausale Erklärungsansatz für die Entstehung des PCDD-Kongenerenmusters erweist sich vor dem

Hintergrund möglicher anderer Bildungsmechanismen als problematisch (siehe auch Kapitel 2.4.1).

In einer neueren Arbeit wurden deshalb sowohl thermodynamische und statistische Aspekte bei der Interpretation des PCDD-Kongenerenmusters berücksichtigt (249). Diese Studie macht deutlich, daß die Bildung des PCDD- und des PCDF-Kongenerenmusters nicht thermodynamisch kontrolliert ist. Darüber hinaus wurde gezeigt, daß weder die Ergebnisse aus Experimenten zur Dechlorierung von OCDD, noch die Ergebnisse der Chlorierung von DD das in Proben aus Verbrennungsprozessen gefundene PCDD-Kongenerenmuster beschreiben können (278), (250), (249), (252).

Als ein wichtiger Bildungsmechanismus für die PCDD werden Phenolkondensationen angesehen (274), (47), (275), (251), (66), (67). So wurde in einem Laborexperiment auf künstlichen Flugaschen unter Kupferkatalyse eine Mischung der zehn in Müllverbrennungsanlagen am häufigsten vorkommenden PCPh-Kongeneren (vgl. PCPh-Kongenerenmuster im Kapitel 4.3.2.1; Abbildung 4.3-14) zwischen 300°C und 500°C verbrannt (279). Das bei diesem Versuch gefundene PCDD-Kongenerenmuster ist dem in Abbildung 4.3-17 gezeigtem Kongenerenmuster sehr ähnlich. Die höchsten relativen Konzentrationen im Kongenerenmuster zeigen dabei 1,3,6,8- + 1,3,7,9-TCDD, 1,2,4,6,8-/1,2,4,7,9- + 1,2,3,6,8-, 1,2,3,7,9-PeCDD und 1,2,4,6,7,9-/1,2,4,6,8,9-/1,2,3,4,6,8- + 1,2,3,6,7,9-/1,2,3,6,8,9-HxCDD. In anderen Laborexperimenten wurden ebenfalls auf flugascheähnlichen Oberflächen Chlorphenole zu PCDD umgesetzt (98). In dieser Studie fanden sich keine PCDF und PCBz in den Reaktionsprodukten. Die gefundenen PCDD wiesen das für Verbrennungsprozesse typische Kongenerenmuster auf.

In der Literatur findet sich ein Vorschlag für die Chlorphenolkopplung über Radikalmechanismen, der von theoretischen Überlegungen ausgeht (u.a. semiempirische quantenchemische Rechnungen) in der Literatur (98), (64), (280). Die Ladungsdichten und Elektronenverteilungen der Chlorphenole und die der Chlorphenolradikale sind dabei die wichtigsten molekülspezifischen Eigenschaften für das aus dieser Reaktion resultierende PCDD-Kongenerenmuster (64). Auch in diesen Untersuchungen wurde die Gültigkeit der „meta-Regel“ für das PCDD-Kongenerenmuster bestätigt.

Vor dem Hintergrund der in Kapitel 4.3.1.1 und 4.3.1.2 beschriebenen parallelen Bildung von PCDD und PCPh im Abhitzeessel der SMVA und MVA liegt es nahe, daß die Phenolkondensation eine das PCDD-Kongenerenmuster beeinflussende Reaktion sein kann. Damit geben die Ergebnisse dieser Arbeit einen Hinweis darauf, daß die Bildung der PCBz, PCPh und der PCDD an großtechnischen Anlagen in Zusammenhang stehen könnten (vgl. Kapitel 4.3.2.1 und 4.3.2.2).

Das Kongenerenmuster der ein- bis dreifach chlorierten PCDD in der Abbildung 4.3-17 ist dem aus der Literatur bekannten Kongenerenmuster sehr ähnlich (236), (174). Die im Kongenerenmuster dominanten zwei- und dreifach chlorierten PCDD-Kongeneren folgen bezüglich der Chlorsubstitution der „meta-Regel“, und eine Mehrfachsubstitution in den transversalen Molekülpositionen (1,4,6,9-Position) findet sich nur selten (vgl. Abbildung 4.3-17).

Auch für die Entstehung des Kongenerenmusters der niedrig chlorierten PCDD könnten Phenolkondensationsreaktionen verantwortlich sein, da sich im PCPh-Kongenerenmuster (Abbildung 4.3-14) ebenfalls niedrig chlorierte PCPh in ausreichend hoher Konzentration finden.

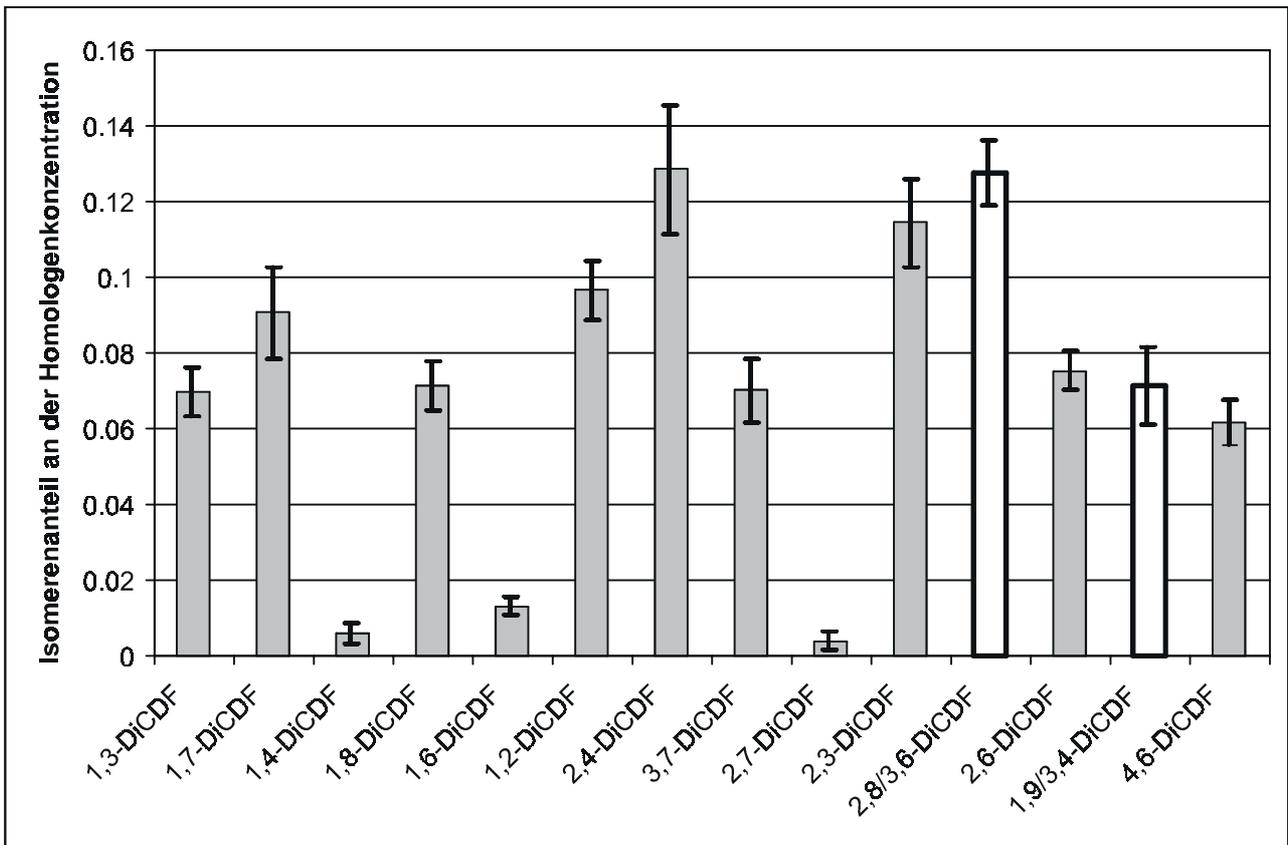
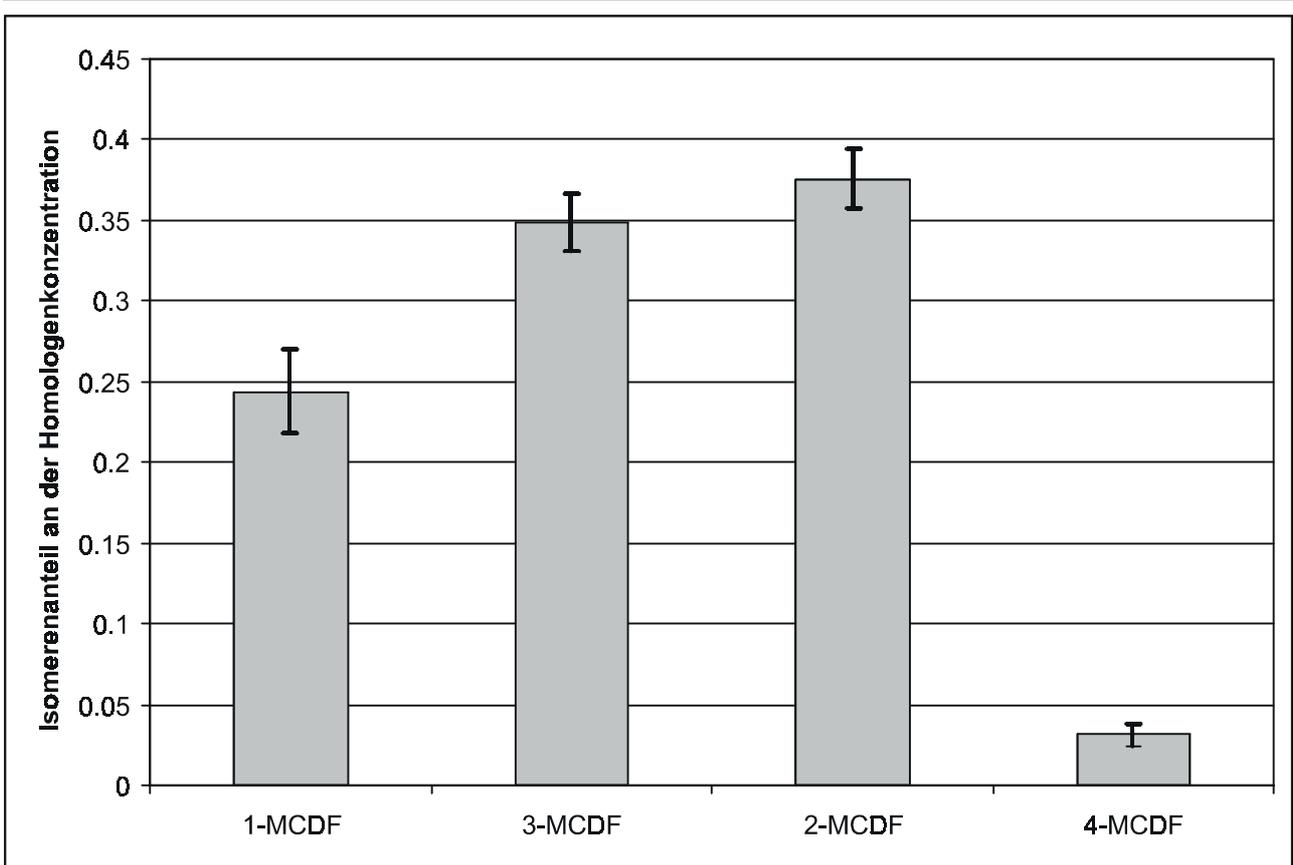
Die verstärkte Bildung der niedrig chlorierten PCDD-Kongeneren während instationärer Verbrennungsbedingungen ist wahrscheinlich ein Hinweis auf einen zusätzlichen von der Phenolkondensation unabhängigen Bildungsweg (vgl. Kapitel 4.3.1.2). Auch in der Literatur finden sich Hinweise für spezielle Bildungsmechanismen der niedrig chlorierten PCDD/F (115). In dieser Studie wurden parallel zu den hohen Konzentrationen der niedrig chlorierten PCDD/F hohe Konzentrationen des Dibenzo-*p*-dioxin (DD) und Dibenzofuran (DF) gefunden. Auch die Ergebnisse an der MVA zeigen, daß bei hohen Konzentrationen von DD und DF im Rauchgas die Konzentration der niedrig chlorierten PCDD-Kongeneren stark erhöht ist. (vgl. Kapitel 4.4.3, Abbildung 4.4-9 und 4.4-12). Diese ähnlichen Befunde weisen darauf hin, daß das Kongenerenmuster der niedrig chlorierten PCDD-Kongeneren nicht nur durch Phenolkondensationsreaktionen bestimmt wird, sondern auch eine Chlorierungsreaktion von Bedeutung sein könnte. Eine Chlorierung von Dibenzo-*p*-dioxin findet bevorzugt in den lateralen 2,3,7,8-Positionen im Molekül statt (47), (97). Aus diesem Grund sind in der Abbildung 4.1-17 die relativen Konzentrationen der in 2,3,7,8-Position substituierten Kongeneren bei den niedrig chlorierten PCDD im Vergleich zu den höher chlorierten PCDD erhöht.

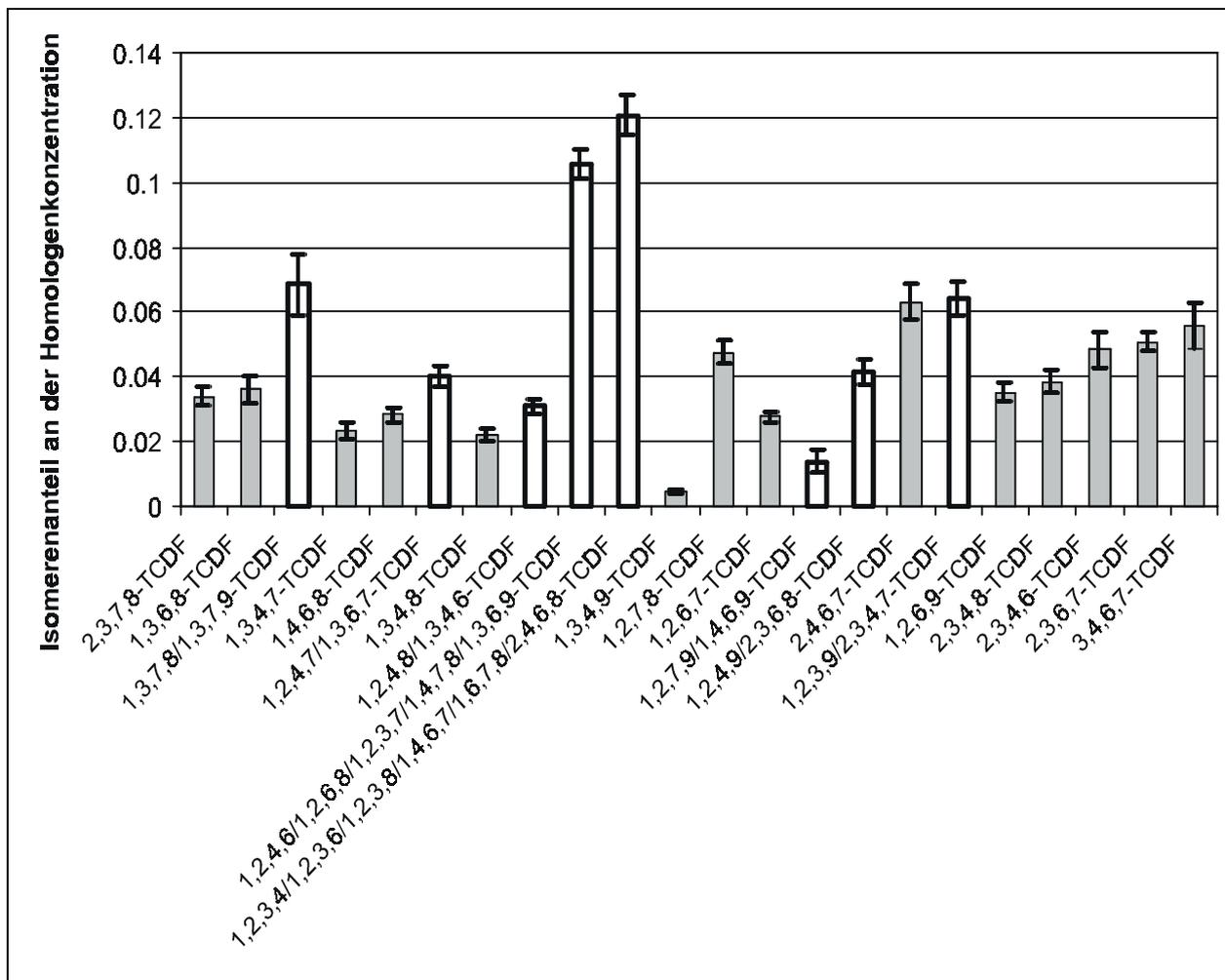
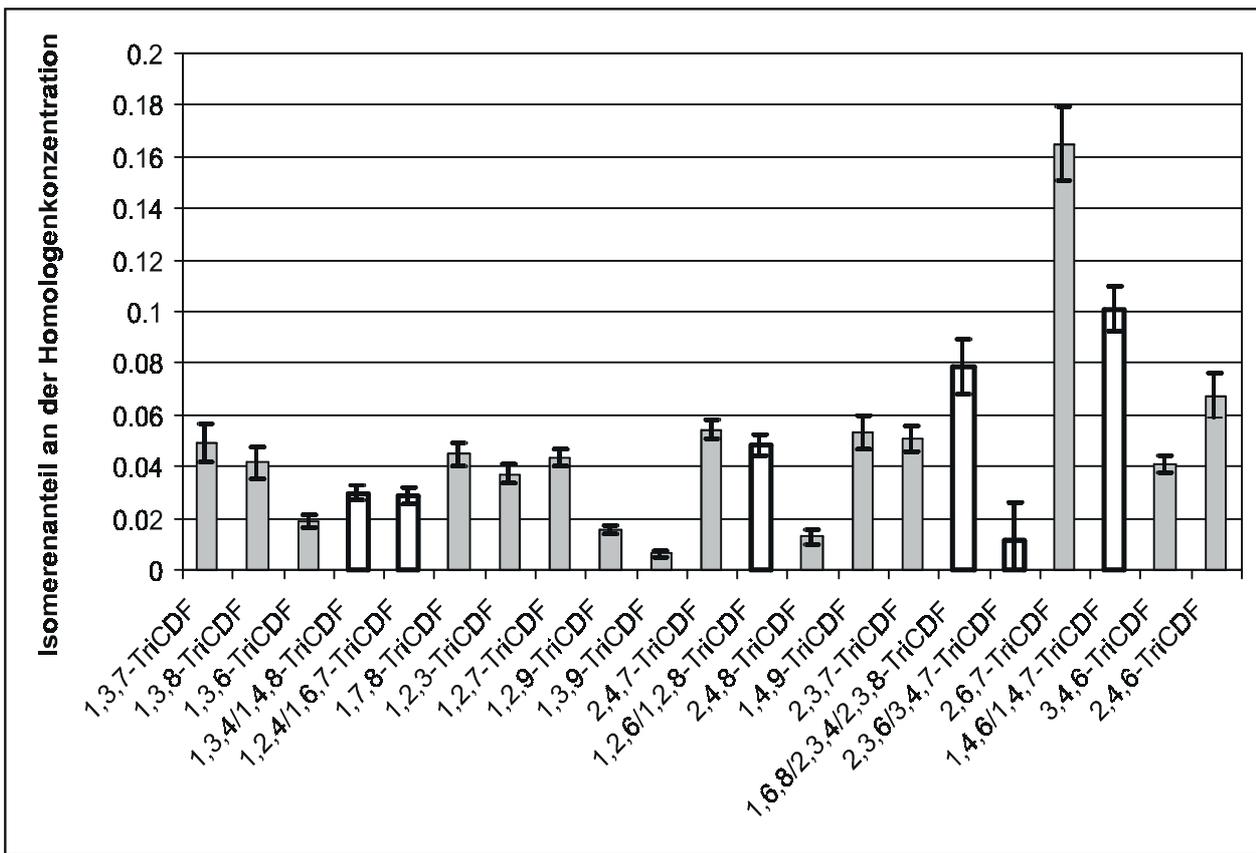
Einen Sonderfall stellt die Verteilung der Isomeren der MCDD dar, da das 1-MCDD das 2-MCDD um den Faktor zwei in der relativen Konzentration übersteigt, obwohl es nach thermodynamischen Berechnungen das instabilere Isomer sein müßte. Allerdings stellt das 2-MCDD auch das reaktionsträgere Isomer bezüglich Oxidation und Reduktion dar (76). Das beobachtete Konzentrationsverhältnis beider Isomere könnte das Ergebnis der kinetischen Kontrolle bei der Entstehung des MCDD-Isomerenmusters sein.

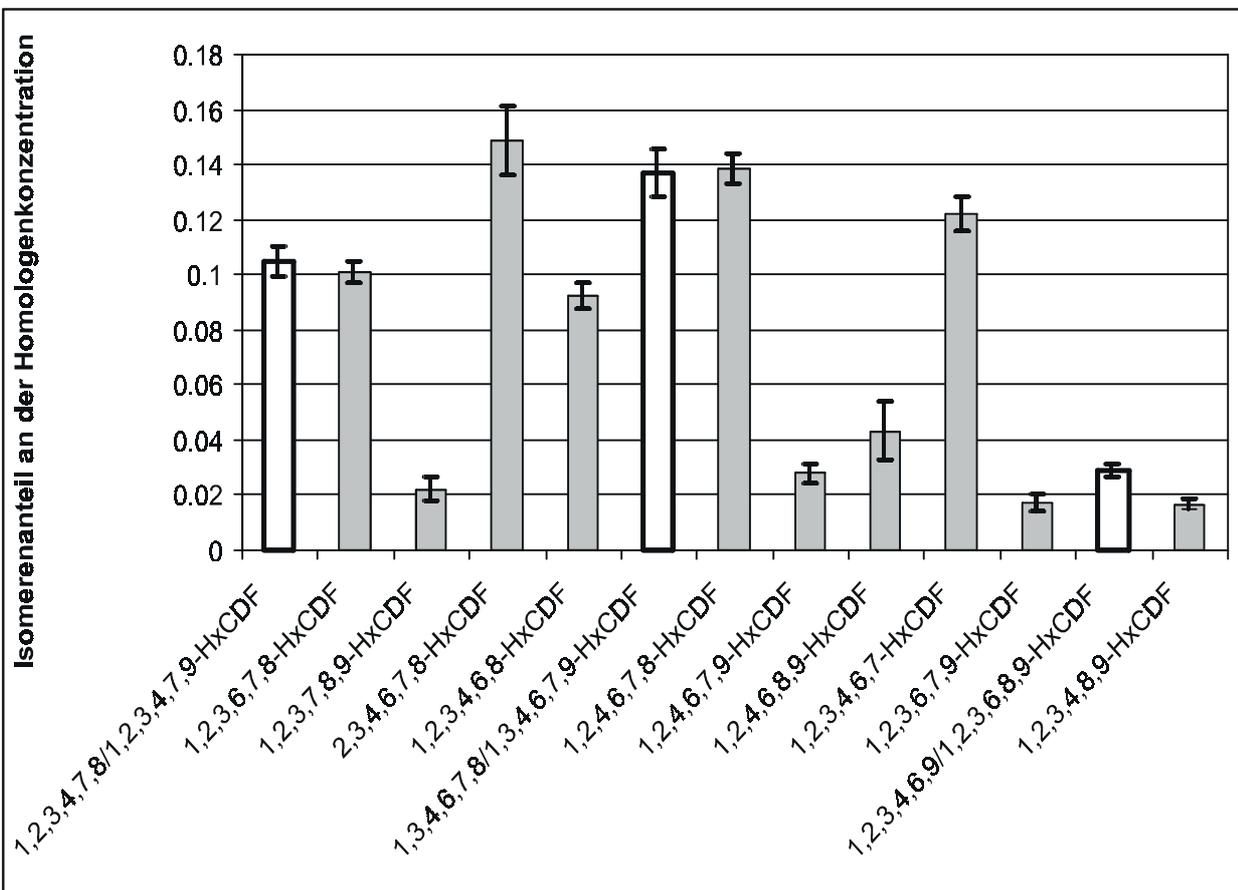
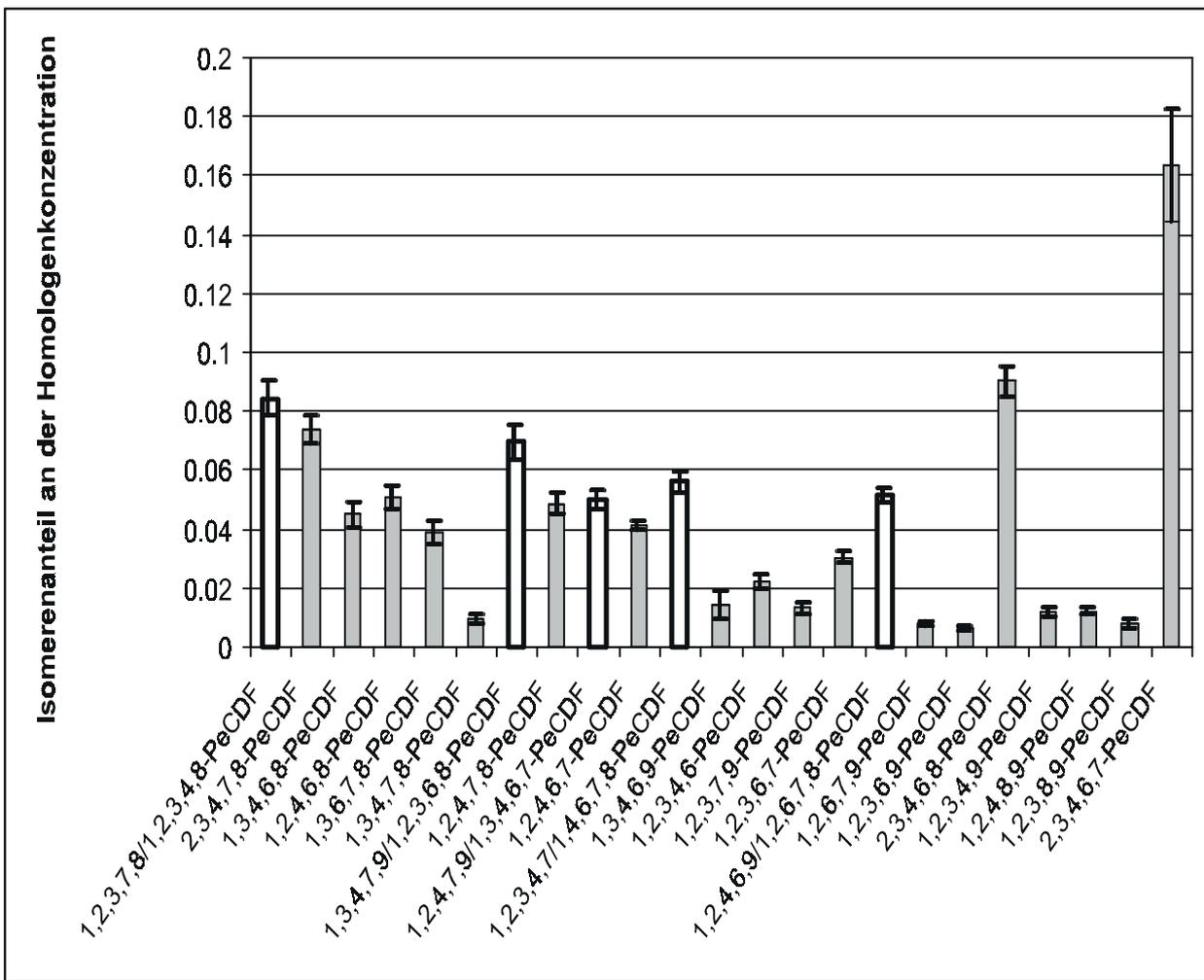
Sowohl niedrig als auch hoch chlorierte PCDD unterliegen nach ihrer Bildung weiteren Chlorierungs- und Dechlorierungsreaktionen, welche einen wesentlichen Einfluß auf das PCDD-Kongenerenmuster haben können, aber in dieser Arbeit nicht näher betrachtet wurden.

In Abbildung 4.3-18 sind die relativen Kongenerenkonzentrationen der PCDF gezeigt. Die Werte für die koeluiierenden Kongeneren sind als Summenwert durch weiße Balken dargestellt.

4. Ergebnisse und Diskussion







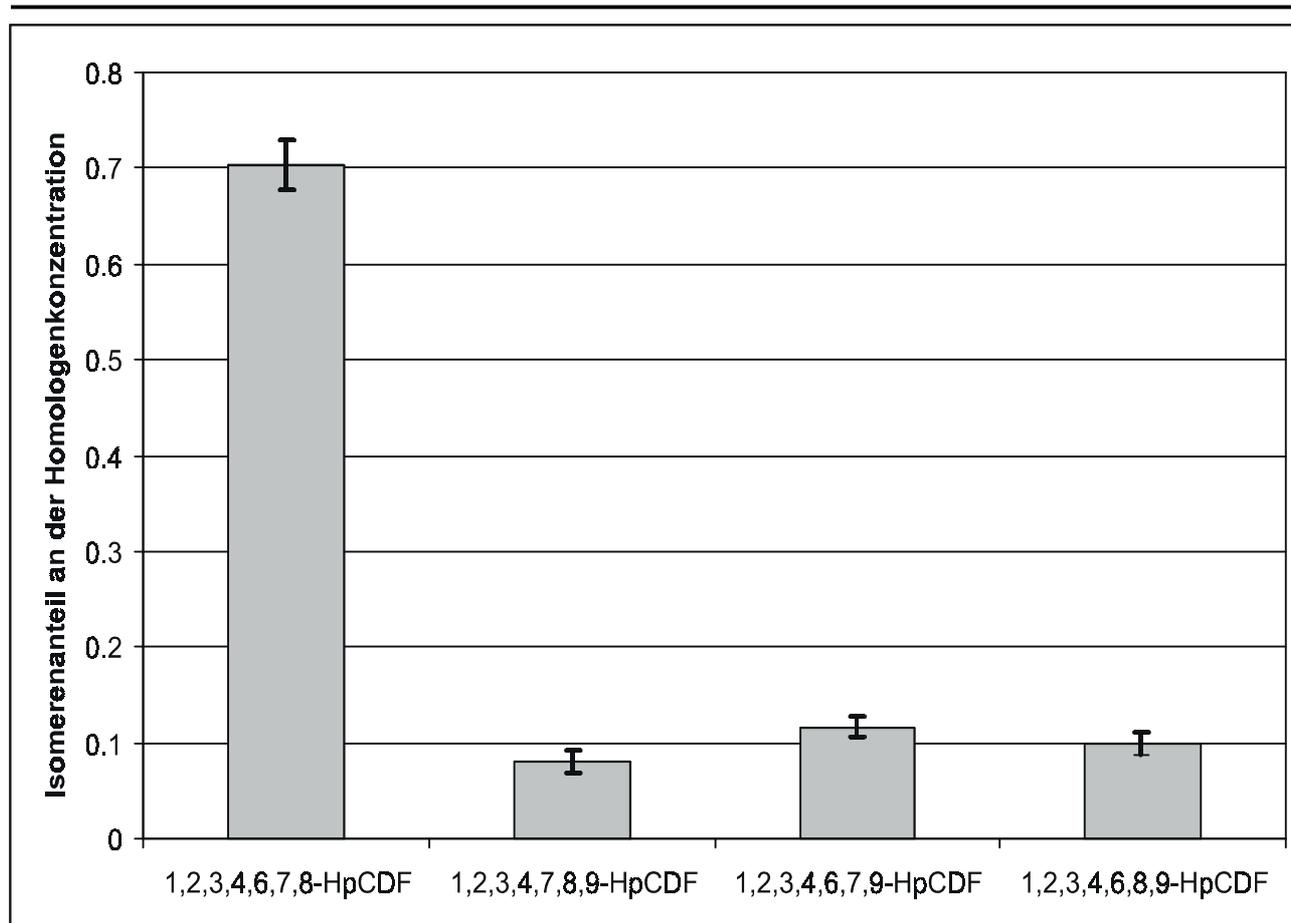


Abbildung 4.3-18: Verteilung der Kongeneren der PCDF (Fehlerbalken entsprechen den Konfidenzintervallen der Mittelwerte, $\alpha = 5\%$, $n = 104$)

Wie in der Abbildung 4.3-11 bereits für die Kongeneren der HxCDF gezeigt wurde, werden die PCDF-Kongeneren bevorzugt gebildet, die keine Chloratome in 1- und 9-Position aufweisen. Auch das in Abbildung 4.3-18 gezeigte PCDF-Kongenerenmuster dieser Arbeit folgt dieser Regel. Durch die Chlorsubstitution in 1- und 9-Position kommt es aufgrund der vicinalen Chloratome zu einem gespannten und damit energetisch ungünstigen PCDF-Molekülbau (274), (76). Aus der Abbildung 4.3-18 geht auch hervor, daß die PCDF-Kongeneren bei der Bildung bevorzugt werden, die in 3,4,6,7- oder in 2,4,6,7-Position chlorsubstituiert sind.

In Laborversuchen wurden Mischungen aus PCBz und PCPh in relativen Konzentrationen wie an der MVA (siehe Abbildung 4.3-14) auf Flugaschen thermisch umgesetzt (47), (249), (67). Das bei diesen Experimenten gefundene PCDF-Kongenerenmuster entspricht nicht dem Kongenerenmuster in Abbildung 4.3-18. Somit sind Kondensationsreaktionen von PCBz und PCPh für die Entstehung des PCDF-Kongenerenmusters in Abbildung 4.3-18 von nicht sehr großer Bedeutung.

Als eine das PCDF-Kongenerenmuster beeinflussende Reaktion wurde die Dechlorierung höher chlorierter PCDF-Kongeneren (Hp/OCDF) identifiziert (276), (45), (91). Experimentelle Befunde und theoretische Betrachtungen zur Dechlorierung von OCDF führten zu einer PCDF-Kongenerenverteilung, welche der in Proben von Verbrennungsprozessen (vgl. Abbildung

4.3-18) sehr gut entspricht (277), (99), (252). Bezüglich der Dechlorierungswahrscheinlichkeit einzelner Positionen konnten sowohl statistische Berechnungen (99) als auch die Berechnungen zur Ladungsdichteverteilung (76), (252) an den C-Atomen im OCDF- bzw. PCDF-Molekül(en) zeigen, daß die Chlorsubstitution in 4- und 6- Position gegenüber Dechlorierungsreaktionen sehr stabil ist. In dem PCDF-Kongenerenmuster in Abbildung 4.3-18 werden deshalb auch bevorzugt Kongenere mit einer Chlorsubstitution in diesen Positionen vorgefunden.

Chlorierungsreaktionen von Dibenzofuran (DF) nach den Regeln der elektrophilen bzw. radikalischen Substitution führen zu einem PCDF-Kongenerenmuster, welches nicht mit dem Kongenerenmuster in Abbildung 4.3-18 übereinstimmt (249).

Es ist wahrscheinlich, daß das PCDF-Kongenerenmuster der zwei- bis siebenfach chlorierten Kongeneren sehr stark durch Dechlorierungsreaktionen beeinflusst ist. Wie bereits diskutiert, stellen die PCDF, PCBz und PCB die Chloraromaten dar, welche im Vergleich zu den PCDD und PCPh verstärkt im Hochtemperaturbereich der Anlagen gebildet werden (Kapitel 4.3.1). Bei Temperaturen zwischen 600°C und 800°C findet sich ein Maximum der Cl-Radikale, welche im Vergleich zu HCl ein starkes Chlorierungsmittel darstellen (siehe Kapitel 2.4.3.2; (135)). Mit den im Kapitel 2.4.1.3 beschriebenen Erkenntnissen aus den Experimenten zur *de-novo* Synthese könnte bei Temperaturen zwischen 600°C und 800°C eine Chlorierung der neu gebildeten kohlenstoffhaltigen Flugstäube stattfinden. In der Nachverbrennungszone der Anlage unterliegen die auf und aus diesen kohlenstoffhaltigen Flugstäuben gebildeten Chloraromaten, darunter auch die PCDF, einer Dechlorierung durch die katalytische Wirkung des in den Flugstäuben enthaltenen Kupfers. Unter 500°C ist die Cl-Radikalkonzentration und Cl₂-Konzentration für Chlorierungsreaktionen zu gering, weshalb in diesem Temperaturbereich verstärkt Dechlorierungsreaktionen ablaufen (vgl. Kapitel 2.4.3.2).

Das Kongenerenmuster der ein- und zweifach chlorierten PCDF in Abbildung 4.3-18 zeigt im Gegensatz zu dem Kongenerenmuster der höher chlorierten Kongeneren keine bevorzugte Chlorsubstitution in 4- und 6-Position. Im Isomerenmuster der DiCDF finden sich die Isomeren in den höchsten relativen Konzentrationen, welche in 2- und 8-Position chloresubstituiert sind (z.B. DiCDF: 2,3-, 2,4-, 2,6- und 2,8/3,6-DiCDF). Ein ähnliches Ergebnis wurde auch für das PCDF-Kongenerenmuster der niedrig chlorierten Kongeneren in Laborexperimenten gefunden (236). Aus der Literatur ist bekannt, daß die Positionen 2 und 8 (bzw. 3 und 7) im DF-Molekül für die Chlorierung favorisiert werden (274), (47), (97). Somit ist das Kongenerenmuster der MCDF und DiCDF wahrscheinlich durch eine Chlorierungsreaktion des DF beeinflusst, welches vor allem während instationärer Verbrennungsbedingungen in hohen Konzentrationen im Rauchgas der MVA nachgewiesen wurde (siehe Kapitel 4.1.3.2).

Auffällig in Abbildung 4.3-18 ist die niedrige relative Konzentration für das 4-MCDF. In der Literatur wurde ein ähnliches Ergebnis für die Verteilung der MCDF-Isomeren wie in der Abbildung 4.3-18 gefunden (236). Aufgrund eigener Untersuchungen und einer Arbeit aus der Literatur kann allerdings vermutet werden, daß die niedrige relative Konzentration des 4-MCDF im

Kongenerenmuster auf die teilweise Zerstörung dieses Isomeres beim *cleanup* auf der sauren Säule zurückgeführt werden muß (vgl. Kapitel 3.2.2.3, (177)).

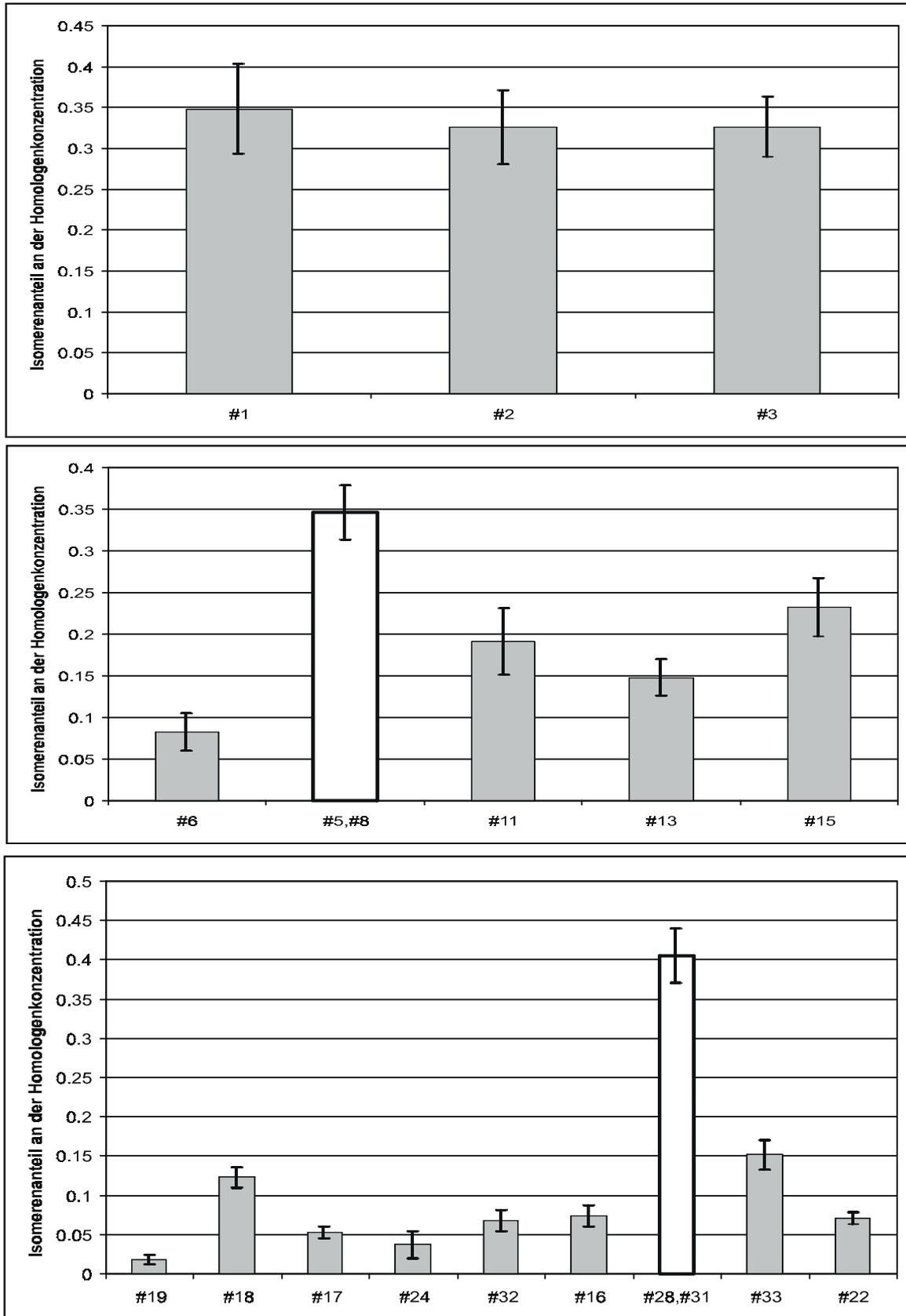
Neben den PCPh können auch PCDF aus PCBz gebildet werden können. Die Bildung der PCDF verläuft bei Laborexperimenten bei einer höheren Temperatur als die der PCPh, so daß sich die Ergebnisse dieser Studie gut mit der in dieser Arbeit beobachteten Hochtemperaturbildung von PCBz und PCDF übereinstimmen (Abbildung 4.3-1 und 4.3-3).

Zusammenfassend kann für das PCDF-Kongenerenmuster an großtechnischen Müllverbrennungsanlagen festgestellt werden, daß das Muster der drei- bis siebenfach chlorierten PCDF sehr stark durch den Mechanismus der Dechlorierung von hoch chlorierten Kongeneren beeinflusst sein könnte. Ein mögliches Szenario wäre die Bildung von perchlorierten Verbindungen auf den Flugascheoberflächen, welche durch einige weitere Reaktionsschritte auf den Flugaschen dechloriert und von diesen freigesetzt werden. Aus der Literatur ist bekannt, daß auch aus PCBz PCDF gebildet werden können (248). Da diese Verbindungen an der MVA und SMVA ähnliche Nachbildungsraten zwischen 200°C und 700°C zeigten (siehe Abbildungen 4.3-1, 4.3-3 und 4.3-5), könnte dieser Bildungsweg das PCDF-Kongenerenmuster beeinflussen. Ob und in welchem Ausmaß die postulierten Bildungswege für die Entstehung des PCDF-Kongenerenmusters von Bedeutung ist, läßt sich nur durch umfangreiche Laborexperimente weiter klären.

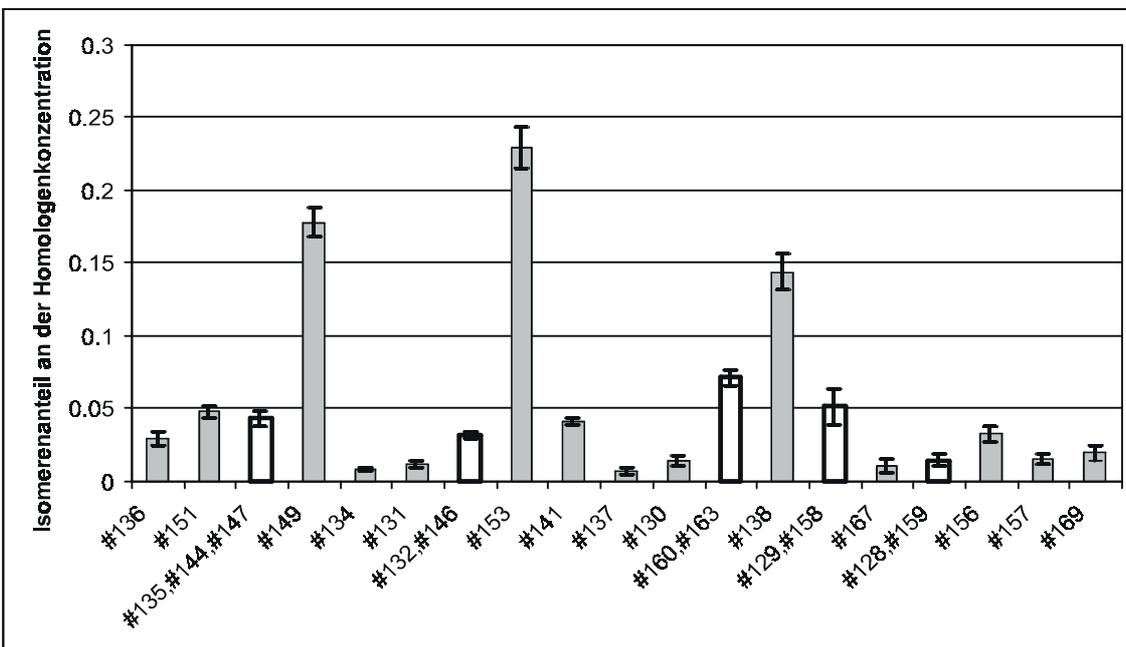
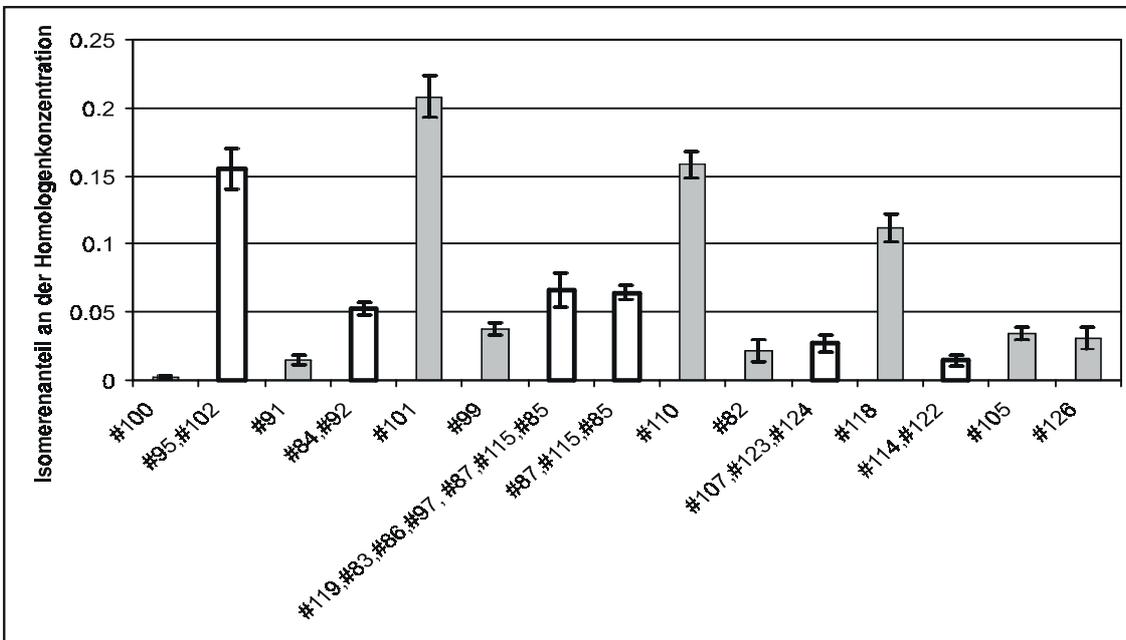
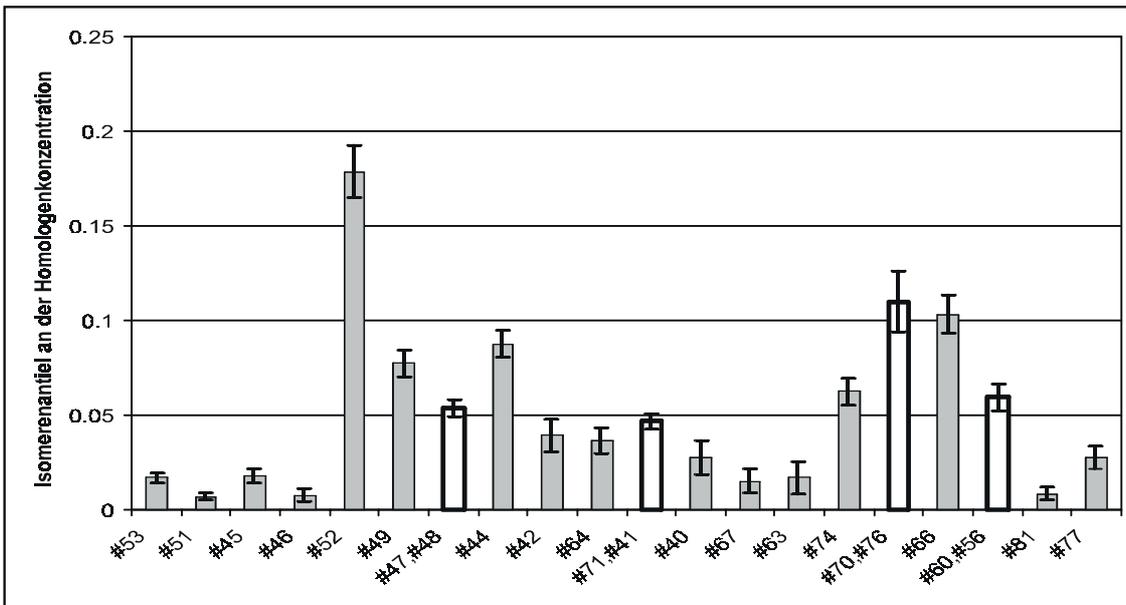
Für die Entstehung des Kongenerenmusters der MCDF und DiCDF ist wahrscheinlich Chlorierungsreaktionen des Dibenzofurans entlang des Rauchgaskanals von großer Bedeutung, was bereits für Laboranlagen gezeigt werden konnte ((115); siehe auch Abbildung 4.3-3 und 4.3-5).

4.3.2.3 Polychlorierte Biphenyle (PCB)

Die Abbildung 4.3-19 zeigt die in den untersuchten Proben gemessene PCB-Kongenerenverteilung. Die Werte der koeluvierenden Kongeneren sind als Summenwert durch weiße Balken dargestellt.



4. Ergebnisse und Diskussion



4. Ergebnisse und Diskussion

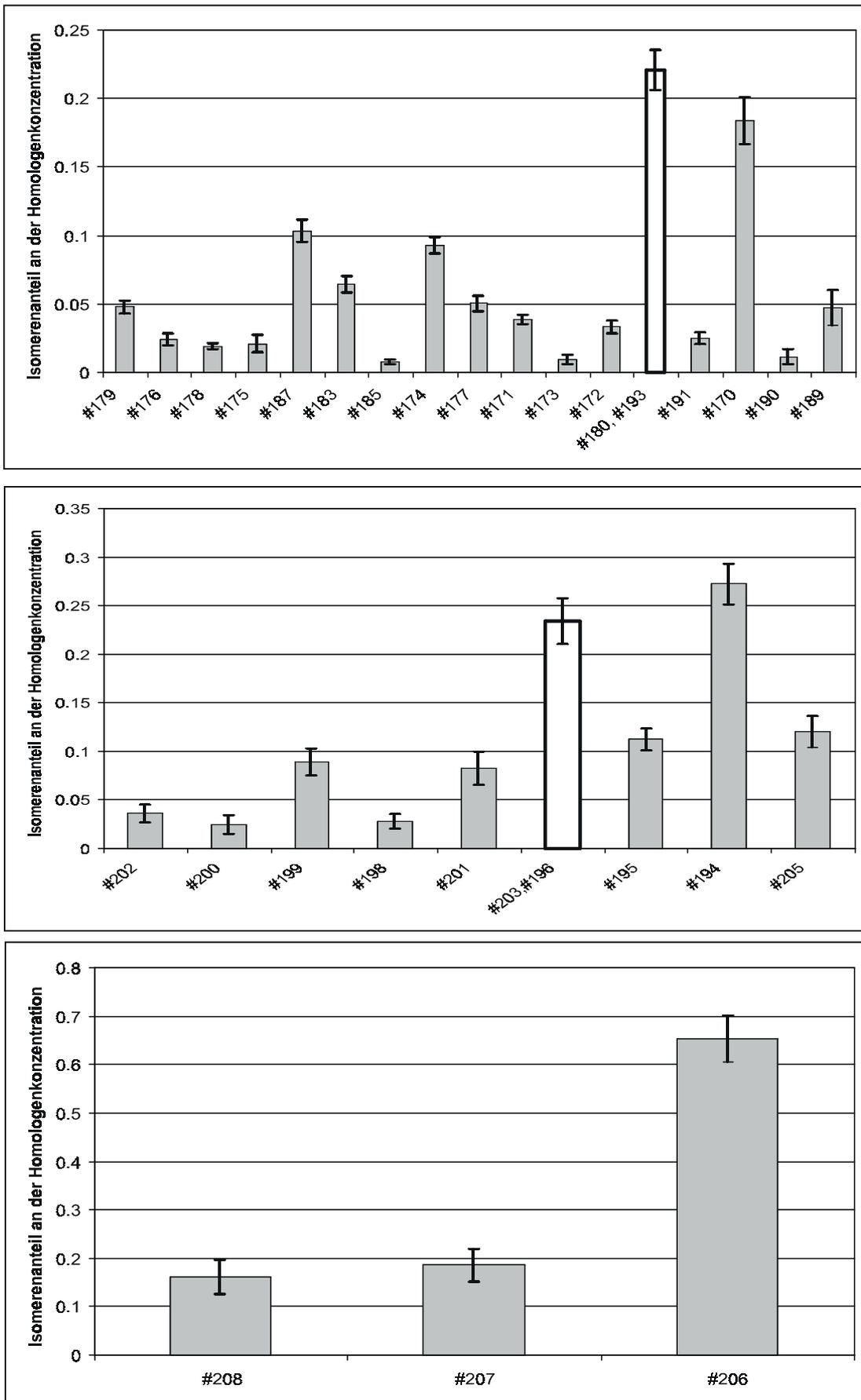


Abbildung 4.3.-19: Verteilung der Kongeneren der PCB (Fehlerbalken entsprechen den Konfidenzintervallen der Mittelwerte, $\alpha = 5\%$, $n = 98$)

Im Gegensatz zu den gut untersuchten PCDD/F-Kongenerenmustern sind über das PCB-Kongenerenmuster wenig Literaturdaten zu finden (21), (281), (282), (283), (284), (285). Im folgenden Abschnitt wird beschrieben, welche molekülgeometrischen Eigenschaften die in den höchsten relativen Konzentrationen in Abbildung 4.3-19 gefundenen Kongeneren aufweisen.

Die PCB-Kongeneren, die gleichzeitig in den Positionen 2,2',6,6' chloresubstituiert sind, werden **nicht** gebildet. Vierfach und höher chlorierte PCB-Kongeneren sind bevorzugt in 2,2'-Position chloresubstituiert und die übrigen chloresubstituierten Positionen im Molekül sind symmetrisch angeordnet, z.B. 2,2',5,5'-TeCB (#52) und 2,2',4,4',5,5'-HxCB (#153). Die in 2,2'-Position chloresubstituierten Kongeneren sind wegen der gegenseitigen Abstoßung der Chloratome nicht planar und besitzen deshalb einen großen Dihedralwinkel zwischen den beiden Benzolringen (41). Weitere im PCB-Kongenerenmuster in hoher relativer Konzentration gefundene Kongenere sind an einem Benzolring in 2,6-Position chloresubstituiert, z.B. das 2,3,3',4',6-PeCB. Eine weitere Chloresubstitution um die Phenyl-Phenyl Bindung in der 2',6'-Position erfolgt in diesen Molekülen nicht.

Die Anpassung der Phenyl-Phenyl Bindung um den Dihedralwinkel und damit die Möglichkeit, einer energetisch ungünstigen Wechselwirkung der Chloratome in 2,2'-Position entgegen zu wirken, sind für das gefundene PCB-Kongenerenmuster sicherlich von großer Bedeutung. In der Literatur wurde das verstärkte Auftreten der in 2,2'-Position substituierten PCB-Kongeneren im PCB-Kongenerenmuster aus Verbrennungsprozessen auf die niedrigere Reaktivität dieser Kongeneren zurückgeführt (242).

Die nicht in 2,2',6,6'-Position substituierten PCB, wie z.B. #77, #81, #126, #127, treten nicht oder nur in sehr geringer Konzentration im PCB-Kongenerenmuster in der Abbildung 4.3-19 auf. Da diese Kongeneren für eine Chlorierung typisch sind (elektrophile Substitution, z.B. in Arochlormischungen), spielt diese Reaktion wahrscheinlich keine Rolle bei der Entstehung des PCB-Kongenerenmuster in Verbrennungsprozessen (284).

In der Literatur wurde für einzelne Chlorierungsgrade der PCB gezeigt, daß zwei Mechanismen das Kongenerenmuster beeinflussen können. Der erste Mechanismus geht von einer Reaktion der PCB zu PCDF aus (93), (242). Im zweiten vorgeschlagenen Mechanismus werden Dechlorierungsreaktionen, wie schon bei der Betrachtung des PCDF-Kongenerenmusters, für die Entstehung des PCB-Kongenerenmusters verantwortlich gemacht (252). Diese beiden Prozesse überlagern sich, wie dies für eine Auswahl von PCB-Kongeneren gezeigt wurde (281).

In zwei Studien wurde für die TeCB und HxCB gefunden, daß die in 2,2'-Position und symmetrisch chloresubstituierten PCB-Kongeneren die höchsten relativen Konzentrationen im Kongenerenmuster aufweisen (252), (242). So zeigen die nicht in 2,2',6,6'-Position substituierten PCB-Kongeneren eine höhere Dechlorierungswahrscheinlichkeit als die in 2,2'-Position substituierten (242). Die Chloresubstitution in 2,2'-Position hat eine Abschirmung der Bindung zwischen den Phényleinheiten zur Folge und trägt damit zu einer verminderten Dechlorierungswahrscheinlichkeit bei (242). Ferner wurde durch die Ergebnisse dieser

Laborexperimente gezeigt, daß die Reaktion von PCB zu PCDF im Vergleich zu (De-)Chlorierungsreaktionen dann bevorzugt ist, wenn eine Chlorsubstitution in 2- oder 2'-Position vorliegt (242). Somit decken sich die Befunde für das PCB-Kongenerenmuster aus Laborexperimenten mit den in dieser Arbeit gefundenen Ergebnissen an großtechnischen Feuerungsanlagen.

Bei den PCB handelt es sich, wie bei den PCBz und PCDF, um Verbindungen, deren Bildung bereits im Hochtemperaturbereich der untersuchten Anlagen einsetzt (Kapitel 4.3.1.1 und 4.3.1.2). Einer Reaktion der PCB zu den PCDF, wie sie für Arochlorgemische in Laborexperimenten gezeigt wurde, könnte deshalb auch an großtechnischen Feuerungsanlagen eine Bedeutung zukommen. Im ersten Schritt solch einer Reaktion findet ein OH-Radikalangriff an dem PCB-Kongener statt. Für das Chlorsubstitutionsmuster der dabei entstehenden PCDF ist vor allem die Regioselektivität des OH-Radikalangriffs entscheidend. In einem zweiten Schritt findet die interne Zyklisierung des PCB-Kongeners zum PCDF statt. An einem Beispiel für vierfach chlorierte PCB bzw. PCDF soll diese Reaktion verdeutlicht werden: Die das Kongenerenmuster der TCDF dominierenden Kongeneren sind das 2,4,6,7- und 3,4,6,7-TCDF, welche aus der Reaktion vom PCB #107 bzw. #105 mit OH-Radikalen gebildet werden könnten. Das PCB #107 bzw. #105 sind vielleicht aufgrund dieser Reaktionen nur in sehr geringen absoluten und relativen Konzentrationen im PCB-Kongenerenmuster zu finden.

Die Verteilung der ein- und zweifach chlorierten PCB-Kongeneren folgt nicht den für das Kongenerenmuster der höher chlorierten PCB-Kongeneren beobachteten Regelmäßigkeiten. Alle Kongeneren der MCB zeigen im PCB-Kongenerenmuster alle die gleiche relative Konzentration, somit wird keines dieser Kongenere bevorzugt gebildet. Innerhalb der DiCB-Kongeneren weisen das 4,4'- und 3,3'-DiCB (#15, #11) eine sehr hohe relative Konzentration auf, obwohl in diesen Kongeneren keinerlei Abschirmung der Phenyl-Phenyl Bindung durch Chlorsubstituenten vorzufinden ist. Unter instationären Betriebsbedingungen treten im Rauchgaskanal hohe Konzentrationen von unchloriertem Biphenyl auf, und es werden hohe Nachbildungsraten der niedrig chlorierten PCB beobachtet (Abbildung 4.3-5). In Analogie zur Bildung der niedrig chlorierten PCDD/F weisen die Nachbildungsraten sowie das Kongenerenmuster der MCB und DiCB auf eine Chlorierungsreaktion des unchlorierten Biphenyls hin.

Zusammenfassend läßt sich für das PCB-Kongenerenmuster festhalten, daß die in 2,2'-Position chloresubstituierten Kongeneren die höchsten relativen Konzentrationen im Kongenerenmuster aufweisen. Diese Kongeneren zeigen auch die geringste Reaktivität und finden sich deshalb auch in den höchsten Konzentrationen in den Proben aus Verbrennungsprozessen.

4.3.2 Zusammenfassung

In der Abbildung 4.3-20 wird schematisch zusammengefaßt, wie die Bildung von Chloraromaten an großtechnischen Feuerungsanlagen entsprechend der in dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse verlaufen könnte.

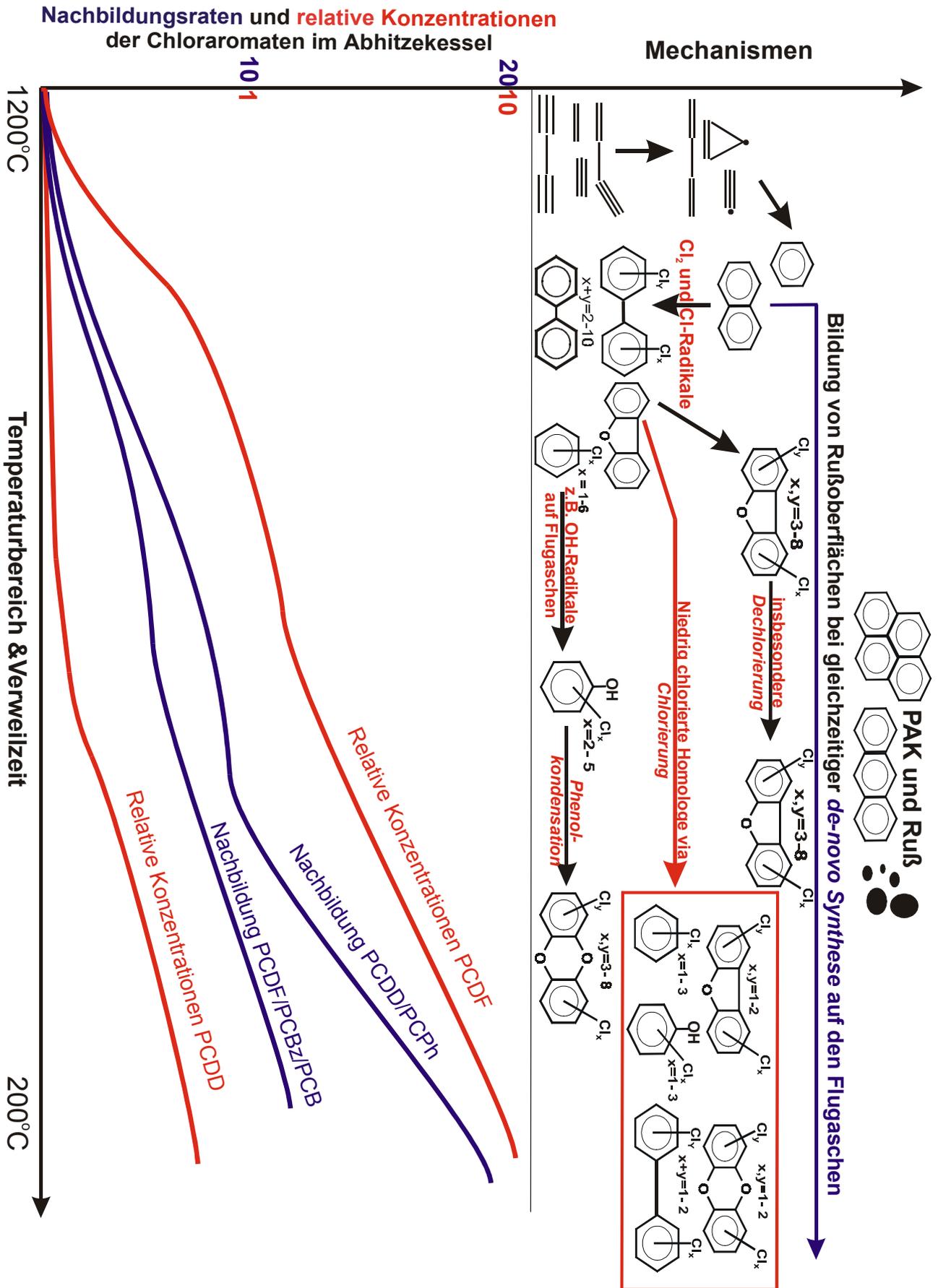


Abbildung 4.3-20: Bildungsschema für Chloraromaten

Im unteren Teil der Abbildung 4.3-20 werden die relativen Konzentrationen und die Nachbildungsraten der untersuchten Chloraromaten dargestellt. Die obere Hälfte der Abbildung 4.3-20 zeigt die wichtigsten Bildungsprozesse der untersuchten Substanzklassen.

Die PCDD/PCPh einerseits und PCDF/PCBz andererseits zeigen bei der Abkühlung des Rauchgases in der SMVA und MVA ähnliche Nachbildungsraten (vgl. Kapitel 4.3.1.1 und 4.3.1.2). Dieser Befund hat für die Homologen mit mehr als drei Chlorsubstituenten Gültigkeit. Die Konzentrationen der PCDF (PCBz) sind im Durchschnitt elfmal höher als die der PCDD (PCPh), was auf die höhere Stabilität der PCDF (PCBz) im Verbrennungsprozeß im Vergleich zu den PCDD zurückgeführt werden kann (48).

Die Aromatenbildung beginnt bereits in der Flammenzone des Verbrennungsprozesses. Als Startpunkt dieser Reaktionen werden Radikalmechanismen von aliphatischen C₂- bis C₆-Einheiten vermutet ((107); vgl. auch Kapitel 2.4.2 und Kapitel 4.3.1.2). In der Nachbrennzone der Anlagen werden aus den kleinen aromatischen Einheiten größere rußartige Strukturen gebildet, welche als Kohlenstoffquelle für die *de-novo* Synthese dienen können.

Im Temperaturfenster zwischen 500°C bis 200°C werden mehr PCDD und PCPh als PCDF und PCBz gebildet. Dieser Temperaturbereich entspricht dem Temperaturbereich der *de-novo* Synthese. Das PCPh-Kongenerenmuster könnte aus Reaktionen von PCBz mit OH-Radikalen ableitbar sein. Diese Hypothese wurde durch die Analyse der Moleküleigenschaften und der Kongenerenmuster dieser beiden Verbindungen überprüft (Kapitel 4.3.2.1). Für die Reaktion der PCBz mit den in diesem Temperaturbereich vorhandenen OH-Radikalen spielen sowohl die elektronischen Eigenschaften der reaktiven PCBz-Kongeneren als auch die sterischen und symmetrischen Eigenschaften der dabei entstehenden PCPh-Kongeneren eine wichtige Rolle (Abbildung 4.3-16). Die thermodynamisch stabilsten PCBz-Kongeneren innerhalb eines Chlorierungsgrades (1,3-DiCBz, 1,3,5-TriCBz und 1,2,3,5-TeCBz) stellen auch die reaktivsten dar, so daß die gefundenen Kongenerenmuster der PCBz und der PCPh stark von der Reaktivität der Vorläuferverbindungen beeinflusst werden.

Aufgrund der ähnlichen Nachbildungsraten der PCDD und PCPh und der Ähnlichkeit des PCDD-Kongenerenmusters mit dem Kongenerenmuster aus Phenolkondensationsreaktionen wird die Phenolkondensation als wichtiger Bildungsweg für PCDD in der Abbildung 4.3-20 vorgeschlagen (47), (279).

Im Hochtemperaturbereich der Anlagen werden bevorzugt die PCDF, PCBz und PCB gebildet. Für die Bildung der PCDF konnte gezeigt werden, daß das an den Anlagen gefundene Kongenerenmuster aus einer Dechlorierungsreaktion von hoch chlorierten Verbindungen, z.B. Hp/OCDF, ableitbar ist (vgl. Kapitel 4.3.2.2; (99)).

Die Chlorierung der entlang des Rauchgaskanals gebildeten kohlenstoffhaltigen Flugaschen hat zur Folge, daß der partikuläre Kohlenstoff teilweise chloriert und damit gegen eine thermische Zersetzung stabilisiert wird (vgl. Kapitel 2.4.2 und 4.4.1; (138)). In der Literatur werden

Temperaturen von unter 700°C angegeben, bei welchen die Vergasung des chlorierten Kohlenstoffgerüsts einsetzt (103). Diese Vergasungsreaktion könnte zur Freisetzung von PCDF, PCBz und PCB aus der Flugasche entlang des Rauchgaskanals führen. Die Flugasche selbst und das in und auf der Flugasche vorhandene Kupfer führt zu einer verstärkten Dechlorierung der gebildeten PCDF.

Mit den hier vorgestellten Analysen der Kongenerenmuster und den daraus formulierten Hypothesen zur Bildung der Chloraromaten wird erstmalig an großtechnischen Anlagen ein deutlicher Unterschied zwischen der Bildung der PCDD und PCDF aufgezeigt. Dieser Unterschied zwischen der Bildung der PCDD und PCDF ist erstens auf elektronische und zweitens auf sterische Eigenschaften im Molekülbau der jeweiligen Verbindung zurückzuführen. Elektronisch betrachtet stellt das PCDF-Molekül im Vergleich zum PCDD-Molekül ein Molekül mit einer höheren Aromatizität dar, was auf den aromatischen heterozyklischen Fünfring der PCDF zurückzuführen ist. Diese molekülspezifische Eigenschaft führt zu einer höheren Stabilität der PCDF im Vergleich zu den PCDD. Der zweite wesentliche Unterschied zwischen PCDD und PCDF ist vor allem auf die sterischen Eigenschaften der Moleküle zurückzuführen. Dieser Unterschied führt zu unterschiedlichen Regeln für die Chlorsubstitution. Die Chlorsubstitution der PCDD erfolgt gemäß der „meta-Regel“. Im Gegensatz dazu zeigen die planar gebauten PCDF keine gleichzeitige Chlorsubstitution in 1- und 9-Position, also in direkter Nachbarschaft zum Sauerstoff im heterozyklischen Fünfring, da dies zu einem stark gespannten Molekülbau führen würde.

Auch die PCB zeigen eine stärkere Bildungstendenz im Hochtemperaturbereich als die PCDD. Vor allem PCB, welche in 2,2'-Position und symmetrisch chlorsubstituiert sind, weisen die höchsten Konzentrationen im PCB-Kongenerenmuster auf (Kapitel 4.3.2.3). Das Fehlen bzw. die geringen Konzentrationen der Kongeneren im PCB-Kongenerenmuster, die diese Moleküleigenschaft nicht aufweisen und Laborexperimente, lassen vermuten, daß diese PCB auf Flugaschen mit hohen Ausbeuten zu PCDF umgesetzt werden konnten, zeigen, daß das PCDF-Kongenerenmuster von PCB-Ringschlußreaktionen mit Sauerstoff beeinflusst sein könnte (242).

Ein- und zweifach chlorierte Kongenere aller untersuchten Chloraromaten zeigen eine höhere Nachbildung entlang des Rauchgaskanals als hoch chlorierte Kongenere. Die Nachbildungsraten dieser Kongeneren sind an der SMVA und MVA sehr ähnlich. Diese beiden Ergebnisse geben einen Hinweis auf einen speziellen Bildungsweg für die niedrig chlorierten Kongeneren. Die Nachbildungsraten der ein- und zweifach chlorierten Homologen sind im Gegensatz zu den höher chlorierten unter gestörten Anlagenbedingungen (CO-Spitzen) deutlich erhöht (vgl. Kapitel 4.4.1 bis 4.4.3). Unter diesen Anlagenbedingungen finden sich auch hohe Konzentrationen der unchlorierten Grundgerüste der jeweiligen chloraromatischen Verbindungen (z.B. Benzol und Dibenzofuran). Da die Kongenerenmuster der niedrig chlorierten Kongeneren oftmals nicht die für die höher chlorierten Kongeneren beobachteten Regelmäßigkeiten zeigen (z.B. PCDD/F), könnte

für die Kongeneren dieser Chlorierungsgrade ein spezieller Bildungsweg existieren (z.B. elektrophile Substitution der unchlorierten Grundgerüste).

Die Bildung der Chloraromaten und die daraus hervorgehenden Kongenerenmuster stellen dynamische Prozesse dar, die von einer Reihe weiterer Faktoren (z.B. Anlagentyp, Brennstoff, etc.) und Reaktionen (z.B. Chlorierungs-/Dechlorierungsreaktion) abhängig sind.

Zusammenfassend läßt sich festhalten, daß eine Betrachtung der Kongenerenmuster der Chloraromaten nur aus dem Blickwinkel der Thermodynamik deren Entstehung nicht hinreichend aufklären kann. Es bedarf vielmehr einer genauen Untersuchung der spezifischen Reaktionsbedingungen bei hohen (600°C-800°C) und niedrigen (200°C-250°C) Temperaturen, des jeweiligen Chlorierungsgrades und der jeweiligen Verbindung, um die komplexen Bildungsmechanismen der Chloraromaten bei Verbrennungsprozessen verstehen zu können.

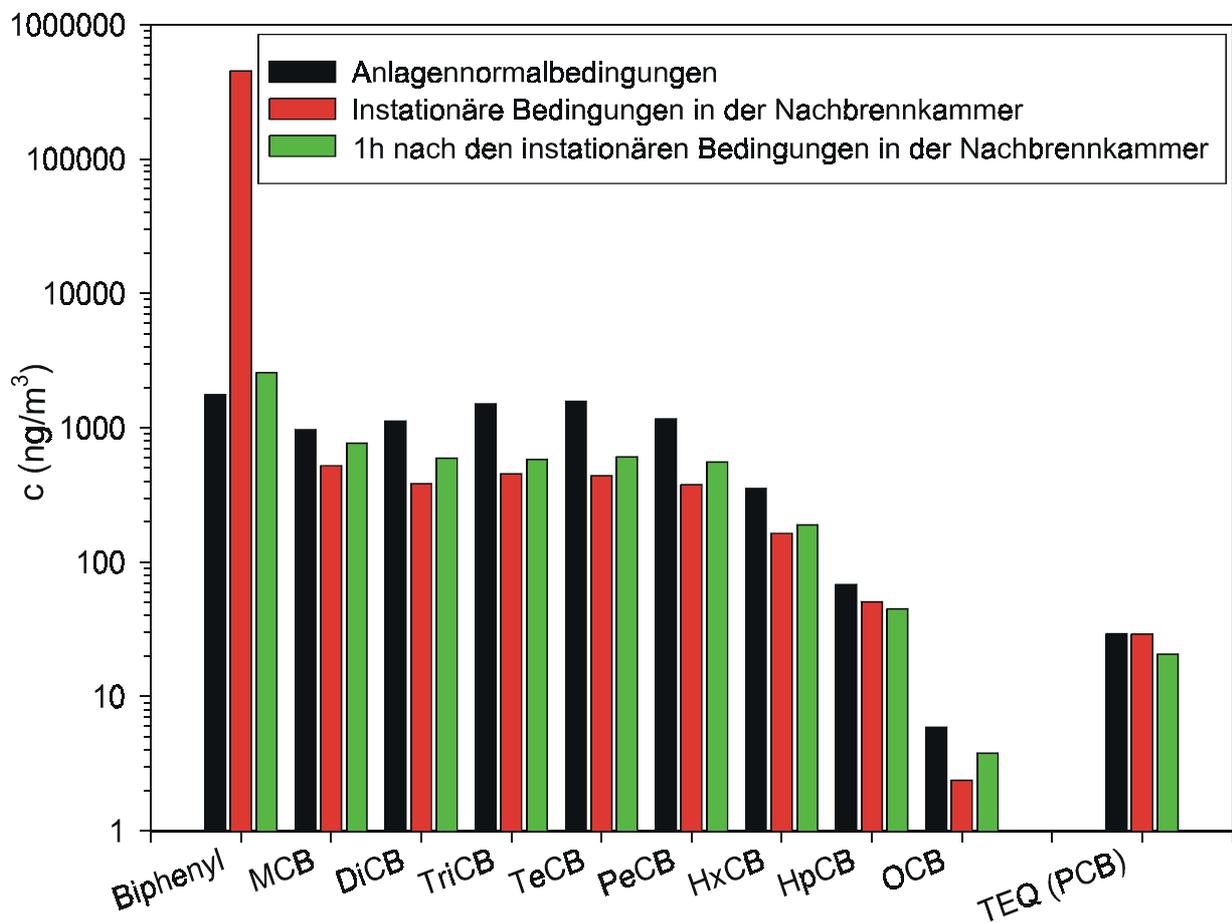
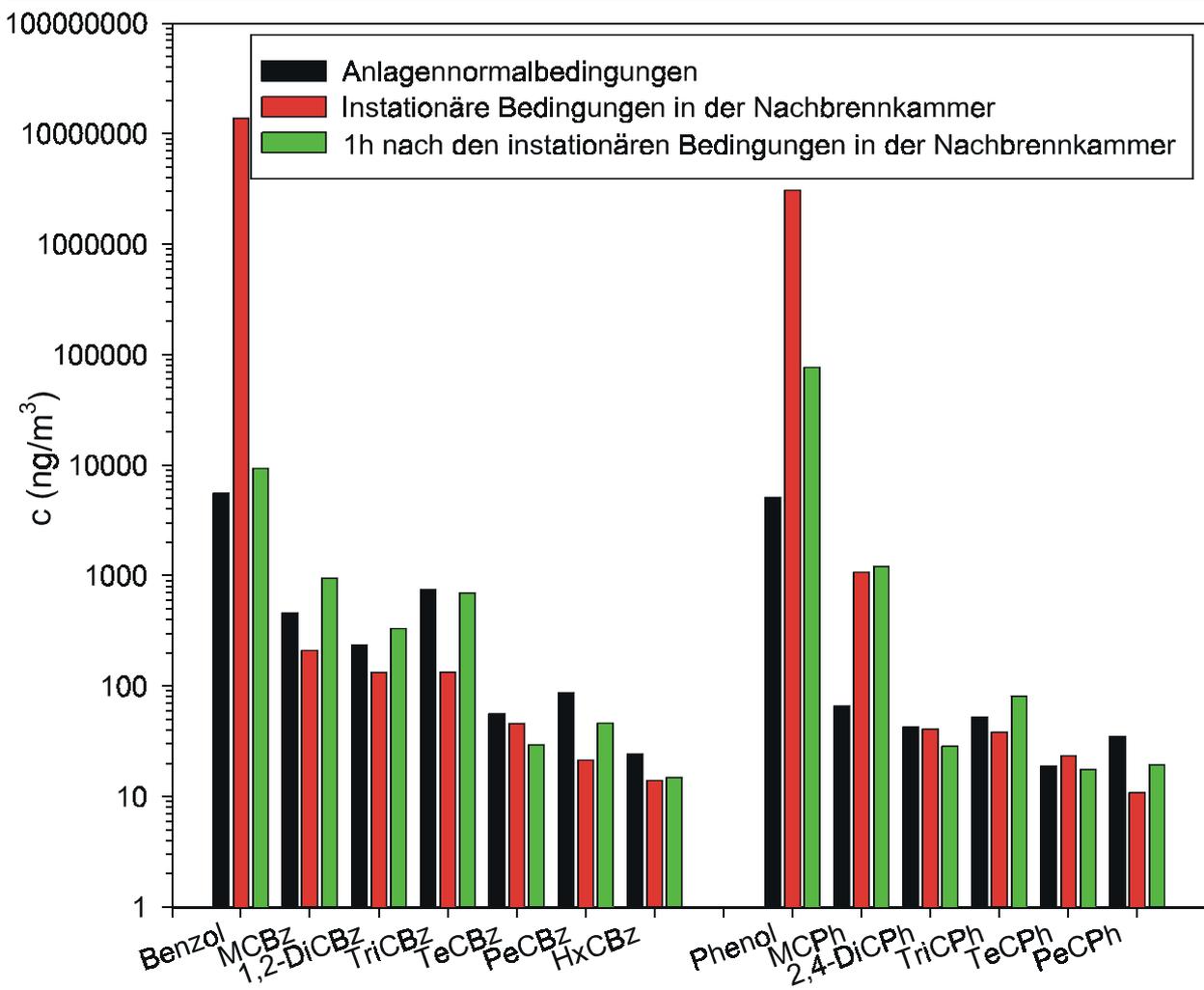
4.4 *Memory*-Hochtemperatureffekte: Langfristige Konzentrationserhöhung der Emissionswerte

In diesem Kapitel werden sowohl die Ergebnisse von konventionellen als auch von REMPI-TOFMS Messungen bezüglich der *Memory*-Effekte an der PVA, SMVA und MVA vorgestellt. Beim *Memory*-Effekt handelt es sich um die Beobachtung, daß an den Anlagen nach kurzfristig instationären Verbrennungsbedingungen (z.B. CO-Spitze(n) aufgrund von Fluktuationen in der Luftzufuhr) oder unerwartet auftretenden Änderungen in der Brennstoffzusammensetzung im Minutenbereich über mehrere Stunden veränderte Konzentrationsprofile der aromatischen und chloraromatischen Verbindungen im Rohgas auftraten. Während der *Memory*-Phasen (2-4h nach den instationären Verbrennungsbedingungen) zeigten die an den Anlagen kontinuierlich erfaßten Parameter zur Überwachung der Güte der Verbrennung, wie z.B. CO- und NO_x-Konzentration, keine erhöhten Werte (200). Neben den *Memory*-Effekten im Bereich der Nachbrennkammer und des Abhitzekeessels wurden an der SMVA auch *Memory*-Effekte für die Reingasemissionen gefunden. Die *Memory*-Effekte im Reingas werden durch die gestörten Verbrennungsbedingungen im Rohgas verursacht und darüber hinaus von der Rauchgasreinigung stark beeinflusst

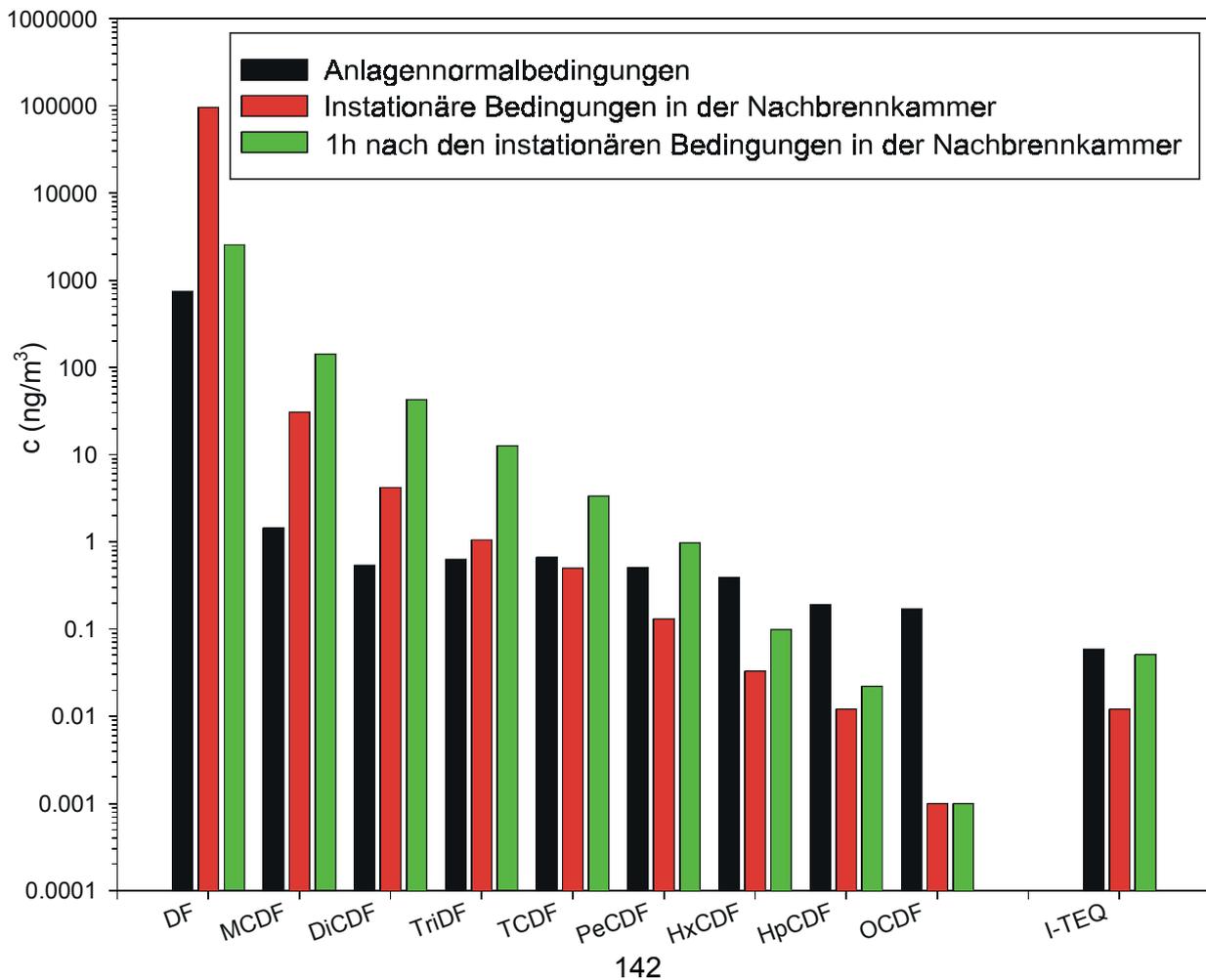
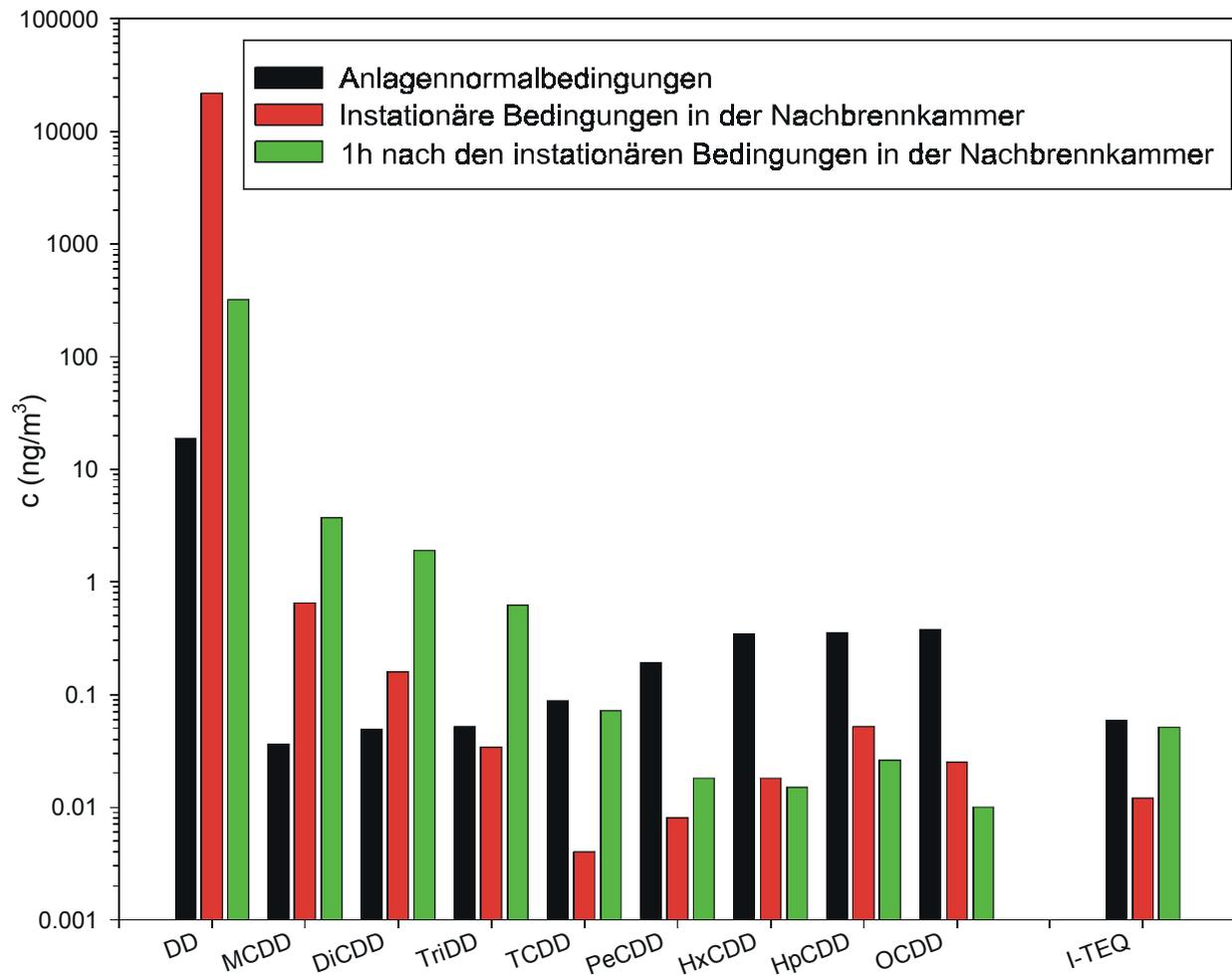
4.4.1 Pilotverbrennungsanlage (PVA)

In Abbildung 4.4-1 sind die Konzentrationen der Aromaten und Chloraromaten vor, während und nach instationären Verbrennungsbedingungen an der PVA dargestellt (122). Um den Einfluß des Temperaturgradienten in der Nachbrennkammer auf die Schadstoffbildung zu untersuchen, wurde der Temperaturgradient am Kopf der Nachbrennkammer durch eine Quenche mit Stickstoff variiert. Durch die Stickstoffgaben kam es unbeabsichtigt zu einer Störung der Verbrennung in der Nachbrennkammer und damit zu einer veränderten Flammenführung am Kopf der Nachbrennkammer für einen Zeitraum von knapp zwei Minuten. Während dieser Fluktuation sank die Temperatur am Kopf der Nachbrennkammer aufgrund der zu starken Stickstoffquenche für etwa fünf Minuten um circa 200°C ab.

4. Ergebnisse und Diskussion



4. Ergebnisse und Diskussion



4. Ergebnisse und Diskussion

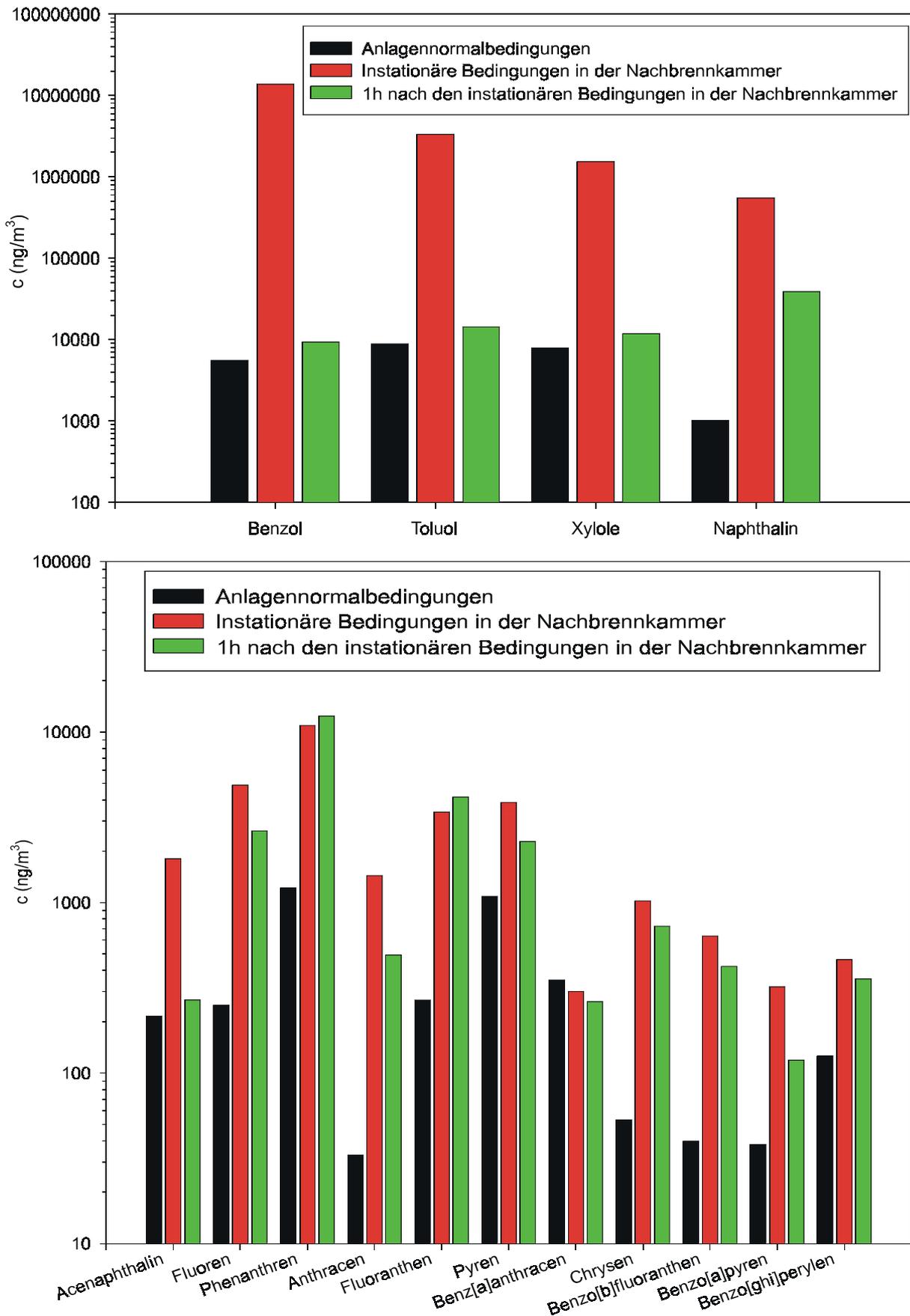


Abbildung 4.4-1: Konzentrationen der PCBz, PCPh, PCB, PCDD/F und PAK vor, während und nach instationären Verbrennungsbedingungen in der Nachbrennkammer der PVA (modifiziert nach (120), (185))

In der Abbildung 4.4-1 ist an der PVA ein deutlicher Unterschied für den *Memory*-Effekt der Aromaten und Chloraromaten zu erkennen. So weisen die PCBz, PCPh und PCB nach der Betriebsstörung nur einen sehr geringen, innerhalb einer Größenordnung liegenden *Memory*-Effekt auf. Die PCDD zeigen den stärksten *Memory*-Effekt für die ein- bis dreifach chlorierten Homologen. Bei den PCDF weisen die ein- bis fünffach chlorierten Homologen ebenfalls einen deutlichen *Memory*-Effekt auf.

Die Konzentrationen der ein- und zweifach chlorierten Homologen der PCDD/F sind im Gegensatz zu den Konzentrationen der ein- und zweifach chlorierten PCBz und PCB 1h nach den instationären Verbrennungsbedingungen (*Memory*-Phase) um Größenordnungen erhöht. Die beobachteten Änderungen im Homologenmuster der PCDD/F lassen sich allgemein als „Kippen“ des Musters um den Schwerpunkt der drei- bis vierfach chlorierten Homologen interpretieren.

Die Konzentrationsverläufe der PAK und der BTX in Abbildung 4.4-1 sind sehr ähnlich und weisen im Vergleich zu den niedrig chlorierten PCDD/F-Homologen nur geringen *Memory*-Effekt auf.

Die REMPI-TOFMS *on-line* Messungen zeigen für das Verhalten der PAK bezüglich der *Memory*-Effekte ähnliche Ergebnisse wie die konventionellen Analysen. In Abbildung 4.4-2 werden zwei Beispiele einer Prozeßumstellung von Verbrennung auf Vergasung an der PVA aufgenommen mit REMPI-TOFMS vorgestellt. Eine genauere Abbildung aller Massen in Form eines Konturplots findet sich in der Literatur (23), (238).

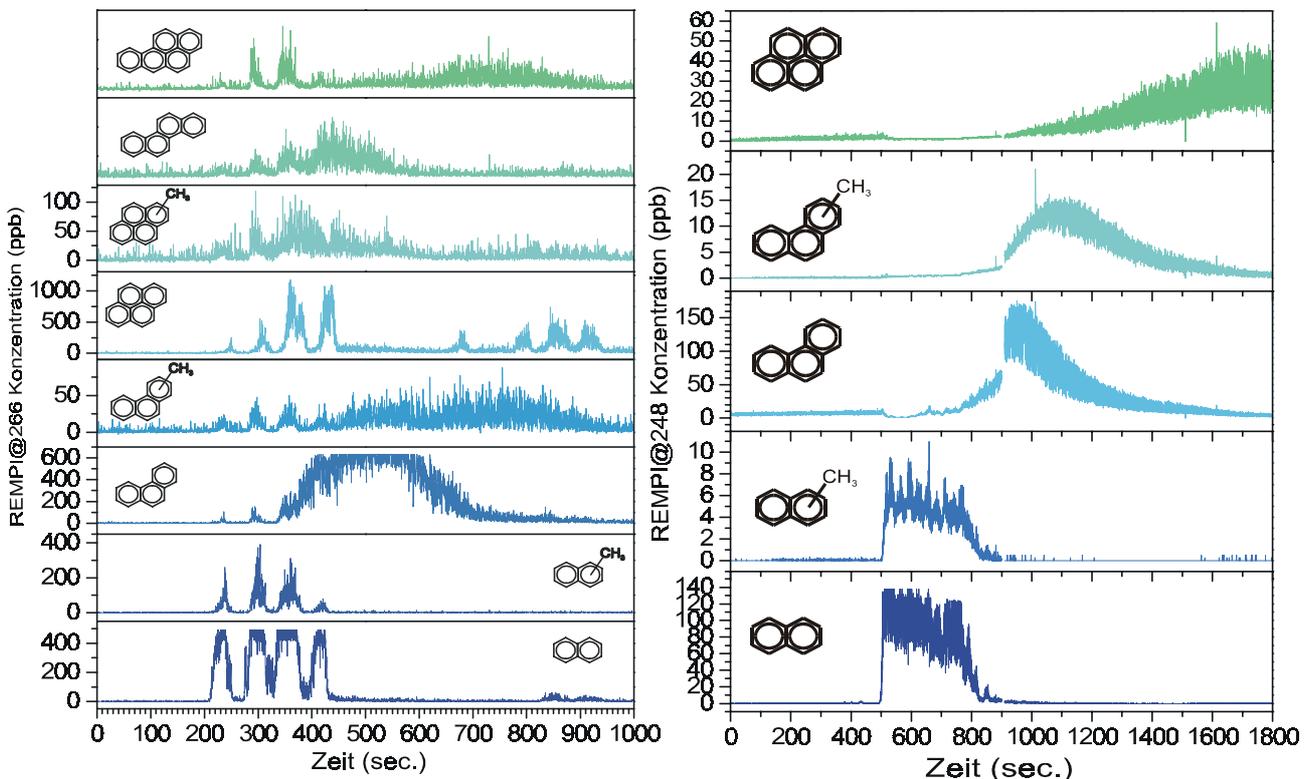


Abbildung 4.4-2: PAK-Massenspuren bei den Prozeßumstellungen von Verbrennung auf Vergasung an der PVA aufgenommen mit REMPI-TOFMS (links: 266 nm Nd:YAG Laser; rechts: 248 nm KrF Excimer Laser, aus: (185))

Die in der Abbildung 4.4-2 an der PVA dargestellten Prozeßumstellungen von Verbrennung auf Vergasung werden durch eine Reduzierung der Primärluftmenge unterhalb des Rückschubrostes eingeleitet. Durch die Reduzierung der Primärluft am Rost entstehen hochkalorische Brenngase, die in der Nachbrennkammer bei entsprechender Luftzufuhr umgesetzt werden, weshalb sich der λ -Wert von ≥ 1 während der Umstellungen für den gesamten Verbrennungsprozeß nicht ändert. Einige mit REMPI-TOFMS aufgenommene PAK-Massenspuren dieser Prozeßumstellungen sind in Abbildung 4.4-2 dargestellt. Im linken Bild der Abbildung 4.4-2 steigt die Konzentration des Naphthalins und der methylierten Verbindungen am Beginn der Prozeßumstellung sehr stark an. In abgeschwächter Form sind die Konzentrationsspitzen auch für die übrigen Massenspuren zu erkennen. Der Konzentrationsverlauf des Phenanthrens zeigt nach den ersten Konzentrationsspitzen ein länger andauerndes Konzentrationsmaximum weit über der Konzentration der Naphthalinspitzen. Das Pyren bzw. Methylpyren zeigt einen Konzentrationsverlauf, der dem des Phenanthren nicht ähnlich ist. Die höher kondensierten PAK mit mehr als drei Benzolringen auf den Massenspuren m/z 228 (stellvertretend ist in der Abbildung 4.4-2 die Strukturformel von Chrysen dargestellt) und m/z 252 (stellvertretend ist in der Abbildung 4.4-2 die Strukturformel von Benzo[a]pyren dargestellt) zeigen ebenfalls eine längerfristig erhöhte Konzentration. Aufgrund von weiteren isobaren PAK-Massen für m/z 228 und m/z 252 müssen die abgebildeten Konzentrationsverläufe als Summe der Konzentrationen aller PAK mit diesen Massenzahlen betrachtet werden.

Im rechten Bild der Abbildung 4.4-2 ist ein Konzentrationsverlauf von ausgewählten PAK-Massenspuren während einer weiteren Prozeßumstellung dargestellt. Auch hier fällt auf, daß am Beginn der Prozeßumstellung nach einigen sehr kleinen Konzentrationsspitzen auf der Naphthalinspur ein starker Konzentrationsanstieg erfolgt, welcher in gleichem Maße auch für das Methylnaphthalin auftritt. Nach diesen Konzentrationsspitzen für das Naphthalin finden sich länger andauernde Konzentrationsmaxima für das Phenanthren und Pyren.

Während der eingangs erwähnten Betriebsstörung in der Nachbrennkammer aufgrund der Stickstoffquenche war das REMPI-TOFMS Instrument nicht *on-line*. Kurz nach dieser Betriebsstörung wurde aber eine REMPI-TOFMS Messung gestartet. Eine Auswahl der dabei aufgenommen charakteristischen PAK-Massenspuren wird in Abbildung 4.4-3 dargestellt.

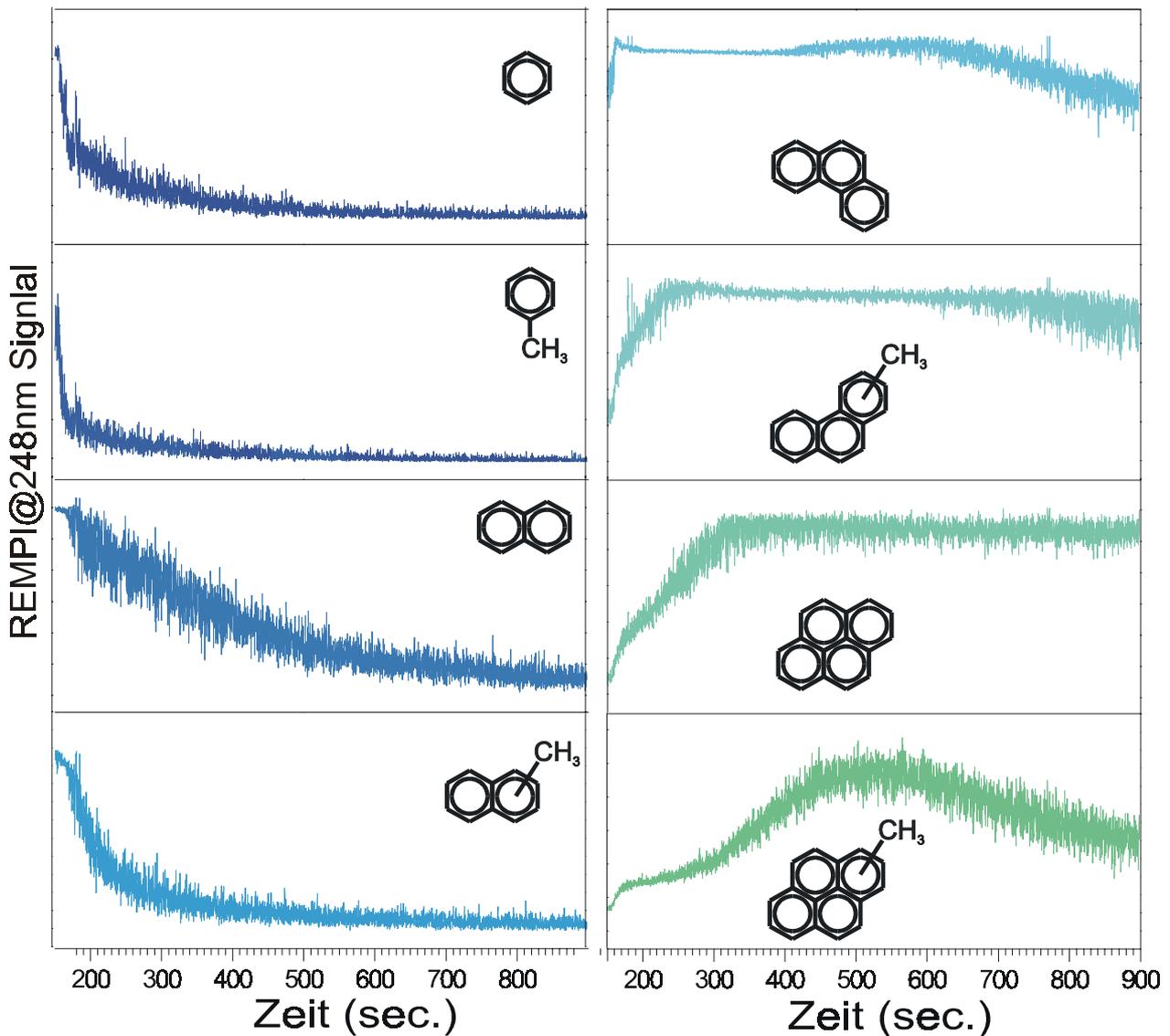


Abbildung 4.4-3: Konzentrationsverläufe (unquantifizierte Rohdaten) ausgewählter PAK-Massenspuren nach einer Betriebsstörung in der Nachbrennkammer der PVA aufgenommen mit REMPI-TOFMS (REMPI@248 nm KrF Excimer Laser, aus: (185))

Ähnlich wie bei den vorher dargestellten Anlagenumstellungen in Abbildung 4.4-2 zeigt sich in der Abbildung 4.4-3 ein zweiphasiger Verlauf der Aromatenbildung nach der Betriebsstörung an der PVA. Am Beginn der Messung, also kurz nach den instationären Verbrennungsbedingungen in der Nachbrennkammer, fallen die Konzentrationen der kleinen Aromaten, Toluol und Benzol, stark ab. Es ist davon auszugehen, daß während des eigentlichen Störfalls diese Verbindungen in deutlich höherer Konzentration auftraten. Die Ergebnisse aus den konventionellen Analysen in der Abbildung 4.4-1 zeigen für die monozyklischen Aromaten den gleichen Konzentrationsverlauf. Eine Stunde nach den instationären Verbrennungsbedingungen erreichen die REMPI-TOFMS Signale für Benzol, Naphthalin und die methylierten Vertreter dieser Verbindungen in der Abbildung 4.4-3 wieder das Konzentrationsniveau wie unter Anlagennormalbedingungen. In den in der Abbildung 4.4-3 gezeigten Konzentrationsverläufen wird zeitversetzt zum Abfall der

Naphthalinkonzentration ein Anstieg für die Methylphenanthren-, Pyren- und Methylpyrenkonzentration gemessen (*Memory*-Effekt).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß sich die Bildung von Aromaten während und nach veränderten Verbrennungsbedingungen (z.B. Prozeßumstellungen oder Betriebsstörungen) an der PVA in zwei Phasen gliedert: In einer ersten Phase werden die kleineren Aromaten (Benzol und Naphthalin) z.T. in der Gasphase „direkt“, d.h. wahrscheinlich aus ihren aliphatischen Vorläufern (z.B. Acetylen) gebildet (106). Als Hinweis dafür kann die Bildung des Phenylacetylen (m/z 102) angesehen werden, welches mit REMPI-TOFMS während dieser Phasen gemessen werden konnte (14). In der zweiten Phase, der sog. *Memory*-Phase, in welcher kein Phenylacetylen gefunden wurde, findet die Bildung v.a. von höher kondensierten PAK (Phenanthren und Pyren) durch den oxidativen Abbau der Anlage während der instationären Verbrennungsbedingungen wahrscheinlich gebildeten kohlenstoffhaltigen Oberflächen statt.

Die an dieser Anlage erstmalig gezeigten längerfristig andauernden Konzentrationserhöhungen und Musterverschiebungen der untersuchten Verbindungen weisen auf einen *Memory*-Effekt im Hochtemperaturbereich von Verbrennungsanlagen hin. Die beobachtete Bildung von Aromaten und Chloraromaten läßt, wie schon im Kapitel 4.3 diskutiert, den Schluß zu, daß auch außerhalb des bekannten *de-novo* Bildungsfensters zwischen 250°C und 450°C ein zweites Bildungsfenster bei höheren Temperaturen existiert.

Der beobachtete *Memory*-Effekt der PAK und PCDD/F kann auf das Eintreten von unverbranntem Kohlenstoff (hohe CO- und BTX-Konzentrationen) in die Nachbrennzone bei momentan erniedrigten Gastemperaturen (= geringe Reaktionswärme) und damit auf die Möglichkeit der Zersetzung der nicht abreagierten Kohlenstoffspezies an den heißeren Innenwänden der Brennkammer zurückgeführt werden. Ein mögliches Szenario der dabei in der Nachbrennkammer ablaufenden Prozesse ist in der Abbildung 4.4-4 schematisch dargestellt.

