

Beckmann, M.¹⁾; Griebel, H.²⁾; Scholz, R.³⁾

- 1) Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH, Leibnizstr. 21+23, 38678 Clausthal-Zellerfeld
- 2) Fels-Werke GmbH, Geheimrat-Ebert Straße 12, 38640 Goslar
- 3) Technische Universität Clausthal, Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik, Agricolastr. 4, 38678 Clausthal-Zellerfeld

EINFLUSS VON TEMPERATUR, DURCHMISCHUNG UND VERWEILZEIT AUF DEN ABBAU ORGANISCHER SPURENSTOFFE BEI DER THERMISCHEN BEHANDLUNG VON ABFALLHOLZ

INHALTSVERZEICHNIS

1 EINLEITUNG	2
2 ABBAU ORGANISCHER SPURENSTOFFE IN FEUERUNGEN	2
3 PILOTANLAGE, MESS- UND ANALYSENTECHNIK, PARAMETERVARIATIONEN	4
4 DISKUSSION DER HAUPTINFLUSSGRÖSSEN (TEMPERATUR, VERWEILZEIT, VERMISCHUNG)	7
5 SYMBOLVERZEICHNIS	9
6 SCHRIFTTUM	9

Beckmann, M.¹⁾; Griebel, H.²⁾; Scholz, R.³⁾

- 1) Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH, Leibnizstr. 21+23, 38678 Clausthal-Zellerfeld
- 2) Fels-Werke GmbH, Geheimrat-Ebert Straße 12, 38640 Goslar
- 3) Technische Universität Clausthal, Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik, Agricolastr. 4, 38678 Clausthal-Zellerfeld

EINFLUSS VON TEMPERATUR, DURCHMISCHUNG UND VERWEILZEIT AUF DEN ABBAU ORGANISCHER SPURENSTOFFE BEI DER THERMISCHEN BEHANDLUNG VON ABFALLHOLZ

INHALTSVERZEICHNIS

1 EINLEITUNG	2
2 ABBAU ORGANISCHER SPURENSTOFFE IN FEUERUNGEN	2
3 PILOTANLAGE, MESS- UND ANALYSENTECHNIK, PARAMETERVARIATIONEN	4
4 DISKUSSION DER HAUPT-EINFLUSSGRÖSSEN (TEMPERATUR, VERWEILZEIT, VERMISCHUNG)	7
5 SYMBOLVERZEICHNIS	9
6 SCHRIFTTUM	9

1 Einleitung

Abfallhölzer, wie z.B. Fensterrahmen oder mit Steinkohlenteerpech behandelte Eisenbahnschwellen, werden nach Zerkleinerung und Abtrennung von Wert- und Störstoffen (Glas, Metalle usw.) häufig in Rostsystemen thermisch behandelt. Bei der Diskussion der Prozeßbedingungen liegt ein besonderer Schwerpunkt in der Fragestellung nach geeigneten Abbaubedingungen für organische Spurenstoffe wie **polyaromatische Kohlenwasserstoffe** (PAK), **polychlorierte Biphenyle** (PCB), Chlorbenzole und **polychlorierte Dibenzodioxine** (PCDD) und **polychlorierte Dibenzofurane** (PCDF) im Nachverbrennungsprozeß.

Insgesamt sind bei der thermischen Behandlung von stückigen Abfällen mehrere Teilaufgaben zu berücksichtigen, die u.a. den Ausbrand und die Eluateigenschaften der Asche, die Minderung von Stickstoffoxiden sowie den Ausbrand insgesamt in der Gasphase betreffen. Bei Rostsystemen sind diesbezüglich eine Reihe von Möglichkeiten zur Steuerung der Haupteinflußgrößen und damit zur Optimierung gegeben. Die mit dem Feststoffumsatz auf dem Rost (1. Einheit) und mit dem Nachverbrennungsprozeß (2. Einheit) zusammenhängenden Teilaufgaben lassen sich um so besser optimieren, je deutlicher die beiden Einheiten voneinander entkoppelt sind. Bei einer solchen getrennten Prozeßführung können der Feststoffumsatz auf dem Rost unterstöchiometrisch (Vergasung) und der Nachverbrennungsprozeß als eigenständige Feuerung betrieben werden [1]. Bei Anwendung von Primärmaßnahmen in der Nachverbrennungseinheit zum Abbau organischer Spurenstoffe müssen ebenso wie zur Minderung von NO usw. die Haupteinflußgrößen Temperatur, Sauerstoffkonzentration, Verweilzeit und Verweilzeitverhalten (Durchmischung) im Zusammenhang betrachtet werden. Dabei ist auch der Einfluß der Maßnahmen untereinander auf die jeweils anderen Schadstoffe zu berücksichtigen. Die Betrachtung nur einer Haupteinflußgröße für sich allein – wie z.B. die Temperatur ($\vartheta \approx 1200$ °C) im Zusammenhang mit dem Abbau organischer Spurenstoffe – ist für Interpretationen nicht ausreichend. Untersuchungen an industriellen Anlagen zur Sonderabfallbehandlung zeigen hierzu, daß sich unter entsprechend optimierten Verbrennungsbedingungen z.B. bei $\vartheta \approx 1050$ °C keine höheren Emissionen an PCDD/F, PAK, PCB und gesamtem organischen Kohlenstoff als bei $\vartheta \approx 1200$ °C ergeben [2].