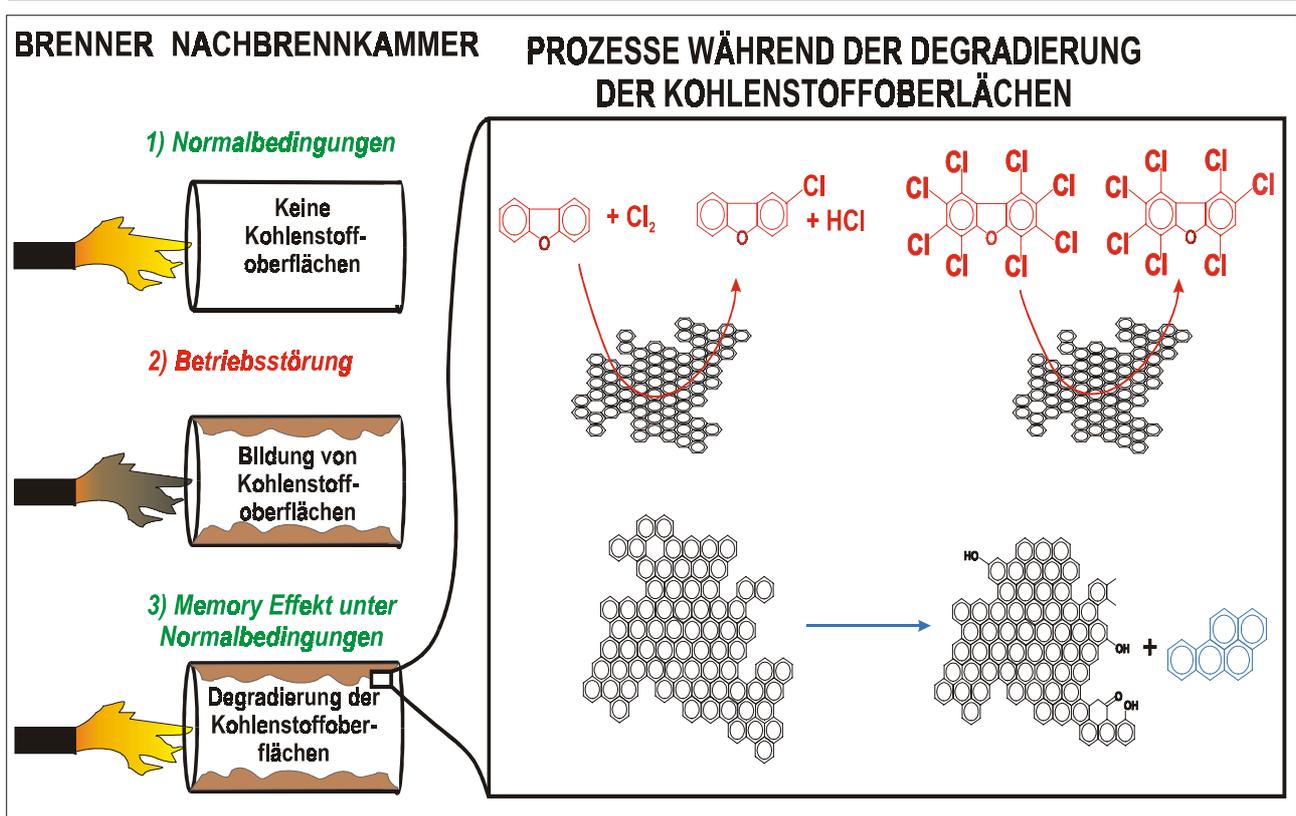


Abbildung 4.4-4: Schematischer Ablauf der Prozesse vor und während der *Memory*-Phase auf die in der Nachbrennkammer gebildeten kohlenstoffhaltigen Strukturen (aus: (185))

Wie in der Abbildung 4.4-4 dargestellt, können sich während der instationären Verbrennungsbedingungen kohlenstoffhaltige Ablagerungen an den Brennkammerwänden bilden. Ein vom Prozeß her vergleichbarer Vorgang ist die *chemical vapor deposition* (CVD) (286), bei welcher auf glühenden Metalloberflächen *pyrocarbon* aus aliphatischen Vorläuferverbindungen hergestellt werden kann (104). Es ist bekannt, daß für diesen Prozeß eine Reihe weiterer Faktoren, wie z.B. die Kohlenstoffquelle oder die Menge und Art der beteiligten Fremdatome (z.B. Halogene), eine wichtige Rolle spielt (287). Die bei der CVD gebildeten Kohlenstoffmodifikationen sind äußerst temperaturstabil, so daß sie selbst bei sehr hohen Temperaturen nur sehr langsam thermisch zersetzt werden (104). Es ist anzunehmen, daß es sich bei den Bildungsprozessen der untersuchten Verbindungen während instationärer Verbrennungsprozesse in der Nachbrennzone von Feuerungsanlagen aufgrund der chemisch nicht definierten Randbedingungen um sehr komplexe Reaktionen handelt. Die in der Brennkammer gebildeten kohlenstoffhaltigen Strukturen können vermutlich sowohl als Quelle für Aromaten (z.B. BTX und PAK) als auch als Katalysator zur Chlorierung von vorhandenen unchlorierten Grundgerüsten der PCDD/F dienen (vgl. Abbildung 4.4-4).

Aus der Literatur ist bekannt, daß aktive Kohlenstoffspezies sowohl die Chlorierung von unchlorierten Aromaten als auch die Kondensation von PCPh katalysieren können (47). Die Chlorierung der Kohlenstoffoberfläche führte in der zitierten Arbeit zu einer Inertisierung des unverbrannten Kohlenstoffs. Dieser Prozeß der Inertisierung des Kohlenstoffs durch Cl₂ konnte

auch für die PAK-Bildung aus Ruß gezeigt werden (138). Aus Laborexperimenten zwischen 250 - 400°C ist bekannt, daß Metalle (z.B. Kupfer) in und auf Kohlenstoffoberflächen aufgrund ihrer katalytischen Aktivität zu einer verstärkten Bildung von Chloraromaten führen kann (288).

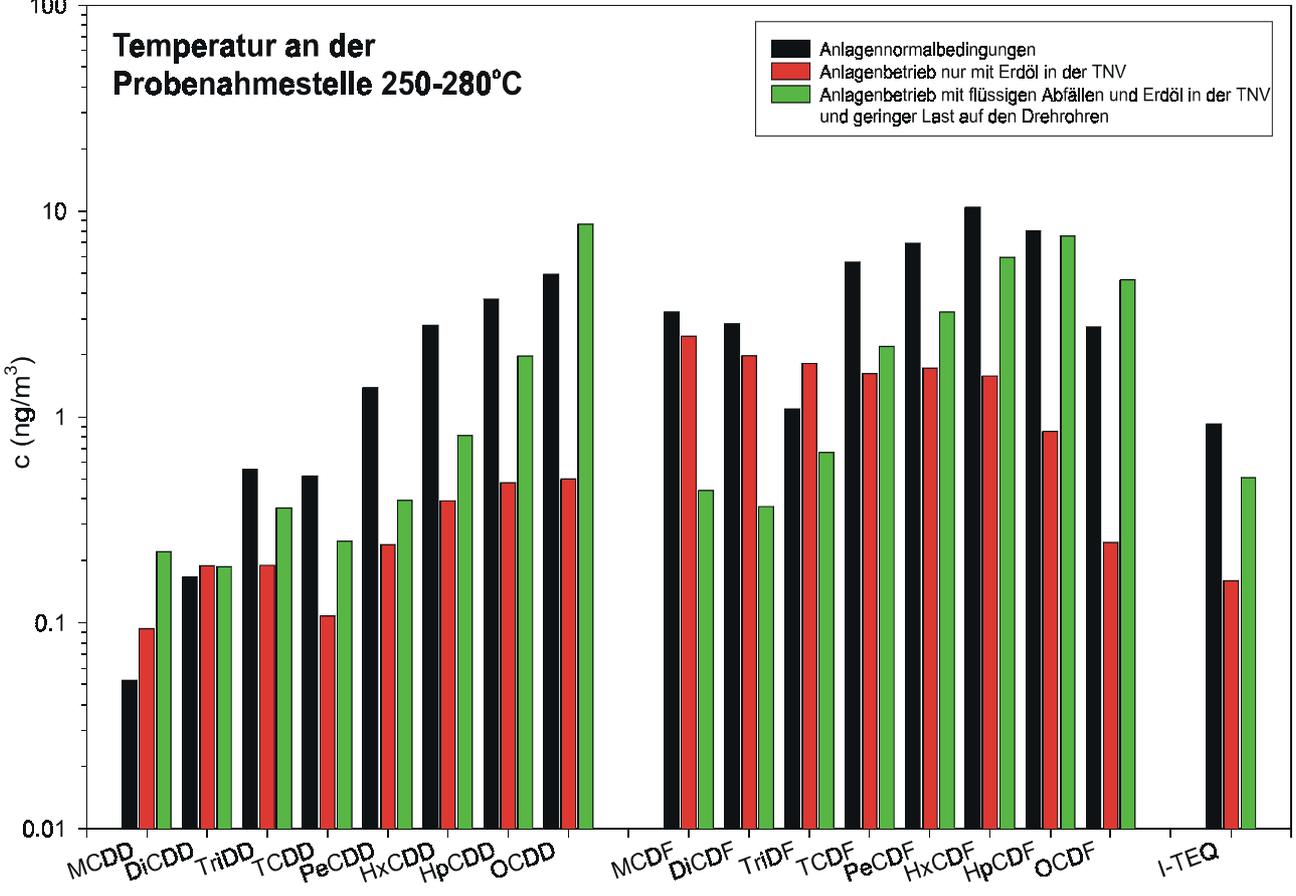
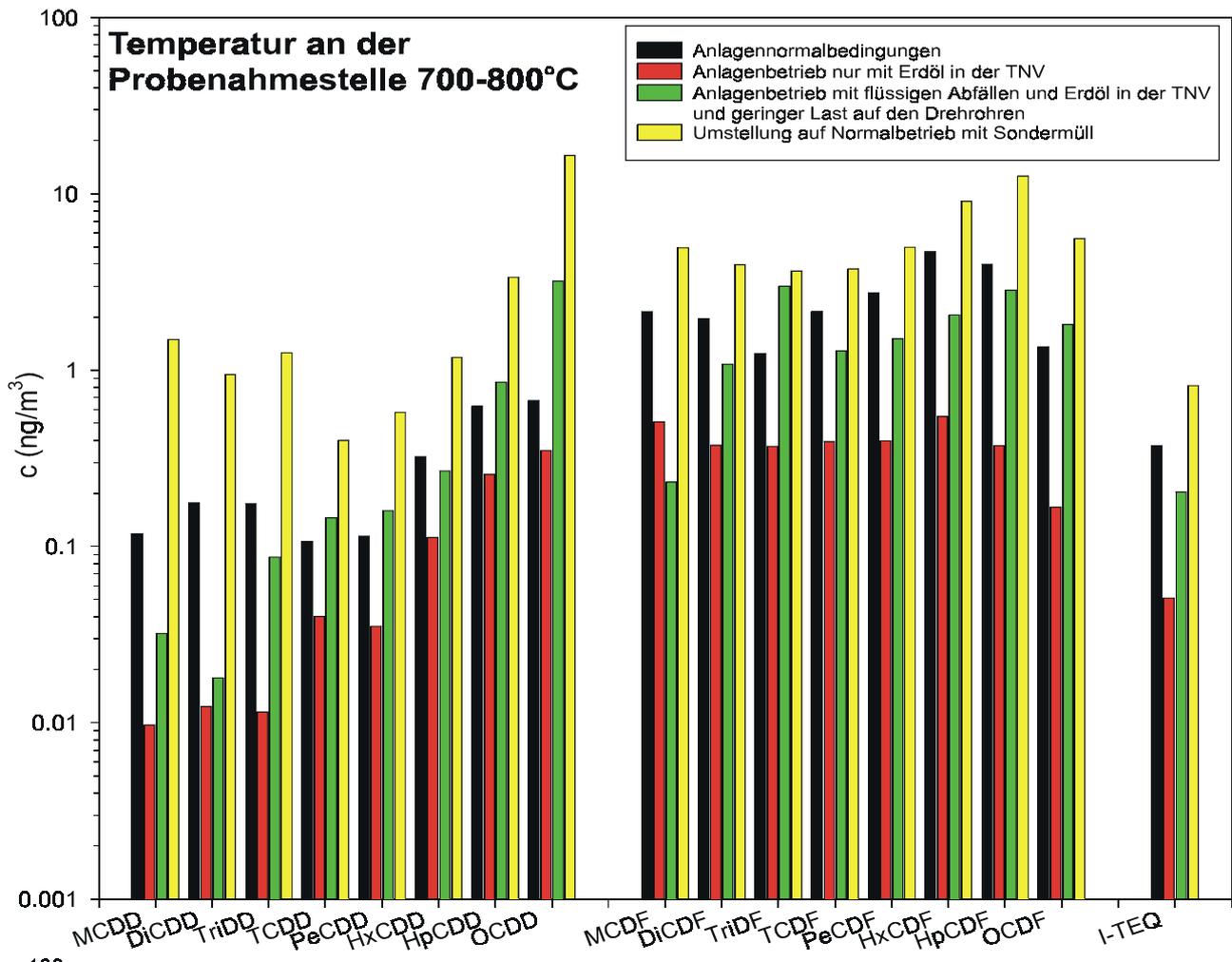
Mit der zitierten Literatur und den Ergebnissen aus den Messungen an der PVA läßt sich folgendes Szenario für die Bildung der PAK und PCDD/F während der *Memory*-Phasen ableiten (siehe auch Abbildung 4.4-4): Die PAK werden aus den in der Nachbrennkammer gebildeten kohlenstoffhaltigen Ablagerungen (z.B. *pyrocarbon*) freigesetzt. Im Anschluß an den teilweisen oxidativen Abbau des Kohlenstoffes dieser Kohlenstoffoberflächen mit entsprechender Stabilisierung (evtl. Chlorierung) und chemischer Umstrukturierung (z.B. Einbau von Metallen, u.a. Kupfer, Fremdatomen, u.a. N, O) liegt eine für die Chlorierung, z.B. von den in hohen Konzentrationen gefundenen DD oder DF, höchst reaktive Oberfläche vor. Das „Kippen“ der PCDD/F-Homologenmuster, also die Konzentrationszunahme der niedrig chlorierten PCDD/F und die teilweise Konzentrationsabnahme der höher chlorierten PCDD/F, lassen auf gleichzeitig ablaufende Chlorierungs-/ bzw. Dechlorierungsreaktionen an den in der Nachbrennkammer gebildeten kohlenstoffhaltigen Ablagerungen schließen. Ob und in welchem Umfang der Brennstoff oder die speziellen Verbrennungsbedingungen für die hohen Konzentrationen der niedrig chlorierten PCDD/F-Homologen und damit das „Kippen“ der PCDD/F-Homologenmuster verantwortlich sind, läßt sich an dieser Stelle nicht endgültig klären. Sicherlich sind die beiden aufgeführten Prozeßparameter (Brennstoff und Verbrennungsbedingungen) von hoher Relevanz für die Bildung der untersuchten Substanzen.

4.4.2 Sondermüllverbrennungsanlage (SMVA)

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse dargestellt, die den Einfluß des Brennstoffes auf die Homologenmuster zeigen. Zudem werden die *Memory*-Effekte der Chloraromaten an der SMVA vorgestellt.

Wie aus der Literatur bekannt, hat die Brennstoffzusammensetzung nicht nur einen großen Einfluß auf die absolut emittierte Schadstoffmenge, sondern auch auf die Homologenmuster der Chloraromaten (289). Der Einfluß des Einsatzes unterschiedlicher Brennstoffe auf die Homologenprofile an der SMVA wird in der Abbildung 4.4-5 dargestellt. Dabei wurden Probenahmen in den Temperaturbereichen von 700°C bis 800°C und von 250°C bis 280°C für vier unterschiedliche Brennstoffe zeitgleich durchgeführt. Die Probenahmezeit für eine Anlageneinstellung betrug je circa eine Stunde.

4. Ergebnisse und Diskussion



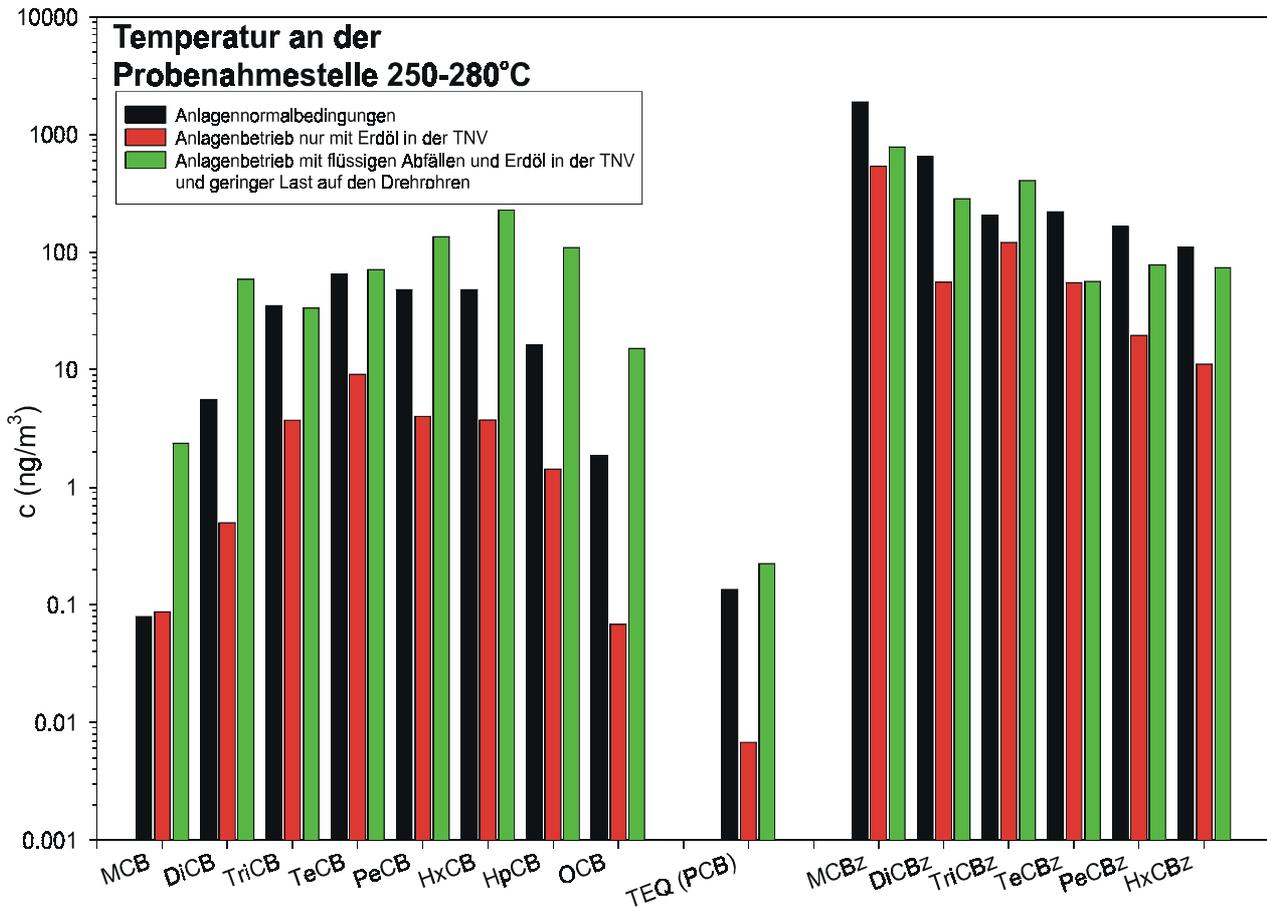
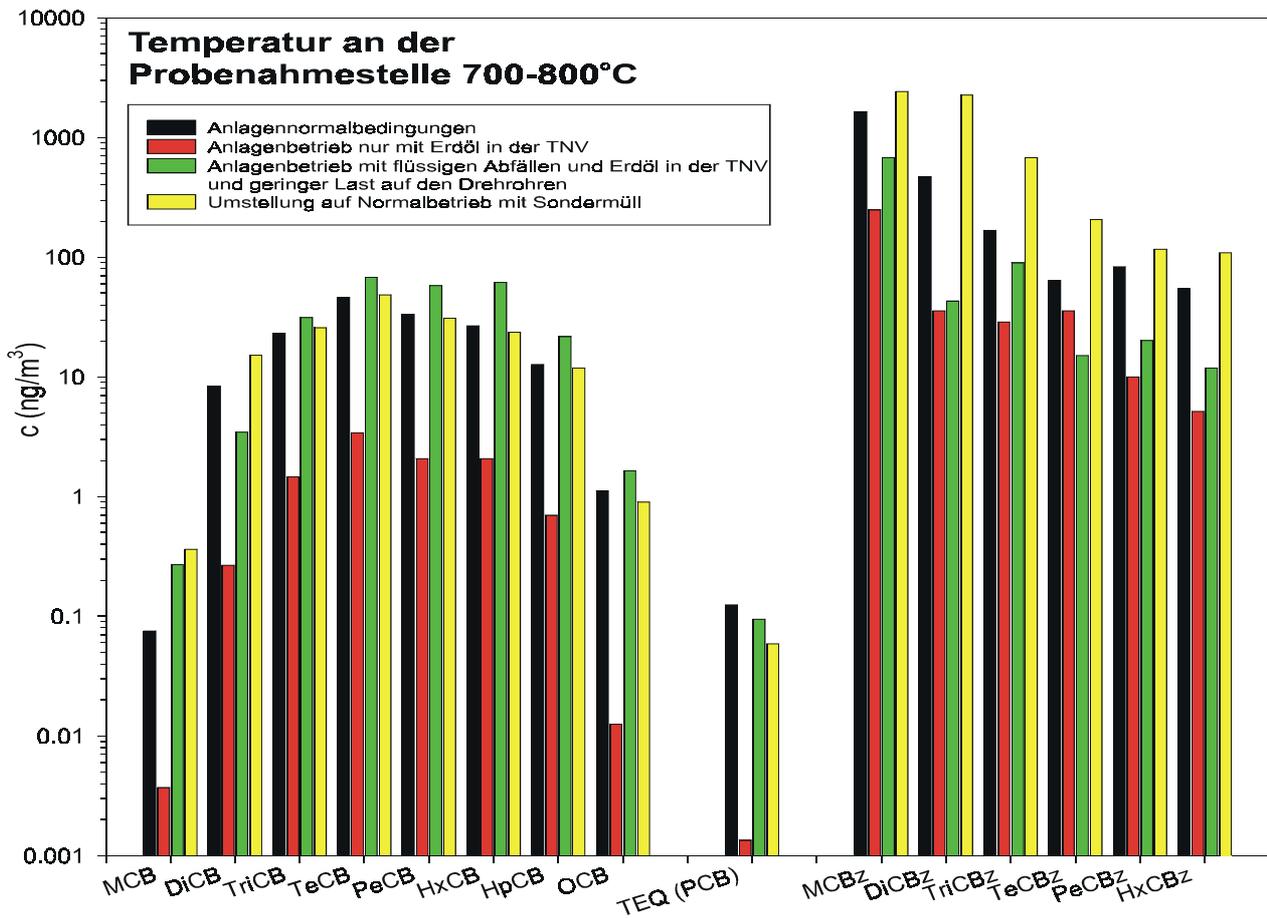


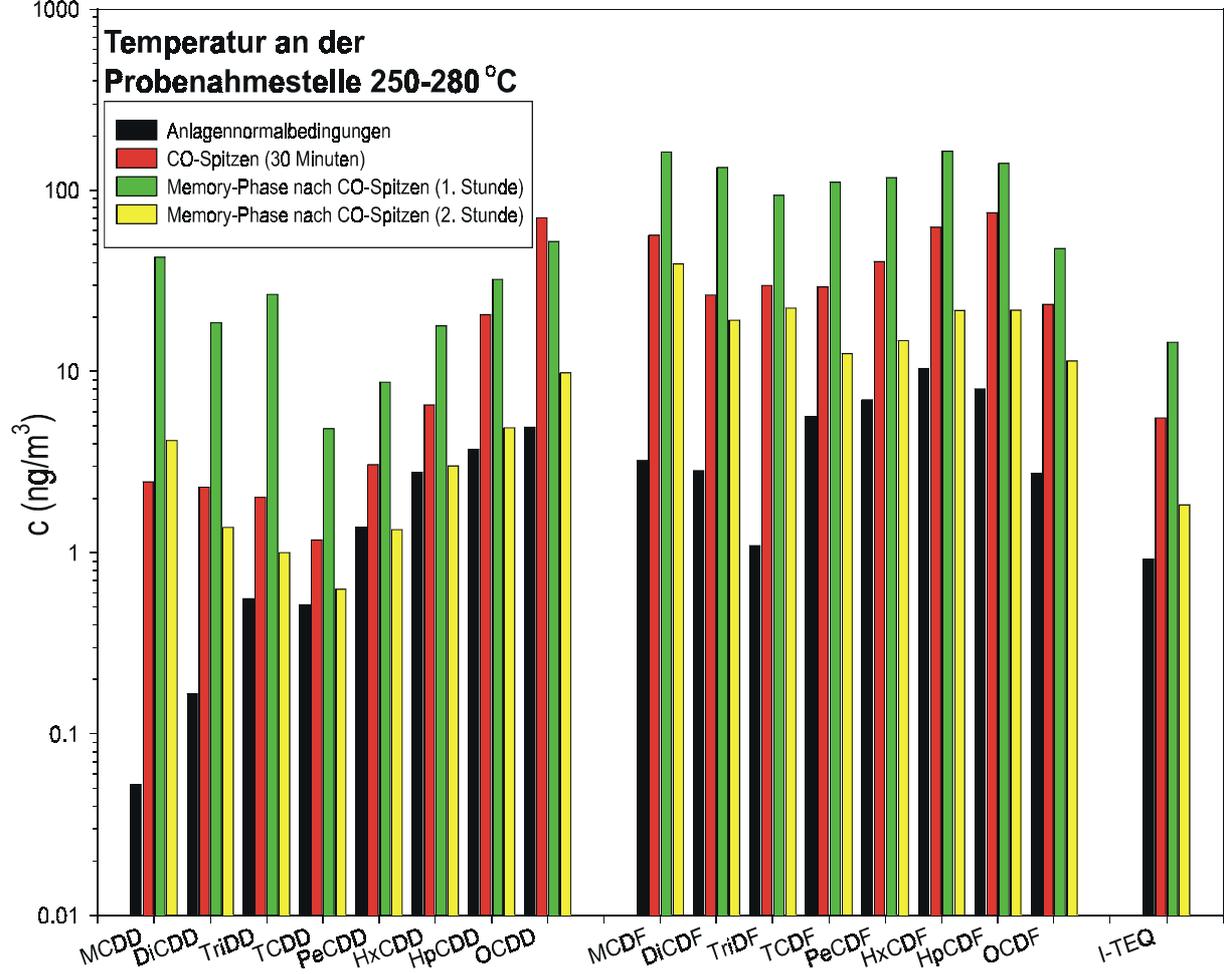
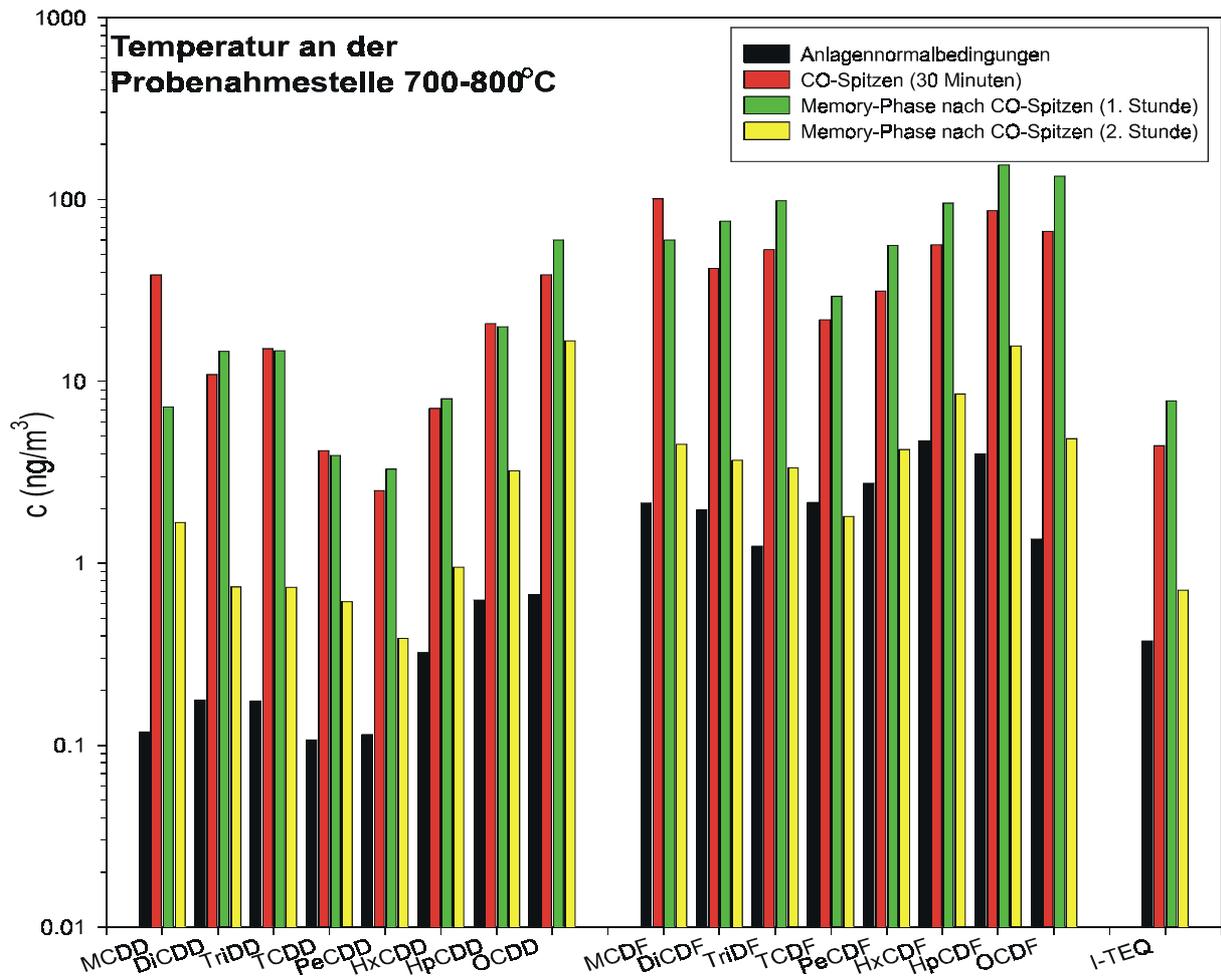
Abbildung 4.4-5: Homologenprofile der Chloraromaten an der SMVA bei Normal-, Erdölbetrieb und in den Umstellungsphasen auf Normalbetrieb

Die Abbildung 4.4-5 zeigt, daß der Anlagenbetrieb mit Erdöl an beiden Probenahmepunkten zu einem deutlichen Absinken der Homologenkonzentrationen führt. Nach dieser Anlageneinstellung steigen die Konzentrationen aller Chloraromaten bis auf Werte ähnlich denen im Normalbetrieb an. Da während der Anlagenumstellung von Erdöl auf Sondermüll keine instationären Verbrennungsbedingungen an der SMVA auftraten, kann der Anstieg der Homologenkonzentrationen auf das mit dem Sondermüll zugeführte Chlor zurückgeführt werden (vgl. Kapitel 2.4.3.2).

Nur die Konzentrationen der PCBz zwischen 700-800°C übersteigen bei der Umstellung auf Normalbetrieb die Werte unter Normalbedingungen. Für die PCBz werden im Vergleich zu den anderen Chloraromaten während aller Anlageneinstellungen die stabilsten Homologenmuster gefunden. Da der I-TEQ Wert der PCDD/F bei diesen Umstellungenprozessen an der Anlage einen ähnlichen Konzentrationsverlauf wie derjenigen der PCBz zeigt, erwiesen sich die PCBz als Surrogate des I-TEQ Wertes der PCDD/F (vgl. Kapitel 4.1)

An der SMVA wurden CO-Spitzen durch mehrfache Gebindeaufgabe (z.B. Fässer) in die Drehrohre gezielt provoziert. Diese CO-Spitzen können noch durch unerwartet hochkalorische Sondermüllchargen, z.B. bei einer falschen Faßdeklarierung, verstärkt werden. In der Regel wird hierbei keine Luft in die Drehrohre vorgelegt, so daß die CO-Konzentration im Rohgas unter diesen Bedingungen Werte von 1-4% erreichen kann. Vergleicht man diese Werte mit den vergleichsweise niedrigen CO-Konzentrationen während des instationären Betriebes an der PVA (Stundenmittel: 412 ppm, Spitzenwert: > 4000 ppm), so wird klar, unter der instationären Betriebsbedingungen die Gesamtmenge an unverbranntem Kohlenstoff im Rauchgas der SMVA deutlich die an der PVA übersteigt.

In der Abbildung 4.4-6 werden die Homologenprofile der PCDD/F, PCB und PCBz nach instationären Betriebsbedingungen (CO-Spitzen) an der SMVA dargestellt. Bei den in Klammern angegebenen Zeiten in der Legende (Abbildung 4.4-6) handelt es sich um die Probenahmezeit (z.B. CO-Spitzen (30 Minuten)). Innerhalb des Zeitintervalls der CO-Spitzen (30 Minuten) wurden drei CO-Spitzen CO-Konzentrationen zwischen 1-3 Vol% über eine Dauer von mehreren Minuten gemessen.



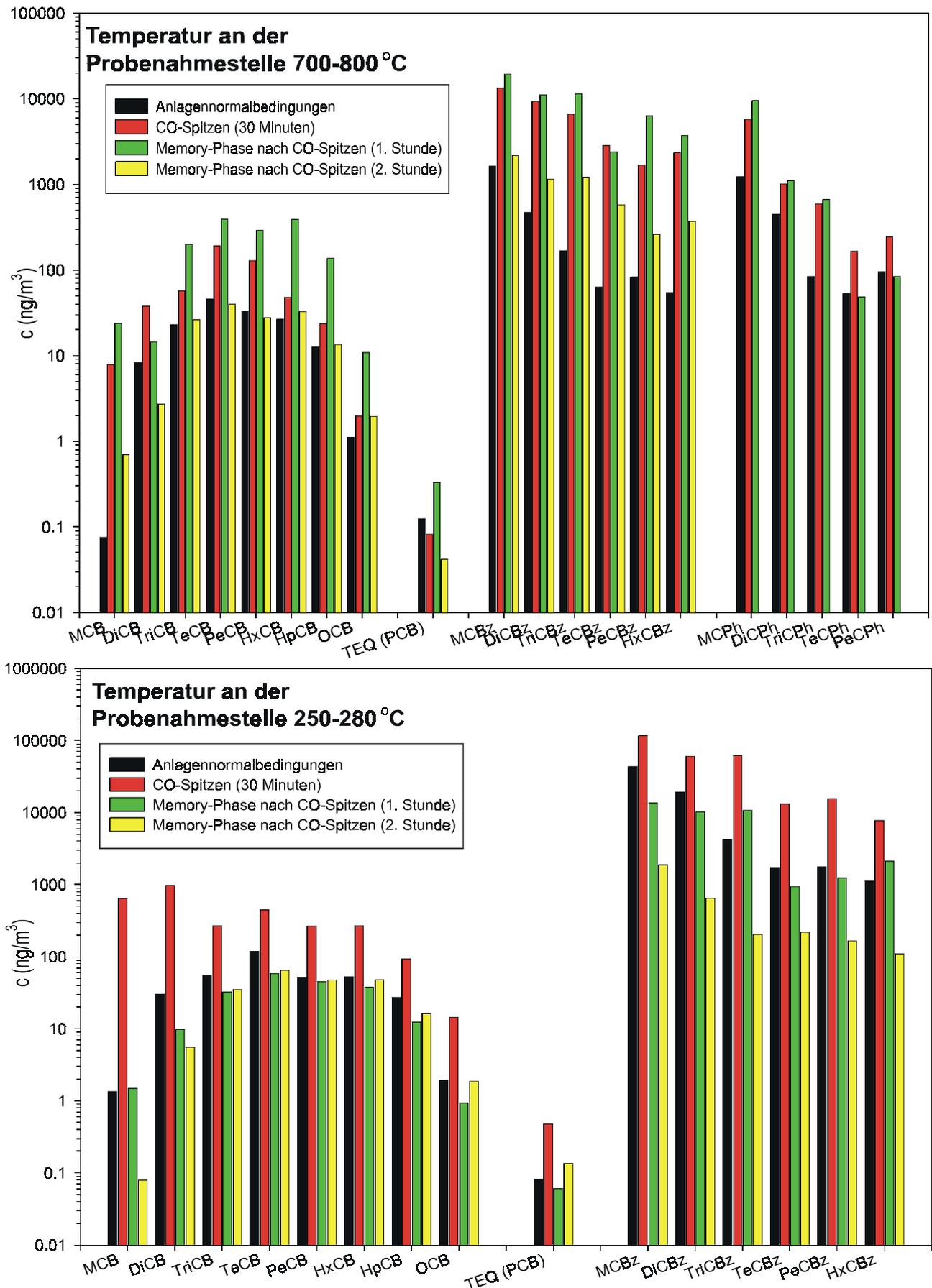


Abbildung 4.4-6: Homologenprofile der Chloraromaten im Rohgas der SMVA bei 700-800°C und 250-280°C vor, während und nach provozierten CO-Spitzen

Für die Homologenkonzentrationen aller Chloraromaten ist in der Abbildung 4.4-6 für beide Probenahmepunkte ein deutlicher Konzentrationsanstieg während und nach den provozierten CO-Spitzen zu erkennen. Im Vergleich zu den Messungen an der PVA wird allerdings kein „Kippen“ des PCDD/F-Homologenmusters zu den niedrig chlorierten Homologen der PCDD/F hin beobachtet. Vielmehr steigen die Konzentrationen aller PCDD/F-Homologen an. Dabei ist der Konzentrationsanstieg für die niedrig chlorierten PCDD/F-Homologen zwar stärker ausgeprägt als für die hoch chlorierten PCDD/F-Homologen, aber dennoch übersteigen die Konzentrationen dieser Homologen nicht wie an der PVA die der hoch chlorierten Homologen um Größenordnungen (siehe Abbildung 4.4-1). Auffällig für die PCDD/F-Homologen ist, daß dieser Konzentrationsanstieg bei der Probenahmestelle am Ende des Abhitzekessels (250-280°C) deutlicher als am Beginn der Nachbrennkammer zu erkennen ist.

Im Unterschied zu den Homologenprofilen der Chloraromaten an der PVA zeigt sich an der SMVA ein ähnliches Verhalten für alle untersuchten Chloraromaten. So weisen an der SMVA nicht nur die PCDD/F-Homologen während und nach den instationären Verbrennungsbedingungen ein verändertes Homologenprofil auf, sondern alle Chloraromatenprofile sind zu den niedrig chlorierten Homologen hin verschoben. Dieses Ergebnis könnte auf die höheren Konzentrationen von Chlor an der SMVA im Vergleich zur PVA zurückzuführen sein (7.4 Anhang C-2; siehe Kapitel 2.4.3.2). Aus der Literatur ist bekannt, daß der Chlorgehalt des Brennstoffs einen entscheidenden Einfluß auf das Maß der Bildung von Chloraromaten hat. So führt ein Gewichtsanteil von Chlor größer 1 % im Müll zu einem deutlichen Anstieg der PCDD/F-Konzentrationen (129).

Auch die Unterschiede in der CO-Konzentration der CO-Spitzen (%-Bereich an der SMVA; ppm-Bereich an der PVA) könnten für die unterschiedlichen *Memory*-Effekte an der PVA und SMVA verantwortlich sein. Die CO-Konzentration könnte sich auch auf die Menge und evtl. die Beschaffenheit der für den *Memory*-Effekt verantwortlich gemachten kohlenstoffhaltigen Ablagerungen auf den Anlageinnenwänden auswirken (Abbildung 4.4-4). Aus einigen Arbeiten ist bekannt, daß die CO-Konzentration mit der gebildeten Menge an PCDD/F korreliert ist (155), (130), (157). Dabei spielen für die Bildung der Chloraromaten während instationärer Verbrennungsbedingungen sicherlich die strukturellen Eigenschaften des an der Reaktion beteiligten Kohlenstoffs (z.B. Modifikationen, Fremdatome) eine sehr wichtige Rolle, worüber jedoch in der Literatur nichts bekannt ist.

Im Gegensatz zu den unterstöchiometrischen Prozeßbedingungen (λ -Wert < 1) während der *Memory*-Phasen an der PVA lagen an der SMVA unterstöchiometrischen Prozeßbedingungen vor. Aus der Literatur ist bekannt, daß Oxychlorierungsreaktionen sowohl in der Gasphase als auch an heterogenen Oberflächen stärker niedrig chlorierte PCDD/F als höher chlorierte erfassen (98). Die Ergebnisse dieser Studie könnten somit zu einem besseren Verständnis der erhöhten Konzentrationen der niedrig chlorierten PCDD/F während und nach instationären Verbrennungsbedingungen an der SMVA beitragen.

Die Konzentrationserhöhung der PCDD/F und PCBz dauert auch zwei Stunden nach den CO-Spitzen noch an, und zwar am stärksten für die niedrig chlorierten Homologen bei 250-280°C. Diese *Memory*-Phasen könnten auf die in der Abbildung 4.4-4 vorgeschlagenen katalytischen Prozesse auf die im Rauchgaskanal gebildeten kohlenstoffhaltigen Ablagerungen zurückgeführt werden.

In der Literatur wurde an einer Pilotanlage gezeigt, daß die unter rußenden Prozessbedingungen in der Anlage gebildeten kohlenstoffhaltigen Ablagerungen, welche in hohem Maße Kupfer enthielten, zu einer stark erhöhten Bildung von PCDD/F über 100 h hinweg führten (290). In der zitierten Arbeit waren die Homologenmuster der PCDD/F unter instationären Verbrennungsbedingungen ebenfalls zu den niedrig chlorierten Homologen hin verschoben. Die ähnlichen Befunde für die Homologenmuster der PCDD/F aus der Literatur und der hier untersuchten SMVA legen nahe, daß der unter instationären Verbrennungsbedingungen beobachtete *Memory*-Effekt auf kohlenstoffhaltige Ablagerungen im Rauchgaskanal zurückzuführen sein könnte.

In den Ergebnissen von Studien an Pilotanlagen zur Sondermüllverbrennung, welche unter ähnlichen Verbrennungsbedingungen wie die SMVA betrieben wurden, finden sich nach provozierten CO-Spitzen zeitweise stark erhöhte Konzentrationen der Chloraromaten (291), (292), (157), (293), (156), (294), (295). Die Ergebnisse dieser Arbeiten geben erstmalig Hinweise auf *Memory*-Effekte nach instationären Verbrennungsbedingungen für eine große Anzahl von aliphatischen und aromatischen Verbindungen.

In der Abbildung 4.4-7 wird an einer weiteren Serie von provozierten CO-Spitzen die Veränderung der Homologenkonzentrationen im **Reingas** SMVA dargestellt. Die in Klammern aufgeführten Werte in der Legende in Abbildung 4.4-7 beziehen sich auf die Zeitintervalle der Probenahmen. Im Probenahmezeitraum (30 Minuten) unter instationären Verbrennungsbedingungen wurden zwei CO-Spitzen von einigen Minuten Dauer mit Konzentrationen von 1-4 Vol% CO gemessen (CO-Meßwert aus dem Rohgas bei circa 250°C).

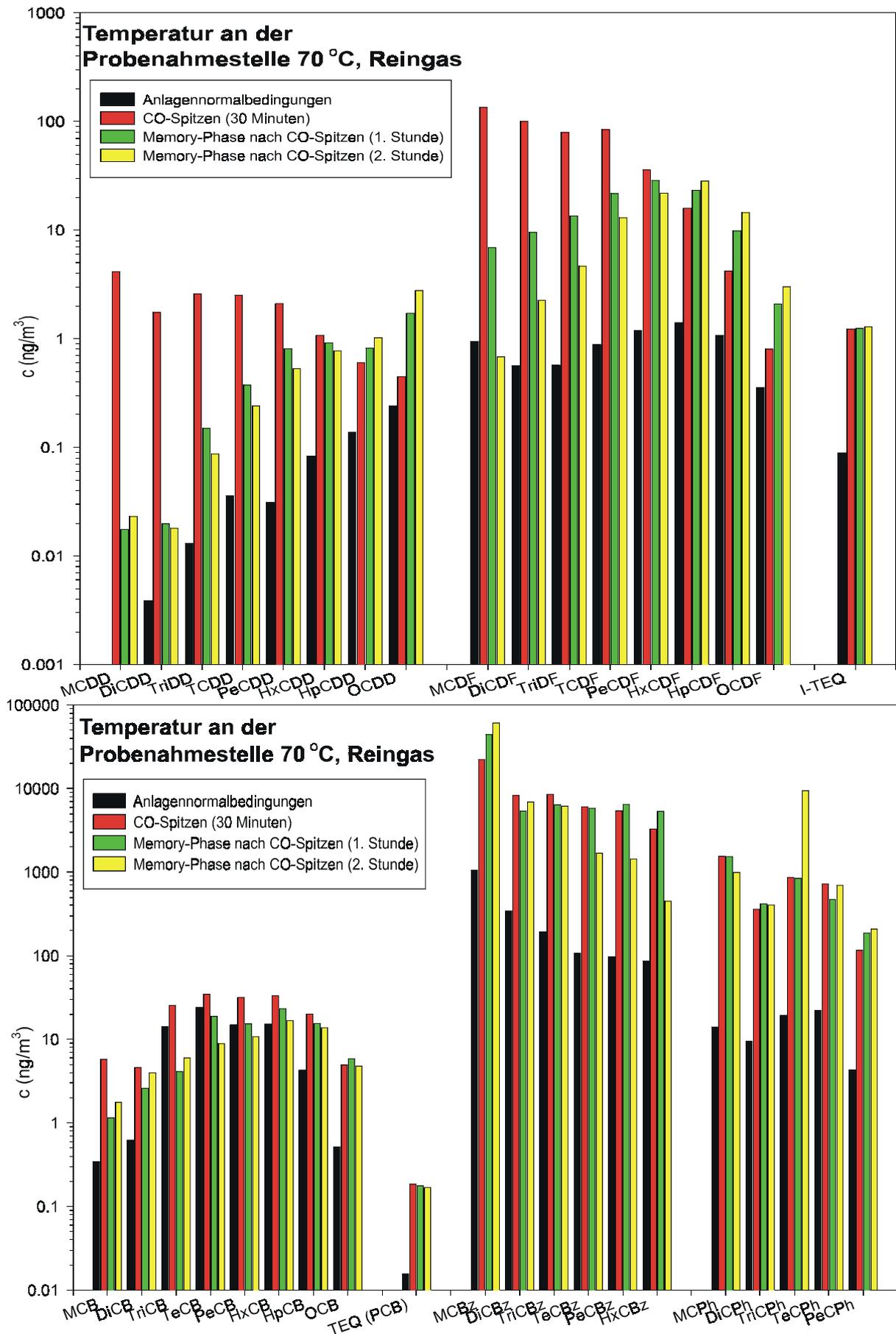


Abbildung 4.4-7: Homologenprofile der Chloraromaten im Reingas der SMVA bei 70°C vor, während und nach provozierten CO-Spitzen

Aus der Abbildung 4.4-7 wird klar, daß *Memory*-Effekte, wie sie bei den Untersuchungen im Rohgas der SMVA beobachtet wurden, auch zu längerfristig erhöhten Emissionen im Reingas der SMVA führen können. Da es sich nicht um die gleichen provozierten CO-Spitzen wie in Abbildung 4.4-6 handelt, ist ein direkter Vergleich der Ergebnisse nicht möglich. Dennoch lassen sich Analogien zu den beobachteten *Memory*-Effekten im Rohgas erkennen.

Die PCB-Homologen zeigen wie schon im Rohgas (siehe Abbildung 4.4-6) den geringsten *Memory*-Effekt. Die Konzentrationen der drei- bis sechsfach chlorierten PCB-Homologen weisen während der *Memory*-Phase gegenüber Anlagennormalbedingungen nur unwesentlich erhöhte Werte auf.

Die höchsten Konzentrationen der niedrig chlorierten Homologen der PCDD/F treten im Reingas unter instationären Verbrennungsbedingungen auf. Ein „Kippen“ des Homologenmusters der PCDD/F wie im Rohgas der PVA wird nicht beobachtet, da alle Homologenkonzentrationen gleich stark ansteigen. Auch hierfür könnten, wie bereits für das Rohgas der SMVA diskutiert, die um Größenordnungen höheren Chlorkonzentrationen im Rauchgas der SMVA im Vergleich zur PVA eine wichtige Rolle bei der Bildung der niedrig chlorierten Homologen spielen (vgl. 7.4 Anhang C-2). Die niedrig chlorierten Homologen der PCDD/F weisen im Gegensatz zu den höher chlorierten Homologen in der *Memory*-Phase keine weiter ansteigenden Konzentrationen auf.

Im Gegensatz zu den PCDD/F zeigen die PCBz und PCPh mit Ausnahme von MCBz und TriCPh keinen Konzentrationsanstieg in der *Memory*-Phase. Die Konzentrationen dieser Homologen sind am höchsten unter gestörten Verbrennungsbedingungen (CO-Spitzen). In der *Memory*-Phase nach den CO-Spitzen sinken diese ab, erreichen allerdings nicht die Konzentrationen wie unter Anlagennormalbedingungen.

Die beobachteten *Memory*-Effekte der Chloraromaten im Reingas der SMVA werden auch durch Rauchgasreinigung beeinflusst. Die Rauchgasreinigung erfaßt die untersuchten Substanzen in Abhängigkeit ihrer physikalisch-chemischen Eigenschaften, z.B. Wasserlöslichkeit und Dampfdruck, unterschiedlich stark. Vergleicht man das Verhalten des I-TEQ Wertes der PCDD/F während und nach CO-Spitzen im Roh- und Reingas, so fällt auf, daß der *Memory*-Effekt im Reingas länger andauert als im Rohgas (Abbildung 4.4-6 und 4.4-7). In der Literatur wurden im Reingas von Pilotanlagen ebenfalls *Memory*-Effekte für die PCDD/F gefunden, welche auf den Einsatz von Naßwäschern bei der Rauchgasreinigung zurückgeführt wurden (296), (297). Diese Studien zeigten, daß es aus den Naßwäschern von Pilotanlagen zu einer Freisetzung von PCDD/F und damit längerfristig erhöhten PCDD/F-Emissionen im Reingas kommen kann. Nach den in der hier vorliegenden Arbeit gefundenen Ergebnissen wäre eine Abreicherung der Substanzen von den im Filter befindlichen Partikeln ein mögliches Szenario für die Konzentrationserhöhungen im Reingas der SMVA. Diese These wird vor allem durch den Konzentrationsanstieg der höher chlorierten PCDD/F in den *Memory*-Phasen gestützt, welche bei den Temperaturen im Naßwäscher (80 bis 90°C) überwiegend an Partikel gebunden vorliegen. Im Gegensatz dazu wird für die ein- bis zweifach chlorierten PCDD/F eine Konzentrationsabnahme bis auf ein Niveau

ähnlich dem unter Normalbedingungen vermutlich aufgrund ihrer Abscheidung im Naßwäscher gefunden.

Die gezeigten Ergebnisse zu den *Memory*-Effekten für die Chloraromaten im Reingas der SMVA legen die Vermutung nahe, daß die *Memory*-Effekte auch zu einem erhöhten Schadstoffeintrag in die Umwelt führen können.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß an der SMVA an allen drei Probenahmepunkten nach Gebindeaufgaben ein *Memory*-Effekt bei der Bildung der Chloraromaten beobachtet wurde. An der SMVA folgt nach den CO-Spitzen mit stark erhöhten Chloraromatenkonzentrationen im Roh- und Reingas eine für alle Chloraromaten in ähnlichem Ausmaß beobachtete *Memory*-Phase. Unter instationären Verbrennungsbedingungen sind v.a. die Konzentrationen der niedrig chlorierten Homologen stark erhöht, während in der *Memory*-Phase v.a. die höher chlorierten Homologenkonzentrationen ansteigen.

Die Aromatenbildung während kurzzeitig gestörter Verbrennungsbedingungen bei der Gebindeaufgabe an der SMVA wurde mit Hilfe des REMPI-TOFMS Instruments untersucht. In Abbildung 4.4-8 sind die Meßergebnisse für eine Serie von Gebindeaufgaben, z.B. Metall- oder Plastikfäßer mit festem oder pastösem Sondermüll, dargestellt. Sowohl die Signale des REMPI-TOFMS Instruments als auch der konventionellen Gasanalytik sind abgebildet.

4. Ergebnisse und Diskussion

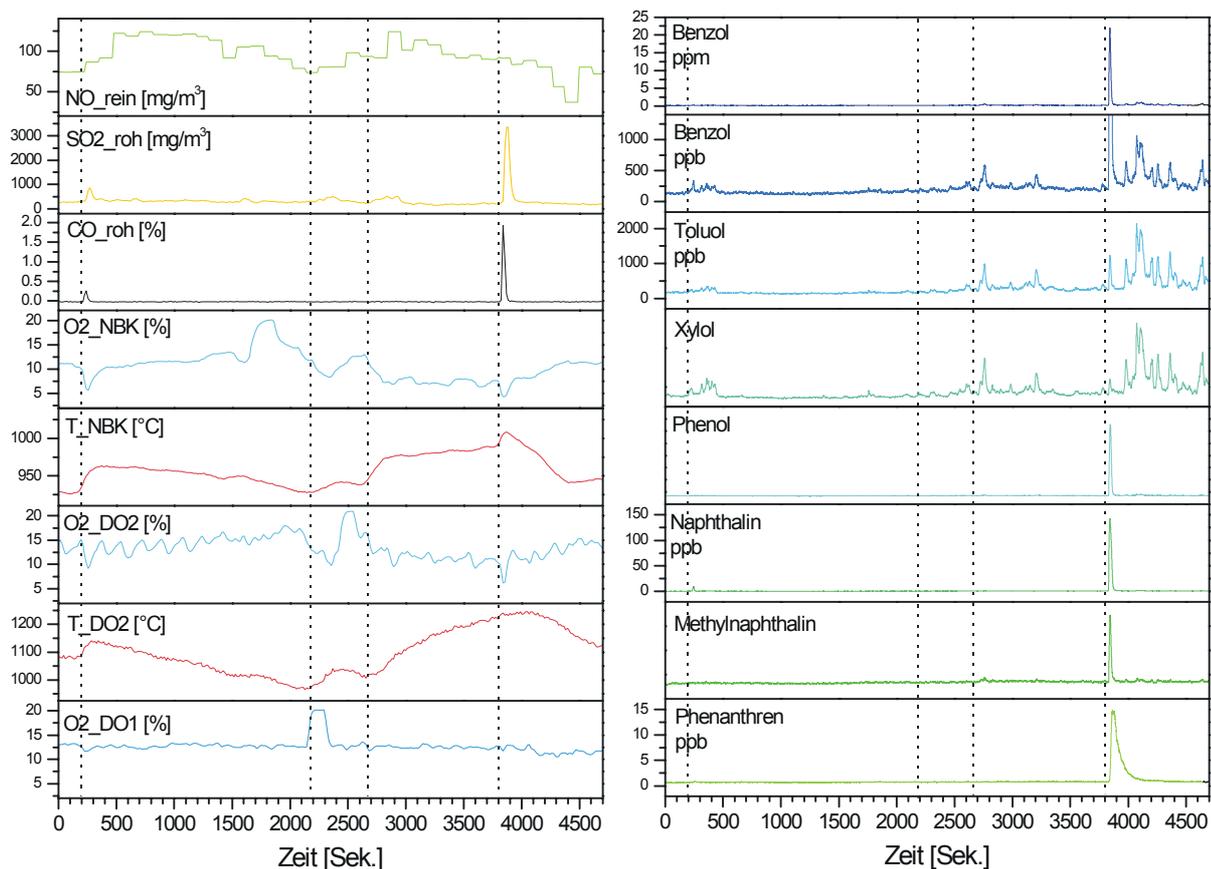


Abbildung 4.4-8: Anlagendaten und korrespondierende REMPI-TOFMS PAK-Konzentrationsverläufe bei der Gebindeaufgabe (gestrichelte Linien) an der SMVA (REMPI@ 266 nm, Nd:YAG Laser; Temperaturbereich 250°C bis 280°C) (aus: (14))

Die in der Abbildung 4.4-8 dargestellten Konzentrationsverläufe für O₂ zeigen nach der jeweiligen Gebindeaufgabe in das Drehrohr 2 (DO2) ein leichtes Abfallen. Interessant ist, daß nicht jede Gebindeaufgabe eine Auswirkung auf die Aromatenbildung (REMPI-TOFMS Massenspuren) zeigt. Erst das vierte Gebinde führt sowohl zu deutlichen Spitzen bei den aufgezeichneten SO₂- und CO-Konzentrationen als auch bei den Aromatenkonzentrationen. In dieser Phase der direkten Bildung von Aromaten aus der CO-Spitze heraus konnten - in Analogie zu den Ergebnissen an der PVA - die für den Aufbau von Aromaten typischen reaktiven Intermediate, wie Phenylacetylen und Phenylethen, nachgewiesen werden (14), (185), (298). Das REMPI-TOFMS Signal für Phenanthren ist über einen Zeitraum von circa 200 s erhöht. Der für Phenanthren gemessene Konzentrationsverlauf könnte als Ansatz eines *Memory*-Effektes interpretiert werden (298). Auffällig für die Massenspuren der methylierten Aromaten sind die Fluktuationen ihrer Konzentrationen im Anschluß an die deutliche Konzentrationsspitze der unmethylierten Aromaten. Im Vergleich zu den REMPI-TOFMS Meßergebnissen an der PVA sind die Fluktuationen der Methyларomaten an der SMVA stärker ausgeprägt.

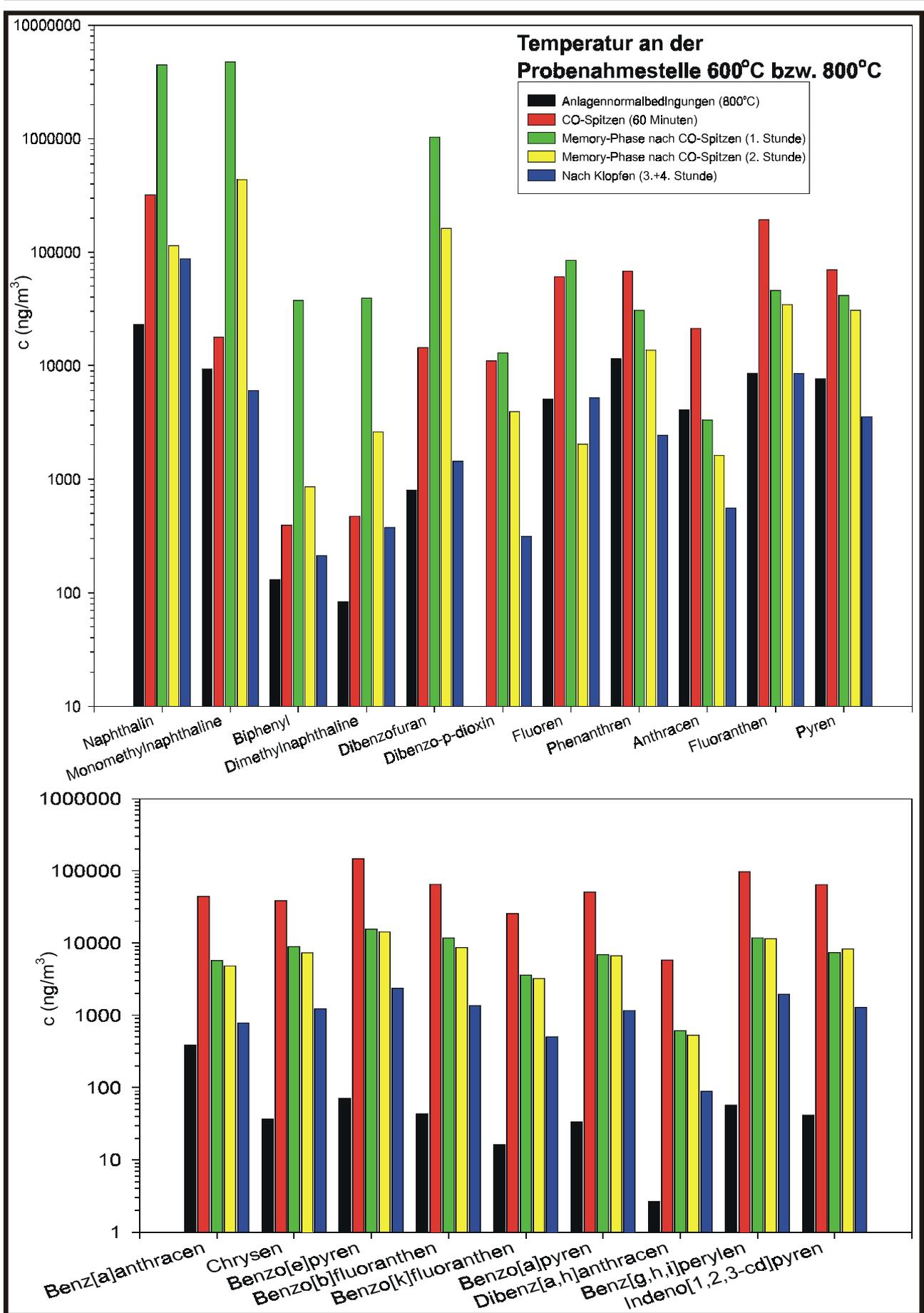
Wie in der Literatur für ähnliche Anlagen beschrieben, führen Gebindeaufgaben zu einer Emission von aromatischen Kohlenwasserstoffen, welche länger andauert als die mit konventioneller Gasanalytik aufgezeichnete CO-Spitze (291), (157), (288), (295).

Anlagenbedingungen, wie die Temperatur und der Sauerstoffgehalt in der Nachbrennzone, haben einen entscheidenden Einfluß auf die Schadstoffbildung während instationärer Verbrennungsprozesse an Sondermüllverbrennungsanlagen (156), (294), (291). In diesen Arbeiten wurde ferner gefunden, daß eine hohe Temperatur in der Nachbrennzone unter instationären Verbrennungsbedingungen zu einer sehr schnellen CO-Entwicklung im Rauchgas führt. Dies hat eine im Vergleich zu Anlagennormalbedingungen erhöhte und länger andauernde Schadstoffbildung zur Folge. So könnte das Temperaturkriterium für die Verbrennung von Sondermüll, welches die 17. BImSchV vorschreibt (Mindestverweildauer der Abgase von 2s bei 1200°C), unter bestimmten instationären Anlagenzuständen zu einer Erhöhung der Emissionen aufgrund von massiven Wandbelegungen in der Nachbrennzone führen (siehe Abbildung 4.4-4). Das Ziel dieser Vorschrift, die Emissionen durch den chemischen Umsatz der gesamten Organik in der Gasphase durch eine hohe Temperatur, hohe Vermischung und eine möglichst große Verweilzeit der Rauchgase in der Nachbrennzone zu reduzieren (siehe Kapitel 2.4.3.1), wird aufgrund der Ablagerungen von thermisch stabilen Kohlenstoffoberflächen (z.B. *pyrocarbon*) auf den Anlageninnenwänden nicht erreicht. Durch REMPI-TOFMS Messungen an der SMVA wurde bestätigt, daß eine höhere Temperatur in der Nachbrennzone während der Gebindeaufgaben zu einer längerfristig verstärkten Aromatenbildung führen kann (238).

4.4.3 Hausmüllverbrennungsanlage (MVA)

Um zu klären, ob *Memory*-Effekte auch bei der Verbrennung von Hausmüll auftreten können, wurden an einer MVA Probenahmen unter instationären Verbrennungsbedingungen durchgeführt. Die Ergebnisse für die Aromatenprofile (PAK und BTX) an den unterschiedlichen Probenahmestellen sind in der Abbildung 4.4-9 dargestellt. Drei Stunden nach den CO-Spitzen wurden die Kesselrohre durch mechanische Klopferwerke von den abgelagerten Flugstäuben befreit (siehe Legende in der Abbildung 4.4-9: Nach Klopfen (3.+4. Stunde)). Die Zeitangaben in der Legende der Abbildung 4.4-9 beziehen sich auf die Dauer der Probenahmen. Während des Zeitintervalls der CO-Spitzen von 60 Minuten wurden vier CO-Spitzen mit CO-Konzentrationen von größer 1 Vol% im Rauchgas am Ende des Abhitzekessels gemessen.

4. Ergebnisse und Diskussion



4. Ergebnisse und Diskussion

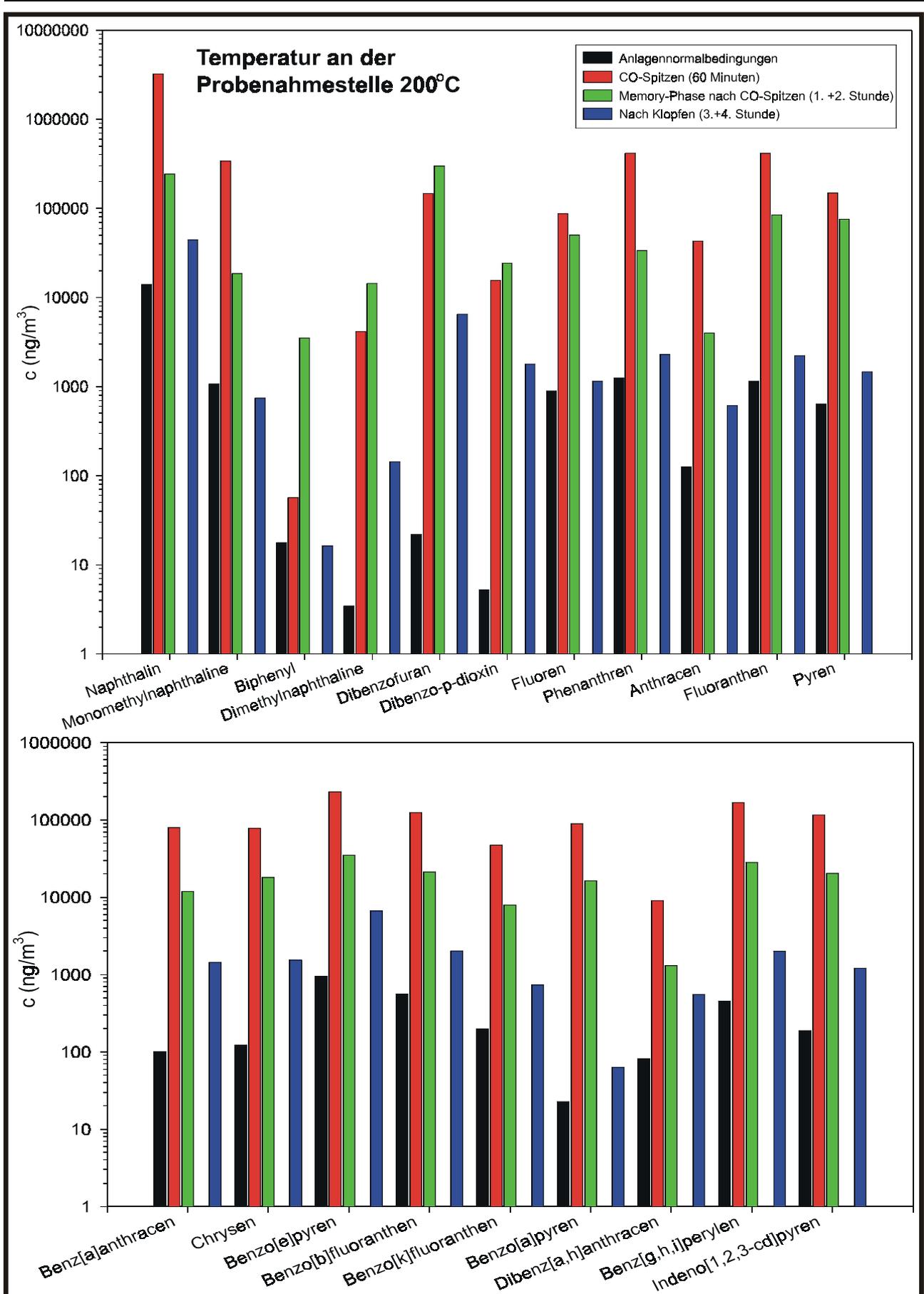


Abbildung 4.4-9: Aromatenprofile im Rohgas der MVA bei 600°C und 200°C vor, während und nach provozierten CO-Spitzen

Die Abbildung 4.4-9 zeigt, daß während der provozierten CO-Spitzen sehr hohe PAK-Rohgaskonzentrationen sowohl an der Probenahmestelle bei 200°C als auch bei 700°C auftreten. Die PAK-Konzentrationsverläufe an beiden Probenahmestellen der MVA sind sehr ähnlich. Die Konzentrationen aller PAK sinken zu der niedrigeren Temperatur hin ab, was vor allem auf die Prozesse des Partikelwachstums, die Aggregation und Nukleation, zurückgeführt werden kann (vgl. Kapitel 2.4.2, Abbildung 2.4.1 und Kapitel 4.3.1.2, Abbildung 4.3-7) (107).

Vergleicht man die Konzentrationen der PAK unter Normalbedingungen zwischen 700-800°C mit denjenigen unter instationären Verbrennungsbedingungen, so ist vor allem auffällig, daß die PAK mit mehr als drei Benzolringen einen deutlichen *Memory*-Effekt auch nach dem Klopfen zeigen. Dieses Ergebnis weist auf den oxidativen Abbau der vermutlich während der CO-Spitzen gebildeten kohlenstoffhaltigen Wandbelegungen hin (siehe Abbildung 4.4-4).

Der an der MVA im Hochtemperaturbereich der Anlage gefundene *Memory*-Effekt für die PAK-Bildung ist dem an der PVA beobachteten sehr ähnlich. So zeigen an beiden Anlagen alle Aromaten während der CO-Spitzen ein Konzentrationsmaximum. In den sich an die CO-Spitzen anschließenden *Memory*-Phasen treten im Vergleich zum Normalbetrieb erhöhte PAK-Konzentrationen auf (vgl. Abbildung 4.4-9 und Abbildung 4.4-1).

Mit den Ergebnissen der konventionellen PAK-Messungen kann noch nicht eindeutig geklärt werden, ob das Klopfen zu einer Reduzierung der *Memory*-Effekte führt, da in den Zeitintervallen vor dem Klopfen die Konzentrationen der PAK ebenfalls um die gleichen Größenordnungen abgefallen sind. Dennoch sollten bezüglich des Einflusses des Klopfens auf die Schadstoffbildung Untersuchungen angestrebt werden, um eine Arbeitsempfehlung für den Standardroutinebetrieb der Anlage herauszugeben.

Die mit konventioneller Analytik gefundenen Ergebnisse für den *Memory*-Effekt der PAK an der MVA stimmen gut mit den Ergebnissen der in Abbildung 4.4-10 dargestellten zeitgleich durchgeführten REMPI-TOFMS Messungen überein.

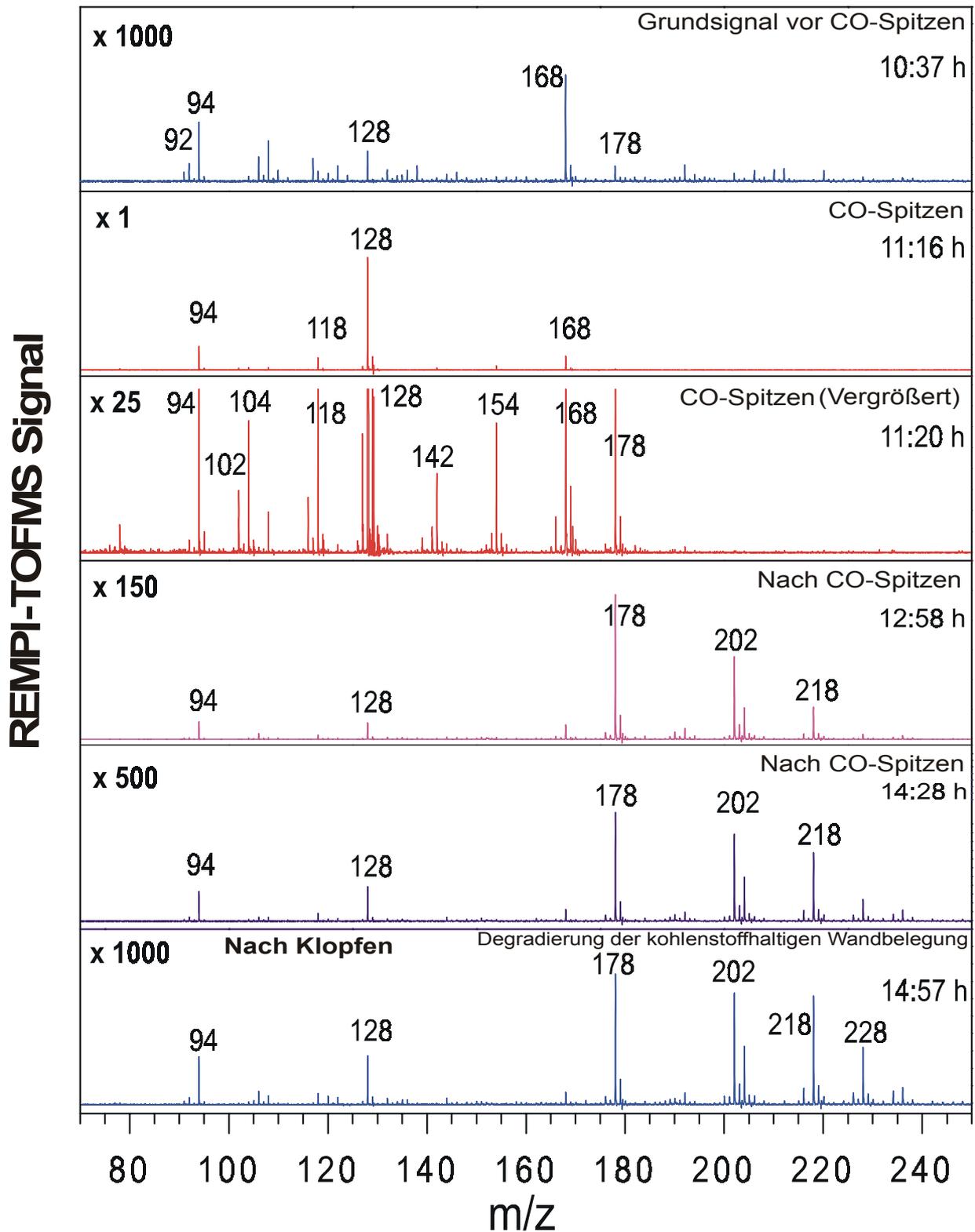


Abbildung 4.4-10: REMPI-TOFMS @269.82 nm Massenspektren im Rohgas der MVA bei circa 200°C vor und während der *Memory*-Phase (aus: (238))

Die in der linken oberen Ecke jedes Massenspektrums abgebildete Zahl in der Abbildung 4.4-10 entspricht dem Faktor, um den das Massenspektrum, das während der CO-Spitzen aufgenommen wurde, verstärkt wird. Im Normalbetrieb der Anlage findet sich neben den für die Verbrennung typischen Massen von Toluol (m/z 92), Phenol (m/z 94), Naphthalin (m/z 128) und Phenanthren

(m/z 178) auch die Masse von Dibenzofuran (m/z 168). Alle Aromatenkonzentrationen sind während der CO-Spitzen um Größenordnungen erhöht. Im Anschluß an diese direkte Aromatenbildung findet sich in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen der konventionellen Analysendaten ein deutlicher *Memory*-Effekt für die Massen m/z 202 (Pyren) und m/z 228 (Chrysen) innerhalb der ersten drei Stunden nach den CO-Spitzen. Auch das Dibenzofuran zeigt sowohl in den konventionellen Analysen (Abbildung 4.4-9) als auch in den REMPI-TOFMS Messungen einen deutlichen *Memory*-Effekt. Die hohe Konzentration von unchlorierten Dibenzofuran kann zu einer verstärkten Bildung von niedrig chlorierten PCDF beitragen, wie dies im Kapitel 4.4.1 postuliert wurde (Abbildung 4.4-4). Die Ergebnisse sowohl der konventionellen Analysen als auch der REMPI-TOFMS Messungen geben damit einen Hinweis auf mögliche Unterschiede in den Bildungswegen von niedrig und hoch chlorierten PCDF.

Neben den für CO-Spitzen typischen Aromatenmassen, wie z.B. Naphthalin, finden sich in der Abbildung 4.4-10 auch die für das Aromatenwachstum verantwortlich gemachten Verbindungen, z.B. Phenylacetylen (m/z 102), Styrol (m/z 104), Inden (m/z 116) und Indan (m/z 118). Diese Verbindungen stellen chemisch aktivierte Vorläuferverbindungen zum Aufbau von mehrkernigen aromatischen Verbindungen dar (299). Die Bildung dieser Verbindungen könnte auf Reaktionen zwischen den Gasphasenspezies (z.B. Acetylen) und den wahrscheinlich unter instationären Betriebsbedingungen gebildeten kohlenstoffhaltigen Ablagerungen auf den Anlageninnenwänden zurückzuführen sein.

Die während der *Memory*-Phase mit REMPI-TOFMS aufgezeichneten Massenspektren in Abbildung 4.4-10 werden von Phenanthren (m/z 178), Pyren (m/z 202) und der Masse m/z 228 (Chrysen, Triphenylen und Benz[a]anthracen) dominiert. Der deutliche *Memory*-Effekt vor allem für mehrkernige Aromaten ist auch in der Abbildung 4.4-9 aus den konventionellen Analysendaten gut zu erkennen. Während Naphthalin nach dem Klopfen im Zeitraum von drei bis vier Stunden nach den CO-Spitzen noch eine um den Faktor 2 bis 3 erhöhte Konzentration aufweist, liegen die Konzentrationen der mehrkernigen PAK um den Faktor 10 höher als unter Anlagennormalbedingungen (Abbildung 4.4-9 und 4.4-10). Im Gegensatz zu den REMPI-TOFMS Messungen an der SMVA wurde an der MVA kein *Memory*-Effekt für die methylierten PAK gefunden (siehe Abbildung 4.4-8). Die an der MVA beobachteten *Memory*-Effekte der PAK sind vermutlich auf die während der CO-Spitzen auf den Anlageninnenwänden gebildeten Kohlenstoffoberflächen zurückzuführen, wie dies im Kapitel 4.4.1 dargestellt wurde (vgl. Abbildung 4.4-4).

Um zu zeigen, daß die während der *Memory*-Phasen ablaufenden PAK-Bildungsprozesse bereits im Hochtemperaturbereich der Anlagen stattfinden, wurde an der MVA bei circa 900°C eine Serie von REMPI-TOFMS Messungen unter instationären Betriebsbedingungen durchgeführt. In Abbildung 4.4-11 ist ein Ergebnis dieser REMPI-TOFMS Messungen als Konturplot dargestellt.

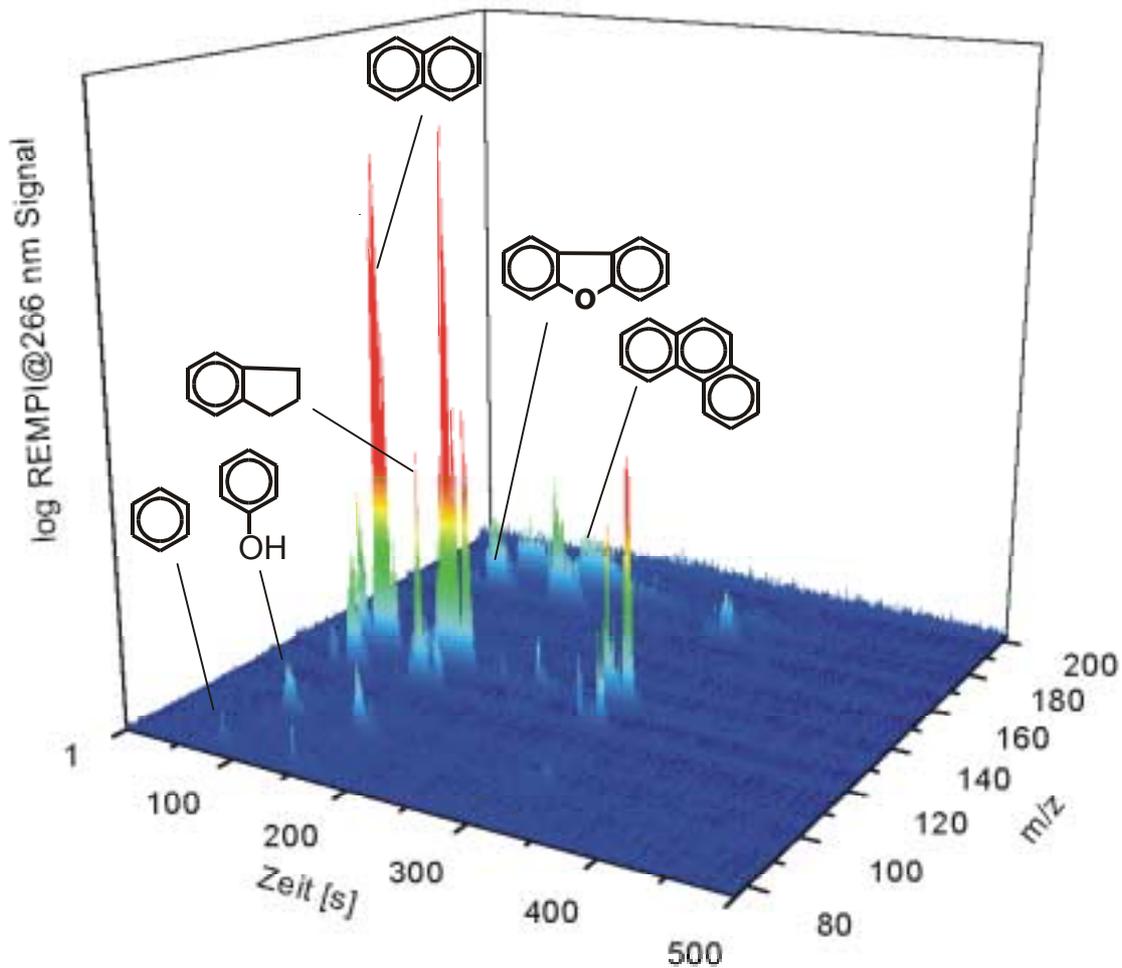
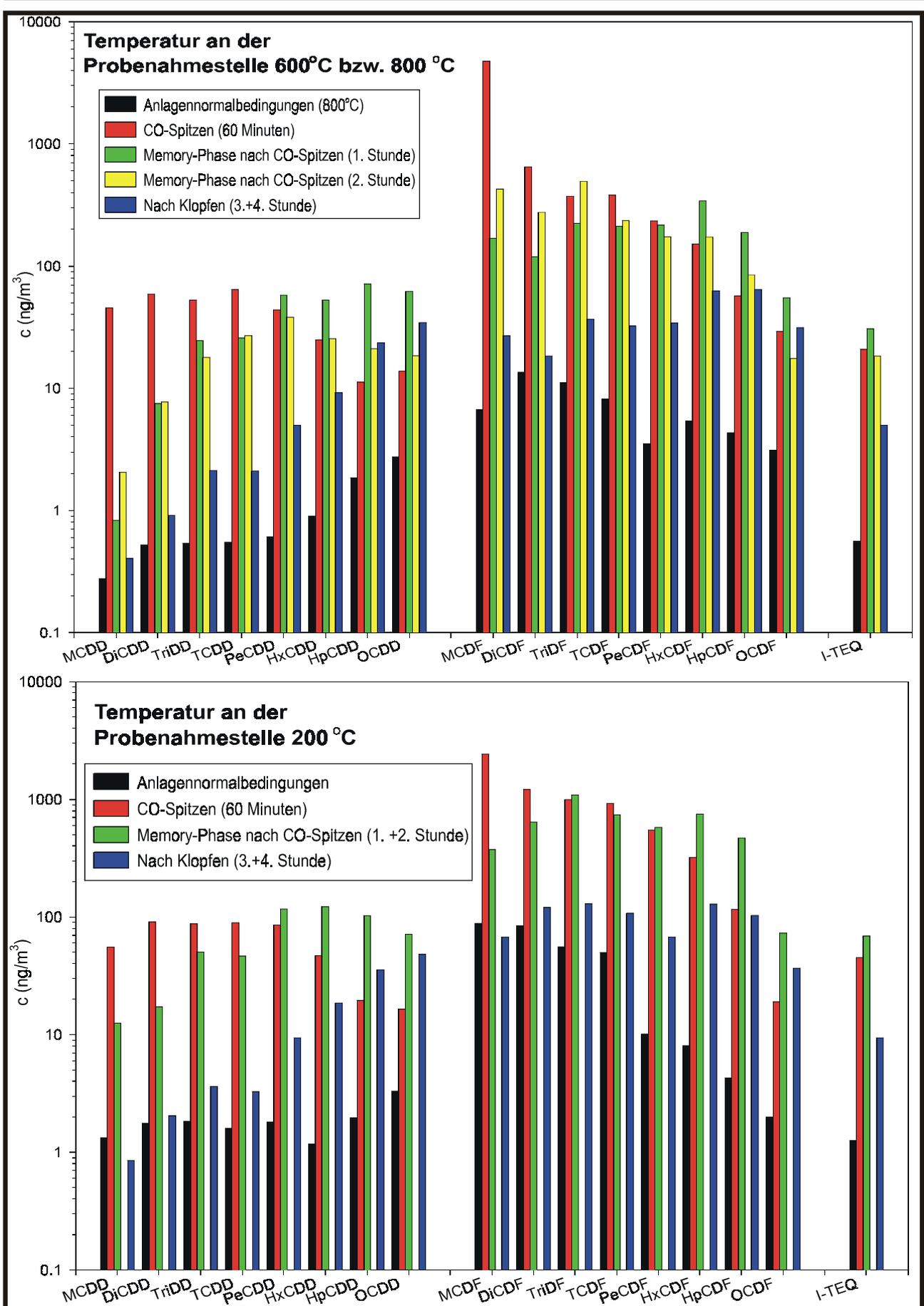


Abbildung 4.4-11: Konturplot einer REMPI-TOFMS Messung (Nd:YAG Laser bei 266 nm) bei 900°C während instationärer Verbrennungsbedingungen an der MVA (aus: (238))

In der Abbildung 4.4-11 zeigt die Massenspur des Phenanthrens (m/z 178) unter instationären Verbrennungsbedingungen bei 900°C einen leicht „verschmierten“ Konzentrationsverlauf. Dieser Konzentrationsverlauf weist ein über 60 s erhöhtes REMPI-TOFMS Signal auf. Dieses Ergebnis könnte einen Hochtemperatur-*Memory*-Effekt des Phenanthrens andeuten.

In der Abbildung 4.4-12 sind die Homologenprofile der Chloraromaten vor, während und nach instationären Betriebsbedingungen an der MVA dargestellt.

4. Ergebnisse und Diskussion



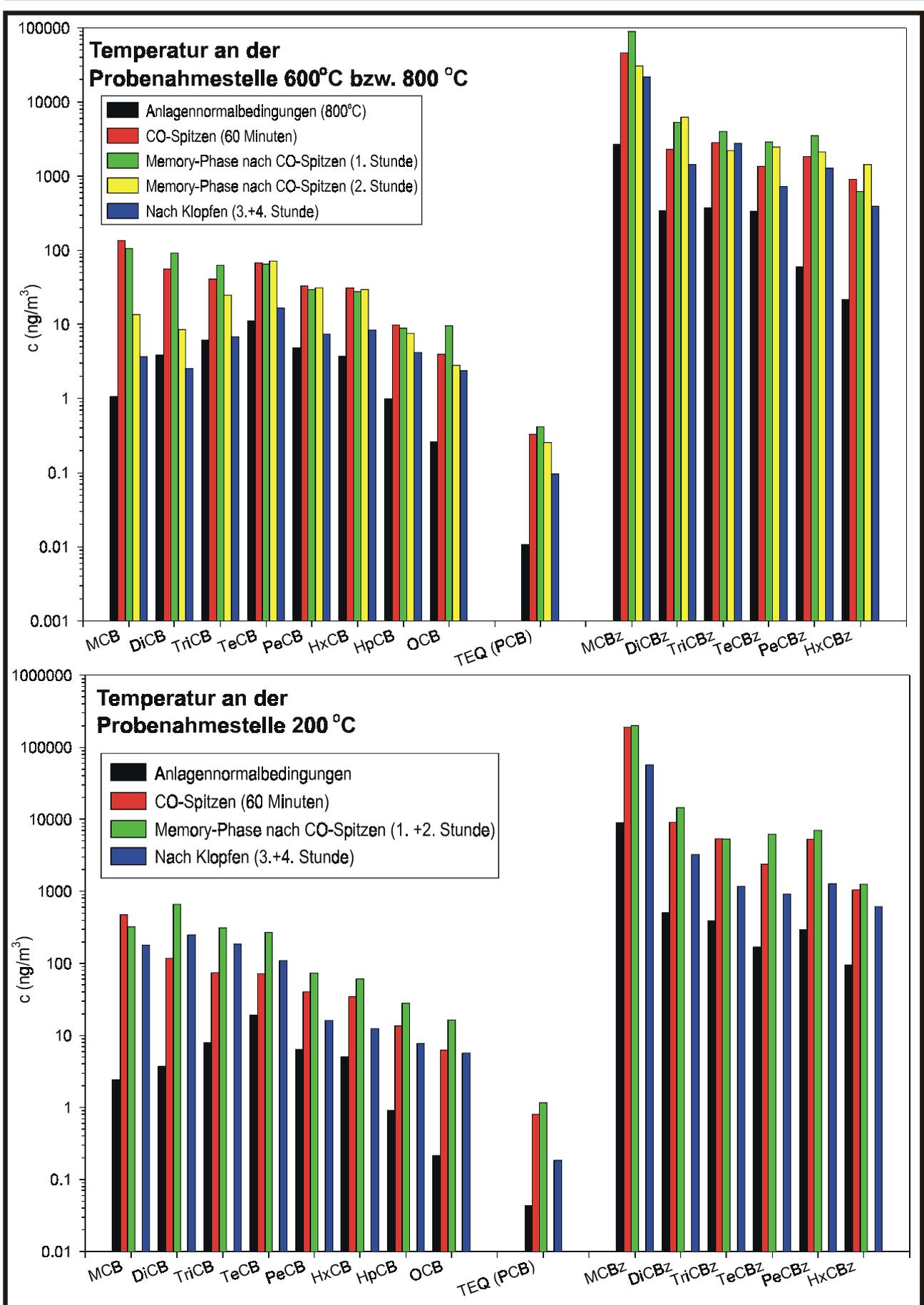


Abbildung 4.4-12: Homologenprofile der Chloraromaten im Rohgas der MVA bei 600°C und 200°C vor, während und nach provozierten CO-Spitzen

Im Gegensatz zu den Ergebnissen an der PVA (Kapitel 4.4.1 PVA) und in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen an der SMVA (Kapitel 4.4.2 SMVA) zeigen an der MVA (Abbildung 4.4-12) unabhängig vom Chlorierungsgrad die Konzentrationen aller PCDD/F-Homologen während und nach den CO-Spitzen im Vergleich zu Anlagennormalbedingungen erhöhte Konzentrationen.

Für die in der Abbildung 4.4-12 dargestellten Homologenprofile der PCDD/F an der MVA erkennt man deutlich, daß die Einfluß der provozierten CO-Spitzen eine Musterverschiebung zu den niedrig chlorierten PCDD/F-Homologen hin stattfindet. Ein „Kippen“ der PCDD/F-Homologenmuster zu den niedrig chlorierten Homologen hin, wie dies an der PVA beobachtet wurde, trat weder an der MVA noch an der SMVA auf. Da diese Musterverschiebung für die PCDD/F-Homologen auch innerhalb der Hochtemperaturzone (600°C bzw. 800°C) auftritt, kann davon ausgegangen werden, daß die für die Bildung der niedrig chlorierten Homologen vermutlich verantwortlichen Kohlenstoffoberflächen (Abbildung 4.4-4) bereits bei diesen Temperaturen gebildet werden. Wie in den Kapiteln 4.3, 4.4.1 und 4.4.2 diskutiert, zeigen die PCDF unter gestörten Betriebsbedingungen im Vergleich zu den PCDD höhere Nachbildungsraten als unter Normalbedingungen, wovon besonders die niedrig chlorierten PCDF-Homologen betroffen sind.

Im Verlauf der *Memory*-Phasen sinken die Konzentrationen der niedrig chlorierten PCDD/F-Homologen an der MVA ab (Abbildung 4.4-12) und es kommt zu einem Anstieg der höher chlorierten PCDD/F-Homologen. Ein ähnliches Verhalten der PCDD/F-Homologen unter instationären Verbrennungsbedingungen wurde vor kurzem in der Literatur beschrieben (290). Aufgrund der Nachbildung der höher chlorierten und damit toxischen Kongeneren erhöht sich die Toxizität der PCDD/F im Rauchgas.

Auch nach dem Klopfen sind die Konzentrationen der Homologen der PCDD/F, PCB und PCBz noch deutlich erhöht, so daß der beobachtete *Memory*-Effekt wahrscheinlich noch länger andauert. Wie schon für die PAK diskutiert, fehlt somit der eindeutige Beweis, ob die mechanische Kesselreinigung den *Memory*-Effekt beeinflusst oder nicht.

Während und nach den CO-Spitzen sind die Homologenprofile der PCB an der MVA deutlich zu den niedrig chlorierten Homologen hin verschoben (Abbildung 4.4-12). Dieses Ergebnis steht im Einklang mit den Ergebnissen an der SMVA (Kapitel 4.4.2 SMVA, Abbildung 4.4-6).

In der Abbildung 4.4-12 ist aus den Konzentrationsverläufen für alle PCBz-Homologen ein *Memory*-Effekt ablesbar. Die Homologenmuster der PCBz an der MVA zeigen während und nach instationären Betriebsbedingungen ein ähnliches Verhalten wie die PCBz-Homologenprofile an der SMVA. Die PCBz-Homologenmuster an der MVA sind nicht wie die PCDD/F-Homologenmuster zu den niedrig chlorierten Homologen hin verschoben. Die während der *Memory*-Phase an der MVA gebildeten Mengen an niedrig chlorierten PCBz reichen vermutlich nicht wie im Falle der PCDD/F dafür aus, die unter Normalbedingungen im Rauchgas vorhandenen hohen Konzentrationen an niedrig chlorierten PCBz um Größenordnungen zu erhöhen.

Wie bereits für die *Memory*-Effekte an der SMVA diskutiert, könnten sich die von der 17. BImSchV geforderten hohen Temperaturen für die Nachbrennzone der MVA (850°C für 2 s) bei auftretenden instationären Betriebsbedingungen verstärkend auf die beobachteten *Memory*-Effekte auswirken. Es besteht die Möglichkeit, daß unter instationären Betriebsbedingungen in verstärktem Maße kohlenstoffhaltige Ablagerungen in der Nachbrennzone gebildet werden und dadurch die beobachteten *Memory*-Phasen an der Anlage verursacht werden. In der Literatur finden sich ebenfalls Hinweise, daß hohe Temperaturen in der Nachbrennzone zu einer höheren CO-Konzentration führen und es dadurch auch zu einer verstärkten Aromaten- und Chloraromatenbildung kommen kann (291), (157), (300).

4.4.4 Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, daß aufgrund von provozierten CO-Spitzen, welche in der Regel bei Anlagenumstellungen, wie z.B. Änderung der Luftstufung im Feuerraum, entstehen, im Bereich von mehreren Stunden liegende, erhöhte Konzentrationen der Aromaten und Chloraromaten im Rauchgas der Anlagen auftreten können. Zudem wurden während dieser *Memory*-Phasen deutliche Musterverschiebungen der untersuchten Substanzklassen in Abhängigkeit von Brennstoff und Anlagentyp beobachtet. Neben den konventionellen Messungen der PAK an der PVA und MVA liegen Ergebnisse aus REMPI-TOFMS Messungen vor, welche gut mit den konventionellen Analysendaten übereinstimmen.

Die *Memory*-Effekte werden auf die während der instationären Verbrennungsbedingungen vermutlich auf den Anlageinnenwänden gebildeten kohlenstoffhaltigen Ablagerungen zurückgeführt. So kann sich der in den Anlagen unter Sauerstoffmangel gebildete Ruß (z.B. bei CO-Spitzen) auf den heißen Anlagewänden in der Nachverbrennungszone niederschlagen und wird durch die dort vorherrschenden hohen Temperaturen stabilisiert. Dieser Prozeß ist ähnlich der *chemical vapor deposition (CVD)*, welche unter bestimmten Voraussetzungen zur Bildung von thermisch hochstabilen *pyrocarbon* führen kann (104). Diese in der Nachbrennzone der Anlagen gebildeten und abgelagerten kohlenstoffhaltigen Oberflächen können bei ihrem langsamen oxidativen Abbau sowohl als Kohlenstoffquelle der untersuchten Fremdstoffe (PAK) als auch als katalytische Oberfläche für eine Chlorierungsreaktion der Chloraromaten (PCDD/F) dienen. Diese duale Wirkung von z.B. durch Kupfer aktivierte Kohlenstoffoberflächen in Verbrennungsprozessen ist bereits seit langem in der Literatur bekannt und wurde durch Laborexperimente bestätigt (47), (288).

Die Prozesse des beobachteten *Memory*-Effekts lassen sich für die **PAK** in zwei Phasen gliedern. In der ersten Phase erfolgt eine direkte Bildung der PAK aus der Gasphase. Während dieser Phase treten vor allem die kleineren Aromaten, z.B. Benzol und Naphthalin, in hohen Konzentrationen im Rauchgas auf. Wahrscheinlich werden diese kleinen Aromaten aus den für die Bildung von PAK typischen aromatischen Vorläuferverbindungen, z.B. Phenylacetylen, das mit Hilfe von REMPI-TOFMS nachgewiesen werden konnte, gebildet (107), (106), (238). Die hohen

Konzentrationen der einkernigen Aromaten führen vermutlich zu kohlenstoffhaltigen Ablagerungen auf den Anlageinnenwänden, welche wahrscheinlich für die zweite Phase des *Memory*-Effektes von großer Bedeutung sind.

In der zweiten Phase der Aromatenbildung nach den CO-Spitzen sinken die Konzentrationen der einkernigen Aromaten wieder auf das Niveau unter Normalbedingungen ab. Im Gegensatz dazu steigen die Konzentrationen der PAK mit mehr als drei Benzolringen an und bleiben über einige Stunden hinweg deutlich erhöht, diese Phase stellt die sog. *Memory*-Phase dar. In dieser Phase werden wahrscheinlich die in der ersten Phase in der Nachbrennzone der Anlagen gebildeten kohlenstoffhaltigen Ablagerungen oxidativ abgebaut (siehe Abbildung 4.4-4). Ein ähnlicher *Memory*-Effekt bei der Aromatenbildung wurde in einer Studie über Pilotanlagen zur Sondermüllverbrennung beobachtet. Dabei wurde gefunden, daß nach instationären Verbrennungsbedingungen die PAK-Konzentrationen stark ansteigen und erst nach circa 10 bis 50 Minuten auf das Konzentrationsniveau unter Anlagennormalbedingungen sinken (156), (294), (157), (295), (290).

Während sich die *Memory*-Effekte der **PAK** an allen untersuchten Anlagen ähnlich darstellen, lassen sich für die **Chloraromaten** in Abhängigkeit des Anlagentyps deutliche Unterschiede erkennen. So zeigten die PCB, PCPh und PCB an der PVA keinen oder nur einen wenig ausgeprägten *Memory*-Effekt. Im Gegensatz dazu weisen an der PVA die niedrig chlorierten Homologen der PCDD/F während und eine Stunde nach instationären Verbrennungsbedingungen einen Konzentrationsanstieg um Größenordnungen auf.

An allen Anlagen ist für den Konzentrationsanstieg der niedrig chlorierten PCDD/F vermutlich die katalytische Aktivität der während der instationären Betriebsbedingungen gebildeten kohlenstoffhaltigen Ablagerungen verantwortlich (Abbildung 4.4-4). Durch ihre Aktivität könnten die in hohen Konzentrationen im Rauchgas gefundenen unchlorierten Grundgerüste der Chloraromaten, z.B. Benzol oder Dibenzofuran, chloriert werden. Diese Reaktion führt an der PVA zu einem „Kippen“ der Homologenmuster, so daß die ein- bis dreifach chlorierten PCDD/F-Homologen die höchsten Konzentrationen im Homologenmuster zeigen. Die Funktion des unverbrannten Kohlenstoffs bei der Bildung der Chloraromaten als Katalysator für Chlorierungsreaktionen und als Kohlenstoffquelle bei der *de-novo* Synthese ist seit langem bekannt (47), (82). Vermutlich sind die zwischen der PVA und SMVA/MVA beobachteten Unterschiede bei der PCDD/F-Bildung in den *Memory*-Phasen sowohl auf die pyrolytischen Prozessbedingungen als auch auf den niedrigen Chlorgehalt des Brennstoffs (Holz) zurückzuführen. Im Vergleich mit der PVA werden an der MVA und SMVA *Memory*-Effekte für alle Chloraromaten gefunden, wobei diese am deutlichsten für die niedrig chlorierten PCDD/F ausfallen.

Im Vergleich zur PVA zeigt sich der *Memory*-Effekt für die niedrig chlorierten Homologen der PCDD/F an der SMVA und MVA vor allem in einer verstärkten Bildung während der CO-Spitzen.

In der *Memory*-Phase nach den CO-Spitzen fallen die Konzentrationen der niedrig chlorierten PCDD/F-Homologen an der SMVA und MVA, wohingegen die Konzentrationen der hoch chlorierten PCDD/F-Homologen weiter ansteigen. Ein sehr ähnliches Verhalten der PCDD/F-Homologenmuster während und nach induzierten CO-Spitzen wurde in der neusten Literatur beschrieben (290). Erstmals konnten in dieser Studie im Temperaturbereich zwischen 600°C bis 700°C über 100 h stabile kohlenstoffhaltige Ablagerungen mit einem hohen Kupfergehalt auf den Anlageinnenwänden nachgewiesen werden. Dennoch sind, um den Chemismus und die tieferen Gesetzmäßigkeiten der während der *Memory*-Phasen ablaufenden Prozesse näher zu verstehen, weitere Experimente unter chemisch kontrollierten Versuchsbedingungen im Labormaßstab nötig.

Eine weitere wichtige Erkenntnis für die Rauchgasüberwachung an großtechnischen Feuerungsanlagen ist, daß die Werte der konventionellen Gasanalytik (z.B. CO-Konzentration) keinen verlässlichen Hinweis auf die in den *Memory*-Phasen auftretenden hohen Konzentrationen an Spurenschadstoffen im Rauchgas geben. Somit sind zeitlich aufgelöste Messungen der Spurenschadstoffe (z.B. PAK) im Rauchgas von Müllverbrennungsanlagen z.B. mit REMPI-TOFMS nötig, um die oben beschriebenen *Memory*-Effekte zu erkennen und ggf. entsprechende Primärmaßnahmen einleiten zu können.

4.5. Holzverbrennung als Quelle chloraromatischer Verbindungen

Wie unter 1. Einleitung bereits erwähnt, stellt die Verbrennung von Biomasse eine mögliche Quelle für den Eintrag chloraromatischer Verbindungen in die Umwelt dar (16), (17), (18), (19). Dem UNEP-Bericht zufolge hatte die thermische Biomassenverwertung 1998 einen prozentualen Anteil von circa 6% an der Gesamtemission der PCDD/F in Deutschland (einschließlich industrieller Quellen), wobei die Datenlage aufgrund der Quellsituation (hohe Anzahl von kleinen Quellen, wie z.B. Hausbrände) als äußerst schwierig angesehen wird (11). Zudem unterliegt die Verbrennung von Holz und Holzabfällen nicht der 17. BImSchV sondern der 4. BImSchV, in welcher keine Abgasgrenzwerte für den I-TEQ Wert der PCDD/F angegeben sind.

Als limitierender Faktor für die Bildung von Chloraromaten bei der Holzverbrennung wird der geringe Chlorgehalt des Holzes angesehen (244). Eine Erhöhung des im Hausmüll vorgefundenen durchschnittlichen Chlorgehaltes von circa 1 Gew% auf mehr als 2 Gew% führte nicht zu einer Steigerung der Chloraromatenbildung (129). Die Chlorgehalte von Holz liegen typischerweise im unteren ppm-Bereich (243). Bei Zugabe eines chlorhaltigen Brennstoffes (z.B. Stroh) steigen die Konzentrationen der Chloraromaten im Rauchgas bei Holzverbrennungsanlagen um eine Größenordnung an (244). Einen weiteren wichtigen Aspekt für die niedrigen Bildungsraten von Chloraromaten bei der Holzverbrennung stellen die niedrigen Kupfergehalte der Flugaschen aus Holzverbrennungsprozessen dar. Liegt die Konzentration von Kupfer, welches als der wichtigste Katalysator bei der Bildung von Chloraromaten angesehen wird (vgl. Kapitel 2.4.3.2), in den Flugaschen aus der SMVA und MVA im Bereich von 5-10g/kg (eigene Daten), so fanden sich für die Flugasche aus der HVA Konzentrationen von 0.2-0.5g/kg (301). Diese im Vergleich zu den Kupferkonzentrationen in den Flugaschen der (S)MVA um mehr als eine Größenordnung niedrigeren Kupferkonzentrationen bedeuten eine katalytische Aktivität der Flugasche der HVA für die Chloraromatenbildung (73).

Diese Unterschiede im Bildungsverhalten der Chloraromaten zwischen der Müll- und Holzverbrennung werden auch an Leitbeziehungen zwischen MCBz und dem I-TEQ der PCDD/F deutlich (Abbildung 4.1-16). Die Leitbeziehungen an der MVA und der SMVA sind sehr ähnlich, wohingegen die Regressionsgerade für die HVA einen steileren Verlauf zeigt. Wenn es also zu einer erhöhten Chlorbenzolbildung an der HVA kommt, steigt der I-TEQ Wert der PCDD/F stärker als an der SMVA und MVA an.

Aus der guten Übereinstimmung der Kongenerenverteilungen der Chloraromaten bei der Holz- und Müllverbrennung lassen sich vom Anlagentyp und Brennstoff unabhängige Bildungsmechanismen dieser Verbindungen vermuten (vgl. Kapitel 4.3.2, Abbildung 4.3-9 bis 4.3-12).

An der HVA wurden folgende Brennstoffe bzw. Brennstoffgemische auf dem Vorschubrost verbrannt: 1. Holz (naturbelassenes Holz, meist Kiefer); 2. MDF (**M**edium **D**ensity **F**ibreboard = Preßspanplattenreste); 3. Altholz (mit Kresolen und chlorierten Phenolen behandelte Bahnschwellen) und 4. Holzkohle. In der Legende der Abbildung 4.5-1 geben die Zahlen in

Klammern die prozentualen Gewichtsanteile der Einzelbrennstoffe an der Gesamtmasse wieder. In der Abbildung 4.5-1 ist der Einfluß des Brennstoffes auf die PCDD/F-Homologenmuster und auf die Verhältnisse der PCDD/F-Homologensummen an der HVA dargestellt.

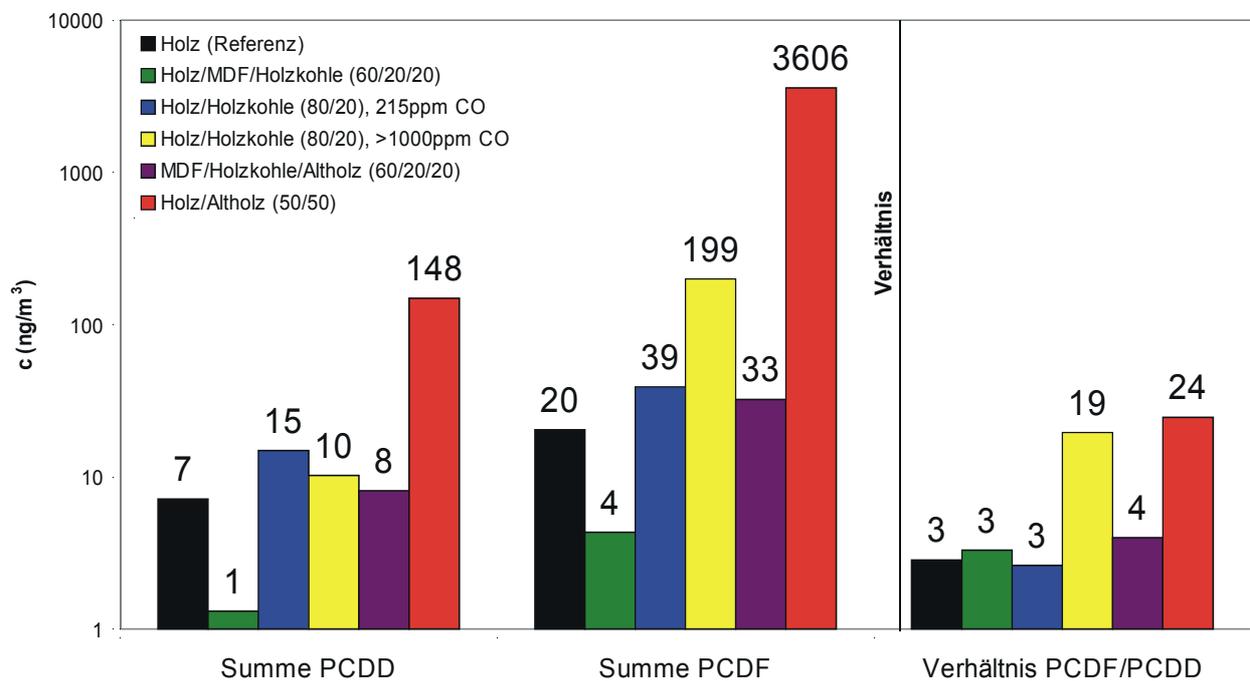
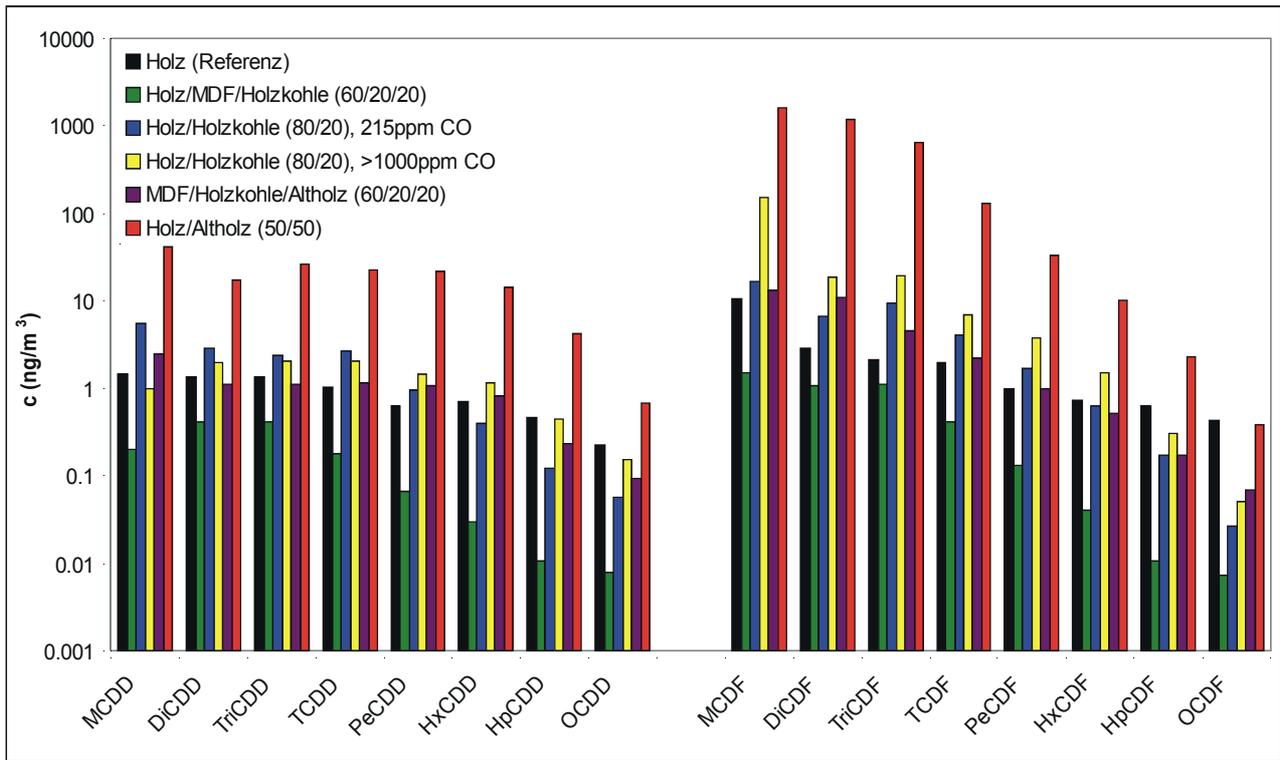


Abbildung 4.5-1: PCDD/F-Homologenmuster und Verhältnisse der PCDD/F-Homologensummen in Abhängigkeit der Brennstoffmischungen an der HVA

In Abbildung 4.5-1 erkennt man, daß an der HVA die Brennstoffmischungen und die Verbrennungsbedingungen (CO-Konzentration) eine Auswirkung auf die

PCDD/F-Gesamtkonzentration und das Verhältnis der PCDD/F Homologensummen haben. Das Konzentrationsverhältnis der PCDF-Homologensumme zu der PCDD-Homologensumme lag an der MVA und SMVA bei 200°C im Rohgas zwischen 11 und 20. Nur bei höheren CO-Konzentrationen wie sie bei der Verbrennung der Brennstoffmischungen Holz/Holzkohle (80/20) (CO-Durchschnittskonzentration > 1000ppm) und Holz/Altholz (50/50) (CO-Durchschnittskonzentration >7000ppm) auftraten, erreichen die Konzentrationsverhältnisse zwischen PCDF und PCDD an der HVA Werte wie an der SMVA und MVA. Der Unterschied zwischen den PCDD/PCDF-Konzentrationsverhältnissen an der HVA und (S)MVA ist wahrscheinlich auf den Brennstoff Holz zurückzuführen. Ein thermisches Zerkleinern der phenolischen Grundstruktur des Holzes könnte zu höheren Chlorphenolkonzentrationen und damit aufgrund der im Kapitel 4.3.2.2 diskutierten Phenolkondensation bei der PCDD-Bildung zu höheren PCDD-Konzentrationen im Rauchgas der HVA führen.

Neben dem Brennstoff haben die Verbrennungsbedingungen einen großen Einfluß auf die Bildung der Chloraromaten, wie dies das Beispiel der Wiederholungsmessung Holz/Holzkohle (80/20) in der Abbildung 4.5-1 deutlich zeigt. So konnte während der Wiederholungsmessung aufgrund des niedrigen Heizwertes der Holzkohle die Brennraumtemperatur nicht konstant gehalten werden, weshalb die CO-Durchschnittskonzentration im Probenahmezeitraum höher als 1000ppm war. Für die Interpretation der hohen PCDD/F-Konzentrationen bei der Messung mit der Brennstoffmischung aus Holz/Altholz (50/50) ist es wichtig zu wissen, daß auch hier eine CO-Durchschnittskonzentration von mehr als 3000 ppm auftrat (Abbildung 4.5-1). Das Altholz weist einen sehr hohen Heizwert auf. Als Folge davon war das Brennbett sehr inhomogen, da das Altholz im Vergleich zum feuchteren Holz viel schneller abbrannte. Deshalb dürfen die bei der Verbrennung der Brennstoffmischung aus Holz/Altholz (50/50) gefundenen hohen PCDD/F-Konzentrationen nicht nur auf die chemische Imprägnierung des Altholzes zurückgeführt werden, sondern sind das Ergebnis eines schlechten Ausbrandes. Bei der Verbrennung des Brennstoffgemisches bestehend aus MDF/Holzkohle/Altholz (60/20/20) liegen die PCDD/F-Konzentrationen im Bereich der Referenzprobe (reines Holz), was deutlich macht, daß die durch das Altholz der Verbrennung zugeführten Schadstoffe (z.B. Kresole, chlorierte Phenole) zu keiner höheren PCDD/F-Konzentration im Abgas der HVA führten. Durch die hohen Brennbett- (bis zu 1400°C) und Brennraumtemperaturen (bis zu 1600°C) bei der Verbrennung von Holz und Holzabfällen kam es in der HVA wahrscheinlich zu einer vollständigen thermischen Zerstörung der auf dem Altholz befindlichen Schadstoffe.

Durch den Einsatz von MDF im Brennstoff sollte geklärt werden, ob der Stickstoffgehalt des MDF von fünf Gewichtsprozent zu einer Reduzierung der PCDD/F-Konzentrationen im Rauchgas beitragen kann. In der Literatur finden sich Hinweise, daß der Einsatz von Harnstoff und anderen stickstoff- und/oder schwefelhaltigen Komponenten im Brennstoff aufgrund ihrer die Kupferkatalyse bei der Chloraromatenbildung inhibierenden Eigenschaften eine Reduzierung der PCDD/F-Konzentrationen im Rauchgas zur Folge haben kann (vgl. Kapitel 2.4.3.2; (74), (141),

(142), (143), (144)). Für die Brennstoffmischung von Holz/MDF/Holzkohle (60/20/20) finden sich die niedrigsten PCDD/F-Konzentrationen im Rauchgas der HVA. Auch in der Brennstoffmischung mit MDF und Altholz liegt der Wert für die PCDD/F-Konzentration nahe der Referenzprobe mit 100% Holz, obwohl kontaminiertes Holz mitverbrannt wurde. Die hier vorgestellten Ergebnisse könnten ein Hinweis darauf sein, daß eine Reduzierung von PCDD/F-Emissionen an großtechnischen Anlagen durch den Zusatz von anorganischen Stickstoff- und Schwefelverbindungen zum Brennstoff möglich ist (143), (144). Dennoch wird ein Einsatz von Inhibitoren, der hohe Mehrkosten verursacht, nur dann von Nutzen sein, wenn entsprechend gute Verbrennungsbedingungen an der Anlage vorausgesetzt werden können.

In der Abbildung 4.5-2 sind die I-TEQ Werte der PCDD/F für die jeweilige Brennstoffmischung dargestellt, um zu klären, ob die Veränderungen der PCDD/F-Homologenmuster in Abbildung 4.5-1 auch eine Auswirkung auf die I-TEQ Werte der PCDD/F zeigen.

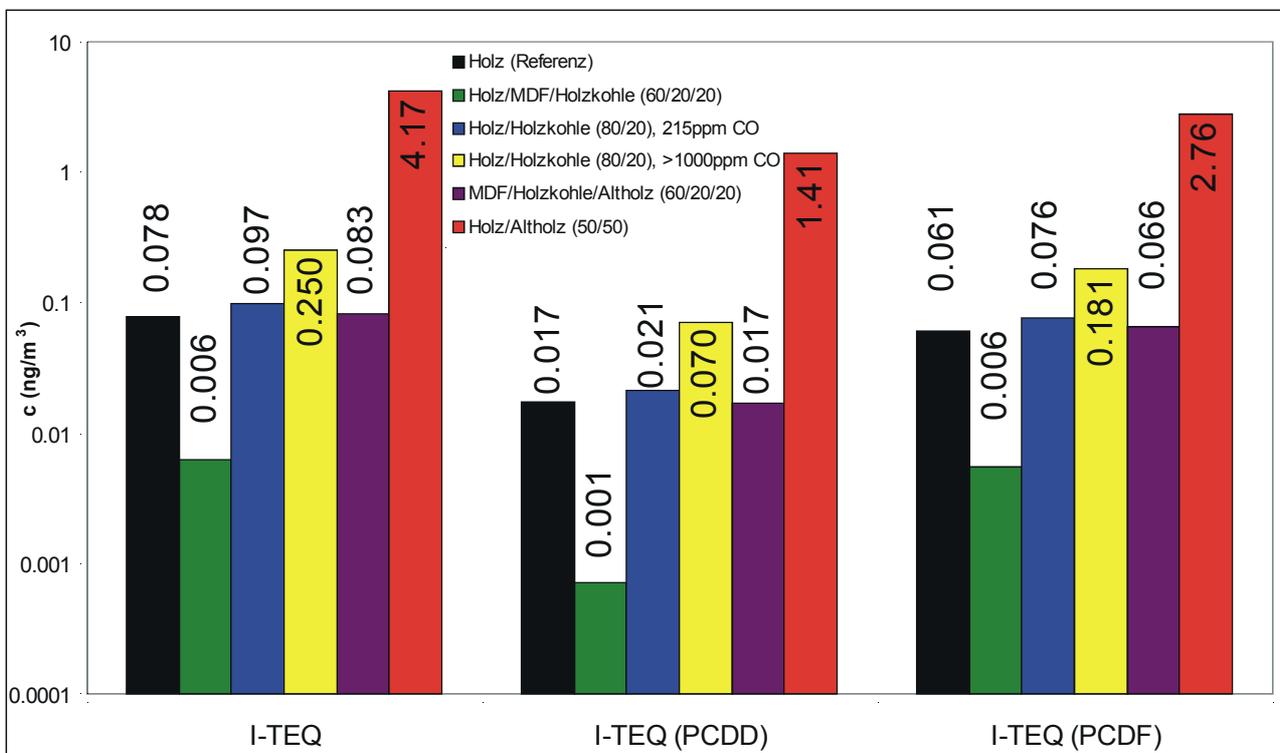


Abbildung 4.5-2: I-TEQ Werte der PCDD/F in Abhängigkeit der Brennstoffmischungen an der HVA

Die Brennstoffmischungen, welche die höchsten I-TEQ Werte in der Abbildung 4.5-2 aufweisen, entsprechen den Brennstoffmischungen mit der höchsten PCDD/F-Konzentration in Abbildung 4.5-1 (Holz/Holzkohle (80/20) >1000ppm; Holz/Altholz (50/50)). In diesen Versuchen sind in größerem Umfang CO-Spitzen im Rauchgas aufgetreten, welche im wesentlichen für die Erhöhung der PCDD/F-Konzentrationen und damit auch des I-TEQ Wertes verantwortlich sind. Obwohl sich das PCDF/PCDD-Verhältnis in diesen Versuchen gemäß Abbildung 4.5-1 zu den PCDF hin verschiebt, sinkt deren Anteil am I-TEQ Wert der PCDD/F um die Hälfte ab. Unter

normalen Betriebsbedingungen an der HVA beträgt der Anteil des I-TEQ Wertes der PCDF am I-TEQ Wert der PCDD/F circa 70% und entspricht damit dem an den übrigen Anlagen unter normalen Verbrennungsbedingungen gefundenen Wert ebenso wie dem Literaturwert (201), (215). Durch die Gewichtung der 17 toxischen PCDD/F-Kongeneren mit den Toxizitätsfaktoren und durch die höheren PCDD-Konzentrationen unter instationären Verbrennungsbedingungen an der HVA erhöht sich der Anteil der Toxizität der PCDD am gesamten I-TEQ Wert der PCDD/F in der Abbildung 4.5-2 für die Brennstoffmischung aus Holz/Altholz (50/50).

Durch die instationären Verbrennungsbedingungen bei zwei der untersuchten Fälle wurden auch die Homologenmuster der übrigen Chloraromaten PCB, PCBz und PCPh beeinflusst, wie dies die Abbildung 4.5-3 zeigt.

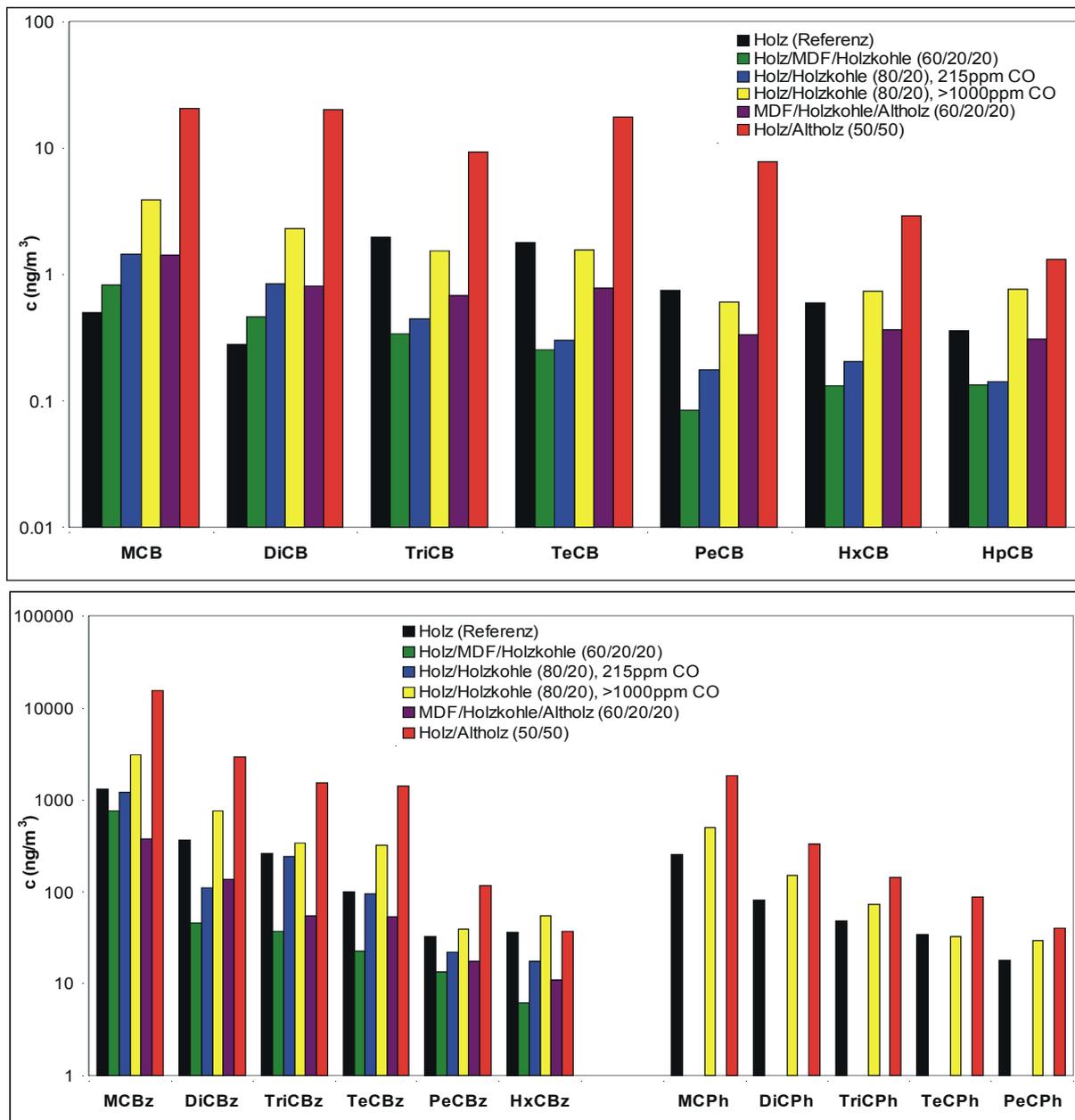


Abbildung 4.5-3: PCB, PCBz und PCPh Homologenmuster in Abhängigkeit der Brennstoffmischungen an der HVA

In der Abbildung 4.5-3 zeigt sich für die PCB-Homologenmuster, daß die niedrig chlorierten Homologen mit Ausnahme der Referenzmessung die höchsten Konzentrationen im Muster aufweisen. Die an der HVA gefundenen PCB-Homologenprofile sind damit den Homologenprofilen an der PVA sehr ähnlich (Abbildung 4.4-1). Dieses Ergebnis könnte in Bezug auf die beobachteten Unterschiede zwischen den *Memory*-Effekten an der PVA und (S)MVA darauf hinweisen, daß der Brennstoff neben den Anlagenbedingungen einen großen Einfluß auf das Verhältnis der gebildeten Chloraromaten hat (vgl. Kapitel 4.4.1 und 4.4.2).

Im Gegensatz dazu zeigt das Homologenprofil der PCBz in der Abbildung 4.5-3 keine oder nur eine sehr schwach ausgeprägte Abhängigkeit von der Brennstoffmischung. Die Konzentrationsänderungen der einzelnen Homologen folgen im wesentlichen den Änderungen der PCDD/F-Homologenkonzentrationen. Dieses Ergebnis zeigt wiederum, daß PCBz im allgemeinen als Surrogatverbindungen zur Vorhersage der PCDD/F-Konzentration herangezogen werden können (vgl. Kapitel 4.1).

Darüber hinaus zeigt die Abbildung 4.5-3, daß der Einsatz von mit chlorierten Phenolen behandeltem Altholz als Brennstoff zu keiner Erhöhung der emittierten Chlorphenolmengen führt. Dies läßt, wie oben bereits diskutiert, den Schluß zu, daß bei der gemessenen Brennraumtemperatur von mehr als 1400°C wahrscheinlich alle im Brenngut enthaltenen chlorierten Phenole zu 100% thermisch zerstört wurden (124). Nur während gestörter Verbrennungsbedingungen finden sich erhöhte PCPh-Konzentrationen im Abgas der HVA.

Um zu zeigen, welchen Einfluß die Gewichtung einzelner Kongenerer für die TEQ Werte der PCB bzw. I-TEQ Werte der PCDD/F hat, sind in der Abbildung 4.5-4 der TEQ der PCB (nach Safe) und die Verhältnisse der (I-)TEQ Werte ((PCDD/F)/(PCB)) und der Homologensummen ((PCDD/F)/(PCB)) dargestellt.

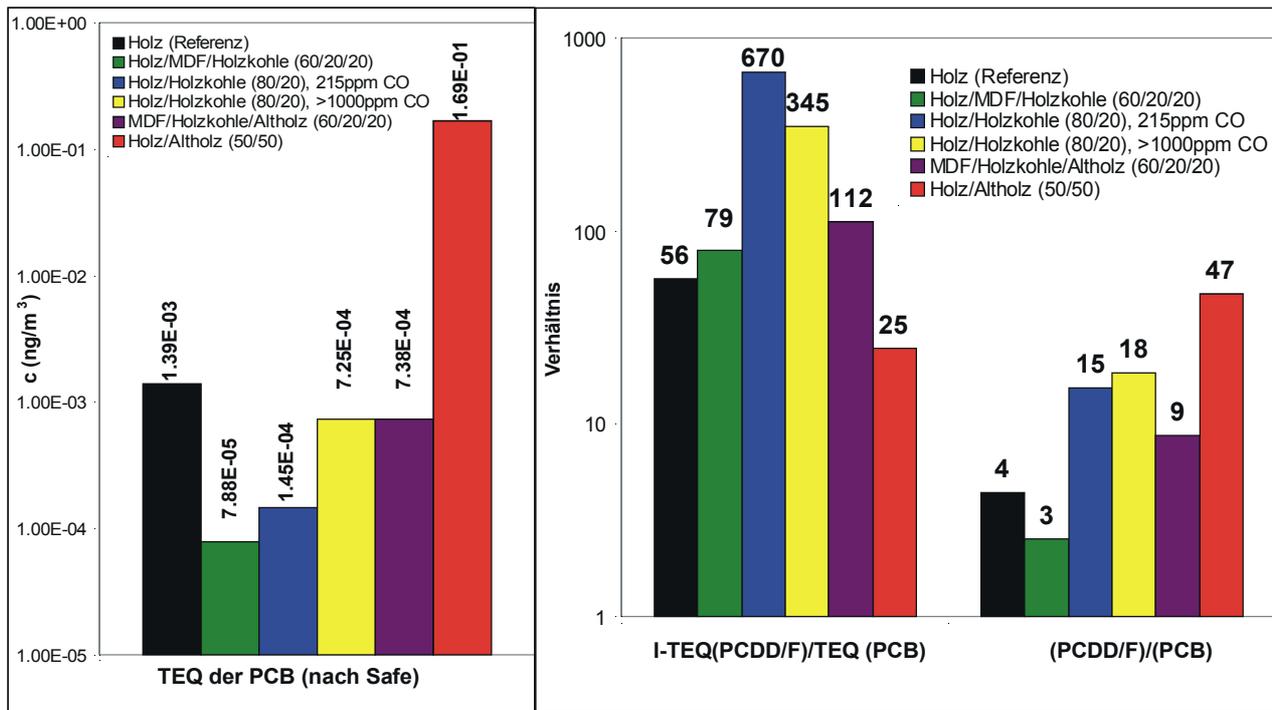


Abbildung 4.5-4: TEQ Werte der PCB (nach Safe) und Konzentrationsverhältnisse der ((I)-TEQ Werte und Homologensummen der PCDD/F und PCB in Abhängigkeit von den Brennstoffmischungen an der HVA

Aus der Abbildung 4.5-4 geht hervor, daß die Konzentrationen der PCDD/F die der PCB übersteigen. Im Gegensatz dazu liegen die PCB Homologenkonzentrationen an der SMVA und MVA um den Faktor 4 über jenen der PCDD/F. Durch dieses Ergebnis wird klar, daß die Verhältnisse der Chloraromaten von vielen Parametern, wie z.B. Brennstoff und Temperatur, beeinflusst werden.

Das Verhältnis zwischen dem I-TEQ Wert der PCDD/F und dem TEQ Wert der PCB in Abbildung 4.5-4 zeigt an der HVA ähnliche Werte wie an der SMVA und MVA (vgl. Abbildung 4.1-5). An der PVA übersteigt der TEQ Wert der PCB den I-TEQ Wert der PCDD/F um das 16fache. Dieses Ergebnis unterstreicht ein weiteres Mal den Sonderfall der an der PVA beobachteten Chloraromatenbildung, die im wesentlichen mit den pyrolytischen Prozeßbedingungen in Zusammenhang stehen könnte.

Die in Abbildung 4.5-4 gezeigten hohen Werte (>100) für das Verhältnis zwischen dem I-TEQ der PCDD/F und dem TEQ der PCB sind z.T. auf die unterschiedliche Gewichtung der toxischen Kongeneren zurückzuführen. Für die Brennstoffmischung aus Holz/Altholz (50/50) steigt die absolute Konzentration der PCDD/F im Verhältnis stärker an als die der PCB, dennoch sinkt das Verhältnis zwischen dem I-TEQ Wert der PCDD/F und dem TEQ der PCB durch die unterschiedliche Gewichtung einzelner Kongenerer mit den Toxizitätsäquivalenten ab.

5. AUSBLICK

Die in der Arbeit gefundenen Korrelationen zwischen dem I-TEQ Wert der PCDD/F und einer Reihe niedrig chlorierter Aromaten eröffnen die Möglichkeit für den Einsatz einfacher Analysensysteme zur indirekten Überwachung des I-TEQ Wertes der PCDD/F an großtechnischen Feuerungsanlagen. Um die allgemeine Gültigkeit dieses Ansatzes für verschiedenartige thermische Prozesse zu zeigen, ist es jedoch notwendig, noch weitere Untersuchungen über die statistischen Beziehungen der Chloraromaten und Chloraliphaten an großtechnischen Feuerungsanlagen durchzuführen. So wurden im Rahmen dieser Arbeit eine Reihe chlorierter Aliphaten, z.B. Hexachlorbutadien und Tetrachlorethylen, im Rauchgas der SMVA detektiert. Diese Verbindungen könnten ebenfalls Surrogate für die PCDD/F-Konzentration im Rauchgas darstellen.

Das On-line-Monitoring mit REMPI-TOFMS kann in Zukunft, wie dies bereits in der vorliegenden Arbeit gezeigt wurde, verstärkt zur Aufklärung der Bildungsprozesse von aromatischen Verbindungen in Verbrennungsprozessen verwendet werden. Durch den Einsatz von *on-line* Methoden können Hinweise über die Qualität des Verbrennungsprozesses gewonnen und aufgrund dieser Informationen gezielt Primärmaßnahmen zur Reduzierung der Schadstoffbildung an großtechnischen Feuerungsanlagen eingeleitet werden.

Die Erkenntnisse über die statistischen Beziehungen der Chloraromaten können für ein Off-line-Monitoring der für den I-TEQ Wert der PCDD/F identifizierten Surrogate herangezogen werden. Diese *off-line* Systeme haben im Vergleich zu REMPI-TOFMS den Vorteil einer einfacheren Bedienbarkeit, so daß sie vor allem für einen längerfristigen Anlageneinsatz denkbar wären. Erste Versuche, solche Systeme, bestehend aus einer Anreicherungseinheit und einer selektiven chemischen Ionisation (z.B. *APCI = Atmospheric Pressure Chemical Ionisation*), an großtechnischen Anlagen zu betreiben, zeigten vielversprechende Ergebnisse (204). Ebenso wäre es denkbar, mit einem relativ einfachen Analysenaufbau, bestehend aus einer Anreicherungseinheit, einem Prozeßgaschromatographen und einem Ion-Trap-System, eine relativ schnelle (5-10 Minuten) *off-line* Rauchgasanalytik durchzuführen. Ein solches System ist bisher noch nicht an großtechnischen Verbrennungsanlagen zur Überwachung von Surrogatverbindungen aufgebaut worden, findet aber in anderen großtechnischen Prozessen aufgrund seiner Robustheit bereits Verwendung.

Um die postulierten Bildungswege der Chloraromaten und das chemische Verhalten der auf den Anlageinnenwänden während instationärer Verbrennungsbedingungen gebildeten kohlenstoffhaltigen Ablagerungen besser zu verstehen, sind sowohl weitere Untersuchungen an großtechnischen Anlagen als auch eine Reihe von Laborexperimenten notwendig. Dabei sollten die Probenahmen an den großtechnischen Verbrennungsanlagen die in dieser Arbeit gewonnenen

Hinweise auf das unterschiedliche Bildungsverhalten der Chloraromaten in den verschiedenen Temperaturbereichen statistisch absichern.

Für die Aufklärung der postulierten Bildungswege der Chloraromaten, der Hochtemperaturbildung der in der Arbeit untersuchten Verbindungen und der *Memory*-Effekte würde sich eine Reihe von Laborexperimenten anbieten. Diese Experimente sollten sich allerdings nicht, wie oftmals in der Literatur beschrieben, auf einen halbstündigen thermischen Umsatz von Flugaschen beschränken, sondern vielmehr durch zeitlich und chemisch definierte Randbedingungen zur Aufklärung der hier vorgeschlagenen Bildungswege beitragen. Es wäre sinnvoll, wenn sich die in diesen Experimenten gewählten Reaktionsbedingungen sehr stark an den in dieser Arbeit an großtechnischen Feuerungsanlagen gefundenen Prozeßbedingungen orientieren würden.

Für die Aufklärung der *Memory*-Effekte ist es nötig, die dafür verantwortlichen Kohlenstoffmodifikationen aus dem Hochtemperaturbereich der Anlagen in Laborversuchen durch den Einsatz von ^{13}C -markiertem Kohlenstoff chemisch näher zu charakterisieren. Darüber hinaus sollten auch Analysen bezüglich der elementarchemischen Zusammensetzung der Ablagerungen erfolgen, um die für die katalytische Aktivität verantwortliche Metallspezies zu identifizieren.

Zusammenfassend läßt sich festhalten, daß die in der Arbeit gefundenen Ergebnisse zur Entwicklung eines indirekten Überwachungsverfahrens für den I-TEQ Wert der PCDD/F an großtechnischen Verbrennungsanlagen mit verschiedenen *on-line* Analysetechniken beitragen könnten. In Zukunft sollten eine Reihe ausgewählter Laborexperimente sowohl die in dieser Arbeit vorgestellten Bildungsmechanismen der Chloraromaten während der *Memory*-Phasen als auch die postulierten Bildungswege zwischen den einzelnen Chloraromaten weiter aufklären.

6. LITERATUR

1. Thomé-Kozmiensky, K. J., *Thermische Abfallbehandlung*. 1994, Berlin: EF Verlag für Energie- und Umwelttechnik.
2. Affüpper, M., J. Püchel und J. Sachse, *Restabfallentsorgung-Konzepte und Tendenzen*. Abfallwirtschafts-Journal, 1998. **7/8**: 9-13.
3. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn. *Bericht der Bundesregierung zur TA Siedlungsabfall*. 1996, **2**: 74-75.
4. Lenoir, D. und S. Leichsenring, *Konzepte und Methoden des Umweltschutzes. Das Beispiel der Dioxine*. Chemie in unserer Zeit, 1996. **30**: 182-191.
5. Olie, K., P. L. Vermeulen und O. Hutzinger, *Chlorodibenzo-p-dioxins and chlorodibenzofurans are trace components of fly ash and flue gas of some municipal incinerators in the Netherlands*. Chemosphere, 1977. **6**: 455-459.
6. Lenoir, D. und H. Sandermann, *Entstehung und Wirkung von Dioxinen*. Biologie in unserer Zeit, 1993. **6**: 363-369.
7. Hulpke, H., R. Koch und R. Wagner, *Römpf Lexikon Umwelt*. 1993, Stuttgart: Thieme Verlag.
8. Ballschmiter, K. und R. Bacher, *Dioxine: Chemie, Analytik, Vorkommen, Umweltverhalten und Toxikologie der halogenierten Dibenzo-p-dioxine und Dibenzofurane*. 1996, Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft mbH.
9. Bundesgesetzblatt. *Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes: Verordnung über Verbrennungsanlagen für Abfälle und ähnliche brennbare Stoffe*.
10. Leichsenring, S., D. Lenoir, A. Kettrup und G. Mützenich, *Maßnahmen zur Dioxinminderung an Müllverbrennungsanlagen*. Umweltwissenschaften und Schadstoffforschung, 1996. **8**: 197-206.
11. Fiedler, H., *Dioxin and furan inventories: National and regional emission of PCDD/PCDF*. 1999, Genf, United Nations Environment Programme (UNEP Chemicals).

12. Weizsäcker, E. U. v., A. B. Lovins und L. H. Lovins, *Faktor Vier. Doppelter Wohlstand, halbiertes Naturverbrauch. Der neue Bericht an den Club of Rome*. 1995, München: Droemer Knaur.
13. Zimmermann, R., Dissertation, *Anwendung isomerenselektiver Lasermassenspektrometrie (LAMS) in der Analytik: Entwicklung einer Gaschromatographie-LAMS Kopplung sowie spektroskopische Untersuchungen zur on-line Emissionsüberwachung technischer Verbrennungsanlagen*. Fakultät für Landwirtschaft und Gartenbau, 1995, München: Technische Universität München.
14. Heger, H. J., Dissertation, *On-line Spurenanalytik aromatischer Verbindungen aus komplexen Proben: Entwicklung und Feldanwendung eines Lasermassenspektrometers für Untersuchungen am Rauchgas von Abfallverbrennungsanlagen*. Fakultät für Chemie, Biologie und Geowissenschaften, 1999, München: Technische Universität München.
15. Marutzky, R., *Moderne Feuerungstechnik zur energetischen Verwertung von Holz und Holzabfällen: Emissionsminderung, Konzepte und ausgeführte Anlagen*. 1997, Heidelberg: Springer VDI Verlag.
16. Schattowitz, B., G. Brandt, F. Gafner, E. Schlumpf, R. Bühler, P. Hasler und T. Nussbaumer, *Dioxin emissions from wood combustion*. Chemosphere, 1994. **29**: 2005-2013.
17. Kolenda, J., H. Gass, M. Wilken, J. Jager und B. Zeschmar-Lahl, *Determination and reduction of PCDD/F emissions from wood burning facilities*. Chemosphere, 1994. **29**: 1927-1938.
18. Wunderli, S., M. Zennegg, I. S. Doležal, E. Gujer, U. Moser, M. Wolfensberger, P. Hasler, D. Noger, C. Studer und G. Karlaganis, *Determination of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzo-furans in solid residues from wood combustion by HRGC/HRMS*. Chemosphere, 2000. **40**: 641-649.
19. Samaras, P., G. Skordas, G. P. Sakellariopoulos, M. Blumenstock, K.-W. Schramm und A. Kettrup, *Toxic emissions during co-combustion of biomass-waste wood-lignite blends in an industrial boiler*. Chemosphere, 2001. **43**: 751-755.
20. Jay, K. und L. Stieglitz, *Identification and quantification of volatile organic compounds in emissions of waste incineration plants*. Chemosphere, 1995. **30**: 1249-1260.

21. Ballschmiter, K. und M. Zell, *Analysis of polychlorinated biphenyls (PCB) by glass capillary gas chromatography*. Fresenius Journal of Analytical Chemistry, 1980. **302**: 20-31.
22. EPA, Method 8310 - *Determination of the concentration of certain polynuclear aromatic hydrocarbons (PAH) in ground water and wastes*, 1986: 1-13.
23. Heger, H. J., R. Zimmermann, R. Dorfner, M. Beckmann, H. Griebel, A. Kettrup und U. Boesl, *On-line Emission Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons down to pptv Concentration Levels in the Flue Gas of an Incineration Pilot Plant with a Mobile Resonance-Enhanced Multiphoton Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometer*. Analytical Chemistry, 1999. **71**: 46-57.
24. Kutz, F. W., D. P. Barnes, H. Bottimore, E. W. Greim und E. W. Bretthausen, *The international toxicity equivalenz factor (I-TEF) method of risk assessment for complex mixtures of dioxins and related compounds*. Chemosphere, 1990. **20**: 751-757.
25. Grimmer, G., H. Brune, G. Dettbarn, J. Jacob, J. Misfeld, U. Mohr, K.-W. Naujack, J. Timm und R. Wenzel-Hartung, *Relevance of polycyclic aromatic hydrocarbons as environmental carcinogens*. Fresenius Journal of Analytical Chemistry, 1991. **339**: 792-795.
26. NATO/CCMS, *International toxicity equivalency factor (I-TEF) method of risk assessment for complex mixtures of dioxins and related compounds. Pilot study on instrumental information exchange on dioxins and related compounds*. 1988.
27. WHO, *WHO (World Health Organization) Experts Re-evaluate Health Risks from Dioxins*. 1998.
28. Safe, S., *Risk assessment of PCDDs and PCDFs based on in vitro and in vivo bioassays*. Chemosphere, 1989. **19**: 609-613.
29. Safe, S., *Polychlorinated biphenyls (PCBs), dibenzo-p-dioxins (PCDDs), dibenzofurans (PCDFs) and related compounds: Environmental and mechanistic considerations which support the development of toxic equivalency factors (TEF)*. Critical Reviews in Toxicology, 1990. **21**: 51-88.
30. Neubert, D., *Reflection on the assessment of the toxicity of dioxin for humans, using data from experimental and epidemiological studies*. Teratogenesis, Cancerogenesis and Mutagenesis, 1997. **17**: 157-215.

31. Rippen, G., *Handbuch Umweltchemikalien: Stoffdaten, Prüf- und Nachweisverfahren, Vorschriften und Richtlinien*. 1987, Landsberg: Ecomed.
32. Schlatter, C. *Fakten zur allgemeinen Toxikologie und zur Kanzerogenität von 2,3,7,8-TCDD als Grundlage einer Risikoermittlung*, in *Schriftenreihe Chemie+Fortschritt 1*, 1985, Frankfurt: Verband der Chemischen Industrie e.V.
33. WHO, *Polynuclear aromatic compounds, part 1, chemical, environmental and experimental data*. 1983, Lyon.
34. WHO, *Selected non-heterocyclic polycyclic aromatic hydrocarbons*. 1998, Geneva.
35. Kaiser, G., T. Wiedmann und K. Ballschmiter, *Organische Spurenstoffe als Emissionen aus Verbrennungsanlagen und deren humantoxikologische und ökotoxikologische Einordnung, Teil 1: Organische Emissionen*. 1998, Stuttgart, Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg.
36. Kaiser, G., T. Wiedmann und K. Ballschmiter, *Organische Spurenstoffe als Emissionen aus Verbrennungsanlagen und deren humantoxikologische und ökotoxikologische Einordnung, Teil 2: Humantoxikologische und ökotoxikologische Einordnung*. 1998, Stuttgart, Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg.
37. MacKay, D., W. Y. Shiu und K. C. Ma, *Illustrated handbook of physical-chemical properties and environmental fate for organic chemicals. Vol. 1 Monoaromatic hydrocarbons, chlorobenzenes and polychlorinated biphenyls. Vol. 2 Polynuclear aromatic hydrocarbons, polychlorinated dioxins and dibenzofurans*. 1992, New York: Lewis Publisher.
38. Xie, T. M. und D. Dyrssen, *Simultaneous determination of partition coefficients and acidic constants of chlorinated phenols and guajacols by gas chromatography*. *Analytica Chimica Acta*, 1984. **160**: 21-30.
39. Weast, R. C., *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 1983, Boca Raton: CRC Press.
40. Unsworth, J. F. und H. Dorans, *Thermodynamic data for dioxins from molecular modelling computations-Prediction of equilibrium isomer composition*. *Chemosphere*, 1993. **27**: 351-358.

41. Zimmermann, R., C. Weickhardt, U. Boesl und E. W. Schlag, *Influence of chlorine substituent positions on the torsional potentials of dichlorinated biphenyls: R2PI-spectra of the first singlet transition*. Journal of Molecular Structure, 1994. **327**: 81-97.
42. Shaub, W. M., *Procedure for estimating the heats of formation of aromatic compounds. Chlorinated benzenes, phenols and dioxins*. Thermochimica Acta, 1981. **58**: 11-44.
43. Bozzelli, J. W., Y. G. Wu und E. R. Ritter, *Thermodynamic insights on pathways to formation of chlorinated dioxins and dibenzofurans*. Chemosphere, 1991. **23**: 1221-1232.
44. Thompson, D., *Thermodynamic consideration in dibenzodioxin and dibenzofuran formation: Concentration of chlorinated dioxins and furans in model fuel-rich combustion gases*. Chemosphere, 1994. **29**: 2545-2554.
45. Huang, C.-L., B. K. Harrison, J. Madura und J. Dolfing, *Gibbs free energy of formation of PCDDs. Evaluation of estimation methods and application for predicting dehalogenation pathways*. Environmental Toxicology Chemistry, 1996. **15**: 824-836.
46. Zimmermann, R., *REMPI-Spectroscopy of dibenzo-p-dioxin and its chlorinated isomers: Implication for analytical applications of the REMPI-TOFMS technique*. Organohalogen Compounds, 2001. **54**: 374-379.
47. Luijck, R., D. M. Akkerman, P. Slot, K. Olie und F. Kapteijn, *Mechanism of formation of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in the catalyzed combustion of carbon*. Environmental Science and Technology, 1994. **28**: 312-321.
48. Schwarz, G., Dissertation, *Bildung und Verhalten von organischen Spurenstoffen auf Flugaschen der Müllverbrennung*. Forschungszentrum Karlsruhe-Institut für Technische Chemie, 1991, Heidelberg: Naturwissenschaftliche-Mathematische Gesamtfakultät der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg.
49. Hagenmaier, H., M. Kraft, W. Jäger, U. Mayer, K. Lütze und D. Siegel, *Comparison of various sampling methods for PCDDs and PCDFs in stack gas*. Chemosphere, 1986. **15**: 1187-1192.
50. Schramm, K.-W., D. Lenoir und O. Hutzinger, *Fugacity calculations of vapor-flyash partition of polyhalogenated dioxins and furans*. Chemosphere, 1990. **20**: 563-568.

51. Mätzing, H., W. Baumann, B. Becker, K. Jay, H.-R. Paur und H. Seifert, *Adsorption of PCDD/F on MWI fly ash*. Chemosphere, 2001. **42**: 803-809.
52. Bidleman, T. F., W. N. Billings und W. T. Foreman, *Vapor-particle partitioning of semivolatile compounds: Estimates from field collections*. Environmental Science and Technology, 1986. **20**: 1038-1043.
53. Junge, C. E., *Basic considerations about trace constituents in the atmosphere as related to the fate of global pollutants*. 1977, New York: Wiley.
54. Smolka, A., K.-G. Schmidt und B. Neukirchen, *Gas/particle partitioning of PCDD/F in the flue gas of waste incineration plants*. Organohalogen Compounds, 1995. **23**: 481-485.
55. Sheffield, A. E. und J. F. Pankow, *Specific surface area of urban atmospheric particulate matter in portland, Oregon*. Environmental Science and Technology, 1994. **28**: 1759-1766.
56. Rordorf, B. F., *Prediction of vapor pressures, boiling points and enthalpiess of fusion for twenty-nine halogenated dibenzo-p-dioxins and fifty-five dibenzofurans by a vapor pressure correlation method*. Chemosphere, 1989. **18**: 783-788.
57. VDI, 3499, Blatt 1-3, *Messen von Emissionen - Messen von polychlorierten Dibenzo-p-dioxinen (PCDD) und Dibenzofuranen (PCDF) - Verdünnungsmethode; Ausführungsbeispiel zur DIN EN 1948 im Konzentrationsbereich 0.1 ng I-TEQ/m³ und Ergänzung zur DIN EN 1948.*, 2001.
58. Choudry, G. und O. Hutzinger, *Mechanistic aspects of the thermal formation of halogenated organic compounds including polychlorinated dibenzo-p-dioxins*. 1983, New York: Gordon and Breach science publishers.
59. Shaub, W. M. und W. Tsang, *Dioxin formation in incinerators*. Environmental Science and Technology, 1983. **17**: 721-730.
60. Altwicker, E. R., *Some laboratory experimental designs for obtaining dynamic property data on dioxins*. Science of the Total Environment, 1991. **104**: 47-72.
61. Taylor, P. H., D. A. Tirey und B. Dellinger, *A detailed model of the high-temperature pyrolysis of tetrchloroethene*. Combustion and Flame, 1996. **106**: 1-10.

62. Mulholland, J. A., A. F. Sarofim, P. Sosothikul, P. A. Monchamp, E. F. Plummer und A. L. Lafleur, *Formation of perchloroaromatics during trichlorethylene pyrolysis*. Combustion and Flame, 1992. **89**: 103-115.
63. Sidhu, S., L. Maqsd, B. Dellinger und G. Mascolo, *The homogeneous, gas-phase formation of chlorinated and brominated dibenzo-p-dioxin from 2,4,6-trichloro- and 2,4,6-tribromophenols*. Combustion and Flame, 1995. **100**: 11-20.
64. Tuppurainen, K., I. Halonen, J. Tarhanen und J. Ruuskanen, *Chlorinated phenoxy radicals and phenolate anions as precursors of polychlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDDs) and dibenzofurans (PCDFs) in municipal waste incineration: a semi-empirical AM1 molecular orbital study*. Journal of Molecular Structure, 1994. **312**: 139-144.
65. Louw, R., H.-H. Grotheer, M. J. Kanters und I. Wiater, *Gas-phase pathways to "dioxins" from halogenated phenols*. Organohalogen Compounds., 1996. **27**: 26-29.
66. Wiater, I. und R. Louw, *Reactions of diphenyl ether with chlorine and bromine atoms around 750 K - Relevance for gas-phase "dioxin" formation*. European Journal of Organic Chemistry, 1999. **5**: 261-265.
67. Wiater, I., J. G. P. Born und R. Louw, *Products, rates and mechanism of the gas-phase condensation of phenoxy radicals between 500-840K*. European Journal of Organic Chemistry, 2000. **17**: 921-928.
68. Eklund, G., J. Pedersen und B. Strömberg, *Methane, hydrogen chloride and oxygen form a wide range of chlorinated organic species in the temperature range 400 °C and 900°C*. Chemosphere, 1988. **17**: 575-589.
69. Pedersen, J., B. Källmann, M. Simonson und J. O. Olsson, *The chlorinating species in turbulent flame combustion of methane with hydrogen present*. Chemosphere, 1991. **22**: 67-76.
70. Tsang, W., *Mechanisms for the formation and destruction of chlorinated organic products of incomplete combustion*. Combustion Science and Technology, 1990. **74**: 99116.
71. Karasek, F. W. und L. C. Dickson, *Model studies of polychlorinated dibenzo-p-dioxin formation during municipal refuse incineration*. Science, 1987. **237**: 754-756.

72. Stieglitz, L., H. Vogg, G. Zwick, J. Beck und H. Bautz, *On formation conditions of organohalogen compounds from particulate carbon of fly ash*. Chemosphere, 1991. **23**: 1255-1264.
73. Gullett, B. K., K. R. Bruce, L. O. Beach und A. M. Drago, *Mechanistic steps in the production of PCDD and PCDF during waste combustion*. Chemosphere, 1992. **25**: 1387-1392.
74. Lippert, T., A. Wokaun und D. Lenoir, *Surface reactions of brominated arenes as a model for the formation of chlorinated dibenzodioxines and -furans in incineration. Inhibition by ethanolamine*. Environmental Science and Technology, 1991. **25**: 1485-1489.
75. Froese, K., Dissertation, *Pathways in the formation of chlorinated aromatic compounds through heterogeneous combustion reactions of C₂-Hydrocarbons*. Fakultät für Biologie, Chemie und Geowissenschaften, 1994, Bayreuth.
76. Wehrmeier, A., Dissertation, *Thermische Bildungswege von polychlorierten Dibenzo-p-dioxinen und Dibenzofuranen aus Vorläuferverbindungen*. Fakultät für Landwirtschaft und Gartenbau, 1999, München: Technische Universität München.
77. Froese, K. und O. Hutzinger, *Polychlorinated benzene, phenol, dibenzo-p-dioxin and dibenzofuran in heterogeneous combustion reactions of acetylene*. Environmental Science and Technology, 1996. **30**: 998-1008.
78. Froese, K. und O. Hutzinger, *Polychlorinated benzene and polychlorinated phenol in heterogenous combustion reactions of ethylene and ethane*. Environmental Science and Technology, 1996. **30**: 1009-1013.
79. Strömberg, B., *Low temperature formation and minimization of chlorinated hydrocarbons*. Chemosphere, 1991. **23**: 1515-1525.
80. Altwicker, E. R., *Formation of PCDD/F in municipal solid waste incinerators. Laboratory and modeling studies*. Journal of Hazardous Waste Materials, 1995. **47**: 137-161.
81. Wehrmeier, A., D. Lenoir, K.-W. Schramm, R. Zimmermann, K. Hahn, B. Henkelmann und A. Kettrup, *Patterns of isomers of chlorinated dibenzo-p-dioxins as tool for elucidation of thermal formation mechanisms*. Chemosphere, 1998. **36**: 2775-2801.

82. Vogg, H. und L. Stieglitz, *Thermal behaviour of PCDD/PCDF in fly ash from municipal waste incinerators*. Chemosphere, 1986. **15**: 1373-1378.
83. Hagenmaier, H., M. Kraft, H. Brunner und R. Haag, *Catalytic effects of fly ash from waste incineration facilities on the formation and decomposition of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and polychlorinated dibenzofurans*. Environmental Science and Technology, 1987. **21**: 1080-1084.
84. Stieglitz, L., G. Zwick, J. Beck, W. Roth und L. Vogg, *On the de-novo synthesis of PCDD/PCDF on fly ash of municipal waste incinerators*. Chemosphere, 1989. **18**: 1219-1226.
85. Wikström, E., A. Touati, M. Telfer und B. K. Gullet, *The role of HCl, Cl₂ and Cl radicals in the fast, in-flight formation of PCDDs and PCDFs*. Organohalogen Compounds, 2000. **46**: 264-267.
86. Jay, K. und L. Stieglitz, *On the mechanism of formation of polychlorinated aromatic compounds with copper(II) chloride*. Chemosphere, 1991. **22**: 987-995.
87. Stieglitz, L., H. Bautz, W. Roth und G. Zwick, *Investigation of precursor reactions in the de novo synthesis of PCDD/F on fly ash*. Chemosphere, 1997. **34**: 1083-1090.
88. Altwicker, E. R. und M. S. Milligan, *Formation of dioxins: Competing rates between chemically similar precursors and de novo reactions*. Chemosphere, 1993. **27**: 301-307.
89. Dickson, L. C., D. Lenoir und O. Hutzinger, *Quantitative comparison of de novo and precursor formation of polychlorinated dibenzo-p-dioxins under simulated municipal waste incineration conditions*. Environmental Science and Technology, 1992. **16**: 1822-1828.
90. Huang, H. und A. Buekens, *Some problems in evaluation of PCDD/F formation from aromatic compound condensation and solid carbon degradation pathways under municipal incinerator conditions*. Organohalogen Compounds, 1998. **36**: 135-138.
91. Iino, F., T. Imagawa, M. Takeuchi und M. Sadakata, *De Novo Synthesis Mechanism of Polychlorinated Dibenzofurans from Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and the Characteristic Isomers of Polychlorinated Naphthalenes*. Environmental Science and Technology, 1999. **33**: 1038-1043.

-
92. Wilhelm, J., L. Stieglitz, E. Dinjus und R. Will, *Mechanistic studies on the role of PAHs and related compounds in PCDD/F formation on model fly ashes*. Chemosphere, 2001. **42**: 797-802.
93. Buser, H. R. und C. Rappe, *Formation of polychlorinated dibenzofurans (PCDFs) from the pyrolysis of individual PCB isomers*. Chemosphere, 1979. **3**: 157-174.
94. Wilhelm, J., Dissertation, *Mechanistische Untersuchungen zum Einfluss intra- und intermolekularer Sauerstoffübertragungsreaktionen sowie zu strukturell bedingten Bildungstendenzen bei der De-novo-Synthese von PCDD und PCDF*. Forschungszentrum Karlsruhe - Institut für Technische Chemie, 2000, Heidelberg: Naturwissenschaftlich-Mathematische Gesamtfakultät der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg.
95. Huang, C.-L. und A. Buekens, *On the mechanisms of dioxin formation in combustion processes*. Chemosphere, 1995. **31**: 4099-4117.
96. Luijck, R., K. Dorland, P. Smit und H. A. J. Govers, *The halogenation of dibenzo-p-dioxin and dibenzofurans in a model fly ash system*. Organohalogen Compounds, 1992. **8**: 273-276.
97. Addink, R., M. Antonioli, K. Olie und H. A. J. Govers, *Reactions of dibenzofuran and 1,2,3,4,7,8-hexachlorodibenzo-p-dioxin on municipal waste incinerator fly ash*. Environmental Science and Technology, 1996. **30**: 833-836.
98. Born, J. G. P., Dissertation, *On the formation of dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in combustion process*. Faculty of natural science, 1992, Leiden: University of Leiden.
99. Iino, F., T. Imagawa und B. K. Gullett, *Dechlorination-controlled polychlorinated dibenzofuran isomer patterns from municipal waste incinerators*. Environmental Science and Technology, 2000. **34**: 3143-3147.
100. Milligan, M. S. und E. R. Altwicker, *The relationship between de novo synthesis of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans and low-temperature gasification in fly ash*. Environmental Science and Technology, 1993. **27**: 1959-1601.
101. Milligan, M. S. und E. R. Altwicker, *The catalytic gasification of carbon in incinerator fly ash*. Carbon, 1991. **11**: 977-986.

-
102. Collina, E., M. Lasagni, M. Tettamanti und D. Pitea, *Kinetics of MSWI fly ash thermal degradation. 2. Mechanism of native carbon gasification*. Environmental Science and Technology, 2000. **34**: 137-142.
103. Lasagni, M., E. Collina, M. Tettamanti und D. Pitea, *Kinetics of MSWI fly ash thermal degradation. 1. Empirical rate equation for native carbon gasification*. Chemosphere, 2000. **34**: 130-136.
104. Brüggert, M., Z. Hu und K. J. Hüttinger, *Chemistry and kinetics of chemical vapour deposition of pyrocarbon: VI. Influence of temperature using methane as carbon source*. Carbon, 1999. **37**: 2021-2030.
105. Stieglitz, L., J. Eichenberger, G. Schleihauf, G. Zwick und R. Will, *The oxidative degradation of carbon and its role in the de novo synthesis of organohalogen compounds in fly ash*. Chemosphere, 1993. **27**: 343-350.
106. Richter, H. und J. B. Howard, *Formation of polycyclic hydrocarbons and their growth to soot-a review of chemical reaction pathways*. Progress in Energy and Combustion Science, 2000. **26**: 565-608.
107. Bockhorn, H., *Soot Formation in Combustion*. 1994, Berlin: Springer-Verlag.
108. Westmoreland, P. R., A. M. Dean, J. B. Howard und J. P. Longwell, *Forming Benzene in Flames by Chemically Activated Isomerization*. Journal of Physical Chemistry, 1989. **93**: 8171-8180.
109. Marinov, N. M., W. J. Pitz, C. K. Westbrook, M. J. Castaldi und M. S. Senkan, *Modeling of aromatic and polycyclic aromatic hydrocarbon formation in premixed methane and ethane flames*. Combustion Science and Technology, 1996. **116/117**: 211-228.
110. Wang, H. und M. Frenklach, *A detailed kinetic modeling study of aromatics formation in laminar premixed acetylene and ethylene flames*. Combustion and Flame, 1997. **110**: 173-221.
111. Frenklach, M. und H. Wang, *Detailed modeling of soot particle nucleation and growth*. 1990, Twenty-third Symposium (International) on Combustion, Pittsburgh, The Combustion Institute.

-
112. Palmer, H. B. und C. F. Cullis, *The formation of carbon from gases*. 1965, New York: Marcel Dekker.
113. Mingming, L. und J. A. Mulholland, *Aromatic hydrocarbon growth from indene*. *Chemosphere*, 2001. **42**: 625-633.
114. Stieglitz, L. und H. Vogg, *On formation conditions of PCDD/PCDF in fly ash from municipal waste incinerators*. *Chemosphere*, 1987. **16**: 1917-1922.
115. Wikström, E. und S. Marklund, *Secondary formation of chlorinated dibenzo-p-dioxins, dibenzofurans, biphenyls, benzenes, and phenols during MSW combustion*. *Environmental Science and Technology*, 2000. **34**: 604-609.
116. Ballschmiter, K., P. Kirschmer und W. Zoller, *Experiments in high-temperature chemistry of organohalogenes*. *Chemosphere*, 1986. **15**: 1369-1371.
117. Altwicker, E. R., R. K. N. V. Konduri, C. Lin und M. S. Milligan, *Rapid formation of polychlorinated dioxins/furans in the post combustion region during heterogeneous combustion*. *Chemosphere*, 1992. **25**: 1935-1944.
118. Ghorishi, B. S. und E. R. Altwicker, *Formation of polychlorinated dioxins, furans, benzenes and phenols in the post-combustion region of a heterogeneous combustor: Effect of bed material and post-combustion temperature*. *Environmental Science and Technology*, 1995. **29**: 1156-1162.
119. Ghorishi, S. B. und E. R. Altwicker, *Rapid high temperature formation of polychlorinated dioxins and furans in the bed region of a heterogeneous spouted bed combustor: Development of a surface mediated model for the formation of dioxins*. *Hazardous Waste & Hazardous Materials*, 1996. **13**: 11-22.
120. Blumenstock, M., R. Zimmermann, K.-W. Schramm, B. Henkelmann und A. Kettrup, *Presence of polychlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDD), dibenzofurans (PCDF), biphenyls (PCB), chlorinated benzenes (PCBz) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) under various combustion conditions in a post combustion chamber*. *Organohalogen Compounds*, 1998. **36**: 59-63.
121. Wikström, E., M. Tyksland und S. Marklund, *Influence of variation in combustion conditions on the primary formation of chlorinated organic micropollutants during municipal solid waste combustion*. *Environmental Science and Technology*, 1999. **33**: 4263-4269.

122. Blumenstock, M., R. Zimmermann, K.-W. Schramm und A. Kettrup, *Influence of combustion conditions on the PCDD/F-, PCB-, PCBz- and PAH-concentrations in the post-combustion chamber of a waste incineration pilot plant*. Chemosphere, 2000. **40**: 987-993.
123. Luthhardt, P., J. Schulte und H.-J. Hemminghaus, *Dioxin/Furan-`Verbrennungsprofile`aus Hochtemperaturprozessen; Teil III: Ein Beweis für den monomechanistischen Verlauf? `ThermoStat-Synthese` statt `De-novo` für die `dirty17`*. Umweltwissenschaften und Schadstoffforschung, 2001. **13**: 95-101.
124. Hagenmaier, H., H. Brunner, R. Haag und M. Kraft. *Die Bedeutung katalytischer Effekte bei der Bildung und Zerstörung von Polychlorierten Dibenzodioxinen und Dibenzofuranen*. VDI-Bericht 634, 1987: VDI-Verlag.
125. Fängmark, I., B. Strömberg, N. Berge und C. Rappe, *Influence of postcombustion temperature profiles on the formation of PCDDs, PCDFs, PCBz, and PCBs in a pilot incinerator*. Environmental Science and Technology, 1994. **28**: 624-629.
126. Gullett, B. K., K. R. Bruce und L. O. Beach, *The effect of metal catalysts on the formation of polychlorinated dibenzo-p-dioxin and polychlorinated dibenzofuran precursors*. Chemosphere, 1990. **20**: 1945-1952.
127. Weber, P., E. Dinjus und L. Stieglitz, *The role of copper(II)chloride in the formation of organic chlorine in fly ash*. Chemosphere, 2001. **42**: 579-582.
128. Matilla, H., T. Virtanen, T. Vartiainen und J. Ruuskanen, *Emissions of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in flue gas from co-combustion of mixed plastic with coal and bark*. Chemosphere, 1992. **25**: 1599-1609.
129. Wikström, E., G. Löfvenius, C. Rappe und S. Marklund, *Influence of level and form of chlorine on the formation of chlorinated dioxins, dibenzofurans, and benzenes during combustion of an artificial fuel in a laboratory reactor*. Environmental Science and Technology, 1996. **30**: 1637-1644.
130. Lenoir, D., A. Kaune, O. Hutzinger, G. Mutzenich und K. Horch, *Influence of operating parameters and fuel type on PCDD/PCDF emissions from a fluidized bed incinerator*. Chemosphere, 1991. **23**: 1491-1500.

-
131. Kaimann, B., M. Kluwe, H. Meier zu Köcker und K. E. Lorber, *Correlation between CO- and PIC-emissions*. Chemosphere, 1992. **25**: 1403-1407.
132. Hodges, N. J. und R. D. Gareth, *The fate of chlorine, sulfur, sodium, potassium, calcium and magnesium during fluidized bed combustion of coal*. Fuel, 1989. **68**: 440-445.
133. Griffin, R. D., *A new theory of dioxin formation in municipal solid waste combustion*. Chemosphere, 1986. **15**: 1987-1990.
134. Gullett, B. K., K. R. Bruce und L. O. Beach, *Formation of chlorinated organics during solid waste combustion*. Waste Management & Research, 1990. **8**: 203-214.
135. Procaccini, C., J. W. Bozzelli, J. P. Longwell, K. A. Smith und A. F. Sarofim, *Presence of chlorine radicals and formation of molecular chlorine in the post-flame region of chlorocarbon combustion*. Environmental Science and Technology, 2000. **34**: 4656-4570.
136. Gullett, B. K., E. R. Altwicker und A. Touati, *Rate and carbon source for in-flight PCDD and PCDF formation*. Organohalogen Compounds, 2000. **46**: 102-105.
137. Taylor, P. H., S. Sidhu, S. Rubey, B. Dellinger, A. Wehrmeier, D. Lenoir und K.-W. Schramm, *Evidence for a unified pathway of dioxin formation from aliphatic hydrocarbons*. 1998, 27th International Symposium of Combustion.
138. Frenklach, M., *Production of polycyclic aromatic hydrocarbons in chlorine containing environments*. Combustion Science and Technology, 1990. **74**: 283-296.
139. Huang, J. und S. M. Senkan. *Polycyclic aromatic hydrocarbon and soot formation in premixed flames of CH₃Cl/CH₄ and CH₄*, in *26th Symposium (International) on Combustion*, 1996, Pittsburgh: The Combustion Institute.
140. Takeshi, H., I. Takashi und T. Masao, *Formation of PCDD/Fs in artificial solid waste incineration in a laboratory-scale fluidized-bed reactor: influence of contents and forms of chlorine source in high-temperature combustion*. Environmental Science and Technology, 2000. **34**: 3920-3924.
141. Raghunathan, K. und B. K. Gullett, *Role of sulfur in reducing PCDD and PCDF formation*. Environmental Science and Technology, 1996. **30**: 1827-1834.

-
142. Addink, R., R. H. W. Paulus und K. Olie, *Prevention of polychlorinated dibenzo-p-dioxins/dibenzofurans formation on municipal waste incinerator fly ash using nitrogen and sulfur compounds*. Environmental Science and Technology, 1996. **7**: 650-657.
143. Samaras, P., M. Blumenstock, K.-W. Schramm und A. Kettrup, *PCDD/F Prevention by Novel Inhibitors: Addition of Inorganic S- and N-Compounds in the Fuel before combustion*. Environmental Science and Technology, 2000. **34**: 5092-5096.
144. Samaras, P., M. Blumenstock, D. Lenoir, K.-W. Schramm und A. Kettrup, *PCDD/F inhibition by prior addition of urea to the solid fuel in laboratory experiments and results statistical evaluation*. Chemosphere, 2001. **42**: 737-743.
145. Gullett, B. K. und K. Raghunathan, *Observations on the effect of combustion parameters on dioxin/furan yield*. Organohalogen Compounds, 1995. **23**: 397-402.
146. Gullett, B. K., K. R. Bruce und L. O. Beach, *Effect of sulfur dioxide on the formation mechanism of polychlorinated dibenzodioxin and dibenzofuran in municipal waste combustors*. Environmental Science and Technology, 1992. **26**: 1938-1943.
147. Addink, R. und K. Olie, *Role of oxygen in formation of polychlorinated dibenzo-p-dioxins/dibenzofurans from carbon fly ash*. Environmental Science and Technology, 1995. **29**: 1586-1590.
148. Fängmark, I., B. Van Bavel, S. Marklund, B. Strömberg, N. Berge und C. Rappe, *Influence of combustion parameters on the formation of polychlorinated dibenzo-p-dioxins, dibenzofurans, benzenes, biphenyls and polycyclic aromatic hydrocarbons in a pilot plant incinerator*. Environmental Science and Technology, 1993. **27**: 1602-1610.
149. Kilgroe, J. D., L. P. Nelson, P. J. Schindler und W. S. Lanier, *Combustion control of organic emissions from municipal waste combustors*. Combustion Science and Technology, 1990. **74**: 223-244.
150. Watanabe, T., M. Asai, T. Kondo, M. Shimizu, Y. Takeuchi, H. Aramaki und M. Naito, *An advanced fluidized-bed swirl incinerator for dioxin control during municipal waste disposal*. Chemosphere, 1996. **32**: 177-187.

151. Lenoir, D., A. Kaune, O. Hutzinger, G. Mützenich und K. Horch, *Influence of temperature, air flow and moisture on PCDD/f concentration in fly ash of a fluidized bed pilot plant*. Organohalogen Compounds, 1990. **4**: 313-318.
152. Pitea, D., M. Lasagni, G. Moro, R. Todeschini, R. Clementi, G. Cruciani und G. Chiesa, *Response surface models for the formation of PCDD and PCDF in a pilot plant combustion of MSW*. Chemosphere, 1990. **20**: 1973-1979.
153. Nottrodt, A., U. Duewel und K. Ballschmiter, *The influence of increased excess air on the formation of PCDD/PCDF in a municipal waste incineration plant*. Chemosphere, 1990. **20**: 1847-1854.
154. Andersson, P. und S. Marklund, *Emissions of organic compounds from biofuel combustion and influence of different control parameters using a laboratory scale incinerator*. Chemosphere, 1998. **36**: 1429-1443.
155. Bergström, J. und K. Warman, *Production and characterization of trace organic emissions in Sweden*. Waste Management & Research, 1987. **5**: 395-401.
156. Linak, W. P., J. D. Kilgroe, J. A. McSorley, J. O. L. Wendt und J. E. Dunn, *On the occurrence of transient puffs in a rotary kiln incinerator simulator. I. Prototype solid plastic wastes*. Journal of Air Pollution Control, 1987. **37**: 54-65.
157. Lemieux, P. M., W. P. Linak, C. DeBenedictis, J. V. Ryan, J. O. L. Wendt und J. E. Dunn, *Operating parameters to minimize emissions during rotary kiln emergency safety vent openings*. Hazardous Waste & Hazardous Materials, 1994. **11**: 102-113.
158. Vogg, H., M. Metzger und L. Stieglitz, *Recent findings on the formation and decomposition of PCDD/PCDF in municipal solid waste incineration*. Waste Management & Research, 1987. **5**: 285-294.
159. Grabic, R., S. Marklund, V. Pekarek, M. Pun, M. Puncocha und J. Ullrich, *Effects of oxygen, sulphur dioxide, sulphuric acid and peroxides on the formation of polychlorinated biphenyls (PCBs), dibenzo-p-dioxins (PCDDs) and dibenzofurans (PCDFs) on the MWI fly ash*. Organohalogen Compounds, 1999. **41**: 251-254.

160. Fängmark, I., B. Strömberg, N. Berge und C. Rappe, *The influence of fly ash load and particle size on the formation of PCDD, PCDF, PCBz and PCB in a pilot incinerator*. Waste Management & Research, 1995. **13**: 259-272.
161. Lehnardt, R., A. Kaune, K.-W. Schramm und A. Kettrup, *Sampling exhaust gases of thermal processes with continuous, automatic adjustment to isokinetic conditions*. Organohalogen Compounds, 1998. **36**: 77-80.
162. VDI, *Messen von Partikeln; Staubmessungen in strömenden Gasen; Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung (Blatt 1-8)*. 1975.
163. Kreis, S., H. Hunsinger und H. Vogg, *A simple procedure for the determination of PCDD/F, chlorophenols and chlorobenzenes in the stack gas of municipal waste incinerators*. Organohalogen Compounds, 1994. **19**: 231-234.
164. Knobloch, T. und W. Engewald, *Identification of some polar polycyclic compounds in emissions from brown-coal-fired residential stoves*. Journal of High Resolution Chromatography, 1993. **16**: 239-242.
165. Knobloch, T. und W. Engewald, *Sampling and gaschromatographic analysis of volatile organic compounds in hot and extremely humid emissions*. Journal of High Resolution Chromatography, 1995. **18**: 635-642.
166. Patil, S. F. und S. T. Lonkar, *Evaluation of Tenax TA for the determination of chlorobenzene and chloronitrobenzenes in air using capillary gas chromatography and thermal desorption*. Journal of chromatography, 1994. **684**: 133-142.
167. Liang, K. T. und A. J. Liem, *Effect of hydrochloric acid on sampling and analysis of semivolatile organic compounds in incineration flue gas. 3. Chlorobenzenes and polychlorinated biphenyls*. Environmental Science and Technology, 1997. **31**: 1785-1793.
168. Schramm, K.-W., M. Merck, B. Henkelmann und A. Kettrup, *Leaching of PCDD/F from fly ash and soil with fire-extinguishing water*. Chemosphere, 1995. **30**: 2249-2257.
169. Blumenstock, M., R. Zimmermann, K.-W. Schramm, A. Kaune, U. Nikolai, D. Lenoir und A. Kettrup, *Estimation of the dioxin emission (PCDD/F I-TEQ) from the concentration of low chlorinated aromatic compounds in the flue and stack gas of a hazardous waste incinerator*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 1999. **49**: 179-190.

170. NIOSH, *Niosh manual of analytical methods-Hydrocarbons Aromatic*. 1984, Ohio: National Institute for Occupational Safety and Health.
171. Mertens, D., V. Pracher, S. Amberg, K. Oxyinos, K.-W. Schramm und A. Kettrup, *Determination of pentachlorophenol (PCP) in samples of the environmental specimen bank using isotope dilution*. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 1997. **68**: 415-427.
172. Hauk, A., M. Sklorz, G. Bergmann und O. Hutzinger, *Analysis and toxicity testing of combustion gases 2. Characterisation of combustion products from halogen-free flame-retardant duroplastic polymers for electronics*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 1994. **28**: 1-12.
173. Frame, G. M., *A collaborative study of 209 PCB congeners and 6 Aroclors on 20 different HRGC columns. 1. Retention and coelution database*. Fresenius Journal of Analytical Chemistry, 1997. **357**: 701-713.
174. Nakano, T. und R. Weber, *Isomer specific analysis of mono- to trichlorinated dibenzofurans and dibenzodioxins - analysis of ambient air*. Organohalogen Compounds, 2000. **46**: 558-561.
175. Liang, X., W. Wang, K.-W. Schramm, Q. Zhang, K. Oxyinos, B. Henkelmann und A. Kettrup, *A new method of predicting of gas chromatographic retention indices for polychlorinated dibenzofurans (PCDFs)*. Chemosphere, 2000. **41**: 1889-1895.
176. Liang, X., W. Wang, W. Wu, K.-W. Schramm, B. Henkelmann und A. Kettrup, *Quantitative relationship between chromatographic retentions and molecular structures of polychlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDD)*. Chemosphere, 2000. **41**: 923-929.
177. Schimmel, H., U. Riehle, U. Reuter und K. Ballschmiter, *Selective losses of polychlorinated dibenzofurans (Cl_xDF , $x = 1-4$) and monohalogenated dibenzodioxins (Hal_1DD , $Hal = Br, Cl$) during matrix separation*. Chemosphere, 1992. **24**: 413-420.
178. Liang, K. T. und A. J. Liem, *Evaluation of column cleanup for chlorobenzenes, polychlorinated biphenyls, polychlorinated dibenzo-p-dioxins and polychlorinated dibenzofurans in MM5 flue gas analysis*. Analytical Chemistry, 1997. **70**: 191-198.

-
179. Wilhelm, M., Dissertation, *Methodenentwicklung zur Bestimmung N-heterozyklischer und N-substituierter polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe in Brandgasen polymerer Materialien*. Fakultät für Landwirtschaft und Gartenbau, 2000, München: Technische Universität München.
180. EPA. Method 8290A - *Polychlorinated Dibenzodioxins (PCDDs) and polychlorinated dibenzofurans (PCDFs) by high resolution gas chromatography/high resolution mass spectrometry (HRGC/HRMS)*, 1998: 1-67.
181. Grimmer, G., H. Brune, G. Dettbarn und K.-W. Naujack, *Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons, azaarenes and thiaarenes emitted from coal-fired residential furnaces by gas chromatography/mass spectrometry*. Fresenius Journal of Analytical Chemistry, 1985. **322**: 595-602.
182. Otto, M., *Analytische Chemie*. 2000, Weinheim: Wiley-VCH Verlag.
183. Mühlberger, F., R. Zimmermann und A. Kettrup, *A mobile mass spectrometer for comprehensive on-line analysis of trace and bulk components of complex gas mixtures: Parallel application of the laser-based ionization methods VUV single-photon ionization, resonant multiphoton ionization, and laser-induced electron impact ionization*. Analytical Chemistry, 2001. **73**: 3590-3604.
184. Hafner, K., R. Zimmermann, E. R. Rohwer, R. Dorfner und A. Kettrup, *A capillary-based supersonic jet inlet system for resonance-enhanced laser ionization mass spectrometry: Principle and first on-line process analytical application*. Analytical Chemistry, 2001. **73**: 4171-4180.
185. Zimmermann, R., M. Blumenstock, H. J. Heger, K.-W. Schramm und A. Kettrup, *Emission of Non-chlorinated and Chlorinated aromatics in the Flue Gas of Incineration Plants during and after Transient Disturbances of Combustion Conditions: Delayed Emission Effects*. Environmental Science and Technology, 2001. **35**: 1019-1030.
186. Heger, H. J., U. Boesl, R. Zimmermann, R. Dorfner und A. Kettrup, *On-line REMPI-TOFMS Laser Mass Spectrometry for Combined Multi-Component-Pattern Analysis and Target-Compound Monitoring: Non-Chlorinated Aromatics and Chlorobenzene in Flue Gases of Combustion Processes*. European Mass Spectrometry, 1999. **5**: 51-57.

187. Zimmermann, R., C. Weickhardt, U. Boesl, D. Lenoir, K.-W. Schramm, A. Kettrup und E. W. Schlag, *Isomer-Selective Ionization of Chlorinated Aromatics with Lasers for Analytical Time-of-Flight Mass Spectrometry; First Results for Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins (PCDD), Biphenyls (PCB) and Benzenes (PCBz)*. Chemosphere, 1994. **29**: 1877.
188. Boesl, U., *Multiphoton Excitation and Mass-Selective Ion Detection for Neutral and Ion Spectroscopy*. Journal of Physical Chemistry, 1991. **95**: 2949-2962.
189. Atkins, P. W., *Physikalische Chemie*. 1990, Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft.
190. Tembreull, R., C. H. Sin, P. Li, H. M. Pang und D. M. Lubman, *Applicability of Resonant Two-Photon Ionization in Supersonic Beam Mass Spectrometry to Halogenated Aromatic Hydrocarbons*. Analytical Chemistry, 1985. **57**: 1186-1192.
191. Rohlfing, E. A. *Resonantly Enhanced Multiphoton Ionization for the Trace Detection of Chlorinated Aromatics*, in *22nd Symposium (International) on Combustion*, 1988, Pittsburgh: The Combustion Institute.
192. Zimmermann, R., D. Lenoir, K.-W. Schramm, A. Kettrup und U. Boesl, *Resonance-enhanced multiphoton ionization (REMPI)-mass spectrometry for analysis of chlorinated compounds: The first REMPI-spectrum of a chlorinated dibenzofuran (PCDF)*. Organohalogen Compounds, 1994. **19**: 155-160.
193. Zimmermann, R., H. J. Heger, M. Blumenstock, R. Dorfner, K.-W. Schramm, U. Boesl und A. Kettrup, *On-Line monitoring of chlorobenzene in waste incineration flue gas as a surrogate for the emission of polychlorinated dibenzo-p-dioxins/furans (I-TEQ) using mobile Resonance Laser Ionization Time-of-flight Mass Spectrometry*. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 1999. **13**: 307-314.
194. Walter, K., K. Scherm und U. Boesl, *Spectroscopy of the ionic ground state of monohalogenated benzenes*. Journal of Physical Chemistry, 1991. **95**: 1188-1194.
195. Weickhardt, C., U. Boesl und E. W. Schlag, *Laser mass spectrometry for time-resolved multicomponent analysis of exhaust Gas*. Analytical Chemistry, 1994. **66**: 1062-1069.
196. Levy, D. H., *The spectroscopy of very cold gases*. Science, 1981. **214**: 263.

197. Zimmermann, R., D. Lenoir, A. Kettrup, H. Nagel und U. Boesl. *On-line emission control of combustion processes by laser-induced Resonance-enhanced Multi-photon Ionization/Mass Spectrometry*, in *26th Symposium (International) on Combustion*, 1996, Pittsburgh: The Combustion Institute.
198. Zimmermann, R., H. J. Heger, A. Kettrup und U. Nikolai, *Direct observation of the formation of aromatic pollutants in waste incineration flue gases by on-line REMPI-TOFMS laser mass spectrometry*. *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*, 2000. **366**: 368-374.
199. Mühlberger, F., Dissertation, *Entwicklung einer Vakuum-UV-Ionenquelle für die Massenspektrometrie an Umweltproben*. in Vorbereitung, 2002, München: Technische Universität München.
200. Blumenstock, M., R. Zimmermann, K.-W. Schramm und A. Kettrup, *Identification of surrogate compounds for the emission of PCDD/F (I-TEQ value) and evaluation of their on-line real-time detectability by REMPI-TOFMS mass spectrometry*. *Chemosphere*, 2001. **42**: 507-518.
201. Mohr, K., C. Nonn, J. Kondela, H. Gass, D. Menke und J. Jäger, *Innovations in continuous emission control of PCDD/PCDF from municipal solid waste incineration facilities*. *Organohalogen Compounds*, 1996. **27**: 93-98.
202. Mohr, K., T. Ludwig, C. Brockmann, H. Grund, H. Ortner, P. Hoffmann und J. Jäger, *Modified continuous sampling and clean-up device for the determination of PCDD/PCDF in waste gases of incinerators and thermal processes*. *Chemosphere*, 1999. **39**: 1937-1950.
203. Nagano, H., K. Miyazawa, Y. Osada und T. Yokoyama, *A newly-devised automatic and continuous system to monitor chlorobenzenes in the exhaust gas at an MSW incineration plant*. *Organohalogen Compounds*, 1997. **31**: 150-153.
204. Hishimoto, Y., M. Suga, M. Yamada, Y. Takada, I. Waki und M. Sakairi, *An automated direct dioxin monitor using APCI-ITMS coupled with ASE*. *Organohalogen Compounds*, 2001. **20**: 221-224.
205. Hori, Y., M. Yamada, T. Saito, N. Takeda und T. Fujiwara, *Analysis of chlorophenol monitored by an on-line monitoring system for dioxin precursor in flue gas*. *Organohalogen Compounds*, 2001. **50**: 217-220.

206. Dellinger, B. und D. L. Hall, *Surrogate compounds for monitoring the effectiveness of incineration systems*. Hazardous Waste Management, 1986. **36**: 179-183.
207. Oehme, M., S. Mano und A. Mikalsen, *Formation and presence of polyhalogenated and polycyclic compounds in the emissions of small and large municipal waste incinerators*. Chemosphere, 1987. **16**: 143-153.
208. Öberg, T. und J. Bergström, *Indicator Parameters for PCDD/PCDF*. Chemosphere, 1989. **19**: 337-344.
209. Kaune, A., D. Lenoir, U. Nikolai und A. Kettrup, *Estimating concentrations of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in the stack gas of a hazardous waste incinerator from concentrations of chlorinated benzenes and biphenyls*. Chemosphere, 1994. **29 (9-11)**: 2083-2096.
210. Kaune, A., D. Lenoir, K.-W. Schramm, R. Zimmermann, A. Kettrup, K. Jaeger, H. G. Rückel und F. Frank, *Chlorobenzenes and chlorophenols as indicator parameters for chlorinated dibenzodioxins and dibenzofurans in incineration processes: Influences of various facilities and sampling points*. Environmental Engineering Science, 1998. **15**: 85-95.
211. Watanabe, T., Y. Matsuzawa, I. Kawakami und M. Tanaka, *Measurement of lower chlorinated hydrocarbons in flue gas from municipal solid waste incinerators and the relationships to PCDD/Fs*. Organohalogen Compounds, 1994. **19**: 415-418.
212. Kato, M. und K. Urano, *Convenient substitute indices to toxic equivalent quantity for controlling and monitoring dioxins in stack gas from waste incineration facilities*. Waste Management, 2001. **21**: 55-62.
213. Kato, M. und K. Urano, *A measuring method of chlorobenzenes as a convenient substitute index of dioxins in stack gas from waste incineration facilities*. Waste Management, 2001. **21**: 63-68.
214. Tuppurainen, K., P. Ruokojärvi, A. Asikainen, M. Aatamila und J. Ruuskanen, *Chlorophenols as precursors of PCDD/Fs in incineration processes: Correlations, PLS modeling, and reaction mechanisms*. Environmental Science and Technology, 2000. **34**: 4958-4962.

-
215. Fiedler, H., C. Lau und G. Eduljee, *Statistical analysis of patterns of PCDDs and PCDFs in stack emission samples and identification of a marker congener*. Waste Management & Research, 2000. **18**: 283-292.
216. Imagawa, T. und M. Takeuchi, *Relation between Isomer compositions of polychlorinated naphthalenes and congener compositions of PCDDs /PCDFs from Incinerators*. Organohalogen Compounds, 1995. **23**: 487-491.
217. Gullett, B. K. und E. Wikström, *Mono- to tri-chlorinated dibenzodioxin (CDD) and dibenzofuran (CDF) congeners/homologues as indicators of CDD and CDF emissions from municipal waste and waste/coal combustion*. Chemosphere, 2000. **40**: 1015-1019.
218. Zimmermann, R., *Dibenzo-p-dioxin and its chlorinated congeners: Molecular geometry and electronic structure*. 1998, 9th International Symposium on Resonance Ionization Spectroscopy, Manchester, GB, American Institute of Physics, AIP-Press, New York.
219. Wilkerson, C. W., Jr. und J. P. Reilly, *Variations in Detection Efficiency of Halobenzenes Studied by Using Gas Chromatography/Laser Ionization Mass Spectrometry: Correlation with Excited-State Lifetimes*. Analytical Chemistry, 1990. **62**: 1804-1808.
220. Tanada, T. N., J. Velazquez, N. Hemmi und T. A. Cool, *Surrogate Detection for Continuous Emission Monitoring by Resonance Ionization*. Combustion Science and Technology, 1994. **101**: 333-348.
221. Flury, B., *Angewandte multivariate Statistik: Computergestützte Analyse mehrdimensionaler Daten*. 1983, Stuttgart: Fischer Verlag.
222. StatSoft, *STATISTICA 5.1*. 1997, Tulsa: StatSoft Inc.
223. Afifi, A. A., *Computer-aided multivariate analysis. 1. Multivariate analysis-Data processing*. 1984, Belmont, California.
224. Sachs, L., *Angewandte Statistik*. 1967.
225. Kaune, A. und A. Kettrup, *Treatment of values below the detection limits in correlation analysis of chlorinated dioxins and related compounds*. Chemosphere, 1994. **29**: 1811-1818.

226. Janoschek, R., *Irrtümer und Erfolge bei quantenchemischen ab-initio Rechnungen*. Chemie in unserer Zeit, 1995. **29**: 122-132.
227. Pople, J. A., *Quantenchemische Modelle*. Angewandte Chemie, 1999. **111**: 2014-2023.
228. Hehre, W. J., J. Yu, P. E. Klunzinger und L. Lou, *A brief guide to molecular mechanics and quantum chemical calculations*. 1998, Irvine, Californien: Wavefunction, Inc.
229. Szabo, A. und N. S. Ostlund, *Modern quantum chemistry*. 1989, New York: McGraw-Hill Publishing Company.
230. Kunz, R. W., *Molecular Modelling für Anwender*. 1991, Stuttgart: B.G. Teubner.
231. Schmidtke, H.-H., *Quantenchemie*. 1994, Weinheim: VCH-Verlag Chemie.
232. Dewar, M. J. S., E. G. Zoebisch, E. F. Healy und J. J. P. Stewart, *AM1. An new general purpose quantum mechanical molecular model*. Journal of American Chemical Society, 1985. **107**: 3902-3909.
233. Stewart, J. J. P., *MOPAC 7.0*. 1994, United States Airforce Academy: F.J. Seiler Research Laboratory.
234. Findegg, G. H., *Statistische Thermodynamik*. 1985, Darmstadt: Steinkopf Verlag.
235. Inc., A., *Hyperchem 3.0, Molekülorbitalprogrammpaket 3.0*. 1993: Autodesk Publication.
236. Wikström, E., Dissertation, *The role of chlorine during waste combustion*. Department of Environmental Chemistry, 1999, Umea: Umea University.
237. Blumenstock, M., R. Zimmermann, R. Lehnhardt, K.-W. Schramm, A. Kaune, U. Nikolai, D. Lenoir und A. Kettrup, *Estimating I-TEQ emissions of polychlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDD) and dibenzofurans (PCDF) from lower chlorinated PCDD/F and benzenes (PCBz) at a hazardous waste incinerator (HWI)*. Organohalogen Compounds, 1998. **36**: 47-52.
238. Zimmermann, R., Habilitation, *Entwicklung und Anwendung analytischer Methoden für die on-line-Analytik komplexer Gasgemische und Aerosole aus thermischen Prozessen sowie Beiträge zum Verständnis von Bildungsprozessen organischer Luftschadstoffe*, Fakultät für Landwirtschaft und Gartenbau, 2000, München: Technische Universität München.

239. Sakai, S., M. Hiraoka, N. Takeda und K. Shiozaki, *Coplanar PCBs and PCDDs/PCDFs in municipal waste incineration*. Chemosphere, 1993. **27**: 233-240.
240. Sakai, S., S. E. Sawell, A. J. Chandler, T. T. Eighmy, D. S. Kosson, J. Vehlow, S. v. d. H.A., J. Hartlén und O. Hjelm, *World trends in municipal solid waste management*. Waste Management, 1996. **16**: 341-350.
241. Blumenstock, M., R. Zimmermann, K.-W. Schramm und A. Kettrup, *Comparison of different combustion facilities according to their emission profiles of polychlorinated compounds*. Organohalogen Compounds, 1999. **41**: 87-95.
242. Scholz, M., Dissertation, *Reaktionen von polychlorierten Biphenylen an Flugaschen von Müllverbrennungsanlagen*. Forschungszentrum Karlsruhe-Institut für Technische Chemie, 1997, Heidelberg: Naturwissenschaftlich-Mathematische Gesamtfakultät der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg.
243. Nestruck, T. J. und L. L. Lamparski, *Assessment of chlorinated dibenzo-p-dioxins: Formation and potential emission to the environment from wood combustion*. Chemosphere, 1983. **12**: 617-626.
244. Vierle, O., T. Launhardt, A. Strehler, R. Dumler-Grادل, H. Thoma und M. Schreiner, *Investigation of organic pollutants from house heating systems using biogenic fuels and correlations with other exhaust gas components*. Analytica Chimica Acta, 1999. **393**: 131-140.
245. Hunsinger, H., S. Kreis und H. Vogg, *Experiences gained from the sampling of chlorine aromatics in the raw gas of waste incineration plants-conclusions with regard to dedusting technology*. Chemosphere, 1996. **32**: 109-118.
246. Bumb, R. R., W. B. Crummett, S. S. Cutie, J. R. Gledhill, R. H. Hummel, R. O. Kogel, L. L. Lamparski, E. V. Luoma, D. L. Miller, T. J. Nestruck, L. A. Shadoff, R. H. Stehl und J. S. Woods, *Trace chemistry of fire: A source of chlorinated dioxins*. Science, 1980. **210**: 385-390.
247. Blumenstock, M., R. Zimmermann, K.-W. Schramm und A. Kettrup, *Application of monochlorobenzene as an reliable surrogate for the prediction of the I-TEQ value in combustion facilities*. Organohalogen Compounds, 2000. **46**: 174-177.

248. Nath, P., P. Edwards und S. Sidhu, *Investigation of the role of benzene and phenol in PCDD/F formation*. Chemosphere, 2001. submitted.
249. Mulholland, J. A., J.-Y. Ryu, D. T. Nakahata, B. K. Gullett, F. Iino und E. Wikström, *PCDD/F isomer patterns from combustion: Formation mechanism fingerprints*. Environmental Science and Technology, 2001. submitted.
250. Ryu, J.-Y. und J. A. Mulholland, *Chlorination of dibenzofuran and dibenzo-p-dioxin vapor by copper(II)chloride*. Chemosphere, 2001. submitted.
251. Weber, R. und H. P. Hagenmaier, *Mechanism of the formation of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans from chlorophenols in gas phase reactions*. Chemosphere, 1999. **38**: 529-534.
252. Iino, F., K. Tsuchiya, T. Imagawa und B. K. Gullett, *An isomer prediction model based on dechlorination kinetics for polychlorinated naphthalenes, polychlorinated dibenzo-p-dioxins, and polychlorinated biphenyls from municipal waste incinerators*. Environmental Science and Technology, 2001. **35**: 3175-3181.
253. Blumenstock, M., R. Zimmermann, K.-W. Schramm und A. Kettrup, *Elucidation of relationships between chloroaromatics in full scale incinerators: High temperature formation and long-term concentration increase*. Organohalogen Compounds, 2001. **50**: 301-306.
254. Luthhardt, P. und J. Schulte, *Dioxin/Furan-"Verbrennungsprofile" in Abgasen aus Hochtemperaturprozessen. Teil II: Annäherung an eine thermodynamisch kontrollierte Reaktionsvariante mittels semiempirischer Molekülorbital-Methode unter Nutzung des MOPAC-Programmpaketes*. Umweltwissenschaften und Schadstofforschung, 2000. **12**: 215-219.
255. Luthhardt, P. und J. Schulte, *Dioxin-/Furan- "Verbrennungsprofile" in Abgasen aus Hochtemperaturprozessen: Teil I: Grundlagen der Entstehung und Profilcharakteristik unterschiedlicher Anlagentypen*. Umweltwissenschaften und Schadstofforschung, 2000. **12**: 157-162.
256. Ballschmiter, K., I. Braunmiller, R. Niemczyk und M. Swerev, *Reaction pathways for the formation of polychloro-dibenzodioxins (PCDD) and -dibenzofurans (PCDF) in combustion processes: II. Chlorobenzenes and chlorophenols as precursors in the formation of polychloro-dibenzodioxins and -dibenzofurans in flame chemistry*. Chemosphere, 1988. **18**: 995-1005.

257. Platonov, V. A. und Y. N. Simulin, *Standard enthalpies of formation of 1,2,3-Trichlorobenzene, 1,2,4,5-Tetrachlorobenzene, and Hexachlorobenzene*. Russian Journal of Physical Chemistry, 1983. **57**: 840-842.
258. Platonov, V. A. und Y. N. Simulin, *Experimental Determination of standard enthalpies of formation of polychlorobenzenes. II Standard enthalpies of dichlorobenzenes*. Russian Journal of Physical Chemistry, 1984. **58**: 1630-1632.
259. Platonov, V. A. und Y. N. Simulin, *Determination of standard enthalpies of formation of polychlorobenzenes. III. The standard enthalpies of formation of mono-, 1,2,4- and 1,3,5-Tri- and 1,2,3,4- and 1,2,3,5-Tetrachlorobenzenes*. Russian Journal of Physical Chemistry, 1985. **59**: 179-181.
260. Platonov, V. A., Y. N. Simulin und M. M. Rozenberg, *Standard enthalpy of formation of pentachlorobenzene. Calculation of $H_c^\circ(g)$ and $H_f^\circ(g)$ for polychlorobenzenes by Tetevskii's method*. Russian Journal of Physical Chemistry, 1985. **59**: 814-817.
261. Tsuchiya, K., *Computational prediction of the heats of formation for gaseous fluoro- and chlorobenzenes by applying isodesmic approach*. Organohalogen Compounds, 1999. **41**: 283-286.
262. Cox, J. D. und G. Pilcher, *Thermochemistry of organic and organometallic compounds*. 1970, New York: Academic Press.
263. Silva, R. in: NIST-Spectral Database. 1994 aus NIST 2000.
264. Tsuchiya, K., Persönliche Mitteilung, *Heat of formation for chlorinated phenols calculated with ab-initio methods*. 2000, München.
265. Mulholland, J. A., Persönliche Mitteilung, *PCBz combustion and resulting PCPh patterns*. 2001, München.
266. Donovan, W. H. und G. R. Famini, *Ab initio study of the addition of selected free radicals to monofluorethylene and 1,1'-Difluorethylene*. Journal of Physical Chemistry, 1994. **98**: 7811-7818.
267. Sekusak, S., K. R. Liedl und A. Sabljic, *Reactivity and regioselectivity of hydroxyl radical addition to halogenated ethenes*. Journal of Physical Chemistry, 1998. **102**: 1583-1594.

268. Tuppurainen, K., Persönliche Mitteilung, *Charges and HOMO-densities in PCBz and PCPh*. 2001, München.
269. Buser, H. R., *Formation of polychlorinated dibenzofurans (PCDFs) and dibenzo-p-dioxins (PCDDs) from the pyrolysis of chlorobenzenes*. *Chemosphere*, 1979. **6**: 415-424.
270. Ritter, E. und J. W. Bozzeli, *Chlorobenzene and dichlorobenzene reactions in hydrogen and in hydrogen/oxygen mixtures*. *Hazardous Waste & Hazardous Materials*, 1990. **7**: 103-115.
271. Fadli, A., C. Briois, C. Baillet und J.-P. Sawerysyn, *Experimental study on the thermal oxidation of chlorobenzene at 575-825°C*. *Chemosphere*, 1999. **38**: 2835-2848.
272. Higgins, B., M. J. Thomson, D. Lucas, C. P. Koshland und R. F. Sawyer, *An experimental and numerical study of the thermal oxidation of chlorobenzene*. *Chemosphere*, 2001. **42**: 703-717.
273. Kanters, M. J., Dissertation, *Chlorination in combustion processes-Formation of chlorophenols*. *Environmental Chemistry*, 1996, Leiden: University of Leiden.
274. Ballschmiter, K., W. Zoller, C. Scholz und A. Nottrodt, *Occurrence and absence of polychlorodibenzofurans and polychlorodibenzodioxins in fly ash from municipal waste incinerators*. *Chemosphere*, 1983. **12**: 585-594.
275. Addink, R. und K. Olie, *Mechanisms of formation and destruction of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in heterogenous systems*. *Environmental Science and Technology*, 1995. **29**: 1425-1435.
276. Hagenmaier, H., H. Brunner, R. Haag und M. Kraft, *Copper-catalyzed dechlorination/hydrogenation of polychlorinated dibenzo-p-dioxins, polychlorinated dibenzofurans, and other chlorinated aromatic compounds*. *Environmental Science and Technology*, 1987. **21**: 1085-1088.
277. Wiesmüller, T., Dissertation, *Untersuchungen zur katalytischen Dechlorierung von Octachlordibenzo-p-dioxin und Octachlorfuran und Anwendung der erhaltenen Gemische in toxikologischen Studien*. Fakultät für Biologie und Chemie, 1990, Tübingen: Universität Tübingen.

278. Okamoto, Y., *A new dioxin decomposition process based on a hybrid density-functional calculation*. Chemical Physical Letters, 1999. **310**: 355-360.
279. Mulholland, J. A. und J.-Y. Ryu, *Formation of polychlorinated dibenzo-p-dioxins by CuCl₂-catalyzed condensation of chlorinated phenols*. Combustion Science and Technology, 2001. submitted.
280. Tuppurainen, K., I. Halonen und J. Ruuskanen, *Diaxospiro-type structures as intermediates in the formation of polychlorinated dibenzo-p-dioxins. A semi-empirical AM1 molecular orbital study*. Chemosphere, 1996. **32**: 1349-1356.
281. Bavel, v. B., M. Gidlund, T. Takasuga, C. Rappe und M. Tysklind, *Prediction of the thermal stability of PCBs using their physio-chemical properties and comparison of the results with the levels in an incineration sample*. Organohalogen Compounds, 1996. **27**: 111-114.
282. Sakai, S., M. Hiraoka, N. Takeda und K. Shiozaki, *Formation and emission of non-ortho CBs and mono-ortho CBs in municipal waste incineration*. Chemosphere, 1994. **29**: 1979-1986.
283. Sakai, S., M. Hiraoka, N. Takeda und K. Shiozaki, *Behaviour of coplanar PCBs and PCNs in oxidative conditions of municipal waste incineration*. Chemosphere, 1996. **32**: 79-88.
284. Frame, G. M., *A collaborative study of 209 PCB congeners and 6 Aroclors on 20 different HRGC columns. 2. Semi-quantitative Aroclor congener distributions*. Fresenius Journal of Analytical Chemistry, 1997. **357**: 714-722.
285. Sakai, S., T. Ukai, H. Takatsuki, K. Nakamura, S. Kinoshita und T. Takasuga, *Substance flow analysis of coplanar PCBs released from waste incineration processes*. Journal of Mater Cycles Waste Management, 1999. **1**: 62-74.
286. Hitchman, M. L. und K. F. Jensen, *Chemical Vapor Deposition*. 1993, Portland, Oregon: Academic Press.
287. Asmann, M., J. Heberlein und E. Pfender, *A review of diamond CVD utilizing halogenated precursors*. Diamond and Related Materials, 1999. **8**: 1-16.
288. Lee, C. W., J. D. Kilgroe und K. Raghunathan, *Effect of Soot and Copper Combustor Deposits on Dioxin Emissions*. Environmental Engineering Science, 1998. **15**: 71-84.

-
289. England, G. C., T. P. McGrath, L. Gilmer, J. G. Seebold, M. Lev-On und T. Hunt, *Hazardous air pollutant emissions from gas-fired combustion sources: emissions and the effects of design and fuel type*. Chemosphere, 2001. **42**: 754-764.
290. Gullett, B. K., A. Touati und C. W. Lee, *Formation of Chlorinated Dioxins and Furans in a Hazardous-Waste-Firing Industrial Boiler*. Environmental Science and Technology, 2000. **34**: 2069-2074.
291. Lemieux, P. M., W. P. Linak, J. A. McSorley, J. O. L. Wendt und J. E. Dunn, *Minimization of transient emissions from rotary kiln incinerators*. Combustion Science and Technology, 1990. **74**: 311-325.
292. Lemieux, P. M., W. P. Linak, J. A. McSorley und J. O. L. Wendt, *Transient suppression packaging for reduced emissions from rotary kiln incinerators*. Combustion Science and Technology, 1992. **85**: 203-215.
293. Wendt, J. O. L. *Combustion Science for Incineration Technology*, in *25th Symposium (International) on Combustion*, 1994, Pittsburgh: The Combustion Institute.
294. Linak, W. P., J. A. McSorley, J. O. L. Wendt und J. E. Dunn, *On the occurrence of transient puffs in a rotary kiln incinerator simulator: II Contained liquid wastes on sorbent*. Journal of Air Pollution Control, 1987. **37**: 934-945.
295. Hart, J. R., *Transient puffs of trace organic emissions from a batch-fed waste propellant incinerator*. Chemosphere, 2001. **42**: 559-569.
296. Kreis, S., H. Hunsinger und H. Vogg, *Wet scrubbers - a potential PCDD/F source?* Organohalogen Compounds, 1994. **18**: 305-307.
297. Hunsinger, H., S. Kreis und H. Seifert, *PCDD/F behavior in wet scrubbing systems of waste incineration plants*. Chemosphere, 1998. **37**: 2993-2997.
298. Heger, H. J., R. Zimmermann, M. Blumenstock und A. Kettrup, *On-line real-time measurement at incineration plants: PAH and a PCDD/F surrogate compound at stationary combustion conditions and during transient emission puffs*. Chemosphere, 2001. **42**: 691-696.

299. Author, *Handbook of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons*, Bjørseht, A. 1983, New York and Basel: Marcel Dekker, Inc.
300. Linak, W. P., J. A. McSorley, J. O. L. Wendt und J. E. Dunn, *Rotary kiln incineration: The effect of oxygen enrichment on formation of transient puffs during batch introduction of hazardous wastes*. 1988, Fourteenth Annual Research Symposium on Land Disposal, Remedial Action, Incineration and Treatment of Hazardous Waste, Cincinnati, Ohio.
301. Samaras, P., Persönliche Mitteilung, *Specification of anorganic compounds of fly ashes from wood combustion*. 1999, München.

7. ANHANG

Anhang A-1: Tabelle zur Ballschmitter Nomenklatur der PCB	216
Anhang B-1: Verwendete Lösungsmittel, Adsorbentien und weitere Verbrauchsmaterialien	217
Anhang B-2: Gerätespezifische Parameter für die Analytik der untersuchten Substanzen	218
Anhang B-3: Für die Quantifizierung verwendete isotope markierte Standards und eingesetzte Standardmengen	220
Anhang B-4: Aufarbeitungsvorschrift für PCPh	221
Anhang B-5: Anleitungen zur säulenchromatographischen Reinigung der Chloraromaten	221
Anhang C-1: Gemessene Konzentrationen in (ng/m ³)	227
Anhang C-2: HCl-Konzentrationsbereiche im Rohgas der untersuchten Anlagen	316
Anhang C-3: Übersicht der Anlagenbedingungen an der PVA	316
Anhang C-4: Zuordnung der Nummerierung zu den Kongeneren und Homologen für die Korrelationsmatrizen an der PVA, SMVA, MVA und HVA	317
Anhang C-5: Korrelationskoeffizienten (KK) der niedrig chlorierten Aromaten für die PVA und SMVA mit den (I-)TEQ Werte der PCDD/F und PCB	319
Anhang C-6: Korrelationskoeffizienten (KK) der niedrig chlorierten Aromaten für die MVA und HVA mit den (I-)TEQ Werten der PCDD/F und PCB	321
Anhang C-7: Vergleich der KK dieser Arbeit mit Daten aus der Literatur	323

7.2 Anhang A: Anhang zu Kapitel 1 und 2

Anhang A-1: Tabelle zur Ballschmitter Nomenklatur der PCB

#	Monochlorbiphenyle	70	2,3',4',5	141	2,2',3,4,5,5'
1	2	71	2,3',4',6	142	2,2',3,4,5,6
2	3	72	2,3',5,5'	143	2,2',3,4,5,6'
3	4	73	2,3',5',6	144	2,2',3,4,5',6
#	Dichlorbiphenyle	74	2,4,4',5	145	2,2',3,4,6,6'
4	2,2'	75	2,4,4',6	146	2,2',3,4',5,5'
5	2,3	76	2',3,4,5	147	2,2',3,4',5,6
6	2,3'	77	3,3',4,4'	148	2,2',3,4',5,6'
7	2,4	78	3,3',4,5	149	2,2',3,4',5',6
8	2,4'	79	3,3',4,5'	150	2,2',3,4',6,6'
9	2,5	80	3,3',5,5'	151	2,2',3,5,5',6
10	2,6	81	3,4,4',5	152	2,2',3,5,6,6'
11	3,3'	#	Pentachlorbiphenyle	153	2,2',4,4',5,5'
12	3,4	82	2,2',3,3',4	154	2,2',4,4',5,6'
13	3,4'	83	2,2',3,3',5	155	2,2',4,4',6,6'
14	3,5	84	2,2',3,3',6	156	2,3,3',4,4',5
15	4,4'	85	2,2',3,4,4'	157	2,3,3',4,4',5'
#	Trichlorbiphenyle	86	2,2',3,4,5	158	2,3,3',4,4',6
16	2,2',3	87	2,2',3,4,5'	159	2,3,3',4,5,5'
17	2,2',4	88	2,2',3,4,6	160	2,3,3',4,5,6
18	2,2',5	89	2,2',3,4,6'	161	2,3,3',4,5',6
19	2,2',6	90	2,2',3,4',5	162	2,3,3',4',5,5'
20	2,3,3'	91	2,2',3,4',6	163	2,3,3',4',5,5'
21	2,3,4	92	2,2',3,5,5'	#	Hexachlorbiphenyle
22	2,3,4'	93	2,2',3,5,6	164	2,3,3',4',5',6
23	2,3,5	94	2,2',3,5,6'	165	2,3,3',5,5',6
24	2,3,6	95	2,2',3,5',6	166	2,3,4,4',5,6
25	2,3',4	96	2,2',3,6,6'	167	2,3',4,4',5,5'
26	2,3',5	97	2,2',3',4,5	168	2,3',4,4',5',6
27	2,3',6	98	2,2',3',4,6	169	3,3',4,4',5,5',
28	2,4,4'	99	2,2',4,4',5	#	Heptachlorbiphenyle
29	2,4,5	100	2,2',4,4',6	170	2,2',3,3',4,4',5
30	2,4,6	101	2,2',4,5,5'	171	2,2',3,3',4,4',6
31	2,4',5	102	2,2',4,5,6'	172	2,2',3,3',4,5,5'
32	2,4',6	103	2,2',4,5',6	173	2,2',3,3',4,5,6
33	2',3,4	104	2,2',4,6,6'	174	2,2',3,3',4,5,6'
34	2',3,5	105	2,3,3',4,4'	175	2,2',3,3',4,5',6
35	3,3',4	106	2,3,3',4,5	176	2,2',3,3',4,6,6'
36	3,3',5	107	2,3,3',4',5	177	2,2',3,3',4',5,6
37	3,4,4'	108	2,3,3',4,5'	178	2,2',3,3',5,5',6
38	3,4,5	109	2,3,3',4,6	179	2,2',3,3',5,6,6'
39	3,4',5	110	2,3,3',4',6	180	2,2',3,4,4',5,5'
#	Tetrachlorbiphenyle	111	2,3,3',5,5'	181	2,2',3,4,4',5,6
40	2,2',3,3'	112	2,3,3',5,6	182	2,2',3,4,4',5,6'
41	2,2',3,4	113	2,3,3',5',6	183	2,2',3,4,4',5',6
42	2,2',3,4'	114	2,3,4,4',5	184	2,2',3,4,4',6,6'
43	2,2',3,5	115	2,3,4,4',6	185	2,2',3,4,5,5',6
44	2,2',3,5'	116	2,3,4,5,6	186	2,2',3,4,5,6,6'
45	2,2',3,6	117	2,3,4',5,6	187	2,2',3,4',5,5',6
46	2,2',3,6'	118	2,3',4,4',5	188	2,2',3,4',5,6,6'
47	2,2',4,4'	119	2,3',4,4',6	189	2,3,3',4,4',5,5'
48	2,2',4,5	120	2,3',4,5,5'	190	2,3,3',4,4',5,6
49	2,2',4,5'	121	2,3',4,5',6	191	2,3,3',4,4',5',6
50	2,2',4,6	122	2',3,3',4,5	192	2,3,3',4,5,5',6
51	2,2',4,6'	123	2',3,4,4',5	193	2,3,3',4',5,5',6
52	2,2',5,5'	124	2',3,4,5,5'	#	Octachlorbiphenyle
53	2,2',5,6'	125	2',3,4,5,6'	194	2,2',3,3',4,4',5,5'
54	2,2',6,6'	126	3,3',4,4',5	195	2,2',3,3',4,4',5,6
55	2,3,3',4	127	3,3',4,5,5'	196	2,2',3,3',4,4',5',6
56	2,3,3',4'	#	Hexachlorbiphenyle	197	2,2',3,3',4,4',6,6'
57	2,3,3',5	128	2,2',3,3',4,4'	198	2,2',3,3',4,5',6
58	2,3,3',5'	129	2,2',3,3',4,5	199	2,2',3,3',4,5,6,6'
59	2,3,3',6	130	2,2',3,3',4,5'	200	2,2',3,3',4,5',6,6'
60	2,3,4,4'	131	2,2',3,3',4,6	201	2,2',3,3',4',5,5',6
61	2,3,4,5	132	2,2',3,3',4,6'	202	2,2',3,3',5,5',6,6'
62	2,3,4,6	133	2,2',3,3',5,5'	203	2,2',3,4,4',5,5',6
63	2,3,4',5	134	2,2',3,3',5,6	204	2,2',3,4,4',5,6,6'
64	2,3,4',6	135	2,2',3,3',5,6'	205	2,3,3',4,4',5,5',6
65	2,3,5,6	136	2,2',3,3',6,6'	#	Nonachlorbiphenyle
66	2,3',4,4'	137	2,2',3,4,4',5	206	2,2',3,3',4,4',5,5',6
67	2,3',4,5	138	2,2',3,4,4',5'	207	2,2',3,3',4,4',5,6,6'
68	2,3',4,5'	139	2,2',3,4,4',6	208	2,2',3,3',4,5,5',6,6'
69	2,3',4,6	140	2,2',3,4,4',6'	#	Dechlorbiphenyl
				209	2,2',3,3',4,4',5,5',6,6'

7.3 Anhang B: Anhang zu Kapitel 3

Anhang B-1: Verwendete Lösungsmittel, Adsorbentien und weitere Verbrauchsmaterialien

Lösungsmittel:

Lösungsmittel/Adsorbens	Reinheitsgrad	Lieferfirma
Aceton	picograde	Promochem
Acetonitril	p.a.	Riedel de Haen
Benzol	picograde	Promochem
Dichlormethan	picograde	Promochem
Nonan	picograde	Promochem
n-Hexan	picograde	Promochem
Tetradecan	p.a.	Fluka
Toluol	picograde	Promochem
Aluminiumoxid B Super1	Zur Dioxinanalyse	ICN
Bio Bed SX-8	-	Bio Rad
Natriumsulfat	p.a.	Promochem
Kieselgel 60 (70- 230 mesh)	p.a.	Promochem
Florisil (60- 100 mesh)	p.a.	Promochem
Glaswolle	-	selbst; 24 Soxhletextraktion mit Toluol

Adsorbentien für die Probenahme: (Kursiv gedruckte Adsorbentien kamen an der PVA zum Einsatz; alle anderen bei den übrigen Probenahmen)

Untersuchte Verbindungs- klasse	Adsorbent(ien)	Firma	Menge pro Probe	Dimensionen der Adsorptionseinheit
PCDD/F	XAD-2 (Supelpak 2) 2- <i>Ethoxyethanol</i>	Supelco	50 g	L: 30 cm, ID: 4,5 cm
PAK	XAD-2 (Supelpak 2) 2- <i>Ethoxyethanol</i>	Supelco	50 g	L: 30 cm, ID: 4,5 cm
PCB	XAD-2 (Supelpak 2) 2- <i>Ethoxyethanol</i>	Supelco	50 g	L: 30 cm, ID: 4,5 cm
PCBz	1. Carbotrap (mesh 20/40) oder Tenax TA (mesh 60/80) 2. Caboxen 569 (mesh 20/45) (30mg) <i>Aktivkohle</i>	Supelco	1. 200 mg 2. 50 mg	L: 9 cm, ID: 0,4 cm (Firma: Supelco)
PCPh	Cabotrap (20/40 mesh), <i>(Aktivkohle),</i> <i>2-Ethoxyethanol</i>	Supelco	350 mg	L: 10 cm, ID: 0,6 cm
BTX, MeNap	Carbotrap (20/40 mesh) <i>Aktivkohle</i>	Supelco	200 mg	L: 9 cm, ID: 0,4 cm

Filter zur Partikelabscheidung bei der Probenahme der BTX, PCBz und PCPh:

Firma Schleicher und Schüll: GFF8, Durchmesser: 45mm (Abscheidegrad von 98% bei $d_{ae} < 0,3\mu\text{m}$).