Für die Behandlung o.g. Abfallhölzer in Rostsystemen müssen systematische Untersuchungen zur Beurteilung geeigneter Prozeßbedingungen für den Abbau organischer Spurenstoffe in der Nachverbrennungseinheit noch erbracht werden. Die hier dargestellten Ergebnisse sollen in diesem Zusammenhang einen Beitrag liefern. Die Untersuchungen wurden an einer Rost-Pilotanlage (0,5 MW_{th}) mit unabhängigem Brennkammersystem, unter Vergasungsbedingungen auf dem Rost, mit Abfallhölzern durchgeführt. Im Hinblick auf die Diskussion der o.g. Haupteinflußgrößen werden zunächst jeweils kurz die Bildungs- und Abbaupfade organischer Spurenstoffe zusammengefaßt und eine Beschreibung der Versuchsanlage mit zugehöriger Analytik vorangestellt.

2 Abbau organischer Spurenstoffe in Feuerungen

Besonderes Augenmerk bei der Optimierung der Nachverbrennung ist auf die Komponenten zu legen, deren Abbaukinetik deutlich langsamer als die von CO ist. Hierzu gehören Verbindungen der Chlorbenzole, PCB und PCDD/F. Als sehr stabile Komponenten sind insbesondere Hexachlorbenzol und Tetrachlordibenzodioxin anzusehen. Bekanntlich können für das Auftreten von organischen Spurenstoffen und speziell von PCDD/F im Abgas einer thermischen Behandlungsanlage im wesentlichen folgende Ursachen in Betracht gezogen werden:

- Die Verbindungen liegen im Abfall bereits vor und werden durch unzureichende Reaktionsbedingungen während des Verbrennungsprozesses nicht in entsprechendem Maße abgebaut.
- In der Nachverbrennung liegen keine optimierten Reaktionsbedingungen vor, so daß die aus Vorläufersubstanzen (z.B. PCB) während des Verbrennungsprozesses neu gebildeten Verbindungen nur ungenügend zerstört werden.
- Dioxine und Furane können im Niedertemperaturbereich unterhalb 500 °C durch Oxychlorierung von partikulärem Kohlenstoff und durch oberflächenkatalysierte Reaktionen aus Vorläuferverbindungen neu gebildet werden.

In dem hier gesteckten Rahmen soll weniger auf die einzelnen Bildungs- und Abbaumechanismen eingegangen werden, hierzu wird auf das Schrifttum verwiesen [z.B. 3 bis 7]. Vielmehr sei vor dem Hintergrund der durchgeführten Untersuchungen zusammenfassend auf den Einfluß der Prozeßbedingungen in dem Nachverbrennungsprozeß auf den Abbau der organischen Spurenstoffe eingegangen.

Betrachtet man zunächst die Temperatur als Einflußgröße getrennt, so führt eine Temperaturerhöhung zu einer Steigerung der Reaktionsgeschwindigkeit, d.h., sowohl die Abbaureaktionen (C_xH_y , Brennstoff-NO) als auch Bildungsreaktionen (z.B. Thermisches NO) werden beschleunigt. Bei den organischen Spurenstoffen spielt die Temperaturabhängigkeit für die Radikabildung als Vorstufe für die Bildung (Rekombination) und für den Abbau z.B. von PCDD/F und deren Precursor eine Rolle. Darüber hinaus erhöht sich mit der Temperatur die Zähigkeit der Gase, was bei gleicher Mischungsleistung eine Verschlechterung der Durchmischung zur Folge haben kann. Aus Laboruntersuchungen und Berechnungen ist bekannt, daß bereits Temperaturen von $\vartheta \approx 950$ °C für den Abbau von chlorierten Kohlenwasserstoffen ausreichend erscheinen [8], sofern die Vermischungs- und Verweilzeitverhältnisse entsprechend abgestimmt sind. Der Einfluß der Sauerstoffkonzentration auf den Abbau von chlorierten organischen Verbindungen ist eher als gering einzustufen. Der Einfluß der Sauerstoffkonzentration auf den Abbau von TCDD und Pentachlorbiphenyl bei verschiedenen Temperaturen ist u.a. in [8] beschrieben. In einem für den Nachverbrennungsprozeß üblichen Bereich der Sauerstoffkonzentration von $\nu_{O_2} \approx 5$ Vol.-% bis $\nu_{O_2} \approx 10$ Vol.-% zeigt sich für einen vorgegebenen Abbaugrad bei gleicher Verweilzeit nur ein geringer Einfluß der Sauerstoffkonzentration.