Anhang B-2: Gerätespezifische Parameter für die Analytik der untersuchten Substanzen**PCDD/F**

HRGC: Hewlett Packard
5890 series II

HRMS: Finnigan MAT 95S

Kapillarsäule	Restec: RTX 2330	Ionisationsmode	EI
	Länge: 60m	Ionisationsenergie	70eV
	Innendurchmesser: 0,25mm	Quellentemperatur	260°C
	Filmdicke: 0,1µm	Interfacetemperatur	260°C
Trärgas	Helium, 2bar Säulenvordruck	Auflösung	10000
Injektion	Gerstel KAS 3		
	Split: 1/60		
	Temperatur: 280°C		
Temperaturprogramm	90°C, 1,5min, 25°C min ⁻¹ , 180°C, 2°C min ⁻¹ , 260°C, 15min		

PCBz

HRGC: Varian HRGC
3400

LRMS: Finnigan its
Tracker 40

Kapillarsäule	J&W XLB	Ionisationsmode	EI
	Länge: 60m	Ionisationsenergie	60eV
	Innendurchmesser: 0,25mm	Quellentemperatur	260°C
	Filmdicke: 0,25µm	Interfacetemperatur	260°C
Trärgas	Helium, 1,8 bar Säulenvordruck	Auflösung	1000
Thermodesorption (Material für die Röhrchenfüllung siehe Anhang B-1)	Perkin Elmer ATD 400		
	Split: 1/20		
	Desorptionstemperatur: 390°C/15min		
	Kryofocusierung (Tenax TA):		
	Starttemperatur: 5°C		
	Endtemperatur: 280°C/10min		
	Transferline:		
Unfused capillary column			
Temperatur: 225°C			
Temperaturprogramm	50°C, 2min, 3°C min ⁻¹ , 180°C, 10°C min ⁻¹ , 320°C, 5min		

PCB			
HRGC: Hewlett Packard 5890 series II		LRMS: SSQ7000 HRMS: MAT95	
Kapillarsäule	J&W DB5ms Länge: 60m Innendurchmesser: 0,25mm Filmdicke: 0,1µm	Ionisationsmode Ionisationsenergie Quellentemperatur Interfacetemperatur	EI 70eV 150°C 260°C (MAT95) 280°C
Trärgas	Helium, 2bar Säulenvordruck	Auflösung	1000 (SSQ7000) 8500 (MAT95)
Injektion	Gerstel KAS 3 (MAT95) Split/Splitlos Split 1/50 Temperatur: 280°C		
Temperaturprogramm	90°C, 1min, 20°C min ⁻¹ , 170°C, 7,5min, 3°C min ⁻¹ , 280°C, 10min		

PCPh			
HRGC: Hewlett Packard 5890 series II		LRMS: SSQ 7000	
Kapillarsäule	J&W DB5ms Länge: 60m Innendurchmesser: 0,25mm Filmdicke: 0,1µm	Ionisationsmode Ionisationsenergie Quellentemperatur Interfacetemperatur	EI 70eV 150°C 280°C
Trärgas	Helium, 2bar Säulenvordruck	Auflösung	1000
Injektion	Split/Splitlos Split 1/50 Temperatur: 280°C		
Temperaturprogramm	60°C, 1min, 20°C min ⁻¹ , 260°C, 8min		

7. ANHANG

PAK

HPLC: Hewlett Packard		Fluoreszenzdetektor:
Series 1100		HP 1046A
Säule	Vydac 201TP54 (C ₁₈ -Phase)	Anregungswellenlängen:
	Länge: 250mm	246 nm - 294 nm
	Innendurchmesser: 4,6mm	Emissionswellenlängen:
	Filmdicke: 5µm	330 nm - 492 nm
Laufmittel, Fluß, Temperatur	Acetonitril/Wasser; Fluß: 0,5ml/min;	
	Temperatur: 35°C	
Injektion	10µl	
Laufmittelgradientenprogramm	35 min: 58% Acetonitril/42% Wasser	
	35-45 min: 100% Wasser	

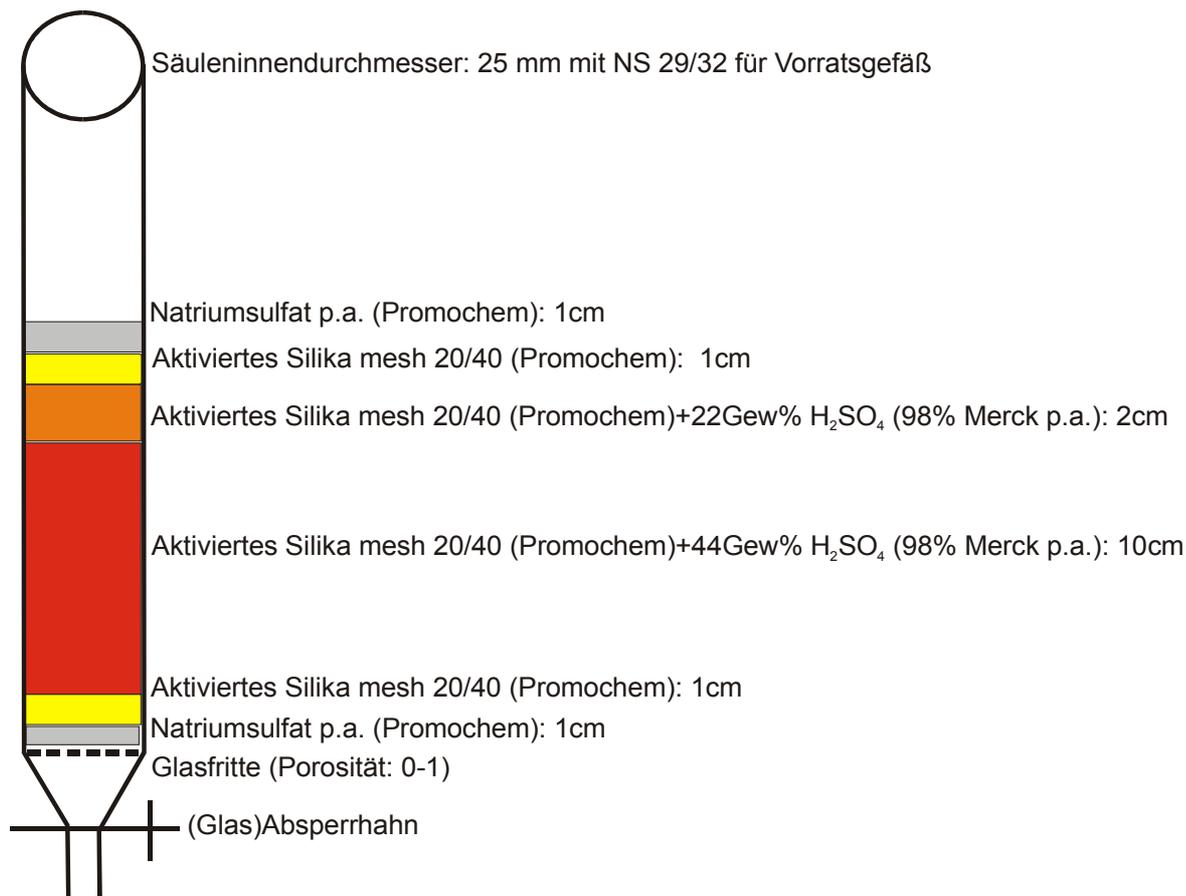
Anhang B-3: Für die Quantifizierung verwendete isotopenmarkierte Standards und eingesetzte Standardmengen

Polychlorierte Dibenzo-p-dioxine		Polychlorierte Dibenzofurane		Polychlorierte Biphenyle	
Probenahmestandards:	Konzentration (pg/µl)		Konzentration (pg/µl)	Wiederfindungsstandard	Konzentration (pg/µl)
¹³ C ₆ -1,2,3,4-TCDD	500	Aufarbeitungsstandard:		¹³ C ₁₂ -1,2,3,4-TCDD	500
¹³ C ₁₂ -1,2,3,7,8,9-HxCDD	500	¹³ C ₁₂ 2,8-DiCDF	100	4-MCB	800
Wiederfindungsstandard:		¹³ C ₁₂ 2,3,7,8-TCDF	100	4,4'-DiCB	800
¹³ C ₁₂ -1,2,3,4-TCDD	100	¹³ C ₁₂ 1,2,3,7,8-PeCDF	400	2,4,4'-TriCB	800
Aufarbeitungsstandard		¹³ C ₁₂ 2,3,4,7,8-PeCDF	200	2,2',5,5'-TeCB	700
¹³ C ₁₂ 2,7-DiCDD	100	¹³ C ₁₂ 1,2,3,4,7,8-HxCDF	300	3,3',4,4'-TeCB	1000
¹³ C ₁₂ 2,3,7-TriCDD	100	¹³ C ₁₂ 1,2,3,6,7,8-HxCDF	300	2,2',4,5,5'-PeCB	1000
¹³ C ₁₂ 2,3,7,8-TCDD	100	¹³ C ₁₂ 1,2,3,7,8,9-HxCDF	300	2,3,3',4,4'-PeCB	1000
¹³ C ₁₂ 1,2,3,7,8-PeCDD	250	¹³ C ₁₂ 2,3,4,6,7,8-HxCDF	300	3,3',4,4',5-PeCB	700
¹³ C ₁₂ 1,2,3,4,7,8-HxCDD	200	¹³ C ₁₂ 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	400	2,2',4,4',5,5'-HxCB	1200
¹³ C ₁₂ 1,2,3,6,7,8-HxCDD	200	¹³ C ₁₂ 1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	400	2,2',3,4,4',5'-HxCB	700
¹³ C ₁₂ 1,2,3,7,8,9-HxCDD	200	OCDF	900	3,3',4,4',5,5'-HxCB	900
¹³ C ₁₂ 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	300			2,2',3,4,4',5,5'-HpCB	1000
OCDD	900			2,2',3,3',4,4',5,5'-OCB	700
				2,2',3,3',4,4',5,5',6-NCB	1000
				2,2',3,3',4,4',5,5',6,6'-DCB	800

Chlorbenzole	Konzentration	BTX, MeNap	Konzentration	Chlorphenole	Konzentration
¹³ C ₆ MCBz	10 ng/µl	¹³ C ₆ Benzol	20 ng/µl	¹³ C ₆ 4-MCPh	10 ng/µl
¹³ C ₆ 1,4-DiCBz	10 ng/µl	² H ₈ Toluol	20 ng/µl	¹³ C ₆ 2-MCPh	10 ng/µl
¹³ C ₆ 1,2,4-TriCBz	10 ng/µl	² H ₁₀ <i>p</i> -Xylol	20 ng/µl	¹³ C ₆ 2,4-DiCPh	10 ng/µl
¹³ C ₆ 1,2,4,5-TeCBz	10 ng/µl	² H ₆ Naphthalin	20 ng/µl	¹³ C ₆ 2,4,5-TriCPh	10 ng/µl
¹³ C ₆ PeCBz	10 ng/µl	Wiederfindungsstandard		¹³ C ₆ 2,3,4,5-TeCPh	10 ng/µl
¹³ C ₆ HxCBz	10 ng/µl	² H ₁₀ Ethylbenzol	20 ng/µl	¹³ C ₆ PeCPh	10 ng/µl
Wiederfindungsstandard				Wiederfindungsstandard:	
² H ₆ Naphthalin	20 ng/µl			<i>Pentachlortoluol</i>	20 ng/µl

Anhang B-4: Aufarbeitungsvorschrift für PCPh

1. **Elution** der Cabotrapröhrchen mit:
 1. 12 ml Dichlormethan,
 2. 3 ml Toluol
 3. 10 ml Hexan/Dichlormethan (1/1 Vol%)
2. **Gegenschütteln** der organischen Phasen mit 150 ml K_2CO_3 (0,2 molar, pH-Wert = 10).
3. **Versetzen** und **ausschütteln** der wässrigen Phase mit 10 ml Hexan und 2 ml Essigsäureanhydrid p.A. (Firma Merck, Reinheit > 98,5%). **Abtrennen** der organische Phase.
4. **Nochmaliges Ausschütteln** der organischen Phase mit 10 ml Hexan und **vereinigen** mit den ersten 10 ml Hexan (Insgesamt circa 20 ml organische Phase).
5. **Einengen** der organische Phase (20 ml Hexan) auf circa 50µl mit der Wiederfindungsstandardlösung (Pentachlortoluol) zur Messung am HRGC/LRMS.

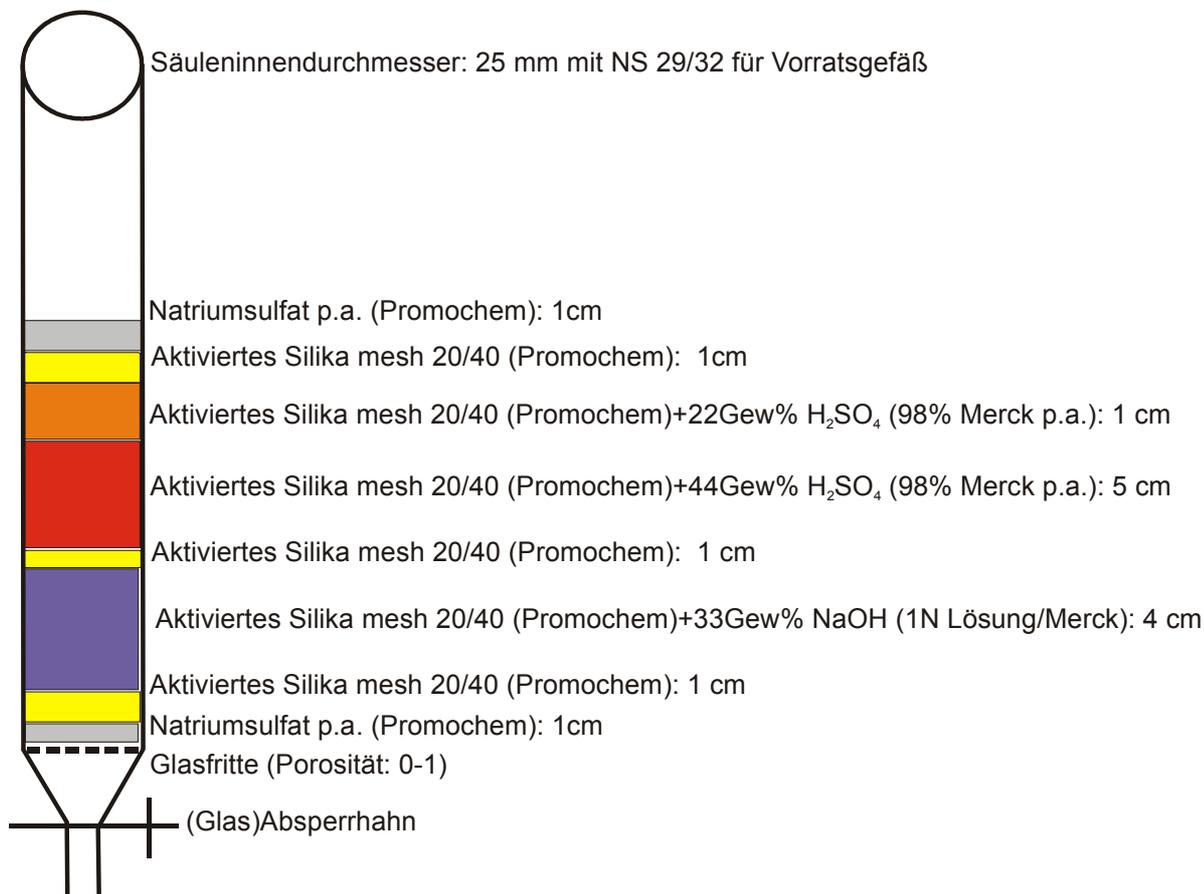
Anhang B-5: Anleitungen zur säulenchromatographischen Reinigung der Chloraromaten**Saure Säule:****Beschreibung:**

Die Befüllung der Säule wird entweder trocken mit nachfolgendem Befeuchten des Säulenbettes mit *n*-Hexan (z.T. unter Druck mit N_2) oder durch vorheriges Aufschlemmen der Adsorbentien in *n*-Hexan durchgeführt. Das Bett darf nach dem Packen keinerlei Risse, Luftblasen, etc. aufweisen.

Die Elution der Säule erfolgt mit 300 ml Hexan/Dichlormethan (98/2 Vol.%/Vol%). Bei weniger stark verschmutzten Proben (z. B. Reingasproben) kann die Menge des 44 Gew.% H₂SO₄ Silika halbiert werden und damit reduziert sich das Volumen an Hexan/Dichlormethan auf 200 ml.

Das Aufgabevolumen der Probe sollte 1-1,5 ml Toluol (Extraktionslösungsmittel) nicht übersteigen, da es sonst sehr leicht auf der Säule zu Durchbrüchen der Matrix kommen kann.

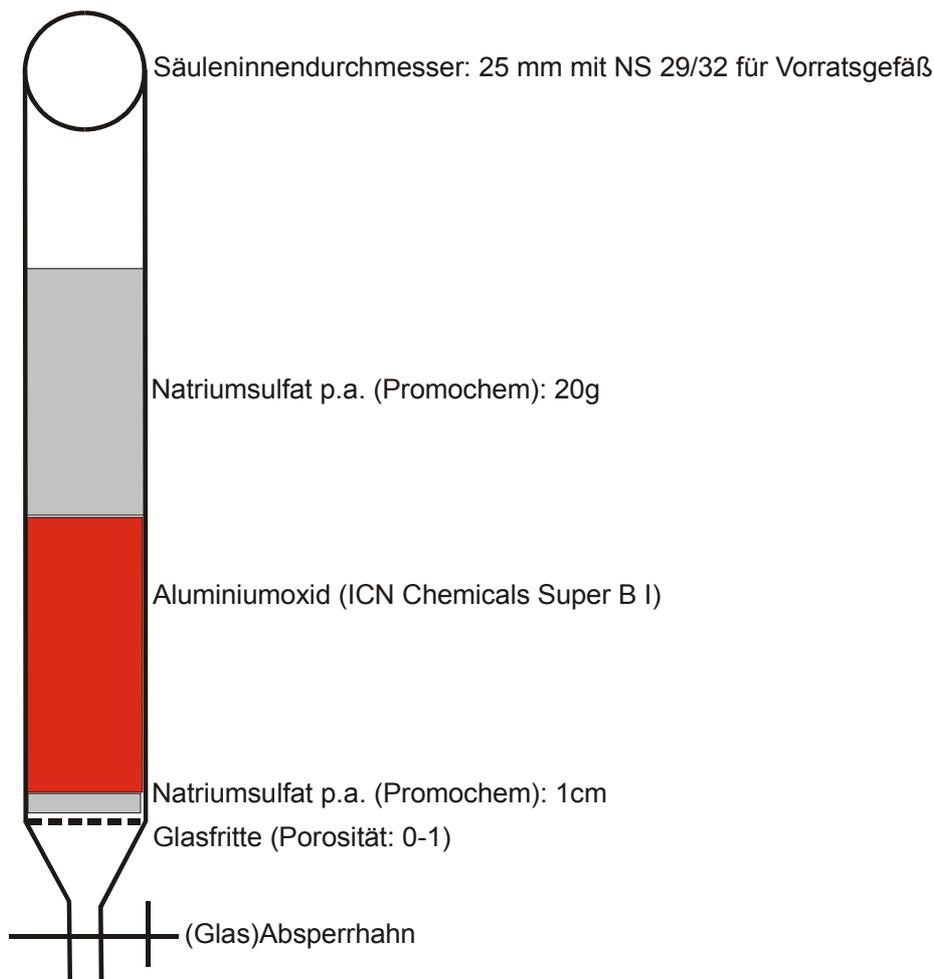
Saure-basische Säule:



Beschreibung:

Der Unterschied zur sauren Säule ist die Verwendung von basischen Silika zur Verseifung von Störkomponenten. Bei hoher Organikbelastung der Proben kann diese Säule eingesetzt werden.

Die Elution erfolgt in Analogie zur sauren Säule mit 300 ml Hexan. Die Adsorbentienmengen können bei geringer Organikbelastung der Probe halbiert werden, dann wird die Säulenpackung mit 200 ml Hexan eluiert.

Alox-Säule:**Beschreibung:**

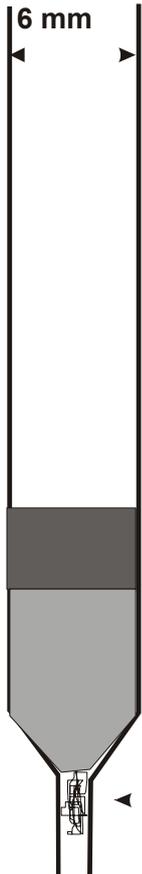
Was in keinem Lehrbuch steht: Manchmal treten Alkane aus dem Laborspülmittel als Störkomponenten bei den Messungen am HRGC/HRMS auf. Um diese von den Zielkomponenten abzutrennen, sollte jede Aloxsäule mit 7-10 Pipetten Hexan/Dichlormethan (50/50 Vol%/Vol%) vor der Befüllung mit den Adsorbentien durchgespült werden.

Die Befüllung kann trocken oder naß erfolgen. Das zur Trennung verwendete Bett darf keine Risse oder Luftblasen aufweisen.

Das aufgebene Probenvolumen sollte um die 500-1000 µl liegen, auf keinen Fall höher.

Die Elution erfolgt mit 80 ml Benzol und nachfolgend mit 200 ml Hexan/Dichlormethan (98/2 Vol%/Vol%, d.h. 196 ml Hexan/4 ml Dichlormethan). In diesen zwei Fraktionen befinden sich PCB's, PCBz, PCN und aliphatische und aromatische Störkomponenten.

Die dritte Fraktion besteht 200 ml Hexan/Dichlormethan 50/50 (Vol%/Vol%), in dieser Fraktion befinden sich die PCDD/F.

Kleine Alox-Säule:**Vorbereitung und Elution:**

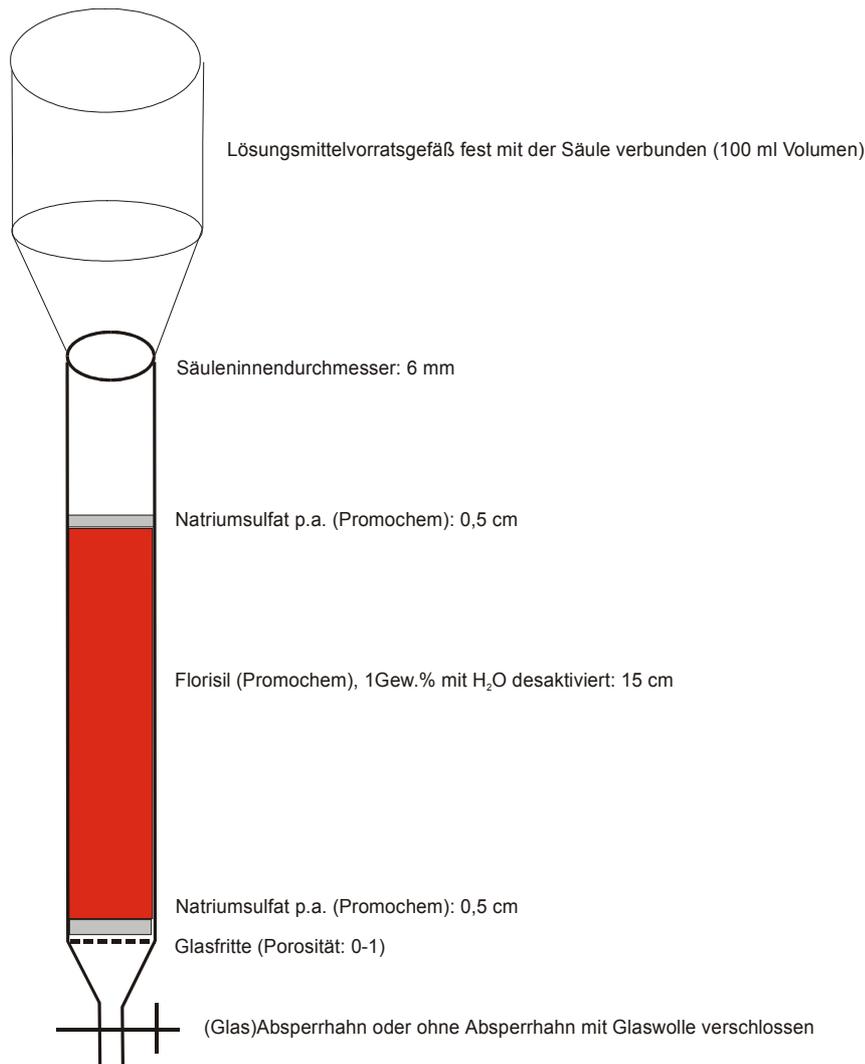
Anwendung: Nachreinigung der PCDD/F Fraktion der großen Alox-Säule bei alkanischen Verunreinigungen.

Die bei 280°C ausgeheizten Pasteurpipetten werden wie in der Zeichnung gezeigt befüllt und dann mit n-Hexan vorgespült. Die Elution erfolgt nach der Probenaufnahme mit 10 ml n-Hexan (wird verworfen) und danach mit 2 ml Dichlormethan (enthält die PCDD/F).

0,2 g Na_2SO_4

0,3 g Aluminiumoxid

Ausgeheizte Glaswolle

Florisil Säule:***Beschreibung:***

Diese Säule wird zur Nachreinigung der PCDD/F-Fraktion bei Verunreinigungen mit Fetten oder Alkanen eingesetzt. Das Packen der Säule erfolgt entweder trocken oder naß, dabei ist darauf zu achten, daß das Säulenbett keine Riss oder Luftblasen aufweist.

Das Probenaufgabevolumen sollte bei 300-600µl n-Hexan liegen, auf keinen Fall höher.

Die Elution erfolgt zuerst mit 50 ml n-Hexan, in welchem sich die abzutrennenden Verunreinigungen befinden. In der zweiten Fraktion von 70 ml Toluol/Dichlormethan (9:1 Vol%/Vol%) finden sich die gesuchten PCDD/F wieder.

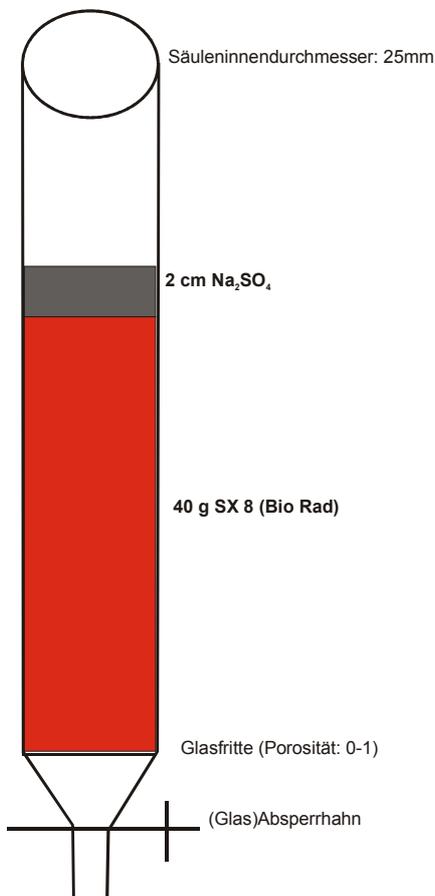
GPC (Gelpermeationschromatographie)**Beschreibung:**

Das Gel (SX-8 von Bio Rad) wird über Nacht im Laufmittel (hier: Toluol) aufgeschlämmt und dann in die Glassäule wie oben gezeigt überführt. Die Schicht Natriumsulfat am Anfang des Gelbettes soll dieses vor Verunreinigungen usw. schützen. Zur Vorreinigung wurde die Säule mit circa 500 ml Toluol gespült.

Die Probe, circa 1 ml, wird auf das Säulenbett aufgegeben und sickert komplett ein. Auch das Lösungsmittel zum Spülen des Probenkolbens (zweimal circa eine halbe Pasteurpipette aus der 1. Lösungsmittelfraktion) werden auf die Säule aufgegeben und müssen komplett in das Bett einsickern. Im Anschluß daran wird ein Lösungsmittelvorratsgefäß mit Toluol (Lösungsmittel für alle drei Fraktionen) auf die Säule aufgesetzt und folgende Fraktionen geschnitten:

1. Fraktion (PCDD/F, PCB, PCBz): 52 g (hieraus werden auch die zwei halben Pasteurpipetten zum Spülen des Probenkolbens entnommen)
2. Fraktion (PAK): 48 g
3. Fraktion: 50 g (Reinigung der Säule, verworfen)

Wichtig ist bei der Anwendung, daß das gepackte Bett keinerlei Lufteinschlüsse oder Risse zeigt, sonst erfolgt eine falsche Fraktionierung. Die Säule kann für circa 150 Emissionsproben verwendet werden, danach sollte das Bett erneuert werden.



7.4 Anhang C: Anhang zu Kapitel 4

Anhang C-1: Gemessene Konzentrationen in (ng/m³)**PVA:**

Versuchsnummer Laborlaufnummer	V1 c9701019	V2 c9701020	V3 c9701021	V4 c9702060	V5 c9702016	V6 c9702017	V7 c9702018	V8 c9702019	V9 c9702061
1-MCDD	29.19	44.17	5.97	11.28	11.47	7.75	106.89	462.73	2414.99
2-MCDD	18.78	8.63	1.57	3.38	5.98	2.78	85.73	184.63	1308.25
1,3-DiCDD	34.01	17.09	8.42	13.73	8.03	9.94	16.42	69.32	615.27
2,7/2,3/2,8-DiCDD	20.14	35.28	11.11	11.53	45.90	17.42	15.74	49.60	421.98
1,4/1,7-DiCDD	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	11.06	15.67	257.01
1,8-DiCDD	n.n.	n.n.	n.n.	0.67	n.n.	n.n.	n.n.	13.64	262.13
1,6-DiCDD	n.n.	2.06	79.68						
1,2-DiCDD	n.n.	n.n.	n.n.	1.86	4.47	n.n.	14.23	2.45	175.30
1,9-DiCDD	11.68	8.29	1.37	2.61	n.n.	1.50	10.39	5.92	80.27
1,3,7-TriCDD	6.52	9.22	8.27	7.58	8.52	9.03	2.39	4.13	65.19
1,3,8-TriCDD	6.97	6.43	8.61	6.92	12.96	6.20	1.02	4.93	69.67
1,3,6-TriCDD	n.n.	n.n.	n.n.	3.71	5.77	n.n.	1.25	1.57	37.43
1,2,4-TriCDD	n.n.	n.n.	n.n.	1.26	1.90	n.n.	n.n.	0.76	25.15
1,3,9/2,3,7-TriCDD	55.25	34.10	7.98	7.23	5.66	9.78	4.62	6.73	138.12
1,4,7-TriCDD	n.n.	n.n.	n.n.	7.26	4.23	n.n.	5.03	2.16	34.85
1,2,3-TriCDD	n.n.	n.n.	n.n.	1.64	0.89	n.n.	n.n.	1.86	30.08
1,7,8-TriCDD	4.54	7.36	1.32	1.57	1.24	1.44	n.n.	4.64	45.35
1,2,7-TriCDD	n.n.	n.n.	n.n.	4.46	1.33	n.n.	n.n.	1.85	37.98
1,2,8-TriCDD	n.n.	n.n.	n.n.	5.56	0.92	n.n.	n.n.	2.23	41.59
1,4,6-TriCDD	n.n.	n.n.	n.n.	3.86	2.01	0.59	n.n.	1.27	29.77
1,2,6-TriCDD	n.n.	n.n.	n.n.	3.99	0.85	n.n.	n.n.	0.26	26.56
1,2,9-TriCDD	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	1.99	n.n.	n.n.	1.26	38.30
2,3,7,8-TCDD	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	1.72	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1,3,6,8-TCDD	23.82	44.75	9.01	53.81	64.82	6.24	5.29	0.51	12.33
1,3,7,9-TCDD	25.38	47.98	6.73	23.12	36.79	6.68	8.50	0.38	2.22
1,3,7,8-TCDD	n.n.	25.38	n.n.	11.12	16.34	3.68	3.32	1.40	8.90
1,3,6,9/1,2,4,7/1,2,4,8-TCDD	9.77	10.58	n.n.	n.n.	20.25	1.70	2.51	0.38	11.20
1,2,6,8-TCDD	n.n.								
1,4,7,8-TCDD	n.n.								
1,2,4,6/1,2,4,9-TCDD	n.n.	n.n.	4.40	n.n.	n.n.	2.82	2.01	n.n.	3.58
1,2,3,4/1,2,3,7/1,2,3,8-TCDD	n.n.	17.25	4.43	n.n.	18.20	2.86	1.96	0.47	18.45
1,2,3,6/1,2,7,9-TCDD	13.24	15.80	5.36	n.n.	16.96	3.51	3.39	0.47	14.15
1,2,7,8/1,4,6,9-TCDD	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	4.13	n.n.	n.n.	0.30	2.41
1,2,3,9-TCDD	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	6.96	1.54	n.n.	n.n.	n.n.
1,2,6,9-TCDD	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	5.63	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1,2,6,7-TCDD	n.n.	1.09							
1,2,8,9-TCDD	n.n.								
1,2,3,7,8-PeCDD	16.59	37.25	13.88	5.70	17.96	17.88	12.34	2.01	1.14
1,2,4,7,9/1,2,4,6,8-PeCDD	70.85	131.72	14.20	9.84	134.65	14.87	12.73	2.75	12.32
1,2,3,6,8-PeCDD	53.94	75.91	8.66	6.58	89.87	9.24	n.n.	0.89	n.n.
1,2,4,7,8-PeCDD	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	12.75	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1,2,3,7,9-PeCDD	35.35	88.23	9.66	8.04	51.10	12.29	8.76	1.26	1.57
1,2,4,6,9/1,2,3,4,7-PeCDD	n.n.	n.n.	n.n.	4.11	38.09	n.n.	n.n.	n.n.	0.71
1,2,3,6,9-PeCDD	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	19.44	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1,2,4,6,7-PeCDD	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	11.05	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1,2,4,8,9-PeCDD	n.n.	0.43							
1,2,3,4,6-PeCDD	n.n.	n.n.	n.n.	6.82	12.18	n.n.	n.n.	n.n.	0.71
1,2,3,6,7-PeCDD	n.n.	n.n.	n.n.	5.31	14.51	n.n.	n.n.	0.52	0.71
1,2,3,8,9-PeCDD	n.n.	16.04	n.n.	n.n.	10.73	n.n.	n.n.	0.15	0.85
1,2,3,4,7,8-HxCDD	n.n.	34.22	n.n.						
1,2,3,6,7,8-HxCDD	n.n.	60.80	9.57	n.n.	39.46	n.n.	n.n.	1.69	0.52
1,2,3,7,8,9-HxCDD	n.n.	76.80	n.n.	n.n.	28.52	5.40	n.n.	0.73	0.44
1,2,4,6,7,9/1,2,4,6,8,9/1,2,3,4,6,8-HxCDD	174.95	301.24	35.25	40.48	238.27	36.94	23.25	7.55	10.08
1,2,3,6,7,9/1,2,3,6,8,9-HxCDD	81.97	193.16	19.24	n.n.	81.32	20.44	13.51	7.64	3.68
1,2,3,4,6,9-HxCDD	n.n.	0.26							
1,2,3,4,6,7-HxCDD	n.n.	46.22	n.n.	n.n.	28.09	n.n.	n.n.	n.n.	0.35
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	136.59	388.59	37.17	40.35	111.17	46.71	27.70	44.63	15.99
1,2,3,4,6,7,9-HpCDD	160.84	306.07	29.19	32.85	112.13	32.58	21.75	6.97	9.51
OCDD	347.35	647.81	135.02	132.07	134.84	142.08	79.65	24.73	9.78

7. ANHANG

Versuchsnummer Laborlaufnummer	V1 c9701019	V2 c9701020	V3 c9701021	V4 c9702060	V5 c9702016	V6 c9702017	V7 c9702018	V8 c9702019	V9 c9702081
1-MCDF	613.86	98.33	897.39	297.07	319.70	869.16	6333.66	6283.40	35174.73
3-MCDF	981.42	21.41	239.63	489.93	424.59	239.25	8998.25	12226.55	56625.74
2-MCDF	1091.40	55.04	95.94	454.35	402.86	242.93	9478.42	11917.78	49194.85
4-MCDF	95.73	51.02	114.07	26.39	8.16	58.84	n.n.	310.92	1228.71
1,3-DiCDF	80.00	11.75	25.74	36.74	36.62	36.99	1081.97	422.90	3650.13
1,7-DiCDF	148.04	14.46	20.99	74.87	68.54	40.66	1896.92	488.86	5236.79
1,4-DiCDF	n.n.	n.n.	n.n.	1.38	n.n.	10.72	114.34	n.n.	11.67
1,8-DiCDF	101.24	n.n.	n.n.	39.56	42.06	n.n.	1732.87	353.31	4382.25
1,6-DiCDF	38.65	n.n.	n.n.	2.77	8.76	32.15	24.42	2.35	376.24
1,2-DiCDF	109.85	20.79	41.61	43.22	58.51	101.82	823.15	493.86	3844.21
2,4-DiCDF	105.74	24.89	60.11	52.05	55.18	86.37	256.43	38.06	2361.50
3,7-DiCDF	91.86	8.04	22.23	37.14	33.52	31.94	835.91	299.10	3133.28
2,7-DiCDF	n.n.	2.55	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	10.77	n.n.	18.93
2,3-DiCDF	155.57	12.76	17.77	52.98	50.84	25.53	1805.68	588.23	5509.89
2,8/3,6-DiCDF	155.12	4.25	n.n.	69.22	63.17	31.63	1070.01	739.07	4943.70
2,6-DiCDF	79.23	n.n.	n.n.	32.44	27.02	n.n.	824.86	375.92	3995.79
1,9/3,4-DiCDF	176.63	n.n.	n.n.	46.76	40.37	10.51	967.06	310.51	2681.35
4,6-DiCDF	68.95	3.79	7.75	27.68	27.13	11.14	395.62	92.68	2518.33
1,3,7-TriCDF	18.44	5.26	4.97	20.27	19.77	7.14	489.37	75.73	829.03
1,3,8-TriCDF	14.93	n.n.	n.n.	18.87	17.41	n.n.	414.41	64.42	527.22
1,3,6-TriCDF	4.06	n.n.	n.n.	8.62	6.60	n.n.	201.81	27.56	505.64
1,3,4/1,4,8-TriCDF	17.50	7.27	n.n.	17.75	14.60	n.n.	223.59	35.32	527.36
1,2,4/1,6,7-TriCDF	12.72	21.80	6.00	20.11	22.94	8.62	28.20	1.48	341.99
1,7,8-TriCDF	32.92	56.43	9.51	20.47	23.04	13.66	223.97	55.76	681.48
1,2,3-TriCDF	16.32	27.98	11.85	34.67	32.02	38.04	70.68	42.56	375.56
1,2,7-TriCDF	18.26	31.31	7.68	23.59	20.34	11.03	281.91	76.41	814.93
1,2,9-TriCDF	18.58	31.85	5.70	8.45	9.99	8.20	118.33	19.09	420.85
1,3,9-TriCDF	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	6.45	n.n.	42.42
2,4,7-TriCDF	41.53	71.20	16.16	36.03	38.05	23.22	216.74	51.72	612.33
1,2,6/1,2,8-TriCDF	21.87	37.49	20.84	21.35	21.70	71.97	218.23	65.50	592.22
2,4,8-TriCDF	n.n.	n.n.	n.n.	2.12	4.08	n.n.	14.35	1.59	129.92
1,4,9-TriCDF	62.14	106.52	13.02	30.92	26.71	18.70	196.76	34.42	571.93
2,3,7-TriCDF	38.65	66.25	15.14	30.39	27.96	21.75	99.92	40.96	467.55
1,6,8/2,3,4/2,3,8-TriCDF	41.31	70.81	15.79	28.24	31.14	75.23	233.42	87.64	949.87
2,3,8/3,4,7-TriCDF	2.03	3.48	3.29	n.n.	n.n.	4.73	n.n.	n.n.	n.n.
2,6,7-TriCDF	122.20	209.49	15.36	130.25	122.50	22.07	277.93	130.57	1281.94
1,4,6/1,4,7-TriCDF	81.08	138.99	21.79	34.45	36.61	94.36	156.37	149.13	1609.78
3,4,6-TriCDF	45.82	78.54	8.48	2.12	23.76	12.19	133.35	41.28	680.07
2,4,6-TriCDF	43.97	75.37	12.80	25.67	25.69	18.39	90.90	53.30	648.45
2,3,7,8-TCDF	32.82	45.75	6.23	12.75	41.79	15.50	33.93	21.85	108.23
1,3,6,8-TCDF	18.68	79.95	4.65	24.15	9.62	13.05	116.01	20.00	148.69
1,3,7,8/1,3,7,9-TCDF	28.41	178.58	3.84	22.16	29.55	21.60	132.99	45.87	219.66
1,3,4,7-TCDF	13.43	22.67	n.n.	6.47	17.65	7.83	35.12	n.n.	123.46
1,4,6,8-TCDF	27.80	38.19	4.67	8.83	28.34	9.96	62.85	11.51	131.75
1,2,4,7/1,3,6,7-TCDF	20.42	48.85	3.96	12.60	27.56	13.53	80.83	22.71	171.46
1,3,4,8-TCDF	15.83	33.87	n.n.	6.44	21.36	9.49	55.05	6.93	130.35
1,3,4,6/1,2,4,8-TCDF	27.05	37.15	5.49	10.03	32.03	10.81	53.06	17.83	152.35
1,2,4,6/1,2,6,8/1,2,3,7/1,4,7,8/1,3,6,9-TCDF	82.83	148.21	15.68	39.22	97.66	38.72	177.07	88.26	481.67
2,3,4,9/1,2,3,4/2,4,6,8/1,2,3,8-TCDF	114.76	104.68	3.55	17.70	34.16	39.51	135.15	44.75	489.89
1,3,4,9-TCDF	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	10.48	3.83	8.89	n.n.	42.08
1,2,7,8-TCDF	33.50	77.82	8.55	5.88	29.75	20.01	61.33	39.93	197.44
1,2,6,7/1,2,7,9-TCDF	20.59	23.78	2.29	6.45	19.07	9.75	26.61	3.58	131.58
1,4,6,9-TCDF	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	10.60	2.14	5.40	n.n.	14.79
2,3,6,8/1,2,4,9-TCDF	40.25	51.11	5.29	18.81	60.66	13.76	61.06	29.66	164.35
2,4,6,7-TCDF	48.01	35.12	6.23	17.80	84.85	12.83	37.38	23.15	151.82
1,2,3,9/2,3,4,7-TCDF	48.01	35.12	6.23	17.80	94.61	12.83	41.17	23.15	159.68
1,2,6,9-TCDF	37.76	33.08	3.34	11.53	37.52	11.46	25.07	17.81	124.02
2,3,4,8-TCDF	41.51	29.37	5.06	8.53	41.79	11.15	30.37	16.08	n.n.
2,3,4,6-TCDF	38.06	27.00	5.06	8.49	45.21	13.94	17.58	21.01	108.42
2,3,6,7-TCDF	55.11	47.33	7.38	13.88	23.93	23.11	39.87	36.52	n.n.
3,4,6,7-TCDF	28.84	26.69	4.88	6.89	27.44	14.07	15.69	8.06	92.19

7. ANHANG

Versuchsnummer Laborlaufnummer	V1 c9701019	V2 c9701020	V3 c9701021	V4 c9702060	V5 c9702016	V6 c9702017	V7 c9702018	V8 c9702019	V9 c9702061
1,2,3,7,8-PeCDF	63.32	76.70	9.93	11.14	68.60	26.18	35.16	18.24	91.02
2,3,4,7,8-PeCDF	55.40	45.10	6.44	7.97	63.91	22.62	19.37	12.03	60.06
1,3,4,6,8-PeCDF	31.90	38.95	n.n.	n.n.	41.80	7.48	23.64	1.28	46.47
1,2,4,6,8-PeCDF	40.94	43.18	5.41	7.30	52.94	11.27	21.84	3.13	48.54
2,3,4,7,9-PeCDF	20.97	28.40	3.16	3.91	31.42	11.08	23.09	1.83	41.32
1,3,4,7,8-PeCDF	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	7.50	n.n.	8.53	n.n.	n.n.
1,3,4,7,9/1,2,3,6,8-PeCDF	54.36	65.64	6.35	10.14	70.22	18.59	36.66	6.84	75.95
1,2,4,7,8-PeCDF	34.77	48.41	5.40	7.97	39.15	12.39	27.00	7.00	61.17
1,2,4,7,9/1,3,4,6,7-PeCDF	47.46	38.03	n.n.	6.95	42.52	13.04	22.85	3.21	63.01
1,2,4,6,7-PeCDF	31.21	36.08	4.15	7.42	28.48	11.32	14.31	3.19	51.41
1,2,3,4,7/2,3,4,6,9-PeCDF	65.46	n.n.	n.n.	11.19	73.51	19.71	31.73	3.68	74.58
1,3,4,6,9-PeCDF	59.69	68.59	9.36	10.42	9.30	25.04	n.n.	16.35	86.95
1,2,3,4,6-PeCDF	32.22	26.27	n.n.	3.64	26.71	8.89	6.47	2.89	28.53
1,2,3,7,9-PeCDF	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	8.81	5.28	2.86	28.45
1,2,3,6,7-PeCDF	32.19	n.n.	4.11	4.13	19.68	10.40	11.20	2.15	39.11
1,2,4,6,9/2,3,4,6,8-PeCDF	41.89	42.61	5.30	10.42	47.14	n.n.	20.69	5.75	56.41
1,3,4,8,9-PeCDF	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	10.64	4.31	n.n.	n.n.	1.35
1,2,3,6,9-PeCDF	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	8.26	2.16	n.n.	n.n.	n.n.
2,3,4,8,9-PeCDF	68.12	51.95	4.73	9.15	116.39	15.16	20.32	11.20	52.96
1,2,3,4,9-PeCDF	8.82	n.n.	n.n.	n.n.	14.07	n.n.	n.n.	n.n.	0.72
1,2,4,8,9-PeCDF	9.75	n.n.	n.n.	n.n.	13.52	n.n.	n.n.	n.n.	0.80
1,2,3,8,9-PeCDF	n.n.								
2,3,4,6,7-PeCDF	78.08	75.80	7.35	13.48	89.85	n.n.	19.94	26.05	65.36
1,2,3,4,7,8-HxCDF	48.62	64.28	9.52	9.41	58.30	30.48	16.60	3.97	17.07
1,2,3,6,7,8-HxCDF	43.48	59.63	5.51	7.32	55.11	26.68	12.97	2.31	17.22
1,2,3,7,8,9-HxCDF	26.73	n.n.	n.n.	n.n.	17.30	10.30	n.n.	0.11	0.20
2,3,4,6,7,8-HxCDF	72.42	83.01	18.58	15.23	73.63	37.63	18.89	6.84	9.97
1,2,3,4,6,8-HxCDF	66.50	61.59	5.66	8.34	80.93	19.66	13.84	2.57	5.58
1,3,4,6,7,8/1,3,4,6,7,9-HxCDF	57.11	75.22	n.n.	12.93	74.74	27.71	n.n.	3.31	19.27
1,2,4,6,7,8-HxCDF	64.25	83.09	8.36	16.36	86.86	30.81	17.19	7.68	19.27
1,2,4,6,7,9-HxCDF	13.85	19.17	n.n.	n.n.	19.95	6.73	n.n.	n.n.	n.n.
1,2,4,6,8,9-HxCDF	n.n.	71.14	n.n.	12.06	n.n.	n.n.	10.61	n.n.	n.n.
1,2,3,4,6,7-HxCDF	76.36	70.88	7.05	11.44	58.63	30.75	10.67	6.14	9.45
1,2,3,6,7,9-HxCDF	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	8.24	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1,2,3,4,6,9/1,2,3,4,8,9-HxCDF	24.88	20.53	n.n.	n.n.	17.94	9.86	n.n.	0.17	1.00
1,2,3,4,8,9-HxCDF	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	7.59	n.n.	n.n.	0.29
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	128.80	188.06	18.67	34.99	128.10	116.90	29.15	11.30	21.47
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	63.58	n.n.	n.n.	n.n.	23.91	23.15	7.15	0.25	0.24
1,2,3,4,6,7,9-HpCDF	55.57	35.67	n.n.	n.n.	31.47	28.37	7.34	n.n.	n.n.
1,2,3,4,6,8,9-HpCDF	36.80	36.63	n.n.	n.n.	25.50	19.93	6.40	n.n.	0.07
OCDF	224.61	218.94	52.65	35.84	66.63	105.94	32.08	0.66	1.12
I-TEQ (NATO/CCMS)	65.43	94.09	16.34	12.79	80.33	36.27	26.58	12.27	50.70
I-TEQ (PCDD nach NATO/CCMS)	10.01	40.34	8.41	3.39	18.74	10.09	6.52	1.72	0.84
I-TEQ (PCDF nach NATO/CCMS)	55.42	53.75	7.94	9.40	61.59	26.19	20.06	10.55	49.87
I-TEQ (WHO)	73.22	111.94	23.12	15.49	89.13	44.99	32.65	13.25	51.26
I-TEQ (PCDD nach WHO)	17.99	58.39	15.23	6.12	27.60	18.90	12.62	2.70	1.40
I-TEQ (PCDF nach WHO)	55.22	53.56	7.89	9.37	61.53	26.09	20.03	10.55	49.87

7. ANHANG

Versuchsnummer Laborlaufnummer	V1 c9701019	V2 c9701020	V3 c9701021	V4 c9702060	V5 c9702016	V6 c9702017	V7 c9702018	V8 c9702019	V9 c9702061
#6	n.n.	n.n.	154036.84	166439.48	59223.85	73338.32	49624.94	19788.56	163564.23
#5,#8	39834.97	159267.17	491891.43	248196.74	189121.68	356150.86	240992.23	314393.02	457274.35
#11	n.n.	n.n.	n.n.	70069.79	n.n.	n.n.	18078.40	23584.67	191565.04
#13	26920.04	90792.32	130422.04	65807.87	n.n.	94431.25	89739.92	229450.21	289918.60
#15	69269.27	227338.33	616912.19	577427.70	169589.28	319367.77	129961.71	57167.58	143798.40
#19	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	2675.84	7988.81	7429.66	8132.00	7527.56
#18	100912.60	63046.35	241987.23	91647.78	38287.17	115150.42	86425.43	48586.58	50881.34
#17	n.n.	33774.14	88242.44	43681.17	17033.67	46943.70	40675.54	22992.69	50881.34
#24	n.n.	7250.18	24248.29	n.n.	4737.87	12042.15	9083.35	7494.43	n.n.
#32	87456.75	24327.76	96146.21	42986.97	17410.77	43603.77	34795.35	26588.84	36567.84
#16	98852.35	29816.91	93807.06	46875.40	19865.33	47152.99	37297.52	27702.22	41562.01
#28,#31	684599.01	214586.42	557802.93	435810.11	189755.66	395703.32	290876.67	184017.19	238261.04
#33	272052.92	76898.56	219948.69	167215.31	71022.00	151547.53	112454.00	78622.24	93365.12
#22	137764.44	40515.71	115429.43	90689.64	39701.26	79468.24	60485.81	50441.60	61124.07
#53	24626.18	7993.90	23950.92	12535.09	5509.09	14872.83	11773.19	6687.54	11338.88
#51	9907.93	3138.75	8610.56	4077.53	1983.09	5832.87	4383.88	2713.11	4792.86
#45	23216.55	7211.85	19771.70	10680.43	4887.80	13402.40	11219.26	6276.77	10809.69
#46	10005.61	2929.84	8716.92	5420.62	2248.62	5992.65	4695.19	3305.95	4765.80
#52	441311.88	134833.83	358153.79	315086.82	128668.73	271493.80	229234.59	131517.70	191956.60
#49	134689.46	38957.49	107523.25	67320.56	31151.35	78511.33	62453.52	35110.23	53440.34
#47,#48	64126.77	18680.43	49543.69	32234.56	15125.00	35823.05	30623.95	16387.58	24842.56
#44	182092.07	52773.17	157305.40	96227.32	44763.85	104091.40	88441.28	49047.70	81758.45
#42	35700.97	12184.67	28055.21	20342.73	9046.68	21401.26	18075.35	10320.61	14895.38
#64	40209.17	13352.49	30973.83	23267.65	10468.25	22477.29	18692.24	9934.99	15029.02
#71,#41	90877.58	27182.21	70182.21	48590.15	22531.88	49398.92	40154.79	21827.63	n.n.
#40	16781.97	5449.12	13803.95	9882.73	4878.71	10158.48	9148.42	4736.13	6890.31
#67	5511.37	n.n.	6511.84	n.n.	212.26	479.13	492.28	216.77	339.28
#63	6203.12	2089.07	4687.79	3573.45	1896.15	3780.40	3183.08	1787.44	2343.62
#74	n.n.	28271.19	58925.87	49375.93	22645.93	47814.96	37613.23	18493.93	22465.08
#70,#76	n.n.	76957.47	173825.73	144751.48	65173.55	133752.56	108023.86	67176.69	94840.95
#66	234742.47	40364.86	174823.28	72736.75	33419.19	67445.57	54314.55	32241.66	40954.39
#60,#56	49338.53	16615.46	35821.95	34206.50	16463.08	29824.96	25596.54	14130.03	18205.94
#81	4076.27	10027.53	3261.16	6418.24	2014.44	4651.57	3860.11	4949.46	5635.11
#77	6285.97	4519.73	4747.25	3476.49	1848.34	3621.22	2917.75	3098.64	2531.97
#100	6619.97	2172.54	5621.04	3434.36	1516.44	3704.75	3212.23	2017.56	3061.19
#95,#102	250082.89	80541.36	204088.53	117407.98	60464.42	131269.73	113144.77	72827.11	119618.51
#91	26682.40	9157.18	24033.89	14506.16	7317.93	16333.81	13907.84	8455.23	13277.24
#84,#92	94988.40	31794.26	76810.00	50456.22	10052.39	54090.98	45748.95	28520.21	43309.46
#101	258029.23	93182.73	190895.70	143944.37	66652.47	135128.88	115444.33	66830.24	98728.19
#99	73079.15	24998.64	59321.12	39111.61	19652.66	39038.14	34086.84	20885.23	29588.15
#119,#83,#86,#97,#87,#115,#85	159599.64	56626.45	128201.77	89970.78	43407.28	93998.68	80043.82	46104.40	66621.68
#87,#115,#85	102361.65	36776.38	77872.02	57148.52	27746.14	59983.54	51007.40	28697.49	41445.81
#110	203654.23	71817.33	146440.22	106624.15	49713.24	102546.86	90771.44	58878.18	85301.78
#82	12862.56	4888.65	9883.47	7951.90	3573.88	7906.45	7286.55	4127.45	5841.29
#107,#123,#124	15075.75	6578.19	11109.56	8694.61	4326.18	8398.73	6945.72	4386.81	5654.48
#118	97443.10	37185.09	69793.06	53418.27	25577.35	49264.20	42625.67	25326.38	30219.38
#114,#122	4253.55	1281.03	3062.76	2213.67	1734.50	2323.44	1985.51	1237.92	2793.57
#105	26152.46	9751.64	19254.83	15798.85	7732.21	15288.55	12533.84	7843.62	10678.19
#126	481.71	247.08	549.93	163.77	117.49	123.42	185.34	328.57	154.11

7. ANHANG

Versuchsnummer	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9
Laborlaufnummer	c9701019	c9701020	c9701021	c9702060	c9702016	c9702017	c9702018	c9702019	c9702061
#136	1449.99	18110.27	1146.91	16195.52	9459.55	18821.83	17784.58	10279.83	13927.89
#151	29185.94	18466.75	20730.38	13758.15	8810.14	15815.71	14735.21	11613.00	13175.38
#135,#144,#147	3218.10	12823.41	2281.38	11025.47	6757.79	12154.60	11261.68	8918.07	10930.83
#149	164057.90	62262.42	109183.97	44070.83	28854.49	50385.02	47633.18	36241.13	42606.51
#134	10997.83	4855.22	8154.35	3811.03	2383.31	4441.89	3893.06	3067.91	3485.66
#131	5340.72	2182.63	3897.32	1701.14	1083.47	2156.55	1963.33	1340.21	1492.19
#132,#146	23293.40	9432.93	15925.96	6571.98	4053.89	7364.09	6761.00	5333.38	5386.83
#153	148097.95	57090.55	96125.19	47750.08	26933.14	42796.61	39484.36	30599.68	38248.90
#141	34857.90	16082.43	23261.89	9264.52	6102.32	9494.66	9481.08	7998.71	8331.85
#137	4976.06	1688.85	3021.19	1721.94	1145.32	2336.19	2059.49	1227.82	1394.88
#130	7997.84	3252.74	5776.89	2297.28	1634.80	2920.51	2552.68	2039.34	2302.20
#160,#163	53444.10	24187.03	35717.49	12629.58	n.n.	13740.65	12986.17	11632.17	11262.12
#138	120748.72	54405.87	78656.02	34110.54	19478.14	30594.59	27442.50	24880.37	26857.39
#129,#158	5670.73	2789.70	4239.83	1911.93	1318.36	2389.09	2000.06	1432.40	1718.36
#167	470.87	n.n.	n.n.	104.50	58.81	162.25	n.n.	n.n.	n.n.
#128,#159	17825.18	7981.65	11750.72	5829.41	3600.34	5492.97	5386.09	4258.43	4954.85
#156	12520.60	6813.73	8331.96	2876.51	2057.17	2683.87	2520.19	2460.18	2807.31
#157	1825.30	873.81	1097.41	332.20	387.11	517.03	419.54	414.94	394.24
#169	96.30	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#179	17192.09	7626.16	80.89	3542.85	2574.79	4255.89	4502.03	4382.96	4258.94
#176	7136.52	3255.08	5265.78	1339.18	935.82	1734.44	1556.74	1525.37	1445.23
#178	5657.19	2738.61	4079.11	1109.45	986.74	1206.89	1242.35	1364.44	1142.22
#175	1733.75	902.41	1020.12	318.06	236.62	265.29	330.83	345.24	291.82
#187	28976.35	12325.22	18719.13	5022.92	3936.44	5391.43	5891.54	6195.14	5511.49
#183	18863.43	8217.31	11931.19	3341.88	2421.12	3513.86	3583.26	3639.06	3503.05
#185	3491.27	1514.48	2013.96	537.18	462.66	660.31	587.95	912.52	526.36
#174	29224.12	14675.50	18693.53	5366.49	4229.97	4861.50	5702.81	6922.18	6092.44
#177	17899.92	8389.97	11255.78	3150.84	2505.00	3433.21	3771.02	4126.20	3399.28
#171	10829.62	5604.46	6810.46	1720.41	1402.16	1591.10	2101.91	2139.56	2002.07
#173	1039.87	420.29	719.78	191.56	126.05	159.35	246.97	247.75	174.75
#172	4950.32	2220.64	3068.21	789.68	746.61	780.95	877.45	1201.17	800.06
#180,#193	49973.70	23120.72	32409.33	8839.67	6848.96	9128.42	9088.88	10451.72	8800.83
#191	1942.87	851.63	1138.89	304.37	292.14	327.78	418.30	355.93	308.22
#170	34197.25	17704.45	20939.91	5928.84	4624.59	5296.08	5959.93	6822.18	6632.49
#190	n.n.	n.n.	n.n.	51.36	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#189	147.01	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#202	654.59	461.51	684.29	239.66	106.62	n.n.	145.48	n.n.	168.58
#200	n.n.	n.n.	n.n.	201.49	101.74	n.n.	n.n.	n.n.	150.44
#199	733.17	406.25	479.51	113.32	101.37	n.n.	n.n.	n.n.	200.59
#198	182.18	n.n.	179.52	n.n.	n.n.	n.n.	120.59	n.n.	n.n.
#201	3247.93	1622.01	2170.27	676.18	513.76	765.60	584.32	568.95	679.51
#203,#196	4525.12	1985.25	3230.32	704.77	598.47	718.25	564.26	695.32	703.62
#195	1989.13	1099.27	1578.81	452.10	312.86	299.45	259.05	445.24	416.42
#194	3112.33	1725.97	3157.62	606.68	381.18	690.14	354.02	667.61	741.62
#205	398.59	1725.97	3157.97	609.08	381.18	698.79	n.n.	n.n.	735.06
TEQ (nach Safe)	328.83	188.12	314.19	224.88	113.46	209.77	182.11	143.43	139.89
TEQ (WHO)	79.38	38.81	76.05	29.30	19.06	24.83	29.35	41.01	25.08

7. ANHANG

Versuchsnummer	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9
Laborlaufnummer	c9701019	c9701020	c9701021	c9702060	c9702016	c9702017	c9702018	c9702019	c9702061
MCBz	430.50	715.40	231.34	299.30	892.74	518.96	316.20	209.84	948.10
1,2-DiCBz	268.50	358.32	80.50	109.23	427.50	296.10	313.30	133.20	331.30
1,3,5-TriCBz	76.51	150.53	54.02	56.75	72.45	55.86	45.53	31.11	86.07
1,2,4-TriCBz	673.29	725.36	212.45	293.17	601.94	299.19	214.71	20.33	482.59
1,2,3-TriCBz	125.95	156.45	65.43	74.50	145.11	90.61	108.71	82.85	127.79
1,2,4,5+1,2,3,5-TeCBz	21.55	55.95	32.97	18.64	23.80	39.15	76.63	21.23	12.59
1,2,3,4-TeCBz	25.06	6.24	26.87	23.62	30.16	36.96	39.72	24.50	16.84
PeCBz	56.46	170.57	34.59	17.30	59.27	38.16	31.67	21.33	46.29
HxCBz	33.06	12.04	27.64	27.18	34.70	27.33	22.50	14.00	14.86

Versuchsnummer	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9
Laborlaufnummer	c9701019	c9701020	c9701021	c9702060	c9702016	c9702017	c9702018	c9702019	c9702061
2-MCPh	101.71	41.22	31.85	575.60	94.36	866.03	190.33	581.43	675.18
4-MCPh	10.45	8.23	5.12	163.73	134.21	768.20	275.02	493.12	533.02
2,4-DiCPh	111.10	10.02	7.25	7.42	7.04	33.72	31.75	40.69	28.67
2,4,6-TriCPh	24.66	4.54	3.39	8.67	4.08	13.61	12.79	11.37	8.85
2,3,6-TriCPh	4.35	5.21	3.52	41.43	4.47	3.47	9.07	0.69	2.44
2,3,5-TriCPh	7.35	2.33	3.22	15.86	2.24	1.83	4.56	5.31	12.73
2,4,5-TriCPh	38.92	3.44	1.46	14.40	8.60	2.64	2.94	6.28	14.14
2,3,4-TriCPh	34.79	8.37	9.16	16.50	13.55	8.70	22.45	13.54	42.23
3,4,5-TriCPh	1.12	1.23	0.85	6.83	18.48	0.30	42.80	0.95	0.74
2,3,5,6-TeCPh	4.00	2.10	3.02	7.30	5.27	6.07	6.23	6.16	5.71
2,3,4,6-TeCPh	9.99	8.03	7.14	18.31	8.02	9.23	9.47	9.37	8.69
2,3,4,5-TeCPh	22.12	n.n.	n.n.	17.74	11.48	13.68	17.29	7.83	3.17
PeCPh	38.76	26.09	40.40	68.21	13.30	19.47	16.64	10.85	19.31

Versuchsnummer	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9
Laborlaufnummer	c9701019	c9701020	c9701021	c9702060	c9702016	c9702017	c9702018	c9702019	c9702061
Naphthalin	1559.60	741.60	747.60	2936.00	3069.00	1897.00	2953.00	550902.00	38989.00
Acenaphthen	251.00	100.90	294.60	246.00	137.00	220.60	178.00	1805.00	268.00
Fluoren	260.10	101.50	388.50	298.00	182.00	273.40	221.00	4875.00	2633.00
Phenanthren	1441.00	528.20	1691.10	1447.00	1011.00	1237.50	1101.00	10914.00	12404.00
Anthracen	58.50	10.80	29.60	90.00	17.00	25.30	21.00	1436.00	492.00
Fluoranthren	299.00	171.40	332.20	492.00	147.00	153.90	103.00	3392.00	4150.00
Pyren	1085.50	839.20	1333.80	1397.00	597.00	429.30	592.00	3861.00	2278.00
Benz[a]anthracen	390.10	247.60	414.60	823.00	618.00	451.50	746.00	301.00	262.00
Chrysen	58.50	48.70	52.10	96.00	40.00	34.40	53.00	1021.00	725.00
Benzo[e]pyren	n.n.	n.n.	n.n.	77.00	n.n.	n.n.	n.n.	345.00	295.00
Benzo[b]fluoranthren	50.40	27.60	41.30	86.00	30.00	12.40	56.00	636.00	422.00
Benzo[k]fluoranthren	30.40	17.70	24.70	41.00	19.00	19.90	32.00	263.00	162.00
Benzo[a]pyren	44.00	28.70	41.40	73.00	n.n.	23.80	52.00	320.00	119.00
Dibenzo[a,h]anthracen	n.n.	96.00	99.00						
Benzo[g,h,i]perylene	130.30	93.70	153.70	252.00	61.00	53.90	71.00	463.00	356.00
Indeno[1,2,3-cd]pyren	n.n.	n.n.	n.n.	286.00	n.n.	n.n.	101.00	331.00	185.00

Versuchsnummer	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9
Laborlaufnummer	c9701019	c9701020	c9701021	c9702060	c9702016	c9702017	c9702018	c9702019	c9702061
Benzol	7239.82	4180.00	5290.00	8520.00	7230.00	9748.22	7680.66	13799827.27	9346.43
Toluol	7662.98	9725.16	9117.85	16960.21	13395.54	17845.62	18604.20	3322465.15	14328.82
Ethylbenzol	1473.18	1307.65	1492.48	3098.97	4042.88	2174.77	1760.52	1185734.96	2382.45
m/p-Xylol	5467.99	5256.96	6743.12	16260.03	21704.44	8040.07	7343.80	1123230.16	9173.74
o-Xylol	1735.80	2198.75	2241.71	5777.09	5731.23	2825.56	1867.43	418303.78	2658.95
Biphenyl	1006.73	1436.06	1785.67	2148.81	1421.67	2008.93	1826.91	452988.12	3568.24
Methylnaphthalin	369.78	n.n.	1156.15	3080.03	897.36	n.n.	1092.38	1471912.35	4369.79
Dimethylnaphthalin	2138.18	n.n.	2641.23	1740.13	1528.11	2236.04	n.n.	241782.41	n.n.
Dibenzofuran	390.96	359.84	1479.95	2320.69	715.90	1000.00	2433.36	96172.49	2548.02
Dibenzo-p-dioxin	56.20	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	21782.07	321.40

7. ANHANG

SMVA:

Probenahmen bei 700-800°C:

Versuch	Ausfall TNV, I	Ausfall TNV, II	Ausfall TNV, III	Normalbetrieb	CO-Spitzen	CO-Spitzen, Memory Phase I	CO-Spitzen, Memory Phase II
Laborlaufnummer	9812020	9812019	9812024	9812023	9812025	9812034	9812033
1-MCDD	0.005	0.021	0.925	0.067	19.138	4.539	0.834
2-MCDD	0.005	0.011	0.570	0.051	19.358	2.693	0.842
1,3-DiCDD	0.007	0.008	0.035	0.072	1.871	3.001	0.004
2,7/2,3/2,8-DiCDD	0.001	0.002	0.253	0.054	4.827	5.312	0.206
1,4/1,7-DiCDD	n.n.	0.008	0.128	0.019	1.574	1.563	0.223
1,8-DiCDD	n.n.	n.n.	0.056	0.017	0.748	1.582	0.186
1,6-DiCDD	n.n.	n.n.	0.054	0.003	0.885	0.956	0.023
1,2-DiCDD	n.n.	n.n.	0.160	0.011	0.885	1.341	0.091
1,9-DiCDD	0.004	n.n.	0.259	n.n.	0.142	0.859	0.010
1,3,7-TriCDD	0.002	0.020	0.201	0.043	2.400	1.492	0.070
1,3,8-TriCDD	0.003	0.021	0.267	0.048	1.871	0.790	0.082
1,3,6-TriCDD	0.001	0.004	0.109	0.014	1.265	1.209	0.072
1,2,4-TriCDD	0.001	0.003	0.030	0.009	0.839	0.342	0.005
1,3,9/2,3,7-TriCDD	0.001	0.016	0.167	0.013	2.594	4.652	0.193
1,4,7-TriCDD	0.001	0.005	0.058	0.004	0.271	0.231	0.018
1,2,3-TriCDD	0.001	0.002	0.060	0.014	0.439	0.883	0.042
1,7,8-TriCDD	0.001	0.009	0.071	0.001	1.368	1.222	0.040
1,2,7-TriCDD	n.n.	0.002	0.081	0.007	0.787	0.491	0.033
1,2,8-TriCDD	0.001	0.002	0.094	0.007	1.226	0.401	0.036
1,4,6-TriCDD	n.n.	0.002	0.020	0.004	1.149	1.000	0.060
1,2,6-TriCDD	n.n.	n.n.	0.028	0.004	0.723	0.667	0.034
1,2,9-TriCDD	0.001	0.001	0.071	0.007	0.194	1.355	0.054
2,3,7,8-TCDD	n.n.	n.n.	0.007	n.n.	0.058	0.034	0.004
1,3,6,8-TCDD	0.007	0.105	0.241	0.048	1.037	0.353	0.454
1,3,7,9-TCDD	0.004	0.013	0.035	0.035	0.333	0.154	0.095
1,3,7,8-TCDD	n.n.	0.005	0.020	0.003	0.132	0.099	0.010
1,3,6,9/1,2,4,7/1,2,4,8-TCDD	0.005	0.006	0.015	0.004	0.109	0.113	0.010
1,2,6,8-TCDD	n.n.	0.002	0.009	n.n.	0.048	0.083	0.002
1,4,7,8-TCDD	n.n.	n.n.	0.007	n.n.	0.041	0.056	n.n.
1,2,4,6/1,2,4,9-TCDD	0.008	0.002	0.009	0.003	0.213	1.365	0.013
1,2,3,4/1,2,3,7/1,2,3,8-TCDD	0.008	0.005	0.021	0.009	0.644	1.365	0.013
1,2,3,6/1,2,7,9-TCDD	0.008	0.003	0.011	0.004	0.173	0.153	0.004
1,2,7,8/1,4,6,9-TCDD	n.n.	0.003	0.013	n.n.	0.131	0.049	0.004
1,2,3,9-TCDD	n.n.	n.n.	0.005	n.n.	0.734	0.028	0.002
1,2,6,9-TCDD	n.n.	0.001	0.006	0.001	0.048	0.016	0.002
1,2,6,7-TCDD	n.n.	n.n.	0.002	n.n.	0.297	n.n.	0.002
1,2,8,9-TCDD	n.n.	0.001	n.n.	n.n.	0.156	0.049	n.n.
1,2,3,7,8-PeCDD	n.n.	0.008	0.047	0.005	0.149	0.310	0.016
1,2,4,6,8/1,2,4,7,9-PeCDD	0.009	0.051	0.145	0.037	0.640	0.745	0.155
1,2,3,6,8-PeCDD	0.012	0.040	0.107	0.025	0.442	0.430	0.118
1,2,4,7,8-PeCDD	n.n.	0.007	0.040	0.003	0.146	0.265	0.010
1,2,3,7,9-PeCDD	0.008	0.014	0.069	0.015	0.265	0.295	0.045
1,2,3,4,7/1,2,4,6,9-PeCDD	n.n.	0.010	0.037	0.012	0.318	0.230	0.005
1,2,3,6,9-PeCDD	n.n.	0.005	0.018	n.n.	n.n.	0.118	0.003
1,2,4,6,7-PeCDD	n.n.	n.n.	0.023	n.n.	0.130	0.235	0.003
1,2,4,8,9-PeCDD	n.n.	n.n.	0.024	n.n.	0.152	0.209	0.002
1,2,3,4,6-PeCDD	0.003	0.004	0.011	0.004	0.074	n.n.	0.009
1,2,3,6,7-PeCDD	0.003	0.012	0.031	0.009	0.056	0.241	0.010
1,2,3,8,9-PeCDD	n.n.	0.008	0.026	0.005	0.138	0.222	0.011
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.005	0.013	0.070	0.013	0.191	0.316	0.033
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.011	0.034	0.124	0.033	0.396	0.754	0.090
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.004	0.016	0.089	0.017	0.409	0.799	0.059
1,2,3,4,6,8/1,2,4,6,7,9/1,2,4,6,8,9-HxCDD	0.060	0.120	0.514	0.148	4.066	3.242	0.496
1,2,3,6,7,9/1,2,3,6,8,9-HxCDD	0.023	0.058	0.257	0.076	1.413	1.910	0.162
1,2,3,4,6,9-HxCDD	0.005	0.010	0.035	0.011	0.131	0.165	0.044
1,2,3,4,6,7-HxCDD	0.006	0.018	0.094	0.025	0.495	0.837	0.067
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.124	0.443	1.746	0.339	9.672	10.132	1.637
1,2,3,4,6,7,9-HpCDD	0.132	0.410	1.621	0.286	11.099	9.836	1.590
OCDD	0.350	3.209	16.513	0.672	38.552	59.907	16.677

7. ANHANG

Versuch Laborlaufnummer	Ausfall TNV, I	Ausfall TNV, II	Ausfall TNV, III	Normalbetrieb	CO-Spitzen	CO-Spitzen, Memory Phase I	CO-Spitzen, Memory Phase II
	9812020	9812019	9812024	9812023	9812025	9812034	9812033
1-MCDF	0.108	0.180	1.062	0.404	18.077	13.006	0.965
3-MCDF	0.174	0.004	1.733	0.833	35.120	20.667	1.575
2-MCDF	0.210	0.038	2.125	0.896	46.817	26.002	1.932
4-MCDF	0.017	0.010	0.025	0.013	1.120	0.145	0.035
1,3-DiCDF	0.025	0.064	0.254	0.085	0.695	4.613	0.231
1,7-DiCDF	0.019	0.069	0.332	0.083	0.603	6.151	0.302
1,4-DiCDF	n.n.	0.008	0.146	n.n.	0.156	0.640	0.132
1,8-DiCDF	0.025	0.134	0.320	0.087	0.411	6.549	0.291
1,6-DiCDF	0.005	n.n.	n.n.	0.039	0.397	0.283	0.048
1,2-DiCDF	0.037	0.226	0.501	0.262	4.126	11.361	0.455
2,4-DiCDF	0.099	0.066	0.130	0.382	8.649	1.344	0.118
3,7-DiCDF	0.017	0.030	0.263	0.116	1.950	4.412	0.239
2,7-DiCDF	n.n.	0.034	n.n.	n.n.	0.078	n.n.	0.037
2,3-DiCDF	0.030	0.201	0.446	0.155	2.701	10.034	0.405
2,8/3,6-DiCDF	0.040	0.091	0.785	0.375	8.330	14.724	0.695
2,6-DiCDF	0.024	0.092	0.347	0.142	3.828	7.322	0.315
1,9/3,4-DiCDF	0.027	0.030	0.328	0.123	6.728	6.443	0.298
4,6-DiCDF	0.030	0.016	0.135	0.117	3.197	2.277	0.122
1,3,7-TriCDF	0.012	0.045	0.096	0.039	0.184	2.552	0.088
1,3,8-TriCDF	0.011	0.062	0.117	0.032	0.289	2.729	0.107
1,3,6-TriCDF	0.004	0.063	0.083	0.015	0.305	2.023	0.057
1,3,4/1,4,8-TriCDF	0.010	0.113	0.135	0.045	0.326	4.073	0.123
1,2,4/1,6,7-TriCDF	0.012	0.016	0.013	0.069	0.737	0.145	0.018
1,7,8-TriCDF	0.012	0.108	0.159	0.044	0.603	3.981	0.145
1,2,3-TriCDF	0.020	0.146	0.191	0.075	0.957	5.263	0.174
1,2,7-TriCDF	0.014	0.144	0.242	0.057	1.262	5.684	0.220
1,2,9-TriCDF	0.003	0.071	0.088	0.023	0.099	2.387	0.062
1,3,9-TriCDF	0.002	0.013	0.004	0.011	0.282	0.371	0.006
2,4,7-TriCDF	0.024	0.182	0.291	0.064	3.254	7.451	0.264
1,2,6/1,2,8-TriCDF	0.013	0.133	0.225	0.062	2.673	5.508	0.204
2,4,8-TriCDF	0.004	0.009	0.002	0.019	4.126	0.103	0.006
1,4,9-TriCDF	0.023	0.146	0.135	0.049	0.191	3.331	0.122
2,3,7-TriCDF	0.024	0.181	0.246	0.053	0.085	7.419	0.223
1,6,8/2,3,4/2,3,8-TriCDF	0.037	0.141	0.274	0.061	2.736	5.318	0.249
2,3,6/3,4,7-TriCDF	0.001	0.012	0.007	n.n.	0.043	0.159	0.019
2,6,7-TriCDF	0.066	0.450	0.530	0.257	17.822	11.077	0.482
1,4,6/1,4,7-TriCDF	0.037	0.526	0.362	0.141	9.492	16.192	0.329
3,4,6-TriCDF	0.012	0.162	0.133	0.055	2.914	2.841	0.121
2,4,6-TriCDF	0.029	0.269	0.362	0.071	4.707	9.797	0.329
2,3,7,8-TCDF	0.029	0.047	0.123	0.125	0.853	0.894	0.050
1,3,6,8-TCDF	0.005	0.034	0.166	0.047	0.577	0.845	0.030
1,3,7,8/1,3,7,9-TCDF	0.008	0.075	0.282	0.044	1.608	1.802	0.075
1,3,4,7-TCDF	n.n.	0.033	0.123	0.026	0.527	0.743	0.040
1,4,6,8-TCDF	n.n.	0.027	0.082	0.028	0.438	0.749	0.034
1,2,4,7/1,3,6,7-TCDF	0.009	0.049	0.160	0.051	0.765	1.062	0.045
1,3,4,8-TCDF	n.n.	0.024	0.090	0.043	0.424	0.545	0.030
1,2,4,8/1,3,4,6-TCDF	0.009	0.026	0.078	0.063	0.495	0.480	0.031
1,2,4,6/1,2,6,8/1,2,3,7/1,4,7,8/1,3,6,9-TCDF	0.046	0.121	0.355	0.173	2.004	2.409	0.142
1,2,3,4/1,2,3,6/1,2,3,8/1,4,6,7/1,6,7,8/2,4,6,8-TCDF	0.079	0.139	0.395	0.386	2.323	2.843	0.263
1,3,4,9-TCDF	n.n.	0.009	0.025	0.018	0.286	n.n.	0.011
1,2,7,8-TCDF	0.026	0.051	0.137	0.093	0.613	0.925	0.062
1,2,6,7-TCDF	0.012	0.041	0.110	0.071	0.504	0.738	0.057
1,2,7,9/1,4,6,9-TCDF	0.005	0.011	0.032	0.019	0.440	0.195	0.009
1,2,4,9/2,3,6,8-TCDF	0.012	0.054	0.148	0.114	1.019	1.248	0.056
2,4,6,7-TCDF	0.026	0.081	0.205	0.141	1.504	2.606	0.144
1,2,3,9/2,3,4,7-TCDF	0.026	0.091	0.236	0.160	1.504	2.781	0.157
1,2,6,9-TCDF	0.022	0.066	0.176	0.110	0.858	1.259	0.099
2,3,4,8-TCDF	0.023	0.049	0.126	0.125	0.871	0.782	0.061
2,3,4,6-TCDF	0.021	0.079	0.207	0.121	1.136	1.950	0.142
2,3,6,7-TCDF	0.025	0.084	0.209	0.115	1.499	1.697	0.097
3,4,6,7-TCDF	0.013	0.099	0.293	0.084	1.538	2.773	0.173

7. ANHANG

Versuch Laborlaufnummer	Ausfall TNV, I	Ausfall TNV, II	Ausfall TNV, III	Normalbetrieb	CO-Spitzen	CO-Spitzen, Memory Phase I	CO-Spitzen, Memory Phase II
	9812020	9812019	9812024	9812023	9812025	9812034	9812033
1,2,3,7,8/1,2,3,4,8-PeCDF	0.033	0.080	0.326	0.244	2.291	2.602	0.164
2,3,4,7,8-PeCDF	0.039	0.124	0.400	0.245	2.103	3.590	0.201
1,3,4,6,8-PeCDF	0.009	0.047	0.186	0.076	1.223	1.753	0.078
1,2,4,6,8-PeCDF	0.026	0.049	0.177	0.110	1.409	1.718	0.087
1,3,6,7,8-PeCDF	0.009	0.049	0.198	0.058	1.124	1.569	0.065
1,3,4,7,8-PeCDF	n.n.	0.011	0.056	0.014	0.201	0.338	0.013
1,3,4,7,9/1,2,3,6,8-PeCDF	0.016	0.078	0.335	0.132	1.625	2.745	0.117
1,2,4,7,8-PeCDF	0.017	0.051	0.195	0.104	1.188	1.859	0.083
1,2,4,7,9/1,3,4,6,7-PeCDF	0.013	0.066	0.241	0.087	1.064	2.267	0.133
1,2,4,6,7-PeCDF	0.019	0.055	0.191	0.114	1.211	1.610	0.112
1,2,3,4,7/1,4,6,7,8-PeCDF	0.020	0.069	0.284	0.185	2.389	3.228	0.144
1,3,4,6,9-PeCDF	n.n.	0.012	0.060	0.027	0.255	0.445	0.027
1,2,3,4,6-PeCDF	n.n.	0.035	0.122	0.083	0.872	1.236	0.111
1,2,3,7,9-PeCDF	n.n.	0.008	0.040	0.014	0.123	0.285	0.013
1,2,3,6,7-PeCDF	0.014	0.050	0.188	0.097	0.964	1.592	0.096
1,2,4,6,9/1,2,6,7,8-PeCDF	0.026	0.065	0.238	0.175	1.541	2.103	0.146
1,2,6,7,9-PeCDF	0.007	0.016	0.035	0.035	0.258	0.391	0.045
1,2,3,6,9-PeCDF	0.004	0.014	0.040	0.021	0.208	0.559	0.019
2,3,4,6,8-PeCDF	0.067	0.161	0.417	0.327	3.586	7.199	0.471
1,2,3,4,9-PeCDF	0.008	0.022	0.072	0.097	0.505	0.741	0.069
1,2,4,8,9-PeCDF	0.004	0.017	0.055	0.045	0.291	0.733	0.053
1,2,3,8,9-PeCDF	n.n.	0.016	0.041	0.054	0.231	0.575	0.040
2,3,4,6,7-PeCDF	0.066	0.413	1.082	0.407	6.758	16.923	1.931
1,2,3,4,7,8/1,2,3,4,7,9-HxCDF	0.062	0.187	0.776	0.528	4.440	8.015	0.475
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.045	0.191	0.818	0.454	4.947	9.755	0.645
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.006	0.067	0.325	0.102	0.305	0.715	0.357
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.093	0.458	1.885	0.737	10.505	21.306	2.425
1,2,3,4,6,8-HxCDF	0.052	0.181	0.747	0.556	5.780	9.719	0.605
1,3,4,6,7,8/1,3,4,6,7,9-HxCDF	0.040	0.234	1.242	0.408	8.062	10.639	0.907
1,2,4,6,7,8-HxCDF	0.083	0.244	1.150	0.653	8.959	10.746	0.853
1,2,4,6,7,9-HxCDF	0.012	0.042	0.196	0.138	1.351	2.254	0.141
1,2,4,6,8,9-HxCDF	0.059	0.021	0.091	0.077	0.645	1.426	0.075
1,2,3,4,6,7-HxCDF	0.059	0.296	1.371	0.601	7.798	13.510	1.536
1,2,3,6,7,9-HxCDF	0.006	0.028	0.123	0.085	0.789	1.299	0.083
1,2,3,4,6,9/1,2,3,6,8,9-HxCDF	0.016	0.058	0.189	0.168	1.317	3.313	0.232
1,2,3,4,8,9-HxCDF	0.016	0.051	0.170	0.197	1.491	2.910	0.184
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.253	2.161	10.055	2.437	62.295	101.751	12.943
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.029	0.170	0.966	0.526	5.485	12.138	0.980
1,2,3,4,6,7,9-HpCDF	0.046	0.245	0.984	0.482	9.732	17.825	1.209
1,2,3,4,6,8,9-HpCDF	0.046	0.268	0.599	0.548	9.326	22.977	0.516
OCDF	0.167	1.815	5.585	1.358	66.715	134.211	4.839
I-TEQ (NATO/CCMS)	0.051	0.204	0.818	0.373	4.432	7.804	0.711
I-TEQ (PCDD nach NATO/CCMS)	0.004	0.018	0.094	0.013	0.416	0.537	0.063
I-TEQ (PCDF nach NATO/CCMS)	0.048	0.186	0.725	0.360	4.015	7.267	0.648
I-TEQ (WHO)	0.051	0.204	0.822	0.373	4.367	7.784	0.700
I-TEQ (PCDD nach WHO)	0.003	0.019	0.102	0.015	0.412	0.638	0.056
I-TEQ (PCDF nach WHO)	0.047	0.184	0.720	0.359	3.955	7.146	0.644

7. ANHANG

Versuch Laborlaufnummer	Ausfall TNV, I	Ausfall TNV, II	Ausfall TNV, III	Normalbetrieb	CO-Spitzen	CO-Spitzen, Memory Phase I	CO-Spitzen, Memory Phase II
	9812020	9812019	9812024	9812023	9812025	9812034	9812033
#1	0.001	0.016	0.017	0.010	2.022	1.174	0.087
#2	0.001	0.175	0.257	0.046	3.916	12.382	0.322
#3	0.002	0.079	0.088	0.018	1.940	10.194	0.290
#6	0.002	0.121	0.213	0.106	0.473	1.358	0.274
#5,#8	0.021	0.833	2.109	1.129	10.337	4.666	2.275
#11	0.209	0.030	11.735	6.411	24.463	4.424	0.101
#13	0.002	0.049	0.247	0.178	0.448	2.600	0.028
#15	0.033	2.405	0.846	0.486	2.127	1.421	0.039
#19	n.n.	0.017	0.073	0.029	0.161	0.165	0.011
#18	0.076	3.038	2.104	1.405	5.750	23.054	0.802
#17	0.025	3.038	0.913	0.603	1.635	7.494	2.458
#24	0.002	n.n.	0.296	0.214	n.n.	3.414	0.408
#32	0.007	0.367	0.689	n.n.	1.205	12.348	1.632
#16	0.042	0.712	1.256	0.969	3.183	0.269	1.632
#28,#31	1.009	17.627	13.750	13.253	32.311	105.763	11.340
#33	0.175	4.164	3.926	4.091	8.355	30.420	5.192
#22	0.119	2.266	2.721	2.465	4.515	16.363	2.758
#53	0.019	0.592	0.377	0.347	1.738	3.523	0.344
#51	0.005	0.405	0.300	0.184	2.488	1.712	0.182
#45	0.012	0.465	0.412	0.322	1.516	2.765	0.323
#46	n.n.	0.014	n.n.	n.n.	0.344	n.n.	0.146
#52	0.485	8.832	5.851	5.833	16.246	54.138	5.249
#49	0.209	3.857	2.703	2.448	11.176	25.631	2.172
#47,#48	0.131	3.344	2.014	1.624	31.774	16.050	1.416
#44	0.178	3.992	3.065	2.792	12.513	24.277	2.571
#42	0.039	1.583	1.415	0.494	4.840	8.547	1.011
#64	0.088	1.637	1.604	1.347	5.380	11.060	1.223
#71,#41	0.197	4.378	0.317	2.850	4.558	24.849	2.618
#40	0.021	0.553	0.615	0.495	1.829	3.266	0.522
#67	0.038	0.654	0.487	0.439	1.308	4.896	0.352
#63	0.039	0.101	0.549	0.367	n.n.	2.708	0.269
#74	0.439	6.967	5.620	5.129	18.253	43.160	3.982
#70,#76	0.678	12.808	9.218	8.266	33.927	65.523	6.444
#66	0.583	11.453	9.020	8.341	30.426	70.134	6.895
#60,#56	0.229	4.670	3.985	3.733	12.094	24.956	3.282
#81	0.007	0.206	0.123	0.153	0.031	1.405	0.107
#77	0.029	1.094	0.585	0.804	1.387	3.737	0.511
#100	0.003	0.163	0.094	0.098	n.n.	1.038	0.101
#95,#102	0.241	7.212	3.651	3.333	31.678	39.465	3.670
#91	0.016	0.436	0.317	0.273	2.716	2.730	0.257
#84,#92	0.081	2.278	1.288	1.260	10.201	13.262	1.345
#101	0.427	9.997	5.484	5.723	13.906	52.620	4.915
#99	0.149	3.994	1.873	2.038	14.289	20.810	1.922
#119,#83,#86,#97,#87,#115,#85	0.256	7.651	4.084	4.296	13.056	28.192	2.714
#87,#115,#85	0.201	5.920	3.148	3.266	9.680	18.156	1.764
#110	0.341	9.388	5.042	5.574	25.048	55.253	5.609
#82	0.010	0.249	0.133	0.274	0.794	1.580	0.137
#107,#123,#124	0.034	0.970	0.599	0.617	3.048	5.992	0.535
#118	0.257	7.319	3.962	4.189	0.580	40.377	3.682
#114,#122	0.006	0.338	0.193	0.336	0.685	1.620	0.178
#105	0.047	1.468	0.787	0.934	2.863	7.432	0.705
#126	n.n.	0.456	0.273	0.898	n.n.	1.196	0.163

7. ANHANG

Versuch	Ausfall TNV, I	Ausfall TNV, II	Ausfall TNV, III	Normalbetrieb	CO-Spitzen	CO-Spitzen, Memory Phase I	CO-Spitzen, Memory Phase II
Laborlaufnummer	9812020	9812019	9812024	9812023	9812025	9812034	9812033
#136	n.n.	n.n.	n.n.	0.003	2.280	0.101	0.018
#151	0.137	3.739	2.115	2.205	6.583	26.681	2.191
#135,#144,#147	0.199	5.744	3.158	3.405	6.588	39.879	3.277
#149	0.408	11.470	6.279	6.731	n.n.	84.994	6.953
#134	0.017	0.548	0.328	0.364	n.n.	3.761	0.362
#131	0.008	0.301	0.165	0.195	n.n.	2.174	0.170
#132,#146	0.066	1.827	0.997	1.048	1.291	13.297	1.099
#153	0.513	15.506	7.203	8.028	17.858	81.224	7.325
#141	0.090	2.617	1.508	1.664	4.130	20.861	1.783
#137	0.006	0.214	0.130	0.179	4.130	1.628	0.145
#130	0.014	0.446	0.274	0.316	0.958	3.519	0.302
#160,#163	0.161	4.262	0.130	0.178	n.n.	31.657	2.450
#138	0.383	11.838	n.n.	n.n.	n.n.	61.908	5.440
#129,#158	0.007	0.325	n.n.	n.n.	n.n.	2.378	0.223
#167	0.009	0.229	0.144	0.229	n.n.	1.465	0.119
#128,#159	0.024	0.758	0.316	0.372	n.n.	4.461	0.360
#156	0.027	0.007	0.320	1.572	n.n.	4.309	0.371
#157	0.002	1.178	0.320	n.n.	3.533	4.309	n.n.
#169	n.n.	0.280	0.190	0.185	0.535	0.719	0.147
#179	0.044	1.304	0.874	0.819	n.n.	8.481	0.896
#176	0.013	n.n.	0.413	0.369	1.338	3.873	0.510
#178	0.017	0.432	0.358	0.354	n.n.	4.369	0.405
#175	0.099	2.511	0.111	0.105	n.n.	1.192	0.133
#187	0.099	2.511	1.952	1.729	n.n.	23.917	2.324
#183	0.046	1.324	0.906	0.820	0.243	11.833	1.111
#185	0.006	n.n.	0.201	0.214	n.n.	1.672	n.n.
#174	0.072	2.378	0.780	1.021	0.380	11.396	1.057
#177	0.046	0.634	0.929	0.867	3.324	0.911	0.113
#171	0.018	0.261	0.389	0.408	2.289	2.875	0.298
#173	0.000	n.n.	n.n.	0.057	1.188	n.n.	n.n.
#172	0.011	0.507	0.425	0.335	0.841	4.514	0.528
#180,#193	0.145	5.587	2.027	2.372	8.877	27.780	2.607
#191	0.003	0.218	0.064	0.148	0.270	0.802	0.098
#170	0.075	3.544	2.405	2.679	4.943	30.181	3.266
#190	n.n.	n.n.	n.n.	0.005	n.n.	0.156	n.n.
#189	0.001	0.481	n.n.	0.363	n.n.	2.522	0.122
#202	0.000	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.094	n.n.
#200	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.086	0.295
#199	0.004	0.267	0.172	0.159	0.363	2.163	0.245
#198	n.n.	0.034	n.n.	0.034	0.363	0.177	0.034
#201	n.n.	0.017	n.n.	0.013	n.n.	0.097	0.106
#203,#196	0.004	0.317	0.237	0.235	n.n.	2.015	0.282
#195	0.001	0.241	n.n.	0.228	n.n.	2.072	0.258
#194	0.003	0.579	0.381	0.240	1.002	3.517	0.546
#205	n.n.	0.184	0.110	0.205	0.240	0.634	0.184
#208	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.191	n.n.
#207	n.n.	n.n.	n.n.	0.003	n.n.	0.483	0.215
#206	n.n.	0.320	0.274	0.125	0.693	0.912	0.284
#209	n.n.	2.499	n.n.	n.n.	2.000	n.n.	n.n.
TEQ (nach Safe)	0.001	0.094	0.059	0.124	0.082	0.330	0.042
TEQ (WHO)	7.465E-05	0.051	0.031	0.094	0.009	0.143	0.019

7. ANHANG

Versuch	Ausfall TNV, I	Ausfall TNV, II	Ausfall TNV, III	Normalbetrieb	CO-Spitzen	CO-Spitzen, Memory Phase I	CO-Spitzen, Memory Phase II
Laborlaufnummer	9812020	9812019	9812024	9812023	9812025	9812034	9812033
MCBz	248.70	679.14	2413.79	1637.84	13353.57	19297.91	2174.72
1,3 -DiCBz	10.62	10.13	824.74	144.61	1343.41	2611.98	482.14
1,4 -DiCBz	18.77	11.32	1205.39	303.90	6926.95	2919.27	340.40
1,2 -DiCBz	6.11	21.45	226.01	19.09	1049.54	5531.25	328.13
1,3,5 -TriCBz	6.42	27.96	136.88	20.91	1653.70	3544.44	210.58
1,2,4 -TriCBz	6.26	24.57	185.19	36.60	1264.59	3114.81	218.68
1,2,3 -TriCBz	16.06	37.28	354.27	109.79	3696.50	4725.93	785.64
1,2,3,5 -TeCBz	2.87	2.49	11.38	4.99	243.16	396.74	32.59
1,2,4,5 -TeCBz	1.64	2.76	22.76	9.98	227.96	440.82	34.51
1,2,3,4 -TeCBz	31.03	9.78	171.93	48.42	2370.82	1560.51	509.97
PeCBz	9.97	20.10	116.16	82.81	1681.82	6310.62	260.87
HxCBz	5.14	11.84	108.51	54.55	2340.00	3718.19	370.64

Versuch	Normalbetrieb	CO-Spitzen	CO-Spitzen, Memory Phase I
Laborlaufnummer	9812023	9812025	9812034
2-MCPh	475.08	2948.13	3763.32
4-MCPh	754.70	2781.13	5796.56
2,6-DiCPh	48.26	127.36	211.89
2,4-DiCPh	378.62	18.37	366.39
3,4-DiCPh	18.61	863.58	527.12
2,4,6-TriCPh	62.85	470.20	369.71
2,3,6-TriCPh	1.07	18.18	113.25
2,3,5-TriCPh	1.81	8.61	56.72
2,4,5-TriCPh	9.61	30.03	43.81
2,3,4-TriCPh	8.59	62.43	73.18
3,4,5-TriCPh	0.12	2.51	9.04
2,3,5,6-TeCPh	n.n.	19.04	0.70
2,3,4,6-TeCPh	26.99	104.05	27.92
2,3,4,5-TeCPh	26.12	41.88	19.78
PeCPh	95.58	243.76	83.85

7. ANHANG

Probenahmen bei 250-280°C:

Versuch	Normalbetrieb	Pastöser Sondermüll (= PaS)	PaS	PaS	PaS	PaS	PaS	PaS	Normalbetrieb	Normalbetrieb
Laborlaufnummer	9708011+9708009	9707013	9707014	9707015	9707016	9707017	9707018	9707019	9808002+9808003	9708005+9708006
1-MCDD	0.032	0.014	0.006	0.010	0.004	0.031	0.021	0.561	0.130	0.045
2-MCDD	0.021	0.013	0.005	0.008	0.005	0.018	0.018	0.232	0.079	0.047
1,3-DiCDD	0.736	0.020	0.014	0.004	0.003	0.022	0.025	0.167	0.079	0.002
2,7,2,3,2,8-DiCDD	0.071	0.003	0.002	0.001	0.001	0.011	n.n.	0.044	0.132	0.013
1,4,1,7-DiCDD	0.118	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.014	n.n.	0.134	0.039	0.012
1,8-DiCDD	0.119	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.049	0.039	0.010
1,6-DiCDD	0.043	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.124	0.039	n.n.
1,2-DiCDD	0.092	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.099	0.033	0.005
1,9-DiCDD	0.011	0.010	0.006	0.006	0.002	0.010	0.020	0.006	0.021	0.001
1,3,7-TriCDD	0.187	0.005	0.003	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.053	0.044	0.004
1,3,8-TriCDD	0.241	0.008	0.005	0.030	0.001	n.n.	n.n.	0.097	0.028	0.004
1,3,6-TriCDD	0.187	0.003	0.003	n.n.	n.n.	0.003	0.003	0.063	0.038	0.004
1,2,4-TriCDD	0.106	0.002	0.001	n.n.	0.001	n.n.	n.n.	0.094	0.011	0.000
1,3,9,2,3,7-TriCDD	0.330	0.003	0.003	0.008	0.001	0.016	0.045	0.129	0.125	0.011
1,4,7-TriCDD	0.136	0.002	0.001	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.088	0.006	n.n.
1,2,3-TriCDD	0.135	0.001	0.000	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.178	0.022	0.002
1,7,8-TriCDD	0.183	0.003	0.002	0.008	n.n.	0.003	n.n.	0.265	0.030	0.002
1,2,7-TriCDD	0.157	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.100	0.012	0.003
1,2,8-TriCDD	0.185	0.002	0.001	0.004	n.n.	0.003	n.n.	0.120	0.010	0.002
1,4,6-TriCDD	0.095	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.034	0.025	0.003
1,2,6-TriCDD	0.117	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.082	0.017	0.002
1,2,9-TriCDD	0.186	0.003	0.003	0.006	n.n.	0.001	0.003	0.118	0.034	0.003
2,3,7,8-TCDD	0.124	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.021	0.015	0.004
1,3,6,8-TCDD	0.351	0.039	0.015	0.075	0.003	0.022	0.094	0.065	0.057	0.007
1,3,7,9-TCDD	0.218	0.014	0.004	0.029	0.001	0.012	0.034	0.040	0.058	0.008
1,3,7,8-TCDD	0.393	0.008	0.001	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.071	0.066	0.010
1,3,6,9,1,2,4,7,1,2,4,8-TCDD	0.610	0.011	0.002	0.057	n.n.	n.n.	0.009	0.113	0.076	0.013
1,2,6,8-TCDD	0.324	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.059	0.028	0.004
1,4,7,8-TCDD	0.125	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.022	0.008	n.n.
1,2,4,6,1,2,4,9-TCDD	0.332	0.012	0.002	0.067	0.001	0.012	0.011	0.187	0.080	0.011
1,2,3,4,1,2,3,7,1,2,3,8-TCDD	0.482	0.009	0.002	0.067	0.002	0.012	0.019	0.253	0.093	0.024
1,2,3,6,1,2,7,9-TCDD	0.608	0.019	0.004	0.068	0.002	0.015	0.033	0.352	0.102	0.024
1,2,7,8,1,4,6,9-TCDD	0.368	0.003	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.207	0.042	0.006
1,2,3,9-TCDD	0.272	0.010	n.n.	0.035	0.001	n.n.	0.013	0.155	0.049	0.007
1,2,6,9-TCDD	0.185	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.104	0.030	0.004
1,2,6,7-TCDD	0.129	n.n.	0.001	n.n.	n.n.	n.n.	0.018	0.070	0.010	n.n.
1,2,8,9-TCDD	0.125	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.066	0.021	n.n.
1,2,3,7,8-PeCDD	0.915	0.007	n.n.	0.035	n.n.	n.n.	0.011	0.487	0.135	0.030
1,2,4,6,8,1,2,4,7,9-PeCDD	1.392	0.087	0.007	0.199	0.006	0.053	0.121	0.219	0.315	0.069
1,2,3,6,8-PeCDD	1.227	0.050	0.005	0.145	0.005	0.034	0.105	0.181	0.184	0.030
1,2,4,7,8-PeCDD	0.665	0.006	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.007	0.095	0.071	0.010
1,2,3,7,9-PeCDD	0.892	0.023	0.007	0.080	0.004	0.011	0.026	0.126	0.171	0.024
1,2,3,4,7,1,2,4,6,9-PeCDD	0.726	0.055	0.007	0.030	0.013	0.095	0.017	0.104	0.172	0.031
1,2,3,6,9-PeCDD	0.552	n.n.	n.n.	0.039	n.n.	n.n.	0.009	0.074	0.116	0.018
1,2,4,6,7-PeCDD	0.489	0.004	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.065	0.080	0.012
1,2,4,8,9-PeCDD	0.549	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.072	0.093	0.015
1,2,3,4,6-PeCDD	0.594	0.007	n.n.	0.026	0.002	0.011	0.008	0.081	0.146	0.027
1,2,3,6,7-PeCDD	0.781	0.006	n.n.	n.n.	0.002	0.006	0.009	0.098	0.120	0.025
1,2,3,8,9-PeCDD	0.705	0.011	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.077	0.124	0.021
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.983	0.010	n.n.	0.016	n.n.	n.n.	0.014	0.054	0.141	0.027
1,2,3,6,7,8-HxCDD	1.307	0.027	n.n.	0.057	n.n.	0.016	0.030	0.077	0.198	0.038
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.837	0.012	n.n.	0.018	0.009	n.n.	0.014	0.050	0.132	0.020
1,2,3,4,6,8,1,2,4,6,7,9,1,2,4,6,8,9-HxCDD	2.580	0.212	0.017	0.567	0.030	0.144	0.439	0.236	0.742	0.193
1,2,3,6,7,9,1,2,3,6,8,9-HxCDD	2.355	0.061	0.005	0.144	0.012	0.031	0.079	0.174	0.507	0.134
1,2,3,4,6,9-HxCDD	0.573	0.007	0.001	0.026	n.n.	0.010	0.018	0.041	0.156	0.024
1,2,3,4,6,7-HxCDD	1.450	0.015	n.n.	0.041	0.008	0.014	0.024	0.355	0.240	0.062
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	4.833	0.196	0.027	0.434	0.020	0.109	0.360	7.120	0.933	0.309
1,2,3,4,6,7,9-HpCDD	4.409	0.230	0.024	0.452	0.017	0.135	0.404	6.382	1.103	0.334
OCDD	5.341	0.990	0.137	1.865	0.046	0.539	1.774	33.466	2.294	0.811

7. ANHANG

Versuch	Normalbetrieb	Pastöser Sondermüll (= PaS)	PaS	Normalbetrieb	Normalbetrieb						
Laborlaufnummer	9706011+9706009	9707013	9707014	9707015	9707016	9707017	9707018	9707019	9808002+9808003	9708005+9708006	
1-MCDF	0.499	0.067	0.011	1.093	0.018	0.343	0.145	6.408	0.316	0.180	
3-MCDF	0.064	0.110	0.112	1.503	0.020	0.406	0.133	0.237	0.504	0.293	
2-MCDF	0.156	0.121	0.092	1.655	0.020	0.478	0.032	3.262	0.639	0.360	
4-MCDF	0.028	0.002	0.001	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.421	0.003	n.n.	
1,3-DiCDF	0.226	0.034	0.041	0.202	0.003	0.081	0.045	0.385	0.148	0.042	
1,7-DiCDF	0.205	0.093	0.052	0.142	0.003	0.355	n.n.	0.349	0.163	0.064	
1,4-DiCDF	0.021	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.009	n.n.	0.048	0.015	0.024	
1,8-DiCDF	0.354	0.024	0.023	0.138	0.002	0.044	0.052	0.542	0.156	0.053	
1,6-DiCDF	0.007	n.n.	n.n.	0.055	0.001	0.013	n.n.	0.580	0.007	n.n.	
1,2-DiCDF	0.619	0.045	0.028	0.323	0.004	0.084	0.172	1.204	0.278	0.089	
2,4-DiCDF	0.205	0.047	0.010	0.618	0.006	0.156	0.094	0.090	0.032	0.022	
3,7-DiCDF	0.089	0.024	0.031	0.117	0.002	0.041	0.056	0.105	0.105	0.047	
2,7-DiCDF	0.086	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.196	n.n.	n.n.	
2,3-DiCDF	0.540	0.044	0.049	0.184	0.004	0.071	0.094	2.081	0.239	0.074	
2,8/3,6-DiCDF	0.292	0.074	0.061	0.307	0.005	0.084	0.172	0.115	0.351	0.132	
2,6-DiCDF	0.258	0.037	0.034	0.181	0.003	0.062	0.118	0.539	0.175	0.061	
1,9/3,4-DiCDF	0.100	0.067	0.033	0.228	0.003	0.049	0.071	0.175	0.154	0.057	
4,6-DiCDF	0.069	0.017	0.007	0.153	0.003	0.045	0.038	0.094	0.061	0.029	
1,3,7-TriCDF	0.122	0.016	0.003	0.028	0.001	0.017	0.027	0.262	0.061	0.016	
1,3,8-TriCDF	0.166	0.015	n.n.	0.022	0.001	0.012	n.n.	0.363	0.065	0.020	
1,3,6-TriCDF	0.167	0.008	n.n.	0.015	0.001	0.006	n.n.	0.129	0.048	0.011	
1,3,4/1,4,8-TriCDF	0.300	0.021	0.003	0.047	0.001	0.012	0.018	0.229	0.097	0.023	
1,2,4/1,6,7-TriCDF	0.060	0.004	n.n.	0.031	0.001	0.012	n.n.	0.032	0.003	n.n.	
1,7,8-TriCDF	0.295	0.020	0.003	0.045	0.003	0.014	0.062	0.220	0.098	0.027	
1,2,3-TriCDF	0.397	0.038	0.004	0.038	0.002	0.016	0.023	0.297	0.138	0.033	
1,2,7-TriCDF	0.397	0.029	0.005	0.024	0.001	0.012	0.036	0.293	0.140	0.042	
1,2,9-TriCDF	0.192	0.010	0.002	n.n.	0.001	0.007	0.013	0.145	0.057	0.011	
1,3,9-TriCDF	0.038	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.056	0.009	n.n.	
2,4,7-TriCDF	0.489	0.047	0.005	0.065	0.003	0.037	0.041	0.783	0.183	0.051	
1,2,6/1,2,8-TriCDF	0.365	0.027	0.007	0.040	0.002	0.037	0.041	0.573	0.139	0.039	
2,4,8-TriCDF	0.036	n.n.	n.n.	n.n.	0.000	n.n.	n.n.	0.039	0.002	n.n.	
1,4,9-TriCDF	0.411	0.045	0.009	0.095	0.004	0.054	0.087	0.632	0.079	0.023	
2,3,7-TriCDF	0.490	0.037	0.006	0.043	0.003	0.017	0.041	0.762	0.184	0.043	
1,6,8/2,3,4/2,3,8-TriCDF	0.397	0.012	0.008	0.025	0.002	0.023	0.017	0.609	0.133	0.048	
2,3,6/3,4,7-TriCDF	0.032	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.063	0.004	n.n.	
2,6,7-TriCDF	1.295	0.115	0.033	0.235	0.008	0.088	0.187	2.400	0.275	0.094	
1,4,6/1,4,7-TriCDF	1.455	0.045	0.019	0.046	0.005	0.024	0.046	2.805	0.399	0.067	
3,4,6-TriCDF	0.462	0.029	0.007	0.029	0.002	0.015	0.039	0.881	0.068	0.022	
2,4,6-TriCDF	0.739	0.041	0.012	0.047	0.003	0.012	0.074	1.436	0.248	0.064	
2,3,7,8-TCDF	0.584	0.061	0.010	0.243	0.006	0.069	0.131	0.062	0.123	0.037	
1,3,6,8-TCDF	0.212	0.019	0.007	0.037	0.001	0.046	0.049	0.026	0.073	0.018	
1,3,7,8/1,3,7,9-TCDF	0.270	0.026	0.009	0.077	0.002	0.034	0.047	0.033	0.072	0.029	
1,3,4,7-TCDF	0.122	0.011	0.003	0.017	0.001	n.n.	0.031	0.014	0.008	n.n.	
1,4,6,8-TCDF	0.357	0.026	0.007	0.032	0.002	0.025	0.063	0.042	0.098	0.022	
1,2,4,7/1,3,6,7-TCDF	0.453	0.027	0.007	0.085	0.001	0.034	0.076	0.228	0.118	0.034	
1,3,4,8-TCDF	0.293	0.017	n.n.	n.n.	0.001	n.n.	0.032	0.145	0.023	0.012	
1,2,4,6/1,3,4,6-TCDF	0.552	0.072	0.014	0.109	0.004	0.085	0.132	0.263	0.128	0.037	
1,2,4,6/1,2,6,8/1,2,3,7/1,4,7,8/1,3,8,9-TCDF	1.623	0.143	0.037	0.323	0.005	0.173	0.269	0.776	0.446	0.119	
1,2,3,4/1,2,3,6/1,2,3,8/1,4,6,7/1,6,7,8/2,4,6,8-TCDF	2.004	0.165	0.033	0.366	0.006	0.170	0.349	0.953	0.489	0.121	
1,3,4,9-TCDF	0.156	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.026	n.n.	0.074	0.038	n.n.	
1,2,7,8-TCDF	0.737	0.072	0.012	0.256	0.009	0.084	0.158	0.345	0.167	0.047	
1,2,6,7-TCDF	0.291	0.044	0.007	0.119	0.002	0.032	0.085	0.120	0.032	0.009	
1,2,7,9/1,4,6,9-TCDF	0.252	0.008	0.003	0.054	n.n.	n.n.	n.n.	0.115	0.049	0.010	
1,2,4,9/2,3,6,8-TCDF	0.972	0.087	0.011	0.240	0.002	0.065	0.165	0.433	0.223	0.060	
2,4,6,7-TCDF	1.033	0.122	0.019	0.400	0.002	0.086	0.216	0.487	0.349	0.071	
1,2,3,9/2,3,4,7-TCDF	1.231	0.113	0.019	0.310	0.002	0.095	0.151	0.577	0.379	0.079	
1,2,6,9-TCDF	0.805	0.008	0.012	n.n.	0.001	n.n.	n.n.	0.423	0.243	0.062	
2,3,4,8-TCDF	0.662	0.122	0.013	0.325	0.004	0.105	0.217	0.382	0.165	0.048	
2,3,4,6-TCDF	1.030	0.118	0.011	0.358	0.003	0.080	0.211	0.482	0.333	0.075	
2,3,6,7-TCDF	1.008	0.098	0.012	0.377	0.004	0.070	0.190	0.449	0.260	0.069	
3,4,6,7-TCDF	0.680	0.088	0.006	0.257	0.002	0.065	0.154	0.298	0.275	0.070	

7. ANHANG

Versuch	Normalbetrieb	Pastöser Sondermüll (= PaS)	PaS	Normalbetrieb	Normalbetrieb						
Laborlaufnummer	9706011+9706009	9707013	9707014	9707015	9707016	9707017	9707018	9707019	9808002+9808003	9708005+9708006	
1,2,3,7,8/1,2,3,4,8-PeCDF	1.719	0.090	0.010	0.222	0.005	0.077	0.125	0.783	0.446	0.128	
2,3,4,7,8-PeCDF	2.069	0.091	0.010	0.302	0.007	0.084	0.150	0.592	0.451	0.135	
1,3,4,6,8-PeCDF	0.583	0.027	0.007	0.088	0.001	0.040	0.033	0.116	0.176	0.043	
1,2,4,6,8-PeCDF	1.083	0.025	0.007	0.103	0.002	0.032	0.069	0.189	0.256	0.055	
1,3,6,7,8-PeCDF	0.432	0.013	0.003	0.062	0.001	0.015	0.029	0.093	0.123	0.031	
1,3,4,7,8-PeCDF	0.116	0.003	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.024	0.030	n.n.	
1,3,4,7,9/1,2,3,6,8-PeCDF	1.023	0.035	0.006	0.150	0.002	0.034	0.054	0.192	0.252	0.071	
1,2,4,7,8-PeCDF	1.032	0.032	0.006	0.132	0.002	0.023	0.054	0.184	0.222	0.057	
1,2,4,7,9/1,3,4,6,7-PeCDF	0.784	0.028	0.005	0.090	n.n.	0.016	0.050	0.161	0.236	0.057	
1,2,4,6,7-PeCDF	0.981	0.033	0.005	0.120	n.n.	0.018	0.063	0.191	0.272	0.057	
1,2,3,4,7/1,4,6,7,8-PeCDF	1.348	0.046	0.006	0.189	0.004	0.029	0.078	0.270	0.406	0.106	
1,3,4,6,9-PeCDF	0.183	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.036	0.048	n.n.	
1,2,3,4,8-PeCDF	0.700	0.026	0.003	0.102	0.001	0.014	0.040	0.141	0.215	0.049	
1,2,3,7,9-PeCDF	0.134	0.026	0.003	0.101	0.001	0.014	0.040	0.023	0.180	0.010	
1,2,3,6,7-PeCDF	0.690	0.019	0.002	0.087	n.n.	0.009	0.041	0.129	0.175	0.042	
1,2,4,6,9/1,2,6,7,8-PeCDF	1.394	0.054	0.006	0.182	0.004	0.036	0.075	0.252	0.352	0.088	
1,2,6,7,9-PeCDF	0.280	0.013	n.n.	0.055	n.n.	0.009	0.012	0.041	0.070	0.013	
1,2,3,6,9-PeCDF	0.162	0.006	n.n.	0.012	n.n.	n.n.	n.n.	0.026	0.043	0.007	
2,3,4,6,8-PeCDF	1.969	0.088	0.010	0.330	0.002	0.095	0.134	0.307	0.601	0.160	
1,2,3,4,9-PeCDF	0.328	0.013	0.001	0.045	0.001	0.013	0.009	0.056	0.081	0.018	
1,2,4,8,9-PeCDF	0.356	0.010	n.n.	0.027	n.n.	n.n.	0.009	0.049	0.063	0.014	
1,2,3,8,9-PeCDF	0.355	0.014	n.n.	0.033	n.n.	n.n.	n.n.	0.047	0.077	0.016	
2,3,4,6,7-PeCDF	2.507	0.145	0.011	0.455	0.005	0.150	0.207	0.347	0.913	0.285	
1,2,3,4,7,8/1,2,3,4,7,9-HxCDF	2.228	0.066	0.010	0.181	0.006	0.048	0.071	0.223	0.578	0.198	
1,2,3,6,7,8-HxCDF	1.810	0.052	0.006	0.171	0.004	0.043	0.062	0.212	0.524	0.166	
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.430	0.027	0.003	0.111	0.003	0.014	0.038	0.018	0.285	0.104	
2,3,4,6,7,8-HxCDF	2.698	0.080	0.038	0.272	0.019	0.081	0.126	0.174	0.831	0.283	
1,2,3,4,6,8-HxCDF	1.966	0.045	0.006	0.194	0.005	0.033	0.080	0.275	0.803	0.160	
1,3,4,6,7,8/1,3,4,6,7,9-HxCDF	1.772	0.048	0.006	0.177	0.004	0.034	0.065	0.257	0.671	0.197	
1,2,4,6,7,8-HxCDF	2.850	0.057	0.010	0.238	0.005	0.052	0.090	0.375	0.886	0.228	
1,2,4,6,7,9-HxCDF	0.463	0.010	n.n.	0.040	n.n.	0.007	0.008	0.057	0.132	0.029	
1,2,4,6,8,9-HxCDF	0.314	0.010	n.n.	0.014	n.n.	0.053	0.108	0.030	0.034	0.007	
1,2,3,4,6,7-HxCDF	2.278	0.076	0.012	0.245	0.004	0.053	0.108	0.250	0.859	0.249	
1,2,3,6,7,9-HxCDF	0.284	0.010	n.n.	0.027	n.n.	0.006	n.n.	0.025	0.083	0.018	
1,2,3,4,6,9/1,2,3,6,8,9-HxCDF	0.695	0.017	0.002	0.049	n.n.	0.009	0.013	0.060	0.151	0.040	
1,2,3,4,8,9-HxCDF	0.512	0.018	n.n.	0.044	n.n.	0.009	0.010	0.036	0.097	0.024	
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	5.443	0.286	0.054	0.922	0.018	0.177	0.360	0.227	3.005	1.154	
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.629	0.026	0.004	0.087	n.n.	0.007	0.025	0.031	0.197	0.065	
1,2,3,4,6,7,9-HpCDF	0.828	0.038	0.004	0.127	n.n.	0.017	0.039	0.034	0.355	0.132	
1,2,3,4,6,8,9-HpCDF	0.927	0.036	0.005	0.113	n.n.	0.017	0.026	0.038	0.259	0.091	
OCDF	1.526	0.155	0.065	0.589	0.027	0.100	0.206	0.101	1.716	0.445	
I-TEQ (NATO/CCMS)	2.903	0.121	0.013	0.304	0.009	0.077	0.144	0.795	0.657	0.196	
I-TEQ (PCDD nach NATO/CCMS)	0.946	0.016	0.000	0.033	0.001	0.003	0.016	0.388	0.141	0.031	
I-TEQ (PCDF nach NATO/CCMS)	1.957	0.105	0.013	0.271	0.008	0.074	0.128	0.407	0.516	0.165	
I-TEQ (WHO)	3.354	0.124	0.013	0.319	0.009	0.076	0.148	1.008	0.721	0.210	
I-TEQ (PCDD nach WHO)	1.398	0.019	0.000	0.049	0.001	0.003	0.020	0.601	0.207	0.046	
I-TEQ (PCDF nach WHO)	1.956	0.105	0.013	0.270	0.008	0.073	0.128	0.407	0.514	0.165	

7. ANHANG

Versuch	Normalbetrieb	Pastöser Sondermüll (= PaS)	PaS	PaS	PaS	PaS	PaS	PaS	Normalbetrieb	Normalbetrieb
Laborlaufnummer	9706011+9706009	9707013	9707014	9707015	9707016	9707017	9707018	9707019	9808002+9808003	9708005+9708006
#1	0.854	3.999	1.135	7.247	0.547	7.969	6.278	2.618	0.390	1.569
#2	0.136	0.343	0.081	2.739	n.n.	0.664	n.n.	0.338	0.043	0.039
#3	0.291	1.519	0.584	0.806	0.583	3.027	0.699	0.793	0.090	0.802
#6	0.197	0.123	0.057	0.504	n.n.	0.245	n.n.	n.n.	n.n.	0.022
#5,#8	1.043	2.282	2.163	3.356	0.612	4.548	1.408	3.074	0.234	1.473
#11	0.273	0.618	0.444	1.913	0.134	1.232	1.215	n.n.	0.012	0.145
#13	0.529	1.377	1.370	3.127	0.439	2.745	n.n.	2.078	0.097	0.285
#15	1.110	2.545	2.818	3.045	1.862	5.071	4.253	5.346	0.271	1.119
#19	0.381	2.789	2.512	2.916	0.050	0.416	0.291	n.n.	0.487	1.830
#18	1.515	4.163	2.064	4.534	0.170	1.792	1.253	1.482	0.956	2.732
#17	1.564	2.275	3.080	3.836	0.173	1.645	1.150	1.742	0.666	1.170
#24	0.550	1.356	n.n.	1.836	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.741	n.n.
#32	1.362	1.038	2.453	2.800	0.190	0.950	0.664	2.017	0.391	0.594
#16	0.755	0.919	1.802	4.876	0.206	1.541	1.077	3.668	2.069	0.818
#28,#31	1.044	0.415	0.291	5.255	0.920	13.403	9.368	12.189	1.967	3.801
#33	0.827	0.949	0.248	2.502	0.756	n.n.	n.n.	n.n.	0.401	1.538
#22	1.353	0.827	2.251	3.580	0.478	n.n.	n.n.	n.n.	0.759	n.n.
#53	0.501	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#51	0.148	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#45	2.343	1.146	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.746	n.n.
#46	1.767	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#52	2.150	2.466	1.474	1.578	0.910	2.795	0.815	2.054	2.215	2.234
#49	0.652	0.905	0.376	0.326	n.n.	n.n.	0.629	n.n.	0.891	1.389
#47,#48	0.641	0.658	0.315	0.314	0.398	n.n.	0.319	n.n.	0.759	0.555
#44	0.962	1.785	0.630	0.656	0.415	1.364	0.580	1.895	1.114	0.554
#42	1.067	n.n.	n.n.	0.492	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.700	0.178
#64	0.690	0.928	n.n.	0.587	0.500	n.n.	n.n.	n.n.	0.622	n.n.
#71,#41	0.604	1.289	0.577	0.901	0.590	1.240	0.475	0.954	0.810	0.802
#40	0.353	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.132	n.n.
#67	0.113	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#63	0.074	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#74	0.627	n.n.	1.050	0.683	0.617	1.043	0.399	1.387	0.909	0.996
#70,#76	1.722	4.733	1.447	1.172	1.039	3.460	1.324	5.489	2.312	2.976
#66	1.648	n.n.	1.278	1.002	0.904	2.951	1.129	3.045	0.962	2.084
#60,#56	1.548	n.n.	0.682	0.526	0.803	2.260	0.865	1.164	0.906	1.529
#81	0.941	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	1.877	0.718	n.n.	n.n.	n.n.
#77	1.339	0.870	0.403	0.412	n.n.	0.449	0.172	0.998	0.055	n.n.
#100	n.n.	0.409	n.n.	n.n.						
#95,#102	3.418	0.178	2.412	3.321	1.229	6.246	1.414	3.598	4.786	4.790
#91	1.652	0.286	0.265	0.204	0.366	n.n.	n.n.	n.n.	0.460	0.278
#84,#92	0.626	0.280	0.987	1.240	1.850	1.690	0.463	0.555	1.792	1.433
#101	2.884	0.258	3.146	3.692	9.618	6.851	2.089	4.632	5.443	4.671
#99	0.317	0.120	0.358	0.516	n.n.	0.403	0.363	1.252	0.904	0.361
#119,#83,#86,#97,#87,#115,#85	1.118	3.137	1.201	1.360	0.322	2.319	1.243	4.787	2.720	2.465
#87,#115,#85	0.462	1.162	0.810	1.360	0.322	2.319	1.243	2.842	2.161	1.892
#110	2.813	0.248	2.450	3.170	1.433	5.870	1.546	3.706	5.864	4.591
#82	n.n.	0.130	n.n.	n.n.	0.181	0.535	0.120	n.n.	0.123	n.n.
#107,#123,#124	0.526	2.281	0.112	0.421	0.132	0.578	0.395	0.872	0.577	0.117
#118	1.874	0.229	1.440	1.642	1.009	1.997	0.762	1.888	2.431	3.192
#114,#122	n.n.	0.013	n.n.	n.n.	n.n.	2.321	0.337	n.n.	0.109	n.n.
#105	0.970	0.009	0.416	0.349	0.278	0.434	0.205	0.622	0.966	0.411
#126	1.395	0.246	n.n.	0.241	n.n.	n.n.	0.001	0.617	0.684	n.n.

7. ANHANG

Versuch	Normalbetrieb	Pastöser Sondermüll (= PaS)	PaS	Normalbetrieb	Normalbetrieb						
Laborlaufnummer	9706011+9706009	9707013	9707014	9707015	9707016	9707017	9707018	9707019	9808002+9808003	9708005+9708006	
#136	1.215	0.357	1.579	1.677	0.987	4.338	0.976	2.439	2.540	2.657	
#151	1.527	0.825	2.177	1.748	1.104	4.649	1.213	2.903	3.487	3.091	
#135,#144,#147	0.905	0.488	1.232	1.091	0.534	2.408	0.859	1.863	2.879	2.657	
#149	4.173	2.821	6.438	6.978	3.347	15.737	1.373	9.524	10.256	9.568	
#134	0.287	n.n.	0.097	0.247	0.173	0.880	0.089	0.418	0.692	0.552	
#131	0.267	n.n.	0.061	0.216	0.137	0.431	0.098	0.221	0.269	0.313	
#132,#146	0.658	0.415	1.153	1.230	0.600	2.477	0.778	1.671	1.823	1.667	
#153	5.859	3.630	8.477	8.219	3.675	14.846	2.856	11.573	13.072	11.659	
#141	1.117	0.813	1.963	1.919	1.103	3.966	1.189	2.754	2.947	2.552	
#137	n.n.	n.n.	0.130	0.059	0.190	0.352	0.054	0.328	0.245	0.248	
#130	1.216	n.n.	n.n.	0.189	n.n.	0.879	0.090	0.427	0.522	0.303	
#160,#163	1.646	1.316	3.227	3.070	1.649	6.756	1.910	4.365	5.132	3.940	
#138	3.868	2.931	6.116	6.443	2.781	12.202	2.104	8.278	9.948	8.422	
#129,#158	0.145	n.n.	n.n.	0.162	n.n.	0.911	0.069	n.n.	0.408	0.223	
#167	0.044	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.155	0.057	n.n.	n.n.	n.n.	
#128,#159	0.016	n.n.	0.810	0.835	0.455	1.915	0.494	0.972	1.046	1.110	
#156	n.n.	n.n.	0.836	0.927	0.513	1.385	0.446	0.971	1.173	1.032	
#157	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.339	0.184	n.n.	n.n.	n.n.	
#169	0.093	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	
#179	0.559	0.448	1.275	0.753	0.980	2.576	0.746	2.694	2.632	1.954	
#176	0.089	n.n.	0.674	0.354	0.243	1.161	0.431	1.502	1.162	1.299	
#178	0.468	n.n.	0.638	0.371	0.210	1.187	0.385	1.241	1.102	1.123	
#175	n.n.	n.n.	n.n.	0.108	n.n.	0.290	n.n.	0.591	0.528	0.244	
#187	1.126	0.906	2.645	1.682	1.781	5.117	1.413	4.583	3.564	3.024	
#183	0.768	0.644	2.090	0.962	1.383	2.747	1.022	2.868	2.951	2.846	
#185	n.n.	n.n.	n.n.	0.121	n.n.	0.617	0.193	0.663	0.431	0.212	
#174	1.560	0.887	2.418	1.736	1.452	3.183	1.408	4.486	3.336	2.808	
#177	0.622	0.718	1.617	0.931	1.330	2.557	0.766	0.902	2.288	1.600	
#171	0.489	0.447	0.607	0.643	0.875	1.417	0.511	0.784	1.603	1.215	
#173	0.118	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.234	
#172	0.542	n.n.	0.486	0.208	0.211	0.350	0.212	0.860	1.037	0.918	
#180,#193	3.442	2.585	5.059	4.116	2.978	6.571	2.236	7.765	7.199	6.166	
#191	0.492	n.n.	n.n.	0.121	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	1.790	0.171	
#170	2.489	1.234	2.933	2.067	1.290	2.621	0.998	4.363	6.237	4.353	
#190	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	
#189	0.898	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	2.546	0.119	n.n.	1.134	n.n.	
#202	n.n.	0.103	0.094	0.035	0.076	0.111	0.047	n.n.	0.136	0.112	
#200	0.027	n.n.	0.079	0.045	0.084	0.099	0.050	n.n.	0.121	0.107	
#199	n.n.	0.148	0.085	0.054	0.110	0.097	n.n.	n.n.	0.149	0.087	
#198	0.047	n.n.	n.n.	0.012	n.n.	0.217	n.n.	n.n.	0.067	0.046	
#201	0.250	0.166	0.350	0.177	0.177	0.320	0.129	0.589	0.701	0.453	
#203,#196	0.524	0.211	0.442	0.276	0.325	0.579	0.179	0.892	1.090	0.653	
#195	0.158	0.056	0.159	0.123	n.n.	0.251	0.081	0.343	0.445	0.301	
#194	0.500	0.147	0.365	0.273	0.242	0.495	0.158	0.798	1.000	0.642	
#205	0.219	n.n.	n.n.	0.030	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.363	0.140	
#208	n.n.	n.n.	0.582	0.059	0.380	0.040	0.011	0.080	0.158	0.065	
#207	0.203	n.n.	0.550	0.053	n.n.	n.n.	n.n.	0.019	0.122	0.060	
#206	0.326	0.088	1.773	0.071	0.364	0.041	0.011	0.634	0.347	0.205	
#209	0.461	n.n.	0.496	0.095	0.336	0.027	0.047	0.111	0.581	0.423	
TEQ (nach Safe)	0.163	0.036	0.009	0.033	0.003	0.020	0.006	0.079	0.077	0.007	
TEQ (WHO)	0.142	0.025	0.001	0.025	0.001	0.003	0.001	0.064	0.070	0.001	

7. ANHANG

Versuch Laborlaufnummer	Normalbetrieb 9706011+9706009	Pastöser Sondermüll (= PaS) 9707013	PaS 9707014	PaS 9707015	PaS 9707016	PaS 9707017	PaS 9707018	PaS 9707019	Normalbetrieb 9808002+9808003	Normalbetrieb 9708005+9708006
MCBz	10817.94	929.33	349.03	1681.70	446.43	429.26	958.99	2135.68	8430.29	5094.58
1,3-DiCBz	302.16	79.85	23.04	345.06	36.20	78.85	281.95	211.52	453.83	571.49
1,4-DiCBz	484.76	397.51	37.70	297.77	78.24	107.89	388.18	688.41	820.44	915.28
1,2-DiCBz	690.49	423.07	79.59	592.44	63.73	173.64	608.14	802.61	1115.82	1263.42
1,3,5-TriCBz	300.83	24.25	11.15	55.74	11.24	29.12	137.80	85.87	335.16	356.36
1,2,4-TriCBz	197.63	107.52	22.94	107.39	16.03	15.21	83.91	316.05	463.81	552.44
1,2,3-TriCBz	452.47	168.84	20.19	138.35	20.06	77.50	247.37	521.72	626.46	1022.67
1,2,3,5-TeCBz+1,2,4,5-TeCBz	217.60	96.49	18.48	159.07	13.81	99.05	177.66	126.92	424.74	328.39
1,2,3,4-TeCBz	435.19	78.52	16.22	189.76	25.42	68.46	224.58	135.87	449.82	414.83
PeCBz	169.45	86.47	16.32	101.27	16.32	61.10	88.94	96.49	314.90	249.66
HxCBz	146.13	59.94	13.02	87.37	13.02	48.23	94.71	66.89	259.37	384.17

Versuch Laborlaufnummer	Normalbetrieb 9706011+9706009	Pastöser Sondermüll (= PaS) 9707013	PaS 9707014	PaS 9707015	PaS 9707016	PaS 9707019	Normalbetrieb 9808002+9808003	Normalbetrieb 9708005+9708006
2-MCPh	329.33	11.64		128.06	3.96	188.82	112.09	151.48
4-MCPh	825.13	2.18		84.85	0.74	237.32	531.67	59.87
2,6-DiCPh	52.60	22.94		91.77	5.51	53.65	66.88	48.81
2,4-DiCPh	73.15	29.05		87.15	9.88	174.30	287.41	51.80
3,4-DiCPh	13.67	3.62		10.85	2.31	71.08	63.54	n.n.
2,4,6-TriCPh	68.29	1.81		21.77	n.n.	28.68	26.93	36.39
2,3,6-TriCPh	20.54	1.80		9.58	n.n.	41.49	11.87	1.43
2,3,5-TriCPh	17.96	1.65		9.90	n.n.	3.59	0.53	2.13
2,4,5-TriCPh	29.88	2.26		13.54	n.n.	36.45	8.22	4.65
2,3,4-TriCPh	35.09	2.29		18.32	n.n.	211.24	327.98	10.19
3,4,5-TriCPh	26.63	2.54		15.27	n.n.	32.48	29.94	2.30
2,3,5,6-TeCPh	4.50	1.59		9.56	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
2,3,4,6-TeCPh	94.97	2.36		21.28	0.32	58.88	16.15	10.91
2,3,4,5-TeCPh	14.13	0.84		5.03	n.n.	11.31	53.79	25.66
PeCPh	192.37	3.29		19.75	0.30	80.80	53.99	11.67

7. ANHANG

Versuch Laborlaufnummer	Normalbetrieb 9708007	CO-Spitzen 9812035	Normalbetrieb 9812016	Ausfall TNV, I 9812022	Ausfall TNV, II 9812017	CO-Spitzen, Memory-Phase I 9812015	Normalbetrieb 9712016	CO-Spitzen, Memory-Phase II 9812036	Normalbetrieb 9712019+9712020
1-MCDD	0.005	9.062	0.033	0.059	0.150	14.170	0.415	0.609	0.006
2-MCDD	0.004	24.377	0.020	0.035	0.071	6.692	0.263	0.352	0.004
1,3-DiCDD	0.006	9.955	0.082	0.039	0.056	5.286	0.769	0.317	0.005
2,7/2,3/2,8-DiCDD	0.005	6.560	0.039	0.068	0.053	5.044	1.826	0.303	0.005
1,4/1,7-DiCDD	n.n.	1.723	0.011	0.020	0.018	1.712	0.103	0.328	n.n.
1,8-DiCDD	n.n.	1.570	0.012	0.020	0.026	2.441	0.072	0.259	n.n.
1,6-DiCDD	n.n.	1.059	0.007	0.012	0.013	1.217	0.090	0.102	n.n.
1,2-DiCDD	n.n.	0.523	0.010	0.017	0.021	1.980	0.018	0.129	n.n.
1,9-DiCDD	0.006	2.208	0.006	0.011	n.n.	n.n.	0.395	0.087	0.002
1,3,7-TriCDD	n.n.	1.748	0.011	0.019	0.043	4.069	0.632	0.426	0.011
1,3,8-TriCDD	n.n.	3.203	0.008	0.010	0.042	3.990	0.379	0.378	0.016
1,3,6-TriCDD	n.n.	1.889	0.009	0.016	0.027	2.578	0.055	0.312	0.009
1,2,4-TriCDD	n.n.	0.268	0.002	0.004	0.016	1.513	0.095	0.121	n.n.
1,3,9/2,3,7-TriCDD	0.006	2.336	0.015	0.060	0.071	6.696	0.653	0.526	0.015
1,4,7-TriCDD	n.n.	0.970	0.062	0.003	0.015	1.401	0.637	0.190	n.n.
1,2,3-TriCDD	n.n.	0.574	0.060	0.011	0.033	3.141	0.236	0.124	n.n.
1,7,8-TriCDD	0.008	1.212	0.073	0.016	0.021	1.974	0.151	0.172	0.012
1,2,7-TriCDD	0.004	0.970	0.070	0.006	0.020	1.820	0.379	0.174	0.010
1,2,8-TriCDD	n.n.	0.421	0.073	0.005	0.021	1.989	0.151	0.153	n.n.
1,4,6-TriCDD	n.n.	0.830	0.042	0.013	0.020	1.920	0.179	0.105	n.n.
1,2,6-TriCDD	n.n.	0.153	0.052	0.009	0.018	1.714	0.096	0.105	n.n.
1,2,9-TriCDD	n.n.	0.102	0.082	0.016	0.012	1.125	0.443	0.111	n.n.
2,3,7,8-TCDD	n.n.	0.692	0.010	n.n.	0.005	0.340	0.582	0.033	0.006
1,3,6,8-TCDD	0.006	3.633	0.141	0.032	0.139	5.216	0.549	0.227	0.037
1,3,7,9-TCDD	0.010	2.061	0.069	0.012	0.021	1.443	0.211	0.125	0.020
1,3,7,8-TCDD	0.007	3.042	0.028	0.006	0.015	1.288	0.084	0.023	0.004
1,3,6,9/1,2,4,7/1,2,4,8-TCDD	n.n.	2.404	0.056	0.010	0.013	1.536	0.393	0.108	0.038
1,2,6,8-TCDD	n.n.	0.591	0.031	0.006	0.007	0.676	0.124	0.098	0.013
1,4,7,8-TCDD	n.n.	0.685	0.011	n.n.	0.005	0.342	0.582	n.n.	0.002
1,2,4,6/1,2,4,9-TCDD	0.010	1.019	0.019	0.013	0.004	0.438	0.464	0.174	0.009
1,2,3,4/1,2,3,7/1,2,3,8-TCDD	0.020	2.909	0.053	0.013	0.015	1.597	0.464	0.175	0.024
1,2,3,6/1,2,7,9-TCDD	0.014	2.279	0.051	0.010	0.009	0.956	0.658	0.108	0.019
1,2,7,8/1,4,6,9-TCDD	n.n.	2.248	0.011	n.n.	0.006	0.835	n.n.	0.056	0.006
1,2,3,9-TCDD	n.n.	0.793	0.005	0.005	0.003	0.374	0.098	0.066	0.009
1,2,6,9-TCDD	n.n.	0.257	0.012	n.n.	0.003	0.236	0.211	0.064	0.005
1,2,6,7-TCDD	n.n.	0.381	0.005	n.n.	0.002	0.209	n.n.	0.013	n.n.
1,2,8,9-TCDD	n.n.	0.848	0.010	n.n.	0.002	n.n.	0.109	n.n.	0.009
1,2,3,7,8-PeCDD	0.008	2.329	0.057	0.017	0.028	2.486	2.744	0.244	0.109
1,2,4,6,8/1,2,4,7,9-PeCDD	0.018	5.096	0.363	0.073	0.099	7.022	0.949	0.621	0.396
1,2,3,6,8-PeCDD	0.012	3.044	0.295	0.056	0.075	4.679	0.481	0.435	0.234
1,2,4,7,8-PeCDD	n.n.	2.144	0.041	0.015	0.025	2.521	0.368	0.158	0.078
1,2,3,7,9-PeCDD	0.017	3.205	0.165	0.023	0.042	3.135	1.249	0.396	0.241
1,2,3,4,7/1,2,4,6,9-PeCDD	0.016	1.499	0.113	0.017	0.022	1.899	0.225	0.241	0.094
1,2,3,6,9-PeCDD	0.009	0.609	0.067	n.n.	0.013	1.065	n.n.	0.227	0.073
1,2,4,6,7-PeCDD	0.006	1.568	n.n.	n.n.	0.014	1.022	n.n.	0.160	0.060
1,2,4,8,9-PeCDD	0.007	1.468	0.021	n.n.	0.015	1.128	0.120	0.093	0.047
1,2,3,4,6-PeCDD	0.012	2.129	0.085	0.012	0.010	0.466	0.229	0.121	0.105
1,2,3,6,7-PeCDD	0.005	2.121	0.113	0.016	0.025	1.471	0.204	0.199	0.147
1,2,3,8,9-PeCDD	0.008	1.814	0.086	0.009	0.023	1.421	0.086	0.154	0.129
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.017	2.952	0.119	0.009	0.042	3.586	1.678	0.250	0.295
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.028	5.558	0.274	0.035	0.086	5.687	0.445	0.547	0.562
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.028	4.133	0.168	0.017	0.053	3.893	0.149	0.272	0.324
1,2,3,4,6,8/1,2,4,6,7,9/1,2,4,6,8,9-HxCDD	0.203	16.816	1.193	0.194	0.344	19.038	1.412	2.144	2.087
1,2,3,6,7,9/1,2,3,6,8,9-HxCDD	0.119	12.053	0.650	0.094	0.190	14.662	0.829	1.440	1.001
1,2,3,4,6,9-HxCDD	0.019	1.446	0.151	0.019	0.031	1.400	0.140	0.217	0.300
1,2,3,4,6,7-HxCDD	0.060	3.503	0.225	0.023	0.064	4.741	0.281	0.340	0.412
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.487	55.379	1.818	0.225	1.054	70.956	3.258	6.299	3.526
1,2,3,4,6,7,9-HpCDD	0.489	56.586	1.899	0.254	0.921	65.252	1.276	6.899	2.949
OCDD	2.396	125.944	4.923	0.499	8.616	420.315	5.424	46.672	6.122

7. ANHANG

Versuch Laboraufnummer	Normalbetrieb 9708007	CO-Spitzen 9812035	Normalbetrieb 9812016	Ausfall TNV, I 9812022	Ausfall TNV, II 9812017	CO-Spitze, Memory-Phase I 9812015	Normalbetrieb 9712016	CO-Spitze, Memory-Phase II 9812036	Normalbetrieb 9712019+9712020
1-MCDF	0.007	18.786	0.889	0.531	0.078	567.982	2.208	5.706	2.888
3-MCDF	0.021	29.852	1.052	0.866	0.161	81.954	6.821	9.168	4.232
2-MCDF	0.022	37.559	1.239	1.062	0.184	120.317	6.903	11.036	6.346
4-MCDF	0.001	0.209	0.048	n.n.	0.015	16.288	0.292	0.914	0.086
1,3-DICDF	0.010	8.884	0.209	0.127	0.023	8.489	3.168	1.335	0.278
1,7-DICDF	0.005	8.885	0.919	0.168	0.023	6.125	1.518	0.983	0.246
1,4-DICDF	0.006	0.924	0.024	0.073	0.000	0.547	2.024	0.101	n.n.
1,8-DICDF	0.003	9.460	0.113	0.160	0.020	7.814	0.821	1.307	0.302
1,6-DICDF	n.n.	0.409	0.033	n.n.	0.004	2.066	0.232	0.259	0.162
1,2-DICDF	0.012	16.439	0.217	0.250	0.033	17.332	3.846	1.925	0.621
2,4-DICDF	0.010	1.942	0.405	0.065	0.068	40.071	3.265	5.205	1.238
3,7-DICDF	0.006	6.372	0.107	0.132	0.016	3.852	1.779	0.875	0.247
2,7-DICDF	n.n.	0.242	0.001	n.n.	0.000	0.348	0.330	0.076	n.n.
2,3-DICDF	0.011	14.493	0.185	0.223	0.032	7.971	3.393	1.567	0.499
2,8,3,6-DICDF	0.018	21.268	0.217	0.383	0.048	18.620	5.621	2.102	1.040
2,6-DICDF	0.009	10.576	0.160	0.173	0.030	8.080	2.967	1.236	0.327
1,9,3,4-DICDF	0.010	9.306	0.127	0.164	0.039	6.750	3.303	1.407	0.470
4,6-DICDF	0.012	3.288	0.116	0.067	0.030	15.330	3.872	1.553	0.576
1,3,7-TriCDF	0.002	3.687	0.045	0.048	0.012	2.857	0.746	0.645	0.070
1,3,8-TriCDF	0.004	3.942	0.030	0.059	0.015	2.721	1.147	0.589	0.057
1,3,6-TriCDF	0.002	2.922	0.015	0.032	0.008	1.949	0.611	0.196	0.051
1,3,4/1,4,8-TriCDF	0.004	5.884	0.030	0.068	0.018	3.739	1.331	0.515	0.106
1,2,4/1,6,7-TriCDF	0.009	0.209	0.032	n.n.	0.023	5.906	2.759	0.651	0.255
1,7,8-TriCDF	0.015	5.751	0.035	0.080	0.016	4.250	4.785	0.656	0.123
1,2,3-TriCDF	0.005	7.602	0.042	0.096	0.030	9.745	1.543	1.028	0.201
1,2,7-TriCDF	0.009	8.181	0.032	0.121	0.021	4.494	2.802	0.751	0.145
1,2,9-TriCDF	0.003	3.448	0.017	0.034	0.011	1.912	0.950	0.147	0.065
1,3,9-TriCDF	0.004	0.536	0.002	n.n.	0.005	1.365	1.115	0.124	0.054
2,4,7-TriCDF	0.008	10.783	0.098	0.145	0.029	5.923	2.699	1.259	0.173
1,2,6/1,2,8-TriCDF	0.010	7.957	0.086	0.112	0.019	5.815	3.288	0.699	0.182
2,4,8-TriCDF	0.007	0.149	0.005	n.n.	0.010	3.340	2.193	0.209	0.083
1,4,9-TriCDF	0.011	4.812	0.141	0.067	0.042	5.477	3.441	1.197	0.171
2,3,7-TriCDF	0.008	10.717	0.044	0.123	0.047	15.917	2.435	1.278	0.164
1,6,8/2,3,4/2,3,8-TriCDF	0.009	7.681	0.059	0.137	0.036	8.459	21.769	1.947	0.211
2,3,8/3,4,7-TriCDF	n.n.	0.229	0.011	n.n.	0.000	0.340	0.397	0.038	n.n.
2,6,7-TriCDF	0.047	15.999	0.229	0.265	0.118	41.237	14.789	3.459	0.884
1,4,6/1,4,7-TriCDF	0.043	23.388	0.063	0.181	0.051	11.496	13.570	1.949	0.374
3,4,6-TriCDF	0.022	4.104	0.040	0.067	0.025	6.368	6.993	0.627	0.164
2,4,6-TriCDF	0.018	14.151	0.030	0.181	0.135	42.013	5.619	1.501	0.198
2,3,7,8-TCDF	0.017	3.509	0.325	0.076	0.074	6.198	5.276	0.936	0.144
1,3,6,8-TCDF	0.005	0.687	0.095	0.029	0.061	9.892	1.015	0.535	0.043
1,3,7,8/1,3,7,9-TCDF	n.n.	11.054	0.142	0.039	0.149	15.893	2.754	1.107	0.051
1,3,4,7-TCDF	n.n.	3.925	0.108	0.035	0.060	6.992	1.412	0.554	0.050
1,4,6,8-TCDF	0.011	2.524	0.125	0.044	0.047	5.456	1.668	0.538	0.058
1,2,4,7/1,3,6,7-TCDF	0.013	6.032	0.196	0.061	0.085	9.939	2.505	0.870	0.099
1,3,4,8-TCDF	n.n.	3.225	0.109	0.032	0.045	5.266	1.409	0.482	0.049
1,2,4,6/1,3,4,6-TCDF	n.n.	2.513	0.173	0.058	0.050	5.374	2.668	0.698	0.150
1,2,4,6/1,2,6,8/1,2,3,7/1,4,7,8/1,3,6,9-TCDF	0.076	12.042	0.561	0.173	0.219	22.032	12.705	2.522	0.419
1,2,3,4/1,2,3,6/1,2,3,8/1,4,6,7/1,6,7,8/2,4,6,8-TCDF	0.022	12.250	0.939	0.274	0.228	23.887	16.539	3.168	0.604
1,3,4,9-TCDF	n.n.	1.091	n.n.	0.015	0.017	1.743	n.n.	n.n.	n.n.
1,2,7,8-TCDF	0.018	5.711	0.223	0.065	0.084	9.752	9.783	0.923	0.190
1,2,6,7-TCDF	n.n.	3.692	0.194	0.055	0.067	6.749	5.002	0.708	0.135
1,2,7,8/1,4,6,9-TCDF	n.n.	0.987	0.067	0.016	0.018	1.834	13.514	0.148	0.054
1,2,4,9/2,3,6,8-TCDF	0.022	3.713	0.273	0.076	0.084	8.894	5.779	0.954	0.250
2,4,6,7-TCDF	0.045	5.585	0.327	0.094	0.129	14.580	5.583	1.504	0.223
1,2,3,9/2,3,4,7-TCDF	n.n.	6.673	0.373	0.106	0.148	16.111	5.434	1.625	0.259
1,2,6,9-TCDF	n.n.	5.111	0.334	0.084	0.125	11.146	0.776	1.248	0.077
2,3,4,8-TCDF	0.039	3.707	0.325	0.076	0.081	6.155	6.364	0.936	0.204
2,3,4,6-TCDF	n.n.	5.353	0.283	0.065	0.122	12.356	5.828	1.351	0.248
2,3,6,7-TCDF	0.043	6.818	0.219	0.067	0.127	13.141	6.032	1.218	0.208
3,4,6,7-TCDF	0.079	9.741	0.236	0.057	0.174	19.423	3.414	1.732	0.116

7. ANHANG

Versuch Laborlaufnummer	Normalbetrieb 9708007	CO-Spitzen 9812035	Normalbetrieb 9812016	Ausfall TNV, I 9812022	Ausfall TNV, II 9812017	CO-Spitze, Memory-Phase I 9812015	Normalbetrieb 9712016	CO-Spitze, Memory-Phase II 9812036	Normalbetrieb 9712019+9712020
1,2,3,7,8/1,2,3,4,8-PeCDF	0,076	7,014	0,576	0,128	0,217	20,180	2,635	2,136	0,477
2,3,4,7,8-PeCDF	0,114	5,865	0,588	0,132	0,242	21,665	2,536	2,175	0,754
1,3,4,6,8-PeCDF	0,014	4,770	0,221	0,061	0,099	13,685	0,562	1,213	0,135
1,2,4,6,8-PeCDF	0,017	3,742	0,321	0,093	0,116	13,584	1,391	1,412	0,228
1,3,6,7,8-PeCDF	n.n.	5,784	0,187	0,047	0,114	13,300	0,415	1,175	0,095
1,3,4,7,8-PeCDF	n.n.	1,595	0,041	0,013	0,029	3,232	0,084	0,189	0,018
1,3,4,7,9/1,2,3,6,8-PeCDF	0,023	8,263	0,337	0,097	0,181	21,580	1,185	1,816	0,234
1,2,4,7,8-PeCDF	0,020	4,579	0,324	0,077	0,129	13,755	0,983	1,522	0,231
1,2,4,7,9/1,3,4,6,7-PeCDF	0,025	6,775	0,244	0,065	0,146	15,928	1,093	1,586	0,161
1,2,4,6,7-PeCDF	0,032	4,247	0,346	0,089	0,141	13,609	1,394	1,439	0,229
1,2,3,4,7/1,4,6,7,8-PeCDF	0,051	6,721	0,500	0,127	0,191	17,736	1,618	2,178	0,323
1,3,4,6,9-PeCDF	n.n.	1,305	0,066	0,022	0,026	2,882	0,356	0,360	0,046
1,2,3,4,8-PeCDF	0,029	2,393	0,228	0,058	0,082	7,944	0,741	0,932	0,148
1,2,3,7,9-PeCDF	n.n.	0,958	0,228	0,058	0,021	1,975	0,224	0,130	0,148
1,2,3,6,7-PeCDF	0,015	4,047	0,208	0,056	0,109	11,136	0,872	1,191	0,144
1,2,4,6,9/1,2,6,7,8-PeCDF	0,066	5,037	0,430	0,105	0,151	13,888	1,443	1,593	0,282
1,2,6,7,9-PeCDF	0,008	1,262	0,081	0,024	0,026	2,013	0,203	0,233	0,082
1,2,3,6,9-PeCDF	n.n.	0,746	0,053	0,014	0,024	1,946	0,161	0,209	0,052
2,3,4,6,8-PeCDF	0,117	8,260	0,730	0,198	0,259	24,587	2,787	2,795	0,687
1,2,3,4,9-PeCDF	0,009	1,116	0,152	0,032	0,040	2,789	0,433	0,334	0,124
1,2,4,8,9-PeCDF	n.n.	1,031	0,099	0,019	0,036	2,601	0,396	0,317	0,132
1,2,3,8,9-PeCDF	n.n.	0,816	0,087	0,014	0,030	2,225	0,274	0,152	0,099
2,3,4,6,7-PeCDF	0,304	23,587	0,921	0,189	0,822	57,248	3,104	6,380	0,851
1,2,3,4,7,8/1,2,3,4,7,9-HxCDF	0,097	11,711	1,175	0,193	0,515	49,799	1,592	5,351	1,195
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0,093	13,012	0,943	0,169	0,536	54,033	1,242	4,946	0,957
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0,131	2,925	0,255	0,008	0,168	13,866	0,047	0,915	0,473
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0,221	18,896	1,445	0,184	1,200	94,947	1,617	7,592	1,668
1,2,3,4,6,8,9-HxCDF	0,077	9,474	1,282	0,202	0,527	56,583	1,246	4,453	0,830
1,3,4,6,7,8/1,3,4,6,7,9-HxCDF	0,095	41,854	1,161	0,187	0,779	92,583	1,338	8,336	0,874
1,2,4,6,7,8-HxCDF	0,108	29,994	1,747	0,288	0,811	92,841	1,846	8,258	1,209
1,2,4,6,7,9-HxCDF	0,009	3,412	0,237	0,046	0,118	12,784	0,133	1,002	0,230
1,2,4,6,8,9-HxCDF	n.n.	0,864	0,125	0,022	0,052	5,201	0,233	0,352	0,166
1,2,3,4,6,7-HxCDF	0,170	18,252	1,338	0,178	0,907	86,191	1,669	8,377	1,065
1,2,3,6,7,9-HxCDF	n.n.	1,041	0,150	0,026	0,078	7,562	0,108	0,620	0,165
1,2,3,4,6,9/1,2,3,6,8,9-HxCDF	0,024	0,507	0,330	0,045	0,144	9,706	0,260	0,702	0,340
1,2,3,4,8,9-HxCDF	n.n.	0,310	0,220	0,032	0,104	8,445	0,204	0,404	0,268
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	1,087	12,077	5,949	0,637	5,995	522,614	4,197	53,766	5,659
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0,074	17,511	0,533	0,045	0,423	48,760	0,266	61,543	0,654
1,2,3,4,6,7,9-HpCDF	0,131	17,411	0,760	0,093	0,602	54,882	0,403	2,221	0,784
1,2,3,4,6,8,9-HpCDF	0,109	29,428	0,772	0,075	0,529	37,374	0,356	1,296	0,838
OCDF	0,713	87,091	2,735	0,245	4,634	476,348	1,584	51,775	3,031
I-TEQ (NATO/CCMS)	0,148	12,472	0,923	0,160	0,507	43,944	4,642	4,745	1,130
I-TEQ (PCDD nach NATO/CCMS)	0,019	3,801	0,118	0,017	0,057	4,028	2,219	0,371	0,220
I-TEQ (PCDF nach NATO/CCMS)	0,129	8,672	0,805	0,142	0,450	39,916	2,423	4,373	0,911
I-TEQ (WHO)	0,149	13,445	0,944	0,168	0,509	44,380	6,007	4,778	1,177
I-TEQ (PCDD nach WHO)	0,021	4,852	0,142	0,026	0,063	4,892	3,586	0,451	0,269
I-TEQ (PCDF nach WHO)	0,129	8,593	0,802	0,142	0,446	39,487	2,422	4,327	0,908

7. ANHANG

Versuch Laborlaufnummer	Normalbetrieb 9708007	CO-Spitzen 9812035	Normalbetrieb 9812016	Ausfall TNV, I 9812022	Ausfall TNV, II 9812017	CO-Spitze, Memory-Phase I 9812015	Normalbetrieb 9712016	CO-Spitze, Memory-Phase II 9812036	Normalbetrieb 9712019+9712020
#1	5.836	1.837	n.n.	0.005	0.229	126.260	8.483	0.572	12.341
#2	1.365	5.349	0.037	0.039	0.683	192.167	1.980	1.476	2.745
#3	2.333	3.062	0.042	0.043	1.455	117.834	3.382	0.328	5.101
#6	n.n.	7.811	0.134	0.018	1.088	73.834	n.n.	1.017	n.n.
#5,#8	3.570	30.515	0.250	0.107	10.991	10.860	5.534	5.107	7.925
#11	0.694	45.995	5.167	0.342	37.090	124.824	1.075	20.200	1.221
#13	1.483	7.136	n.n.	0.030	2.062	2.621	2.299	1.017	2.926
#15	2.850	5.222	n.n.	n.n.	7.502	33.016	4.417	7.361	6.100
#19	n.n.	0.125	n.n.	n.n.	n.n.	2.684	0.207	1.588	1.627
#18	4.337	85.913	1.755	0.229	1.688	10.672	0.232	2.118	1.723
#17	2.136	24.910	0.084	0.149	n.n.	5.492	2.274	5.098	1.715
#24	n.n.	8.451	n.n.	n.n.	n.n.	5.992	6.390	0.979	2.077
#32	0.401	16.626	0.027	0.060	n.n.	4.993	4.383	1.579	1.093
#16	0.465	27.875	0.650	0.260	0.624	16.352	4.372	6.785	1.526
#28,#31	16.487	151.979	23.743	1.917	22.805	597.660	1.116	90.338	5.478
#33	3.089	46.209	5.222	0.684	5.015	131.440	2.578	16.240	4.130
#22	n.n.	21.387	3.454	0.409	3.317	86.940	0.239	11.072	5.500
#53	n.n.	6.700	0.089	0.100	0.403	10.571	1.123	3.146	0.521
#51	n.n.	6.443	0.143	0.091	0.138	3.608	0.878	1.313	0.487
#45	n.n.	5.162	n.n.	0.076	0.213	5.571	1.644	1.919	1.428
#46	n.n.	n.n.	0.093	0.028	n.n.	6.051	1.491	1.398	n.n.
#52	7.707	53.770	10.357	0.908	9.948	260.701	6.407	41.694	3.596
#49	2.045	23.184	4.983	0.558	4.786	125.419	6.415	25.147	4.697
#47,#48	1.787	23.323	3.701	0.585	3.555	93.157	1.652	16.764	0.304
#44	2.687	21.768	4.661	0.558	4.477	117.338	4.190	18.725	3.154
#42	0.646	9.295	2.151	0.285	2.068	54.136	2.817	5.572	6.214
#64	n.n.	9.622	2.373	0.195	2.279	59.730	4.472	9.283	3.451
#71,#41	1.638	18.439	5.092	0.688	4.891	59.775	5.177	19.288	3.151
#40	n.n.	4.843	0.409	0.093	0.393	10.297	3.388	1.827	1.370
#67	n.n.	2.850	0.694	0.088	0.667	17.467	n.n.	4.773	1.445
#63	n.n.	16.862	n.n.	0.083	n.n.	3.082	n.n.	4.510	n.n.
#74	2.781	28.900	9.114	0.959	8.754	229.421	n.n.	40.672	n.n.
#70,#76	10.109	45.294	14.339	1.676	13.773	360.936	n.n.	55.850	n.n.
#66	2.481	47.070	n.n.	1.434	13.777	5.571	n.n.	53.382	n.n.
#60,#56	3.188	19.761	5.218	0.620	n.n.	131.355	n.n.	16.210	n.n.
#81	n.n.	0.750	n.n.	0.010	n.n.	3.539	n.n.	0.815	n.n.
#77	n.n.	4.750	1.605	0.079	0.782	20.504	0.285	3.928	n.n.
#100	n.n.	0.641	n.n.	0.012	0.222	1.942	n.n.	0.472	0.232
#95,#102	5.879	27.931	5.219	0.491	15.038	131.371	0.213	23.139	n.n.
#91	n.n.	2.687	0.482	0.029	1.389	12.137	0.713	2.134	0.565
#84,#92	2.352	9.767	2.162	0.183	6.229	54.419	1.955	8.923	2.102
#101	5.586	43.119	10.045	0.734	28.947	252.867	9.188	38.359	8.055
#99	1.145	9.675	2.898	0.280	8.352	72.958	1.018	11.649	1.097
#119,#83,#86,#97,#87,#115,#85	2.750	21.503	4.813	0.408	13.868	115.561	1.965	16.872	1.814
#87,#115,#85	2.750	14.446	3.268	0.327	8.418	82.274	2.862	10.575	2.686
#110	6.674	44.806	8.211	0.683	23.659	206.883	7.355	31.447	7.193
#82	n.n.	1.137	n.n.	0.003	0.571	3.545	0.307	1.285	0.247
#107,#123,#124	n.n.	5.802	1.131	0.070	2.398	28.460	n.n.	5.112	n.n.
#118	2.230	40.334	6.576	0.576	18.948	165.528	6.974	27.900	1.626
#114,#122	n.n.	1.988	0.522	0.034	n.n.	16.176	n.n.	1.533	0.783
#105	0.907	9.742	1.648	0.140	4.750	41.495	n.n.	6.016	0.268
#126	n.n.	2.373	0.681	0.029	1.107	9.674	0.239	1.770	n.n.

7. ANHANG

Versuch Laborlaufnummer	Normalbetrieb 9708007	CO-Spitzen 9812035	Normalbetrieb 9812016	Ausfall TNV, I 9812022	Ausfall TNV, II 9812017	CO-Spitze, Memory-Phase I 9812015	Normalbetrieb 9712016	CO-Spitze, Memory-Phase II 9812036	Normalbetrieb 9712019+9712020
#136	2.791	n.n.	n.n.	0.001	n.n.	3.113	2.160	n.n.	2.832
#151	3.358	15.798	n.n.	n.n.	n.n.	5.647	3.878	13.885	3.775
#135,#144,#147	3.009	24.482	4.475	0.197	21.493	112.854	2.070	21.308	2.025
#149	12.031	50.850	9.060	0.844	43.512	228.063	11.801	40.289	12.643
#134	0.583	2.807	0.434	0.044	2.082	10.915	0.783	1.890	0.900
#131	0.368	1.916	0.303	0.023	1.456	7.630	n.n.	1.369	0.942
#132,#146	2.053	10.821	1.886	0.129	8.098	42.442	2.838	8.105	2.239
#153	12.803	74.815	11.822	0.979	58.779	297.611	17.503	45.630	15.485
#141	2.646	16.388	2.325	0.193	11.184	58.517	4.362	10.264	3.812
#137	n.n.	1.851	0.183	0.016	0.877	4.595	0.551	0.972	0.473
#130	0.311	3.761	0.461	0.038	2.212	11.595	n.n.	2.139	2.191
#180,#183	3.832	27.585	3.849	0.313	18.484	96.879	9.875	17.320	5.362
#138	10.292	71.767	9.416	0.736	45.224	237.030	13.885	37.588	13.354
#129,#158	n.n.	2.889	0.349	0.023	1.678	8.796	n.n.	1.262	2.297
#167	n.n.	2.075	0.650	0.017	3.122	16.361	n.n.	2.111	0.415
#128,#159	1.778	4.300	0.772	0.061	3.706	19.425	n.n.	2.283	0.707
#156	0.278	n.n.	1.184	0.087	5.689	29.817	n.n.	3.537	n.n.
#157	n.n.	5.172	0.272	0.021	n.n.	6.849	n.n.	1.090	0.730
#169	n.n.	1.420	0.482	0.011	1.144	5.995	0.303	1.074	11.695
#179	1.719	7.310	1.086	0.103	7.300	27.330	1.406	3.839	1.463
#178	0.932	4.489	n.n.	0.032	n.n.	7.870	0.370	1.549	0.478
#178	0.713	5.178	0.511	0.032	3.435	12.862	0.530	2.306	0.465
#175	n.n.	1.690	n.n.	0.186	n.n.	1.622	0.343	0.616	2.736
#187	2.901	27.007	2.473	0.186	16.625	62.241	2.734	10.111	2.762
#183	2.424	12.219	1.298	0.094	8.729	32.665	1.643	5.708	2.149
#185	n.n.	2.482	0.271	0.011	1.823	6.825	0.754	1.143	0.431
#174	3.047	11.250	1.587	0.158	10.671	39.950	2.870	5.184	2.312
#177	2.352	4.866	1.139	0.045	7.656	28.664	1.594	4.387	2.370
#171	0.828	n.n.	0.638	0.026	4.287	16.052	1.580	2.383	1.251
#173	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	39.892	0.222	0.142	1.029
#172	n.n.	7.949	0.435	0.029	2.925	10.951	0.791	2.289	0.679
#180,#193	8.714	38.895	3.783	0.296	25.433	95.218	5.622	15.463	6.397
#191	n.n.	1.158	0.182	0.014	1.225	4.586	1.613	1.058	2.924
#170	1.563	46.988	2.306	0.189	15.506	58.053	4.347	9.674	n.n.
#190	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	7.971	4.347	n.n.	n.n.
#189	n.n.	n.n.	0.482	0.022	3.244	12.144	n.n.	2.263	n.n.
#202	0.110	0.505	0.040	0.001	0.269	1.006	n.n.	0.156	5.794
#200	0.084	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	13.041	0.835	n.n.	0.236
#199	0.087	4.576	0.316	0.014	2.127	7.983	0.269	1.245	6.462
#198	n.n.	4.576	n.n.	0.001	n.n.	2.687	0.306	0.180	0.616
#201	0.594	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	1.825	0.190	0.084	1.400
#203,#196	0.752	5.871	0.541	0.017	3.637	0.944	0.542	1.712	1.419
#195	0.246	n.n.	0.172	0.007	1.154	4.321	1.447	0.752	2.398
#194	0.512	6.097	0.590	0.018	3.967	14.850	1.324	2.056	5.668
#205	0.216	1.977	0.210	0.011	3.969	5.296	1.887	1.448	3.759
#208	0.032	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	1.590	n.n.	n.n.	1.638
#207	0.043	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.658	0.439	4.930
#206	0.407	3.912	0.776	0.011	n.n.	19.298	3.505	2.184	1.508
#209	0.171	n.n.	n.n.	n.n.	3.192	11.951	0.391	n.n.	1.144
TEQ (nach Safe)	0.010	0.471	0.135	0.007	0.223	2.153	0.049	0.377	0.588
TEQ (WHO)	0.001	0.288	0.076	0.003	0.130	1.096	0.028	0.198	0.118

7. ANHANG

Versuch	Normalbetrieb	CO-Spitzen	Normalbetrieb	Ausfall TNV, I	Ausfall TNV, II	CO-Spitze, Memory-Phase I	Normalbetrieb	CO-Spitze, Memory-Phase II	Normalbetrieb
Laborlaufnummer	9708007	9812035	9812016	9812022	9812017	9812015	9712016	9812036	9712019+9712020
MCBz	414.97	65763.89	1885.56	536.24	779.22	80459.77	21388.52	20057.45	3378.91
1,3-DiCBz	89.02	18235.21	63.19	34.38	63.11	13745.70	1252.26	1767.72	320.14
1,4-DiCBz	38.74	8908.64	217.03	13.00	178.48	20089.88	1713.59	2966.45	357.96
1,2-DiCBz	101.57	14321.23	368.13	8.16	42.50	52735.92	2317.25	5004.69	589.37
1,3,5-TriCBz	24.43	2032.52	80.39	19.48	17.57	4562.53	1398.51	1207.19	385.09
1,2,4-TriCBz	45.87	5487.80	84.62	28.57	56.61	6172.84	1177.59	1402.01	194.24
1,2,3-TriCBz	101.46	3958.05	39.35	72.12	330.08	11808.91	2187.03	4077.87	357.45
1,2,3,5-TeCBz	-	2153.84	16.32	2.25	16.19	948.17	-	524.29	-
1,2,4,5-TeCBz	-	2025.92	25.64	1.73	14.51	1896.33	-	544.44	-
1,2,3,5-TeCBz+1,2,4,5-TeCBz	26.62	4179.76	41.96	3.88	30.70	2844.50	1573.10	1068.74	173.99
1,2,3,4-TeCBz	28.30	2952.32	177.16	8.17	25.45	14327.86	1323.92	713.28	207.48
PeCBz	19.45	8708.04	165.18	18.48	77.82	9680.13	970.47	1902.73	78.56
HxCBz	33.17	7251.82	109.48	11.13	73.36	9042.55	766.02	2144.92	62.01

Versuch	CO-Spitzen	Normalbetrieb	CO-Spitze, Memory-Phase I	Normalbetrieb	Normalbetrieb
Laborlaufnummer	9812035	9812016	9812015	9712016	9712019+9712020
2-MCPh	3171.66	380.67	5193.38	140.87	53.07
4-MCPh	9808.67	596.77	16883.83	745.11	635.21
2,6-DiCPh	595.44	14.74	1038.28	128.00	n.n.
2,4-DiCPh	1930.87	202.83	3680.39	157.93	213.36
3,4-DiCPh	1725.00	16.70	4661.85	144.95	46.69
2,4,6-TriCPh	3280.18	74.04	9111.88	231.19	80.92
2,3,6-TriCPh	329.20	15.64	1109.85	n.n.	12.76
2,3,5-TriCPh	170.08	37.91	493.42	250.23	2.80
2,4,5-TriCPh	145.57	58.01	302.29	439.41	27.06
2,3,4-TriCPh	241.18	136.53	955.01	437.08	541.47
3,4,5-TriCPh	28.56	20.10	155.97	202.89	15.26
2,3,5,6-TeCPh	1.61	n.n.	56.30	161.70	35.12
2,3,4,6-TeCPh	269.65	40.92	963.34	309.47	14.38
2,3,4,5-TeCPh	124.24	6.60	356.01	124.26	129.68
PeCPh	578.72	132.90	2238.88	315.86	132.17

7. ANHANG

Versuch	CO-Spitzen	Normalbetrieb	CO-Spitze, Memory-Phase II	CO-Spitze, Memory-Phase I	Normalbetrieb	CO-Spitzen	Normalbetrieb	CO-Spitze, Memory-Phase I	Instationärer Betrieb
Laborlaufnummer	9812021	9712034+9712035	9812014	9812018	9805021	9805022	9805023	9805024	9807058
1-MCDD	1.184	0.008	2.856	31.884	1.522	0.351	0.008	0.048	0.168
2-MCDD	1.268	0.004	1.307	11.061	0.879	0.271	0.008	0.029	0.079
1,3-DiCDD	1.197	0.011	0.096	1.854	0.791	0.380	n.n.	n.n.	0.062
2,7,2,3,2,8-DiCDD	0.200	0.025	0.454	5.180	0.759	0.285	0.015	0.013	0.059
1,4,1,7-DiCDD	0.082	n.n.	0.089	3.697	0.820	0.099	0.005	0.066	0.020
1,8-DiCDD	0.124	n.n.	0.073	3.927	0.647	0.091	n.n.	0.029	0.029
1,6-DiCDD	0.054	n.n.	0.342	0.691	0.255	0.016	n.n.	n.n.	0.014
1,2-DiCDD	0.040	n.n.	0.128	2.582	0.322	0.060	n.n.	n.n.	0.023
1,9-DiCDD	0.602	0.006	0.194	0.842	0.218	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1,3,7-TriCDD	0.290	0.010	0.224	5.574	1.085	0.226	0.010	0.103	0.048
1,3,8-TriCDD	0.475	0.004	0.238	7.292	0.945	0.253	0.008	0.138	0.047
1,3,6-TriCDD	0.180	n.n.	0.045	1.956	0.780	0.076	0.005	0.056	0.030
1,2,4-TriCDD	0.095	n.n.	0.034	1.534	0.304	0.046	0.004	0.015	0.018
1,3,9,2,3,7-TriCDD	0.171	0.011	0.185	3.671	1.314	0.066	0.011	0.086	0.079
1,4,7-TriCDD	0.110	0.009	0.062	0.757	0.474	0.020	0.001	0.030	0.016
1,2,3-TriCDD	0.082	n.n.	0.027	0.989	0.309	0.075	n.n.	0.031	0.037
1,7,8-TriCDD	0.158	n.n.	0.099	1.020	0.429	0.005	0.006	0.037	0.023
1,2,7-TriCDD	0.056	0.006	0.021	1.122	0.435	0.035	0.003	0.041	0.023
1,2,8-TriCDD	0.146	n.n.	0.019	1.123	0.382	0.037	0.005	0.048	0.023
1,4,8-TriCDD	0.023	n.n.	0.021	0.405	0.264	0.020	0.005	0.010	0.023
1,2,6-TriCDD	0.082	n.n.	0.012	0.553	0.261	0.020	n.n.	0.015	0.020
1,2,9-TriCDD	0.153	n.n.	0.016	0.642	0.277	0.037	n.n.	0.036	0.013
2,3,7,8-TCDD	0.030	n.n.	0.021	0.068	0.140	0.027	n.n.	0.020	0.036
1,3,6,8-TCDD	0.424	0.018	0.141	1.120	1.917	0.370	0.015	0.252	0.216
1,3,7,9-TCDD	0.111	0.015	0.055	0.392	1.136	0.233	0.017	0.143	0.154
1,3,7,8-TCDD	0.096	n.n.	0.028	0.095	0.914	0.206	0.022	0.105	0.194
1,3,6,9,1,2,4,7,1,2,4,8-TCDD	0.103	0.021	0.059	0.540	1.419	0.200	0.022	0.149	0.213
1,2,6,8-TCDD	0.053	0.006	0.027	0.113	0.672	0.124	n.n.	0.085	0.122
1,4,7,8-TCDD	n.n.	n.n.	0.011	0.099	0.160	0.027	n.n.	n.n.	0.036
1,2,4,6,1,2,4,9-TCDD	0.111	0.006	0.023	0.611	0.556	0.101	n.n.	0.061	0.111
1,2,3,4,1,2,3,7,1,2,3,8-TCDD	0.111	0.012	0.088	0.625	1.110	0.250	0.025	0.177	0.189
1,2,3,6,1,2,7,9-TCDD	0.054	0.009	0.058	0.487	1.035	0.220	0.031	0.131	0.216
1,2,7,8,1,4,6,9-TCDD	0.026	n.n.	0.015	0.170	0.343	0.094	0.013	0.047	0.123
1,2,3,9-TCDD	0.028	0.007	0.017	0.099	0.295	0.072	0.006	0.047	0.085
1,2,6,9-TCDD	0.019	0.003	0.012	0.113	0.231	0.053	0.005	0.035	0.066
1,2,6,7-TCDD	0.008	0.004	0.039	0.124	0.169	0.052	n.n.	n.n.	0.056
1,2,8,9-TCDD	n.n.	0.009	0.037	0.170	0.110	0.043	0.005	0.032	0.058
1,2,3,7,8-PeCDD	0.158	0.027	0.048	0.335	0.574	0.576	0.052	0.244	0.581
1,2,4,6,8,1,2,4,7,9-PeCDD	0.913	0.119	0.407	2.280	2.434	1.173	0.124	0.814	1.308
1,2,3,6,8-PeCDD	0.757	0.063	0.194	1.166	1.869	0.945	0.087	0.654	0.986
1,2,4,7,8-PeCDD	0.137	0.014	0.080	0.505	0.507	0.482	0.024	0.195	0.483
1,2,3,7,9-PeCDD	0.285	0.047	0.166	1.315	1.300	0.538	0.088	0.384	0.858
1,2,3,4,7,1,2,4,8,9-PeCDD	0.132	0.030	0.078	0.745	0.804	0.392	0.043	0.222	0.444
1,2,3,6,9-PeCDD	0.113	0.021	0.089	0.335	0.486	0.274	0.026	0.187	0.343
1,2,4,6,7-PeCDD	0.116	0.014	0.021	0.405	0.385	0.385	0.042	0.141	0.401
1,2,4,8,9-PeCDD	0.074	0.012	0.022	0.405	0.386	0.416	0.042	0.147	0.437
1,2,3,4,6-PeCDD	0.074	0.034	0.069	0.399	0.750	0.406	0.080	0.179	0.464
1,2,3,6,7-PeCDD	0.173	0.035	0.088	0.389	0.790	0.583	0.062	0.267	0.624
1,2,3,8,9-PeCDD	0.131	0.037	0.077	0.440	0.609	0.597	0.095	0.263	0.595
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.325	0.081	0.099	0.801	0.404	1.173	0.087	0.394	1.559
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.744	0.135	0.302	2.309	0.731	2.289	0.156	0.868	2.239
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.414	0.072	0.153	0.990	0.519	1.527	0.131	0.589	1.823
1,2,3,4,6,8,1,2,4,6,7,9,1,2,4,6,8,9-HxCDD	2.747	0.484	1.467	7.329	3.157	5.139	0.370	2.763	6.058
1,2,3,6,7,9,1,2,3,8,8,9-HxCDD	1.507	0.341	0.683	4.298	1.667	6.142	0.350	1.745	6.291
1,2,3,4,6,9-HxCDD	0.263	0.080	0.125	0.725	0.446	0.584	0.080	0.238	0.893
1,2,3,4,6,7-HxCDD	0.516	0.177	0.176	1.383	0.887	2.267	0.230	0.702	3.466
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	9.363	1.058	2.468	16.503	1.783	28.303	1.743	13.517	29.901
1,2,3,4,6,7,9-HpCDD	11.269	0.927	2.419	15.697	1.801	27.231	1.475	11.504	29.774
OCDD	70.495	2.904	9.842	52.018	7.254	130.635	13.008	110.427	177.458

7. ANHANG

Versuch Laborlaufnummer	CO-Spitzen 9812021	Normalbetrieb 9712034+9712035	CO-Spitze, Memory-Phase II 9812014	CO-Spitze, Memory-Phase I 9812018	Normalbetrieb 9805021	CO-Spitzen 9805022	Normalbetrieb 9805023	CO-Spitze, Memory-Phase I 9805024	Instationärer Betrieb 9807058
1-MCDF	10.102	0.482	7.010	35.797	14.548	71.944	1.749	11.834	0.831
3-MCDF	19.626	0.983	13.618	59.761	19.874	10.381	3.407	12.916	1.717
2-MCDF	28.182	1.101	18.154	68.884	24.855	15.240	12.835	16.811	1.959
4-MCDF	0.826	0.018	0.434	1.128	0.595	2.063	1.397	2.430	0.164
1,3-DiCDF	0.697	0.087	0.544	6.600	5.586	1.075	0.127	1.050	0.243
1,7-DiCDF	0.733	0.084	0.509	7.086	10.403	0.776	0.126	1.185	0.250
1,4-DiCDF	0.487	n.n.	0.383	0.289	7.051	0.089	n.n.	n.n.	0.004
1,8-DiCDF	0.741	0.088	0.280	7.382	7.981	0.990	0.157	1.498	0.208
1,6-DiCDF	1.181	0.038	0.366	2.304	0.826	0.262	0.045	0.371	0.045
1,2-DiCDF	2.306	0.275	1.600	16.627	7.103	2.195	0.197	1.800	0.355
2,4-DiCDF	4.833	0.415	3.354	27.805	8.885	5.078	0.412	2.835	0.720
3,7-DiCDF	1.089	0.122	0.756	7.308	5.279	0.488	0.139	0.815	0.187
2,7-DiCDF	0.495	n.n.	1.790	0.660	0.084	0.044	n.n.	0.010	0.005
2,3-DiCDF	1.509	0.164	1.047	10.336	11.004	1.010	0.230	1.421	0.345
2,8/3,6-DiCDF	4.655	0.406	3.230	22.512	9.091	2.359	0.274	1.884	0.507
2,8-DiCDF	2.139	0.157	1.484	8.039	6.080	1.024	0.148	1.019	0.322
1,9/3,4-DiCDF	3.760	0.153	2.609	8.392	8.548	0.855	0.287	1.030	0.410
4,6-DiCDF	1.787	0.130	1.240	7.774	7.857	1.942	0.263	2.018	0.315
1,3,7-TriCDF	0.111	0.038	0.063	3.292	2.319	0.337	0.059	0.430	0.129
1,3,8-TriCDF	0.059	0.031	0.047	2.837	2.348	0.345	0.085	0.420	0.160
1,3,8-TriCDF	0.083	0.015	0.118	1.201	1.873	0.247	0.049	0.212	0.088
1,3,4/1,4,8-TriCDF	0.135	0.044	0.278	3.863	2.754	0.474	0.067	0.375	0.192
1,2,4/1,6,7-TriCDF	0.048	0.070	0.286	4.119	4.057	0.748	0.111	0.602	0.245
1,7,8-TriCDF	0.337	0.046	0.234	3.789	2.667	0.538	0.085	0.520	0.172
1,2,3-TriCDF	0.535	0.078	0.371	5.877	2.737	1.234	0.103	0.533	0.323
1,2,7-TriCDF	0.705	0.062	0.489	4.440	3.737	0.569	0.131	0.511	0.223
1,2,9-TriCDF	0.091	0.022	0.242	0.253	2.344	0.242	0.029	0.194	0.121
1,3,9-TriCDF	0.103	0.011	0.544	0.079	0.298	0.173	0.013	0.127	0.053
2,4,7-TriCDF	1.818	0.078	1.282	4.852	4.919	0.750	0.177	0.547	0.308
1,2,8/1,2,8-TriCDF	1.494	0.074	1.038	5.043	4.172	0.737	0.127	0.518	0.200
2,4,8-TriCDF	2.306	0.038	1.600	1.473	0.089	0.423	0.034	0.250	0.105
1,4,9-TriCDF	0.388	0.048	0.484	3.803	6.139	0.694	0.194	0.747	0.443
2,3,7-TriCDF	0.503	0.051	0.553	2.587	2.974	2.018	0.173	0.878	0.503
1,6,8/2,3,4/2,3,8-TriCDF	1.529	0.073	1.081	4.892	3.881	1.071	0.180	0.863	0.379
2,3,8/3,4,7-TriCDF	0.063	n.n.	0.181	0.250	0.048	0.043	n.n.	0.031	0.002
2,6,7-TriCDF	9.959	0.337	6.911	23.228	9.057	5.223	0.459	1.819	1.252
1,4,8/1,4,7-TriCDF	5.305	0.183	3.881	10.193	5.148	1.458	0.190	0.930	0.540
3,4,8-TriCDF	1.628	0.088	1.130	3.812	4.115	0.807	0.139	0.447	0.288
2,4,8-TriCDF	2.831	0.092	1.825	4.084	2.580	5.322	0.154	0.908	1.434
2,3,7,8-TCDF	1.089	0.080	0.450	4.611	1.157	0.540	0.105	0.370	0.521
1,3,6,8-TCDF	0.579	0.030	0.200	1.909	0.947	0.324	0.043	0.292	0.303
1,3,7,8/1,3,7,9-TCDF	1.223	0.023	0.411	3.692	1.153	0.518	0.078	0.487	0.297
1,3,4,7-TCDF	0.645	0.023	0.243	2.557	2.108	0.395	0.071	0.327	0.327
1,4,6,8-TCDF	0.581	0.029	0.286	2.650	1.819	0.583	0.085	0.364	0.518
1,2,4,7/1,3,6,7-TCDF	0.890	0.042	0.401	3.921	3.159	0.612	0.118	0.450	0.495
1,3,4,8-TCDF	0.483	0.016	0.223	2.159	2.018	0.359	0.085	0.371	0.339
1,2,4,8/1,3,4,8-TCDF	0.837	0.081	0.358	3.550	2.959	0.825	0.117	0.524	0.581
1,2,4,8/1,2,6,8/1,2,3,7/1,4,7,8/1,3,6,9-TCDF	2.310	0.192	1.093	10.140	7.075	3.074	0.353	1.527	2.053
1,2,3,4/1,2,3,6/1,2,3,8/1,4,6,7/1,6,7,8/2,4,6,8-TCDF	3.099	0.254	1.627	14.700	9.851	5.702	0.514	2.318	3.067
1,3,4,9-TCDF	0.193	n.n.	0.036	0.307	0.430	0.467	0.045	0.178	0.237
1,2,7,8-TCDF	0.884	0.116	0.489	3.512	2.393	0.803	0.135	0.619	0.508
1,2,6,7-TCDF	0.714	0.063	0.432	2.873	2.556	1.398	0.127	0.504	0.788
1,2,7,9/1,4,6,9-TCDF	0.213	0.012	0.111	0.531	0.408	0.921	0.045	0.273	0.351
1,2,4,9/2,3,6,8-TCDF	1.295	0.102	0.532	5.057	2.780	1.065	0.178	0.679	0.974
2,4,6,7-TCDF	2.526	0.108	0.902	8.525	2.773	6.604	0.256	1.379	2.995
1,2,3,9/2,3,4,7-TCDF	2.748	0.119	0.963	8.597	3.058	7.055	0.285	1.570	3.203
1,2,6,9-TCDF	1.669	0.036	0.798	5.972	3.284	2.037	0.208	0.795	1.405
2,3,4,8-TCDF	1.080	0.110	0.620	4.821	3.569	1.288	0.174	0.688	1.036
2,3,4,8-TCDF	1.753	0.110	0.789	6.203	2.242	7.971	0.292	1.211	3.628
2,3,6,7-TCDF	1.785	0.098	0.630	6.073	2.214	2.715	0.206	0.841	1.604
3,4,6,7-TCDF	2.892	0.088	0.998	8.514	1.286	11.234	0.356	1.376	5.378

7. ANHANG

Versuch Laboraufnummer	CO-Spitzen 9812021	Normalbetrieb 9712034+9712035	CO-Spitze, Memory-Phase II 9812014	CO-Spitze, Memory-Phase I 9812018	Normalbetrieb 9805021	CO-Spitzen 9805022	Normalbetrieb 9805023	CO-Spitze, Memory-Phase I 9805024	Instationärer Betrieb 9807058
1,2,3,7,8/1,2,3,4,8-PeCDF	2.203	0.225	1.006	7.555	2.887	2.487	0.319	1.470	2.378
2,3,4,7,8-PeCDF	3.349	0.295	1.233	10.281	1.982	5.907	0.498	2.061	4.571
1,3,4,6,8-PeCDF	1.269	0.058	0.486	4.571	1.227	1.684	0.124	0.872	1.565
1,2,4,6,8-PeCDF	1.641	0.157	0.658	5.669	1.707	1.854	0.184	0.838	2.316
1,3,6,7,8-PeCDF	1.077	0.044	0.398	3.258	0.804	1.088	0.092	0.458	0.753
1,3,4,7,8-PeCDF	0.279	n.n.	0.085	0.407	0.152	0.312	0.025	0.125	0.224
1,3,4,7,9/1,2,3,6,8-PeCDF	1.980	0.094	0.694	6.441	1.740	2.638	0.171	1.120	2.045
1,2,4,7,8-PeCDF	1.340	0.088	0.602	5.015	1.519	1.334	0.151	0.728	1.461
1,2,4,7,9/1,3,4,6,7-PeCDF	1.763	0.079	0.681	6.291	1.686	4.043	0.186	0.904	2.472
1,2,4,6,7-PeCDF	1.418	0.103	0.702	4.809	1.973	3.153	0.189	1.027	2.770
1,2,3,4,7/1,4,6,7,8-PeCDF	2.067	0.150	1.081	6.911	3.271	3.094	0.149	1.135	2.882
1,3,4,6,9-PeCDF	0.341	n.n.	0.039	0.541	0.231	1.716	0.083	0.255	1.029
1,2,3,4,6-PeCDF	0.831	0.070	0.366	2.737	1.434	3.320	0.182	0.744	2.215
1,2,3,7,9-PeCDF	0.193	0.017	0.064	2.733	1.435	3.318	0.182	n.n.	n.n.
1,2,3,6,7-PeCDF	1.268	0.059	0.487	4.582	1.295	2.963	0.144	0.789	1.660
1,2,4,6,9/1,2,6,7,8-PeCDF	1.548	0.132	0.763	5.493	1.842	5.694	0.289	1.177	3.272
1,2,6,7,9-PeCDF	0.337	0.024	0.127	0.694	0.126	0.708	0.057	0.189	0.596
1,2,3,6,9-PeCDF	0.265	0.011	0.104	0.703	0.160	0.570	0.059	0.213	0.444
2,3,4,6,8-PeCDF	5.306	0.290	1.824	14.681	2.800	9.637	0.691	3.402	6.868
1,2,3,4,9-PeCDF	0.422	0.040	0.228	1.031	0.378	1.852	0.147	0.583	0.955
1,2,4,6,9-PeCDF	0.404	0.051	0.174	0.888	0.398	2.394	0.146	0.802	0.977
1,2,3,6,9-PeCDF	0.321	0.039	0.138	0.837	0.154	0.804	0.085	0.300	0.458
2,3,4,6,7-PeCDF	10.783	0.379	2.844	21.014	2.788	45.152	2.333	9.644	14.857
1,2,3,4,7,8/1,2,3,4,7,9-HxCDF	5.448	0.444	2.052	17.548	1.944	7.784	0.579	3.025	8.657
1,2,3,6,7,8-HxCDF	5.871	0.362	1.986	14.417	1.390	14.416	0.608	4.070	8.376
1,2,3,7,8,9-HxCDF	1.808	0.198	0.539	4.091	0.110	2.603	0.238	1.062	1.286
2,3,4,6,7,8-HxCDF	12.548	0.594	3.494	28.330	1.667	49.792	2.312	12.995	24.819
1,2,3,4,6,8-HxCDF	6.436	0.382	2.320	18.886	2.058	8.448	0.420	2.971	11.788
1,3,4,6,7,8/1,3,4,6,7,9-HxCDF	8.767	0.336	2.728	22.282	2.005	16.680	0.667	3.618	14.808
1,2,4,6,7,8-HxCDF	9.884	0.496	3.618	24.178	2.619	13.314	0.808	4.434	18.586
1,2,4,6,7,9-HxCDF	1.098	0.067	0.597	3.791	0.289	4.182	0.232	1.055	3.043
1,2,4,6,8,9-HxCDF	0.547	0.054	0.319	1.536	2.737	2.923	n.n.	0.981	n.n.
1,2,3,4,6,7-HxCDF	7.432	0.458	2.787	21.154	2.738	29.043	1.169	6.149	19.398
1,2,3,6,7,9-HxCDF	0.656	0.048	0.297	1.709	0.150	2.033	0.124	0.802	1.533
1,2,3,4,6,9/1,2,3,6,8,9-HxCDF	1.177	0.109	0.592	3.601	0.389	9.612	0.476	2.676	4.472
1,2,3,4,8,9-HxCDF	0.884	0.084	0.345	1.706	0.229	5.176	0.361	1.855	2.760
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	60.777	2.529	15.561	106.210	3.595	120.837	7.820	43.043	97.662
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	3.284	0.194	1.488	7.477	0.289	13.974	0.887	8.342	7.772
1,2,3,4,6,7,9-HpCDF	5.689	0.296	2.205	13.680	0.444	29.203	1.686	12.652	18.362
1,2,3,4,6,8,9-HpCDF	5.219	0.269	2.505	13.183	0.395	28.582	1.445	18.254	15.972
OCDF	23.409	1.477	11.431	47.654	2.580	255.692	22.186	244.359	131.612
I-TEQ (NATO/CCMS)	5.546	0.411	1.836	14.485	2.419	13.421	0.851	4.587	9.321
I-TEQ (PCDD nach NATO/CCMS)	0.421	0.056	0.135	0.883	0.627	1.226	0.094	0.572	1.365
I-TEQ (PCDF nach NATO/CCMS)	5.125	0.365	1.701	13.602	1.793	12.195	0.757	4.015	7.956
I-TEQ (WHO)	5.541	0.421	1.841	14.562	2.698	13.361	0.845	4.390	9.334
I-TEQ (PCDD nach WHO)	0.437	0.067	0.150	1.003	0.907	1.397	0.108	0.595	1.496
I-TEQ (PCDF nach WHO)	5.104	0.354	1.691	13.559	1.790	11.965	0.737	3.795	7.838

7. ANHANG

Versuch Laborlaufnummer	CO-Spitzen 9812021	Normalbetrieb 9712034+9712035	CO-Spitze, Memory-Phase II 9812014	CO-Spitze, Memory-Phase I 9812018	Normalbetrieb 9805021	CO-Spitzen 9805022	Normalbetrieb 9805023	CO-Spitze, Memory-Phase I 9805024	Instationärer Betrieb 9807058
#1	0.168	7.427	0.386	167.170	1.617	9.515	2.511	6.674	5.290
#2	0.453	0.030	0.616	267.135	0.157	1.415	0.096	1.170	0.686
#3	0.724	3.628	0.488	211.319	0.807	6.228	0.498	2.798	1.382
#8	0.573	0.211	0.102	8.242	0.066	0.437	0.230	0.742	0.357
#5,#8	9.870	8.929	1.258	162.873	0.882	11.293	3.932	7.030	3.574
#11	19.229	1.051	6.511	665.896	0.179	3.680	1.371	1.023	1.051
#13	0.574	1.871	0.958	15.204	0.352	4.560	1.885	2.018	2.159
#15	n.n.	7.373	0.913	123.862	1.065	11.111	3.699	8.176	4.500
#19	0.246	0.722	0.351	17.125	0.108	0.885	0.039	0.600	0.468
#18	7.969	0.891	1.075	9.857	1.192	5.549	1.398	2.880	6.355
#17	2.374	1.148	0.120	40.042	0.826	2.105	0.441	1.115	2.101
#24	0.650	16.097	0.120	15.273	1.179	1.166	0.151	1.016	0.762
#32	1.758	0.572	0.444	n.n.	0.486	4.117	0.467	2.158	2.575
#16	2.976	0.604	1.178	3.648	0.823	4.012	0.579	1.552	2.646
#28,#31	25.334	2.604	20.902	133.324	11.348	15.487	3.098	8.739	14.317
#33	9.234	2.682	4.937	29.321	5.517	8.399	1.505	6.102	5.797
#22	4.420	2.405	3.302	19.394	2.345	3.719	0.682	2.470	3.512
#53	1.701	0.208	0.557	2.358	0.092	0.390	0.039	0.203	0.296
#51	1.272	0.128	0.228	0.805	1.612	n.n.	0.028	0.100	0.178
#45	1.617	0.487	0.435	1.243	0.125	0.354	0.040	0.138	0.311
#46	0.008	0.243	0.185	1.009	0.017	0.106	0.014	0.108	0.156
#52	14.430	8.264	9.356	58.156	1.874	8.297	1.682	4.729	6.653
#49	8.010	1.300	4.611	27.979	0.965	2.568	0.517	1.706	2.252
#47,#48	10.720	1.082	2.788	20.782	2.585	1.706	0.401	1.329	1.403
#44	9.721	1.401	4.413	28.176	0.600	3.856	0.598	2.108	3.215
#42	4.169	1.344	1.916	12.077	0.321	1.235	0.204	0.874	0.879
#64	5.167	0.756	2.292	13.325	1.362	2.104	0.246	1.300	1.109
#71,#41	8.173	0.894	2.293	28.595	1.227	2.378	0.465	1.369	1.981
#40	1.277	1.536	0.486	2.282	0.155	4.089	0.123	1.116	0.908
#67	0.394	0.527	0.557	1.350	1.621	4.359	0.179	3.379	0.984
#63	0.896	n.n.	0.557	3.897	2.707	1.772	0.469	1.354	1.717
#74	9.635	n.n.	8.081	51.180	0.938	1.773	0.470	1.082	0.164
#70,#76	15.744	n.n.	12.648	80.514	5.602	7.962	0.969	5.640	6.139
#66	14.712	n.n.	0.169	80.514	2.223	4.224	0.779	3.503	3.428
#80,#56	10.322	n.n.	5.559	29.288	2.632	3.928	0.546	3.018	2.403
#81	0.115	n.n.	0.074	1.009	2.972	0.545	0.070	0.922	0.354
#77	0.479	n.n.	0.855	4.579	4.313	3.006	0.257	2.093	1.479
#100	0.201	0.201	0.099	0.429	0.110	n.n.	0.012	0.054	0.109
#95,#102	6.618	3.775	5.098	29.306	0.686	9.074	1.678	6.532	4.342
#91	0.341	0.460	0.366	2.710	0.210	0.321	0.046	0.185	0.353
#84,#92	2.948	0.895	1.785	12.140	0.620	0.962	0.436	0.729	0.735
#101	9.195	2.782	7.302	56.410	1.649	9.685	2.529	7.503	5.959
#99	4.802	0.410	4.728	16.277	0.433	0.870	0.227	0.577	1.092
#119,#83,#86,#97,#87,#115,#85	6.034	1.106	4.707	27.647	2.233	8.757	1.115	4.611	3.946
#87,#115,#85	3.835	1.887	3.222	18.977	1.037	4.682	0.889	3.485	2.576
#110	12.052	3.281	8.946	48.107	1.609	7.592	2.276	4.867	5.478
#82	0.327	0.341	0.071	1.114	0.306	7.109	0.043	0.715	0.573
#107,#123,#124	0.709	3.022	0.550	6.349	3.013	0.613	0.252	1.476	0.772
#118	1.990	1.452	6.283	36.926	3.087	4.398	1.446	4.017	4.229
#114,#122	n.n.	1.744	0.213	1.087	2.172	0.799	0.187	1.700	0.589
#105	2.260	n.n.	1.474	9.256	1.625	2.746	0.489	1.951	2.048
#126	0.389	n.n.	0.220	2.158	2.537	6.144	0.280	2.267	2.147

7. ANHANG

Versuch Laborlaufnummer	CO-Spitzen 9812021	Normalbetrieb 9712034+9712035	CO-Spitze, Memory-Phase II 9812014	CO-Spitze, Memory-Phase I 9812018	Normalbetrieb 9805021	CO-Spitzen 9805022	Normalbetrieb 9805023	CO-Spitze, Memory-Phase I 9805024	Stationärer Betrieb 9807058
#136	n.n.	2.485	0.075	0.865	0.184	2.683	0.414	1.399	1.433
#151	n.n.	2.828	0.009	n.n.	0.336	3.139	0.847	2.289	2.208
#135,#144,#147	4.703	3.127	3.944	25.130	0.892	1.981	0.474	1.381	1.404
#149	8.806	9.314	7.947	50.876	1.637	11.409	2.873	8.633	7.664
#134	0.295	0.785	0.385	2.435	n.n.	1.089	0.156	0.506	0.517
#131	0.016	0.511	0.201	1.702	0.543	1.822	0.073	0.534	0.504
#132,#146	1.905	1.588	1.287	9.468	0.780	1.365	0.511	1.372	1.091
#153	14.135	10.847	9.957	68.387	1.558	15.891	4.110	12.442	10.044
#141	2.179	2.670	1.775	13.054	0.798	2.652	0.861	2.420	1.900
#137	0.227	0.204	0.157	1.025	0.290	2.925	0.048	0.251	0.313
#130	0.626	n.n.	0.297	2.586	0.258	2.929	0.187	0.717	0.739
#160,#183	4.204	4.528	2.406	21.812	1.311	4.888	1.533	4.483	3.971
#138	11.858	8.941	7.741	52.876	1.370	12.751	3.892	10.827	8.058
#129,#158	0.390	n.n.	0.193	1.962	0.315	10.038	0.163	1.014	1.392
#167	0.246	n.n.	0.083	3.650	0.448	12.681	0.496	0.776	2.882
#128,#159	1.523	n.n.	0.213	4.333	0.305	12.682	0.496	2.359	2.882
#156	1.328	n.n.	n.n.	6.651	1.947	4.065	0.789	2.349	2.304
#157	0.287	2.004	0.944	1.528	0.703	2.135	0.264	1.559	1.029
#169	0.209	6.276	0.127	1.337	0.479	3.848	0.140	1.067	1.519
#179	1.918	1.438	0.876	6.097	0.197	1.613	0.364	0.926	1.147
#176	0.588	0.407	0.378	1.709	0.505	0.748	0.114	0.417	0.473
#178	0.634	0.733	0.293	2.869	0.086	0.412	0.127	n.n.	0.397
#175	0.172	6.722	0.067	0.440	0.297	0.459	0.034	0.112	0.206
#187	4.561	1.725	1.664	13.885	0.384	2.338	0.840	2.080	2.278
#183	1.442	0.988	0.898	7.290	0.789	1.270	0.513	1.434	1.189
#185	0.357	0.746	0.156	1.522	0.302	n.n.	0.058	0.181	0.268
#174	3.122	6.875	1.080	8.912	0.631	5.719	1.018	3.138	3.215
#177	1.816	3.347	0.829	6.394	0.235	2.843	0.441	1.927	2.211
#171	0.850	1.169	0.377	3.581	0.421	4.286	0.326	1.385	1.378
#173	0.052	1.806	0.179	n.n.	0.173	2.865	0.026	0.221	0.547
#172	0.531	1.659	0.290	2.443	0.433	4.306	0.248	1.016	1.303
#180,#193	5.852	3.244	3.047	21.241	1.341	7.504	2.515	5.743	5.848
#191	0.241	3.712	0.164	1.023	0.597	1.168	0.093	0.705	0.798
#170	4.587	1.343	1.832	12.950	1.721	42.800	1.874	6.543	9.937
#190	n.n.	1.343	0.189	n.n.	n.n.	n.n.	0.008	n.n.	0.020
#189	0.499	n.n.	0.275	2.709	n.n.	0.041	0.006	0.014	0.027
#202	0.068	2.435	0.181	0.224	0.006	n.n.	0.013	0.038	0.066
#200	n.n.	2.239	n.n.	n.n.	0.045	n.n.	0.013	0.052	0.047
#199	0.368	0.928	0.181	1.776	0.095	0.854	0.031	0.082	0.158
#198	0.030	2.361	n.n.	1.717	0.089	n.n.	0.022	0.107	0.238
#201	0.045	1.124	0.003	n.n.	0.099	1.112	0.149	0.470	0.557
#203,#196	0.382	1.070	0.243	3.038	0.342	3.002	0.232	0.793	0.831
#195	0.253	2.982	0.026	0.964	0.187	6.440	0.170	0.913	1.208
#194	0.562	6.832	0.201	3.313	0.242	13.291	0.434	1.841	2.147
#205	0.218	5.334	0.099	3.315	0.342	3.190	0.120	0.801	1.691
#208	n.n.	2.893	0.129	1.629	n.n.	0.159	0.017	0.037	0.074
#207	0.029	7.370	0.038	1.033	n.n.	n.n.	0.014	n.n.	n.n.
#206	0.331	5.485	n.n.	4.350	0.087	4.603	0.208	0.575	1.051
#209	n.n.	4.232	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
TEQ (nach Safe)	0.082	0.320	0.060	0.478	0.337	0.871	0.043	0.319	0.322
TEQ (WHQ)	0.043	0.064	0.025	0.243	0.284	0.663	0.031	0.243	0.234

7. ANHANG

Versuch Laborlaufnummer	CO-Spitzen 9812021	Normalbetrieb 9712034+9712035	CO-Spitze, Memory-Phase II 9812014	CO-Spitze, Memory-Phase I 9812016	Normalbetrieb 9805021	CO-Spitzen 9805022	Normalbetrieb 9805023	CO-Spitze, Memory-Phase I 9805024	Instationärer Betrieb 9807058
MCBz	43333.37	5215.27	13590.89	116208.93	17717.02	87127.68	2418.03	33642.08	80847.52
1,3-DiCBz	2697.11	454.67	2381.25	7579.19	351.27	8437.80	525.62	1759.87	6526.80
1,4-DiCBz	7774.06	1436.31	2055.44	8144.80	247.98	7172.13	429.18	1466.97	7895.46
1,2-DiCBz	8749.98	1471.67	5796.55	44117.85	795.46	16415.36	841.86	3923.40	8639.87
1,3,5-TriCBz	1443.29	1162.46	1787.45	12362.64	3.81	107.02	2.59	107.75	115.67
1,2,4-TriCBz	1077.32	412.50	3514.81	9740.22	715.17	15925.00	276.65	1941.39	5050.95
1,2,3-TriCBz	1701.04	1393.24	5385.89	39835.16	1100.46	35009.52	380.46	4580.20	9613.52
1,2,3,5-TeCBz	488.16	-	216.93	508.72	445.73	4964.95	144.53	729.70	1612.24
1,2,4,5-TeCBz	360.57	-	309.70	1201.90	265.35	2880.13	65.64	464.47	949.22
1,2,3,5-TeCBz+1,2,4,5-TeCBz	848.72	280.08	526.63	1710.62	651.07	7845.08	210.17	1194.16	2561.46
1,2,3,4-TeCBz	874.63	476.31	414.15	11414.36	859.32	10469.57	304.83	1455.66	3965.73
PeCBz	1765.73	243.17	1236.75	15559.44	434.53	8076.23	326.80	2141.80	7480.98
HxCBz	1120.89	374.18	2115.38	7750.11	414.39	5581.75	366.82	1933.34	6798.83

Versuch Laborlaufnummer	CO-Spitzen 9812021	Normalbetrieb 9805021	CO-Spitzen 9805022	Instationärer Betrieb 9807058
2-MCPh	3763.32	200.50	4845.91	6799.06
4-MCPh	5796.56	1050.27	12491.73	12715.71
2,6-DiCPh	211.89	94.00	765.87	431.30
2,4-DiCPh	366.39	109.31	1340.81	653.16
3,4-DiCPh	527.12	8.92	2172.86	2771.55
2,4,6-TriCPh	369.71	65.23	3183.50	2338.54
2,3,6-TriCPh	113.25	60.27	276.98	377.95
2,3,5-TriCPh	56.72	26.16	370.34	485.21
2,4,5-TriCPh	43.81	49.41	291.47	258.15
2,3,4-TriCPh	73.18	42.49	354.03	211.17
3,4,5-TriCPh	9.04	51.49	72.37	54.94
2,3,5,6-TeCPh	0.70	12.57	121.27	245.81
2,3,4,6-TeCPh	69.81	224.05	408.50	419.95
2,3,4,5-TeCPh	39.56	27.13	149.11	225.64
PeCPh	167.71	204.30	846.52	785.09

7. ANHANG

Probenahmen im Reingas bei 70°C:

Versuch Laborlaufnummer	Normalbetrieb 9708026	Instationärer Betrieb 9712014	Normalbetrieb 9712015	Normalbetrieb 970822+9708023	Normalbetrieb 9708024+9708025	Normalbetrieb 9712017+9712018	Normalbetrieb 9712033
1-MCDD	0.023	0.021	0.000	0.022	0.025	0.004	0.002
2-MCDD	0.012	0.010	0.001	0.005	0.014	0.002	0.001
1,3-DiCDD	0.011	0.021	0.000	0.005	0.012	0.003	0.001
2,7/2,3/2,8-DiCDD	0.008	0.018	0.001	0.004	0.015	0.009	0.001
1,4/1,7-DiCDD	0.008	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1,8-DiCDD	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1,6-DiCDD	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1,2-DiCDD	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1,9-DiCDD	0.004	n.n.	n.n.	0.005	n.n.	0.003	0.003
1,3,7-TriCDD	n.n.	0.015	n.n.	0.003	0.011	0.006	0.003
1,3,8-TriCDD	n.n.	0.010	0.001	0.003	0.014	0.012	n.n.
1,3,6-TriCDD	0.003	n.n.	n.n.	0.003	n.n.	n.n.	n.n.
1,2,4-TriCDD	n.n.	n.n.	n.n.	0.002	n.n.	n.n.	n.n.
1,3,9/2,3,7-TriCDD	0.016	0.008	0.001	0.009	0.055	0.005	0.003
1,4,7-TriCDD	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1,2,3-TriCDD	n.n.	0.004	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1,7,8-TriCDD	0.003	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.004	n.n.
1,2,7-TriCDD	n.n.	0.011	n.n.	n.n.	n.n.	0.002	0.001
1,2,8-TriCDD	0.003	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1,4,6-TriCDD	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1,2,6-TriCDD	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1,2,9-TriCDD	0.001	n.n.	n.n.	0.003	n.n.	n.n.	n.n.
2,3,7,8-TCDD	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1,3,6,8-TCDD	0.006	0.025	n.n.	0.008	0.012	0.012	0.009
1,3,7,9-TCDD	0.006	0.016	n.n.	0.008	0.009	0.004	0.004
1,3,7,8-TCDD	0.003	n.n.	n.n.	0.003	n.n.	n.n.	n.n.
1,3,6,9/1,2,4,7/1,2,4,8-TCDD	0.004	0.013	0.002	0.001	0.002	0.008	0.002
1,2,6,8-TCDD	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.002	n.n.
1,4,7,8-TCDD	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1,2,4,6/1,2,4,9-TCDD	0.003	0.016	n.n.	n.n.	0.001	0.003	0.002
1,2,3,4/1,2,3,7/1,2,3,8-TCDD	0.005	0.016	n.n.	0.004	0.011	0.003	0.002
1,2,3,6/1,2,7,9-TCDD	0.013	0.018	n.n.	0.003	0.018	0.011	0.003
1,2,7,8/1,4,6,9-TCDD	n.n.	n.n.	0.003	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1,2,3,9-TCDD	n.n.	n.n.	0.007	0.003	n.n.	0.001	0.001
1,2,6,9-TCDD	n.n.	0.017	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1,2,6,7-TCDD	0.005	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1,2,8,9-TCDD	n.n.	n.n.	0.006	n.n.	n.n.	0.008	0.002
1,2,3,7,8-PeCDD	0.004	0.008	n.n.	0.005	0.006	0.009	0.003
1,2,4,6,8/1,2,4,7,9-PeCDD	0.008	0.024	n.n.	0.013	0.012	0.027	0.010
1,2,3,6,8-PeCDD	0.007	0.016	n.n.	0.006	0.010	0.014	n.n.
1,2,4,7,8-PeCDD	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.005	n.n.
1,2,3,7,9-PeCDD	0.003	0.176	0.009	0.010	0.010	0.035	0.010
1,2,3,4,7/1,2,4,6,9-PeCDD	0.003	n.n.	n.n.	0.003	0.004	0.007	0.002
1,2,3,6,9-PeCDD	n.n.	n.n.	n.n.	0.004	n.n.	0.003	0.002
1,2,4,6,7-PeCDD	0.002	n.n.	n.n.	n.n.	0.003	n.n.	0.002
1,2,4,8,9-PeCDD	n.n.	n.n.	n.n.	0.002	n.n.	n.n.	n.n.
1,2,3,4,6-PeCDD	n.n.	0.012	0.002	n.n.	0.001	0.011	n.n.
1,2,3,6,7-PeCDD	0.001	0.012	0.001	n.n.	0.002	0.010	0.003
1,2,3,8,9-PeCDD	n.n.	n.n.	n.n.	0.003	n.n.	n.n.	n.n.
1,2,3,4,7,8-HxCDD	n.n.	0.006	0.001	0.005	0.001	0.014	n.n.
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.003	0.014	0.001	0.015	0.017	0.010	0.006
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.003	0.010	n.n.	0.006	0.006	0.003	n.n.
1,2,3,4,6,8/1,2,4,6,7,9/1,2,4,6,8,9-HxCDD	0.009	0.047	0.008	0.056	0.024	0.085	0.026
1,2,3,6,7,9/1,2,3,6,8,9-HxCDD	0.009	0.027	0.004	0.035	0.023	0.050	0.015
1,2,3,4,6,9-HxCDD	n.n.	0.008	0.001	0.006	n.n.	0.014	0.002
1,2,3,4,6,7-HxCDD	0.002	0.012	n.n.	0.004	0.005	0.008	n.n.
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.030	0.082	0.011	0.088	0.053	0.128	0.030
1,2,3,4,6,7,9-HpCDD	0.031	0.082	0.007	0.096	0.055	0.110	0.033
OCDD	0.106	0.389	0.057	0.258	0.171	0.370	0.140

7. ANHANG

Versuch	Normalbetrieb	Instationärer Betrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb
Laborlaufnummer	9708026	9712014	9712015	970822+9708023	9708024+9708025	9712017+9712018	9712033
1-MCDF	0.040	0.071	0.001	0.064	0.351	0.124	0.181
3-MCDF	0.065	0.090	0.001	0.097	0.442	0.205	0.297
2-MCDF	0.071	0.152	0.002	0.103	0.471	0.289	0.338
4-MCDF	0.001	0.015	0.000	n.n.	0.033	0.006	0.006
1,3-DiCDF	0.020	0.094	0.001	0.017	0.087	0.030	0.034
1,7-DiCDF	0.055	0.093	0.001	0.016	0.099	0.040	0.036
1,4-DiCDF	n.n.	0.004	n.n.	n.n.	n.n.	0.001	n.n.
1,8-DiCDF	0.014	0.013	n.n.	0.018	0.072	0.049	0.037
1,6-DiCDF	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.013	0.012
1,2-DiCDF	0.027	0.005	n.n.	0.033	0.138	0.079	0.084
2,4-DiCDF	0.028	n.n.	n.n.	0.049	0.194	0.174	0.140
3,7-DiCDF	0.014	n.n.	n.n.	0.021	0.066	0.037	0.037
2,7-DiCDF	n.n.	0.027	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
2,3-DiCDF	0.026	0.022	0.003	0.024	0.082	0.069	0.052
2,8/3,6-DiCDF	0.044	0.056	n.n.	0.044	0.165	0.152	0.114
2,6-DiCDF	0.022	0.014	n.n.	0.038	0.073	0.039	0.041
1,9/3,4-DiCDF	0.039	n.n.	n.n.	0.022	0.063	0.070	0.042
4,6-DiCDF	0.010	n.n.	n.n.	0.029	0.078	0.088	0.039
1,3,7-TriCDF	0.009	n.n.	n.n.	0.011	0.026	0.017	0.017
1,3,8-TriCDF	0.009	0.014	n.n.	0.010	0.026	0.020	0.013
1,3,6-TriCDF	0.005	0.006	0.001	0.002	0.010	0.010	0.006
1,3,4/1,4,8-TriCDF	0.013	n.n.	n.n.	0.008	0.026	0.024	0.020
1,2,4/1,6,7-TriCDF	0.002	0.027	n.n.	0.005	0.009	0.057	0.021
1,7,8-TriCDF	0.012	n.n.	n.n.	0.012	0.034	0.040	0.019
1,2,3-TriCDF	0.008	0.013	n.n.	0.022	0.060	0.061	0.030
1,2,7-TriCDF	0.010	n.n.	n.n.	0.017	0.041	0.036	0.022
1,2,9-TriCDF	0.006	0.036	n.n.	0.006	0.011	0.012	0.001
1,3,9-TriCDF	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.015	0.000
2,4,7-TriCDF	0.028	n.n.	n.n.	0.026	0.048	0.047	0.023
1,2,6/1,2,8-TriCDF	0.016	0.064	0.001	0.017	0.033	0.059	0.025
2,4,8-TriCDF	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.015	0.007
1,4,9-TriCDF	0.019	0.094	0.001	0.017	0.027	0.040	0.019
2,3,7-TriCDF	0.022	0.103	0.001	0.022	0.043	0.032	0.013
1,6,8/2,3,4/2,3,8-TriCDF	0.007	0.149	0.005	0.021	0.034	0.057	0.025
2,3,6/3,4,7-TriCDF	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
2,6,7-TriCDF	0.068	0.055	0.002	0.095	0.193	0.256	0.117
1,4,6/1,4,7-TriCDF	0.027	n.n.	n.n.	0.045	0.091	0.074	0.051
3,4,6-TriCDF	0.010	0.014	n.n.	0.018	0.028	0.045	0.019
2,4,6-TriCDF	0.024	n.n.	n.n.	0.048	0.083	0.058	0.021
2,3,7,8-TCDF	0.019	0.074	0.003	0.015	0.016	0.038	0.018
1,3,6,8-TCDF	0.011	0.072	0.003	0.018	0.026	0.027	0.017
1,3,7,8/1,3,7,9-TCDF	0.018	0.062	n.n.	0.024	0.024	0.022	0.017
1,3,4,7-TCDF	0.007	0.062	n.n.	0.009	0.015	0.021	0.012
1,4,6,8-TCDF	0.009	0.108	n.n.	0.006	0.019	0.026	0.015
1,2,4,7/1,3,6,7-TCDF	n.n.	0.066	n.n.	0.025	0.020	0.040	0.024
1,3,4,8-TCDF	0.010	0.039	n.n.	0.007	0.020	0.020	0.010
1,2,4,8/1,3,4,6-TCDF	0.018	0.063	n.n.	0.009	0.028	0.053	0.027
1,2,4,6/1,2,6,8/1,2,3,7/1,4,7,8/1,3,6,9-TCDF	0.059	0.331	0.003	0.083	0.091	0.149	0.077
1,2,3,4/1,2,3,6/1,2,3,8/1,4,6,7/1,6,7,8/2,4,6,8-TCDF	0.100	0.499	n.n.	0.105	0.130	0.202	0.112
1,3,4,9-TCDF	0.004	n.n.	n.n.	0.003	n.n.	n.n.	n.n.
1,2,7,8-TCDF	0.032	0.152	n.n.	0.029	0.031	0.089	0.042
1,2,6,7-TCDF	0.017	0.072	n.n.	0.016	0.017	0.051	0.021
1,2,7,9/1,4,6,9-TCDF	0.014	0.028	n.n.	0.011	0.012	0.013	0.005
1,2,4,9/2,3,6,8-TCDF	0.042	0.165	n.n.	0.031	0.038	0.051	0.027
2,4,6,7-TCDF	0.081	0.483	0.007	0.073	0.088	0.083	0.039
1,2,3,9/2,3,4,7-TCDF	0.062	0.123	0.005	0.062	0.080	0.081	0.039
1,2,6,9-TCDF	0.006	n.n.	n.n.	0.019	0.040	0.051	0.038
2,3,4,8-TCDF	0.040	0.182	0.003	0.024	0.036	0.053	0.032
2,3,4,6-TCDF	0.076	0.159	0.005	0.071	0.073	0.062	0.033
2,3,6,7-TCDF	0.054	0.152	n.n.	0.047	0.046	0.050	0.035
3,4,6,7-TCDF	0.122	0.321	0.005	0.088	0.101	0.024	0.035

7. ANHANG

Versuch	Normalbetrieb	Instationärer Betrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb
Laborlaufnummer	9708026	9712014	9712015	970822+9708023	9708024+9708025	9712017+9712018	9712033
1,2,3,7,8/1,2,3,4,8-PeCDF	0.050	0.131	n.n.	0.076	0.071	0.118	0.056
2,3,4,7,8-PeCDF	0.047	0.221	0.004	0.076	0.062	0.118	0.044
1,3,4,6,8-PeCDF	0.020	0.140	0.001	0.041	0.037	0.041	0.025
1,2,4,6,8-PeCDF	0.025	0.167	0.003	0.046	0.028	0.132	0.049
1,3,6,7,8-PeCDF	0.018	0.058	n.n.	0.031	0.034	0.031	0.015
1,3,4,7,8-PeCDF	0.004	n.n.	n.n.	n.n.	0.004	n.n.	0.002
1,3,4,7,9/1,2,3,6,8-PeCDF	0.031	0.144	0.002	0.056	0.057	0.073	0.035
1,2,4,7,8-PeCDF	0.022	0.083	n.n.	0.034	0.025	0.069	0.028
1,2,4,7,9/1,3,4,6,7-PeCDF	0.037	0.148	0.003	0.064	0.069	0.059	0.028
1,2,4,6,7-PeCDF	0.030	0.091	0.002	0.049	0.033	0.052	0.033
1,2,3,4,7/1,4,6,7,8-PeCDF	0.052	0.118	0.003	0.080	0.100	0.105	0.048
1,3,4,6,9-PeCDF	0.005	n.n.	n.n.	0.009	0.005	n.n.	n.n.
1,2,3,4,6-PeCDF	0.025	0.044	n.n.	0.039	0.040	0.031	0.017
1,2,3,7,9-PeCDF	0.025	0.044	n.n.	0.009	0.040	0.016	0.017
1,2,3,6,7-PeCDF	0.023	0.041	n.n.	0.036	0.025	0.033	0.019
1,2,4,6,9/1,2,6,7,8-PeCDF	0.044	0.096	0.003	0.068	0.061	0.085	0.038
1,2,6,7,9-PeCDF	0.008	n.n.	0.001	0.016	0.009	0.011	0.005
1,2,3,6,9-PeCDF	n.n.	n.n.	n.n.	0.011	n.n.	0.008	0.002
2,3,4,6,8-PeCDF	0.077	0.394	0.010	0.137	0.108	0.155	0.060
1,2,3,4,9-PeCDF	0.016	0.021	0.002	0.025	0.022	0.019	0.009
1,2,4,8,9-PeCDF	0.011	0.007	0.002	n.n.	0.013	0.019	0.011
1,2,3,8,9-PeCDF	0.003	n.n.	n.n.	0.014	n.n.	0.010	0.004
2,3,4,6,7-PeCDF	0.218	0.647	0.036	0.437	0.264	0.265	0.114
1,2,3,4,7,8/1,2,3,4,7,9-HxCDF	0.039	0.186	0.011	0.142	0.093	0.230	0.090
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.043	0.178	0.011	0.170	0.104	0.183	0.074
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.034	0.184	0.007	0.117	0.081	0.096	0.036
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.087	0.606	0.036	0.353	0.216	0.310	0.110
1,2,3,4,6,8-HxCDF	0.035	0.069	0.008	0.143	0.085	0.184	0.075
1,3,4,6,7,8/1,3,4,6,7,9-HxCDF	0.059	0.384	0.010	0.231	0.149	0.259	0.094
1,2,4,6,7,8-HxCDF	0.052	0.322	0.010	0.187	0.124	0.281	0.105
1,2,4,6,7,9-HxCDF	0.010	0.021	0.001	0.040	0.025	0.036	0.015
1,2,4,6,8,9-HxCDF	n.n.	0.404	0.015	0.024	n.n.	0.025	n.n.
1,2,3,4,6,7-HxCDF	0.088	0.404	0.015	0.333	0.211	0.268	0.110
1,2,3,6,7,9-HxCDF	0.006	n.n.	n.n.	n.n.	0.014	0.018	0.005
1,2,3,4,6,9/1,2,3,6,8,9-HxCDF	0.015	0.017	0.004	0.054	0.037	0.051	0.017
1,2,3,4,8,9-HxCDF	0.009	0.012	0.003	0.042	0.022	0.025	0.011
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.273	1.058	0.096	1.476	0.825	1.233	0.307
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.014	0.051	0.004	0.103	0.041	0.057	0.017
1,2,3,4,6,7,9-HpCDF	0.041	0.078	0.008	0.208	0.124	0.160	0.039
1,2,3,4,6,8,9-HpCDF	0.023	0.018	0.013	0.146	0.069	0.123	0.029
OCDF	0.069	0.185	0.065	0.626	0.220	0.537	0.245
I-TEQ (NATO/CCMS)	0.054	0.259	0.010	0.144	0.100	0.173	0.064
I-TEQ (PCDD nach NATO/CCMS)	0.003	0.008	0.000	0.006	0.006	0.009	0.003
I-TEQ (PCDF nach NATO/CCMS)	0.051	0.251	0.010	0.138	0.094	0.164	0.061
I-TEQ (WHO)	0.056	0.263	0.010	0.146	0.103	0.177	0.065
I-TEQ (PCDD nach WHO)	0.005	0.011	0.000	0.009	0.009	0.013	0.004
I-TEQ (PCDF nach WHO)	0.051	0.251	0.010	0.137	0.094	0.164	0.061

7. ANHANG

Versuch	Normalbetrieb	Instationärer Betrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb
Laborlaufnummer	9708026	9712014	9712015	970822+9708023	9708024+9708025	9712017+9712018	9712033
#1	0.216	0.732	0.380	1.916	0.244	0.847	0.732
#2	n.n.	n.n.	n.n.	0.310	0.303	0.955	0.909
#3	n.n.	0.495	0.257	0.995	n.n.	0.176	n.n.
#6	n.n.	n.n.	n.n.	0.183	n.n.	3.860	n.n.
#5,#8	0.337	1.386	1.276	2.199	0.922	n.n.	2.765
#11	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.820	0.409
#13	n.n.	0.266	0.245	0.491	0.089	4.116	0.266
#15	0.215	0.917	0.843	2.393	0.849	n.n.	2.548
#19	n.n.	0.343	0.175	0.930	0.263	0.327	0.472
#18	0.812	n.n.	0.791	4.770	0.436	0.603	0.425
#17	0.559	n.n.	0.586	2.871	0.384	0.622	0.318
#24	n.n.	0.528	2.805	n.n.	n.n.	2.497	0.660
#32	0.384	3.007	0.948	1.506	0.351	4.091	2.025
#16	0.303	2.969	0.953	0.698	0.762	4.064	0.552
#28,#31	1.282	n.n.	n.n.	5.421	0.989	n.n.	n.n.
#33	0.754	n.n.	n.n.	1.449	0.200	n.n.	n.n.
#22	0.647	n.n.	n.n.	0.858	0.094	n.n.	n.n.
#53	n.n.	0.691	0.302	n.n.	n.n.	0.408	0.100
#51	n.n.	0.702	n.n.	n.n.	n.n.	0.128	0.097
#45	n.n.	0.772	n.n.	n.n.	n.n.	0.469	0.113
#46	n.n.	0.497	0.392	n.n.	n.n.	0.198	1.019
#52	0.671	5.031	0.952	2.696	1.705	1.799	1.489
#49	0.309	2.620	0.689	1.022	0.275	1.546	1.004
#47,#48	0.289	0.871	0.209	0.907	0.196	0.700	0.624
#44	0.293	2.008	0.331	0.954	0.313	1.102	0.773
#42	0.107	2.003	0.374	0.292	n.n.	2.168	0.432
#64	0.049	2.886	0.711	0.065	n.n.	1.193	1.056
#71,#41	0.236	1.113	0.315	1.031	n.n.	0.486	0.502
#40	n.n.	2.205	0.224	n.n.	n.n.	1.484	0.194
#67	n.n.	0.614	n.n.	n.n.	n.n.	0.373	0.207
#63	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#74	0.084	n.n.	n.n.	0.112	n.n.	n.n.	n.n.
#70,#76	0.528	n.n.	n.n.	2.416	1.445	n.n.	n.n.
#66	0.467	2.261	n.n.	2.002	n.n.	n.n.	n.n.
#60,#56	0.234	n.n.	n.n.	1.871	1.173	n.n.	n.n.
#81	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#77	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#100	n.n.	n.n.	0.184	n.n.	n.n.	n.n.	0.213
#95,#102	2.095	n.n.	0.092	10.557	8.145	0.090	0.204
#91	0.176	0.480	0.062	0.311	0.062	0.194	0.754
#84,#92	0.571	1.241	0.360	1.010	2.058	0.719	0.459
#101	2.268	4.426	2.332	8.139	5.921	3.889	1.684
#99	0.177	0.457	0.123	0.523	0.550	0.225	0.071
#119,#83,#86,#97,#87,#115,#85	0.683	0.558	0.082	2.417	2.357	0.260	0.097
#87,#115,#85	0.683	1.334	0.361	2.417	2.357	1.094	0.352
#110	1.708	3.397	1.593	7.437	5.698	2.807	1.106
#82	n.n.	0.150	0.174	0.453	n.n.	0.175	0.067
#107,#123,#124	0.169	0.719	0.324	1.340	0.101	0.451	n.n.
#118	0.742	0.709	0.964	2.802	2.072	2.369	0.887
#114,#122	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#105	0.129	n.n.	0.305	0.519	n.n.	n.n.	n.n.
#126	n.n.	0.325	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.025