Wichtig für den Ausbrand bzw. den Abbau organischer Spurenstoffe sind weiter die Verweilzeit und das Verweilzeitverhalten. Der Einfluß der Reaktorcharakteristik auf den Ab-

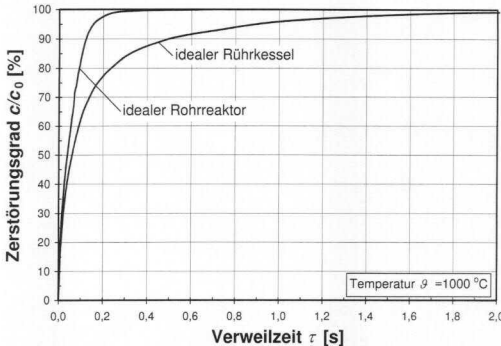


Bild 1. Thermische Zersetzung von TCDD im idealen Rohrreaktor und idealen Rührkessel [8].

erforderlich, was z.B. über Injektorfreistrahlen aus Sekundärluft und/ oder rückgeführtem Abgas oder durch entsprechende Drallströmung erreicht werden kann. Zusammengefaßt sollte sich daher aus reaktionstechnischer Sicht an ein Rührkessellement eine beruhigte Strömungsstrecke (Rohrreaktor) anschließen.

Zur Vermeidung einer PCDD/F- Neubildung ist weiter auf eine Minimierung und auf einen hohen Ausbrand des Flugstaubes zu achten. Dabei besitzen die Feinstäube ein deutlich höheres Bildungspotential für die De-Novo Synthese als die Grobfractionen [9]. Der Ausbrand der Flugstäube wird jedoch in ähnlicher Weise wie bereits erläutert von den Haupteinflußgrößen Temperatur, Sauerstoffkonzentration, Verweilzeit und Verweilzeitverhalten beeinflusst.

Die v.g. Gesichtspunkte sollen zeigen, wie wichtig es ist, auch hinter Rostsystemen den Nachverbrennungsprozeß wie eine eigenständige Feuerung zu gestalten, um damit entsprechende Möglichkeiten zur Minderung der Schadstoffe zu erhalten. Das Bild 2 zeigt schematisch diese Möglichkeiten bei einer getrennten Prozeßführung [10].

3 Pilotanlage, Mess- und Analysetechnik, Parametervariationen

Pilotanlage

Der Aufbau der Rost-Pilotanlage mit getrenntem Nachbrennkammersystem entspricht der in Bild 2 schematisch dargestellten Prozeßführung. Die Anlage setzt sich aus den Hauptkomponenten

- 5-Zonen Rückschubrost, 3-Zonen Vorschubrost (wahlweise),
- Brennkammersystem,
- Wärmetauscher und
- Abgasreinigung

zusammen [11].

baugrad von TCDD in Abhängigkeit von der Verweilzeit ist in Bild 1 dargestellt. Bei einer Temperatur von $\vartheta = 1000\text{ °C}$ wird nach einer Verweilzeit von $\tau = 0,5\text{ s}$ in einem Rohrreaktor ein nahezu vollständiger, in einem Rührkesselreaktor jedoch erst ein ca. 90 %-iger Abbau erreicht [8]. Um bei Eintritt in den Rohrreaktor eine gleichmäßige Verteilung der Komponenten über dem Querschnitt zu erhalten, ist eine intensive Durchmischung (Rührkessellement)

folgte durch das GSF¹ Forschungszentrum Institut für Ökologische Chemie, München. Die Bestimmung der PCDD/F-Konzentrationen im Probenmaterial wurde nach entsprechendem clean up mittels GC-MS durchgeführt.

Die PCDD/F-Konzentrationen im Abgas ergeben sich aus den in Toxizitätsäquivalente (ng TE) umgerechneten Analysenwerten des Probenmaterials, bezogen auf das abgesaugte, trockene Gasvolumen im Normzustand ($m^3(i.N.tr.)$).

Parametervariationen

Im Rahmen erster Tastversuche sollte zunächst der Einfluß deutlich unterschiedlicher Bedingungen im Nachverbrennungsprozeß auf den Abbau organischer Substanzen gezeigt werden. Insgesamt wurden fünf verschiedene Einstellungen (Tabelle 1) vorgesehen. Bei der vorgegebenen Geometrie der Brennkammer sind die Einflußgrößen Temperatur, Stöchiometrie, Verweilzeit usw. entsprechend miteinander gekoppelt.

Bei einer ersten Einstellung (**V1**) mit nahstöchiometrischen Bedingungen im Brennkammerkopf wurde eine Temperatur von $\vartheta \approx 1200$ °C angestrebt. Mit dem Ziel, die Vermischung im Brennkammerkopf zu verbessern, ist in einem zweiten Versuch die Primärluftzufuhr erhöht (**V2**) worden. Zur Verbesserung der Vermischung wurde dann Stickstoff zur Simulation einer Abgasrückführung der Primärluft

beigemischt (**V3**). In den beiden letzten Versuchen war durch Erhöhung der Luftzufuhr (**V4**) und durch zusätzliche Stickstoffzufuhr (**V5**) eine Absenkung der Temperaturen beabsichtigt.

Tabelle 1. Variationen der Versuche V1 bis V5 (Erklärung im Text).							
Versuch Nummer			1	2	3	4	5
Brennstoffmassenstrom Rost	$\dot{m}_{B,R}$	[kg/h]	60	60	60	80	80
Luftmassenstrom Nachbrennkammer	$\dot{m}_{L,NBK,1}$	[kg/h]	110	150	130	200	120
Massenstrom Stickstoff	$\dot{m}_{N_2,NBK,1}$	[kg/h]	0	0	145	0	145
Luftmassenstrom Nachbrennkammer	$\dot{m}_{L,NBK,2}$	[kg/h]	135	60	55	315	280

Der vorgeschaltete Rostprozeß wurde unverändert (gleiche Last, $\lambda_R \approx 0,6$) jeweils für **V1** bis **V3** und für **V4** und **V5** mit verkleinertem Abfallholz (Mischung aus beschichteten Hölzern, Paletten, Kunststoff, Fensterholz usw.) als Vergasung betrieben.

¹ An dieser Stelle möchten wir uns für die Zusammenarbeit bei den Herren Zimmermann, Schramm und Blumenstock der GSF bedanken.

4 Diskussion der Haupteinflussgrößen (Temperatur, Verweilzeit, Vermischung)

Die Ergebnisse der v.g. Parametervariationen (Tabelle1) sind in der **Tabelle 2** zusammengestellt. Die angegebenen Temperaturen wurden in der Mitte der Brennkammer (ϑ_{NBK1}), in der Anschlußgeometrie nach der Sekundärluftzufuhr (ϑ_{NBK2}) und am Austritt der Anschlußgeometrie

Versuch Nummer			1	2	3	4	5
Temperatur in der Nachbrennkammer	$\vartheta_{NBK,1}$	[°C]	1 200	1 050	1 050	1 050	750
	$\vartheta_{NBK,2}$	[°C]	950	1 000	950	750	750
	$\vartheta_{NBK,3}$	[°C]	900	900	900	700	750
Verweilzeit	τ	[s]	2,8	3,1	2,2	2	2,4
Mischindex	δ	[-]	0,61	0,85	1,63	1,00	1,33
O ₂ -Konzentration	$\psi_{O_2,NBK}$	[Vol.-%]	4,34	4,31	2,76	10,2	6,47
CO-Konzentration	$\psi_{CO,NBK}$	[mg/m ³]	<10	<10	<10	<10	<10
NO _x -Konzentration	$\psi_{NO_2,NBK}$	[mg/m ³]	265	357	254	409	297
PCDD-Konzentration	$\psi_{PCDD,NBK}$	[pg/m ³]	224	201	204	1 046	89
PCDF-Konzentration	$\psi_{PCDF,NBK}$	[pg/m ³]	333	180	605	2 322	2 774
PCDD/F-Konzentration	$\psi_{PCDD,F,NBK}$	[pg/m ³]	556	381	810	3 368	2 862
PCDD/F (TEQ)	$\psi_{PCDD,F,NBK}$	[pg/m ³]	21	10	20	59	32

(ϑ_{NBK3}) bestimmt. Die Gaskonzentrationen wurden ebenfalls am Austritt der Anschlußgeometrie ermittelt. Zur Beschreibung der Mischungsintensität im Brennkammerkopf wird hier vereinfacht ein Verhältnis δ aus der Summe des Primärluft- und des Stickstoffmassenstromes bezogen auf den Massenstrom des Brenngases vom Rost gebildet.