7. ANHANG

Versuch Laborlaufnummer	Normalbetrieb 9708026	Instationärer Betrieb 9712014	Normalbetrieb 9712015	Normalbetrieb 970822+9708023	Normalbetrieb 9708024+9708025	Normalbetrieb 9712017+9712018	Normalbetrieb 9712033
#138	0.908	1.144	0.551	4.096	3.556	1.274	0.090
#151	1.175	1.361	0.686	4.984	3.817	1.314	1.648
#135,#144,#147	1.359	0.933	0.704	4.764	4.685	0.901	1.216
#149	4.024	4.476	2.353	16.859	13.527	5.127	5.566
#134	0.149	0.364	0.209	0.711	1.122	0.531	0.437
#131	0.046	0.411	0.127	0.372	0.557	0.356	0.157
#132,#146	0.661	0.748	0.419	2.718	2.193	0.992	0.901
#153	4.905	6.789	3.662	19.976	14.414	7.158	3.483
#141	0.972	1.022	0.730	3.991	3.687	1.796	2.013
#137	n.n.	0.354	n.n.	0.163	0.037	0.084	0.253
#130	0.208	0.383	0.268	0.921	1.194	n.n.	3.071
#160,#163	1.822	2.185	1.379	7.842	5.451	3.050	5.960
#138	3.526	3.793	2.784	14.352	10.616	5.010	n.n.
#129,#158	0.211	n.n.	n.n.	0.561	0.098	1.437	6.046
#167	n.n.	0.280	0.425	n.n.	n.n.	0.498	1.793
#128,#159	0.489	1.349	0.151	2.038	1.704	0.370	n.n.
#156	0.424	0.464	0.412	1.727	1.173	2.257	n.n.
#157	n.n.	n.n.	0.260	n.n.	n.n.	1.414	n.n.
#169	n.n.	n.n.	0.374	n.n.	n.n.	1.938	0.025
#179	0.544	0.423	0.026	3.407	2.487	0.851	0.285
#176	0.359	0.133	0.128	1.884	1.398	0.241	0.026
#178	0.386	0.303	0.114	1.866	1.478	0.232	0.102
#175	0.069	0.167	0.604	0.331	0.554	1.561	0.583
#187	1.120	0.538	0.608	6.798	4.175	1.554	0.575
#183	0.625	0.509	0.296	4.390	3.589	0.811	0.396
#185	0.085	0.132	0.076	0.671	0.688	0.110	0.053
#174	0.999	1.012	0.488	6.116	4.311	1.428	0.562
#177	0.623	0.550	0.260	3.780	3.551	1.152	0.326
#171	0.402	0.238	0.236	2.270	2.699	0.858	0.265
#173	n.n.	0.139	0.045	0.853	n.n.	0.302	0.107
#172	0.105	0.331	0.120	0.907	0.819	0.434	0.122
#180, #193	2.211	1.708	1.166	11.861	8.106	3.096	1.146
#191	0.084	n.n.	0.078	0.170	0.517	1.288	0.263
#170	1.146	0.845	0.776	5.977	4.511	0.760	0.999
#190	n.n.	0.845	0.776	n.n.	n.n.	0.760	0.999
#189	0.084	0.187	0.078	0.224	n.n.	n.n.	1.291
#202	0.025	n.n.	n.n.	0.175	0.135	0.712	0.245
#200	0.025	0.157	0.132	0.200	0.087	0.049	0.110
#199	0.029	0.145	n.n.	0.185	0.122	0.848	0.410
#198	0.004	n.n.	n.n.	0.047	0.082	0.271	0.218
#201	0.116	n.n.	0.071	0.754	0.606	0.052	0.041
#203,#196	0.158	0.141	0.046	1.037	0.817	0.500	0.203
#195	0.061	0.454	0.245	0.399	0.329	0.686	0.228
#194	0.130	0.224	0.140	0.839	0.674	1.805	0.194
#205	0.015	0.301	0.279	0.047	n.n.	1.740	0.141
#208	0.012	n.n.	0.417	0.076	0.033	0.910	n.n.
#207	0.015	0.486	n.n.	0.072	0.028	3.383	n.n.
#206	0.036	n.n.	0.376	0.170	0.132	3.699	0.213
#209	0.094	0.216	0.182	0.453	0.371	1.133	0.160
TEQ (nach Safe)	0.002	0.034	0.021	0.009	0.005	0.068	0.006
TEQ (WHO)	0.000	0.033	0.004	0.002	0.001	0.014	0.003

7. ANHANG

Versuch	Normalbetrieb	Instationärer Betrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb
Laborlaufnummer	9708026	9712014	9712015	970822+9708023	9708024+9708025	9712017+9712018	9712033
MCBz	666.48	6439.05	80.04	3675.84	908.44	3804.43	1028.67
1,3 -DiCBz	33.60	508.77	4.29	185.34	73.25	141.80	51.85
1,4 -DiCBz	151.82	677.95	7.04	348.60	121.59	239.45	234.33
1,2 -DiCBz	152.94	1104.21	6.30	465.60	176.37	365.59	236.06
1,3,5 -TriCBz	39.56	151.74	8.84	213.50	20.41	23.88	61.06
1,2,4 -TriCBz	36.51	254.60	0.79	285.22	30.22	191.90	56.35
1,2,3 -TriCBz	13.58	393.73	8.63	312.49	44.74	274.14	66.53
1,2,3,5 -TeCBz+1,2,4,5-TeCBz	13.57	189.01	2.79	143.76	13.66	108.61	20.94
1,2,3,4 -TeCBz	12.44	235.08	2.88	129.84	16.50	353.18	28.89
PeCBz	15.53	452.57	3.50	242.33	23.41	134.81	23.97
HxCBz	40.27	556.42	3.13	239.04	58.06	228.48	62.15

Versuch	Normalbetrieb	Instationärer Betrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb
Laborlaufnummer	9708026	9712014	9712015	970822+9708023	9708024+9708025
2-MCPh	3.20	35.87	2.06	9.12	9.88
4-MCPh	2.22	692.46	0.16	0.45	4.79
2,6-DiCPh	0.74	26.52	n.n.	20.16	3.75
2,4-DiCPh	0.41	18.38	5.91	19.17	0.56
3,4-DiCPh	n.n.	22.65	n.n.	2.87	n.n.
2,4,6-TriCPh	2.31	71.50	8.56	18.04	3.64
2,3,6-TriCPh	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	1.43
2,3,5-TriCPh	0.16	58.44	n.n.	n.n.	0.71
2,4,5-TriCPh	0.20	66.78	n.n.	2.74	2.32
2,3,4-TriCPh	3.67	143.64	14.49	22.86	5.09
3,4,5-TriCPh	n.n.	74.48	n.n.	n.n.	0.19
2,3,5,6-TeCPh	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
2,3,4,6-TeCPh	0.86	28.12	n.n.	4.32	2.18
2,3,4,5-TeCPh	3.92	107.47	29.69	31.52	8.55
PeCPh	2.85	19.60	2.72	4.49	3.65

7. ANHANG

Versuch	Instationärer Betrieb	Normalbetrieb	CO-Spitzen	Normalbetrieb	CO-Spitzen	CO-Spitzen, Memory-Phase I	CO-Spitzen, Memory-Phase II
Laborlaufnummer	9712036+9712037	9805007	9805008	9805009	9805010	9805019	9805020
1-MCDD	0.008	n.n.	3.070	0.003	0.257	0.005	0.016
2-MCDD	0.005	n.n.	1.071	0.006	0.122	0.012	0.007
1,3-DiCDD	0.005	n.n.	0.180	n.n.	0.213	0.007	0.008
2,7/2,3/2,8-DiCDD	0.007	0.004	0.502	0.001	0.086	0.002	0.002
1,4/1,7-DiCDD	n.n.	n.n.	0.358	0.004	0.045	0.010	0.008
1,8-DiCDD	n.n.	n.n.	0.380	n.n.	0.041	n.n.	n.n.
1,6-DiCDD	n.n.	n.n.	0.067	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1,2-DiCDD	n.n.	n.n.	0.250	n.n.	0.031	n.n.	n.n.
1,9-DiCDD	0.002	n.n.	0.006	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1,3,7-TriCDD	0.009	0.003	0.540	0.004	0.069	0.024	0.020
1,3,8-TriCDD	0.010	0.002	0.706	n.n.	0.115	0.024	0.021
1,3,6-TriCDD	n.n.	n.n.	0.189	n.n.	0.019	0.013	0.004
1,2,4-TriCDD	0.004	n.n.	0.149	n.n.	0.014	0.010	0.003
1,3,9/2,3,7-TriCDD	0.008	0.003	0.356	n.n.	0.066	0.029	0.016
1,4,7-TriCDD	0.003	0.001	0.073	n.n.	0.037	0.009	0.005
1,2,3-TriCDD	n.n.	n.n.	0.096	n.n.	0.038	0.012	0.002
1,7,8-TriCDD	n.n.	0.002	0.099	n.n.	0.029	0.012	0.009
1,2,7-TriCDD	0.002	n.n.	0.109	0.004	0.023	0.004	0.002
1,2,8-TriCDD	n.n.	n.n.	0.109	n.n.	0.022	0.002	0.002
1,4,6-TriCDD	n.n.	n.n.	0.039	n.n.	n.n.	0.010	0.002
1,2,6-TriCDD	n.n.	0.002	0.054	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1,2,9-TriCDD	n.n.	n.n.	0.062	n.n.	0.014	n.n.	0.001
2,3,7,8-TCDD	n.n.	n.n.	0.060	0.001	0.023	0.006	0.004
1,3,6,8-TCDD	0.018	0.009	0.876	0.004	0.183	0.089	0.067
1,3,7,9-TCDD	0.005	0.005	0.359	0.004	0.111	0.048	0.034
1,3,7,8-TCDD	n.n.	0.006	0.265	n.n.	0.104	0.036	0.022
1,3,6,9/1,2,4,7/1,2,4,8-TCDD	0.008	0.004	0.208	0.004	0.065	0.043	0.032
1,2,6,8-TCDD	n.n.	n.n.	0.132	n.n.	0.042	0.027	0.017
1,4,7,8-TCDD	n.n.	n.n.	0.033	0.001	0.023	n.n.	n.n.
1,2,4,6/1,2,4,9-TCDD	0.002	0.004	0.105	0.002	0.033	0.019	0.009
1,2,3,4/1,2,3,7/1,2,3,8-TCDD	0.002	0.004	0.271	0.002	0.074	0.046	0.023
1,2,3,8/1,2,7,9-TCDD	n.n.	0.003	0.172	0.002	0.066	0.042	0.023
1,2,7,8/1,4,6,9-TCDD	n.n.	0.002	0.087	n.n.	0.033	0.012	n.n.
1,2,3,9-TCDD	0.003	n.n.	0.058	n.n.	0.017	0.007	0.011
1,2,6,9-TCDD	0.003	n.n.	0.034	n.n.	0.012	n.n.	n.n.
1,2,6,7-TCDD	n.n.	n.n.	0.023	n.n.	0.009	n.n.	n.n.
1,2,8,9-TCDD	0.009	n.n.	0.022	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1,2,3,7,8-PeCDD	0.015	0.003	0.135	n.n.	0.069	0.056	0.034
1,2,4,6,8/1,2,4,7,9-PeCDD	0.038	0.011	0.473	0.014	0.218	0.195	0.129
1,2,3,6,8-PeCDD	0.027	0.007	0.438	0.012	0.179	0.171	0.082
1,2,4,7,8-PeCDD	n.n.	n.n.	0.155	n.n.	0.060	0.047	0.032
1,2,3,7,9-PeCDD	0.059	0.007	0.208	0.013	0.097	0.069	0.047
1,2,3,4,7/1,2,4,6,9-PeCDD	0.007	0.003	0.136	0.007	0.051	0.043	0.027
1,2,3,6,9-PeCDD	n.n.	n.n.	0.069	n.n.	0.030	0.039	0.024
1,2,4,6,7-PeCDD	0.007	n.n.	0.060	n.n.	0.030	0.021	0.018
1,2,4,8,9-PeCDD	0.007	n.n.	0.075	n.n.	0.021	0.034	0.023
1,2,3,4,6-PeCDD	0.011	n.n.	0.074	0.003	0.021	0.023	0.018
1,2,3,6,7-PeCDD	0.010	n.n.	0.156	0.008	0.071	0.064	0.056
1,2,3,8,9-PeCDD	0.005	n.n.	0.125	0.005	0.077	0.047	0.038
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.013	0.004	0.030	0.008	0.047	0.037	0.035
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.024	0.010	0.149	0.030	0.167	0.129	0.115
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.014	0.004	0.052	0.016	0.081	0.055	0.052
1,2,3,4,6,8/1,2,4,6,7,9/1,2,4,6,8,9-HxCDD	0.123	0.033	0.370	0.064	0.360	0.288	0.224
1,2,3,6,7,9/1,2,3,6,8,9-HxCDD	0.057	0.021	0.378	0.055	0.315	0.309	0.253
1,2,3,4,6,9-HxCDD	0.016	0.004	0.029	0.006	0.025	0.029	0.030
1,2,3,4,6,7-HxCDD	0.018	0.007	0.064	0.018	0.084	0.070	0.062
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.218	0.072	0.289	0.182	0.826	0.408	0.508
1,2,3,4,6,7,9-HpCDD	0.198	0.065	0.313	0.172	0.769	0.408	0.513
OCDD	0.580	0.241	0.446	0.760	3.206	1.717	2.778

7. ANHANG

Versuch	Instationärer Betrieb	Normalbetrieb	CO-Spitzen	Normalbetrieb	CO-Spitzen	CO-Spitzen, Memory-Phase I	CO-Spitzen, Memory-Phase II
Laborlaufnummer	9712036+9712037	9805007	9805008	9805009	9805010	9805019	9805020
1-MCDF	6.549	0.152	37.495	0.175	10.152	1.761	0.155
3-MCDF	8.375	0.367	41.653	0.281	10.392	2.245	0.198
2-MCDF	11.024	0.411	52.509	0.338	13.138	2.620	0.282
4-MCDF	0.135	0.014	3.107	0.028	1.355	0.262	0.045
1,3-DiCDF	0.379	0.037	8.251	0.041	1.153	0.706	0.143
1,7-DiCDF	0.378	0.027	4.153	0.030	1.267	0.273	0.071
1,4-DiCDF	n.n.	n.n.	0.058	n.n.	0.013	0.022	n.n.
1,8-DiCDF	0.541	0.032	6.071	0.040	1.781	0.435	0.108
1,6-DiCDF	0.111	0.001	0.368	0.008	0.331	0.080	0.024
1,2-DiCDF	0.957	0.062	11.360	0.059	2.720	1.003	0.240
2,4-DiCDF	1.354	0.107	27.093	0.159	6.973	2.889	0.654
3,7-DiCDF	0.296	0.037	2.958	0.027	0.858	0.327	0.083
2,7-DiCDF	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.013	n.n.	n.n.
2,3-DiCDF	0.448	0.050	4.998	0.048	1.096	0.428	0.116
2,8/3,6-DiCDF	0.913	0.088	10.975	0.064	1.907	1.110	0.284
2,6-DiCDF	0.266	0.042	6.674	0.038	1.003	0.655	0.170
1,9/3,4-DiCDF	0.366	0.053	2.676	0.043	0.508	0.565	0.109
4,6-DiCDF	0.782	0.028	14.418	0.048	4.235	1.026	0.261
1,3,7-TriCDF	0.977	0.023	2.707	0.020	0.820	0.179	0.079
1,3,8-TriCDF	0.070	0.017	2.302	0.018	0.675	0.202	0.081
1,3,6-TriCDF	0.031	0.009	1.308	0.006	0.333	0.138	0.053
1,3,4/1,4,8-TriCDF	0.084	0.018	1.854	0.016	0.586	0.275	0.106
1,2,4/1,6,7-TriCDF	0.089	0.001	2.844	0.020	0.847	0.526	0.154
1,7,8-TriCDF	0.081	0.017	1.972	0.020	0.614	0.203	0.084
1,2,3-TriCDF	0.146	0.033	5.675	0.031	0.862	0.738	0.266
1,2,7-TriCDF	0.103	0.033	2.490	0.023	0.537	0.294	0.127
1,2,9-TriCDF	0.015	0.025	0.753	0.005	0.193	0.120	0.047
1,3,9-TriCDF	0.003	0.005	0.236	0.004	0.192	0.057	0.024
2,4,7-TriCDF	0.065	0.039	6.383	0.039	0.812	0.907	0.327
1,2,8/1,2,8-TriCDF	0.099	0.024	2.195	0.021	0.565	0.347	0.158
2,4,8-TriCDF	0.016	0.001	0.512	0.006	0.340	0.147	0.050
1,4,9-TriCDF	0.087	0.047	2.402	0.037	0.480	0.520	0.186
2,3,7-TriCDF	0.064	0.029	6.889	0.039	1.108	1.324	0.402
1,6,8/2,3,4/2,3,8-TriCDF	0.090	0.035	3.389	0.060	0.978	0.507	0.189
2,3,8/3,4,7-TriCDF	n.n.	n.n.	0.019	0.001	0.002	n.n.	n.n.
2,6,7-TriCDF	0.412	0.112	18.578	0.108	2.857	2.959	1.084
1,4,6/1,4,7-TriCDF	0.096	0.045	6.172	0.060	2.157	0.985	0.371
3,4,6-TriCDF	0.076	0.020	2.225	0.019	0.446	1.324	0.163
2,4,6-TriCDF	0.069	0.034	8.457	0.046	1.457	1.765	0.699
2,3,7,8-TCDF	0.063	0.013	1.477	0.017	0.193	0.099	0.294
1,3,8,8-TCDF	0.040	0.018	1.709	0.018	0.567	0.274	0.156
1,3,7,8/1,3,7,9-TCDF	0.039	0.043	2.718	0.028	1.077	0.269	0.158
1,3,4,7-TCDF	0.027	0.020	1.479	0.024	0.540	0.281	0.160
1,4,6,8-TCDF	0.046	0.017	1.500	0.027	0.496	0.370	0.181
1,2,4,7/1,3,6,7-TCDF	0.055	0.030	2.104	0.027	0.742	0.340	0.196
1,3,4,8-TCDF	0.019	0.015	1.196	0.020	0.419	0.205	0.124
1,2,4,8/1,3,4,6-TCDF	0.060	0.022	1.615	0.027	0.480	0.448	0.271
1,2,4,8/1,2,6,8/1,2,3,7/1,4,7,8/1,3,6,9-TCDF	0.213	0.078	5.448	0.088	1.856	1.263	0.719
1,2,3,4/1,2,3,6/1,2,3,8/1,4,6,7/1,6,7,8/2,4,6,8-TCDF	0.330	0.130	14.929	0.174	2.896	3.314	1.769
1,3,4,9-TCDF	n.n.	n.n.	0.909	0.010	0.233	0.187	0.094
1,2,7,8-TCDF	0.125	0.029	1.336	0.030	0.477	0.242	0.155
1,2,6,7-TCDF	0.051	0.022	1.491	0.028	0.564	0.449	0.286
1,2,7,9/1,4,6,9-TCDF	0.020	0.012	2.287	0.020	0.846	0.382	0.219
1,2,4,9/2,3,6,8-TCDF	0.081	0.027	1.548	0.037	0.416	0.437	0.272
2,4,6,7-TCDF	0.155	0.077	11.902	0.132	1.745	2.880	1.653
1,2,3,9/2,3,4,7-TCDF	0.101	0.087	13.022	0.150	1.975	3.107	1.761
1,2,6,9-TCDF	0.029	0.047	2.497	0.060	0.736	0.817	0.568
2,3,4,8-TCDF	0.070	0.031	1.477	0.039	0.365	0.466	0.294
2,3,4,6-TCDF	0.111	0.057	4.905	0.103	1.389	2.620	1.572
2,3,8,7-TCDF	0.074	0.038	1.844	0.043	0.636	0.596	0.390
3,4,6,7-TCDF	0.113	0.069	6.667	0.124	1.426	2.620	1.697

7. ANHANG

Versuch Laborlaufnummer	Instationärer Betrieb 9712036+9712037	Normalbetrieb 9805007	CO-Spitzen 9805008	Normalbetrieb 9805009	CO-Spitzen 9805010	CO-Spitzen, Memory-Phase I 9805019	CO-Spitzen, Memory-Phase II 9805020
1,2,3,7,8/1,2,3,4,8-PeCDF	0.163	0.059	1.436	0.094	0.867	0.770	0.506
2,3,4,7,8-PeCDF	0.164	0.050	0.789	0.100	0.670	0.772	0.618
1,3,4,6,8-PeCDF	0.078	0.038	2.002	0.063	0.793	0.830	0.506
1,2,4,6,8-PeCDF	0.115	0.045	1.572	0.089	0.657	0.758	0.489
1,3,6,7,8-PeCDF	0.051	0.034	1.248	0.045	0.651	0.475	0.305
1,3,4,7,8-PeCDF	0.005	0.009	0.301	0.010	0.147	0.109	0.069
1,3,4,7,9/1,2,3,6,8-PeCDF	0.096	0.048	2.083	0.081	1.065	0.913	0.619
1,2,4,7,8-PeCDF	0.090	0.023	0.895	0.044	0.491	0.387	0.235
1,2,4,7,9/1,3,4,6,7-PeCDF	0.075	0.063	2.082	0.112	1.028	1.356	1.021
1,2,4,6,7-PeCDF	0.097	0.042	1.372	0.073	0.727	0.929	0.668
1,2,3,4,7/1,4,6,7,8-PeCDF	0.144	0.059	1.689	0.104	1.011	1.157	0.921
1,3,4,6,9-PeCDF	n.n.	0.009	0.572	0.019	0.202	0.282	0.167
1,2,3,4,6-PeCDF	0.068	0.029	1.349	0.074	0.716	1.180	0.902
1,2,3,7,9-PeCDF	0.068	0.029	1.349	0.007	n.n.	1.180	0.902
1,2,3,6,7-PeCDF	0.042	0.032	0.868	0.064	0.557	0.668	0.474
1,2,4,6,9/1,2,6,7,8-PeCDF	0.110	0.063	1.651	0.105	0.923	1.324	0.914
1,2,6,7,9-PeCDF	0.019	0.005	0.124	0.010	0.085	0.124	0.095
1,2,3,6,9-PeCDF	0.010	0.008	0.259	0.014	0.150	0.160	0.098
2,3,4,6,8-PeCDF	0.254	0.126	3.925	0.282	1.821	3.358	2.807
1,2,3,4,9-PeCDF	0.049	0.025	1.577	0.059	0.600	0.752	0.438
1,2,4,8,9-PeCDF	0.046	0.023	1.161	0.047	0.609	0.661	0.365
1,2,3,8,9-PeCDF	0.016	0.009	0.376	0.023	0.191	0.206	0.126
2,3,4,6,7-PeCDF	0.459	0.358	7.143	0.988	5.579	10.289	8.661
1,2,3,4,7,8/1,2,3,4,7,9-HxCDF	0.323	0.084	0.866	0.216	1.206	0.937	1.000
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.299	0.117	1.365	0.329	1.779	1.628	1.762
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.157	0.021	0.092	0.105	0.357	0.255	0.316
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.532	0.242	1.876	0.999	3.849	3.799	4.316
1,2,3,4,6,8-HxCDF	0.290	0.110	1.570	0.343	1.489	1.738	1.677
1,3,4,6,7,8/1,3,4,6,7,9-HxCDF	0.348	0.165	1.998	0.561	2.495	2.792	3.543
1,2,4,6,7,8-HxCDF	0.383	0.126	1.598	0.391	1.736	2.015	2.426
1,2,4,6,7,9-HxCDF	0.060	0.030	0.372	0.070	0.380	0.377	0.367
1,2,4,6,8,9-HxCDF	0.420	0.214	2.466	0.911	3.344	4.272	5.943
1,2,3,4,6,7-HxCDF	0.422	0.214	2.469	0.911	3.346	4.272	5.943
1,2,3,6,7,9-HxCDF	0.026	0.013	0.167	0.034	0.204	0.142	0.150
1,2,3,4,6,9/1,2,3,6,8,9-HxCDF	0.101	0.046	0.646	0.121	0.676	0.606	0.541
1,2,3,4,8,9-HxCDF	0.064	0.023	0.425	0.083	0.512	0.385	0.289
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	1.589	0.784	3.001	3.580	12.710	8.143	12.663
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.126	0.065	0.263	0.144	0.708	0.311	0.315
1,2,3,4,6,7,9-HpCDF	0.247	0.122	0.518	0.319	1.399	0.793	0.910
1,2,3,4,6,8,9-HpCDF	0.218	0.103	0.414	0.219	1.061	0.569	0.599
OCDF	1.047	0.356	0.601	0.785	3.303	2.086	3.003
I-TEQ (NATO/CCMS)	0.261	0.089	1.222	0.268	1.353	1.245	1.284
I-TEQ (PCDD nach NATO/CCMS)	0.016	0.004	0.154	0.009	0.098	0.062	0.048
I-TEQ (PCDF nach NATO/CCMS)	0.246	0.085	1.067	0.260	1.254	1.183	1.236
I-TEQ (WHO)	0.268	0.090	1.288	0.267	1.382	1.269	1.296
I-TEQ (PCDD nach WHO)	0.023	0.006	0.221	0.008	0.130	0.088	0.063
I-TEQ (PCDF nach WHO)	0.245	0.084	1.067	0.259	1.251	1.181	1.233

7. ANHANG

Versuch Laborlaufnummer	Instationärer Betrieb 9712036+9712037	Normalbetrieb 9805007	CO-Spitzen 9805008	Normalbetrieb 9805009	CO-Spitzen 9805010	CO-Spitzen, Memory-Phase I 9805019	CO-Spitzen, Memory-Phase II 9805020
#1	1.777	0.253	2.804	0.785	3.857	0.803	0.734
#2	2.851	0.023	0.481	0.309	1.159	0.057	0.029
#3	1.203	0.088	2.491	0.718	2.187	0.291	1.002
#6	4.478	0.029	0.614	0.049	0.075	0.085	0.064
#5,#8	2.683	0.335	1.534	0.655	2.481	0.844	1.569
#11	1.607	0.012	0.283	0.137	0.220	0.142	0.176
#13	4.322	0.035	0.771	0.178	0.498	0.303	0.324
#15	1.523	0.214	1.395	0.785	2.628	1.216	1.839
#19	0.337	0.047	1.182	0.020	0.392	0.028	0.104
#18	n.n.	0.976	0.937	0.451	0.819	0.427	0.983
#17	0.181	0.365	0.937	0.173	0.173	n.n.	0.344
#24	6.158	0.144	1.151	0.026	0.222	0.321	0.283
#32	6.295	0.631	2.275	0.166	0.900	0.281	0.650
#16	6.168	0.847	2.275	0.162	0.229	0.205	n.n.
#28,#31	n.n.	6.791	2.118	0.897	1.468	0.831	1.592
#33	1.845	2.793	13.568	0.362	3.126	1.760	1.639
#22	0.726	1.649	0.986	0.181	0.390	0.258	0.411
#53	0.186	0.189	1.091	0.003	0.098	n.n.	0.027
#51	0.073	0.098	0.312	0.002	0.025	n.n.	0.019
#45	0.347	0.239	0.469	0.004	0.064	n.n.	0.030
#46	0.137	0.087	0.327	0.001	n.n.	n.n.	0.012
#52	1.326	3.296	3.645	0.508	1.164	0.888	1.014
#49	0.898	1.525	0.666	0.147	0.305	0.184	0.282
#47,#48	0.627	1.009	0.485	0.123	0.273	1.128	0.335
#44	3.599	2.066	1.590	0.201	0.521	0.346	0.402
#42	3.460	0.789	1.052	0.048	0.249	0.185	0.185
#64	0.808	1.274	2.033	0.059	0.724	0.316	0.230
#71,#41	0.476	1.823	0.496	0.106	0.238	0.148	0.223
#40	0.714	0.377	12.831	0.045	2.184	1.448	0.881
#67	0.298	0.103	1.182	n.n.	0.142	5.923	0.140
#63	n.n.	0.091	0.358	0.013	0.303	5.924	2.431
#74	n.n.	2.572	0.368	0.127	0.445	0.158	0.369
#70,#76	n.n.	4.081	1.623	0.250	0.841	0.423	0.584
#66	n.n.	2.829	0.975	0.175	0.536	0.297	0.425
#60,#56	n.n.	1.581	3.575	0.130	0.715	0.743	0.633
#81	n.n.	0.045	0.709	n.n.	0.374	0.284	0.228
#77	n.n.	0.170	0.858	0.044	0.442	0.490	0.446
#100	0.026	0.067	0.306	n.n.	0.053	n.n.	0.034
#95,#102	0.021	2.685	2.920	0.437	1.037	1.191	1.075
#91	0.062	0.088	0.396	0.010	n.n.	0.075	0.077
#84,#92	0.632	0.775	1.555	0.103	0.380	0.273	0.249
#101	3.810	3.155	1.242	0.706	1.160	1.273	1.370
#99	0.160	1.231	0.143	0.036	0.096	n.n.	0.077
#119,#83,#86,#97,#87,#115,#85	0.345	1.310	7.137	0.135	1.444	3.585	1.988
#87,#115,#85	1.177	0.853	1.551	0.125	0.549	2.518	1.389
#110	2.387	2.706	0.921	0.431	0.750	0.969	0.883
#82	0.081	0.110	9.556	0.046	1.603	2.321	0.862
#107,#123,#124	n.n.	0.206	0.959	0.033	0.295	0.200	0.267
#118	1.712	1.375	0.785	0.273	0.684	0.689	0.627
#114,#122	n.n.	0.056	1.705	n.n.	0.396	0.446	0.359
#105	n.n.	0.271	1.255	0.086	0.454	0.549	0.403
#126	n.n.	0.056	1.346	0.075	0.761	1.247	1.125

7. ANHANG

Versuch	Instationärer Betrieb	Normalbetrieb	CO-Spitzen	Normalbetrieb	CO-Spitzen	CO-Spitzen, Memory-Phase I	CO-Spitzen, Memory-Phase II
Laborlaufnummer	9712036+9712037	9805007	9805008	9805009	9805010	9805019	9805020
#136	1.143	0.583	0.441	0.114	0.244	0.362	0.347
#151	1.322	0.626	0.355	0.112	0.181	0.284	0.435
#135,#144,#147	1.447	0.582	1.040	0.127	0.321	0.428	0.374
#149	4.868	2.968	1.578	0.756	1.238	1.766	1.685
#134	0.411	0.142	0.634	0.029	0.147	0.211	0.183
#131	0.280	0.070	2.418	0.022	0.344	0.719	0.431
#132,#146	0.848	0.332	0.416	0.105	0.258	0.289	0.303
#153	6.251	4.301	2.612	1.209	2.125	2.359	2.305
#141	1.513	0.547	0.638	0.183	0.377	0.492	0.501
#137	0.253	0.034	0.313	0.045	0.095	1.007	0.119
#130	0.287	0.101	2.217	0.045	0.527	1.009	0.704
#160,#163	4.363	0.930	1.001	0.335	0.669	0.868	0.831
#138	4.664	3.217	1.688	0.883	1.789	1.939	1.936
#129,#158	0.795	0.087	10.300	0.081	1.491	3.320	1.856
#167	0.607	0.335	4.591	0.208	1.805	2.816	0.124
#128,#159	1.255	0.088	0.329	0.031	0.268	2.816	2.061
#156	2.009	0.229	1.291	0.122	0.721	1.085	1.003
#157	0.746	0.046	0.939	0.051	0.435	0.699	0.619
#169	2.275	0.032	0.531	0.086	0.399	0.796	0.935
#179	0.757	0.287	0.597	0.076	0.185	0.306	0.292
#176	0.280	0.107	0.555	0.019	0.075	0.227	0.184
#178	0.283	0.086	0.325	0.016	0.074	0.172	0.136
#175	0.781	0.029	0.621	n.n.	0.094	0.314	0.209
#187	1.180	0.495	0.381	0.186	0.337	0.453	0.403
#183	0.881	0.246	0.355	0.084	0.231	0.304	0.298
#185	0.214	0.045	0.126	0.010	0.035	n.n.	0.063
#174	1.282	0.443	2.186	0.284	0.769	0.671	1.151
#177	0.549	0.329	0.822	0.168	0.398	0.581	0.579
#171	0.555	0.189	1.885	0.105	0.698	1.228	0.923
#173	0.141	0.022	2.100	0.011	0.327	0.905	0.581
#172	0.377	0.106	1.654	0.083	0.547	1.328	1.059
#180,#193	2.479	1.129	1.155	0.519	1.092	1.395	1.313
#191	0.477	0.045	0.461	0.028	0.263	0.369	0.329
#170	1.925	0.719	6.807	0.729	4.156	7.257	6.210
#190	1.925	0.001	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.006
#189	n.n.	0.002	0.027	0.002	0.018	n.n.	0.017
#202	0.077	0.011	0.221	0.002	0.027	n.n.	n.n.
#200	0.109	0.010	0.150	n.n.	0.038	0.099	0.044
#199	0.186	0.010	0.440	0.006	0.092	0.294	0.185
#198	0.466	0.009	0.291	0.007	0.083	0.261	0.181
#201	0.105	0.057	0.342	0.016	0.179	0.385	0.272
#203,#196	0.349	0.088	0.861	0.064	0.628	1.049	0.609
#195	0.546	0.085	1.125	0.143	0.872	1.426	1.210
#194	0.785	0.199	1.244	0.330	1.848	1.893	1.784
#205	1.032	0.047	0.270	0.081	0.465	0.467	0.487
#208	0.885	0.007	0.307	n.n.	0.284	0.150	0.067
#207	1.140	0.006	0.214	n.n.	0.342	n.n.	n.n.
#206	1.639	0.124	1.067	0.146	1.866	1.049	0.654
#209	0.787	0.222	1.405	0.108	3.571	n.n.	n.n.
TEQ (nach Safe)	0.118	0.016	0.185	0.013	0.107	0.177	0.168
TEQ (WHO)	0.024	0.006	0.143	0.009	0.082	0.135	0.124

7. ANHANG

Versuch	Instationärer Betrieb	Normalbetrieb	CO-Spitzen	Normalbetrieb	CO-Spitzen	CO-Spitzen, Memory-Phase I	CO-Spitzen, Memory-Phase II
Laborlaufnummer	9712036+9712037	9805007	9805008	9805009	9805010	9805019	9805020
MCBz	8680.10	1054.09	22235.78	7434.82	32745.94	44362.19	60998.24
1,3-DiCBz	1293.99	229.23	2291.63	306.11	621.34	1875.58	2343.29
1,4-DiCBz	1672.91	34.36	2118.48	629.78	1086.32	986.32	1714.84
1,2-DiCBz	458.20	80.46	3873.45	604.30	3328.45	2517.63	2858.37
1,3,5-TriCBz	50.44	31.27	141.45	43.08	288.63	90.61	91.26
1,2,4-TriCBz	262.54	26.04	1551.13	902.96	4374.58	2776.19	1739.34
1,2,3-TriCBz	417.73	135.67	6851.26	648.48	7087.68	3534.34	4327.61
1,2,3,5-TeCBz	-	33.72	1960.88	273.96	1533.53	1719.35	482.28
1,2,4,5-TeCBz	-	6.58	565.61	198.50	1006.10	564.33	152.06
1,2,3,5-TeCBz+1,2,4,5-TeCBz	176.15	40.30	2526.49	472.46	2539.63	2283.68	634.34
1,2,3,4-TeCBz	173.67	66.46	3522.91	592.88	2975.46	3538.91	1056.05
PeCBz	314.26	97.48	5417.92	157.56	3527.18	6470.03	1441.00
HxCBz	410.06	86.90	3284.24	309.41	4329.68	5338.78	450.22

Versuch	Normalbetrieb	CO-Spitzen	CO-Spitzen, Memory-Phase I	CO-Spitzen, Memory-Phase II
Laborlaufnummer	9805007	9805008	9805019	9805020
2-MCPh	13.00	401.63	474.32	253.82
4-MCPh	1.01	1152.61	1063.96	736.17
2,6-DiCPh	4.98	54.77	58.98	83.88
2,4-DiCPh	2.37	145.62	74.70	112.92
3,4-DiCPh	2.14	158.66	283.77	208.73
2,4,6-TriCPh	3.68	269.22	224.14	316.73
2,3,6-TriCPh	2.50	4.75	5.89	8667.00
2,3,5-TriCPh	3.70	163.13	285.42	197.81
2,4,5-TriCPh	3.02	144.05	108.24	82.75
2,3,4-TriCPh	5.17	140.56	135.37	109.27
3,4,5-TriCPh	1.35	139.93	83.01	75.75
2,3,5,6-TeCPh	n.n.	98.10	70.23	168.17
2,3,4,6-TeCPh	6.75	93.06	143.82	150.96
2,3,4,5-TeCPh	15.51	532.71	259.36	377.74
PeCPh	4.32	116.48	187.92	208.47

HVA:

Legende der Abkürzungen für die verwendeten Brennstoffe:

Abkürzung	Brennstoff
H	Holz
HK	Holzkohle
AH	Altholz
MDF	Spanplattenabfälle (<i>Medium Density Fibreboard</i>)

7. ANHANG

Versuch	Nur Nachbrennkammer mit MDF befeuert; ohne Rostfeuerung	H/AH (50/50)	H/HK/AH (60/20/20)	MDF/HK/AH (60/20/20)	MDF (100)	H/MDF/HK (60/20/20)
Laborlaufnummer	9811023	9811024	9811025	9811026	9811027	9811029
1-MCDD	0.083	30.698	1.189	1.244	0.056	0.126
2-MCDD	0.039	10.713	0.563	1.256	0.110	0.075
1,3-DiCDD	0.031	1.796	0.986	0.015	0.103	0.084
2,7/2,3/2,8-DiCDD	0.029	5.017	0.400	0.308	0.134	0.148
1,4/1,7-DiCDD	0.010	3.580	0.208	0.332	0.014	0.044
1,8-DiCDD	0.014	3.804	0.191	0.277	0.005	0.044
1,6-DiCDD	0.007	0.669	0.026	0.032	0.004	0.027
1,2-DiCDD	0.012	2.501	0.142	0.135	0.003	0.037
1,9-DiCDD	n.n.	0.062	0.190	0.011	0.052	0.024
1,3,7-TriCDD	0.024	5.399	0.320	0.105	0.028	0.042
1,3,8-TriCDD	0.023	7.062	0.532	0.122	0.002	0.022
1,3,6-TriCDD	0.015	1.895	0.087	0.108	0.016	0.034
1,2,4-TriCDD	0.009	1.486	0.067	0.007	0.004	0.010
1,3,9/2,3,7-TriCDD	0.039	3.555	0.305	0.287	0.061	0.129
1,4,7-TriCDD	0.008	0.733	0.173	0.037	0.046	0.008
1,2,3-TriCDD	0.018	0.958	0.175	0.062	0.004	0.025
1,7,8-TriCDD	0.012	0.988	0.132	0.060	0.024	0.034
1,2,7-TriCDD	0.011	1.087	0.108	0.050	0.056	0.014
1,2,8-TriCDD	0.012	1.088	0.103	0.054	0.011	0.011
1,4,6-TriCDD	0.011	0.392	0.209	0.090	0.006	0.028
1,2,6-TriCDD	0.010	0.536	0.141	0.050	0.002	0.019
1,2,9-TriCDD	0.007	0.622	0.063	0.080	0.018	0.038
2,3,7,8-TCDD	n.n.	0.777	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1,3,8,8-TCDD	0.231	8.398	0.426	0.554	0.216	0.107
1,3,7,9-TCDD	0.127	2.913	0.296	0.423	0.139	0.055
1,3,7,8-TCDD	0.044	2.766	0.038	0.051	0.011	0.007
1,3,6,9/1,2,4,7/1,2,4,8-TCDD	0.037	1.308	0.043	0.029	0.008	0.004
1,2,6,8-TCDD	0.021	0.767	0.018	0.013	n.n.	n.n.
1,4,7,8-TCDD	n.n.	0.291	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1,2,4,6/1,2,4,9-TCDD	0.010	0.657	0.009	0.012	0.007	n.n.
1,2,3,4/1,2,3,7/1,2,3,8-TCDD	0.027	1.358	0.035	0.027	0.007	0.003
1,2,3,6/1,2,7,9-TCDD	0.021	1.131	0.019	0.021	0.007	0.004
1,2,7,8/1,4,6,9-TCDD	0.013	0.992	0.009	0.007	n.n.	0.001
1,2,3,9-TCDD	0.006	0.316	n.n.	0.003	n.n.	n.n.
1,2,8,9-TCDD	n.n.	0.249	0.005	0.004	n.n.	0.000
1,2,6,7-TCDD	0.004	0.173	n.n.	0.004	n.n.	n.n.
1,2,8,9-TCDD	n.n.	0.191	0.005	n.n.	n.n.	n.n.
1,2,3,7,8-PeCDD	0.010	0.983	0.014	0.019	0.013	0.001
1,2,4,6,8/1,2,4,7,9-PeCDD	0.107	4.857	0.195	0.345	0.094	0.030
1,2,3,6,8-PeCDD	0.088	5.132	0.132	0.349	0.082	0.017
1,2,4,7,8-PeCDD	0.008	1.090	0.013	0.015	n.n.	n.n.
1,2,3,7,9-PeCDD	0.064	6.295	0.063	0.299	0.079	0.014
1,2,3,4,7/1,2,4,6,9-PeCDD	0.015	0.980	0.020	0.040	0.009	0.002
1,2,3,6,9-PeCDD	n.n.	0.190	n.n.	n.n.	0.007	n.n.
1,2,4,6,7-PeCDD	n.n.	0.412	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1,2,4,8,9-PeCDD	n.n.	0.433	0.009	n.n.	0.005	n.n.
1,2,3,4,6-PeCDD	0.009	0.273	n.n.	0.007	n.n.	n.n.
1,2,3,6,7-PeCDD	0.009	0.585	0.008	n.n.	0.007	0.001
1,2,3,8,9-PeCDD	0.007	0.701	0.006	0.008	0.005	n.n.
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.005	0.438	0.007	0.015	0.011	n.n.
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.006	0.525	0.013	0.024	0.015	n.n.
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.008	0.349	0.012	0.020	0.011	0.001
1,2,3,4,6,8/1,2,4,6,7,9/1,2,4,6,8,9-HxCDD	0.115	11.192	0.158	0.660	0.229	0.023
1,2,3,6,7,9/1,2,3,6,8,9-HxCDD	0.027	1.301	0.036	0.083	0.048	0.006
1,2,3,4,6,9-HxCDD	n.n.	0.074	0.004	n.n.	n.n.	n.n.
1,2,3,4,6,7-HxCDD	0.006	0.326	0.007	0.007	0.006	n.n.
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.032	1.311	0.061	0.125	0.080	0.007
1,2,3,4,6,7,9-HpCDD	0.026	2.855	0.043	0.105	0.058	0.004
OCDD	0.029	0.680	0.052	0.095	0.066	0.008

7. ANHANG

Versuch	Nur Nachbrennkammer mit MDF befeuert; ohne Rostfeuerung	H/AH (50/50)	H/HK/AH (60/20/20)	MDF/HK/AH (60/20/20)	MDF (100)	H/MDF/HK (60/20/20)
Laborlaufnummer	9811023	9811024	9811025	9811026	9811027	9811029
1-MCDF	0.615	262.471	3.817	3.431	0.456	0.484
3-MCDF	0.784	858.137	4.238	4.057	1.132	0.510
2-MCDF	0.915	455.710	5.451	4.778	1.185	0.515
4-MCDF	0.092	10.237	0.797	0.802	0.032	n.n.
1,3-DiCDF	0.247	62.693	0.345	0.806	0.045	0.084
1,7-DiCDF	0.095	169.370	0.389	3.545	0.031	0.079
1,4-DiCDF	0.008	4.608	n.n.	0.092	0.006	n.n.
1,8-DiCDF	0.152	131.098	0.491	0.436	0.064	0.051
1,6-DiCDF	0.028	17.743	0.122	0.126	0.013	0.039
1,2-DiCDF	0.350	79.084	0.591	0.837	0.141	0.115
2,4-DiCDF	1.009	69.647	0.930	1.563	0.350	0.162
3,7-DiCDF	0.114	128.173	0.202	0.413	0.113	0.057
2,7-DiCDF	n.n.	15.508	0.003	0.064	n.n.	n.n.
2,3-DiCDF	0.150	143.432	0.466	0.712	0.227	0.093
2,8/3,6-DiCDF	0.388	199.751	0.618	0.838	0.295	0.125
2,6-DiCDF	0.229	66.942	0.335	0.615	0.194	0.085
1,9/3,4-DiCDF	0.197	70.805	0.338	0.492	0.243	0.088
4,6-DiCDF	0.358	47.268	0.662	0.448	0.221	0.078
1,3,7-TriCDF	0.063	50.110	0.141	0.173	0.020	0.025
1,3,8-TriCDF	0.070	25.276	0.138	0.115	0.021	0.023
1,3,6-TriCDF	0.048	3.725	0.069	0.059	0.040	0.014
1,3,4/1,4,8-TriCDF	0.096	17.274	0.123	0.116	0.033	0.025
1,2,4/1,6,7-TriCDF	0.184	14.376	0.198	0.122	0.117	0.028
1,7,8-TriCDF	0.071	55.829	0.171	0.135	0.062	0.073
1,2,3-TriCDF	0.258	15.563	0.175	0.164	0.089	0.042
1,2,7-TriCDF	0.103	15.701	0.168	0.122	0.090	0.036
1,2,9-TriCDF	0.042	10.624	0.064	0.065	0.061	0.016
1,3,9-TriCDF	0.020	5.905	0.042	0.049	0.034	n.n.
2,4,7-TriCDF	0.317	26.380	0.180	0.369	0.151	0.075
1,2,6/1,2,8-TriCDF	0.121	23.234	0.169	0.372	0.133	0.060
2,4,8-TriCDF	0.051	6.402	0.082	0.218	0.037	0.012
1,4,9-TriCDF	0.181	32.671	0.245	0.542	0.187	0.102
2,3,7-TriCDF	0.462	32.643	0.222	0.169	0.187	0.071
1,6,8/2,3,4/2,3,8-TriCDF	0.177	42.439	0.290	0.226	0.243	0.045
2,3,8/3,4,7-TriCDF	n.n.	9.520	0.010	0.120	0.024	n.n.
2,6,7-TriCDF	1.033	139.900	0.597	0.884	0.800	0.203
1,4,6/1,4,7-TriCDF	0.344	44.674	0.305	0.244	0.256	0.139
3,4,6-TriCDF	0.462	25.938	0.147	0.153	0.148	0.062
2,4,6-TriCDF	0.616	38.907	0.297	0.115	0.223	0.069
2,3,7,8-TCDF	0.150	6.434	0.075	0.072	0.060	0.012
1,3,6,8-TCDF	0.223	4.490	0.239	0.117	0.103	0.036
1,3,7,8/1,3,7,9-TCDF	0.281	9.910	0.226	0.120	0.125	0.034
1,3,4,7-TCDF	0.137	3.067	0.104	0.050	0.047	0.015
1,4,6,8-TCDF	0.201	2.886	0.130	0.062	0.066	0.021
1,2,4,7/1,3,6,7-TCDF	0.202	5.023	0.146	0.079	0.070	0.021
1,3,4,8-TCDF	0.136	2.469	0.097	0.051	0.040	0.011
1,2,4,8/1,3,4,6-TCDF	0.148	3.104	0.112	0.056	0.060	0.015
1,2,4,6/1,2,6,8/1,2,3,7/1,4,7,8/1,3,6,9-TCDF	0.545	14.707	0.357	0.214	0.204	0.047
1,2,3,4/1,2,3,6/1,2,3,8/1,4,6,7/1,6,7,8/2,4,6,8-TCDF	0.557	13.206	0.398	0.291	0.205	0.051
1,3,4,9-TCDF	0.028	0.923	0.013	n.n.	n.n.	n.n.
1,2,7,8-TCDF	0.234	8.727	0.118	0.091	0.078	0.020
1,2,6,7-TCDF	0.171	4.839	0.088	0.074	0.056	0.011
1,2,7,9/1,4,6,9-TCDF	0.021	0.668	0.014	0.012	0.010	0.002
1,2,4,9/2,3,6,8-TCDF	0.354	9.657	0.203	0.163	0.135	0.027
2,4,6,7-TCDF	0.302	7.229	0.151	0.143	0.106	0.017
1,2,3,9/2,3,4,7-TCDF	0.315	7.960	0.158	0.152	0.109	0.017
1,2,6,9-TCDF	0.152	4.002	0.097	0.123	0.081	0.015
2,3,4,8-TCDF	0.146	5.089	0.089	0.073	0.062	0.010
2,3,4,6-TCDF	0.115	3.900	0.062	0.061	0.044	0.005
2,3,6,7-TCDF	0.208	8.600	0.116	0.097	0.089	0.013
3,4,6,7-TCDF	0.161	3.948	0.081	0.066	0.084	0.008

7. ANHANG

Versuch	Nur Nachbrennkammer mit MDF befeuert; ohne Rostfeuerung	H/AH (50/50)	H/HK/AH (60/20/20)	MDF/HK/AH (60/20/20)	MDF (100)	H/MDF/HK (60/20/20)
Laborlaufnummer	9811023	9811024	9811025	9811026	9811027	9811029
1,2,3,7,8/1,2,3,4,8-PeCDF	0.085	3.016	0.082	0.073	0.071	0.011
2,3,4,7,8-PeCDF	0.102	3.157	0.063	0.070	0.066	0.005
1,3,4,6,8-PeCDF	0.114	1.659	0.120	0.060	0.063	0.016
1,2,4,6,8-PeCDF	0.127	1.857	0.126	0.073	0.064	0.017
1,3,6,7,8-PeCDF	0.065	1.542	0.074	0.057	0.051	0.009
1,3,4,7,8-PeCDF	0.050	0.656	0.040	0.023	0.026	0.003
1,3,4,7,9/1,2,3,6,8-PeCDF	0.102	2.972	0.114	0.074	0.081	0.014
1,2,4,7,8-PeCDF	0.092	2.407	0.074	0.051	0.054	0.010
1,2,4,7,9/1,3,4,6,7-PeCDF	0.108	1.659	0.092	0.059	0.059	0.006
1,2,4,6,7-PeCDF	0.075	1.493	0.049	0.042	0.037	0.005
1,2,3,4,7/1,4,6,7,8-PeCDF	0.078	1.350	0.082	0.058	0.051	0.008
1,3,4,6,9-PeCDF	0.036	0.832	0.023	0.013	0.016	n.n.
1,2,3,4,6-PeCDF	0.020	0.456	0.010	0.014	n.n.	n.n.
1,2,3,7,9-PeCDF	0.011	0.334	0.012	0.013	0.013	n.n.
1,2,3,6,7-PeCDF	0.043	1.184	0.033	0.030	0.026	0.004
1,2,4,6,9/1,2,6,7,8-PeCDF	0.088	1.723	0.069	0.054	0.051	0.005
1,2,6,7,9-PeCDF	0.011	0.369	0.015	0.006	0.010	n.n.
1,2,3,6,9-PeCDF	0.015	0.314	0.013	0.009	0.013	0.001
2,3,4,6,8-PeCDF	0.139	2.366	0.115	0.092	0.075	0.011
1,2,3,4,9-PeCDF	0.005	0.206	0.005	0.004	0.009	n.n.
1,2,4,8,9-PeCDF	0.026	0.398	0.021	0.014	0.020	0.001
1,2,3,8,9-PeCDF	0.010	0.405	0.012	0.011	0.011	n.n.
2,3,4,6,7-PeCDF	0.132	2.647	0.090	0.088	0.096	0.007
1,2,3,4,7,8/1,2,3,4,7,9-HxCDF	0.053	1.209	0.065	0.070	0.069	n.n.
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.038	1.236	0.050	0.056	0.052	0.005
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.004	0.154	0.007	0.008	0.010	n.n.
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.045	1.126	0.042	0.053	0.044	0.004
1,2,3,4,6,8-HxCDF	0.044	0.769	0.052	0.060	0.052	0.007
1,3,4,6,7,8/1,3,4,6,7,9-HxCDF	0.074	1.526	0.077	0.067	0.070	0.006
1,2,4,6,7,8-HxCDF	0.064	1.514	0.069	0.069	0.078	0.007
1,2,4,6,7,9-HxCDF	0.036	0.595	0.030	0.025	0.036	0.003
1,2,4,6,8,9-HxCDF	0.012	0.337	0.012	0.015	0.009	0.001
1,2,3,4,6,7-HxCDF	0.039	0.756	0.035	0.046	0.038	0.002
1,2,3,6,7,9-HxCDF	0.014	0.379	0.016	0.016	0.021	0.002
1,2,3,4,6,9/1,2,3,6,8,9-HxCDF	0.015	0.432	0.024	0.023	0.026	0.002
1,2,3,4,8,9-HxCDF	0.006	0.212	0.010	0.011	0.016	0.001
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.048	0.920	0.065	0.090	0.075	0.007
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.009	0.254	0.018	0.027	0.025	0.002
1,2,3,4,6,7,9-HpCDF	0.009	0.331	0.022	0.028	0.028	0.002
1,2,3,4,6,8,9-HpCDF	0.015	0.807	0.018	0.029	0.016	n.n.
OCDF	0.032	0.382	0.023	0.068	0.037	0.007
I-TEQ (NATO/CCMS)	0.092	4.171	0.071	0.083	0.072	0.006
I-TEQ (PCDD nach NATO/CCMS)	0.007	1.414	0.011	0.017	0.011	0.001
I-TEQ (PCDF nach NATO/CCMS)	0.085	2.757	0.060	0.066	0.061	0.006
I-TEQ (WHO)	0.097	4.662	0.078	0.092	0.078	0.007
I-TEQ (PCDD nach WHO)	0.013	1.905	0.018	0.026	0.018	0.001
I-TEQ (PCDF nach WHO)	0.085	2.757	0.060	0.066	0.061	0.006

7. ANHANG

Versuch	Nur Nachbrennkammer mit MDF befeuert; ohne Rostfeuerung	H/AH (50/50)	H/HK/AH (60/20/20)	MDF/HK/AH (60/20/20)	MDF (100)	H/MDF/HK (60/20/20)
Laborlaufnummer	9811023	9811024	9811025	9811026	9811027	9811029
#2	n.n.	14.334	1.155	0.803	0.529	0.485
#3	1.290	5.995	1.189	0.602	0.253	0.345
#6	0.117	3.481	0.063	0.082	0.037	0.034
#5,#8	0.413	3.145	0.136	0.223	0.233	0.115
#11	0.292	3.190	0.173	0.153	0.150	0.106
#13	0.323	8.888	0.305	0.247	0.035	0.044
#15	0.277	1.312	0.145	0.100	0.083	0.161
#19	n.n.	0.022	0.002	0.004	n.n.	n.n.
#18	0.241	0.587	0.087	0.107	0.087	0.068
#17	0.084	n.n.	0.034	0.038	0.020	0.019
#24	0.024	0.063	0.007	0.008	n.n.	n.n.
#32	0.025	0.288	0.023	0.030	0.007	0.004
#16	0.059	0.122	0.028	0.037	0.016	0.008
#28,#31	0.484	2.888	0.255	0.271	0.305	0.183
#33	0.192	4.463	0.131	0.134	0.086	0.050
#22	0.066	0.846	0.045	0.052	0.025	0.008
#53	0.012	n.n.	0.007	0.008	0.002	n.n.
#51	0.013	n.n.	n.n.	0.007	n.n.	n.n.
#45	0.008	n.n.	0.005	0.006	n.n.	n.n.
#46	0.007	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#52	0.217	0.735	0.155	0.160	0.123	0.083
#49	0.044	0.430	0.046	0.042	0.027	0.020
#47,#48	0.102	0.832	0.043	0.059	0.034	0.029
#44	0.010	0.169	0.039	0.032	0.027	0.013
#42	0.010	0.097	n.n.	0.005	0.027	n.n.
#64	0.019	n.n.	0.013	0.012	0.005	n.n.
#71,#41	0.027	0.346	0.031	0.021	0.011	0.005
#40	n.n.	0.715	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#67	0.038	1.588	n.n.	0.015	n.n.	n.n.
#63	n.n.	n.n.	0.017	0.015	n.n.	n.n.
#74	0.102	1.833	0.073	0.060	0.037	0.020
#70,#76	0.224	1.978	0.137	0.115	0.124	0.049
#66	0.202	2.501	0.116	0.109	0.073	0.028
#60,#56	0.117	2.467	0.076	0.068	0.020	0.005
#81	n.n.	0.455	0.006	0.006	n.n.	n.n.
#77	0.082	3.492	0.041	0.037	0.003	0.002
#100	n.n.	n.n.	0.003	n.n.	n.n.	n.n.
#95,#102	0.056	0.202	0.042	0.037	0.038	n.n.
#91	0.009	0.037	0.007	0.003	n.n.	n.n.
#84,#92	0.022	0.079	0.014	0.011	n.n.	n.n.
#101	0.120	0.500	0.089	0.080	n.n.	0.040
#99	0.024	0.181	0.020	n.n.	0.004	n.n.
#119,#83,#86,#97,#87,#115,#85	0.089	1.012	0.041	0.026	0.003	0.001
#87,#115,#85	0.048	0.435	0.025	0.014	n.n.	n.n.
#110	0.098	0.702	0.064	0.047	0.059	0.017
#82	n.n.	0.095	0.006	0.004	n.n.	n.n.
#107,#123,#124	0.048	0.798	0.033	0.020	n.n.	n.n.
#118	0.149	1.418	0.073	0.058	0.062	0.022
#114,#122	n.n.	0.307	0.011	0.003	n.n.	n.n.
#105	0.054	0.750	0.031	0.027	n.n.	0.003
#126	0.032	1.217	0.014	n.n.	n.n.	n.n.

7. ANHANG

Versuch	Nur Nachbrennkammer mit MDF befeuert; ohne Rostfeuerung	H/AH (50/50)	H/HK/AH (60/20/20)	MDF/HK/AH (60/20/20)	MDF (100)	H/MDF/HK (60/20/20)
Laborlaufnummer	9811023	9811024	9811025	9811026	9811027	9811029
#136	n.n.	0.007	0.009	n.n.	0.002	n.n.
#151	n.n.	0.037	0.017	0.019	n.n.	0.003
#135,#144,#147	0.015	0.075	0.031	0.015	n.n.	0.001
#149	0.111	0.273	0.076	0.072	0.080	0.019
#134	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#131	0.006	0.030	0.012	n.n.	n.n.	n.n.
#132,#146	0.023	0.055	0.027	0.014	0.006	n.n.
#153	0.227	0.850	0.108	0.098	0.175	0.068
#141	0.027	0.032	0.014	n.n.	0.010	0.002
#137	n.n.	n.n.	0.006	n.n.	n.n.	n.n.
#130	n.n.	n.n.	0.006	n.n.	n.n.	n.n.
#160,#163	0.086	0.319	0.050	0.045	0.032	0.005
#138	0.200	0.690	0.096	0.076	0.125	0.028
#129,#158	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#167	0.017	0.086	0.005	n.n.	0.005	0.003
#128,#159	n.n.	0.027	0.010	0.010	0.005	n.n.
#156	0.007	0.234	0.019	0.013	0.004	0.001
#157	n.n.	0.080	0.005	n.n.	n.n.	n.n.
#169	0.002	0.085	0.001	0.002	n.n.	n.n.
#179	0.016	0.041	0.033	0.015	0.003	0.003
#176	0.010	0.047	0.058	0.019	0.003	0.004
#178	0.011	n.n.	0.017	0.009	n.n.	n.n.
#175	0.006	n.n.	0.027	0.008	n.n.	n.n.
#187	0.057	0.098	0.053	0.032	0.025	0.017
#183	0.041	0.062	0.059	0.031	0.012	0.034
#185	0.005	n.n.	0.005	0.005	n.n.	n.n.
#174	0.063	0.150	0.045	0.038	0.021	0.013
#177	0.033	n.n.	0.022	n.n.	0.005	0.023
#171	0.019	n.n.	0.030	0.014	n.n.	n.n.
#173	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#172	0.012	n.n.	0.011	0.011	n.n.	n.n.
#180,#193	0.179	0.563	0.076	0.063	0.088	0.018
#191	0.007	0.053	0.020	0.009	n.n.	0.007
#170	0.103	0.243	0.058	0.052	0.041	0.014
#190	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#189	n.n.	0.050	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#202	n.n.	n.n.	0.029	0.004	n.n.	n.n.
#200	n.n.	n.n.	0.012	0.002	n.n.	n.n.
#199	n.n.	n.n.	0.015	n.n.	0.002	n.n.
#198	0.003	n.n.	0.005	n.n.	n.n.	n.n.
#201	0.004	n.n.	0.012	0.008	n.n.	n.n.
#203,#196	0.014	0.031	0.029	n.n.	0.003	n.n.
#195	0.004	n.n.	0.007	0.003	n.n.	n.n.
#194	n.n.	n.n.	0.006	0.004	0.002	n.n.
#205	n.n.	n.n.	n.n.	0.003	n.n.	n.n.
#208	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#207	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#206	0.015	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#209	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
TEQ (nach Safe)	4.58E-03	1.69E-01	2.18E-03	7.38E-04	1.59E-04	7.88E-05
TEQ (WHO)	3.26E-03	1.25E-01	1.45E-03	6.58E-05	1.45E-05	5.68E-06

7. ANHANG

Versuch	Nur Nachbrennkammer mit MDF befeuert; ohne Rostfeuerung	H/AH (50/50)	H/HK/AH (60/20/20)	MDF/HK/AH (60/20/20)	MDF (100)	H/MDF/HK (60/20/20)
Laborlaufnummer	9811023	9811024	9811025	9811026	9811027	9811029
MCBz	1064.37	15479.78	936.07	374.28	406.26	746.10
1,3 -DiCBz	111.32	634.12	91.36	23.07	20.16	13.81
1,4 -DiCBz	465.76	1537.11	106.91	32.20	21.22	24.40
1,2 -DiCBz	412.57	727.17	36.73	79.68	7.31	7.95
1,3,5 -TriCBz	16.54	928.87	111.40	11.27	13.07	8.14
1,2,4 -TriCBz	29.15	468.53	64.96	23.02	8.21	8.35
1,2,3 -TriCBz	38.15	117.32	24.98	20.24	4.97	20.88
1,2,3,5 -TeCBz	29.32	568.99	58.57	18.64	8.27	5.56
1,2,4,5 -TeCBz	16.29	449.50	40.42	18.08	11.58	13.86
1,2,3,4 -TeCBz	26.01	393.30	48.60	16.32	5.62	3.18
PeCBz	20.29	116.92	31.53	17.49	6.19	13.51
HxCBz	6.66	36.72	34.54	10.86	4.90	6.18

Versuch	H/AH (50/50)	H/HK/AH (60/20/20)
Laborlaufnummer	9811024	9811025
2-MCPh	994.24	127.14
4-MCPh	843.23	13.06
2,6-DiCPh	91.25	2.34
2,4-DiCPh	232.32	61.10
3,4-DiCPh	7.71	0.45
2,4,6-TriCPh	42.19	5.67
2,3,6-TriCPh	2.55	1.00
2,3,5-TriCPh	19.70	1.69
2,4,5-TriCPh	23.30	8.95
2,3,4-TriCPh	50.22	8.00
3,4,5-TriCPh	3.51	0.26
2,3,5,6-TeCPh	22.85	1.48
2,3,4,6-TeCPh	34.76	3.70
2,3,4,5-TeCPh	29.05	8.18
PeCPh	40.24	14.34

7. ANHANG

Versuch	H/HK (80/20)	H/HK (60/40)	H/HK (80/20), II	MDF (100)	MDF/HK (80/20)	MDF (100)
Laborlaufnummer	9811030	9811031	9811032	9811033	9811034	9811035+9811036
1-MCDD	2.711	6.093	0.619	0.383	0.025	0.704
2-MCDD	2.736	3.752	0.367	0.181	0.006	0.718
1,3-DiCDD	0.356	0.285	0.409	0.143	0.002	0.006
2,7/2,3/2,8-DiCDD	0.670	1.212	0.724	0.136	0.003	0.375
1,4/1,7-DiCDD	0.723	0.842	0.213	0.046	0.001	0.405
1,8-DiCDD	0.603	0.371	0.216	0.066	0.000	0.338
1,6-DiCDD	0.126	0.199	0.130	0.033	0.000	0.045
1,2-DiCDD	0.295	0.448	0.183	0.053	0.001	0.165
1,9-DiCDD	0.081	0.873	0.117	0.001	0.007	0.014
1,3,7-TriCDD	0.228	1.325	0.203	0.110	0.002	0.128
1,3,8-TriCDD	0.267	1.761	0.108	0.108	0.002	0.149
1,3,6-TriCDD	0.235	0.716	0.165	0.070	0.002	0.131
1,2,4-TriCDD	0.016	0.195	0.047	0.041	n.n.	0.009
1,3,9/2,3,7-TriCDD	0.626	1.097	0.634	0.181	0.008	0.350
1,4,7-TriCDD	0.070	0.385	0.032	0.038	n.n.	0.006
1,2,3-TriCDD	0.136	0.396	0.120	0.085	n.n.	0.076
1,7,8-TriCDD	0.130	0.469	0.167	0.053	0.004	0.073
1,2,7-TriCDD	0.108	0.530	0.067	0.052	0.001	0.060
1,2,8-TriCDD	0.117	0.618	0.055	0.054	n.n.	0.066
1,4,6-TriCDD	0.196	0.132	0.136	0.052	0.000	0.110
1,2,6-TriCDD	0.110	0.188	0.091	0.046	n.n.	0.062
1,2,9-TriCDD	0.174	0.467	0.185	0.030	0.002	0.098
2,3,7,8-TCDD	0.006	n.n.	0.017	0.004	n.n.	n.n.
1,3,6,8-TCDD	1.456	2.658	0.943	0.384	0.227	0.623
1,3,7,9-TCDD	0.866	1.484	0.589	0.200	0.085	0.264
1,3,7,8-TCDD	0.081	0.095	0.122	0.034	0.005	0.034
1,3,6,9/1,2,4,7/1,2,4,8-TCDD	0.064	0.067	0.096	0.032	0.005	0.031
1,2,6,8-TCDD	0.041	0.041	0.052	0.015	n.n.	0.013
1,4,7,8-TCDD	0.006	n.n.	0.014	0.004	n.n.	n.n.
1,2,4,6/1,2,4,9-TCDD	0.019	0.025	0.033	0.009	n.n.	0.012
1,2,3,4/1,2,3,7/1,2,3,8-TCDD	0.046	0.053	0.076	0.023	0.004	0.028
1,2,3,6/1,2,7,9-TCDD	0.038	0.044	0.060	0.013	0.002	0.018
1,2,7,8/1,4,6,9-TCDD	0.009	0.007	0.033	0.005	n.n.	0.004
1,2,3,9-TCDD	0.006	0.006	0.008	0.004	n.n.	0.003
1,2,6,9-TCDD	0.005	0.007	0.011	0.003	n.n.	0.002
1,2,6,7-TCDD	n.n.	0.006	0.005	0.001	0.000	0.003
1,2,8,9-TCDD	n.n.	n.n.	0.003	0.001	n.n.	0.001
1,2,3,7,8-PeCDD	0.020	0.012	0.066	0.005	n.n.	0.013
1,2,4,6,8/1,2,4,7,9-PeCDD	0.366	0.652	0.489	0.106	0.029	0.229
1,2,3,6,8-PeCDD	0.257	0.476	0.394	0.077	0.022	0.188
1,2,4,7,8-PeCDD	0.022	0.018	0.065	0.011	n.n.	0.013
1,2,3,7,9-PeCDD	0.166	0.303	0.259	0.056	0.013	0.119
1,2,3,4,7/1,2,4,6,9-PeCDD	0.037	0.034	0.092	0.016	0.003	0.022
1,2,3,6,9-PeCDD	0.011	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.005
1,2,4,6,7-PeCDD	0.011	n.n.	0.017	n.n.	n.n.	0.004
1,2,4,8,9-PeCDD	0.011	0.006	0.021	n.n.	n.n.	0.004
1,2,3,4,6-PeCDD	0.009	0.008	0.014	0.003	0.000	0.005
1,2,3,6,7-PeCDD	0.012	0.008	0.028	n.n.	n.n.	0.006
1,2,3,8,9-PeCDD	0.013	0.007	0.028	0.005	n.n.	0.007
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.013	0.008	0.052	0.009	0.001	0.012
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.019	0.018	0.068	0.008	n.n.	0.049
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.014	0.010	0.056	0.008	0.001	0.021
1,2,3,4,6,8/1,2,4,6,7,9/1,2,4,6,8,9-HxCDD	0.260	0.482	0.715	0.125	0.027	0.500
1,2,3,6,7,9/1,2,3,6,8,9-HxCDD	0.065	0.068	0.237	0.037	0.003	0.121
1,2,3,4,6,9-HxCDD	0.005	n.n.	0.009	0.003	n.n.	0.003
1,2,3,4,6,7-HxCDD	0.016	n.n.	0.029	0.009	n.n.	0.009
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.062	0.051	0.241	0.036	0.002	0.253
1,2,3,4,6,7,9-HpCDD	0.058	0.047	0.201	0.025	0.002	0.207
OCDD	0.057	0.026	0.151	0.025	0.004	0.223

7. ANHANG

Versuch	H/HK (80/20)	H/HK (60/40)	H/HK (80/20), II	MDF (100)	MDF/HK (80/20)	MDF (100)
Laborlaufnummer	9811030	9811031	9811032	9811033	9811034	9811035+9811036
1-MCDF	2.748	0.291	13.410	0.716	0.013	2.131
3-MCDF	5.338	0.370	26.119	1.175	0.039	4.035
2-MCDF	7.116	0.432	98.401	1.338	0.040	4.316
4-MCDF	1.705	0.043	10.710	0.023	0.002	0.169
1,3-DiCDF	0.106	0.116	0.972	0.136	0.018	0.116
1,7-DiCDF	0.092	0.045	0.967	0.142	0.009	0.133
1,4-DiCDF	0.025	0.004	0.013	n.n.	0.012	0.025
1,8-DiCDF	0.062	0.072	1.204	0.147	0.005	0.114
1,6-DiCDF	0.142	0.013	0.342	0.046	n.n.	0.013
1,2-DiCDF	0.627	0.165	1.510	0.333	0.022	0.325
2,4-DiCDF	1.315	0.477	3.155	0.556	0.019	0.353
3,7-DiCDF	0.296	0.054	1.066	0.146	0.010	0.298
2,7-DiCDF	0.109	0.002	0.015	n.n.	n.n.	n.n.
2,3-DiCDF	0.411	0.071	1.763	0.207	0.020	0.336
2,8/3,6-DiCDF	1.266	0.183	2.098	0.450	0.032	0.339
2,6-DiCDF	0.582	0.108	1.138	0.161	0.017	0.367
1,9/3,4-DiCDF	1.023	0.093	2.202	0.168	0.019	0.380
4,6-DiCDF	0.486	0.169	2.019	0.155	0.021	0.113
1,3,7-TriCDF	0.190	0.030	0.456	0.066	0.004	0.064
1,3,8-TriCDF	0.211	0.033	0.498	0.053	0.007	0.039
1,3,6-TriCDF	0.358	0.023	0.372	0.024	0.004	0.025
1,3,4/1,4,8-TriCDF	0.480	0.045	0.514	0.077	0.008	0.094
1,2,4/1,6,7-TriCDF	0.112	0.087	0.848	0.082	0.016	0.061
1,7,8-TriCDF	0.092	0.033	0.654	0.076	0.028	0.010
1,2,3-TriCDF	0.145	0.122	0.790	0.118	0.009	0.037
1,2,7-TriCDF	0.192	0.048	1.001	0.089	0.016	0.024
1,2,9-TriCDF	0.012	0.020	0.222	0.005	0.005	0.055
1,3,9-TriCDF	0.156	0.009	0.097	0.002	0.006	n.n.
2,4,7-TriCDF	0.495	0.150	1.354	0.093	0.016	n.n.
1,2,6/1,2,8-TriCDF	0.406	0.057	0.972	0.101	0.019	0.097
2,4,8-TriCDF	0.627	0.024	0.258	0.029	0.013	n.n.
1,4,9-TriCDF	0.018	0.086	1.485	0.076	0.020	0.174
2,3,7-TriCDF	0.012	0.218	1.329	0.052	0.014	0.112
1,6,8/2,3,4/2,3,8-TriCDF	0.416	0.084	1.381	0.098	0.126	0.167
2,3,6/3,4,7-TriCDF	0.010	0.001	0.026	n.n.	n.n.	1.016
2,6,7-TriCDF	2.709	0.488	3.521	0.465	0.085	0.112
1,4,6/1,4,7-TriCDF	1.443	0.163	1.459	0.204	0.078	n.n.
3,4,6-TriCDF	0.443	0.218	1.069	0.076	0.040	n.n.
2,4,6-TriCDF	0.715	0.291	1.184	0.082	0.032	n.n.
2,3,7,8-TCDF	0.099	0.065	0.200	0.066	0.006	0.051
1,3,6,8-TCDF	0.341	0.197	0.552	0.187	0.017	0.133
1,3,7,8/1,3,7,9-TCDF	0.276	0.170	0.387	0.205	0.018	0.132
1,3,4,7-TCDF	0.110	0.066	0.205	0.083	0.006	0.049
1,4,6,8-TCDF	0.212	0.109	0.301	0.124	0.011	0.092
1,2,4,7/1,3,6,7-TCDF	0.165	0.112	0.307	0.110	0.010	0.082
1,3,4,8-TCDF	0.118	0.071	0.146	0.087	0.008	0.062
1,2,4,8/1,3,4,6-TCDF	0.146	0.087	0.210	0.101	0.016	0.072
1,2,4,6/1,2,6,8/1,2,3,7/1,4,7,8/1,3,6,9-TCDF	0.446	0.266	0.719	0.296	0.027	0.231
1,2,3,4/1,2,3,6/1,2,3,8/1,4,6,7/1,6,7,8/2,4,6,8-TCDF	0.537	0.321	0.922	0.325	0.032	0.249
1,3,4,9-TCDF	0.022	0.009	0.039	0.014	n.n.	0.008
1,2,7,8-TCDF	0.171	0.094	0.271	0.108	0.008	0.079
1,2,6,7-TCDF	0.110	0.058	0.172	0.082	0.005	0.068
1,2,7,9/1,4,6,9-TCDF	0.024	0.015	0.044	0.016	0.002	0.013
1,2,4,9/2,3,6,8-TCDF	0.296	0.187	0.600	0.177	0.014	0.132
2,4,6,7-TCDF	0.201	0.105	0.453	0.133	0.011	0.112
1,2,3,9/2,3,4,7-TCDF	0.215	0.111	0.480	0.143	0.011	0.119
1,2,6,9-TCDF	0.142	0.076	0.243	0.086	0.009	0.073
2,3,4,8-TCDF	0.119	0.060	0.177	0.079	0.007	0.059
2,3,4,6-TCDF	0.079	0.035	0.146	0.056	0.005	0.041
2,3,6,7-TCDF	0.120	0.064	0.258	0.089	0.008	0.068
3,4,6,7-TCDF	0.088	0.032	0.179	0.084	0.004	0.058

7. ANHANG

Versuch	H/HK (80/20)	H/HK (60/40)	H/HK (80/20), II	MDF (100)	MDF/HK (80/20)	MDF (100)
Laborlaufnummer	9811030	9811031	9811032	9811033	9811034	9811035+9811036
1,2,3,7,8/1,2,3,4,8-PeCDF	0.107	0.054	0.203	0.065	0.007	0.072
2,3,4,7,8-PeCDF	0.061	0.039	0.205	0.049	0.002	0.055
1,3,4,6,8-PeCDF	0.129	0.061	0.317	0.073	0.004	0.069
1,2,4,6,8-PeCDF	0.131	0.100	0.381	0.071	0.004	0.072
1,3,6,7,8-PeCDF	0.094	0.048	0.187	0.046	0.002	0.048
1,3,4,7,8-PeCDF	0.053	0.032	0.106	0.032	n.n.	0.030
1,3,4,7,9/1,2,3,6,8-PeCDF	0.129	0.078	0.317	0.071	0.005	0.067
1,2,4,7,8-PeCDF	0.094	0.057	0.236	0.047	0.003	0.047
1,2,4,7,9/1,3,4,6,7-PeCDF	0.105	0.051	0.244	0.058	0.003	0.059
1,2,4,6,7-PeCDF	0.061	0.028	0.151	0.040	0.002	0.040
1,2,3,4,7/1,4,6,7,8-PeCDF	0.103	0.046	0.180	0.049	n.n.	0.051
1,3,4,6,9-PeCDF	0.034	0.012	0.056	0.021	n.n.	0.018
1,2,3,4,6-PeCDF	0.022	n.n.	0.039	0.009	n.n.	0.009
1,2,3,7,9-PeCDF	0.023	0.011	0.048	0.009	n.n.	0.015
1,2,3,6,7-PeCDF	0.041	0.018	0.099	0.023	0.001	0.023
1,2,4,6,9/1,2,6,7,8-PeCDF	0.069	0.036	0.149	0.049	0.003	0.052
1,2,6,7,9-PeCDF	0.018	0.007	0.035	0.013	n.n.	0.013
1,2,3,6,9-PeCDF	0.024	0.005	0.034	0.012	n.n.	0.013
2,3,4,6,8-PeCDF	0.131	0.066	0.379	0.076	0.005	0.097
1,2,3,4,9-PeCDF	0.013	0.003	0.018	0.007	n.n.	0.006
1,2,4,8,9-PeCDF	0.033	0.013	0.064	0.020	0.001	0.021
1,2,3,8,9-PeCDF	0.019	0.005	0.036	0.011	n.n.	0.018
2,3,4,6,7-PeCDF	0.122	0.035	0.272	0.064	0.004	0.086
1,2,3,4,7,8/1,2,3,4,7,9-HxCDF	0.075	0.032	0.158	0.037	0.003	0.076
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.060	0.027	0.147	0.033	0.002	0.054
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.010	0.003	0.019	0.004	n.n.	0.015
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.048	0.016	0.134	0.028	0.002	0.072
1,2,3,4,6,8-HxCDF	0.072	0.034	0.185	0.031	0.003	0.074
1,3,4,6,7,8/1,3,4,6,7,9-HxCDF	0.086	0.047	0.227	0.042	0.002	0.080
1,2,4,6,7,8-HxCDF	0.085	0.042	0.247	0.037	0.003	0.093
1,2,4,6,7,9-HxCDF	0.045	0.023	0.113	0.022	0.001	0.081
1,2,4,6,8,9-HxCDF	0.016	0.007	0.046	0.007	0.001	0.043
1,2,3,4,6,7-HxCDF	0.056	0.016	0.105	0.020	0.001	0.044
1,2,3,6,7,9-HxCDF	0.027	0.010	0.059	0.012	0.001	0.033
1,2,3,4,6,9/1,2,3,6,8,9-HxCDF	0.036	0.010	0.068	0.014	0.000	0.044
1,2,3,4,8,9-HxCDF	0.015	0.003	0.019	0.005	n.n.	0.020
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.077	0.033	0.166	0.036	0.003	0.160
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.033	0.006	0.034	0.010	0.001	0.107
1,2,3,4,6,7,9-HpCDF	0.040	0.011	0.062	0.017	0.001	0.155
1,2,3,4,6,8,9-HpCDF	0.024	0.009	0.047	0.011	0.001	0.204
OCDF	0.027	0.011	0.050	0.011	0.005	0.433
I-TEQ (NATO/CCMS)	0.097	0.047	0.250	0.055	0.003	0.078
I-TEQ (PCDD nach NATO/CCMS)	0.021	0.010	0.070	0.010	0.000	0.017
I-TEQ (PCDF nach NATO/CCMS)	0.076	0.037	0.181	0.045	0.003	0.061
I-TEQ (WHO)	0.107	0.053	0.283	0.057	0.003	0.084
I-TEQ (PCDD nach WHO)	0.031	0.016	0.103	0.012	0.000	0.023
I-TEQ (PCDF nach WHO)	0.076	0.037	0.181	0.045	0.003	0.061

7. ANHANG

Versuch	H/HK (80/20)	H/HK (60/40)	H/HK (80/20), II	MDF (100)	MDF/HK (80/20)	MDF (100)
Laborlaufnummer	9811030	9811031	9811032	9811033	9811034	9811035+9811036
#2	0.785	3.843	2.019	0.380	0.526	0.260
#3	0.649	3.108	1.853	0.327	0.433	0.240
#6	0.080	0.104	0.204	0.061	0.058	n.n.
#5,#8	0.202	0.309	1.069	0.222	0.198	n.n.
#11	0.166	0.192	0.496	0.143	0.188	n.n.
#13	0.322	0.427	0.419	0.144	0.111	n.n.
#15	0.066	0.186	0.131	0.067	0.097	0.279
#19	n.n.	0.002	n.n.	0.007	n.n.	n.n.
#18	0.054	0.103	0.418	0.175	0.114	0.335
#17	0.016	0.037	n.n.	0.053	0.038	0.113
#24	n.n.	0.010	0.015	0.009	0.007	0.022
#32	0.007	0.019	0.056	0.023	0.025	0.087
#16	n.n.	0.022	0.073	0.043	0.025	0.106
#28,#31	0.247	0.238	0.645	0.289	0.210	0.947
#33	0.102	0.117	0.262	0.114	0.083	0.272
#22	0.016	0.037	0.055	0.039	0.032	0.090
#53	n.n.	0.003	n.n.	0.007	0.009	0.034
#51	0.001	0.003	n.n.	0.010	0.012	0.019
#45	n.n.	0.003	n.n.	0.007	n.n.	0.024
#46	n.n.	n.n.	n.n.	0.003	n.n.	0.006
#52	0.059	0.111	0.716	0.139	0.118	0.500
#49	n.n.	0.039	0.080	0.059	0.039	0.150
#47,#48	0.042	0.046	0.076	0.091	0.066	0.112
#44	0.014	0.032	0.068	0.042	0.035	0.152
#42	n.n.	0.004	0.010	0.010	0.007	0.036
#64	0.004	0.006	n.n.	0.013	0.011	0.051
#71,#41	0.004	0.022	0.029	0.027	0.024	0.086
#40	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.012
#67	n.n.	0.006	0.018	0.011	n.n.	n.n.
#63	n.n.	n.n.	0.018	0.011	n.n.	n.n.
#74	0.021	0.046	0.084	0.055	0.027	0.103
#70,#76	0.072	0.097	0.200	0.122	0.093	0.263
#66	0.059	0.081	0.147	0.098	0.046	0.160
#60,#56	0.017	0.037	0.065	0.035	0.016	0.061
#81	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#77	0.006	0.018	0.036	0.020	n.n.	0.015
#100	n.n.	n.n.	0.005	n.n.	n.n.	n.n.
#95,#102	0.022	0.045	0.088	0.049	0.037	0.113
#91	n.n.	n.n.	n.n.	0.005	n.n.	0.014
#84,#92	n.n.	0.002	n.n.	0.008	0.009	0.045
#101	0.053	0.071	0.122	0.095	0.074	0.170
#99	n.n.	n.n.	0.032	0.016	0.005	0.035
#119,#83,#86,#97, #87,#115,#85	0.009	n.n.	0.071	0.015	0.010	0.078
#87,#115,#85	0.006	n.n.	0.035	0.005	0.010	0.052
#110	0.038	0.056	0.125	0.069	0.045	0.124
#82	0.001	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#107,#123,#124	n.n.	n.n.	n.n.	0.022	n.n.	n.n.
#118	0.046	0.052	0.101	0.076	0.038	0.081
#114,#122	n.n.	0.001	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#105	n.n.	0.017	0.030	0.022	0.006	0.027
#126	n.n.	0.002	n.n.	0.010	0.001	0.008

7. ANHANG

Versuch	H/HK (80/20)	H/HK (60/40)	H/HK (80/20), II	MDF (100)	MDF/HK (80/20)	MDF (100)
Laborlaufnummer	9811030	9811031	9811032	9811033	9811034	9811035+9811036
#136	n.n.	0.004	0.015	0.006	0.005	0.014
#151	0.004	0.008	0.014	0.024	0.008	0.030
#135,#144,#147	n.n.	0.008	0.022	0.012	n.n.	0.016
#149	0.038	0.057	0.153	0.083	0.049	0.092
#134	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.002
#131	n.n.	0.002	0.015	0.005	n.n.	0.002
#132,#146	n.n.	0.013	0.034	0.023	0.007	0.014
#153	0.086	0.126	0.217	0.126	0.084	0.181
#141	0.006	0.019	0.010	0.019	0.006	0.024
#137	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.002
#130	n.n.	n.n.	n.n.	0.005	n.n.	0.003
#160,#163	0.018	0.034	0.093	0.049	0.021	0.038
#138	0.052	0.110	0.124	0.107	0.063	0.133
#129,#158	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.001
#167	n.n.	0.006	0.004	0.007	n.n.	0.005
#128,#159	n.n.	0.005	0.009	0.009	n.n.	0.010
#156	n.n.	0.015	0.013	0.013	0.003	0.019
#157	n.n.	0.001	0.004	0.005	n.n.	0.002
#169	n.n.	3.52E-04	0.001	n.n.	n.n.	0.004
#179	0.006	0.009	0.053	0.015	0.003	0.012
#176	0.006	0.018	0.131	0.015	0.004	0.005
#178	0.003	0.005	0.014	0.009	0.002	0.002
#175	0.005	0.006	0.036	0.011	0.001	n.n.
#187	0.026	0.061	0.128	0.057	0.015	0.057
#183	0.016	0.025	0.099	0.040	n.n.	0.020
#185	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#174	0.010	0.041	0.052	0.031	0.008	0.032
#177	0.003	0.019	n.n.	0.019	0.003	0.014
#171	0.004	0.009	0.041	0.011	0.002	0.009
#173	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#172	n.n.	0.007	0.010	0.009	0.002	0.006
#180, #193	0.044	0.148	0.128	0.091	0.035	0.126
#191	0.003	0.005	0.032	0.010	0.001	n.n.
#170	0.016	0.086	0.046	0.052	0.013	0.077
#190	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#189	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	1.85E-04
#202	0.002	0.003	0.018	0.004	n.n.	0.001
#200	n.n.	0.004	0.137	0.014	n.n.	0.003
#199	0.004	0.007	0.025	0.010	0.004	0.007
#198	n.n.	n.n.	n.n.	0.003	n.n.	n.n.
#201	0.007	0.010	0.159	0.019	n.n.	0.003
#203,#196	0.015	0.014	0.119	0.027	0.004	0.013
#195	n.n.	0.002	0.007	0.004	0.001	0.004
#194	n.n.	0.002	0.007	0.005	0.002	0.011
#205	n.n.	0.001	0.005	n.n.	n.n.	0.002
#208	n.n.	n.n.	0.073	0.008	0.006	0.008
#207	n.n.	n.n.	0.120	n.n.	n.n.	0.012
#206	n.n.	n.n.	0.053	n.n.	n.n.	0.017
#209	n.n.	n.n.	0.025	n.n.	0.019	0.016
TEQ (nach Safe)	1.45E-04	5.92E-04	7.25E-04	1.45E-03	1.89E-04	1.39E-03
TEQ (WHO)	9.64E-06	2.48E-04	5.76E-05	1.05E-03	1.05E-04	8.32E-04

7. ANHANG

Versuch	H/HK (80/20)	H/HK (60/40)	H/HK (80/20), II	MDF (100)	MDF/HK (80/20)
Laborlaufnummer	9811030	9811031	9811032	9811033	9811034
MCBz	1191.64	967.75	3057.35	646.70	434.00
1,3 -DiCBz	68.76	4.82	211.55	11.56	12.94
1,4 -DiCBz	26.00	13.62	430.14	18.97	16.73
1,2 -DiCBz	16.32	2.19	111.45	16.96	4.58
1,3,5 -TriCBz	38.96	2.81	40.86	23.81	0.50
1,2,4 -TriCBz	57.14	2.92	81.71	2.14	2.63
1,2,3 -TriCBz	144.23	10.48	211.77	23.23	4.18
1,2,3,5 -TeCBz	20.24	2.61	110.85	7.53	1.76
1,2,4,5 -TeCBz	73.55	40.80	213.24	10.08	2.18
1,2,3,4 -TeCBz	15.59	2.76	49.88	7.74	1.74
PeCBz	22.25	15.46	39.37	16.39	6.91
HxCBz	17.30	6.75	54.25	7.84	3.44

Versuch	H/HK (80/20), II	MDF (100)	MDF/HK (80/20)	MDF (100)
Laborlaufnummer	9811032	9811033	9811034	9811035+9811036
2-MCPh	270.07	76.13	213.39	105.69
4-MCPh	223.87	110.01	34.30	150.32
2,6-DiCPh	10.04	3.56	5.59	5.58
2,4-DiCPh	141.03	76.20	48.59	71.25
3,4-DiCPh	1.16	5.12	3.67	4.57
2,4,6-TriCPh	21.41	3.63	2.46	5.00
2,3,6-TriCPh	1.02	1.82	2.25	2.51
2,3,5-TriCPh	5.35	1.18	9.79	4.47
2,4,5-TriCPh	26.53	8.98	8.70	15.18
2,3,4-TriCPh	17.73	17.12	5.70	20.69
3,4,5-TriCPh	0.31	0.12	2.11	0.63
2,3,5,6-TeCPh	8.11	1.89	5.00	8.98
2,3,4,6-TeCPh	12.33	5.09	n.n.	13.34
2,3,4,5-TeCPh	12.11	6.66	28.28	12.24
PeCPh	29.35	10.63	11.44	17.67

7. ANHANG

MVA:

Probenahmen bei 1100, 800, 600 und 400°C:

Temperatur	600°C	600°C	600°C	600°C	400°C	400°C	400°C
Versuch	CO-Spitzen, Memory Phase I	CO-Spitzen, Memory Phase III	CO-Spitzen	CO-Spitzen, Memory Phase II	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb
Laborlaufnummer	9911022	9911023	9911024	9911025	9911054	9911061	9911018
1-MCDD	0.430	0.314	35.513	1.458	0.020	0.215	0.349
2-MCDD	0.400	0.089	10.090	0.591	0.001	0.087	0.087
1,3-DiCDD	1.666	0.160	18.531	1.075	0.049	0.164	0.086
2,7/2,3/2,8-DiCDD	2.935	0.357	22.218	3.318	0.378	0.198	0.350
1,4/1,7-DiCDD	1.045	0.165	6.725	1.210	0.126	0.080	0.107
1,8-DiCDD	1.178	0.176	7.970	1.258	0.130	0.088	0.107
1,6-DiCDD	0.172	0.011	0.777	0.181	0.017	0.010	0.017
1,2-DiCDD	0.396	0.028	1.658	0.456	0.054	0.035	0.048
1,9-DiCDD	0.097	0.014	0.830	0.213	0.020	0.011	0.020
1,3,7-TriCDD	4.200	0.369	15.382	2.994	0.269	0.147	0.146
1,3,8-TriCDD	4.725	0.394	18.888	3.286	0.267	0.162	0.157
1,3,6-TriCDD	1.087	0.075	3.739	0.781	0.063	0.037	0.039
1,2,4-TriCDD	0.297	0.012	0.675	0.242	0.021	0.014	0.015
1,3,9/2,3,7-TriCDD	5.123	0.508	5.904	3.842	0.728	0.231	0.317
1,4,7-TriCDD	0.888	0.081	1.075	0.750	0.089	0.036	0.054
1,2,3-TriCDD	0.493	0.047	0.845	0.370	0.024	0.020	0.018
1,7,8-TriCDD	1.102	0.098	0.859	0.549	0.118	0.047	0.090
1,2,7-TriCDD	2.280	0.207	2.037	1.715	0.195	0.079	0.124
1,2,8-TriCDD	2.247	0.187	1.737	1.684	0.268	0.067	0.112
1,4,6-TriCDD	0.555	0.023	0.221	0.505	0.046	0.015	0.029
1,2,6-TriCDD	0.662	0.055	0.279	0.488	0.066	0.021	0.032
1,2,9-TriCDD	0.884	0.062	1.082	0.643	0.083	0.030	0.037
2,3,7,8-TCDD	1.591	0.135	2.367	1.385	0.404	0.090	0.139
1,3,6,8-TCDD	3.282	0.219	20.860	4.332	0.171	0.118	0.092
1,3,7,9-TCDD	2.777	0.172	11.680	3.338	0.248	0.107	0.107
1,3,7,8-TCDD	3.934	0.297	7.536	3.957	0.832	0.218	0.301
1,3,6,9/1,2,4,7/1,2,4,8-TCDD	2.204	0.180	3.585	2.469	0.373	0.141	0.132
1,2,6,8-TCDD	1.294	0.113	1.992	1.325	0.228	0.071	0.090
1,4,7,8-TCDD	0.728	0.068	0.966	0.723	0.128	0.036	0.052
1,2,4,6/1,2,4,9-TCDD	1.339	0.117	2.442	1.320	0.211	0.075	0.097
1,2,3,4/1,2,3,7/1,2,3,8-TCDD	1.857	0.170	3.649	1.971	0.275	0.090	0.122
1,2,3,6/1,2,7,9-TCDD	2.149	0.229	3.390	2.202	0.363	0.133	0.151
1,2,7,8/1,4,6,9-TCDD	2.321	0.185	3.149	2.015	0.323	0.136	0.179
1,2,3,9-TCDD	0.503	0.053	0.694	0.477	0.059	0.032	0.033
1,2,6,9-TCDD	0.722	0.066	0.835	0.682	0.062	0.038	0.044
1,2,6,7-TCDD	0.453	0.040	0.519	0.364	0.059	0.024	0.028
1,2,8,9-TCDD	0.534	0.044	0.611	0.446	0.074	0.029	0.033
1,2,3,7,8-PeCDD	7.645	0.664	4.724	4.737	0.584	0.331	0.315
1,2,4,6,8/1,2,4,7,9-PeCDD	7.180	0.616	6.806	5.497	0.580	0.274	0.287
1,2,3,6,8-PeCDD	4.798	0.462	7.088	3.642	0.338	0.174	0.164
1,2,4,7,8-PeCDD	6.087	0.450	4.259	3.896	0.589	0.258	0.275
1,2,3,7,9-PeCDD	5.818	0.482	5.621	4.325	0.381	0.238	0.227
1,2,3,4,7/1,2,4,6,9-PeCDD	2.371	0.186	1.793	1.699	0.137	0.091	0.129
1,2,3,6,9-PeCDD	2.169	0.185	1.221	1.457	0.146	0.075	0.078
1,2,4,6,7-PeCDD	2.855	0.264	1.952	1.860	0.170	0.095	0.105
1,2,4,8,9-PeCDD	2.773	0.275	1.791	1.820	0.166	0.106	0.100
1,2,3,4,6-PeCDD	1.312	0.178	0.837	0.845	0.046	0.042	0.037
1,2,3,6,7-PeCDD	6.225	0.586	2.766	3.501	0.430	0.168	0.175
1,2,3,8,9-PeCDD	8.191	0.639	4.898	4.681	0.461	0.195	0.217
1,2,3,4,7,8-HxCDD	4.910	0.815	1.517	2.200	0.134	0.283	0.137
1,2,3,6,7,8-HxCDD	5.946	1.121	1.797	2.706	0.163	0.279	0.160
1,2,3,7,8,9-HxCDD	9.018	1.197	2.702	4.080	0.245	0.340	0.272
1,2,3,4,6,8/1,2,4,6,7,9/1,2,4,6,8,9-HxCDD	10.593	2.169	11.410	5.645	0.226	0.524	0.503
1,2,3,6,7,9/1,2,3,6,8,9-HxCDD	13.873	2.393	5.324	6.890	0.414	0.698	0.441
1,2,3,4,6,9-HxCDD	2.122	0.383	0.588	1.130	0.085	0.102	0.057
1,2,3,4,6,7-HxCDD	6.220	1.108	1.541	2.742	0.126	0.229	0.172
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	34.897	12.554	6.508	12.015	0.784	2.158	0.705
1,2,3,4,6,7,9-HpCDD	36.206	10.969	4.699	9.015	0.715	2.057	0.668
OCDD	61.951	34.401	13.820	18.419	2.581	5.306	1.069

7. ANHANG

Temperatur	600°C	600°C	600°C	600°C	400°C	400°C	400°C
Versuch	CO-Spitzen, Memory Phase I	CO-Spitzen, Memory Phase III	CO-Spitzen	CO-Spitzen, Memory Phase II	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb
Laborlaufnummer	9911022	9911023	9911024	9911025	9911054	9911061	9911018
1-MCDF	23.419	3.987	804.360	58.743	1.986	4.839	5.087
3-MCDF	66.556	10.860	1893.059	160.737	6.013	8.916	13.786
2-MCDF	74.038	11.485	2003.632	195.998	3.408	9.771	10.017
4-MCDF	2.425	0.487	34.106	10.137	0.231	2.136	0.358
1,3-DiCDF	5.849	1.283	47.203	15.258	1.870	1.019	1.529
1,7-DiCDF	5.898	1.188	41.624	17.254	3.583	1.365	2.599
1,4-DiCDF	0.059	0.005	0.254	0.223	0.152	0.011	0.007
1,8-DiCDF	7.895	1.374	50.502	19.663	4.398	1.292	2.511
1,6-DiCDF	0.510	0.013	6.778	2.730	0.277	0.369	0.208
1,2-DiCDF	9.377	1.757	44.680	20.856	1.394	0.716	1.043
2,4-DiCDF	20.813	1.115	162.863	48.783	1.276	1.114	1.053
3,7-DiCDF	9.442	1.834	45.582	21.475	10.894	1.188	2.635
2,7-DiCDF	0.109	0.002	0.422	0.254	0.190	0.018	0.004
2,3-DiCDF	13.311	2.211	73.251	28.691	6.798	1.627	3.179
2,8/3,6-DiCDF	21.046	3.431	83.139	41.962	3.076	1.095	2.063
2,6-DiCDF	9.852	1.808	13.503	23.780	4.908	0.957	1.896
1,9/3,4-DiCDF	6.744	1.286	33.978	13.193	2.053	0.812	1.138
4,8-DiCDF	8.049	1.015	43.140	20.414	1.993	0.823	1.000
1,3,7-TriCDF	11.342	1.795	32.247	37.740	6.920	1.330	2.318
1,3,8-TriCDF	8.994	1.413	21.781	29.358	5.690	0.985	1.916
1,3,6-TriCDF	4.286	0.597	10.109	13.834	1.743	0.337	0.687
1,3,4/1,4,8-TriCDF	4.971	1.012	10.818	13.967	1.944	0.508	0.744
1,2,4/1,6,7-TriCDF	5.270	0.252	15.874	22.604	1.412	0.640	0.586
1,7,8-TriCDF	8.650	1.281	23.122	24.684	4.334	0.967	1.521
1,2,3-TriCDF	10.088	2.566	12.062	17.799	0.553	0.257	0.279
1,2,7-TriCDF	8.359	1.194	20.550	24.150	3.632	0.729	1.241
1,2,9-TriCDF	2.723	0.409	5.442	7.570	0.822	0.187	0.338
1,3,9-TriCDF	0.853	0.071	3.597	4.732	0.303	0.235	0.117
2,4,7-TriCDF	11.735	1.718	20.391	25.402	4.259	0.888	1.201
1,2,6/1,2,8-TriCDF	8.403	1.090	18.693	21.289	3.016	0.569	1.087
2,4,8-TriCDF	2.908	0.239	6.997	9.705	0.676	0.231	0.280
1,4,9-TriCDF	10.803	1.394	16.344	19.773	1.669	0.565	0.879
2,3,7-TriCDF	12.503	2.325	4.657	24.119	1.310	0.416	0.585
1,6,8/2,3,4/2,3,6-TriCDF	16.839	2.129	36.064	34.169	8.993	1.075	2.280
2,3,6/3,4,7-TriCDF	0.255	0.019	0.173	0.372	0.028	0.006	0.009
2,6,7-TriCDF	36.872	7.674	44.509	58.904	4.777	1.040	1.748
1,4,6/1,4,7-TriCDF	27.888	4.476	38.392	55.377	9.382	0.868	1.742
3,4,6-TriCDF	9.939	1.387	14.532	17.593	2.422	0.524	0.879
2,4,6-TriCDF	19.342	3.669	16.413	29.758	2.353	0.501	0.875
2,3,7,8-TCDF	6.785	0.674	11.983	6.689	3.155	0.568	0.862
1,3,6,8-TCDF	5.170	0.623	12.947	9.297	3.860	0.852	1.239
1,3,7,8/1,3,7,9-TCDF	16.359	1.783	37.128	24.909	14.250	2.034	3.573
1,3,4,7-TCDF	6.754	0.520	4.173	10.447	3.851	0.709	1.056
1,4,6,8-TCDF	5.298	0.674	11.500	8.073	2.912	0.555	0.917
1,2,4,7/1,3,6,7-TCDF	9.508	1.017	41.096	14.596	5.476	0.928	1.502
1,3,4,8-TCDF	5.520	0.612	14.961	8.159	3.287	0.547	0.888
1,2,4,8/1,3,4,6-TCDF	5.269	0.742	11.932	7.382	2.165	0.471	0.672
1,2,4,6/1,2,6,8/1,2,3,7/1,4,7,8/1,3,6,9-TCDF	20.077	2.807	27.435	13.459	9.912	1.573	3.270
1,2,3,4/1,2,3,6/1,2,3,8/1,4,6,7/1,6,7,8/2,4,8,8-TCDF	25.279	4.196	45.851	29.393	7.815	1.859	1.781
1,3,4,9-TCDF	1.158	0.225	2.174	1.348	0.526	0.081	0.154
1,2,7,8-TCDF	9.306	1.006	22.273	12.572	5.007	0.709	1.318
1,2,6,7-TCDF	7.156	0.766	14.961	8.961	3.045	0.613	0.711
1,2,7,9/1,4,6,9-TCDF	1.521	0.409	2.418	1.436	3.551	0.748	0.114
1,2,4,9/2,3,6,8-TCDF	9.280	1.087	18.856	10.103	0.055	0.020	0.987
2,4,6,7-TCDF	11.434	2.199	19.287	11.165	1.830	0.778	0.815
1,2,3,9/2,3,4,7-TCDF	12.494	2.429	20.898	12.134	2.095	0.949	0.933
1,2,8,9-TCDF	8.246	1.489	12.918	7.717	2.730	0.649	0.728
2,3,4,8-TCDF	6.785	1.226	8.840	5.735	0.921	0.514	0.863
2,3,4,6-TCDF	11.231	2.759	7.497	9.114	0.812	0.561	0.445
2,3,6,7-TCDF	13.974	1.931	22.916	12.575	5.013	1.043	1.294
3,4,6,7-TCDF	12.337	3.117	8.269	9.815	3.898	0.941	0.982

7. ANHANG

Temperatur	600°C	600°C	600°C	600°C	400°C	400°C	400°C
Versuch	CO-Spitzen, Memory Phase I	CO-Spitzen, Memory Phase III	CO-Spitzen	CO-Spitzen, Memory Phase II	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb
Laborlaufnummer	9911022	9911023	9911024	9911025	9911054	9911061	9911018
1,2,3,7,8/1,2,3,4,8-PeCDF	23.732	2.521	24.665	19.401	4.963	1.222	1.831
2,3,4,7,8-PeCDF	16.991	2.422	14.119	10.357	1.739	1.136	1.124
1,3,4,6,8-PeCDF	9.854	1.241	12.018	10.118	2.134	0.823	1.009
1,2,4,6,8-PeCDF	9.071	1.198	10.263	8.814	1.927	0.750	0.775
1,3,6,7,8-PeCDF	10.372	1.026	14.564	10.069	3.217	0.974	1.160
1,3,4,7,8-PeCDF	2.126	0.224	3.366	2.110	0.911	0.231	0.323
1,3,4,7,9/1,2,3,6,8-PeCDF	17.392	1.809	25.168	16.797	4.236	1.660	1.846
1,2,4,7,8-PeCDF	12.055	1.059	16.982	11.479	2.433	0.948	1.074
1,2,4,7,9/1,3,4,6,7-PeCDF	12.121	1.641	14.845	10.575	2.002	1.122	0.997
1,2,4,6,7-PeCDF	9.745	1.369	11.215	8.406	1.186	0.731	0.856
1,2,3,4,7/1,4,6,7,8-PeCDF	11.681	1.625	13.036	10.136	1.735	0.987	0.798
1,3,4,6,9-PeCDF	1.878	0.351	1.556	1.587	0.381	0.212	0.187
1,2,3,4,6-PeCDF	4.531	1.208	3.617	3.442	0.202	0.309	0.204
1,2,3,7,9-PeCDF	1.288	0.149	2.253	1.185	0.791	0.159	0.196
1,2,3,6,7-PeCDF	9.448	1.175	8.349	7.705	1.400	0.612	0.857
1,2,4,6,9/1,2,6,7,8-PeCDF	9.229	1.586	10.059	7.761	1.455	0.795	0.713
1,2,6,7,9-PeCDF	2.185	0.301	2.239	1.525	0.504	0.149	0.135
1,2,3,6,9-PeCDF	1.739	0.256	1.956	1.299	0.496	0.131	0.189
2,3,4,6,8-PeCDF	15.074	3.212	14.127	10.113	1.381	0.916	0.829
1,2,3,4,9-PeCDF	2.508	0.811	2.047	1.576	0.102	0.112	0.071
1,2,4,8,9-PeCDF	2.458	0.520	2.489	1.749	0.415	0.168	0.182
1,2,3,8,9-PeCDF	1.637	0.244	2.724	1.123	0.272	0.122	0.145
2,3,4,6,7-PeCDF	29.317	8.123	22.130	15.832	1.570	2.234	1.521
1,2,3,4,7,8/1,2,3,4,7,9-HxCDF	35.769	5.318	22.233	21.761	2.836	3.173	2.082
1,2,3,6,7,8-HxCDF	40.055	5.778	19.116	23.769	2.486	2.943	2.197
1,2,3,7,8,9-HxCDF	2.012	0.361	1.102	1.073	0.167	0.207	0.172
2,3,4,6,7,8-HxCDF	30.956	9.756	11.684	13.967	0.990	2.986	1.279
1,2,3,4,6,8-HxCDF	23.919	6.233	11.694	14.531	1.680	2.564	1.380
1,3,4,6,7,8/1,3,4,6,7,9-HxCDF	57.529	9.405	23.625	32.517	4.446	5.211	3.221
1,2,4,6,7,8-HxCDF	47.782	8.829	25.175	26.655	3.105	3.958	2.358
1,2,4,6,7,9-HxCDF	8.532	1.898	3.713	4.611	0.821	0.833	0.499
1,2,4,6,8,9-HxCDF	38.039	0.933	11.824	3.896	0.230	0.355	n.n.
1,2,3,4,6,7-HxCDF	38.040	9.458	11.824	19.594	1.529	3.503	1.537
1,2,3,6,7,9-HxCDF	6.250	0.959	4.342	3.610	0.729	0.661	0.438
1,2,3,4,6,9/1,2,3,6,8,9-HxCDF	7.929	2.364	2.892	4.345	0.360	0.642	0.360
1,2,3,4,8,9-HxCDF	4.509	1.252	1.777	2.270	0.148	0.307	0.207
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	132.797	42.484	36.824	61.954	3.748	17.531	5.911
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	14.165	4.863	4.987	6.048	0.518	1.935	0.686
1,2,3,4,6,7,9-HpCDF	28.552	9.300	7.578	11.280	0.930	3.520	1.206
1,2,3,4,6,8,9-HpCDF	12.349	7.292	7.510	5.225	0.677	3.314	0.684
OCDF	54.913	31.307	29.128	17.508	4.223	11.066	1.841
I-TEQ (NATO/CCMS)	30.576	4.971	20.761	18.360	2.888	2.191	1.742
I-TEQ (PCDD nach NATO/CCMS)	7.812	0.940	5.409	4.788	0.761	0.371	0.362
I-TEQ (PCDF nach NATO/CCMS)	22.765	4.031	15.352	13.572	2.128	1.820	1.381
I-TEQ (WHO)	34.294	5.244	23.085	20.697	3.174	2.342	1.897
I-TEQ (PCDD nach WHO)	11.578	1.241	7.759	7.141	1.050	0.531	0.518
I-TEQ (PCDF nach WHO)	22.715	4.003	15.326	13.556	2.124	1.811	1.379

7. ANHANG

Temperatur	600°C	600°C	600°C	600°C	400°C	400°C	400°C
Versuch	CO-Spitzen, Memory Phase I	CO-Spitzen, Memory Phase III	CO-Spitzen	CO-Spitzen, Memory Phase II	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb
Laborlaufnummer	9911022	9911023	9911024	9911025	9911054	9911061	9911016
#1	46.130	0.720	32.582	2.058	0.213	n.n.	47.617
#2	29.580	1.932	71.192	7.522	0.184	0.683	8.414
#3	29.580	1.008	30.556	3.986	2.892	1.531	5.804
#4/10	3.089	0.152	1.601	0.530	3.547	0.184	18.172
#7/9	9.088	0.144	8.194	0.478	0.210	0.087	n.n.
#6	12.537	0.130	4.950	0.551	0.914	0.084	4.059
#5/8	10.823	0.590	4.766	1.748	5.147	0.592	48.474
#14	7.976	0.155	9.271	0.604	n.n.	0.078	n.n.
#11	13.370	0.419	6.158	0.818	0.587	0.405	1.476
#12	18.912	0.428	13.341	2.216	0.268	0.136	10.254
#13	12.695	0.307	5.594	1.079	1.151	0.137	10.224
#15	3.287	0.202	1.959	0.484	2.826	0.148	6.549
#19	0.071	0.024	0.151	0.154	0.642	n.n.	1.964
#30	0.011	n.n.	0.395	n.n.	0.043	n.n.	n.n.
#18	2.459	0.885	2.974	3.223	4.139	0.430	47.393
#17	0.842	0.222	0.916	0.821	4.139	0.088	11.305
#24/27	0.179	0.039	0.368	0.147	0.394	0.019	1.191
#16	1.712	0.310	1.593	1.314	2.271	0.071	16.434
#32	0.963	0.402	1.096	1.228	3.118	0.085	18.395
#23/34	0.858	0.031	1.210	0.170	n.n.	0.017	n.n.
#29	0.798	0.051	1.531	0.342	n.n.	0.015	n.n.
#26	1.257	0.178	1.038	0.602	1.681	0.067	4.576
#25	1.443	0.051	0.918	0.275	0.446	0.033	0.658
#28/31	7.488	2.454	9.063	9.595	15.746	0.771	116.188
#21	25.188	0.120	5.931	0.436	0.098	n.n.	0.407
#20/30	6.830	0.801	4.302	3.186	4.039	0.200	34.483
#22	2.048	0.476	1.545	1.525	2.552	0.081	23.483
#36	1.581	0.028	1.105	0.186	n.n.	0.025	n.n.
#39	2.227	0.350	2.644	0.103	0.442	0.065	3.331
#35	4.264	0.112	2.652	0.804	0.393	0.012	3.399
#37	2.418	0.248	1.351	0.690	0.785	0.022	2.476
#54	0.006	0.006	0.029	0.001	0.023	0.004	0.008
#50	0.010	0.009	0.069	0.018	0.007	0.004	0.008
#53	1.250	0.466	1.588	1.976	1.351	0.192	3.357
#51	0.245	0.127	0.475	0.536	0.318	0.035	0.649
#45	1.330	0.444	1.385	1.796	1.306	0.121	3.860
#46	0.545	0.167	0.560	0.673	0.411	0.020	1.338
#69	0.544	0.166	0.047	0.672	0.412	0.020	1.339
#73	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#43/52	7.451	2.534	9.867	10.542	2.816	0.559	8.248
#49	3.140	1.083	4.762	5.739	2.889	0.557	8.656
#47/48/62/65/75	2.043	0.640	2.833	3.156	2.562	0.333	4.510
#44	4.948	1.545	5.849	7.270	3.610	0.524	13.309
#59	0.668	0.201	0.811	0.765	3.609	0.524	1.078
#42	1.723	0.464	1.858	2.025	1.123	0.165	3.281
#41/71/72	1.567	0.554	2.002	2.592	1.421	0.208	4.036
#64/68	1.830	0.902	3.534	4.378	2.258	0.338	6.454
#40	2.911	0.510	2.209	2.336	0.807	n.n.	2.552
#57	1.387	0.052	0.646	0.353	0.076	0.038	n.n.
#67	1.296	0.096	0.813	0.465	0.257	0.042	0.096
#63	1.002	0.171	1.259	0.749	0.233	n.n.	0.223
#74	2.659	0.919	3.064	3.299	2.672	0.277	5.002

7. ANHANG

Temperatur	600°C	600°C	600°C	600°C	400°C	400°C	400°C
Versuch	CO-Spitzen, Memory Phase I	CO-Spitzen, Memory Phase III	CO-Spitzen	CO-Spitzen, Memory Phase II	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb
Laborlaufnummer	9911022	9911023	9911024	9911025	9911054	9911061	9911018
#76	0.976	0.123	0.833	0.540	2.679	0.278	0.105
#70	5.960	2.056	7.073	7.855	5.343	0.457	12.108
#66/80	5.236	1.432	5.667	5.685	3.779	0.369	7.967
#55	1.895	0.099	0.839	0.611	n.n.	n.n.	n.n.
#56/60	4.827	0.882	3.099	3.338	1.878	0.145	4.156
#79	2.663	0.122	1.507	0.222	0.162	0.047	0.031
#78	1.867	0.189	1.210	0.772	0.012	0.023	0.017
#81	1.084	0.255	0.691	0.552	0.011	0.018	0.049
#77	4.140	0.412	2.923	1.978	0.347	0.106	0.404
#104	0.003	n.n.	0.023	0.004	0.001	n.n.	0.002
#96	0.016	0.008	0.115	0.062	0.003	0.002	0.019
#103	0.015	0.004	0.062	0.020	0.010	0.007	0.008
#100	0.014	n.n.	0.057	0.008	0.007	0.008	0.003
#94	0.021	0.006	0.080	0.025	0.007	0.004	n.n.
#98/102	0.130	0.040	0.273	0.203	0.018	0.019	0.046
#88/95/121	3.409	1.330	5.255	6.026	0.659	0.414	3.229
#91	0.295	0.139	0.568	0.531	0.065	0.035	0.254
#92	0.578	0.171	0.907	0.774	0.175	0.078	0.372
#84	0.930	0.281	1.085	1.066	0.118	0.055	0.546
#89/90	0.253	0.035	0.387	0.236	0.107	0.023	0.025
#101	3.567	1.156	5.308	5.343	0.535	0.321	1.592
#99	0.697	0.185	1.051	0.936	0.160	0.091	0.424
#112/119	0.111	0.020	0.197	0.090	0.045	n.n.	0.015
#83	1.380	0.209	1.425	0.980	0.024	0.077	0.027
#86/97/125	1.399	0.278	1.724	1.320	0.077	0.078	0.359
#116/117	0.132	0.016	0.430	0.278	0.077	0.078	n.n.
#87/111/115	1.154	0.326	1.404	1.382	0.171	0.116	0.611
#85/120	0.518	0.111	0.599	0.564	0.071	0.026	0.097
#110	2.434	0.801	2.851	3.280	0.325	0.245	1.723
#82	2.103	0.472	1.443	1.616	0.005	0.047	0.105
#124	0.406	0.050	0.376	0.239	0.044	0.018	n.n.
#107/109/123	1.287	0.134	0.875	0.648	0.132	0.062	0.092
#118	2.514	0.449	2.245	1.966	0.291	0.168	0.647
#114	0.304	0.096	0.287	0.209	n.n.	0.010	0.009
#122	1.100	0.153	0.587	0.487	0.021	0.033	0.006
#105	1.686	0.301	1.115	1.020	0.187	0.094	0.223
#127	0.030	0.012	0.063	0.024	n.n.	n.n.	0.011
#126	2.883	0.623	2.268	1.794	0.098	0.161	0.044
#155	0.003	0.001	0.029	0.004	n.n.	0.002	0.001
#150	0.016	0.007	0.066	0.028	n.n.	0.003	0.001
#152	0.004	0.001	0.026	n.n.	n.n.	n.n.	0.000
#145	0.009	n.n.	0.054	0.010	0.003	n.n.	n.n.
#148	0.016	n.n.	0.069	0.027	0.002	0.009	n.n.
#136	0.756	0.253	1.124	1.327	0.044	0.070	0.255
#154	0.023	0.008	0.094	0.051	0.007	0.007	0.002
#151	0.809	0.333	1.586	1.491	0.063	0.110	0.296
#135/144	0.321	0.219	1.126	0.981	0.048	0.074	0.148
#147	0.318	n.n.	0.082	0.028	0.048	n.n.	0.053
#139/149	3.089	1.023	4.668	4.721	0.210	0.287	0.904
#140	0.033	0.012	0.069	0.039	0.210	n.n.	n.n.
#134/143	0.234	0.078	0.374	0.321	0.005	0.015	0.020
#131/133/142	0.957	0.192	0.983	0.671	n.n.	0.048	0.014

7. ANHANG

<i>Temperatur</i>	600°C	600°C	600°C	600°C	400°C	400°C	400°C
<i>Versuch</i>	CO-Spitzen, Memory Phase I	CO-Spitzen, Memory Phase III	CO-Spitzen	CO-Spitzen, Memory Phase II	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb
<i>Laborlaufnummer</i>	9911022	9911023	9911024	9911025	9911054	9911061	9911018
#165	0.020	0.192	0.963	0.671	0.038	0.048	0.014
#146/161	0.742	0.163	0.860	0.865	0.115	0.088	0.112
#153/168	3.624	1.058	5.268	4.956	0.271	0.287	0.774
#141	0.747	0.214	1.024	0.889	0.045	0.084	0.150
#137	0.333	0.077	0.344	0.285	0.016	0.027	n.n.
#130	1.127	0.255	0.917	0.678	0.015	0.055	n.n.
#163/164	1.210	0.344	1.334	1.302	0.061	0.119	0.206
#138/160	1.573	0.537	1.881	2.047	0.188	0.148	0.508
#158	1.794	0.574	0.920	2.422	0.088	0.088	0.405
#129	2.489	0.653	1.554	1.400	0.008	0.080	0.006
#166	0.033	0.022	0.058	0.026	n.n.	n.n.	n.n.
#159	n.n.	n.n.	0.017	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#162	0.622	0.132	0.530	0.198	0.029	0.026	0.006
#128	1.158	0.436	0.816	0.824	0.044	0.047	0.021
#167	1.211	0.233	0.914	0.749	0.076	0.103	0.042
#156	1.921	0.543	1.295	1.049	0.069	0.115	0.047
#157	1.181	0.337	0.830	0.587	0.021	0.058	0.013
#169	1.357	0.506	1.178	0.838	0.041	0.111	0.023
#188	0.008	0.004	0.051	0.022	0.001	0.004	0.001
#184	0.035	0.018	0.131	0.086	0.003	0.013	0.001
#179	0.175	0.112	0.536	0.423	0.007	0.027	0.033
#176	0.145	0.067	0.411	0.288	0.003	0.019	0.006
#186	n.n.	n.n.	0.026	0.008	n.n.	n.n.	n.n.
#178	0.053	0.047	0.220	0.123	0.008	0.018	0.006
#175	0.209	0.077	0.358	0.282	0.009	0.033	0.003
#187	0.369	0.164	0.746	0.610	0.030	0.071	0.064
#183	0.256	0.117	0.592	0.435	0.022	0.060	0.037
#185	0.024	0.020	0.105	0.045	0.001	0.006	n.n.
#174/181	0.701	0.263	0.900	0.689	0.007	0.051	0.045
#177	0.260	0.125	0.428	0.345	0.007	0.018	0.016
#171	0.597	0.223	0.578	0.408	0.007	0.036	0.005
#173	0.318	0.131	0.329	0.202	n.n.	0.010	n.n.
#172/192	0.844	0.322	0.621	0.468	0.028	0.068	0.009
#180/193	1.133	0.402	1.395	1.046	0.067	0.128	0.129
#191	0.350	0.174	0.297	0.275	0.023	0.057	0.006
#170/190	2.216	1.195	1.344	1.187	0.051	0.198	0.062
#189	1.180	0.708	0.727	0.612	0.050	0.126	0.034
#202	0.075	0.024	0.097	0.058	0.002	0.007	0.002
#201	0.270	0.076	0.396	0.230	0.003	0.032	0.002
#204	0.471	0.084	0.455	0.278	0.003	0.036	0.002
#197	0.326	0.084	0.281	0.146	0.001	0.016	0.000
#200	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#198	0.377	0.105	0.205	0.160	0.005	0.030	0.002
#199	0.495	0.143	0.273	0.183	0.008	0.043	0.002
#196/203	2.466	0.452	0.933	0.696	0.030	0.151	0.013
#195	1.216	0.314	0.389	0.228	0.008	0.047	0.005
#194	2.858	0.759	0.687	0.572	0.062	0.170	0.027
#205	0.996	0.337	0.238	0.242	0.028	0.081	0.010
#208	1.407	0.278	0.470	0.310	0.011	0.119	0.007
#207	2.789	0.525	0.901	0.824	0.011	0.204	0.013
#206	3.997	1.093	1.019	0.803	0.098	0.263	0.042
#209	1.365	0.934	1.040	0.620	0.148	0.322	0.048
TEQ (nach Safe)	0.415	0.096	0.328	0.254	0.021	0.024	0.020
TEQ (WHO)	0.305	0.068	0.241	0.189	0.010	0.017	0.005

7. ANHANG

Temperatur	600°C	600°C	600°C	600°C	400°C	400°C	400°C
Versuch	CO-Spitzen, Memory Phase I	CO-Spitzen, Memory Phase III	CO-Spitzen	CO-Spitzen, Memory Phase II	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb
Laborlaufnummer	9911022	9911023	9911024	9911025	9911054	9911061	9911018
MCBz	89052.63	21725.74	45846.66	30632.56	8287.33	11950.58	13925.75
1,3 -DiCBz	915.15	309.53	557.81	1924.32	483.76	534.89	702.96
1,4 -DiCBz	935.61	514.74	457.42	2482.88	322.73	293.17	593.12
1,2 -DiCBz	3469.70	589.90	1286.65	1834.68	337.80	473.81	1120.44
1,3,5 -TriCBz	932.92	236.80	160.80	313.77	90.37	179.45	52.43
1,2,4 -TriCBz	1249.63	1320.52	1471.12	352.08	529.49	404.48	389.77
1,2,3 -TriCBz	1823.51	1208.47	1195.09	1543.83	117.70	512.83	88.37
1,2,3,5 -TeCBz	710.02	218.23	508.51	967.67	319.54	390.90	225.94
1,2,4,5 -TeCBz	870.02	151.58	212.28	460.01	254.46	289.75	191.04
1,2,3,4 -TeCBz	1310.66	354.86	629.40	1033.01	198.08	304.91	149.10
PeCBz	3502.90	1277.30	1829.41	2118.27	379.50	563.83	276.39
HxCBz	618.15	392.71	907.11	1431.33	147.22	164.97	135.34

Temperatur	600°C	400°C	700-750°C
Versuch	CO-Spitzen	Normalbetrieb	Normalbetrieb mit Erdöl
Laborlaufnummer	9911024	9911018	9911055
2-MCPh	704.35	1857.58	281.93
4-MCPh	37.26	110.05	241.32
2,6-DiCPh	1002.77	750.70	96.03
2,4-DiCPh	375.83	1383.59	371.12
3,4-DiCPh	126.11	48.27	137.01
2,4,6-TriCPh	947.88	1077.91	274.70
2,3,6-TriCPh	108.70	101.22	58.76
2,3,5-TriCPh	917.59	340.29	61.23
2,4,5-TriCPh	191.87	87.62	87.41
2,3,4-TriCPh	1307.74	658.63	232.23
3,4,5-TriCPh	88.60	45.21	88.23
2,3,5,6-TeCPh	211.83	125.10	86.92
2,3,4,6-TeCPh	1333.81	1468.74	202.10
2,3,4,5-TeCPh	774.08	279.23	66.99
PeCPh	827.56	503.12	82.86

Temperatur	600°C	600°C	600°C	600°C	400°C	400°C	400°C
Versuch	CO-Spitzen, Memory Phase I	CO-Spitzen, Memory Phase III	CO-Spitzen	CO-Spitzen, Memory Phase II	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb
Laborlaufnummer	9911022	9911023	9911024	9911025	9911054	9911061	9911018
Naphthalin	4452235.86	87383.89	319070.87	113677.57	22642.20	101406.79	12460.00
Dibenzofuran	1028235.95	1439.68	14403.97	162017.17	32.38	14.54	37.56
Dibenzo-p-dioxin	12897.64	313.87	11021.57	3934.19	9.12	2.60	-
Benzol	-	-	-	-	-	27453.70	15857.14
Toluol	-	-	-	-	-	2232.56	1636.36
Ethylbenzol	-	-	-	-	-	385.14	280.87
m/p-Xylol	-	-	-	-	-	1036.36	590.49
o-Xylol	-	-	-	-	-	375.87	383.09
Fluoren	84716.20	5198.45	60751.48	2034.71	7711.01	-	-
Phenanthren	30598.82	2437.71	67852.69	13859.29	6991.48	-	-
Anthracen	3313.22	556.25	21249.22	1619.22	1514.55	-	-
Fluoranthren	45883.45	8508.98	192784.28	34311.00	3914.80	-	-
Pyren	41457.17	3550.36	69862.71	30649.39	4335.92	-	-
Benz[a]anthracen	5715.53	779.88	44178.08	4828.42	670.53	-	-
Chrysen	8940.90	1223.35	38647.33	7323.18	71.57	-	-
Benzo[e]pyren	15588.30	2359.38	146594.41	14245.27	190.11	-	-
Benzo[b]fluoranthren	11708.57	1357.72	64611.13	8660.41	54.00	-	-
Benzo[k]fluoranthren	3585.24	504.11	25510.73	3227.48	13.26	-	-
Benzo[a]pyren	6935.90	1164.94	50928.28	6662.74	17.54	-	-
Dibenz[a,h]anthracen	613.43	88.68	5803.52	531.46	29.34	-	-
Benzo[g,h,i]perylen	11785.84	1954.23	98965.24	11422.44	48.02	-	-
Indeno[1,2,3-cd]pyren	7385.61	1285.68	64265.46	8294.84	31.41	-	-

7. ANHANG

Temperatur	700-750°C	1100°C, Feuerraum	700-750°C	700-750°C	700-750°C	700-750°C	700-750°C	700-750°C
Versuch	Normalbetrieb mit Erdöl	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Instationärer Betrieb	Normalbetrieb
Laborlaufnummer	9911055	9911060	9911063	9911064	9911066	9911068	9911016	9911017
1-MCDD	0.225	0.127	0.344	1.114	0.037	0.469	0.002	0.321
2-MCDD	0.051	0.052	0.084	0.403	0.018	0.163	0.001	0.077
1,3-DiCDD	0.024	0.022	0.078	0.181	0.024	0.123	0.004	0.055
2,7/2,3/2,8-DiCDD	0.266	0.062	0.354	0.929	0.085	0.359	0.023	0.401
1,4/1,7-DiCDD	0.079	0.049	0.150	0.215	0.051	0.216	0.008	0.132
1,8-DiCDD	0.091	0.048	0.154	0.276	0.049	0.212	0.013	0.136
1,6-DiCDD	0.006	0.010	0.024	0.036	0.006	0.035	0.005	0.018
1,2-DiCDD	0.038	0.033	0.064	0.114	0.019	0.097	0.007	0.042
1,9-DiCDD	0.016	0.012	0.032	0.029	0.007	0.034	0.011	0.026
1,3,7-TriCDD	0.085	0.037	0.302	0.117	0.064	0.229	0.109	0.152
1,3,8-TriCDD	0.092	0.037	0.319	0.111	0.064	0.239	0.248	0.158
1,3,6-TriCDD	0.010	0.013	0.085	0.025	0.017	0.084	0.023	0.040
1,2,4-TriCDD	0.004	0.005	0.030	0.011	0.006	0.029	0.004	0.012
1,3,9/2,3,7-TriCDD	0.178	0.078	0.706	0.157	0.151	0.588	0.812	0.313
1,4,7-TriCDD	0.019	0.019	0.138	0.040	0.026	0.126	0.043	0.066
1,2,3-TriCDD	0.006	0.007	0.037	0.008	0.009	0.035	0.022	0.016
1,7,8-TriCDD	0.027	0.024	0.152	0.035	0.034	0.151	0.174	0.099
1,2,7-TriCDD	0.062	0.035	0.213	0.104	0.046	0.192	0.359	0.123
1,2,8-TriCDD	0.035	0.032	0.200	0.082	0.044	0.163	0.423	0.122
1,4,6-TriCDD	0.005	0.012	0.066	0.020	0.011	0.056	0.057	0.038
1,2,6-TriCDD	0.009	0.013	0.060	0.016	0.012	0.053	0.020	0.036
1,2,9-TriCDD	0.005	0.016	0.086	0.011	0.017	0.080	0.225	0.044
2,3,7,8-TCDD	0.068	0.023	0.262	0.033	0.072	0.122	0.629	0.143
1,3,6,8-TCDD	0.054	0.015	0.195	0.150	0.060	0.140	0.388	0.080
1,3,7,9-TCDD	0.042	0.015	0.210	0.051	0.060	0.125	0.425	0.102
1,3,7,8-TCDD	0.139	0.044	0.691	0.110	0.149	0.333	1.314	0.308
1,3,6,9/1,2,4,7/1,2,4,8-TCDD	0.030	0.030	0.396	0.067	0.081	0.268	0.702	0.152
1,2,6,8-TCDD	0.018	0.015	0.194	n.n.	0.046	0.114	0.422	0.092
1,4,7,8-TCDD	0.012	0.013	0.134	0.033	0.031	0.071	0.295	0.064
1,2,4,6/1,2,4,9-TCDD	0.032	0.016	0.201	0.048	0.050	0.104	0.495	0.099
1,2,3,4/1,2,3,7/1,2,3,8-TCDD	0.037	0.024	0.277	0.033	0.068	0.159	0.590	0.133
1,2,3,6/1,2,7,9-TCDD	0.036	0.032	0.329	0.039	0.080	0.168	0.779	0.161
1,2,7,8/1,4,6,9-TCDD	0.068	0.031	0.265	0.022	0.061	0.034	0.876	0.175
1,2,3,9-TCDD	n.n.	0.008	0.054	n.n.	0.018	0.032	0.174	0.034
1,2,6,9-TCDD	0.006	0.011	0.066	n.n.	0.022	0.037	0.264	0.052
1,2,6,7-TCDD	0.003	0.006	0.063	0.025	0.011	0.052	0.155	0.030
1,2,8,9-TCDD	0.005	0.008	0.094	0.005	0.020	0.066	0.162	0.038
1,2,3,7,8-PeCDD	0.130	0.036	1.208	0.031	0.228	0.344	2.027	0.308
1,2,4,6,8/1,2,4,7,9-PeCDD	0.116	0.034	1.142	0.074	0.258	0.358	1.763	0.283
1,2,3,6,8-PeCDD	0.047	0.020	0.757	0.058	0.202	0.288	1.095	0.163
1,2,4,7,8-PeCDD	0.073	0.031	1.031	0.034	0.200	0.285	1.585	0.266
1,2,3,7,9-PeCDD	0.072	0.022	0.827	0.040	0.172	0.253	1.260	0.212
1,2,3,4,7/1,2,4,6,9-PeCDD	n.n.	0.015	0.393	0.010	0.072	0.137	1.005	0.143
1,2,3,6,9-PeCDD	n.n.	0.011	0.325	n.n.	0.058	0.096	0.610	0.088
1,2,4,6,7-PeCDD	0.025	0.018	0.383	n.n.	0.076	0.131	0.713	0.103
1,2,4,8,9-PeCDD	0.024	0.015	0.378	n.n.	0.074	0.097	0.789	0.106
1,2,3,4,6-PeCDD	n.n.	0.025	0.113	0.033	0.025	0.042	0.459	0.037
1,2,3,6,7-PeCDD	0.033	0.025	0.480	0.033	0.097	0.129	1.705	0.170
1,2,3,8,9-PeCDD	0.089	0.031	0.692	0.016	0.125	0.228	2.089	0.207
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.061	0.014	0.851	0.020	0.186	0.146	1.448	0.105
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.118	0.017	0.994	0.032	0.269	0.173	1.847	0.130
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.136	0.018	1.340	0.037	0.292	0.192	2.753	0.221
1,2,3,4,6,8/1,2,4,6,7,9/1,2,4,6,8,9-HxCDD	0.200	0.031	1.671	0.198	0.603	0.257	5.685	0.430
1,2,3,6,7,9/1,2,3,6,8,9-HxCDD	0.278	0.037	2.362	0.126	0.666	0.392	4.604	0.383
1,2,3,4,6,9-HxCDD	0.025	0.006	0.325	0.014	0.055	0.050	1.308	0.051
1,2,3,4,6,7-HxCDD	0.079	0.019	0.851	0.024	0.175	0.136	3.034	0.121
1,2,3,4,6,7,9-HpCDD	1.017	0.154	4.840	0.263	2.839	0.671	14.611	0.434
1,2,3,4,6,7,9-HpCDD	0.829	0.281	5.021	0.250	2.220	0.910	12.780	0.382
OCDD	2.741	1.356	4.913	0.447	7.236	0.833	27.799	0.407

7. ANHANG

Temperatur	700-750°C	1100°C, Feuerraum	700-750°C	700-750°C	700-750°C	700-750°C	700-750°C	700-750°C
Versuch	Normalbetrieb mit Erdöl	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Instationärer Betrieb	Normalbetrieb
Laborlaufnummer	9911055	9911060	9911063	9911064	9911066	9911068	9911016	9911017
1-MCDF	0.798	1.452	3.537	13.144	0.970	2.821	1.196	1.778
3-MCDF	2.855	1.879	5.005	29.856	1.842	4.912	0.781	2.765
2-MCDF	2.850	1.583	5.054	72.459	1.578	4.268	0.144	2.038
4-MCDF	0.194	0.159	0.557	3.184	0.461	0.736	0.002	0.169
1,3-DiCDF	0.845	0.427	0.823	2.711	0.411	1.475	0.206	1.036
1,7-DiCDF	1.247	0.706	1.432	4.381	0.796	2.256	0.400	2.035
1,4-DiCDF	0.009	0.095	0.007	0.037	0.007	0.013	0.027	0.004
1,8-DiCDF	1.381	0.714	1.259	37.421	0.649	1.918	0.496	1.927
1,6-DiCDF	0.184	0.076	0.110	1.059	0.171	0.209	0.012	0.345
1,2-DiCDF	0.660	0.376	0.661	2.919	0.354	1.147	0.281	0.856
2,4-DiCDF	0.513	0.237	0.695	4.125	0.345	1.171	0.133	0.577
3,7-DiCDF	2.538	0.487	1.101	4.916	0.634	1.509	1.721	1.518
2,7-DiCDF	0.006	0.002	0.005	0.034	0.008	0.011	0.020	0.005
2,3-DiCDF	1.995	0.878	1.612	204.670	0.818	2.276	1.238	2.194
2,8/3,6-DiCDF	1.292	0.609	1.115	4.636	0.638	1.762	0.730	1.100
2,6-DiCDF	1.514	0.480	0.949	26.215	0.456	1.478	1.327	1.033
1,9/3,4-DiCDF	0.698	0.294	0.550	326.708	0.265	0.842	0.423	0.871
4,6-DiCDF	0.611	0.362	0.680	11.814	0.335	1.038	0.242	0.725
1,3,7-TriCDF	1.756	0.424	1.570	1.219	0.846	2.042	3.548	1.884
1,3,8-TriCDF	1.325	0.418	1.430	6.459	0.674	1.794	7.293	1.489
1,3,6-TriCDF	0.405	0.161	0.565	0.583	0.245	0.792	1.097	0.588
1,3,4/1,4,8-TriCDF	0.466	0.173	0.575	1.009	0.275	0.747	0.788	0.584
1,2,4/1,6,7-TriCDF	0.395	0.233	0.792	1.073	0.366	0.865	0.416	0.768
1,7,8-TriCDF	0.994	0.347	1.093	1.516	0.680	1.342	4.348	1.080
1,2,3-TriCDF	0.206	0.076	0.386	0.455	0.158	0.402	0.649	0.250
1,2,7-TriCDF	0.804	0.272	1.055	2.503	0.497	1.312	3.454	1.104
1,2,9-TriCDF	0.156	0.085	0.322	0.328	0.128	0.487	2.688	0.318
1,3,9-TriCDF	0.129	0.054	0.176	0.250	0.159	0.280	0.150	0.171
2,4,7-TriCDF	0.497	0.230	0.935	3.332	0.357	0.997	5.016	0.905
1,2,6/1,2,8-TriCDF	0.420	0.232	0.823	11.106	0.344	0.995	4.018	1.056
2,4,8-TriCDF	0.139	0.097	0.354	0.578	0.148	0.469	0.190	0.379
1,4,9-TriCDF	0.314	0.166	0.666	20.979	0.251	0.799	1.110	0.754
2,3,7-TriCDF	0.199	0.116	0.736	0.888	0.254	0.685	14.074	0.472
1,6,8/2,3,4/2,3,8-TriCDF	0.919	0.408	1.566	2.823	0.753	1.543	12.405	1.555
2,3,6/3,4,7-TriCDF	0.023	0.002	0.008	0.108	0.004	0.014	n.n.	0.003
2,6,7-TriCDF	0.493	0.380	1.586	15.923	0.706	1.696	6.932	1.384
1,4,6/1,4,7-TriCDF	0.891	0.580	2.405	1.991	0.868	2.317	42.221	0.980
3,4,8-TriCDF	0.210	0.190	0.744	4.088	0.295	0.890	8.755	0.651
2,4,6-TriCDF	0.332	0.160	1.301	0.562	0.424	1.167	27.185	0.588
2,3,7,8-TCDF	0.271	0.118	1.098	0.545	0.408	0.851	3.621	0.715
1,3,6,8-TCDF	0.421	0.120	1.369	0.490	0.526	1.089	3.665	0.950
1,3,7,8/1,3,7,9-TCDF	1.485	0.364	2.807	0.868	1.323	2.330	11.738	2.264
1,3,4,7-TCDF	0.338	0.141	1.161	0.366	0.436	0.794	4.116	0.821
1,4,6,8-TCDF	0.282	0.122	1.075	0.346	0.375	0.678	3.809	0.759
1,2,4,7/1,3,6,7-TCDF	0.510	0.198	1.611	0.431	0.622	1.039	6.307	1.176
1,3,4,8-TCDF	0.255	0.119	1.035	0.578	0.381	0.645	3.701	0.724
1,2,4,8/1,3,4,6-TCDF	0.182	0.103	0.987	0.864	0.306	0.675	3.157	0.647
1,2,4,6/1,2,6,8/1,2,3,7/1,4,7,8/1,3,6,9-TCDF	0.489	0.419	3.551	1.467	1.239	2.506	14.335	2.778
1,2,3,4/1,2,3,6/1,2,3,8/1,4,6,7/1,6,7,8/2,4,6,8-TCDF	0.753	0.356	3.488	1.945	1.164	2.187	9.206	1.609
1,3,4,9-TCDF	0.052	0.016	0.199	0.060	0.076	0.128	0.544	0.112
1,2,7,8-TCDF	0.400	0.186	1.459	0.865	0.578	0.931	5.407	1.215
1,2,6,7-TCDF	0.294	0.132	0.690	0.500	0.255	0.426	3.569	0.703
1,2,7,9/1,4,6,9-TCDF	0.047	0.147	1.077	1.044	0.448	0.446	0.624	0.084
1,2,4,9/2,3,6,8-TCDF	0.379	0.002	0.010	n.n.	0.005	0.138	4.871	0.873
2,4,6,7-TCDF	0.300	0.112	0.860	0.465	0.411	0.273	5.087	0.635
1,2,3,9/2,3,4,7-TCDF	0.300	0.123	0.952	0.524	0.463	0.311	5.608	0.710
1,2,6,9-TCDF	0.247	0.082	1.288	0.395	0.359	0.808	4.041	0.521
2,3,4,8-TCDF	0.102	0.082	0.851	1.168	0.253	0.612	3.621	0.715
2,3,4,6-TCDF	0.223	0.070	1.469	0.289	0.447	0.827	4.190	0.401
2,3,6,7-TCDF	0.398	0.181	2.268	0.565	0.732	1.429	6.620	0.979
3,4,6,7-TCDF	0.408	0.091	1.885	0.361	0.686	0.951	3.689	0.446

7. ANHANG

Temperatur	700-750°C	1100°C, Feuerraum	700-750°C	700-750°C	700-750°C	700-750°C	700-750°C	700-750°C
Versuch	Normalbetrieb mit Erdöl	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Instationärer Betrieb	Normalbetrieb
Laborlaufnummer	9911055	9911060	9911063	9911064	9911066	9911068	9911016	9911017
1,2,3,7,8/1,2,3,4,8-PeCDF	0.352	0.135	3.698	0.423	0.924	1.427	7.936	1.263
2,3,4,7,8-PeCDF	0.271	0.105	3.287	0.407	0.924	1.176	5.438	0.804
1,3,4,6,8-PeCDF	0.168	0.199	1.533	0.184	0.640	0.377	2.809	0.642
1,2,4,6,8-PeCDF	0.085	0.162	1.264	0.189	0.487	0.278	2.472	0.600
1,3,6,7,8-PeCDF	0.190	0.203	0.468	0.161	0.251	0.144	3.122	0.717
1,3,4,7,8-PeCDF	0.069	0.042	0.189	0.046	0.115	0.049	0.762	0.147
1,3,4,7,9/1,2,3,6,8-PeCDF	0.337	0.346	1.068	0.307	0.502	0.276	5.515	1.135
1,2,4,7,8-PeCDF	0.160	0.208	2.777	0.227	0.620	1.379	3.225	0.774
1,2,4,7,9/1,3,4,6,7-PeCDF	0.145	0.166	2.996	0.200	0.772	1.336	3.359	0.621
1,2,4,6,7-PeCDF	0.105	0.145	2.438	0.152	0.636	0.984	2.788	0.485
1,2,3,4,7/1,4,6,7,8-PeCDF	0.139	0.191	3.390	0.189	0.815	1.334	0.848	0.568
1,3,4,6,9-PeCDF	0.058	0.037	0.633	0.031	0.176	0.257	0.848	0.107
1,2,3,4,6-PeCDF	0.070	0.052	1.026	0.078	0.237	0.385	1.684	0.184
1,2,3,7,9-PeCDF	0.035	0.023	0.391	0.035	0.108	0.164	0.470	0.086
1,2,3,6,7-PeCDF	0.143	0.124	2.148	0.149	0.519	0.779	2.543	0.460
1,2,4,6,9/1,2,6,7,8-PeCDF	0.201	0.138	2.578	0.231	0.688	0.899	3.478	0.583
1,2,6,7,9-PeCDF	0.016	0.033	0.500	0.057	0.141	0.165	0.972	0.077
1,2,3,6,9-PeCDF	0.031	0.031	0.398	0.031	0.097	0.117	0.836	0.096
2,3,4,6,8-PeCDF	0.232	0.090	2.295	0.361	0.739	0.697	5.186	0.608
1,2,3,4,9-PeCDF	0.050	0.025	0.309	0.056	0.110	0.102	1.065	0.061
1,2,4,8,9-PeCDF	0.053	0.035	0.531	0.045	0.142	0.181	1.050	0.108
1,2,3,8,9-PeCDF	0.038	0.208	0.335	0.060	0.090	0.125	0.676	0.075
2,3,4,6,7-PeCDF	0.555	0.109	5.067	0.510	2.009	1.631	13.041	0.794
1,2,3,4,7,8/1,2,3,4,7,9-HxCDF	0.509	0.112	6.472	0.408	1.749	1.434	11.537	0.989
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.502	0.083	6.593	0.399	1.903	1.487	13.583	1.109
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.043	0.008	0.470	0.024	0.173	0.109	0.831	0.068
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.642	0.119	5.148	0.403	2.424	1.034	14.889	0.634
1,2,3,4,6,8-HxCDF	0.295	0.024	4.275	0.348	1.073	0.701	8.509	0.696
1,3,4,6,7,8/1,3,4,6,7,9-HxCDF	0.689	0.132	8.790	0.569	3.214	1.571	15.473	1.624
1,2,4,6,7,8-HxCDF	0.817	0.041	7.457	0.504	2.507	1.573	13.402	1.379
1,2,4,6,7,9-HxCDF	0.311	0.008	1.804	0.126	0.594	0.392	3.553	0.233
1,2,4,6,8,9-HxCDF	0.155	0.102	5.902	0.046	1.971	0.231	1.854	n.n.
1,2,3,4,6,7-HxCDF	0.839	0.026	5.902	0.411	1.972	1.223	15.316	0.759
1,2,3,6,7,9-HxCDF	0.181	0.112	1.518	0.090	0.366	0.334	2.396	0.177
1,2,3,4,6,9/1,2,3,6,8,9-HxCDF	0.258	0.025	2.194	0.083	0.491	0.486	4.725	0.163
1,2,3,4,8,9-HxCDF	0.158	0.013	1.069	0.063	0.334	0.208	3.996	0.103
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	2.423	0.659	18.132	0.899	9.611	2.720	80.852	1.990
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.579	0.042	2.986	0.085	1.484	0.487	9.702	0.232
1,2,3,4,6,7,9-HpCDF	0.944	0.082	4.854	0.245	2.298	0.782	22.919	0.392
1,2,3,4,6,8,9-HpCDF	0.367	0.119	6.098	0.102	0.963	1.228	17.784	0.215
OCDF	3.092	0.526	6.991	0.376	11.674	1.434	68.404	0.607
I-TEQ (NATO/CCMS)	0.560	0.160	5.263	0.474	1.593	1.537	10.957	1.186
I-TEQ (PCDD nach NATO/CCMS)	0.177	0.049	1.238	0.061	0.296	0.353	2.421	0.347
I-TEQ (PCDF nach NATO/CCMS)	0.383	0.111	4.025	0.413	1.297	1.184	8.536	0.840
I-TEQ (WHO)	0.620	0.176	5.857	0.488	1.690	1.707	11.884	1.340
I-TEQ (PCDD nach WHO)	0.240	0.066	1.838	0.076	0.403	0.524	3.410	0.500
I-TEQ (PCDF nach WHO)	0.380	0.110	4.019	0.412	1.286	1.183	8.474	0.839

7. ANHANG

<i>Temperatur</i>	700-750°C	1100°C, Feuerraum	700-750°C	700-750°C	700-750°C	700-750°C	700-750°C	700-750°C
<i>Versuch</i>	Normalbetrieb mit Erdöl	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Instationärer Betrieb	Normalbetrieb
<i>Laborlaufnummer</i>	9911055	9911060	9911063	9911064	9911066	9911068	9911016	9911017
#1	0.106	194.032	n.n.	8.507	0.816	0.147	0.022	6.111
#2	0.689	810.440	n.n.	14.363	n.n.	0.674	3.861	2.035
#3	0.270	202.202	n.n.	49.306	n.n.	0.586	2.003	4.773
#4/10	0.223	131.057	n.n.	1.348	n.n.	1.256	0.115	6.455
#7/9	0.130	41.338	n.n.	6.772	n.n.	0.290	0.210	0.664
#6	0.166	n.n.	n.n.	2.608	n.n.	0.444	0.308	1.627
#5/8	1.366	801.956	n.n.	10.431	0.314	1.913	1.007	14.137
#14	0.072	9.492	n.n.	0.419	n.n.	0.222	0.247	0.284
#11	1.459	246.190	n.n.	13.560	0.575	n.n.	0.973	0.728
#12	0.027	19.903	n.n.	1.856	0.575	0.328	0.639	0.765
#13	0.227	18.985	n.n.	56.104	0.392	0.328	0.645	4.903
#15	0.168	22.659	n.n.	13.816	0.523	0.435	0.374	0.884
#19	0.046	0.135	n.n.	0.112	0.006	0.005	n.n.	1.322
#30	n.n.	0.011	n.n.	n.n.	0.004	n.n.	n.n.	0.055
#18	0.906	10.217	n.n.	3.261	0.442	0.640	0.477	20.876
#17	0.254	1.563	n.n.	1.094	0.057	0.103	0.139	5.227
#24/27	0.053	0.200	n.n.	0.220	0.020	n.n.	0.032	0.793
#16	0.368	2.397	n.n.	1.134	0.055	0.059	0.185	9.131
#32	0.403	3.502	n.n.	1.590	0.043	0.117	0.185	8.330
#23/34	0.011	n.n.	n.n.	0.280	n.n.	0.011	0.095	0.066
#29	0.013	0.081	n.n.	0.298	n.n.	n.n.	0.076	n.n.
#26	0.174	1.034	n.n.	17.419	n.n.	0.074	0.207	2.449
#25	0.076	0.328	n.n.	17.417	n.n.	0.026	0.192	0.506
#28/31	2.336	31.262	n.n.	91.317	1.600	1.283	2.075	41.449
#21	0.017	n.n.	n.n.	0.318	0.038	0.008	0.252	0.363
#20/30	0.712	9.023	n.n.	3.587	0.078	0.334	0.820	13.028
#22	0.389	4.384	n.n.	2.291	0.027	0.077	0.335	8.711
#36	0.012	n.n.	n.n.	0.444	n.n.	0.030	0.220	n.n.
#39	0.077	0.422	n.n.	0.234	0.028	0.096	0.128	1.994
#35	0.072	0.087	n.n.	1.426	0.021	0.033	0.097	1.849
#37	0.151	0.677	n.n.	1.956	0.006	0.017	0.447	1.414
#54	0.008	0.002	n.n.	0.003	0.002	n.n.	0.003	0.019
#50	0.003	0.011	n.n.	0.002	0.002	0.001	0.003	0.016
#53	0.303	3.091	n.n.	0.779	0.089	0.146	0.260	1.765
#51	0.113	0.423	n.n.	0.417	n.n.	0.011	0.043	0.448
#45	0.333	1.860	n.n.	0.758	0.045	0.050	0.219	1.879
#46	0.129	0.310	n.n.	0.261	0.018	n.n.	0.057	0.760
#69	0.129	n.n.	n.n.	0.260	n.n.	n.n.	0.056	0.760
#73	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#43/52	1.849	18.647	n.n.	7.166	1.123	1.178	1.579	4.053
#49	0.752	10.444	n.n.	5.851	0.786	0.812	0.808	4.007
#47/48/62/65/75	0.491	7.060	n.n.	1.702	0.329	0.316	0.494	2.206
#44	0.991	11.425	n.n.	2.953	0.508	0.586	0.965	6.032
#59	0.991	11.423	n.n.	0.519	0.037	0.051	0.120	0.661
#42	0.267	2.164	n.n.	0.867	0.064	0.113	0.336	1.590
#41/71/72	0.338	3.293	n.n.	1.034	0.264	0.164	0.380	2.072
#64/68	0.533	7.070	n.n.	3.252	0.266	0.346	0.578	3.386
#40	0.257	0.508	n.n.	0.313	n.n.	0.028	0.328	1.426
#57	0.014	n.n.	n.n.	0.633	n.n.	0.033	0.222	0.060
#67	0.050	n.n.	n.n.	0.728	n.n.	0.090	0.243	0.168
#63	0.006	0.293	n.n.	5.805	n.n.	0.020	0.097	0.201
#74	0.585	8.499	n.n.	4.494	0.349	0.489	0.651	2.313

7. ANHANG

<i>Temperatur</i>	700-750°C	1100°C, Feuerraum	700-750°C	700-750°C	700-750°C	700-750°C	700-750°C	700-750°C
<i>Versuch</i>	Normalbetrieb mit Erdöl	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Instationärer Betrieb	Normalbetrieb
<i>Laborlaufnummer</i>	9911055	9911060	9911063	9911064	9911066	9911068	9911016	9911017
#76	0.021	8.503	n.n.	0.141	0.349	0.490	0.203	0.109
#70	1.301	16.928	n.n.	10.152	0.953	1.142	1.476	5.292
#66/80	0.931	12.053	n.n.	3.487	0.523	0.715	1.256	3.570
#55	0.024	n.n.	n.n.	0.144	n.n.	0.044	0.466	n.n.
#56/60	0.490	4.620	n.n.	1.862	0.086	0.228	1.109	2.072
#79	0.048	0.115	n.n.	0.202	0.004	0.185	0.711	0.139
#78	0.019	0.067	n.n.	0.123	n.n.	0.056	0.418	0.029
#81	0.021	0.035	n.n.	0.214	n.n.	0.015	0.322	0.044
#77	0.169	0.383	n.n.	0.495	0.036	0.240	1.256	0.297
#104	0.001	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.000	n.n.	n.n.
#96	0.010	0.031	n.n.	0.003	n.n.	0.001	n.n.	0.027
#103	0.004	n.n.	n.n.	0.026	n.n.	0.003	0.009	0.010
#100	0.007	0.011	n.n.	0.007	n.n.	0.002	0.009	n.n.
#94	0.004	0.014	n.n.	0.003	n.n.	n.n.	0.004	0.008
#98/102	0.028	0.061	n.n.	0.052	n.n.	0.020	0.027	0.059
#88/95/121	0.810	8.568	n.n.	2.734	0.620	0.871	0.895	1.814
#91	0.082	0.330	n.n.	0.422	0.008	0.111	0.088	0.162
#92	0.120	1.115	n.n.	0.440	0.041	0.193	0.183	0.249
#84	0.163	0.916	n.n.	0.496	0.020	0.096	0.166	0.355
#89/90	0.781	8.901	n.n.	0.434	0.743	0.051	0.078	0.050
#101	0.983	7.643	n.n.	3.232	0.626	1.056	0.962	0.880
#99	0.152	1.543	n.n.	0.585	0.049	0.658	0.206	0.289
#112/119	0.011	n.n.	n.n.	0.016	n.n.	0.033	0.035	0.029
#83	0.026	0.057	n.n.	0.066	n.n.	0.063	0.289	0.040
#86/97/125	0.126	0.699	n.n.	0.425	0.027	0.212	0.391	0.228
#116/117	0.010	0.699	n.n.	0.154	0.027	0.010	0.012	n.n.
#87/111/115	0.198	1.679	n.n.	0.743	0.051	0.284	0.352	0.404
#85/120	0.063	0.202	n.n.	0.153	n.n.	0.133	0.197	0.109
#110	0.571	5.099	n.n.	1.925	0.371	0.890	0.699	0.954
#82	0.061	0.111	n.n.	0.126	n.n.	0.047	0.508	0.102
#124	0.019	0.059	n.n.	0.190	0.019	0.051	0.167	0.028
#107/109/123	0.061	0.229	n.n.	0.518	0.018	0.140	0.421	0.127
#118	0.330	2.629	n.n.	1.021	0.131	0.989	0.799	0.454
#114	0.014	0.026	n.n.	0.191	n.n.	0.022	0.120	0.011
#122	0.018	0.016	n.n.	0.040	n.n.	0.035	0.488	0.018
#105	0.126	0.460	n.n.	0.361	0.029	0.353	1.025	0.210
#127	0.006	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.017	0.008
#126	0.058	0.194	n.n.	0.252	0.030	0.166	1.132	0.168
#155	0.001	n.n.	n.n.	0.000	0.002	0.000	0.003	0.001
#150	0.001	n.n.	n.n.	0.005	n.n.	0.001	0.006	0.001
#152	0.001	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.000
#145	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#148	0.002	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.008	0.003
#136	0.155	0.694	n.n.	0.454	0.021	0.062	0.150	0.145
#154	0.004	0.006	n.n.	n.n.	n.n.	0.009	0.011	0.006
#151	0.210	1.873	n.n.	0.622	0.126	0.145	0.267	0.191
#135/144	0.111	0.316	n.n.	0.322	0.056	0.115	0.217	0.054
#147	n.n.	n.n.	n.n.	0.031	0.012	n.n.	0.010	n.n.
#139/149	0.672	5.663	n.n.	2.120	0.523	0.614	0.912	0.531
#140	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.021	0.002
#134/143	0.033	0.067	n.n.	0.058	n.n.	0.017	0.078	0.023
#131/133/142	0.019	0.058	n.n.	0.036	0.003	0.052	0.323	0.022

7. ANHANG

<i>Temperatur</i>	700-750°C	1100°C, Feuerraum	700-750°C	700-750°C	700-750°C	700-750°C	700-750°C	700-750°C
<i>Versuch</i>	Normalbetrieb mit Erdöl	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Instationärer Betrieb	Normalbetrieb
<i>Laborlaufnummer</i>	9911055	9911060	9911063	9911064	9911066	9911068	9911016	9911017
#165	0.019	0.058	n.n.	0.036	0.003	0.052	0.033	0.022
#146/161	0.103	0.589	n.n.	0.265	0.026	0.145	0.333	0.100
#153/168	0.975	5.977	n.n.	2.425	0.506	0.751	1.125	0.443
#141	0.137	0.451	n.n.	0.382	0.035	0.103	0.384	0.103
#137	0.013	n.n.	n.n.	0.040	n.n.	0.056	0.272	0.010
#130	0.032	n.n.	n.n.	0.062	n.n.	0.063	0.424	0.029
#163/164	0.210	1.448	n.n.	0.611	0.093	0.214	0.551	0.161
#138/160	0.372	2.490	n.n.	0.992	0.147	0.447	0.754	0.312
#158	0.387	2.552	n.n.	1.118	0.037	0.504	0.593	0.245
#129	0.029	0.060	n.n.	0.047	n.n.	0.072	1.000	0.013
#166	0.002	n.n.	n.n.	0.013	n.n.	n.n.	0.029	n.n.
#159	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.004	0.031	n.n.	n.n.
#162	0.006	0.016	n.n.	n.n.	0.003	0.031	0.323	0.021
#128	0.011	0.064	n.n.	0.123	0.015	0.089	0.753	0.025
#167	0.044	0.116	n.n.	0.052	0.007	0.117	0.463	0.076
#156	0.089	0.133	n.n.	0.231	0.037	0.174	1.816	0.089
#157	0.046	0.028	n.n.	0.116	0.021	0.080	1.121	0.023
#169	0.030	0.041	n.n.	0.063	0.015	0.041	0.744	0.068
#188	0.002	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.005	0.002
#184	0.004	0.003	n.n.	0.000	0.000	0.002	0.012	0.002
#179	0.063	0.090	n.n.	0.109	0.009	0.019	0.089	0.029
#176	0.020	0.022	n.n.	0.022	0.001	0.008	0.062	0.007
#166	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#178	0.017	0.019	n.n.	0.011	0.002	0.009	0.073	0.012
#175	0.006	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.020	0.153	0.004
#187	0.109	0.417	n.n.	0.201	0.017	0.054	0.180	0.052
#183	0.070	0.167	n.n.	0.071	0.008	0.039	0.169	0.030
#185	0.010	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.002	0.059	0.004
#174/181	0.094	0.237	n.n.	0.207	0.016	0.043	0.453	0.046
#177	0.059	0.096	n.n.	0.093	n.n.	0.017	0.155	0.016
#171	0.035	0.031	n.n.	0.048	0.008	0.041	0.543	0.009
#173	0.004	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.006	0.215	n.n.
#172/192	0.027	0.044	n.n.	0.022	0.008	0.035	0.663	0.019
#180/193	0.228	0.887	n.n.	0.459	0.068	0.104	1.000	0.093
#191	0.019	0.012	n.n.	0.024	n.n.	0.023	0.567	0.016
#170/190	0.157	0.514	n.n.	0.319	0.139	0.103	2.838	0.057
#189	0.066	0.060	n.n.	0.089	0.058	0.083	1.701	0.046
#202	0.007	0.012	n.n.	0.003	0.003	0.003	0.061	0.003
#201	0.011	0.011	n.n.	0.005	0.005	0.007	0.144	0.005
#204	0.005	0.005	n.n.	0.002	0.003	0.008	0.149	0.002
#197	0.007	0.003	n.n.	0.004	0.001	0.004	0.220	0.001
#200	n.n.	n.n.	n.n.	0.000	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#198	0.009	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.008	0.430	0.004
#199	0.027	0.021	n.n.	0.024	0.005	0.011	0.456	0.012
#196/203	0.064	0.095	n.n.	0.066	0.027	0.049	1.570	0.024
#195	0.019	0.043	n.n.	0.029	0.011	0.024	0.928	0.003
#194	0.081	0.186	n.n.	0.061	0.080	0.056	2.773	0.027
#205	0.031	0.033	n.n.	0.028	0.012	0.023	1.294	0.011
#208	0.030	0.059	n.n.	0.013	n.n.	0.017	0.493	0.007
#207	0.045	0.091	n.n.	0.023	0.017	0.035	0.740	0.007
#206	0.127	0.453	n.n.	0.118	0.141	0.079	3.861	0.034
#209	0.116	0.773	n.n.	0.113	0.076	0.037	1.985	0.014
TEQ (nach Safe)	0.011	0.042	n.n.	0.042	0.005	0.024	0.172	0.028
TEQ (WHO)	0.006	0.020	n.n.	0.026	0.003	0.017	0.123	0.018

7. ANHANG

Temperatur	700-750°C	1100°C, Feuerraum	700-750°C	700-750°C	700-750°C	700-750°C	700-750°C	700-750°C
Versuch	Normalbetrieb mit Erdöl	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Instationärer Betrieb	Normalbetrieb
Laborlaufnummer	9911055	9911060	9911063	9911064	9911066	9911068	9911016	9911017
MCBz	2683.98	58709.49	29912.41	3579.00	6450.87	6912.45	27271.76	4760.74
1,3-DiCBz	105.20	5052.35	641.09	68.88	258.87	234.12	760.62	91.91
1,4-DiCBz	116.40	8619.33	770.99	381.81	452.02	528.54	461.33	161.67
1,2-DiCBz	119.97	2948.57	378.83	113.80	257.55	335.97	445.83	531.79
1,3,5-TriCBz	64.31	978.17	199.89	104.62	103.83	38.89	288.35	244.57
1,2,4-TriCBz	234.90	633.59	105.19	139.54	305.67	186.75	220.17	640.13
1,2,3-TriCBz	76.82	4457.28	933.65	300.46	266.48	387.93	1030.73	39.27
1,2,3,5-TeCBz	115.50	3021.81	241.14	135.66	99.69	99.94	290.51	175.35
1,2,4,5-TeCBz	87.58	2238.80	150.08	173.62	62.00	75.99	165.37	147.37
1,2,3,4-TeCBz	133.58	1699.42	221.06	175.32	302.11	290.87	302.87	70.39
PeCBz	59.90	3085.09	979.32	119.88	250.95	232.56	836.49	268.20
HxCBz	21.53	630.64	483.38	77.84	111.23	101.01	656.78	418.03

Temperatur	700-750°C	1100°C, Feuerraum	700-750°C	700-750°C	700-750°C	700-750°C	700-750°C	700-750°C
Versuch	Normalbetrieb mit Erdöl	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Instationärer Betrieb	Normalbetrieb
Laborlaufnummer	9911055	9911060	9911063	9911064	9911066	9911068	9911016	9911017
Naphthalin	23009.06	354.78	11222.09	28373.87	28618.76	13819.47	540886.67	22144.89
Dibenzofuran	798.65	1.17	65.77	47.60	987.07	145.56	1639.67	144.16
Dibenzo-p-dioxin	-	0.97	63.98	5.52	440.60	21.08	203.57	-
Benzol	71229.56	1952.49	13490.21	69778.51	-	143741.28	25794469.67	-
Toluol	2831.54	242.18	1094.02	6000.00	-	10709.21	51155.13	-
Ethylbenzol	64.58	747.25	59.16	2588.83	-	1445.07	8335.03	-
m/p-Xylol	157.87	3543.96	160.36	9238.58	-	4571.15	20806.88	-
o-Xylol	57.44	1607.14	56.07	3984.77	-	2174.89	4570.26	-
Fluoren	5090.84	13.72	-	-	-	-	-	-
Phenanthren	11473.80	93.08	-	-	-	-	-	-
Anthracen	4080.43	6.42	-	-	-	-	-	-
Fluoranthren	8577.75	52.65	-	-	-	-	-	-
Pyren	7662.35	10.48	-	-	-	-	-	-
Benz[a]anthracen	386.27	1.63	-	-	-	-	-	-
Chrysen	36.62	2.09	-	-	-	-	-	-
Benzo[e]pyren	71.23	9.62	-	-	-	-	-	-
Benzo[b]fluoranthren	43.30	4.59	-	-	-	-	-	-
Benzo[k]fluoranthren	16.14	1.75	-	-	-	-	-	-
Benzo[a]pyren	33.31	9.14	-	-	-	-	-	-
Dibenz[a,h]anthracen	2.66	0.32	-	-	-	-	-	-
Benzo[g,h,i]perylen	57.11	3.21	-	-	-	-	-	-
Indeno[1,2,3-cd]pyren	41.47	1.19	-	-	-	-	-	-

7. ANHANG

Probenahmen bei 200°C:

Versuch	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb mit Erdöl	Instationärer Betrieb	CO-Spitzen, Memory-Phase II, nach Klopfen
Laborlaufnummer	9911067	9911059	9911056	9911057	9911019	9911028
1-MCDD	7.757	0.887	0.935	1.008	1.523	0.570
2-MCDD	2.034	0.203	0.272	0.317	0.920	0.280
1,3-DiCDD	3.450	0.243	0.229	0.136	0.805	0.291
2,7/2,3/2,8-DiCDD	2.609	1.664	0.936	0.881	5.065	0.746
1,4/1,7-DiCDD	1.025	0.480	0.328	0.263	2.166	0.293
1,8-DiCDD	1.133	0.522	0.362	0.268	2.187	0.309
1,6-DiCDD	0.128	0.067	0.056	0.037	0.325	0.066
1,2-DiCDD	0.446	0.202	0.162	0.138	0.832	0.232
1,9-DiCDD	0.142	0.073	0.071	0.045	0.379	0.102
1,3,7-TriCDD	1.573	1.102	0.610	0.216	2.393	0.370
1,3,8-TriCDD	1.927	1.108	0.645	0.215	2.393	0.412
1,3,6-TriCDD	0.409	0.247	0.162	0.082	0.688	0.157
1,2,4-TriCDD	0.155	0.081	0.057	0.018	0.212	0.112
1,3,9/2,3,7-TriCDD	1.668	2.706	1.514	0.526	5.972	0.791
1,4,7-TriCDD	0.225	0.331	0.246	0.072	1.024	0.158
1,2,3-TriCDD	0.232	0.097	0.060	0.034	0.290	0.175
1,7,8-TriCDD	0.342	0.466	0.314	0.126	1.247	0.244
1,2,7-TriCDD	0.449	0.869	0.389	0.208	2.549	0.346
1,2,8-TriCDD	0.441	0.687	0.342	0.179	2.247	0.295
1,4,6-TriCDD	0.097	0.125	0.076	0.039	0.667	0.154
1,2,6-TriCDD	0.139	0.172	0.086	0.055	0.772	0.172
1,2,9-TriCDD	0.158	0.207	0.112	0.075	1.006	0.228
2,3,7,8-TCDD	0.245	1.086	0.451	0.163	2.564	0.209
1,3,6,8-TCDD	1.069	0.723	0.316	0.110	1.934	0.262
1,3,7,9-TCDD	0.732	0.758	0.310	0.105	1.824	0.197
1,3,7,8-TCDD	0.723	2.631	1.082	0.303	5.075	0.434
1,3,6,9/1,2,4,7/1,2,4,8-TCDD	0.389	1.085	0.390	0.134	2.946	0.358
1,2,6,8-TCDD	0.204	0.692	0.245	0.085	1.604	0.197
1,4,7,8-TCDD	0.121	0.368	0.187	0.051	1.077	0.115
1,2,4,6/1,2,4,9-TCDD	0.220	0.629	0.210	0.089	1.647	0.192
1,2,3,4/1,2,3,7/1,2,3,8-TCDD	0.331	0.789	0.287	0.114	2.267	0.320
1,2,3,6/1,2,7,9-TCDD	0.308	1.170	0.434	0.161	2.834	0.245
1,2,7,8/1,4,6,9-TCDD	0.057	1.343	0.525	0.172	3.213	0.316
1,2,3,9-TCDD	0.066	0.156	0.077	0.031	0.630	0.127
1,2,6,9-TCDD	n.n.	0.224	0.142	0.035	n.n.	0.130
1,2,6,7-TCDD	0.068	0.187	0.080	0.014	0.923	0.073
1,2,8,9-TCDD	0.073	0.185	0.071	0.027	0.622	0.093
1,2,3,7,8-PeCDD	0.394	1.752	0.748	0.221	6.193	1.091
1,2,4,6,8/1,2,4,7,9-PeCDD	0.562	1.464	0.713	0.255	5.401	1.467
1,2,3,6,8-PeCDD	0.485	1.031	0.379	0.169	3.446	0.990
1,2,4,7,8-PeCDD	0.387	1.509	0.732	0.198	4.679	0.787
1,2,3,7,9-PeCDD	0.408	1.157	0.432	0.164	4.529	0.988
1,2,3,4,7/1,2,4,6,9-PeCDD	0.190	0.394	0.202	0.066	1.904	0.490
1,2,3,6,9-PeCDD	0.114	0.355	0.145	0.055	1.729	0.455
1,2,4,6,7-PeCDD	0.149	0.526	0.173	0.082	2.049	0.408
1,2,4,8,9-PeCDD	0.133	0.486	0.247	0.070	1.895	0.458
1,2,3,4,6-PeCDD	0.042	0.128	0.046	0.045	0.973	0.311
1,2,3,6,7-PeCDD	0.160	1.013	0.328	0.209	4.546	0.714
1,2,3,8,9-PeCDD	0.193	0.990	0.444	0.264	6.608	1.216
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.167	0.300	0.421	0.109	1.830	1.380
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.255	0.364	0.478	0.133	2.235	2.349
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.244	0.517	0.486	0.173	3.879	2.378
1,2,3,4,6,8/1,2,4,6,7,9/1,2,4,6,8,9-HxCDD	0.542	0.832	0.920	0.262	4.489	4.560
1,2,3,6,7,9/1,2,3,6,8,9-HxCDD	0.531	1.063	1.460	0.302	5.713	5.360
1,2,3,4,6,9-HxCDD	0.070	0.143	0.134	0.074	1.072	1.058
1,2,3,4,8,7-HxCDD	0.167	0.279	0.306	0.125	2.192	1.472
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	2.437	0.798	2.155	1.000	8.793	20.872
1,2,3,4,6,7,9-HpCDD	2.290	0.534	2.028	0.966	8.655	14.630
OCDD	11.486	2.553	3.419	3.296	26.122	48.162

7. ANHANG

Versuch Laborlaufnummer	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb mit Erdöl	Instationärer Betrieb	CO-Spitzen, Memory-Phase II, nach Klopfen	
	9911067	9911059	9911056	9911057	9911019	9911028	
1-MCDF	44.373	8.008	7.134	15.315	68.271		14.505
3-MCDF	111.904	24.399	21.256	33.453	146.641		27.939
2-MCDF	104.699	12.175	20.398	27.874	119.690		15.100
4-MCDF	18.617	3.091	1.761	11.531	8.307		9.856
1,3-DiCDF	13.014	10.004	3.317	6.281	18.209		6.745
1,7-DiCDF	15.930	19.647	4.779	8.618	30.604		4.681
1,4-DiCDF	0.095	0.015	0.007	0.040	0.062		0.110
1,8-DiCDF	8.588	19.790	4.382	8.150	38.244		6.554
1,6-DiCDF	2.457	2.008	0.479	2.841	5.345		3.239
1,2-DiCDF	9.507	4.856	3.160	5.806	21.047		9.831
2,4-DiCDF	15.370	5.089	2.449	6.407	27.341		34.521
3,7-DiCDF	14.736	41.146	6.208	9.350	33.950		7.532
2,7-DiCDF	0.043	0.475	0.003	0.028	0.050		0.055
2,3-DiCDF	18.722	24.675	8.365	11.405	45.902		9.645
2,8/3,8-DiCDF	18.607	10.469	6.271	9.425	32.015		19.857
2,6-DiCDF	11.466	18.636	5.213	6.724	27.698		8.342
1,9/3,4-DiCDF	6.721	7.757	2.930	4.417	17.595		3.491
4,8-DiCDF	8.955	6.975	2.853	4.491	23.921		5.747
1,3,7-TriCDF	10.084	36.314	5.969	6.296	29.389		5.169
1,3,8-TriCDF	8.436	28.225	4.996	4.864	19.682		4.069
1,3,6-TriCDF	2.920	8.139	1.848	1.635	10.963		2.097
1,3,4/1,4,8-TriCDF	3.273	10.861	2.051	2.083	11.095		4.136
1,2,4/1,6,7-TriCDF	4.322	8.659	1.459	2.891	14.084		9.217
1,7,8-TriCDF	7.042	22.446	4.053	4.868	21.924		5.052
1,2,3-TriCDF	2.231	2.550	0.895	1.101	5.642		7.743
1,2,7-TriCDF	6.121	16.202	4.091	3.837	20.542		4.175
1,2,9-TriCDF	1.252	2.772	0.907	0.711	7.056		1.880
1,3,9-TriCDF	1.390	3.117	0.407	1.470	4.067		1.651
2,4,7-TriCDF	4.744	12.184	2.331	2.670	19.288		6.017
1,2,6/1,2,8-TriCDF	4.293	9.364	2.033	2.564	16.682		2.536
2,4,8-TriCDF	1.515	2.165	0.571	0.991	7.459		2.066
1,4,9-TriCDF	3.417	7.776	1.845	2.052	14.008		5.734
2,3,7-TriCDF	3.085	3.453	1.127	1.154	13.875		8.513
1,6,8/2,3,4/2,3,8-TriCDF	8.556	25.880	4.094	5.283	30.912		8.131
2,3,6/3,4,7-TriCDF	0.048	0.067	0.013	0.010	0.174		0.076
2,6,7-TriCDF	9.205	13.336	3.212	4.376	27.610		26.457
1,4,6/1,4,7-TriCDF	9.910	28.820	4.253	3.691	36.817		12.068
3,4,6-TriCDF	3.336	6.520	1.369	1.751	12.931		4.615
2,4,6-TriCDF	3.602	5.968	1.525	1.436	13.758		8.106
2,3,7,8-TCDF	2.103	9.975	2.421	1.434	11.964		1.870
1,3,6,8-TCDF	3.277	17.755	2.509	2.155	12.414		2.129
1,3,7,8/1,3,7,9-TCDF	7.968	62.138	7.080	8.208	41.683		5.217
1,3,4,7-TCDF	2.338	14.159	1.653	2.151	15.329		2.090
1,4,6,8-TCDF	1.788	10.648	1.724	1.599	13.893		2.882
1,2,4,7/1,3,6,7-TCDF	3.318	20.078	2.483	3.077	22.526		2.896
1,3,4,8-TCDF	1.970	11.914	1.594	1.744	13.570		2.162
1,2,4,8/1,3,4,6-TCDF	1.700	8.066	1.396	1.400	11.718		2.591
1,2,4,8/1,2,6,8/1,2,3,7/1,4,7,8/1,3,6,9-TCDF	6.402	36.075	4.473	5.979	36.918		5.902
1,2,3,4/1,2,3,8/1,2,3,8/1,4,6,7/1,6,7,8/2,4,6,8-TCDF	5.827	23.971	4.155	4.841	46.878		21.382
1,3,4,9-TCDF	0.320	1.623	0.206	0.257	2.259		1.090
1,2,7,8-TCDF	2.837	16.559	2.804	2.947	20.945		2.740
1,2,6,7-TCDF	1.045	9.598	1.629	1.774	14.268		2.094
1,2,7,9/1,4,6,9-TCDF	0.128	11.705	0.188	0.201	2.240		2.149
1,2,4,9/2,3,6,8-TCDF	1.321	0.198	2.829	1.812	16.797		4.319
2,4,6,7-TCDF	1.434	7.104	2.048	1.495	15.282		8.565
1,2,3,9/2,3,4,7-TCDF	1.812	8.151	2.176	1.716	16.855		9.545
1,2,6,9-TCDF	1.983	8.246	1.119	1.563	11.395		4.095
2,3,4,8-TCDF	1.433	3.457	2.421	0.842	11.964		3.959
2,3,4,6-TCDF	1.521	2.133	0.841	0.714	10.406		7.025
2,3,6,7-TCDF	2.829	14.888	1.998	2.332	18.563		5.395
3,4,6,7-TCDF	2.091	10.763	1.971	1.446	10.637		7.325

7. ANHANG

Versuch	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb mit Erdöl	Instationärer Betrieb	CO-Spitzen, Memory-Phase II, nach Klopfen
Laborlaufnummer	9911067	9911059	9911056	9911057	9911019	9911028
1,2,3,7,8/1,2,3,4,8-PeCDF	0.923	11.358	1.961	1.167	27.642	4.383
2,3,4,7,8-PeCDF	1.610	5.398	2.502	0.787	13.152	4.817
1,3,4,6,8-PeCDF	1.079	8.111	2.081	0.569	11.287	2.944
1,2,4,6,8-PeCDF	0.787	6.294	2.119	0.489	9.619	2.769
1,3,6,7,8-PeCDF	0.068	10.408	2.083	0.718	12.471	1.998
1,3,4,7,8-PeCDF	0.593	3.561	0.528	0.138	2.872	0.547
1,3,4,7,9/1,2,3,6,8-PeCDF	3.220	15.009	4.105	1.084	18.367	3.524
1,2,4,7,8-PeCDF	2.212	7.637	3.016	0.536	12.500	2.047
1,2,4,7,9/1,3,4,6,7-PeCDF	2.255	7.241	1.903	0.496	11.658	3.037
1,2,4,6,7-PeCDF	1.529	4.056	1.342	0.379	8.738	2.163
1,2,3,4,7/1,4,6,7,8-PeCDF	2.111	5.427	1.552	0.459	6.264	3.353
1,3,4,6,9-PeCDF	0.400	1.110	0.286	0.088	2.007	0.514
1,2,3,4,6-PeCDF	0.586	0.473	0.208	0.111	3.007	2.632
1,2,3,7,9-PeCDF	0.374	2.104	0.161	0.127	1.913	0.445
1,2,3,6,7-PeCDF	1.208	3.811	1.177	0.344	8.357	1.505
1,2,4,6,9/1,2,6,7,8-PeCDF	1.547	4.041	1.659	0.445	8.907	3.243
1,2,6,7,9-PeCDF	0.283	0.780	0.158	0.049	2.447	0.543
1,2,3,6,9-PeCDF	0.236	1.057	0.154	0.085	1.919	0.390
2,3,4,6,8-PeCDF	1.683	3.038	1.444	0.645	13.439	8.118
1,2,3,4,9-PeCDF	0.249	0.229	0.063	0.081	1.636	2.438
1,2,4,8,9-PeCDF	0.335	0.954	0.242	0.125	2.918	1.444
1,2,3,8,9-PeCDF	0.236	0.485	0.121	0.112	2.110	0.801
2,3,4,8,7-PeCDF	3.875	3.316	2.528	1.044	14.316	13.771
1,2,3,4,7,8/1,2,3,4,7,9-HxCDF	1.821	5.620	4.734	0.999	22.457	11.333
1,2,3,6,7,8-HxCDF	1.946	6.394	5.113	1.001	22.660	11.767
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.184	0.410	0.389	0.099	1.315	0.936
2,3,4,6,7,8-HxCDF	3.587	1.613	3.146	0.848	12.389	17.701
1,2,3,4,6,8-HxCDF	1.560	4.653	4.370	0.556	14.116	15.357
1,3,4,8,7,8/1,3,4,6,7,9-HxCDF	2.962	15.714	7.914	1.430	34.727	13.747
1,2,4,6,7,8-HxCDF	2.663	10.382	9.419	1.191	28.362	12.423
1,2,4,6,7,9-HxCDF	0.749	2.278	2.096	0.269	5.475	5.116
1,2,4,6,8,9-HxCDF	0.489	0.633	0.710	0.131	n.n.	2.673
1,2,3,4,6,7-HxCDF	2.548	3.870	3.648	0.799	17.742	22.019
1,2,3,6,7,9-HxCDF	0.503	1.573	1.131	0.230	4.027	3.102
1,2,3,4,6,9/1,2,3,6,8,9-HxCDF	0.951	1.031	1.285	0.318	5.237	7.016
1,2,3,4,8,9-HxCDF	0.461	0.304	0.360	0.167	2.679	4.955
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	12.130	4.404	7.537	2.699	54.735	65.639
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	1.781	0.516	1.421	0.421	5.033	8.597
1,2,3,4,6,7,9-HpCDF	3.066	0.667	2.120	0.633	9.067	18.971
1,2,3,4,6,8,9-HpCDF	4.750	0.333	1.381	0.535	6.558	9.652
OCDF	15.525	1.819	5.749	1.989	17.120	36.701
I-TEQ (NATO/CCMS)	2.514	7.809	4.013	1.251	22.221	9.389
I-TEQ (PCDD nach NATO/CCMS)	0.544	2.090	0.988	0.328	6.569	1.622
I-TEQ (PCDF nach NATO/CCMS)	1.970	5.719	3.024	0.923	15.652	7.787
I-TEQ (WHO)	2.687	8.682	4.378	1.357	25.278	9.859
I-TEQ (PCDD nach WHO)	0.731	2.964	1.359	0.436	9.642	2.124
I-TEQ (PCDF nach WHO)	1.956	5.717	3.019	0.921	15.636	7.734

7. ANHANG

Versuch	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb mit Erdöl	Instationärer Betrieb	CO-Spitzen, Memory-Phase II, nach Klopfen
Laborlaufnummer	9911067	9911059	9911056	9911057	9911019	9911028
#1	5.308	0.192	0.651	0.296	59.319	43.864
#2	12.380	0.729	1.343	1.273	6.101	90.463
#3	7.641	0.362	0.828	0.859	2.311	44.719
#4/10	0.459	0.074	0.245	0.219	24.524	58.871
#7/9	1.036	0.278	0.312	0.197	n.n.	n.n.
#8	0.948	0.133	0.153	0.179	3.634	71.133
#5/8	1.490	0.348	0.867	0.659	28.848	70.963
#14	0.970	0.087	0.022	0.167	n.n.	2.980
#11	1.659	0.554	0.509	0.558	0.745	15.981
#12	2.800	0.232	0.779	0.886	4.212	14.107
#13	1.505	0.254	0.423	0.597	4.212	14.363
#15	0.417	0.164	0.215	0.260	10.324	n.n.
#19	0.058	0.017	0.021	0.059	0.454	2.064
#30	n.n.	0.004	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#18	2.032	0.569	0.557	1.120	3.869	22.824
#17	0.541	0.142	0.125	0.298	0.980	4.213
#24/27	0.088	0.036	n.n.	0.037	0.272	2.532
#16	0.705	0.259	0.183	0.413	1.174	11.735
#32	0.696	0.275	0.243	0.498	2.704	14.619
#23/34	0.185	0.050	0.034	0.028	n.n.	n.n.
#29	0.156	0.137	0.068	0.041	n.n.	0.829
#26	0.422	0.219	0.140	0.254	1.821	6.363
#25	0.325	0.211	0.091	0.101	0.325	1.541
#28/31	4.369	1.837	1.598	2.657	15.381	73.337
#21	1.483	0.008	n.n.	0.016	n.n.	4.337
#20/30	1.870	0.633	0.653	0.942	3.477	21.393
#22	0.838	0.338	0.293	0.535	2.248	13.460
#36	0.253	0.140	0.071	0.086	n.n.	n.n.
#39	0.176	0.041	0.028	0.085	0.773	2.877
#35	0.914	0.464	0.393	0.401	0.448	1.813
#37	0.667	0.330	0.319	0.384	0.427	1.813
#54	0.001	0.003	n.n.	0.002	0.007	0.071
#50	0.003	0.004	n.n.	0.002	n.n.	0.017
#53	0.910	0.288	0.159	0.554	2.018	3.129
#51	0.243	0.078	0.039	0.132	0.411	0.504
#45	0.836	0.275	0.160	0.521	1.421	2.815
#46	0.310	0.111	0.047	0.164	0.238	0.704
#69	0.310	0.111	0.047	0.164	0.237	0.699
#73	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#43/52	4.350	1.700	1.193	2.564	9.784	8.635
#49	2.155	0.741	0.616	1.169	7.081	8.974
#47/48/62/65/75	1.312	0.514	0.340	0.727	3.643	5.305
#44	3.235	1.088	0.665	1.872	5.883	9.893
#59	0.389	1.088	0.665	1.872	0.747	9.893
#42	0.953	0.363	0.170	0.569	1.754	3.022
#41/71/72	1.143	0.405	0.228	0.683	2.174	3.777
#64/68	1.944	0.620	0.401	1.082	4.226	5.914
#40	0.487	0.341	0.241	0.448	1.245	2.400
#57	0.131	0.093	0.042	n.n.	n.n.	0.962
#87	0.222	0.300	0.085	0.102	0.388	0.590
#63	0.135	0.033	0.036	0.077	0.368	0.577
#74	1.306	0.825	0.521	0.832	5.926	6.327

7. ANHANG

Versuch	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb mit Erdöl	Instationärer Betrieb	CO-Spitzen, Memory-Phase II, nach Klopfen
Laborlaufnummer	9911067	9911059	9911056	9911057	9911019	9911028
#76	0.170	0.087	0.033	0.053	0.242	6.349
#70	3.197	1.743	1.105	2.067	10.324	12.866
#66/80	2.393	1.864	0.985	1.453	7.500	9.719
#55	0.236	0.133	0.089	n.n.	n.n.	n.n.
#56/80	1.570	0.734	0.510	0.933	2.909	4.089
#79	0.456	0.475	0.380	0.280	0.342	0.555
#78	0.312	0.165	0.160	0.142	0.263	0.454
#81	0.196	0.145	0.085	0.127	0.192	0.196
#77	0.974	0.880	0.641	0.644	1.220	1.078
#104	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#96	0.029	0.006	0.003	0.015	0.010	0.021
#103	n.n.	0.008	n.n.	0.004	0.011	0.027
#100	0.003	0.008	0.006	n.n.	0.006	0.007
#94	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.012	n.n.
#98/102	0.053	0.024	0.013	0.024	0.087	0.079
#88/95/121	2.213	0.777	0.470	1.420	4.582	2.926
#91	0.216	0.082	0.036	0.118	0.392	0.201
#92	0.257	0.140	0.072	0.151	0.894	0.612
#84	0.446	0.164	0.091	0.272	0.517	0.411
#89/90	0.039	0.062	0.013	0.019	0.090	0.169
#101	1.988	0.930	0.654	1.208	5.208	2.011
#99	0.357	0.191	0.111	0.189	0.982	0.579
#112/119	0.022	0.050	0.016	n.n.	0.040	0.094
#83	0.153	0.058	0.040	0.038	0.369	0.626
#86/97/125	0.404	0.149	0.091	0.210	0.680	0.681
#116/117	0.022	0.149	n.n.	0.210	0.035	0.269
#87/111/115	0.548	0.241	0.151	0.363	0.931	0.912
#85/120	0.176	0.165	0.054	0.093	0.269	0.171
#110	1.469	0.500	0.328	0.839	2.837	1.836
#82	0.253	0.116	0.130	0.084	0.456	0.174
#124	0.053	0.110	0.047	0.033	0.134	0.165
#107/109/123	0.214	0.234	0.159	0.113	0.538	0.550
#118	0.742	0.735	0.434	0.430	1.974	1.280
#114	0.043	0.029	0.030	0.018	0.151	0.257
#122	0.105	0.057	0.054	0.039	0.275	0.365
#105	0.404	0.308	0.251	0.210	0.796	0.827
#127	0.004	0.005	n.n.	n.n.	0.028	n.n.
#126	0.445	0.324	0.426	0.289	1.708	1.114
#155	0.002	0.002	0.002	0.001	n.n.	0.007
#150	0.004	0.006	0.002	0.004	0.001	0.003
#152	n.n.	0.001	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#145	0.005	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#148	n.n.	0.008	0.002	n.n.	n.n.	0.033
#136	0.504	0.169	0.057	0.302	0.381	0.117
#154	0.005	0.009	0.007	n.n.	0.011	0.025
#151	0.554	0.199	0.102	0.294	1.368	0.416
#135/144	0.334	0.132	0.050	0.188	0.717	0.292
#147	n.n.	0.062	0.020	0.058	0.384	0.145
#139/149	1.748	0.731	0.349	1.031	3.325	0.997
#140	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#134/143	0.055	0.024	0.006	0.039	0.126	0.054
#131/133/142	0.090	0.049	0.025	0.014	0.303	0.362

7. ANHANG

Versuch	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb mit Erdöl	Instationärer Betrieb	CO-Spitzen, Memory-Phase II, nach Klopfen
Laborlaufnummer	9911067	9911059	9911056	9911057	9911019	9911028
#165	0.090	0.049	0.025	0.014	0.017	0.079
#146/161	0.267	0.168	0.115	0.097	0.716	0.477
#153/168	1.716	0.828	0.531	0.980	4.236	1.148
#141	0.315	0.146	0.063	0.165	0.708	0.349
#137	0.019	0.052	0.018	0.040	0.121	0.221
#130	0.130	0.088	0.057	0.040	0.446	0.458
#163/164	0.483	0.234	0.155	0.292	1.107	0.654
#138/160	0.753	0.411	0.239	0.479	1.965	0.903
#158	0.326	0.442	0.270	0.513	0.702	0.497
#129	0.287	0.094	0.091	0.042	0.761	0.714
#166	n.n.	0.003	n.n.	n.n.	0.035	0.114
#159	0.026	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#162	0.026	0.041	0.034	n.n.	0.208	0.538
#128	0.307	0.090	0.100	0.016	0.382	0.567
#167	0.191	0.260	0.244	0.087	0.719	0.640
#156	0.396	0.209	0.264	0.182	1.216	1.109
#157	0.204	0.137	0.179	0.072	0.635	0.580
#169	0.129	0.113	0.246	0.101	1.415	0.903
#188	0.001	0.003	0.002	n.n.	0.001	0.007
#184	0.003	0.007	0.003	n.n.	0.009	0.020
#179	0.121	0.050	0.019	0.045	0.184	0.051
#176	0.033	0.017	0.008	0.014	0.058	0.024
#186	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#178	0.016	0.010	0.008	0.009	0.115	0.133
#175	0.021	0.012	0.009	n.n.	0.130	0.216
#187	0.156	0.088	0.045	0.069	0.523	0.270
#183	0.081	0.061	0.037	0.028	0.317	0.279
#185	0.005	n.n.	n.n.	n.n.	0.021	0.053
#174/181	0.202	0.102	0.041	0.118	0.477	0.241
#177	0.080	0.047	0.021	0.035	0.235	0.084
#171	0.084	0.043	0.035	0.030	0.255	0.176
#173	0.009	0.006	0.003	n.n.	0.069	0.088
#172/192	0.091	0.067	0.056	0.019	0.509	0.861
#180/193	0.347	0.202	0.192	0.188	1.149	0.985
#191	0.039	0.043	0.043	0.021	0.372	0.528
#170/190	0.572	0.209	0.247	0.208	1.443	1.654
#189	0.302	0.128	0.201	0.122	1.395	2.017
#202	0.006	0.004	0.003	0.002	0.010	0.042
#201	0.013	0.018	0.006	0.004	0.032	0.112
#204	0.009	0.011	0.010	0.005	0.032	0.103
#197	0.010	0.007	0.005	0.002	0.016	0.054
#200	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#198	0.011	0.009	0.011	0.004	0.054	0.348
#199	0.038	0.016	0.030	0.012	0.054	0.360
#196/203	0.180	0.053	0.092	0.046	0.254	1.056
#195	0.083	0.023	0.027	0.018	0.133	0.367
#194	0.405	0.094	0.153	0.088	0.427	1.921
#205	0.094	0.033	0.039	0.035	0.246	1.337
#208	0.097	0.030	0.040	0.021	0.138	0.339
#207	0.197	0.055	0.090	0.038	0.240	0.550
#206	0.559	0.141	0.229	0.136	0.550	2.986
#209	0.501	0.136	0.137	0.136	0.922	1.794
TEQ (nach Safe)	0.066	0.050	0.064	0.043	0.269	0.184
TEQ (WHO)	0.046	0.034	0.045	0.030	0.187	0.122

7. ANHANG

Versuch	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb mit Erdöl	Instationärer Betrieb	CO-Spitzen, Memory-Phase II, nach Klopfen
Laborlaufnummer	9911067	9911059	9911056	9911057	9911019	9911028
MCBz	25454.11	60169.24	18149.27	9004.57	76088.03	56887.32
1,3-DiCBz	663.69	2134.71	1305.81	174.34	761.30	900.42
1,4-DiCBz	651.62	1396.90	846.84	169.67	1838.06	1358.13
1,2-DiCBz	692.81	1237.70	1172.73	162.75	4929.28	985.42
1,3,5-TriCBz	159.96	190.58	57.11	45.68	150.02	98.82
1,2,4-TriCBz	756.27	1114.76	385.82	269.14	919.34	634.68
1,2,3-TriCBz	269.44	219.81	130.23	76.62	1058.09	435.49
1,2,3,5-TeCBz	345.90	483.10	220.32	69.46	550.26	295.27
1,2,4,5-TeCBz	196.45	414.31	172.13	60.84	547.94	203.18
1,2,3,4-TeCBz	296.32	307.66	181.94	38.50	843.69	414.71
PeCBz	589.23	1124.08	1091.06	293.49	1934.48	1274.42
HxCBz	377.05	510.95	458.70	95.03	711.44	613.44

Versuch	Instationärer Betrieb	CO-Spitzen
Laborlaufnummer	9911019	9911026
2-MCPh	3728.90	17228.46
4-MCPh	67.29	823.93
2,6-DiCPh	2743.70	3854.90
2,4-DiCPh	2863.81	3676.91
3,4-DiCPh	135.42	745.49
2,4,6-TriCPh	3174.25	12476.17
2,3,6-TriCPh	290.88	632.52
2,3,5-TriCPh	1809.56	2435.84
2,4,5-TriCPh	343.12	796.67
2,3,4-TriCPh	1264.32	4246.39
3,4,5-TriCPh	127.27	405.87
2,3,5,6-TeCPh	515.49	2915.45
2,3,4,6-TeCPh	4219.68	18160.98
2,3,4,5-TeCPh	1183.80	3913.11
PeCPh	2513.87	6303.89

Versuch	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb mit Erdöl	Instationärer Betrieb	CO-Spitzen, Memory-Phase II, nach Klopfen
Laborlaufnummer	9911067	9911059	9911056	9911057	9911019	9911028
Naphthalin	9527.11	22178.87	13951.14	13964.85	358198.99	44135.56
Dibenzofuran	0.76	4.25	13.18	21.83	182.68	6470.59
Dibenzo-p-dioxin	1.26	8.38	11.98	5.24	120.98	1788.24
Benzol	6012.27	-	-	12388.38	1552941.18	-
Toluol	828.00	-	-	268.63	96551.72	-
Ethylbenzol	111.41	-	-	5.51	5071.12	-
m/p-Xylol	473.79	-	-	7.74	9549.98	-
o-Xylol	205.70	-	-	4.25	471.05	-
Fluoren	-	-	-	886.27	-	1144.83
Phenanthren	-	-	-	1240.33	-	2288.20
Anthracen	-	-	-	124.91	-	611.07
Fluoranthren	-	-	-	1143.48	-	2218.45
Pyren	-	-	-	634.31	-	1458.92
Benz[a]anthracen	-	-	-	100.77	-	1437.40
Chrysen	-	-	-	122.94	-	1538.27
Benzo[e]pyren	-	-	-	951.53	-	6659.28
Benzo[b]fluoranthren	-	-	-	558.91	-	2017.76
Benzo[k]fluoranthren	-	-	-	197.87	-	733.15
Benzo[a]pyren	-	-	-	22.67	-	62.83
Dibenz[a,h]anthracen	-	-	-	81.46	-	552.85
Benzo[g,h,i]perylen	-	-	-	452.53	-	1999.35
Indeno[1,2,3-cd]pyren	-	-	-	188.23	-	1207.88

7. ANHANG

Versuch	CO-Spitzen, Memory-Phase I	CO-Spitzen	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb
Laborlaufnummer	9911027	9911026	9911004	9911020	9911021	9911058
1-MCDD	8.357	41.843	0.018	2.310	0.471	1.772
2-MCDD	4.194	13.583	n.n.	0.776	0.141	0.348
1,3-DiCDD	1.633	31.942	n.n.	0.668	0.195	0.344
2,7/2,3/2,8-DiCDD	5.240	27.705	0.170	2.323	1.352	2.069
1,4/1,7-DiCDD	3.428	11.038	0.063	0.800	0.374	0.603
1,8-DiCDD	3.458	12.950	0.077	0.768	0.403	0.640
1,6-DiCDD	0.735	1.420	n.n.	0.144	0.058	0.072
1,2-DiCDD	1.921	4.203	0.038	0.352	0.178	0.292
1,9-DiCDD	0.786	1.274	n.n.	0.162	0.072	0.085
1,3,7-TriCDD	4.965	20.543	0.214	0.830	0.379	0.876
1,3,8-TriCDD	5.479	24.465	0.222	0.876	0.382	0.870
1,3,6-TriCDD	1.902	5.630	0.040	0.241	0.104	0.211
1,2,4-TriCDD	0.935	1.780	0.007	0.092	0.040	0.068
1,3,9/2,3,7-TriCDD	11.896	15.249	0.462	1.587	1.000	2.143
1,4,7-TriCDD	2.380	2.072	0.058	0.325	0.147	0.278
1,2,3-TriCDD	1.273	2.381	0.015	0.116	0.053	0.106
1,7,8-TriCDD	3.026	1.574	0.108	0.563	0.309	0.408
1,2,7-TriCDD	5.903	5.276	0.168	0.668	0.387	0.513
1,2,8-TriCDD	5.410	3.637	0.189	0.590	0.364	0.563
1,4,6-TriCDD	2.008	1.384	0.021	0.187	0.096	0.061
1,2,6-TriCDD	2.193	1.106	0.025	0.208	0.105	0.097
1,2,9-TriCDD	2.842	2.346	0.047	0.212	0.122	0.116
2,3,7,8-TCDD	3.007	4.318	0.214	0.582	0.311	0.663
1,3,6,8-TCDD	3.464	22.431	n.n.	0.425	0.176	0.566
1,3,7,9-TCDD	2.882	11.149	0.160	0.467	0.203	0.494
1,3,7,8-TCDD	7.098	11.878	0.452	1.253	0.603	1.036
1,3,6,9/1,2,4,7/1,2,4,8-TCDD	4.810	7.081	0.222	0.589	0.261	0.591
1,2,6,8-TCDD	2.632	2.399	0.093	0.394	0.184	0.355
1,4,7,8-TCDD	1.554	1.595	0.214	0.264	0.101	0.216
1,2,4,6/1,2,4,9-TCDD	2.694	4.509	0.127	0.445	0.205	0.430
1,2,3,4/1,2,3,7/1,2,3,8-TCDD	3.972	7.496	0.191	0.499	0.254	0.523
1,2,3,6/1,2,7,9-TCDD	4.582	5.778	0.246	0.630	0.317	0.692
1,2,7,8/1,4,6,9-TCDD	4.704	5.791	0.284	0.736	0.370	0.934
1,2,3,9-TCDD	1.293	1.313	0.032	0.152	0.074	0.162
1,2,6,9-TCDD	1.698	1.498	n.n.	0.209	0.092	0.225
1,2,6,7-TCDD	0.938	1.077	0.031	0.143	0.067	0.133
1,2,8,9-TCDD	1.108	1.048	0.041	0.145	0.081	0.136
1,2,3,7,8-PeCDD	14.663	9.445	0.410	1.004	0.393	1.987
1,2,4,6,8/1,2,4,7,9-PeCDD	15.454	10.952	0.364	0.937	0.430	1.971
1,2,3,6,8-PeCDD	11.109	10.713	0.285	0.548	0.275	1.179
1,2,4,7,8-PeCDD	11.453	8.683	0.336	0.830	0.351	1.409
1,2,3,7,9-PeCDD	11.169	11.307	0.299	0.707	0.301	1.350
1,2,3,4,7/1,2,4,6,9-PeCDD	5.310	4.742	n.n.	0.464	0.214	0.419
1,2,3,6,9-PeCDD	4.978	2.958	0.089	0.293	0.132	0.425
1,2,4,6,7-PeCDD	5.526	3.223	0.086	0.369	0.146	0.532
1,2,4,8,9-PeCDD	5.600	2.697	0.125	0.364	0.158	0.501
1,2,3,4,6-PeCDD	3.831	2.448	n.n.	0.150	0.077	0.189
1,2,3,6,7-PeCDD	12.029	7.642	0.176	0.588	0.264	0.189
1,2,3,8,9-PeCDD	15.271	10.391	0.237	0.646	0.279	1.351
1,2,3,4,7,8-HxCDD	10.015	3.472	0.145	0.405	0.188	1.167
1,2,3,6,7,8-HxCDD	13.005	3.871	0.231	0.444	0.268	1.543
1,2,3,7,8,9-HxCDD	20.411	8.719	0.263	0.763	0.345	2.052
1,2,3,4,6,8/1,2,4,6,7,9/1,2,4,6,8,9-HxCDD	24.956	14.533	0.459	1.566	0.903	2.657
1,2,3,6,7,9/1,2,3,6,8,9-HxCDD	31.368	8.792	0.507	1.282	0.635	3.864
1,2,3,4,6,9-HxCDD	7.289	2.254	n.n.	0.207	0.169	0.417
1,2,3,4,6,7-HxCDD	14.887	5.100	0.192	0.516	0.323	1.050
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	50.996	10.804	1.494	1.937	2.420	14.449
1,2,3,4,6,7,9-HpCDD	51.448	8.696	1.387	1.859	2.319	12.889
OCDD	71.036	16.476	6.617	4.924	14.022	32.770

7. ANHANG

Versuch Laborlaufnummer	CO-Spitzen, Memory-Phase I	CO-Spitzen	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb
	9911027	9911026	9911004	9911020	9911021	9911058
1-MCDF	63.272	290.040	0.042	49.464	2.720	16.086
3-MCDF	159.684	1021.195	0.154	132.138	6.141	21.855
2-MCDF	138.140	1037.333	0.133	92.964	4.436	17.492
4-MCDF	12.785	70.853	0.006	9.511	0.432	2.565
1,3-DiCDF	41.602	85.126	0.469	11.370	4.200	9.370
1,7-DiCDF	34.043	65.094	0.896	20.484	8.174	17.434
1,4-DiCDF	0.322	0.603	n.n.	0.056	0.019	0.130
1,8-DiCDF	40.917	64.942	0.819	20.134	9.031	15.109
1,6-DiCDF	1.188	25.853	0.197	5.700	1.775	1.577
1,2-DiCDF	72.994	86.018	0.546	8.283	3.924	5.898
2,4-DiCDF	55.226	328.255	0.618	11.179	3.139	8.826
3,7-DiCDF	48.082	86.096	1.391	19.855	9.953	9.149
2,7-DiCDF	0.130	0.270	n.n.	0.100	0.060	0.083
2,3-DiCDF	61.318	125.714	1.674	24.244	11.680	14.241
2,8/3,6-DiCDF	145.362	108.712	1.079	15.345	6.953	7.811
2,6-DiCDF	64.342	90.180	1.104	13.636	5.427	5.682
1,9/3,4-DiCDF	26.213	55.108	0.653	8.544	4.229	4.254
4,6-DiCDF	46.250	87.396	0.613	9.114	3.657	4.181
1,3,7-TriCDF	45.300	59.448	3.081	14.104	7.969	19.178
1,3,8-TriCDF	34.635	49.521	2.800	11.165	6.396	14.480
1,3,6-TriCDF	21.294	24.223	0.983	4.326	2.098	4.083
1,3,4/1,4,8-TriCDF	27.058	29.453	1.121	4.754	2.286	5.207
1,2,4/1,6,7-TriCDF	12.232	53.513	1.277	5.728	2.713	4.195
1,7,8-TriCDF	35.421	57.843	2.607	9.157	5.357	10.635
1,2,3-TriCDF	63.017	33.921	0.512	1.521	0.913	1.680
1,2,7-TriCDF	37.640	46.908	2.114	7.425	4.807	8.863
1,2,9-TriCDF	20.580	16.739	0.489	2.109	0.875	1.335
1,3,9-TriCDF	3.554	17.113	0.355	1.694	0.752	1.397
2,4,7-TriCDF	64.122	48.718	1.579	7.888	4.086	2.085
1,2,6/1,2,8-TriCDF	34.198	39.125	1.559	6.718	4.639	4.228
2,4,8-TriCDF	10.485	26.447	0.445	2.412	1.388	0.930
1,4,9-TriCDF	45.994	48.142	1.147	5.710	3.164	2.716
2,3,7-TriCDF	83.361	43.334	0.821	3.815	1.656	0.880
1,6,8/2,3,4/2,3,8-TriCDF	75.418	84.247	3.612	13.190	9.539	6.385
2,3,6/3,4,7-TriCDF	0.528	0.193	n.n.	0.041	0.019	0.021
2,6,7-TriCDF	207.849	118.329	2.789	11.173	7.217	4.771
1,4,6/1,4,7-TriCDF	130.619	109.083	2.995	10.552	5.411	3.527
3,4,6-TriCDF	41.867	37.616	1.246	5.453	3.137	2.003
2,4,6-TriCDF	89.812	49.039	1.089	5.424	1.974	1.492
2,3,7,8-TCDF	16.374	27.736	1.298	3.916	2.234	3.385
1,3,6,8-TCDF	15.045	30.008	1.806	6.446	2.854	6.811
1,3,7,8/1,3,7,9-TCDF	41.113	94.735	5.111	17.172	9.671	19.524
1,3,4,7-TCDF	17.892	34.047	1.331	5.173	2.255	5.531
1,4,6,8-TCDF	20.974	35.318	1.136	4.615	1.737	3.183
1,2,4,7/1,3,6,7-TCDF	27.295	66.899	2.034	7.413	3.268	5.914
1,3,4,8-TCDF	17.183	35.099	1.216	4.325	1.840	3.294
1,2,4,8/1,3,4,6-TCDF	20.586	31.157	0.991	3.097	1.512	2.106
1,2,4,6/1,2,6,8/1,2,3,7/1,4,7,8/1,3,6,9-TCDF	69.702	53.396	3.807	15.635	7.647	9.949
1,2,3,4/1,2,3,6/1,2,3,8/1,4,6,7/1,6,7,8/2,4,6,8-TCDF	105.119	107.617	2.938	12.857	3.986	7.857
1,3,4,9-TCDF	6.381	6.564	0.192	0.731	0.326	0.504
1,2,7,8-TCDF	25.279	44.934	1.969	5.991	3.575	6.082
1,2,6,7-TCDF	21.146	34.570	1.133	3.089	1.650	4.035
1,2,7,9/1,4,6,9-TCDF	9.730	6.793	0.158	0.615	0.298	0.580
1,2,4,9/2,3,6,8-TCDF	30.309	45.284	1.516	4.794	2.484	0.150
2,4,6,7-TCDF	50.364	47.019	1.217	3.784	1.686	2.880
1,2,3,9/2,3,4,7-TCDF	56.465	52.178	1.373	4.304	1.969	3.330
1,2,6,9-TCDF	29.472	31.432	0.932	3.336	1.577	2.812
2,3,4,8-TCDF	22.566	22.506	1.298	3.921	2.235	1.733
2,3,4,6-TCDF	48.643	30.143	0.585	2.050	0.803	1.516
2,3,6,7-TCDF	40.176	50.903	1.789	5.876	2.531	4.883
3,4,6,7-TCDF	46.712	33.277	1.232	4.146	1.311	2.846

7. ANHANG

Versuch	CO-Spitzen, Memory-Phase I	CO-Spitzen	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb
Laborlaufnummer	9911027	9911026	9911004	9911020	9911021	9911058
1,2,3,7,8/1,2,3,4,8-PeCDF	51.710	57.317	2.024	6.045	2.495	7.114
2,3,4,7,8-PeCDF	39.531	32.362	1.052	4.152	1.619	4.327
1,3,4,6,8-PeCDF	28.125	28.921	0.848	3.786	1.180	3.670
1,2,4,6,8-PeCDF	26.779	23.274	0.775	2.837	1.072	3.047
1,3,6,7,8-PeCDF	24.157	29.385	1.166	4.214	1.557	5.613
1,3,4,7,8-PeCDF	5.502	8.911	0.339	1.145	0.425	1.344
1,3,4,7,9/1,2,3,6,8-PeCDF	40.057	47.046	1.791	7.137	2.422	9.477
1,2,4,7,8-PeCDF	27.003	31.528	1.134	3.964	1.502	5.680
1,2,4,7,9/1,3,4,6,7-PeCDF	32.215	34.292	1.025	3.567	1.200	4.037
1,2,4,6,7-PeCDF	26.640	25.854	0.559	2.306	0.834	2.418
1,2,3,4,7/1,4,6,7,8-PeCDF	35.296	34.184	0.810	2.994	1.059	3.532
1,3,4,6,9-PeCDF	5.824	6.010	0.168	0.639	0.213	0.637
1,2,3,4,6-PeCDF	17.680	10.521	0.222	0.728	0.348	0.784
1,2,3,7,9-PeCDF	4.019	6.605	0.241	0.663	0.279	0.812
1,2,3,6,7-PeCDF	23.783	24.797	0.635	2.214	0.765	2.561
1,2,4,6,9/1,2,6,7,8-PeCDF	25.449	23.643	0.723	2.500	1.056	2.852
1,2,6,7,9-PeCDF	6.873	5.109	0.193	0.483	0.352	0.439
1,2,3,6,9-PeCDF	5.383	6.084	0.155	0.734	0.275	0.545
2,3,4,6,8-PeCDF	49.239	35.233	0.782	3.256	1.562	2.892
1,2,3,4,9-PeCDF	11.041	5.670	0.070	0.344	0.249	0.488
1,2,4,8,9-PeCDF	8.971	5.699	0.155	0.698	0.371	0.596
1,2,3,8,9-PeCDF	5.425	6.433	0.161	0.511	0.247	0.560
2,3,4,6,7-PeCDF	75.539	58.380	1.411	5.550	2.135	5.618
1,2,3,4,7,8/1,2,3,4,7,9-HxCDF	89.046	43.096	1.383	6.201	1.893	11.002
1,2,3,6,7,8-HxCDF	93.414	47.028	1.555	6.502	1.978	10.820
1,2,3,7,8,9-HxCDF	5.402	2.406	0.147	0.517	0.207	0.831
2,3,4,6,7,8-HxCDF	70.470	23.613	1.433	4.179	2.405	7.802
1,2,3,4,6,8-HxCDF	71.584	26.644	1.048	4.624	1.821	4.742
1,3,4,6,7,8/1,3,4,6,7,9-HxCDF	120.659	59.134	2.124	10.077	2.872	15.668
1,2,4,6,7,8-HxCDF	111.327	50.504	1.787	7.029	2.585	11.725
1,2,4,6,7,9-HxCDF	24.342	11.155	0.353	1.491	0.492	2.432
1,2,4,6,8,9-HxCDF	n.n.	2.998	n.n.	n.n.	n.n.	0.086
1,2,3,4,6,7-HxCDF	93.641	29.668	1.382	4.629	2.104	7.788
1,2,3,6,7,9-HxCDF	17.763	7.276	0.334	1.255	0.352	2.187
1,2,3,4,6,9/1,2,3,6,8,9-HxCDF	32.721	12.758	0.320	1.152	0.509	2.906
1,2,3,4,8,9-HxCDF	17.319	3.846	0.183	0.718	0.519	1.536
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	318.602	80.542	6.292	19.355	11.996	46.471
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	33.122	9.279	0.628	1.981	1.065	5.214
1,2,3,4,6,7,9-HpCDF	65.986	11.909	1.024	3.238	1.455	9.618
1,2,3,4,6,8,9-HpCDF	49.520	14.305	0.875	1.986	1.193	5.965
OCDF	72.704	18.961	3.701	5.363	6.400	22.539
I-TEQ (NATO/CCMS)	68.675	45.123	1.786	5.998	2.568	8.752
I-TEQ (PCDD nach NATO/CCMS)	15.263	10.771	0.504	1.270	0.625	2.310
I-TEQ (PCDF nach NATO/CCMS)	53.411	34.352	1.282	4.728	1.943	6.443
I-TEQ (WHO)	75.877	49.814	1.982	6.491	2.746	9.696
I-TEQ (PCDD nach WHO)	22.531	15.479	0.703	1.767	0.809	3.274
I-TEQ (PCDF nach WHO)	53.346	34.335	1.278	4.724	1.937	6.422

7. ANHANG

Versuch	CO-Spitzen, Memory-Phase I	CO-Spitzen	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb
Laborlaufnummer	9911027	9911026	9911004	9911020	9911021	9911058
#1	200.943	118.134	80.088	4.928	0.759	6.314
#2	54.035	230.870	15.921	11.607	1.596	4.605
#3	67.544	123.994	n.n.	7.530	0.889	4.531
#4/10	136.615	1.928	n.n.	1.207	0.253	8.625
#7/9	39.996	11.027	n.n.	1.562	0.335	n.n.
#6	10.336	8.745	n.n.	0.798	0.304	n.n.
#5/8	263.344	7.159	55.783	5.202	2.000	12.878
#14	n.n.	12.280	29.399	0.606	0.142	n.n.
#11	5.842	10.172	n.n.	3.562	0.804	n.n.
#12	68.308	31.864	n.n.	2.428	0.532	n.n.
#13	67.858	31.898	n.n.	2.425	0.532	n.n.
#15	83.587	2.469	47.491	0.793	0.340	10.870
#19	1.861	0.170	0.126	0.208	0.029	0.233
#30	n.n.	0.445	0.195	n.n.	n.n.	n.n.
#18	49.831	1.920	2.807	3.722	0.772	3.024
#17	9.099	1.003	0.401	1.021	0.231	0.673
#24/27	2.519	0.560	n.n.	0.212	0.048	n.n.
#16	13.161	2.476	1.913	1.497	0.369	0.601
#32	22.624	0.792	1.924	1.652	0.326	1.947
#23/34	1.861	2.340	n.n.	0.346	0.045	n.n.
#29	2.246	2.536	n.n.	0.602	0.045	n.n.
#26	8.941	1.865	0.745	0.631	0.236	0.781
#25	2.246	2.366	0.756	0.288	0.156	0.781
#28/31	125.803	6.235	12.692	9.194	2.776	10.508
#21	n.n.	16.373	n.n.	0.360	0.037	n.n.
#20/30	38.599	10.169	1.386	3.575	1.090	0.888
#22	21.081	2.061	1.054	1.921	0.469	0.413
#36	2.269	2.797	n.n.	0.149	0.093	n.n.
#39	3.903	1.332	n.n.	0.197	0.045	0.215
#35	1.657	14.336	n.n.	0.601	0.339	0.144
#37	3.381	4.603	0.229	0.718	0.393	0.251
#54	0.163	0.019	n.n.	0.067	n.n.	0.010
#50	n.n.	0.108	n.n.	0.025	0.005	n.n.
#53	6.243	0.887	0.242	1.750	0.242	0.630
#51	0.684	0.328	n.n.	0.282	0.053	n.n.
#45	5.044	0.981	0.207	1.754	0.349	0.637
#46	0.802	0.442	n.n.	0.505	0.095	n.n.
#69	0.802	0.210	n.n.	0.503	0.094	n.n.
#73	n.n.	0.122	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#43/52	18.111	5.991	1.406	7.162	2.102	2.760
#49	19.445	2.413	1.133	4.221	1.114	1.545
#47/48/62/65/75	10.185	1.828	0.638	2.776	0.631	0.968
#44	22.528	3.739	0.955	5.837	1.286	1.836
#59	1.629	0.762	0.219	0.494	0.266	1.836
#42	6.197	1.820	0.345	1.638	0.265	0.249
#41/71/72	7.572	1.449	0.391	2.072	0.325	0.302
#64/68	14.636	1.954	0.518	3.456	0.754	1.054
#40	5.565	3.326	n.n.	1.610	0.397	0.155
#57	8.380	1.908	0.132	n.n.	0.075	n.n.
#67	4.594	2.055	n.n.	0.240	0.149	0.110
#63	7.527	2.215	n.n.	0.315	n.n.	n.n.
#74	14.656	2.479	0.753	2.871	0.839	1.028

7. ANHANG

Versuch	CO-Spitzen, Memory-Phase I	CO-Spitzen	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb
Laborlaufnummer	9911027	9911026	9911004	9911020	9911021	9911058
#76	29.207	1.902	0.753	2.881	0.846	1.033
#70	29.155	5.506	2.945	6.425	1.949	2.770
#66/80	22.814	6.000	1.536	5.334	1.548	1.660
#55	2.985	2.670	n.n.	n.n.	0.079	n.n.
#56/60	13.203	5.746	0.661	2.693	0.852	0.609
#79	n.n.	0.104	0.035	0.324	0.354	0.239
#78	5.428	3.813	n.n.	0.147	0.114	0.058
#81	1.903	2.177	n.n.	0.123	0.136	0.031
#77	9.290	8.806	0.261	0.753	0.523	0.485
#104	n.n.	0.013	n.n.	n.n.	0.004	n.n.
#96	n.n.	0.061	n.n.	n.n.	0.007	n.n.
#103	0.131	0.129	n.n.	0.042	0.008	0.021
#100	0.069	0.097	n.n.	0.038	n.n.	n.n.
#94	0.045	0.097	n.n.	0.028	0.005	n.n.
#98/102	0.290	0.296	n.n.	0.073	0.013	n.n.
#88/95/121	8.180	2.601	0.335	4.143	0.947	1.682
#91	0.354	0.406	n.n.	0.272	0.070	n.n.
#92	1.650	0.675	0.080	0.570	0.108	0.158
#84	1.363	0.793	0.079	0.842	0.171	0.109
#89/90	0.693	0.605	0.648	4.093	0.031	1.384
#101	6.265	3.310	0.534	4.300	1.257	1.091
#99	1.824	0.968	0.101	0.825	0.183	0.153
#112/119	0.521	0.366	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#83	4.132	2.115	n.n.	0.141	0.078	0.037
#86/97/125	2.863	2.442	0.071	0.581	0.145	0.119
#116/117	1.974	0.514	n.n.	0.104	n.n.	0.119
#87/111/115	3.472	1.378	0.071	1.073	0.260	0.195
#85/120	0.859	0.865	n.n.	0.259	0.071	0.073
#110	5.494	2.062	0.272	2.931	0.662	1.020
#82	2.443	2.856	n.n.	0.464	0.198	0.051
#124	1.647	0.881	0.107	0.085	0.040	0.042
#107/109/123	4.727	1.959	0.105	0.171	0.184	0.169
#118	6.975	3.896	0.341	1.535	0.574	0.856
#114	1.830	0.651	n.n.	0.093	0.033	0.042
#122	2.921	1.669	n.n.	0.096	0.087	0.036
#105	4.815	2.869	0.065	0.492	0.214	0.225
#127	n.n.	0.029	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#126	7.763	5.817	0.133	0.329	0.362	0.249
#155	n.n.	0.037	n.n.	n.n.	0.004	0.005
#150	0.034	0.125	n.n.	0.012	0.005	0.002
#152	n.n.	0.029	n.n.	n.n.	0.004	n.n.
#145	n.n.	0.091	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#148	0.145	0.141	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#136	0.508	0.674	0.018	0.519	0.113	0.034
#154	0.198	0.262	n.n.	n.n.	n.n.	0.009
#151	1.438	0.862	0.053	0.945	0.226	0.179
#135/144	1.286	0.874	n.n.	0.469	0.122	0.064
#147	0.127	0.136	n.n.	0.167	0.042	n.n.
#139/149	4.449	2.759	0.210	3.534	0.893	0.787
#140	n.n.	0.199	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#134/143	0.371	0.393	n.n.	0.103	0.016	n.n.
#131/133/142	2.205	1.499	0.033	0.097	0.070	0.045

7. ANHANG

Versuch	CO-Spitzen, Memory-Phase I	CO-Spitzen	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb
Laborlaufnummer	9911027	9911026	9911004	9911020	9911021	9911058
#165	0.308	0.114	n.n.	0.097	0.070	0.045
#146/161	2.628	1.103	0.057	0.375	0.152	0.170
#153/168	5.578	3.661	0.491	4.092	1.253	0.956
#141	1.612	0.880	0.051	0.442	0.131	0.092
#137	1.203	0.724	n.n.	n.n.	0.085	0.036
#130	2.653	1.369	n.n.	0.168	0.085	n.n.
#163/164	2.975	1.432	0.084	0.880	0.247	0.202
#138/160	3.963	1.897	0.100	1.628	0.551	0.502
#158	3.001	1.258	0.112	2.045	0.154	0.120
#129	4.422	2.769	n.n.	0.342	0.274	0.136
#166	0.362	0.170	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#159	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#162	2.198	0.638	0.015	n.n.	n.n.	0.030
#128	1.318	1.193	0.033	0.420	0.154	0.039
#167	3.780	1.964	0.092	0.246	0.107	0.246
#156	6.479	3.272	0.108	0.255	0.218	0.353
#157	3.165	1.830	n.n.	0.155	0.120	0.141
#169	4.567	2.226	0.061	0.112	0.116	0.214
#188	0.055	0.100	n.n.	0.005	0.001	0.005
#184	0.148	0.241	n.n.	n.n.	n.n.	0.005
#179	0.171	0.400	n.n.	0.146	0.048	0.018
#176	0.191	0.449	0.012	0.063	0.015	0.006
#186	n.n.	0.056	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#178	0.378	0.254	0.015	0.028	0.020	0.014
#175	0.803	0.520	n.n.	n.n.	0.021	0.014
#187	1.153	0.740	0.024	0.314	0.065	0.049
#183	1.250	0.645	0.015	0.181	0.073	0.054
#185	0.155	0.127	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#174/181	1.320	0.908	0.017	0.274	0.101	0.071
#177	0.404	0.436	0.012	0.126	0.049	0.024
#171	0.901	0.805	0.009	0.112	0.067	0.044
#173	0.441	0.510	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#172/192	2.820	1.074	0.012	0.078	0.122	0.147
#180/193	3.721	1.740	0.086	0.727	0.360	0.344
#191	2.047	0.648	0.021	0.070	0.034	0.102
#170/190	5.939	2.289	0.116	0.567	0.472	0.641
#189	6.055	1.642	0.101	0.131	0.174	0.443
#202	0.139	0.095	n.n.	0.027	0.017	0.007
#201	0.607	0.523	0.004	n.n.	0.027	n.n.
#204	0.637	0.667	0.004	0.018	0.011	0.028
#197	0.313	0.417	n.n.	0.025	0.026	0.012
#200	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#198	1.041	0.344	n.n.	n.n.	0.046	n.n.
#199	1.146	0.477	0.018	0.034	0.048	0.045
#196/203	3.813	1.522	0.051	0.157	0.175	0.245
#195	1.503	0.684	0.035	0.068	0.086	0.056
#194	4.128	1.013	0.073	0.186	0.303	0.538
#205	3.071	0.493	0.069	0.041	0.139	0.184
#208	1.459	0.646	0.041	0.171	0.135	0.100
#207	2.556	1.305	n.n.	0.221	0.280	0.201
#206	5.472	1.490	0.179	0.265	0.573	0.745
#209	3.408	0.999	0.200	0.263	0.587	0.757
TEQ (nach Safe)	1.160	0.806	0.021	0.054	0.050	0.044
TEQ (WHO)	0.831	0.609	0.014	0.035	0.038	0.028

7. ANHANG

Versuch	CO-Spitzen, Memory-Phase I	CO-Spitzen	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb
Laborlaufnummer	9911027	9911026	9911004	9911020	9911021	9911058
MCBz	200097.09	190156.33	8509.28	66310.00	28328.00	87045.16
1,3 -DiCBz	4904.35	1230.22	192.30	251.38	673.83	1966.29
1,4 -DiCBz	2409.06	2577.14	815.87	154.97	415.39	1809.99
1,2 -DiCBz	7159.38	5248.93	1472.55	183.25	683.61	1738.73
1,3,5 -TriCBz	384.96	1031.17	156.39	71.68	192.13	185.02
1,2,4 -TriCBz	2721.46	641.60	340.75	594.30	159.29	1226.35
1,2,3 -TriCBz	2214.63	3676.66	298.00	133.80	516.67	410.96
1,2,3,5 -TeCBz	1848.99	543.25	125.99	463.95	135.75	649.78
1,2,4,5 -TeCBz	1501.38	593.98	224.52	358.59	104.92	487.94
1,2,3,4 -TeCBz	2860.06	1250.04	64.95	353.12	197.72	446.13
PeCBz	7040.06	5291.07	275.15	816.69	218.91	1512.13
HxCBz	1253.70	1050.92	487.38	756.14	202.68	1296.04

Versuch	CO-Spitzen, Memory-Phase I	CO-Spitzen	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb
Laborlaufnummer	9911027	9911026	9911004	9911020	9911021	9911058
Naphthalin	241777.96	3216374.27	16111.18	10013.10	8387.00	12780.73
Dibenzofuran	297299.83	145900.20	14.05	13.75	113.91	36.83
Dibenzo- <i>p</i> -dioxin	24142.13	15465.42	2.10	-	-	28.20
Benzol	-	-	-	-	-	-
Toluol	-	-	-	-	-	-
Ethylbenzol	-	-	-	-	-	-
m/p-Xylol	-	-	-	-	-	-
o-Xylol	-	-	-	-	-	-
Fluoren	49964.15	86694.69	-	-	-	-
Phenanthren	33541.65	414499.90	-	-	-	-
Anthracen	3976.14	42829.92	-	-	-	-
Fluoranthren	84253.85	412998.27	-	-	-	-
Pyren	75262.42	148751.13	-	-	-	-
Benz[a]anthracen	11856.63	79315.35	-	-	-	-
Chrysen	17982.76	77902.50	-	-	-	-
Benzo[e]pyren	34980.58	231188.79	-	-	-	-
Benzo[b]fluoranthren	21266.44	124013.77	-	-	-	-
Benzo[k]fluoranthren	7925.38	47088.42	-	-	-	-
Benzo[a]pyren	16360.97	89388.71	-	-	-	-
Dibenz[a,h]anthracen	1305.06	9050.35	-	-	-	-
Benzo[g,h,i]perylen	28048.87	167412.52	-	-	-	-
Indeno[1,2,3-cd]pyren	20368.74	115822.23	-	-	-	-

7. ANHANG

Probenahmen im Reingas bei 90°C:

Versuch Laborlaufnummer	Normalbetrieb 9911005	Normalbetrieb 9911006	Normalbetrieb 9911007	Instationärer Betrieb 9911008	Normalbetrieb 9911009	Normalbetrieb 9911010	Normalbetrieb 9911011	Normalbetrieb 9911012	Normalbetrieb 9911013
1-MCDD	0.085	0.012	0.009	0.157	0.075	0.238	0.094	0.025	0.004
2-MCDD	0.018	n.n.	n.n.	0.063	0.031	0.101	0.044	n.n.	n.n.
1,3-DiCDD	0.048	0.002	0.010	0.146	0.055	0.028	0.260	n.n.	0.002
2,7/2,3/2,8-DiCDD	0.044	0.010	0.022	0.301	0.069	0.128	0.238	0.005	0.005
1,4/1,7-DiCDD	0.010	n.n.	0.011	0.151	0.021	0.070	0.124	n.n.	n.n.
1,8-DiCDD	0.012	n.n.	0.007	0.139	0.020	0.067	0.121	n.n.	n.n.
1,6-DiCDD	n.n.	n.n.	n.n.	0.027	n.n.	0.011	0.016	n.n.	n.n.
1,2-DiCDD	n.n.	n.n.	n.n.	0.071	0.008	0.034	0.045	n.n.	n.n.
1,9-DiCDD	n.n.	n.n.	n.n.	0.033	n.n.	0.013	0.014	n.n.	n.n.
1,3,7-TriCDD	0.018	0.006	0.012	0.162	0.039	0.049	0.225	0.007	0.001
1,3,8-TriCDD	0.021	0.008	0.025	0.195	0.057	0.058	0.260	0.012	0.002
1,3,6-TriCDD	0.007	0.002	0.002	0.060	0.024	0.016	0.068	n.n.	n.n.
1,2,4-TriCDD	0.002	n.n.	n.n.	0.014	0.009	0.004	0.021	n.n.	n.n.
1,3,9/2,3,7-TriCDD	0.011	0.003	0.017	0.192	0.027	0.052	0.206	0.012	0.003
1,4,7-TriCDD	0.004	0.002	0.006	0.054	0.005	0.013	0.052	n.n.	n.n.
1,2,3-TriCDD	n.n.	n.n.	0.003	0.015	0.005	0.005	0.025	n.n.	n.n.
1,7,8-TriCDD	n.n.	n.n.	n.n.	0.066	0.004	0.007	0.046	n.n.	n.n.
1,2,7-TriCDD	0.003	n.n.	0.004	0.086	0.005	0.022	0.081	n.n.	n.n.
1,2,8-TriCDD	0.005	n.n.	0.006	0.089	0.006	0.016	0.068	n.n.	n.n.
1,4,6-TriCDD	n.n.	n.n.	0.003	0.028	0.004	0.010	0.021	n.n.	n.n.
1,2,6-TriCDD	n.n.	n.n.	n.n.	0.028	n.n.	0.005	0.022	n.n.	n.n.
1,2,9-TriCDD	0.006	0.002	0.006	0.033	0.004	0.005	0.027	n.n.	n.n.
2,3,7,8-TCDD	n.n.	n.n.	n.n.	0.031	n.n.	n.n.	0.020	n.n.	n.n.
1,3,8,8-TCDD	0.100	0.088	0.141	0.209	0.273	0.102	0.288	0.110	n.n.
1,3,7,9-TCDD	0.028	0.015	0.038	0.118	0.093	0.044	0.178	0.018	0.013
1,3,7,8-TCDD	0.006	0.004	0.012	0.125	0.022	0.023	0.142	n.n.	0.005
1,3,6,9/1,2,4,7/1,2,4,8-TCDD	0.006	0.007	0.022	0.088	0.030	0.021	0.097	0.022	0.006
1,2,6,8-TCDD	n.n.	n.n.	n.n.	0.035	n.n.	n.n.	0.048	n.n.	n.n.
1,4,7,8-TCDD	n.n.	n.n.	n.n.	0.021	n.n.	n.n.	0.020	n.n.	n.n.
1,2,4,6/1,2,4,9-TCDD	0.011	0.012	0.030	0.027	0.029	0.017	0.040	n.n.	n.n.
1,2,3,4/1,2,3,7/1,2,3,8-TCDD	0.011	0.012	n.n.	0.083	0.029	0.008	0.088	n.n.	0.009
1,2,3,6/1,2,7,9-TCDD	0.012	0.004	0.016	0.075	0.030	0.015	0.075	0.007	n.n.
1,2,7,8/1,4,6,9-TCDD	0.003	n.n.	0.011	0.060	0.007	0.005	0.053	n.n.	0.002
1,2,3,9-TCDD	0.002	n.n.	n.n.	n.n.	0.004	n.n.	0.013	n.n.	n.n.
1,2,6,9-TCDD	n.n.	n.n.	n.n.	0.015	0.004	n.n.	n.n.	0.008	n.n.
1,2,6,7-TCDD	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1,2,8,9-TCDD	n.n.	n.n.	n.n.	0.005	n.n.	n.n.	0.007	n.n.	n.n.
1,2,3,7,8-PeCDD	n.n.	n.n.	n.n.	0.032	0.013	n.n.	0.042	n.n.	0.003
1,2,4,6,8/1,2,4,7,9-PeCDD	0.038	0.050	0.077	0.115	0.180	0.073	0.152	0.057	0.025
1,2,3,6,8-PeCDD	0.043	0.045	n.n.	0.090	0.193	0.074	0.133	0.042	0.024
1,2,4,7,8-PeCDD	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.065	n.n.	n.n.
1,2,3,7,9-PeCDD	0.014	0.013	0.030	0.057	0.041	0.024	0.085	0.019	0.010
1,2,3,4,7/1,2,4,8,9-PeCDD	0.004	0.007	0.011	0.018	0.033	0.014	n.n.	0.012	0.004
1,2,3,6,9-PeCDD	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1,2,4,6,7-PeCDD	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1,2,4,8,9-PeCDD	n.n.	n.n.	n.n.	0.011	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1,2,3,4,8-PeCDD	0.004	0.005	n.n.	n.n.	0.015	n.n.	n.n.	0.010	n.n.
1,2,3,6,7-PeCDD	0.003	0.005	n.n.	0.017	0.018	n.n.	0.030	0.010	n.n.
1,2,3,8,9-PeCDD	n.n.	n.n.	0.006	0.018	n.n.	0.006	0.025	0.016	0.005
1,2,3,4,7,8-HxCDD	n.n.	n.n.	n.n.	0.009	n.n.	0.015	0.010	n.n.	0.007
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.007	0.008	0.013	0.017	0.028	0.015	0.027	n.n.	0.007
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.006	0.004	0.011	0.011	0.011	0.007	0.017	0.013	0.002
1,2,3,4,6,8/1,2,4,6,7,9/1,2,4,6,8,9-HxCDD	0.135	0.132	0.245	0.202	0.404	0.193	0.292	0.149	0.082
1,2,3,6,7,9/1,2,3,6,8,9-HxCDD	0.028	0.027	n.n.	0.055	0.085	0.058	0.076	0.036	0.012
1,2,3,4,6,9-HxCDD	0.004	0.003	n.n.	n.n.	0.012	0.006	0.007	n.n.	n.n.
1,2,3,4,6,7-HxCDD	0.005	0.006	0.013	0.010	0.017	0.009	0.019	0.009	n.n.
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.054	0.053	0.123	0.094	0.152	0.090	0.125	0.065	0.030
1,2,3,4,6,7,9-HpCDD	0.055	0.065	0.149	0.081	0.163	0.077	0.139	0.078	0.029
OCDD	0.058	0.040	0.113	0.063	0.107	0.050	0.083	0.054	0.020

7. ANHANG

Versuch	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Instationärer Betrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb
Laborlaufnummer	9911005	9911006	9911007	9911008	9911009	9911010	9911011	9911012	9911013
1-MCDF	1.233	0.407	0.035	1.122	0.827	5.220	0.256	0.719	0.005
3-MCDF	1.910	0.677	0.083	3.073	1.232	7.675	0.739	1.184	0.006
2-MCDF	2.421	0.753	0.083	3.074	1.574	8.282	1.053	1.185	0.002
4-MCDF	0.022	0.037	0.010	0.479	0.056	0.483	0.198	0.027	0.003
1,3-DICDF	0.284	0.092	0.064	1.586	0.248	0.898	0.599	0.190	0.001
1,7-DICDF	0.322	0.081	0.108	2.571	0.181	1.035	0.866	0.241	0.002
1,4-DICDF	0.005	0.002	n.n.	0.009	0.014	0.032	0.007	0.003	n.n.
1,8-DICDF	0.362	0.086	0.096	2.554	0.204	1.238	1.011	0.224	0.001
1,6-DICDF	0.004	0.005	0.024	0.642	0.020	0.105	0.280	0.012	n.n.
1,2-DICDF	0.233	0.086	0.065	1.544	0.303	0.837	0.718	0.156	0.001
2,4-DICDF	0.014	0.156	0.112	2.464	0.474	0.741	1.698	0.027	n.n.
3,7-DICDF	0.299	0.066	0.095	1.633	0.152	0.624	0.703	0.202	n.n.
2,7-DICDF	0.004	0.002	n.n.	0.007	0.002	0.009	0.004	n.n.	n.n.
2,3-DICDF	0.403	0.104	0.141	2.833	0.262	1.239	1.187	0.272	0.002
2,8/3,6-DICDF	0.340	0.118	0.108	2.260	0.442	1.027	1.179	0.213	0.002
2,6-DICDF	0.266	0.081	0.084	1.810	0.217	0.951	0.941	0.222	n.n.
1,9/3,4-DICDF	0.190	0.051	0.059	1.115	0.150	0.456	0.547	0.128	n.n.
4,6-DICDF	0.054	0.041	0.078	1.738	0.132	0.451	0.897	0.041	n.n.
1,3,7-TrICDF	0.228	0.043	0.142	2.076	0.094	0.578	1.291	0.152	0.002
1,3,8-TrICDF	0.194	0.045	0.127	1.713	0.091	0.482	1.200	0.132	n.n.
1,3,6-TrICDF	0.071	0.019	0.046	0.804	0.043	0.265	0.516	0.040	n.n.
1,3,4/1,4,8-TrICDF	0.107	0.026	0.068	0.825	0.073	0.275	0.591	0.084	n.n.
1,2,4/1,6,7-TrICDF	0.016	0.013	0.066	1.069	0.049	0.168	0.685	0.004	n.n.
1,7,8-TrICDF	0.150	0.031	0.127	1.412	0.078	0.335	0.996	0.095	n.n.
1,2,3-TrICDF	0.053	0.027	0.035	0.395	0.084	0.132	0.282	0.033	n.n.
1,2,7-TrICDF	0.116	0.028	0.095	1.172	0.080	0.312	0.778	0.072	0.003
1,2,9-TrICDF	0.010	0.007	0.025	0.466	0.030	0.150	0.308	0.014	n.n.
1,3,9-TrICDF	n.n.	0.003	0.015	0.249	0.003	0.021	0.173	0.001	n.n.
2,4,7-TrICDF	0.134	0.046	0.052	0.930	0.144	0.288	0.752	0.020	n.n.
1,2,8/1,2,8-TrICDF	0.108	0.029	0.087	0.834	0.082	0.238	0.607	0.044	n.n.
2,4,8-TrICDF	n.n.	0.004	0.029	0.364	0.012	0.035	0.264	0.002	n.n.
1,4,9-TrICDF	0.013	0.040	0.075	0.770	0.122	0.245	0.639	0.032	n.n.
2,3,7-TrICDF	0.105	0.042	0.064	0.765	0.119	0.256	0.733	0.068	n.n.
1,6,8/2,3,4/2,3,8-TrICDF	0.170	0.041	0.132	1.160	0.109	0.293	0.854	0.126	0.012
2,3,8/3,4,7-TrICDF	n.n.	n.n.	0.003	0.061	n.n.	n.n.	0.009	n.n.	n.n.
2,6,7-TrICDF	0.139	0.089	0.167	1.407	0.287	0.391	1.238	0.135	0.027
1,4,6/1,4,7-TrICDF	0.147	0.068	0.162	1.419	0.199	0.403	1.341	0.132	0.011
3,4,6-TrICDF	0.005	0.023	0.066	0.608	0.074	0.140	0.461	0.016	n.n.
2,4,6-TrICDF	0.086	0.032	0.069	0.638	0.113	0.208	0.628	0.057	n.n.
2,3,7,8-TCDF	0.022	0.008	0.044	0.226	0.031	0.041	0.214	0.034	0.013
1,3,6,8-TCDF	0.045	0.013	0.072	0.712	0.039	0.129	0.727	0.050	0.017
1,3,7,8/1,3,7,9-TCDF	0.109	0.035	0.161	1.490	0.090	0.289	1.350	0.149	0.057
1,3,4,7-TCDF	n.n.	0.010	0.060	0.536	0.033	0.107	0.527	n.n.	n.n.
1,4,6,8-TCDF	0.028	0.012	0.052	0.533	0.044	0.129	0.533	0.046	0.018
1,2,4,7/1,3,6,7-TCDF	0.045	0.018	0.077	0.746	0.051	0.147	0.694	0.064	0.024
1,3,4,8-TCDF	n.n.	0.010	0.050	0.470	0.032	0.102	0.446	n.n.	n.n.
1,2,4,8/1,3,4,6-TCDF	0.010	0.011	0.047	0.418	0.035	0.093	0.398	0.027	0.018
1,2,4,8/1,2,6,8/1,2,3,7/1,4,7,8/1,3,6,9-TCDF	0.082	0.044	0.189	1.449	0.132	0.315	1.372	0.131	0.071
1,2,3,4/1,2,3,8/1,2,3,8/1,4,6,7/1,6,7,8/2,4,6,8-TCDF	0.072	0.055	0.153	1.307	0.199	0.302	1.214	0.092	0.075
1,3,4,9-TCDF	n.n.	n.n.	n.n.	0.073	n.n.	n.n.	0.072	n.n.	n.n.
1,2,7,8-TCDF	0.042	0.017	0.079	0.526	0.058	0.097	0.472	0.060	0.040
1,2,6,7-TCDF	0.008	0.008	0.053	0.355	0.034	0.054	0.329	n.n.	0.020
1,2,7,9/1,4,6,9-TCDF	0.043	0.021	0.009	0.075	0.079	0.088	0.070	0.055	n.n.
1,2,4,9/2,3,6,8-TCDF	n.n.	n.n.	0.078	0.424	n.n.	n.n.	0.423	n.n.	0.030
2,4,6,7-TCDF	0.051	0.023	0.080	0.397	0.085	0.096	0.423	0.054	0.044
1,2,3,9/2,3,4,7-TCDF	0.051	0.023	0.080	0.441	0.089	0.101	0.459	0.054	0.044
1,2,6,9-TCDF	0.030	0.012	0.063	0.234	0.047	0.057	0.277	0.044	0.027
2,3,4,8-TCDF	0.022	0.010	0.044	0.226	0.047	0.055	0.214	0.028	0.013
2,3,4,6-TCDF	0.031	0.016	0.052	0.231	0.069	0.057	0.232	0.037	0.019
2,3,6,7-TCDF	0.036	0.017	0.072	0.315	0.055	0.070	0.365	0.049	0.035
3,4,6,7-TCDF	0.037	0.015	0.054	0.191	0.054	0.049	0.216	0.039	0.034

7. ANHANG

Versuch	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Instationärer Betrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb	Normalbetrieb
Laborlaufnummer	9911005	9911006	9911007	9911008	9911009	9911010	9911011	9911012	9911013
1,2,3,7,8/1,2,3,4,8-PeCDF	0.043	0.028	0.080	0.340	0.052	0.065	0.359	0.059	0.024
2,3,4,7,8-PeCDF	0.027	0.016	0.056	0.115	0.047	0.036	0.148	0.029	0.015
1,3,4,6,8-PeCDF	0.022	0.009	0.041	0.298	0.027	0.050	0.348	0.024	0.017
1,2,4,6,8-PeCDF	0.018	0.011	0.041	0.230	0.025	0.042	0.264	0.026	0.016
1,3,6,7,8-PeCDF	0.020	0.009	0.044	0.282	0.020	0.038	0.267	0.026	0.016
1,3,4,7,8-PeCDF	n.n.	0.002	n.n.	0.063	n.n.	0.007	0.075	n.n.	n.n.
1,3,4,7,9/1,2,3,6,8-PeCDF	0.029	0.015	0.070	0.393	0.034	0.056	0.434	0.056	0.030
1,2,4,7,8-PeCDF	0.020	0.007	0.045	0.266	0.020	0.037	0.287	0.017	0.017
1,2,4,7,9/1,3,4,6,7-PeCDF	0.017	0.007	0.046	0.244	0.027	0.031	0.267	0.033	0.014
1,2,4,6,7-PeCDF	0.012	0.009	0.029	0.173	0.015	0.028	0.183	0.029	0.010
1,2,3,4,7/1,4,6,7,8-PeCDF	0.016	0.007	0.040	0.231	0.019	0.034	0.252	0.029	0.006
1,3,4,6,9-PeCDF	n.n.	n.n.	n.n.	0.051	n.n.	0.006	n.n.	n.n.	n.n.
1,2,3,4,8-PeCDF	0.003	0.005	0.017	n.n.	0.014	0.010	0.078	n.n.	n.n.
1,2,3,7,8-PeCDF	0.003	0.005	n.n.	n.n.	0.014	0.010	n.n.	n.n.	n.n.
1,2,3,6,7-PeCDF	0.009	0.006	0.027	0.126	0.013	0.015	0.137	0.014	n.n.
1,2,4,6,9/1,2,6,7,8-PeCDF	0.016	0.008	0.045	0.145	0.023	0.028	0.149	0.027	0.011
1,2,6,7,9-PeCDF	0.003	n.n.	0.005	0.025	n.n.	0.005	n.n.	n.n.	n.n.
1,2,3,6,9-PeCDF	n.n.	n.n.	n.n.	0.021	0.003	0.004	0.021	n.n.	n.n.
2,3,4,6,8-PeCDF	0.033	0.022	0.081	0.142	0.063	0.045	0.166	0.041	0.020
1,2,3,4,9-PeCDF	0.005	0.003	n.n.	n.n.	0.006	0.004	0.020	n.n.	n.n.
1,2,4,8,9-PeCDF	0.005	0.002	0.005	0.027	0.006	0.003	0.038	0.006	n.n.
1,2,3,8,9-PeCDF	n.n.	n.n.	0.003	0.009	0.004	0.002	n.n.	n.n.	n.n.
2,3,4,6,7-PeCDF	0.050	0.028	0.079	0.162	0.070	0.054	0.187	0.068	0.028
1,2,3,4,7,8/1,2,3,4,7,9-HxCDF	0.034	0.022	0.062	0.117	0.047	0.047	0.150	0.039	0.014
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.034	0.023	0.072	0.127	0.054	0.046	0.152	0.042	0.016
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.004	0.002	0.005	n.n.	0.003	0.002	0.003	0.003	n.n.
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.046	0.027	0.075	0.076	0.064	0.048	0.092	0.059	0.016
1,2,3,4,6,8-HxCDF	0.026	0.023	0.066	0.141	0.063	0.048	0.139	0.049	0.015
1,3,4,6,7,8/1,3,4,6,7,9-HxCDF	0.050	0.027	0.093	0.252	0.066	0.071	0.258	0.090	0.026
1,2,4,6,7,8-HxCDF	0.041	0.027	0.092	0.190	0.066	0.061	0.226	0.071	0.025
1,2,4,6,7,9-HxCDF	0.007	0.004	0.014	0.031	0.013	0.010	0.049	n.n.	n.n.
1,2,4,6,8,9-HxCDF	0.032	0.019	0.065	0.017	0.058	0.004	0.015	0.039	0.017
1,2,3,4,6,7-HxCDF	0.032	0.019	0.065	0.118	0.058	0.048	0.132	0.039	0.017
1,2,3,6,7,9-HxCDF	0.004	n.n.	0.010	0.019	0.006	0.006	0.022	n.n.	n.n.
1,2,3,4,6,9/1,2,3,6,8,9-HxCDF	0.004	0.004	n.n.	0.019	0.013	0.011	0.025	0.009	0.002
1,2,3,4,8,9-HxCDF	0.004	0.002	n.n.	0.009	0.007	0.004	0.010	n.n.	n.n.
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.104	0.077	0.226	0.218	0.152	0.120	0.227	0.158	0.042
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.009	0.006	n.n.	0.009	0.010	0.010	0.012	0.015	0.003
1,2,3,4,6,7,9-HpCDF	0.017	0.010	0.035	n.n.	0.024	0.015	0.039	0.013	0.004
1,2,3,4,6,8,9-HpCDF	0.013	0.006	0.028	n.n.	0.015	0.010	0.022	0.015	0.006
OCDF	0.020	0.010	0.040	0.016	0.029	0.020	0.014	0.022	0.007
I-TEQ (NATO/CCMS)	0.033	0.020	0.064	0.183	0.060	0.046	0.203	0.039	0.019
I-TEQ (PCDD nach NATO/CCMS)	0.002	0.002	0.004	0.052	0.012	0.005	0.047	0.002	0.002
I-TEQ (PCDF nach NATO/CCMS)	0.031	0.018	0.060	0.131	0.048	0.041	0.155	0.037	0.037
I-TEQ (WHO)	0.033	0.020	0.064	0.199	0.066	0.046	0.224	0.039	0.039
I-TEQ (PCDD nach WHO)	0.002	0.002	0.004	0.067	0.019	0.005	0.068	0.002	0.002
I-TEQ (PCDF nach WHO)	0.031	0.018	0.060	0.131	0.048	0.041	0.155	0.037	0.037

7. ANHANG

Versuch Laborlaufnummer	Normalbetrieb 9911005	Normalbetrieb 9911006	Normalbetrieb 9911007	Instationärer Betrieb 9911008	Normalbetrieb 9911009	Normalbetrieb 9911010	Normalbetrieb 9911011	Normalbetrieb 9911012	Normalbetrieb 9911013
#1	0.038	n.n.	0.307	0.109	0.077	1.791	13.211	0.221	n.n.
#2	0.029	1.738	0.118	4.481	n.n.	4.305	16.070	0.459	1.908
#3	0.342	0.988	n.n.	4.481	1.490	0.963	7.047	0.241	0.466
#4/10	0.094	0.126	0.175	0.415	0.019	4.285	0.728	0.230	n.n.
#7/9	0.087	n.n.	n.n.	1.018	0.490	1.755	1.251	0.151	1.147
#6	0.077	n.n.	0.764	1.183	0.218	1.490	1.297	0.151	n.n.
#5/8	0.347	1.315	0.179	1.214	1.916	22.547	1.367	0.761	1.196
#14	0.035	n.n.	n.n.	0.660	0.200	n.n.	0.814	0.025	n.n.
#11	0.197	0.250	n.n.	1.483	1.054	n.n.	1.213	0.392	1.245
#12	0.074	0.114	n.n.	1.527	0.333	2.081	1.527	0.176	1.099
#13	0.067	0.116	0.047	0.958	0.398	2.081	0.865	0.176	1.099
#15	0.128	0.134	0.132	0.331	0.335	1.183	0.378	0.214	1.465
#19	0.014	0.002	n.n.	n.n.	0.026	n.n.	0.026	0.045	n.n.
#30	0.002	0.002	n.n.	n.n.	n.n.	1.145	n.n.	0.004	n.n.
#18	0.212	1.112	0.098	0.010	0.612	12.773	0.151	0.949	0.394
#17	0.066	0.202	0.043	0.010	0.187	3.053	0.102	0.306	0.085
#24/27	0.011	0.007	0.149	n.n.	0.017	n.n.	0.043	0.037	0.066
#16	0.084	0.186	0.196	0.202	0.208	2.971	0.292	0.271	0.068
#32	0.085	0.277	0.196	0.086	0.230	2.980	0.112	0.310	0.391
#23/34	0.009	n.n.	n.n.	0.212	0.018	n.n.	0.182	0.009	n.n.
#29	0.008	n.n.	0.035	0.160	0.021	n.n.	0.175	0.013	n.n.
#26	0.048	0.048	n.n.	0.321	0.120	1.526	0.235	0.165	0.231
#25	0.019	0.048	n.n.	0.335	0.040	1.526	0.268	0.049	0.231
#28/31	0.513	3.008	5.076	0.854	1.363	26.764	0.703	1.949	2.874
#21	0.103	n.n.	n.n.	7.312	0.015	6.686	2.886	0.327	n.n.
#20/30	0.154	0.574	0.360	1.151	0.381	6.677	0.915	0.501	0.423
#22	0.092	0.272	0.430	0.206	0.222	2.544	0.157	0.299	0.160
#36	0.008	n.n.	n.n.	0.234	0.015	n.n.	0.163	0.007	n.n.
#39	0.019	0.027	n.n.	0.070	0.044	0.618	0.043	0.098	n.n.
#35	0.051	0.006	n.n.	0.502	0.068	0.164	0.366	0.071	0.046
#37	0.037	0.034	0.172	0.263	0.064	0.273	0.123	0.085	0.046
#54	0.002	0.001	n.n.	n.n.	0.001	0.022	n.n.	0.008	n.n.
#50	0.000	0.001	0.014	0.002	0.000	n.n.	0.004	0.005	0.001
#53	0.072	0.105	0.122	0.059	0.214	1.675	0.040	0.408	0.024
#51	0.022	n.n.	n.n.	0.012	0.035	0.403	0.025	0.126	n.n.
#45	0.073	0.093	0.101	0.032	0.172	1.308	0.037	0.360	0.037
#46	0.022	n.n.	n.n.	0.016	0.051	n.n.	n.n.	0.148	n.n.
#69	0.022	n.n.	n.n.	n.n.	0.051	n.n.	n.n.	0.148	n.n.
#73	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#43/52	0.383	0.880	1.068	0.547	0.855	6.968	0.419	1.782	0.604
#49	0.195	0.633	0.576	0.201	0.518	7.333	0.185	0.954	0.282
#47/48/62/65/75	0.128	0.326	0.248	0.173	0.337	2.883	0.161	0.573	0.176
#44	0.215	0.713	0.424	0.251	0.534	6.837	0.182	1.188	0.332
#59	0.028	0.713	0.424	0.039	0.072	6.829	0.030	1.188	0.027
#42	0.069	0.072	0.101	0.131	0.146	1.862	0.101	0.338	0.056
#41/71/72	0.089	0.159	0.289	0.187	0.201	3.134	0.051	0.461	0.056
#64/68	0.137	0.373	0.293	0.136	0.353	5.090	0.102	0.718	0.155
#40	0.039	n.n.	n.n.	0.250	0.079	n.n.	0.304	0.172	n.n.
#57	n.n.	n.n.	n.n.	0.117	n.n.	n.n.	0.124	n.n.	n.n.
#67	0.007	n.n.	n.n.	0.073	0.014	n.n.	0.071	0.020	n.n.
#63	0.065	n.n.	n.n.	0.208	0.220	n.n.	0.220	0.118	0.217
#74	0.130	0.337	0.366	0.169	0.351	3.709	0.114	0.512	0.218

7. ANHANG

Versuch Laborlaufnummer	Normalbetrieb 9911005	Normalbetrieb 9911006	Normalbetrieb 9911007	Instationärer Betrieb 9911008	Normalbetrieb 9911009	Normalbetrieb 9911010	Normalbetrieb 9911011	Normalbetrieb 9911012	Normalbetrieb 9911013
#76	0.256	0.337	0.366	0.077	0.012	3.709	0.065	0.025	0.218
#70	0.256	0.779	1.246	0.518	0.646	9.209	0.390	1.137	0.712
#66/80	0.176	0.503	1.016	0.469	0.453	6.743	0.336	0.808	0.401
#55	n.n.	n.n.	n.n.	0.101	n.n.	n.n.	0.132	n.n.	n.n.
#56/60	0.092	0.118	0.254	0.326	0.239	2.437	0.267	0.414	0.112
#79	0.006	n.n.	n.n.	0.177	0.026	n.n.	0.080	0.008	n.n.
#78	0.011	0.004	0.012	0.110	0.043	0.085	0.062	0.018	n.n.
#81	0.006	0.002	0.019	0.062	0.010	n.n.	0.022	0.009	0.009
#77	0.072	0.020	0.105	0.271	0.181	2.419	0.212	0.089	0.072
#104	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.048	0.004	0.002	n.n.
#96	0.003	n.n.	n.n.	n.n.	0.002	0.031	n.n.	0.011	n.n.
#103	n.n.	n.n.	n.n.	0.004	0.003	0.041	n.n.	0.002	n.n.
#100	0.003	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.007	n.n.	n.n.
#94	n.n.	n.n.	n.n.	0.008	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#98/102	0.004	n.n.	n.n.	n.n.	0.006	0.048	0.009	0.027	n.n.
#88/95/121	0.152	0.319	0.286	0.220	0.318	2.037	0.234	0.871	0.177
#91	0.013	0.007	n.n.	0.018	0.024	0.112	0.015	0.080	0.011
#92	0.033	0.022	0.017	0.041	0.067	0.203	0.041	0.123	0.020
#84	0.030	0.014	0.017	0.041	0.059	0.141	0.037	0.164	0.020
#89/90	0.164	0.360	0.315	0.019	0.364	2.520	0.029	0.702	0.271
#101	0.210	0.291	0.263	0.355	0.381	1.554	0.244	0.801	0.237
#99	0.030	0.030	0.034	0.061	0.082	0.271	0.039	0.117	0.020
#112/119	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#83	0.004	n.n.	n.n.	0.137	0.014	0.073	0.127	0.016	n.n.
#86/97/125	0.024	0.012	n.n.	0.151	0.058	0.104	0.153	0.131	0.023
#116/117	0.006	0.012	n.n.	0.151	0.009	0.051	0.154	0.131	0.005
#87/111/115	0.040	0.030	0.031	0.090	0.090	0.220	0.078	0.194	0.032
#85/120	0.011	n.n.	n.n.	0.041	0.022	n.n.	0.050	0.058	n.n.
#110	0.102	0.190	0.137	0.219	0.225	1.005	0.162	0.544	0.098
#82	0.010	n.n.	n.n.	0.149	0.017	n.n.	0.181	0.040	n.n.
#124	0.003	n.n.	n.n.	0.024	0.013	n.n.	0.023	0.030	n.n.
#107/109/123	0.012	0.006	0.018	0.063	0.021	0.118	0.067	0.030	n.n.
#118	0.070	0.084	0.107	0.185	0.155	0.610	0.215	0.202	0.071
#114	0.006	n.n.	n.n.	0.021	0.010	n.n.	0.042	n.n.	n.n.
#122	0.008	n.n.	n.n.	0.047	0.017	n.n.	0.042	0.010	n.n.
#105	0.037	0.019	0.053	0.091	0.076	0.152	0.074	0.084	0.033
#127	n.n.	n.n.	n.n.	0.007	n.n.	0.037	n.n.	n.n.	n.n.
#126	0.029	0.005	0.042	0.078	0.066	0.044	0.093	0.047	n.n.
#155	0.001	1.32E-04	n.n.	0.001	0.001	0.008	0.002	2.06E-04	n.n.
#150	2.77E-04	6.61E-05	n.n.	0.006	n.n.	0.001	0.004	4.80E-04	2.68E-04
#152	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#145	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#148	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.003	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#136	0.030	0.012	0.004	0.028	0.050	0.086	0.021	0.207	0.011
#154	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.002	n.n.	n.n.
#151	0.039	0.032	0.039	0.027	0.077	0.127	0.038	0.198	0.030
#135/144	0.023	0.008	0.025	0.039	0.037	0.056	0.037	0.130	0.011
#147	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.027	n.n.	n.n.	n.n.
#139/149	0.122	0.157	0.093	0.193	0.231	0.446	0.227	0.590	0.078
#140	n.n.	0.001	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#134/143	0.003	0.001	n.n.	n.n.	0.005	n.n.	0.008	0.028	n.n.
#131/133/142	0.004	0.002	0.008	0.041	0.005	0.016	0.045	0.015	0.002

7. ANHANG

Versuch Laborlaufnummer	Normalbetrieb 9911005	Normalbetrieb 9911006	Normalbetrieb 9911007	Instationärer Betrieb 9911008	Normalbetrieb 9911009	Normalbetrieb 9911010	Normalbetrieb 9911011	Normalbetrieb 9911012	Normalbetrieb 9911013
#165	0.004	0.002	0.008	0.041	0.005	n.n.	0.044	0.015	n.n.
#146/161	0.022	0.012	0.011	0.032	0.038	0.047	0.037	0.063	0.017
#153/168	0.203	0.221	0.230	0.308	0.340	0.583	0.259	0.642	0.155
#141	0.031	0.016	0.017	0.040	0.063	0.080	0.043	0.132	0.019
#137	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.007	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#130	n.n.	n.n.	n.n.	0.034	0.007	n.n.	0.046	0.012	n.n.
#183/164	0.054	0.033	0.033	0.071	0.103	0.108	0.081	0.189	0.025
#138/160	0.052	0.036	0.040	0.065	0.148	0.256	0.068	0.295	0.072
#158	0.079	0.072	0.061	0.122	0.152	0.199	0.159	0.326	0.066
#129	0.009	n.n.	n.n.	0.121	0.010	n.n.	0.102	0.024	n.n.
#166	0.002	n.n.	n.n.	n.n.	0.004	0.010	n.n.	n.n.	n.n.
#159	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#162	n.n.	n.n.	0.005	0.006	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#128	0.011	0.001	0.005	0.041	0.017	0.017	0.024	0.040	0.006
#167	0.015	0.001	0.006	0.037	0.018	0.027	0.036	0.023	0.006
#156	0.028	0.006	0.019	0.055	0.051	0.040	0.056	0.054	0.008
#157	0.013	0.002	0.007	0.025	0.035	n.n.	0.024	0.016	0.002
#169	0.017	0.003	0.006	0.024	0.033	0.023	0.027	0.017	0.004
#188	n.n.	9.77E-05	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#184	0.001	0.000	n.n.	0.003	0.000	n.n.	0.004	0.001	n.n.
#179	0.007	0.002	0.004	0.005	0.017	0.013	0.017	0.056	0.002
#176	0.003	0.001	0.001	0.006	0.005	n.n.	0.010	0.012	n.n.
#186	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#178	0.003	0.001	n.n.	n.n.	0.006	0.005	n.n.	0.007	0.003
#175	n.n.	n.n.	n.n.	0.007	n.n.	n.n.	0.008	n.n.	n.n.
#187	0.019	0.011	0.012	0.024	0.039	0.041	0.015	0.064	0.009
#183	0.012	0.003	0.004	0.015	0.018	0.030	0.018	0.033	0.005
#185	0.001	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.006	n.n.	0.007	n.n.
#174/181	0.021	0.003	0.007	0.027	0.025	0.012	0.021	0.091	0.006
#177	0.010	0.001	n.n.	0.010	0.009	0.011	0.008	0.032	0.002
#171	0.004	0.001	0.004	0.012	0.012	n.n.	0.020	0.018	n.n.
#173	n.n.	n.n.	n.n.	0.006	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#172/192	0.005	n.n.	n.n.	0.017	0.010	n.n.	0.013	0.009	n.n.
#180/193	0.055	0.032	0.036	0.082	0.094	0.077	0.075	0.129	0.037
#191	0.006	n.n.	0.006	n.n.	0.015	0.009	0.014	0.006	n.n.
#170/190	0.039	0.014	0.023	0.092	0.064	0.048	0.069	0.091	0.013
#189	0.021	0.005	0.014	0.027	0.050	0.033	0.019	0.018	0.004
#202	0.001	0.001	0.001	0.005	0.002	0.005	n.n.	0.003	n.n.
#201	0.002	n.n.	n.n.	0.009	0.003	0.004	n.n.	0.003	n.n.
#204	0.001	n.n.	n.n.	0.009	0.004	0.002	0.012	0.002	n.n.
#197	0.001	9.22E-05	0.001	0.006	0.003	n.n.	0.004	0.003	0.001
#200	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#198	0.001	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
#199	0.003	0.001	0.004	0.012	0.009	0.008	0.008	0.006	0.001
#196/203	0.011	0.003	0.005	0.037	0.024	0.016	0.026	0.024	0.004
#195	0.005	0.001	0.003	0.012	0.011	0.003	0.014	0.006	0.002
#194	0.012	0.003	0.011	0.025	0.024	0.022	0.021	0.016	0.005
#205	0.009	0.002	0.011	0.010	0.023	0.026	0.014	0.009	n.n.
#208	0.005	0.001	0.009	0.037	0.010	n.n.	0.021	0.009	0.012
#207	0.009	0.002	0.021	0.066	0.017	n.n.	0.059	0.010	0.011
#206	0.028	0.008	0.039	0.056	0.077	0.046	0.062	0.026	0.021
#209	0.036	0.009	0.038	0.053	0.117	0.053	0.061	0.038	0.018
TEQ (nach Safe)	0.005	0.001	0.006	0.013	0.011	0.037	0.014	0.008	0.001
TEQ (WHO)	0.003	0.001	0.004	0.008	0.007	0.005	0.010	0.005	6.41E-05

7. ANHANG

Versuch Laborlaufnummer	Normalbetrieb 9911005	Normalbetrieb 9911006	Normalbetrieb 9911007	Instationärer Betrieb 9911008	Normalbetrieb 9911009	Normalbetrieb 9911010	Normalbetrieb 9911011	Normalbetrieb 9911012	Normalbetrieb 9911013
MCBz	1566.85	1358.14	2355.82	27651.22	1758.60	2081.07	14596.32	1381.01	709.43
1,3-DiCBz	42.04	88.75	116.67	1298.04	273.60	151.16	416.36	109.64	214.56
1,4-DiCBz	81.74	281.88	205.21	672.91	247.73	127.67	290.39	66.93	28.06
1,2-DiCBz	104.45	35.83	675.00	962.23	218.27	128.61	583.96	89.00	44.83
1,3,5-TriCBz	13.47	91.77	218.35	169.75	51.17	19.96	149.05	13.40	11.01
1,2,4-TriCBz	69.26	199.87	571.52	651.94	512.43	113.63	40.37	56.62	23.16
1,2,3-TriCBz	20.53	23.60	35.06	187.89	127.00	23.19	787.87	13.70	31.23
1,2,3,5-TeCBz	13.81	47.50	86.85	306.56	24.20	27.59	186.63	40.40	25.71
1,2,4,5-TeCBz	12.97	30.82	73.00	186.07	27.58	24.60	133.88	29.65	14.22
1,2,3,4-TeCBz	100.00	27.87	34.86	188.39	19.49	16.43	164.25	23.90	16.51
PeCBz	15.66	15.28	132.85	291.43	43.95	28.41	155.01	8.85	20.88
HxCBz	13.73	17.60	156.15	287.52	73.22	117.02	211.90	15.05	5.65

Versuch Laborlaufnummer	Instationärer Betrieb 9911008
2-MCPh	95.51
4-MCPh	47.20
2,6-DiCPh	56.87
2,4-DiCPh	222.42
3,4-DiCPh	n.n.
2,4,6-TriCPh	376.31
2,3,6-TriCPh	n.n.
2,3,5-TriCPh	n.n.
2,4,5-TriCPh	62.82
2,3,4-TriCPh	23.64
3,4,5-TriCPh	n.n.
2,3,5,6-TeCPh	n.n.
2,3,4,6-TeCPh	324.61
2,3,4,5-TeCPh	n.n.
PeCPh	150.76

Versuch Laborlaufnummer	Normalbetrieb 9911005	Normalbetrieb 9911006	Normalbetrieb 9911007	Instationärer Betrieb 9911008	Normalbetrieb 9911009	Normalbetrieb 9911010	Normalbetrieb 9911011	Normalbetrieb 9911012	Normalbetrieb 9911013
Naphthalin	3779.21	6517.13	3656.37	120700.69	54299.62	30802.35	217587.39	9528.47	15000.15
Dibenzofuran	0.77	9.32	17.95	16.52	60.52	170.58	344.35	18.39	19.09
Dibenzo-p-dioxin	3.62	0.05	-	-	-	38.35	96.07	-	2.55
Benzol	-	-	-	-	-	32608.70	140169.61	-	14177.69
Toluol	-	-	-	-	-	15841.58	90434.78	-	6887.65
Ethylbenzol	-	-	-	-	-	413.18	3706.12	-	179.64
m/p-Xylol	-	-	-	-	-	3100.96	9872.15	-	1348.24
o-Xylol	-	-	-	-	-	457.00	4344.66	-	198.70
Fluoren	-	-	-	-	-	-	-	-	875.39
Phenanthren	-	-	-	-	-	-	-	-	665.51
Anthracen	-	-	-	-	-	-	-	-	155.30
Fluoranthren	-	-	-	-	-	-	-	-	965.40
Pyren	-	-	-	-	-	-	-	-	644.18
Benz[a]anthracen	-	-	-	-	-	-	-	-	54.42
Chrysen	-	-	-	-	-	-	-	-	9.56
Benzo[e]pyren	-	-	-	-	-	-	-	-	5.59
Benzo[b]fluoranthren	-	-	-	-	-	-	-	-	1.61
Benzo[k]fluoranthren	-	-	-	-	-	-	-	-	3.15
Benzo[a]pyren	-	-	-	-	-	-	-	-	3.58
Dibenz[a,h]anthracen	-	-	-	-	-	-	-	-	0.45
Benzo[g,h,i]perylene	-	-	-	-	-	-	-	-	n.n.
Indeno[1,2,3-cd]pyren	-	-	-	-	-	-	-	-	n.n.

Anhang C-2: HCl-Konzentrationsbereiche im Rohgas der untersuchten Anlagen bei circa 200°C

HCl Konzentrationen an den Anlagen	(mg/m³)
PVA *	20-60
SMVA *	3000-5000
MVA *, **	1000-2000
HVA *	100-500

* : Angaben der Betreiber oder der Projektpartner

** : Eigene Daten

Anhang C-3: Übersicht der Anlagenbedingungen an der PVA

Parameter	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9
Temperatur Brennkammerkopf (°C)	1060	1100	1050	1175	1200	1050	1120	1050	720
Temperatur Brennkammermitte (°C)	740	750	1000	950	1000	950	920	830	775
Temperatur Brennkammerauslaß (°C)	675	670	900	875	940	875	875	775	740
Verweilzeit (qualitativ)	2	2.2	3.1	2.8	2.9	2.2	1.8	1.9	2.4
Vermischung (qualitativ)	4	5	5	6	6	3	1	3	2
Sauerstoff Mittelwert (%)	10	8	4	4	4	2.8	3.3	8	5
Stickstoffgaben (m ³ /h)	-	-	-	-	-	100	100	75	70
CO-Spitzen (qualitativ)	-	-	60	65	50	100	-	100	100
CO ₂ Mittelwert (%)	10.6	12.2	15.6	15.78	15.88	12.2	11.57	9.94	10.63
CO Mittelwert (ppm)	2	0	27	3	70	2	0	227	30
NO ₂ (mg/m ³)	409	323	357	265	322	254	155	262	297
SO ₂ (mg/m ³)	n.n.	n.n.	96	n.n.	7	n.n.	n.n.	86	n.n.

Anhang C-4: Zuordnung der Nummerierung zu den Kongeneren und Homologen für die Korrelationsmatrizen an der PVA, SMVA, MVA und HVA

PVA		SMVA	Alle Temperaturen		MVA	Alle Temperaturen		HVA
Nummer	Substanz	Nummer	Substanz	Nummer	Substanz	Nummer	Substanz	Nummer
I-TEQ (NATO/CCMS)	1	1	I-TEQ (NATO/CCMS)	1	I-TEQ (NATO/CCMS)	1	I-TEQ (NATO/CCMS)	1
I-TEQ (PCDD)	2	2	I-TEQ (PCDD)	2	I-TEQ (PCDD)	2	I-TEQ (PCDD)	2
I-TEQ (PCDF)	3	3	I-TEQ (PCDF)	3	I-TEQ (PCDF)	3	I-TEQ (PCDF)	3
I-TEQ (WHO)	4	4	I-TEQ (WHO)	4	I-TEQ (WHO)	4	I-TEQ (WHO)	4
I-TEQ WHO (PCDD)	5	5	TEQ (PCB nach Safe)	5	TEQ (PCB nach Safe)	5	I-TEQ WHO (PCDD)	5
I-TEQ WHO (PCDF)	6	6	MCDD	6	1-MCDD	6	I-TEQ WHO (PCDF)	6
TEQ (PCB nach Safe)	7	7	DiCDD	7	2-MCDD	7	TEQ (PCB nach Safe)	7
1-MCDD	8	8	TriCDD	8	1,3-DiCDD	8	1-MCDD	8
2-MCDD	9	9	MCDF	9	2,7/2,3/2,8-DiCDD	9	2-MCDD	9
1,3-DiCDD	10	10	DiCDF	10	1,4/1,7-DiCDD	10	1,3-DiCDD	10
2,7/2,3/2,8-DiCDD	11	11	TriCDF	11	1,8-DiCDD	11	2,7/2,3/2,8-DiCDD	11
1,4/1,7-DiCDD	12	12	1-MCDD	12	1,6-DiCDD	12	1,4/1,7-DiCDD	12
1,8-DiCDD	13	13	2-MCDD	13	1,2-DiCDD	13	1,8-DiCDD	13
1,6-DiCDD	14	14	1,3-DiCDD	14	1,9-DiCDD	14	1,6-DiCDD	14
1,2-DiCDD	15	15	2,7/2,3/2,8-DiCDD	15	1,3,7-TriCDD	15	1,2-DiCDD	15
1,9-DiCDD	16	16	1,4/1,7-DiCDD	16	1,3,8-TriCDD	16	1,9-DiCDD	16
1,3,7-TriCDD	17	17	1,8-DiCDD	17	1,3,6-TriCDD	17	1,3,7-TriCDD	17
1,3,8-TriCDD	18	18	1,6-DiCDD	18	1,2,4-TriCDD	18	1,3,8-TriCDD	18
1,3,6-TriCDD	19	19	1,2-DiCDD	19	1,3,9/2,3,7-TriCDD	19	1,3,6-TriCDD	19
1,2,4-TriCDD	20	20	1,9-DiCDD	20	1,4,7-TriCDD	20	1,2,4-TriCDD	20
1,3,9/2,3,7-TriCDD	21	21	1,3,7-TriCDD	21	1,2,3-TriCDD	21	1,3,9/2,3,7-TriCDD	21
1,4,7-TriCDD	22	22	1,3,8-TriCDD	22	1,7,8-TriCDD	22	1,4,7-TriCDD	22
1,2,3-TriCDD	23	23	1,3,6-TriCDD	23	1,2,7-TriCDD	23	1,2,3-TriCDD	23
1,7,8-TriCDD	24	24	1,2,4-TriCDD	24	1,2,8-TriCDD	24	1,7,8-TriCDD	24
1,2,7-TriCDD	25	25	1,3,9/2,3,7-TriCDD	25	1,4,6-TriCDD	25	1,2,7-TriCDD	25
1,2,8-TriCDD	26	26	1,4,7-TriCDD	26	1,2,6-TriCDD	26	1,2,8-TriCDD	26
1,4,6-TriCDD	27	27	1,2,3-TriCDD	27	1,2,9-TriCDD	27	1,4,6-TriCDD	27
1,2,6-TriCDD	28	28	1,7,8-TriCDD	28	1-MCDF	28	1,2,6-TriCDD	28
1,2,9-TriCDD	29	29	1,2,7-TriCDD	29	3-MCDF	29	1,2,9-TriCDD	29
1-MCDF	30	30	1,2,8-TriCDD	30	2-MCDF	30	1-MCDF	30
3-MCDF	31	31	1,4,6-TriCDD	31	4-MCDF	31	3-MCDF	31
2-MCDF	32	32	1,2,6-TriCDD	32	1,3-DiCDF	32	2-MCDF	32
4-MCDF	33	33	1,2,9-TriCDD	33	1,7-DiCDF	33	4-MCDF	33
1,3-DiCDF	34	34	1-MCDF	34	1,4-DiCDF	34	1,3-DiCDF	34
1,7-DiCDF	35	35	3-MCDF	35	1,8-DiCDF	35	1,7-DiCDF	35
1,4-DiCDF	36	36	2-MCDF	36	1,6-DiCDF	36	1,4-DiCDF	36
1,8-DiCDF	37	37	4-MCDF	37	1,2-DiCDF	37	1,8-DiCDF	37
1,6-DiCDF	38	38	1,3-DiCDF	38	2,4-DiCDF	38	1,6-DiCDF	38
1,2-DiCDF	39	39	1,7-DiCDF	39	3,7-DiCDF	39	1,2-DiCDF	39
2,4-DiCDF	40	40	1,4-DiCDF	40	2,7-DiCDF	40	2,4-DiCDF	40
3,7-DiCDF	41	41	1,8-DiCDF	41	2,3-DiCDF	41	3,7-DiCDF	41
2,7-DiCDF	42	42	1,6-DiCDF	42	2,8/3,6-DiCDF	42	2,7-DiCDF	42
2,3-DiCDF	43	43	1,2-DiCDF	43	2,6-DiCDF	43	2,3-DiCDF	43
2,8/3,6-DiCDF	44	44	2,4-DiCDF	44	1,9/3,4-DiCDF	44	2,8/3,6-DiCDF	44
2,6-DiCDF	45	45	3,7-DiCDF	45	4,6-DiCDF	45	2,6-DiCDF	45
1,9/3,4-DiCDF	46	46	2,7-DiCDF	46	1,3,7-TriCDF	46	1,9/3,4-DiCDF	46
4,6-DiCDF	47	47	2,3-DiCDF	47	1,3,8-TriCDF	47	4,6-DiCDF	47
1,3,7-TriCDF	48	48	2,8/3,6-DiCDF	48	1,3,6-TriCDF	48	1,3,7-TriCDF	48
1,3,8-TriCDF	49	49	2,6-DiCDF	49	1,3,4/1,4,8-TriCDF	49	1,3,8-TriCDF	49
1,3,6-TriCDF	50	50	1,9/3,4-DiCDF	50	1,2,4/1,6,7-TriCDF	50	1,3,6-TriCDF	50
1,3,4/1,4,8-TriCDF	51	51	4,6-DiCDF	51	1,7,8-TriCDF	51	1,3,4/1,4,8-TriCDF	51
1,2,4/1,6,7-TriCDF	52	52	1,3,7-TriCDF	52	1,2,3-TriCDF	52	1,2,4/1,6,7-TriCDF	52
1,7,8-TriCDF	53	53	1,3,8-TriCDF	53	1,2,7-TriCDF	53	1,7,8-TriCDF	53
1,2,3-TriCDF	54	54	1,3,6-TriCDF	54	1,2,9-TriCDF	54	1,2,3-TriCDF	54
1,2,7-TriCDF	55	55	1,3,4/1,4,8-TriCDF	55	1,3,9-TriCDF	55	1,2,7-TriCDF	55
1,2,9-TriCDF	56	56	1,2,4/1,6,7-TriCDF	56	2,4,7-TriCDF	56	1,2,9-TriCDF	56
1,3,9-TriCDF	57	57	1,7,8-TriCDF	57	1,2,6/1,2,8-TriCDF	57	1,3,9-TriCDF	57
2,4,7-TriCDF	58	58	1,2,3-TriCDF	58	2,4,8-TriCDF	58	2,4,7-TriCDF	58
1,2,6/1,2,8-TriCDF	59	59	1,2,7-TriCDF	59	1,4,9-TriCDF	59	1,2,6/1,2,8-TriCDF	59
2,4,8-TriCDF	60	60	1,2,9-TriCDF	60	2,3,7-TriCDF	60	2,4,8-TriCDF	60
1,4,9-TriCDF	61	61	1,3,9-TriCDF	61	1,6,8/2,3,4/2,3,8-TriCDF	61	1,4,9-TriCDF	61
2,3,7-TriCDF	62	62	2,4,7-TriCDF	62	2,3,6/3,4,7-TriCDF	62	2,3,7-TriCDF	62
1,6,8/2,3,4/2,3,8-TriCDF	63	63	1,2,6/1,2,8-TriCDF	63	2,6,7-TriCDF	63	1,6,8/2,3,4/2,3,8-TriCDF	63
2,3,6/3,4,7-TriCDF	64	64	2,4,8-TriCDF	64	1,4,6/1,4,7-TriCDF	64	2,3,6/3,4,7-TriCDF	64
2,6,7-TriCDF	65	65	1,4,9-TriCDF	65	3,4,6-TriCDF	65	2,6,7-TriCDF	65
1,4,6/1,4,7-TriCDF	66	66	2,3,7-TriCDF	66	2,4,6-TriCDF	66	1,4,6/1,4,7-TriCDF	66
3,4,6-TriCDF	67	67	1,6,8/2,3,4/2,3,8-TriCDF	67	MCDD	67	3,4,6-TriCDF	67
2,4,6-TriCDF	68	68	2,3,6/3,4,7-TriCDF	68	DiCDD	68	2,4,6-TriCDF	68
MCDD	69	69	2,6,7-TriCDF	69	TriCDD	69	MCDD	69
DiCDD	70	70	1,4,6/1,4,7-TriCDF	70	MCDF	70	DiCDD	70

7. ANHANG

PVA	SMVA	MVA	HVA
Nummer	Substanz	Nummer	Substanz
TriCDD	71	71	71
MCDF	72	72	72
DiCDF	73	73	73
TriCDF	74	74	74
2,3'-DiCB	75	75	75
2,3- + 2,4'-DiCB	76	76	76
3,3'-DiCB	77	77	77
3,4'-DiCB	78	78	78
4,4'-DiCB	79	79	79
2,2',6'-TriCB	80	80	80
2,2',5'-TriCB	81	81	81
2,2',4'-TriCB	82	82	82
2,3,6'-TriCB	83	83	83
2,4',6'-TriCB	84	84	84
2,2',3'-TriCB	85	85	85
2,4,4'- + 2,4',5'-TriCB	86	86	86
2',3,4'-TriCB	87	87	87
2,2',3'-TriCB	88	88	88
DiCB	89	89	89
TriCB	90	90	90
MCBz	91	91	91
1,3-DiCBz	92	92	92
1,4-DiCBz	93	93	93
1,2-DiCBz	94	94	94
1,3,5-TriCBz	95	95	95
1,2,4-TriCBz	96	96	96
1,2,3-TriCBz	97	97	97
1,2,3,5-TeCBz	98	98	98
1,2,4,5-TeCBz	99	99	99
1,2,3,4-TeCBz	100	100	100
PeCBz	101	101	101
HxCBz	102	102	102
4-MCPh	103	103	103
2,4-DiCPh	104	104	104
2,4,6-TriCPh	105	105	105
2,3,6-TriCPh	106	106	106
2,3,5-TriCPh	107	107	107
2,4,5-TriCPh	108	108	108
2,3,4-TriCPh	109	109	109
3,4,5-TriCPh	110	110	110
2,3,5,6-TeCPh	111	111	111
2,3,4,6-TeCPh	112	112	112
2,3,4,5-TeCPh	113	113	113
PeCPh	114	114	114
MCPH	115	115	115
DiCPh	116	116	116
TriCPh	117	117	117
TeCPh	118	118	118
PeCPh	119	119	119
	120	120	120
	121	121	121
	122	122	122
	123	123	123
	124	124	124
	125	125	125
	126	126	126
	127	127	127
	128	128	128
	129	129	129
	130	130	130
	131	131	131
	132		
	133		
	134		
	135		
	136		
	137		

Anhang C-5: Korrelationskoeffizienten (KK) der niedrig chlorierten Aromaten für die PVA und SMVA mit den (I-)TEQ Werte der PCDD/F und PCB

PVA		SMVA (650-750°C)		SMVA (250-300°C)		SMVA (70°C)	
Leitparameter	KK	Leitparameter	KK	Leitparameter	KK	Leitparameter	KK
I-TEQ (NATO/CCMS)	1.00	I-TEQ (NATO/CCMS)	1.00	I-TEQ (NATO/CCMS)	1.00	I-TEQ (NATO/CCMS)	1.00
I-TEQ (WHO)	0.99	I-TEQ (WHO)	1.00	I-TEQ (WHO)	1.00	I-TEQ (WHO)	1.00
I-TEQ (PCDF)	0.97	I-TEQ (PCDF)	1.00	I-TEQ (PCDF)	1.00	I-TEQ (PCDF)	1.00
I-TEQ WHO (PCDF)	0.97	I-TEQ (PCDD)	0.98	I-TEQ (PCDD)	0.96	MCBz	0.98
1,2,3-TriCBz	0.92	2,4,5-TriCPh	0.87	MCBz	0.92	I-TEQ (PCDD)	0.98
PeCBz	0.89	MCPH	0.87	PeCBz	0.91	TriCBz	0.98
TriCBz	0.88	2-MCPh	0.87	TeCBz	0.90	1,2,3-TriCBz	0.97
MCBz	0.86	MCBz	0.87	TriCBz	0.90	PeCBz	0.96
1,2-DiCBz	0.86	DiCPh	0.87	1,2,4-TriCBz	0.89	1,2-DiCBz	0.96
1,8-DiCDD	0.85	2,3,4-TriCPh	0.86	HxCBz	0.89	1,2,3,5-TeCBz	0.96
1,3,5-TriCBz	0.81	2,6-DiCDF	0.86	1,3-DiCBz	0.88	TeCBz	0.96
1,4/1,7-DiCDD	0.78	3,4,5-TriCPh	0.86	1,2,3,4-TeCBz	0.88	1,2,4-TriCBz	0.96
1,2,4-TriCBz	0.77	TriCPh	0.86	1,2,3-TriCBz	0.88	DiCBz	0.96
1,6-DiCDF	0.63	2,8/3,6-DiCDF	0.86	DiCBz	0.87	1,2,3,4-TeCBz	0.96
1,2,4-TriCDD	0.58	DiCDF	0.86	TEQ (PCB nach Safe)	0.85	HxCBz	0.95
1,3,6-TriCDD	0.58	TriCDD	0.86	TriCDF	0.84	1,3-DiCBz	0.94
2,4,8-TriCDF	0.55	1,2,4-TriCBz	0.86	1,4-DiCBz	0.84	TriCDF	0.93
I-TEQ (PCDD)	0.54	1,2,3-TriCDD	0.86	1,2-DiCBz	0.84	1,2,4,5-TeCBz	0.90
3,3'-DiCB	0.54	1,2-DiCDF	0.86	TriCDD	0.80	1,4-DiCBz	0.89
1,2-DiCDD	0.54	3,7-DiCDF	0.86	1,2,3-TriCDF	0.80	DiCDF	0.87
1,3,9/2,3,7-TriCDD	0.53	2,6-DiCPh	0.86	DiCDF	0.80	1,4,7-TriCDD	0.84
I-TEQ WHO (PCDD)	0.51	1,3,9/2,3,7-TriCDD	0.86	2,4,6-TriCDF	0.80	TriCDD	0.81
1,9-DiCDD	0.49	TriCBz	0.86	2',3,4-TriCB	0.80	1,3,8-TriCDD	0.80
1,2,4/1,6,7-TriCDF	0.48	1,3,6-TriCDD	0.86	2,3,7-TriCDF	0.80	2,3,7-TriCDF	0.79
1,4-DiCDF	0.48	1,2,4,5-TeCBz	0.86	1,2,3-TriCDD	0.79	1,7,8-TriCDD	0.79
3,4,6-TriCDF	0.48	1,6-DiCDF	0.86	PeCPh	0.79	1,4,9-TriCDF	0.79
1,4,7-TriCDD	0.40	2,3-DiCDF	0.85	2,6,7-TriCDF	0.79	1,3,7-TriCDD	0.79
1,2,9-TriCDD	0.40	1,3,7-TriCDD	0.85	MCDF	0.78	MCDF	0.78
2,7/2,3/2,8-DiCDD	0.37	4-MCPh	0.85	2,3,6-TriCPh	0.78	1,2,6/1,2,8-TriCDF	0.78
1,4,9-TriCDF	0.36	PeCBz	0.85	1,3,4/1,4,8-TriCDF	0.78	2,4,6-TriCDF	0.78
TriCDD	0.36	1,3,5-TriCBz	0.85	2,3,4,6-TeCPh	0.78	1,6,8/2,3,4/2,3,8-TriCDF	0.77
1,3,7-TriCDD	0.34	2,3,6-TriCPh	0.85	1,2,7-TriCDF	0.77	1,4-DiCDF	0.77
2,6,7-TriCDF	0.31	1,2,3-TriCBz	0.85	MCPH	0.77	2,6,7-TriCDF	0.77
1,2,6-TriCDD	0.31	HxCBz	0.85	2,4,7-TriCDF	0.77	1,4,6/1,4,7-TriCDF	0.76
1,7,8-TriCDD	0.30	1,2,6/1,2,8-TriCDF	0.85	1,6,8/2,3,4/2,3,8-TriCDF	0.77	4-MCDF	0.75
1,3,8-TriCDD	0.30	DiCDD	0.85	1,2,8-TriCDD	0.77	1,2,4/1,6,7-TriCDF	0.75
2,4,6-TriCDF	0.29	1-MCDF	0.85	4,6-DiCDF	0.77	2,4,7-TriCDF	0.75
1,2,9-TriCDF	0.29	1,2,6-TriCDD	0.85	1,7,8-TriCDF	0.77	2,4,8-TriCDF	0.75
2,3,7-TriCDF	0.29	1,6-DiCDD	0.84	3,4,6-TriCDF	0.77	1,3,9-TriCDF	0.74
1,4,6/1,4,7-TriCDF	0.26	1,4,6-TriCDD	0.84	1,3,8-TriCDD	0.77	3,4,6-TriCDF	0.74
2,4,5-TriCPh	0.24	1,9/3,4-DiCDF	0.84	1,3,7-TriCDD	0.77	1,3-DiCDF	0.74
2,4,7-TriCDF	0.24	1,4,7-TriCDD	0.84	1,4,9-TriCDF	0.77	1,3-DiCDD	0.74
1,2,3-TriCDD	0.21	1,3,8-TriCDD	0.84	TeCPh	0.77	TEQ (PCB nach Safe)	0.74
DiCDD	0.21	1,3-DiCDF	0.84	1,2,6/1,2,8-TriCDF	0.77	1,3,6-TriCDF	0.73
TriCDF	0.21	MCB	0.84	1,2,4,5-TeCBz	0.77	1,3,5-TriCBz	0.73
1,4,6-TriCDD	0.21	2,7/2,3/2,8-DiCDD	0.84	1,3,6-TriCDF	0.77	3,4-DiCPh	0.73
1,7,8-TriCDF	0.20	1,2,7-TriCDF	0.84	2,4,6-TriCPh	0.76	1,2,7-TriCDF	0.73
1,6,8/2,3,4/2,3,8-TriCDF	0.19	1,2-DiCBz	0.84	1,3,9/2,3,7-TriCDD	0.76	1,3,4/1,4,8-TriCDF	0.73
1,2,7-TriCDD	0.17	2,4,7-TriCDF	0.84	1,3,7-TriCDF	0.76	2,4-DiCDF	0.72
2,3,4-TriCPh	0.14	2,4,6-TriCPh	0.83	1,2,9-TriCDF	0.76	1,3,9/2,3,7-TriCDD	0.72
2,4-DiCDF	0.13	TriCDF	0.83	1,4,6/1,4,7-TriCDF	0.76	4,6-DiCDF	0.72
1,2,4,5+1,2,3,5-TeCBz	0.11	1,2,9-TriCDD	0.83	1,3,6-TriCDD	0.76	1,2,3-TriCDF	0.72
2,3'-DiCB	0.10	1,4/1,7-DiCDD	0.83	TriCPh	0.76	1,7,8-TriCDF	0.72
24-DiCPh	0.09	3,4-DiCPh	0.83	1,2,3,5-TeCBz	0.76	2,3,4,6-TeCPh	0.71
DiCPh	0.09	2,3,6-TriCB	0.83	TeCB	0.75	1,3,8-TriCDF	0.71
1,2,3-TriCDF	0.09	1,2,7-TriCDD	0.83	1,2,4-TriCDD	0.75	2-MCPh	0.71
1,3-DiCDD	0.06	1,7-DiCDF	0.83	1,3,8-TriCDF	0.75	1,3,7-TriCDF	0.71
2-MCDD	0.04	2-MCB	0.83	DiCPh	0.74	DCB	0.70
1,2,6/1,2,8-TriCDF	0.04	1,6,8/2,3,4/2,3,8-TriCDF	0.83	1,3-DiCDD	0.74	1,2,9-TriCDF	0.70
1,2,7-TriCDF	0.04	1,2,3-TriCDF	0.83	2,7/2,3/2,8-DiCDD	0.74	2,3,5-TriCPh	0.70
MCDD	0.03	1,2,4-TriCDD	0.83	TriCB	0.73	2,3-DiCDF	0.69
1-MCDD	0.02	DiCBz	0.83	1,2,9-TriCDD	0.73	DiCDD	0.69
1,2,8-TriCDD	0.01	2-MCB	0.83	2,4-DiCPh	0.73	MCPH	0.69
TriCPh	0.01	3-MCB	0.83	2,4,5-TriCPh	0.73	1,7-DiCDF	0.68
1,8-DiCDF	0.00	2,7-DiCDF	0.83	DiCDD	0.73	2,4,5-TriCPh	0.68
345-TriCPh	0.00	1,2,8-TriCDD	0.83	2,6-DiCPh	0.73	PeCPh	0.68
HxCBz	-0.01	2,4,6-TriCDF	0.83	1-MCDF	0.72	2,6-DiCPh	0.68
1,9/3,4-DiCDF	-0.01	1,2-DiCDD	0.83	1,2,4/1,6,7-TriCDF	0.72	2-MCDD	0.67
TeCBz	-0.01	1-MCDD	0.83	1,4,7-TriCDD	0.72	1-MCDF	0.67

7. ANHANG

PVA		SMVA (650-750°C)		SMVA (250-300°C)		SMVA (70°C)	
Leitparameter	KK	Leitparameter	KK	Leitparameter	KK	Leitparameter	KK
2,6-DiCDF	-0.04	1,7,8-TriCDF	0.82	1,2,7-TriCDD	0.71	2-MCDF	0.66
4,6-DiCDF	-0.05	1,8-DiCDD	0.82	2,4,8-TriCDF	0.71	MCDD	0.66
2,3,6-TriCPh	-0.06	2,6,7-TriCDF	0.82	2,3,5-TriCPh	0.70	4-MCPh	0.66
2,4,6-TriCPh	-0.07	3,4,6-TriCDF	0.82	2,3'-DiCB	0.70	3,7-DiCDF	0.66
2,3,4,5-TeCPh	-0.07	MCDD	0.82	4-MCDF	0.70	2,6-DiCDF	0.66
1,3,8-TriCDF	-0.08	1,2,3,5-TeCBz	0.82	1-MCDD	0.69	1,9/3,4-DiCDF	0.66
1,3,6-TriCDF	-0.08	1,4,6/1,4,7-TriCDF	0.81	3,4-DiCPh	0.69	3-MCDF	0.66
1,3,7-TriCDF	-0.10	1,3,6-TriCDF	0.81	4-MCPh	0.69	1-MCDD	0.65
2,3-DiCDF	-0.11	1,3,8-TriCDF	0.81	2-MCDF	0.69	DiCPh	0.65
1,7-DiCDF	-0.11	MCDF	0.81	MCDD	0.69	2-MCB	0.64
1,2-DiCDF	-0.12	2-MCDD	0.81	2-MCDD	0.68	2,8/3,6-DiCDF	0.64
DiCDF	-0.12	2,3,6/3,4,7-TriCDF	0.81	3-MCDF	0.68	3,4,5-TriCPh	0.64
TeCPh	-0.12	4,6-DiCDF	0.81	1,9-DiCDD	0.68	1,8-DiCDF	0.64
3,7-DiCDF	-0.15	2,3,5-TriCPh	0.80	1,7,8-TriCDD	0.68	OCB	0.63
1,3-DiCDF	-0.16	1,3,7-TriCDF	0.80	2,4,4'- + 2,4',5-TriCB	0.67	1,6-DiCDF	0.63
2-MCDF	-0.19	1,7,8-TriCDD	0.80	1,8-DiCDD	0.67	2,4,6-TriCPh	0.63
PeCPh	-0.19	1,3,4/1,4,8-TriCDF	0.80	1,2-DiCDF	0.66	TriCPh	0.62
2,4,4'- + 2,4',5-TriCB	-0.19	1,3-DiCBz	0.80	2,2',3-TriCB	0.66	TeCPh	0.62
TEQ (PCB nach Safe)	-0.20	TeCB	0.79	1,3,9-TriCDF	0.66	MCB	0.61
1,3,4/1,4,8-TriCDF	-0.20	1,8-DiCDF	0.79	2,4-DiCDF	0.65	1,2,4-TriCDD	0.60
2,2',3-TriCB	-0.20	TeCBz	0.79	2,6-DiCDF	0.65	2,3,4,5-TeCPh	0.59
4-MCDF	-0.20	1,4-DiCBz	0.79	2,3,4,5-TeCPh	0.65	1,2,7-TriCDD	0.59
4,4'-DiCB	-0.24	3,4'-DiCB	0.79	1,4/1,7-DiCDD	0.65	1,2-DiCDF	0.58
2',3,4-TriCB	-0.25	2,4',6-TriCB	0.78	1,3-DiCDF	0.65	1,3,6-TriCDD	0.58
4-MCPh	-0.25	2,4,4'- + 2,4',5-TriCB	0.78	PeCB	0.65	1,2,9-TriCDD	0.58
MCDF	-0.27	TriCB	0.78	2-MCPh	0.65	2-MCB	0.57
TriCB	-0.27	2,3'-DiCB	0.78	2,8/3,6-DiCDF	0.64	2,3,4-TriCPh	0.56
2,3,6/3,4,7-TriCDF	-0.27	2-MCDF	0.78	1,8-DiCDF	0.64	2,4-DiCPh	0.56
2,4',6-TriCB	-0.28	2,2',3-TriCB	0.78	1,9/3,4-DiCDF	0.64	2',3,4-TriCB	0.55
3,4'-DiCB	-0.28	2,3- + 2,4'-DiCB	0.78	2,3-DiCDF	0.64	2,3,5,6-TeCPh	0.53
1-MCDF	-0.28	2',3,4-TriCB	0.77	1,2-DiCDD	0.64	2,7/2,3/2,8-DiCDD	0.49
3-MCDF	-0.29	PeCB	0.77	1,2,6-TriCDD	0.63	1,4/1,7-DiCDD	0.45
MCPh	-0.31	1,2,3,4-TeCBz	0.77	3,7-DiCDF	0.63	2,3,6/3,4,7-TriCDF	0.45
2,2',3-TriCB	-0.32	1,2,9-TriCDF	0.76	1,4,6-TriCDD	0.62	1,2,3-TriCDD	0.45
2,2',4-TriCB	-0.33	2,2',5-TriCB	0.76	1,3,5-TriCBz	0.62	TeCB	0.44
2,8/3,6-DiCDF	-0.36	1,4-DiCDF	0.76	3,4,5-TriCPh	0.61	4,4'-DiCB	0.43
2,3,5-TriCPh	-0.36	TEQ (PCB nach Safe)	0.75	3-MCB	0.60	NCB	0.43
2-MCPh	-0.36	1,3,9-TriCDF	0.75	2,2',3-TriCB	0.60	2,3,6-TriCPh	0.40
2,2',5-TriCB	-0.38	1,9-DiCDD	0.74	1,7-DiCDF	0.59	DiCB	0.34
1,2,3,4-TeCBz	-0.42	HpCB	0.74	OCB	0.58	1,9-DiCDD	0.32
2,3,4,6-TeCPh	-0.44	DiCB	0.74	3,3'-DiCB	0.57	1,2,8-TriCDD	0.32
2,3,5,6-TeCPh	-0.46	2,2',6-TriCB	0.74	2,3,4-TriCPh	0.57	2,3- + 2,4'-DiCB	0.26
2,3- + 2,4'-DiCB	-0.49	1,3-DiCDD	0.73	HxCB	0.57	3,4'-DiCB	0.25
DiCB	-0.55	1,4,9-TriCDF	0.73	DiCB	0.57	HpCB	0.21
2,3,6-TriCB	-0.56	NCB	0.73	1,6-DiCDF	0.56	PeCB	0.20
2,7-DiCDF	-0.69	OCB	0.71	HpCB	0.53	TriCB	0.15
2,2',6-TriCB	-0.70	HxCB	0.71	1,6-DiCDD	0.52	3,3'-DiCB	0.07
		3-MCDF	0.70	2,2',5-TriCB	0.52	1,8-DiCDD	0.00
		4-MCDF	0.69	2,3- + 2,4'-DiCB	0.51	1,6-DiCDD	0.00
		2,4-DiCDF	0.68	2,3,6/3,4,7-TriCDF	0.50	1,2-DiCDD	0.00
		2,2',4-TriCB	0.66	DCB	0.49	1,2,6-TriCDD	0.00
		1,2,4/1,6,7-TriCDF	0.65	2,4',6-TriCB	0.49	2,7-DiCDF	0.00
		2,3,7-TriCDF	0.62	NCB	0.45	2,4',6-TriCB	-0.01
		2,4,8-TriCDF	0.61	4,4'-DiCB	0.45	2,2',6-TriCB	-0.05
		3,3'-DiCB	0.54	2-MCB	0.44	2,2',5-TriCB	-0.06
		4,4'-DiCB	0.48	MCB	0.44	2,2',3-TriCB	-0.08
		2,2',3-TriCB	0.45	2,2',4-TriCB	0.43	HxCB	-0.10
		2,3,4,6-TeCPh	0.31	3,4'-DiCB	0.38	2,2',3-TriCB	-0.10
		TeCPh	0.24	1,4-DiCDF	0.38	3-MCB	-0.14
		PeCPh	0.20	2-MCB	0.34	2,3'-DiCB	-0.15
		DCB	0.00	2,7-DiCDF	0.33	2,2',4-TriCB	-0.20
		2,3,5,6-TeCPh	0.00	2,3,5,6-TeCPh	0.31	2,3,6-TriCB	-0.29
		2,3,4,5-TeCPh	-0	2,3,6-TriCB	0.23	2,4,4'- + 2,4',5-TriCB	-0.30
		2,4-DiCPh	-0.3	2,2',6-TriCB	0.12	1,4,6-TriCDD	-1.00

7. ANHANG

Anhang C-6: Korrelationskoeffizienten (KK) der niedrig chlorierten Aromaten für die MVA und HVA mit den (I-)TEQ Werten der PCDD/F und PCB

MVA (700-850°C)		MVA (550-600°C)		MVA (200-250°C)		MVA (90°C)		HVA	
Leitparameter	KK	Leitparameter	KK	Leitparameter	KK	Leitparameter	KK	Leitparameter	KK
I-TEQ (NATO/CCMS)	1.00	I-TEQ (NATO/CCMS)	1.00	I-TEQ (NATO/CCMS)	1.00	I-TEQ (NATO/CCMS)	1.00	I-TEQ (NATO/CCMS)	1.00
I-TEQ WHO	1.00	I-TEQ (WHO)	1.00	I-TEQ WHO	1.00	I-TEQ (WHO)	1.00	I-TEQ WHO	1.00
I-TEQ (PCDF)	1.00	I-TEQ (PCDF)	1.00	I-TEQ (PCDF)	1.00	I-TEQ (PCDF)	1.00	I-TEQ (PCDF)	1.00
I-TEQ (PCDD)	0.98	I-TEQ (PCDD)	0.99	I-TEQ (PCDD)	0.99	TeCBz	0.99	I-TEQ WHO (PCDF)	1.00
1,3,9/2,3,7-TricDD	0.89	TEQ (PCB nach Safe)	0.98	PeCBz	0.96	1,2,4-TricBz	0.98	I-TEQ (PCDD)	0.99
2,4,6-TricDF	0.87	2,4,5-TricB	0.96	1,2,9-TricDF	0.96	I-TEQ (PCDD)	0.98	I-TEQ WHO (PCDD)	0.99
1,2,8-TricDD	0.86	PeCBz	0.95	1,2,3,4-TeCBz	0.95	1,2,3,5-TeCBz	0.98	TeCBz	0.91
TricDD	0.85	1,2,3,4-TeCBz	0.95	1,4,7-TricDD	0.94	1,2-DicBz	0.96	1,2,3,4-TeCBz	0.89
1,7,8-TricDD	0.83	2,3,5+2,3,6-TricB	0.94	1,2,9-TricDD	0.94	1,2,3,4-TeCBz	0.96	2',3,4-TricB	0.87
1,2,7-TricDD	0.83	3,3',5-TricB	0.93	1,2,8-TricDD	0.94	MCBz	0.96	1,2,4,5-TeCBz	0.86
1,3,8-TricDD	0.81	MCBz	0.92	TeCBz	0.94	HxCBz	0.96	1,2,3,5-TeCBz	0.86
1,2,9-TricDD	0.81	HxCBz	0.91	1,2,7-TricDD	0.94	1,2,4,5-TeCBz	0.96	2,3'-DicB	0.84
1,4,6/1,4,7-TricDF	0.80	3,5-DicB	0.90	1,3,4/1,4,8-TricDF	0.93	1,2,3-TricBz	0.96	2,2',6-TricB	0.84
2,3,7-TricDF	0.79	TeCBz	0.89	MCBz	0.93	1,4-DicBz	0.96	TricBz	0.84
1,2,9-TricDF	0.78	2,4+2,5-DicB	0.88	TricDF	0.93	1,3,5-TricBz	0.95	1,3,5-TricBz	0.83
1,3,7-TricDF	0.75	TricBz	0.87	1,2,6-TricDD	0.93	PeCBz	0.95	2,4,4'- + 2,4',5-TricB	0.83
1,2,3-TricDD	0.75	1,2,7-TricDD	0.84	1,7,8-TricDD	0.93	DicBz	0.91	2,3- + 2,4'-DicB	0.82
1,7,8-TricDF	0.74	1,2,3-TricDD	0.84	1,4,6-TricDD	0.93	1,3-DicBz	0.90	PeCBz	0.82
1,2,3-TricDF	0.72	1,2,9-TricDD	0.83	1,4,9-TricDF	0.92	DicB	0.85	TricB	0.82
1,6,8/2,3,4/2,3,8-TricDF	0.72	1,4,7-TricDD	0.83	TricBz	0.92	2,4,6-TricDF	0.82	3,4-DicB	0.81
1,3,6-TricDF	0.71	1,2,6-TricDD	0.83	1,3,9/2,3,7-TricDD	0.91	3,4,6-TricDF	0.82	2,3,5-DicB	0.81
1,4,6-TricDD	0.68	1,2,8-TricDD	0.83	2,4,6-TricDF	0.91	1,8-DicDD	0.82	MCBz	0.80
1,3,7-TricDD	0.60	1,3,9/2,3,7-TricDD	0.83	1,3,6-TricDF	0.91	2,6,7-TricDF	0.81	2,3,6-TricB	0.80
1,2,7-TricDF	0.60	1,2,3-TricDF	0.83	1,2,3-TricDF	0.91	TricDF	0.81	TEQ (PCB nach Safe)	0.80
TricDF	0.58	1,7,8-TricDD	0.82	TricDD	0.91	MCDD	0.80	2,2',3-TricB	0.79
1,4,7-TricDD	0.57	TricDD	0.82	2,4,5-TricB	0.90	2,7-DicDF	0.80	1,2,4-TricBz	0.78
3,4,6-TricDF	0.56	1,2,3-TricBz	0.82	3,4,6-TricDF	0.90	TricDD	0.79	DicB	0.78
2,4,7-TricDF	0.56	2,6,7-TricDF	0.82	TEQ (PCB nach Safe)	0.90	MCDF	0.78	DicBz	0.77
1,3,6-TricDD	0.50	2,4,6-TricDF	0.82	3,3',5-TricB	0.90	1,2-DicDF	0.78	3-MCDF	0.76
1,3,4/1,4,8-TricDF	0.48	2,3,6/3,4,7-TricDF	0.82	2,4+2,5-DicB	0.90	2,4,7-TricDF	0.78	1,3-DicBz	0.75
1,2,6-TricDD	0.48	1,3,7-TricDD	0.81	2,6,7-TricDF	0.90	2,3,6/3,4,7-TricDF	0.78	1-MCDF	0.75
1,3,8-TricDF	0.48	1,4,9-TricDF	0.81	1,2,7-TricDF	0.90	1,4,6/1,4,7-TricDF	0.78	2-MCDF	0.75
1,3,9-TricDF	0.44	1,3,6-TricDD	0.81	2,3,6/3,4,7-TricDF	0.90	1,6,8/2,3,4/2,3,8-TricDF	0.77	1,4-DicBz	0.74
2,6,7-TricDF	0.38	1,3,8-TricDD	0.81	2,3,7-TricDF	0.89	DicDF	0.77	1,2-DicBz	0.74
TEQ (PCB nach Safe)	0.33	1,2,3,5-TeCBz	0.80	1,2,4,5-TeCBz	0.89	2,4-DicDF	0.76	2,4-DicPh	0.73
HxCBz	0.33	1,2,4-TricDD	0.80	1,4,6/1,4,7-TricDF	0.89	1,4/1,7-DicDD	0.76	2,2',3-TricB	0.72
2,7-DicDF	0.31	3,4,6-TricDF	0.80	1,2,4-TricDD	0.89	1,2,9-TricDF	0.76	2,4-DicDF	0.72
1,2,6/1,2,8-TricDF	0.31	1,4,6-TricDD	0.80	1,2,3-TricDD	0.89	1,4,9-TricDF	0.75	2,4,6-TricPh	0.72
3,3',5-TricB	0.26	2,3,7-TricDF	0.79	2,4,7-TricDF	0.88	1,3,9-TricDF	0.75	1,2,7-TricDD	0.72
1,2,4/1,6,7-TricDF	0.26	2,8/3,6-DicDF	0.79	1,3,6-TricDD	0.88	TricBz	0.75	2,4,7-TricDF	0.72
2,4,8-TricDF	0.24	1,2-DicDF	0.78	1,9-DicDD	0.88	1,9/3,4-DicDF	0.75	1,3,7-TricDD	0.72
1,2,4-TricDD	0.21	TricDF	0.78	1,6,8/2,3,4/2,3,8-TricDF	0.88	1,7,8-TricDF	0.75	DicPh	0.71
1,4-DicDF	0.21	1,2-DicBz	0.78	1,2,3,5-TeCBz	0.87	1,2,6-TricDD	0.74	2,6-DicDF	0.71
MCBz	0.19	1,2,9-TricDF	0.78	1,7,8-TricDF	0.87	2,4,8-TricDF	0.74	1,2,4/1,6,7-TricDF	0.71
2,3,4-TricB	0.19	1,3,5-TricBz	0.78	1,2,6/1,2,8-TricDF	0.87	1,2,6/1,2,8-TricDF	0.74	DicDF	0.71
PeCBz	0.10	2,4-DicDF	0.77	2,3,5+2,3,6-TricB	0.87	1,2,7-TricDF	0.74	4,6-DicDF	0.71
2,3,5+2,3,6-TricB	0.09	1,4,6/1,4,7-TricDF	0.77	2,4,8-TricDF	0.87	TEQ (PCB nach Safe)	0.74	2,8/3,6-DicDF	0.71
1,4,9-TricDF	0.07	1,8-DicDD	0.77	1,6-DicDD	0.86	1,2,3-TricDF	0.73	1,9/3,4-DicDF	0.71
3,7-DicDF	0.07	1,4/1,7-DicDD	0.77	1,2-DicDD	0.85	2,3,7-TricDF	0.73	1,2-DicDF	0.71
2,4,6-TricB	0.03	2,3,4-TricB	0.77	1,3,7-TricDD	0.84	1,3,8-TricDF	0.72	2,7/2,3/2,8-DicDD	0.70
2,3,6/3,4,7-TricDF	0.02	2,4,7-TricDF	0.77	2,8/3,6-DicDF	0.84	1,3-DicDD	0.72	2,3,4-TricPh	0.70
1,9-DicDD	0.02	1,3,4/1,4,8-TricDF	0.76	2,6-DicDF	0.84	3,7-DicDF	0.71	1,2,3-TricDF	0.70
1,2,3-TricBz	0.00	1,6-DicDD	0.76	1,2-DicDF	0.84	1,7,8-TricDD	0.71	TricDF	0.70
2,4,5-TricB	-0.02	2,4,8-TricDF	0.76	1,2,3-TricBz	0.83	1-MCDF	0.70	1,3,4/1,4,8-TricDF	0.70
1,3-DicBz	-0.03	DicDD	0.75	4,6-DicDF	0.83	1,2,3-TricDD	0.70	3,7-DicDF	0.70
1-MCDF	-0.10	1,2,6/1,2,8-TricDF	0.75	1,2,4/1,6,7-TricDF	0.83	1,4-DicDF	0.69	2,4,6-TricDF	0.69
1,6-DicDD	-0.13	4,6-DicDF	0.75	1,3,8-TricDD	0.83	2,7/2,3/2,8-DicDD	0.69	2,3-DicDF	0.69
2,6-DicDF	-0.14	1,9/3,4-DicDF	0.75	DicDF	0.83	1,6-DicDF	0.69	1,3,9/2,3,7-TricDD	0.69
TricBz	-0.16	1,2-DicDD	0.75	1,3,7-TricDF	0.83	4,6-DicDF	0.68	3,4,6-TricDF	0.69
1,3,5-TricBz	-0.17	2,7/2,3/2,8-DicDD	0.75	1,3,8-TricDF	0.82	1,3,4/1,4,8-TricDF	0.68	1,2,6/1,2,8-TricDF	0.69
3,3',4-TricB	-0.17	DicBz	0.74	1,4/1,7-DicDD	0.82	1,2,4/1,6,7-TricDF	0.68	1,3,6-TricDD	0.69
2,8/3,6-DicDF	-0.20	1,2,7-TricDF	0.74	3,4'-DicB	0.82	1,8-DicDF	0.68	1,3,6-TricDF	0.69
1,2-DicBz	-0.20	2,6-DicDF	0.73	1,8-DicDD	0.82	3,3',5-TricB	0.67	MCDF	0.69
DicBz	-0.22	1,3,6-TricDF	0.73	DicBz	0.81	1,3,6-TricDF	0.66	1,3,7-TricDF	0.69
3,4,4'-TricB	-0.24	DicDF	0.73	1,9/3,4-DicDF	0.80	2,3-DicDF	0.66	1,8-DicDF	0.69
3,4',5-TricB	-0.26	1,3-DicDD	0.73	2,3-DicDF	0.79	TricB	0.66	1,3,8-TricDF	0.69
2,3-DicDF	-0.26	1,7,8-TricDF	0.72	1,2-DicBz	0.79	3,4,4'-TricB	0.66	HxCBz	0.68
DicDF	-0.26	1,6,8/2,3,4/2,3,8-TricDF	0.72	HxCBz	0.79	2,8/3,6-DicDF	0.65	4-MCDF	0.68
1,9/3,4-DicDF	-0.27	1,9-DicDD	0.72	1,8-DicDF	0.78	1,9-DicDD	0.65	1,8-DicDD	0.68

7. ANHANG

MVA (700-850°C)		MVA (550-600°C)		MVA (200-250°C)		MVA (90°C)		HVA	
Leitparameter	KK	Leitparameter	KK	Leitparameter	KK	Leitparameter	KK	Leitparameter	KK
2,3',4'-TriCB	-0.28	3-MCB	0.72	1,3-DiCDF	0.78	MCB	0.64	PeCPh	0.68
2,7/2,3/2,8-DiCDD	-0.29	3,3'-DiCB	0.71	3,4-DiCB	0.77	1,4,6-TriCDD	0.64	2,4',6'-TriCB	0.68
2,4-DiCDF	-0.29	1,3-DiCDF	0.71	DiCDD	0.77	3,4',5'-TriCB	0.64	1,4,6/1,4,7-TriCDF	0.68
1,2-DiCDF	-0.31	1,3,7-TriCDF	0.70	1,3,9-TriCDF	0.77	2,3,4'-TriCB	0.62	1,7,8-TriCDD	0.67
1,2,3,4-TeCBz	-0.31	1,2,4/1,6,7-TriCDF	0.70	3,4',5'-TriCB	0.76	2-MCDD	0.61	2-MCDD	0.67
1,4-DiCBz	-0.32	2-MCDF	0.70	2,7/2,3/2,8-DiCDD	0.76	2,6-DiCDF	0.60	2,3,4,6-TeCPh	0.67
MCDF	-0.33	2,3-DiCDF	0.70	2,4-DiCDF	0.76	3,3',4'-TriCB	0.60	2,6,7-TriCDF	0.67
DiCDD	-0.33	1,3,8-TriCDF	0.69	3,7-DiCDF	0.75	1,2-DiCDD	0.59	1,2,7-TriCDF	0.67
1,7-DiCDF	-0.33	4-MCB	0.69	2,3,6+2,3',6'-TriCB	0.75	1-MCDD	0.58	MCB	0.67
4,6-DiCDF	-0.33	MCDF	0.68	1,2,4-TriCBz	0.74	1,6-DiCDD	0.57	1,2,3-TriCBz	0.67
1,3-DiCDD	-0.33	3-MCDF	0.68	1,4-DiCBz	0.74	2-MCB	0.56	1,6-DiCDD	0.67
1,8-DiCDF	-0.34	1,3,9-TriCDF	0.67	2,3',5'-TriCB	0.73	2,3,4-TriCB	0.56	1-MCDD	0.67
2,3'-DiCB	-0.34	1,8-DiCDF	0.67	3,4,4'-TriCB	0.72	2,2',3-TriCB	0.54	2,7-DiCDF	0.67
3-MCDF	-0.35	1-MCDF	0.66	TriCB	0.72	1,2,8-TriCDD	0.53	2,4,8-TriCDF	0.67
1,8-DiCDD	-0.35	1,7-DiCDF	0.64	2,3,3'+2,4,6-TriCB	0.72	3-MCDF	0.52	1,4/1,7-DiCDD	0.66
3,4-DiCB	-0.36	4-MCDF	0.63	1,3-DiCBz	0.72	1,2,7-TriCDD	0.51	TriCPh	0.66
1,3-DiCDF	-0.38	3,7-DiCDF	0.63	1,7-DiCDF	0.70	1,7-DiCDF	0.51	1,3-DiCDF	0.66
1,2,3,5-TeCBz	-0.38	1,2,4,5-TeCBz	0.62	2,2'+2,6-DiCB	0.70	4-MCB	0.50	1,6,8/2,3,4/2,3,8-TriCDF	0.65
1,4/1,7-DiCDD	-0.38	1,4-DiCBz	0.61	2,3',4'-TriCB	0.70	2,2',4-TriCB	0.48	1,2-DiCDD	0.65
2,2',6-TriCB	-0.39	3,4-DiCB	0.59	1,3,5-TriCBz	0.69	DiCDD	0.46	2,2',5-TriCB	0.64
2,3',5-TriCB	-0.41	MCB	0.59	4-MCB	0.68	1,3,7-TriCDD	0.43	1,2,9-TriCDF	0.64
TeCBz	-0.43	2-MCDD	0.57	2,3'-DiCB	0.67	1,3,8-TriCDD	0.40	1,4,6-TriCDD	0.64
1,2-DiCDD	-0.43	MCDD	0.56	1,4-DiCDF	0.67	1,2,9-TriCDD	0.39	2-MCB	0.64
2,3,3'+2,4,6-TriCB	-0.45	1,4-DiCDF	0.55	2-MCDD	0.67	2,4,5-TriCB	0.39	1,3,8-TriCDD	0.63
2,3,4'-TriCB	-0.45	2,7-DiCDF	0.54	MCB	0.67	3,5-DiCB	0.38	1,7-DiCDF	0.63
2,3,6+2,3',6'-TriCB	-0.47	1,2,4-TriCBz	0.54	2,2',4-TriCB	0.67	2,3,3'+2,4,6-TriCB	0.38	1,2,9-TriCDD	0.62
1,2,4-TriCBz	-0.47	1-MCDD	0.53	2,3,4-TriCB	0.65	2,4',6'-TriCB	0.30	1,4,9-TriCDF	0.62
2,2',3-TriCB	-0.47	3,3',4'-TriCB	0.52	3-MCDF	0.64	1,4,7-TriCDD	0.28	1,3,9-TriCDF	0.62
2-MCDF	-0.47	2,3',4'-TriCB	0.50	2-MCDF	0.63	2-MCDF	0.28	2,3,7-TriCDF	0.62
2,2',4-TriCB	-0.50	1,3-DiCBz	0.49	MCDD	0.63	2,4+2,5-DiCB	0.23	4,4'-DiCB	0.61
4-MCDF	-0.50	2,3'-DiCB	0.49	MCDF	0.63	2,3+2,4'-DiCB	0.22	1,6-DiCDF	0.61
1,2,4,5-TeCBz	-0.51	1,6-DiCDF	0.47	2,3,4'-TriCB	0.63	2,4,4'+2,4',5-TriCB	0.18	MCPh	0.61
TriCB	-0.52	3,4,4'-TriCB	0.42	2-MCB	0.63	2,3',5-TriCB	0.18	1,2,4-TriCDD	0.60
2,4',6-TriCB	-0.53	3,4'-DiCB	0.42	1-MCDF	0.63	2,3,5+2,3,6-TriCB	0.13	2,4,5-TriCPh	0.59
3,5-DiCB	-0.54	DiCB	0.34	1-MCDD	0.62	2,3'-DiCB	0.06	2,6-DiCPh	0.59
1,6-DiCDF	-0.54	2-MCB	0.34	DiCB	0.61	1,3,6-TriCDD	0.00	4-MCPh	0.59
4-MCB	-0.54	3,4',5-TriCB	0.22	2,2',6-TriCB	0.61	1,2,4-TriCDD	0.00	1,7,8-TriCDF	0.59
3,4'-DiCB	-0.54	2,3,3'+2,4,6-TriCB	0.14	1,3-DiCDD	0.59	1,3,9/2,3,7-TriCDD	0.00	1,3-DiCDD	0.58
MCB	-0.55	TriCB	0.13	3-MCB	0.59	1,3-DiCDF	0.00	TriCDD	0.58
1-MCDD	-0.55	4,4'-DiCB	0.10	2,2',3-TriCB	0.58	1,3,7-TriCDF	0.00	DiCDD	0.57
3-MCB	-0.55	2,3',5-TriCB	0.09	3,3'-DiCB	0.58	2,2',6-TriCB	-0.01	1,2,8-TriCDD	0.56
2,4,4'+2,4',5-TriCB	-0.56	2,2',3-TriCB	0.04	2,4,4'+2,4',5-TriCB	0.58	3,3'-DiCB	-0.04	MCDD	0.55
MCDD	-0.56	2,3,6+2,3',6-TriCB	0.04	3,3',4-TriCB	0.57	3,4-DiCB	-0.05	2,3,6/3,4,7-TriCDF	0.55
2,2',5-TriCB	-0.58	2,3+2,4'-DiCB	0.00	2,2',5-TriCB	0.57	2,4,6-TriCB	-0.07	1,4-DiCDF	0.54
2-MCDD	-0.59	2,3,4'-TriCB	0.00	2,4',6-TriCB	0.55	2,3',4-TriCB	-0.08	1,4,7-TriCDD	0.53
4,4'-DiCB	-0.65	2,4,6-TriCB	-0.02	2,3+2,4'-DiCB	0.54	2,3,6+2,3',6-TriCB	-0.09	3-MCB	0.52
DiCB	-0.67	2,2'+2,6-DiCB	-0.08	4-MCDF	0.51	3-MCB	-0.12	1,2,3-TriCDD	0.50
2,4+2,5-DiCB	-0.70	2,4,4'+2,4',5-TriCB	-0.09	4,4'-DiCB	0.50	2,2'+2,6-DiCB	-0.13	2-MCPh	0.50
2,3+2,4'-DiCB	-0.71	2,4',6-TriCB	-0.14	2,7-DiCDF	0.47	3,4'-DiCB	-0.18	1,2,6-TriCDD	0.48
								2,3,5,6-TeCPh	0.45
								TeCPh	0.42
								2,3,5-TriCPh	0.26
								1,9-DiCDD	0.25
								2,2',4-TriCB	0.24
								3,4,5-TriCPh	0.14
								3,4-DiCPh	0.13
								2,3,4,5-TeCPh	0.08
								2,3,6-TriCPh	0.02

Anhang C-7: Vergleich der KK dieser Arbeit mit Daten aus der Literatur (200)

Leitparameter	Daten aus der Literatur	Daten dieser Arbeit	Leitparameter	Daten aus der Literatur	Daten dieser Arbeit
I-TEQ	1.00	1.00	1,2,4,5-TeCBz	0.34	0.77
1,2,3,4-TeCBz	0.91	0.88	2,3,6/3,4,7-TriCDF	0.34	0.50
MCBz	0.85	0.92	3-MCDF	0.34	0.68
2,4,6-TriCPh	0.82	0.76	2,3,7-TriCDF	0.29	0.80
2,4-DiCPh	0.80	0.73	2,4-DiCDF	0.28	0.65
PeCBz	0.79	0.91	2-MCDD	0.28	0.68
PeCPh	0.79	0.79	1,3-DiCBz	0.27	0.88
1,2-DiCBz	0.78	0.84	1,6-DiCDF	0.27	0.56
1,2,3-TriCBz	0.76	0.88	2,6,7-TriCDF	0.26	0.79
1,2,6-TriCDD	0.76	0.63	MCDD	0.25	0.69
TriCBz	0.76	0.90	1-MCDD	0.23	0.69
1,4,6-TriCDD	0.75	0.62	2,3,5-TriCPh	0.23	0.70
1,7,8-TriCDD	0.75	0.68	2,6-DiCPh	0.20	0.73
2,3,4,6-TeCPh	0.75	0.78	4,6-DiCDF	0.20	0.77
1,2,3-TriCDD	0.74	0.79	2,8/3,6-DiCDF	0.19	0.64
HxCBz	0.74	0.89	2-MCPh	0.19	0.65
1,4,7-TriCDD	0.73	0.72	1,2,4/1,6,7-TriCDF	0.15	0.72
1,2,7-TriCDD	0.72	0.71	1,3,9-TriCDF	0.15	0.66
1,2,8-TriCDD	0.72	0.77	1,9/3,4-DiCDF	0.11	0.64
1,2,9-TriCDD	0.72	0.73	2,7-DiCDF	0.10	0.33
2,4,6-TriCDF	0.72	0.80	3,7-DiCDF	0.10	0.63
1,3,9/2,3,7-TriCDD	0.71	0.76	DiCDF	0.09	0.80
TriCDD	0.70	0.80	1,2-DiCDF	0.08	0.66
1-MCDF	0.69	0.72	1,3-DiCDF	0.08	0.65
2,3,4-TriCPh	0.69	0.57	1,4-DiCDF	0.07	0.38
2,3,5,6-TeCPh	0.69	0.31	2,6-DiCDF	0.04	0.65
DiCDD	0.68	0.73	1,6,8/2,3,4/2,3,8-TriCDF	0.02	0.77
1,2,4-TriCDD	0.66	0.75	1,2,6/1,2,8-TriCDF	-0.01	0.77
1,4-DiCBz	0.65	0.84	3,4,6-TriCDF	-0.01	0.77
1,6-DiCDD	0.65	0.52	1,2,3-TriCDF	-0.03	0.80
2,3,4,5-TeCPh	0.63	0.65	1,7-DiCDF	-0.04	0.59
1,3,7-TriCDD	0.62	0.77	1,8-DiCDF	-0.04	0.64
1,3-DiCDD	0.62	0.74	1,7,8-TriCDF	-0.08	0.77
1,4/1,7-DiCDD	0.62	0.65	TriCDF	-0.08	0.84
1,3,8-TriCDD	0.60	0.77	2,3-DiCDF	-0.09	0.64
3,4-DiCPh	0.60	0.69	1,3,7-TriCDF	-0.10	0.76
1,8-DiCDD	0.59	0.67	1,4,9-TriCDF	-0.11	0.77
1,2-DiCDD	0.58	0.64	2,4,7-TriCDF	-0.13	0.77
1,9-DiCDD	0.57	0.68	1,3,4/1,4,8-TriCDF	-0.14	0.78
2,3,6-TriCPh	0.56	0.78	1,3,6-TriCDD	-0.14	0.76
MCDF	0.54	0.78	1,3,6-TriCDF	-0.14	0.77
4-MCDF	0.52	0.70	3,4,5-TriCPh	-0.14	0.61
2,4,8-TriCDF	0.49	0.71	1,2,9-TriCDF	-0.15	0.76
2,4,5-TriCPh	0.48	0.73	1,3,8-TriCDF	-0.15	0.75
1,2,4-TriCBz	0.45	0.89	1,3,5-TriCBz	-0.18	0.62
2,7/2,3/2,8-DiCDD	0.40	0.74	1,2,7-TriCDF	-0.24	0.77
2-MCDF	0.37	0.69	1,4,6/1,4,7-TriCDF	-0.24	0.76
1,2,3,5-TeCBz	0.34	0.76	4-MCPh	-0.31	0.69

8. VERZEICHNIS EIGENER VERÖFFENTLICHUNGEN

1. Blumenstock, M., R. Zimmermann, R. Lehnhardt, K.-W. Schramm, A. Kaune, U. Nikolai, D. Lenoir und A. Kettrup, *Estimating I-TEQ emissions of polychlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDD) and dibenzofurans (PCDF) from lower chlorinated PCDD/F and benzenes (PCBz) at a hazardous waste incinerator (HWI)*. Organohalogen Compounds, 1998. **36**: 47-52.
2. Blumenstock, M., R. Zimmermann, K.-W. Schramm, B. Henkelmann und A. Kettrup, *Presence of polychlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDD), dibenzofurans (PCDF), biphenyls (PCB), chlorinated benzenes (PCBz) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) under various combustion conditions in a post combustion chamber*. Organohalogen Compounds, 1998. **36**: 59-63.
3. Zimmermann, R., H. J. Heger, R. Dorfner, U. Boesl, M. Blumenstock, D. Lenoir und A. Kettrup, *A Mobile Laser Mass Spectrometer (REMPI-TOFMS) for continuous monitoring of toxic combustion byproducts: Real-Time On-Line Analysis of PAH in Waste Incineration Flue Gases*. Combustion Science and Technology, 1998. **134 (1-6)**: 87.
4. Blumenstock, M., R. Zimmermann, K.-W. Schramm, A. Kaune, U. Nikolai, D. Lenoir und A. Kettrup, *Estimation of the dioxin emission (PCDD/F I-TEQ) from the concentration of low chlorinated aromatic compounds in the flue and stack gas of a hazardous waste incinerator*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 1999. **49**: 179-190.
5. Blumenstock, M., R. Zimmermann, K.-W. Schramm und A. Kettrup, *Comparison of different combustion facilities according to their emission profiles of polychlorinated compounds*. Organohalogen Compounds, 1999. **41**: 87-95.
6. Zimmermann, R., H. J. Heger, M. Blumenstock, R. Dorfner, K.-W. Schramm, U. Boesl und A. Kettrup, *On-Line Monitoring of Chlorobenzene in Waste Incineration Flue Gas as a Surrogate for the Emission of Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins/Furans (I-TEQ) Using Mobile Resonance Laser Ionization Time-of-flight Mass Spectrometry*. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 1999. **13**: 307-314.
7. Zimmermann, R., H. J. Heger, M. Blumenstock, R. Dorfner, U. Nikolai, K.-W. Schramm und A. Kettrup, *On-line Real-Time Measurement PAH and PCDD/F Surrogates in the Flue Gas of Industrial Waste Incineration Processes*. Organohalogen Compounds, 1999. **41**: 321-328.

8. Blumenstock, M., R. Zimmermann, K.-W. Schramm und A. Kettrup, *Influence of combustion conditions on the PCDD/F-, PCB-, PCBz- and PAH-concentrations in the post-combustion chamber of a waste incineration pilot plant*. Chemosphere, 2000. **40 (9-11)**: 987-993.
9. Blumenstock, M., R. Zimmermann, K.-W. Schramm und A. Kettrup, *Application of monochlorobenzene as an reliable surrogate for the prediction of the I-TEQ value in combustion facilities*. Organohalogen Compounds, 2000. **46**: 174-177.
10. Zimmermann, R., M. Blumenstock, K.-W. Schramm und A. Kettrup, *Formation of PAH and PCDD/F in industrial incineration plants: Memory effects after disturbed combustion conditions due to deposits in the high temperature region*. Organohalogen Compounds, 2000. **46**: 78-81.
11. Kaupp, H., M. Blumenstock und M. McLachlan, *Retention and mobility of atmospheric particle-associated organic pollutant PCDD/Fs and PAHs in maize leaves*. New Phytologist, 2000. **148**: 473-480.
12. Samaras, P., M. Blumenstock, K.-W. Schramm und A. Kettrup, *PCDD/F Prevention by Novel Inhibitors: Addition of Inorganic S- and N-Compounds in the Fuel before combustion*. Environmental Science and Technology, 2000. **34 (24)**: 5092-5096.
13. Samaras, P., M. Blumenstock, K.-W. Schramm und A. Kettrup, *Emissions of chlorinated aromatics during sludge combustion*. Water Science and Technology, 2000. **42 (9)**: 251-256.
14. Blumenstock, M., R. Zimmermann, K.-W. Schramm und A. Kettrup, *Identification of surrogate compounds for the emission of PCDD/F (I-TEQ value) and evaluation of their on-line real-time detectability by REMPI-TOFMS mass spectrometry*. Chemosphere, 2001. **42 (5-7)**: 507-518.
15. Blumenstock, M., R. Zimmermann, K.-W. Schramm und A. Kettrup, *Elucidation of relationships between chloroaromatics in full scale incinerators: High temperature formation and long-term concentration increase*. Organohalogen Compounds, 2001. **50**: 301-306.

16. Zimmermann, R., M. Blumenstock, H. J. Heger, K.-W. Schramm und A. Kettrup, *Emission of Non-chlorinated and Chlorinated aromatics in the Flue Gas of Incineration Plants during and after Transient Disturbances of Combustion Conditions: Delayed Emission Effects*. Environmental Science and Technology, 2001. **35 (6)**: 1019-1030.
17. Zimmermann, R., K. Hafner, R. Dorfner, M. Blumenstock und A. Kettrup, *On-line laser mass spectrometry for analysis of combustion processes: PCDD/F surrogates in waste incineration flue gases*. Organohalogen Compounds, 2001. **54**: 368-373.
18. Heger, H. J., R. Zimmermann, M. Blumenstock und A. Kettrup, *On-line real-time measurement at incineration plants: PAH and a PCDD/F surrogate compound at stationary combustion conditions and during transient emission puffs*. Chemosphere, 2001. **42 (5-7)**: 691-696.
19. Samaras, P., G. Skordas, G. P. Sakellariopoulos, M. Blumenstock, K.-W. Schramm und A. Kettrup, *Toxic emissions during co-combustion of biomass-waste wood-lignite blends in an industrial boiler*. Chemosphere, 2001. **43**: 751-755.
20. Samaras, P., M. Blumenstock, D. Lenoir, K.-W. Schramm und A. Kettrup, *PCDD/F inhibition by prior addition of urea to the solid fuel in laboratory experiments and results statistical evaluation*. Chemosphere, 2001. **42**: 737-743.