Zunächst sei festgehalten, daß alle PCDD/F- Konzentrationen, unabhängig der durchgeführten Einstellungen, unterhalb von 0,1 ngTE/m³ liegen. Weiterhin können die Werte für die Versuche **V1** bis **V3** und für **V4**, **V5** als nahezu auf demselben Niveau innerhalb einer vertretbaren Schwankungsbreite angesehen werden. Die unter deutlichen Parameteränderungen aus den Tastversuchen erhaltenen Ergebnisse zeigen, daß bei der Vergasung/Verbrennung von Abfallholz für die Zerstörung der organischen Komponenten auch Temperaturen von $\vartheta \approx 950$ °C bei entsprechend abgestimmten Verweilzeitverhältnissen (insbesondere Durchmischung) ausreichend sind. Die hier ermittelten PCDD/F-Konzentrationen liegen in derselben Größenordnung wie bei Einsatz von mit Teeröl getränkten Eisenbahnschwellen [12].

Ausgehend von **V1** wird bei **V2** im Brennkammerkopf eine Erhöhung der Primärluftzufuhr vorgenommen. Es ergeben sich im Fall **V1**, bezogen auf den Nachverbrennungsprozeß des Brenngases, in dieser Stufe leicht unterstöchiometrische Bedingungen ($\lambda_{NBK1,V1} \approx 0,9$) während für **V2** dann mit $\lambda_{NBK1,V2} \approx 1,2$ überstöchiometrische Bedingungen vorliegen. Dabei stellt sich eine Temperatursenkung von $\vartheta_{NBK2,V1} \approx 1200$ °C auf $\vartheta_{NBK1,V2} \approx 1050$ °C ein. Das Massenstromverhältnis erhöht sich von $\delta_{V1} \approx 0,6$ auf $\delta_{V2} \approx 0,8$. Im Hinblick auf den Abbau der organischen Spurenstoffe kann die Temperatursenkung im vorliegenden Fall durch eine Verbesserung der Vermischung kompensiert werden. Der Übergang von unter- überstöchiometrischen Bedingungen in der ersten Stufe wirkt sich jedoch nachteilig auf die NO-Konzentrationen aus, diese steigen von $\psi_{NO_2,V1} \approx 255$ mg/m³ auf $\psi_{NO_2,V2} \approx 360$ mg/m³ an. Die zusätzliche Zufuhr von Stickstoff in die Primärstufe der Brennkammer (Simulation einer Abgasrezirkulation) führt bei Versuch **V3** zu einer deutlichen Verbesserung der Durchmischung ($\delta_{V3} \approx 1,6$). Dabei wird die Primärluft gleichzeitig abgesenkt, so

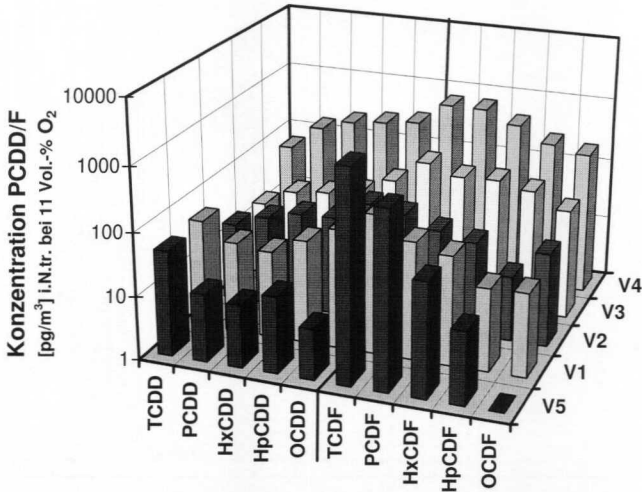


Bild 3. Verteilungsmuster der PCDD/F (Versuch 1 bis 5).

daß sich in der ersten Stufe nahstöchiometrische Bedingungen ($\lambda_{\text{NBK1},V3} \approx 1,0$) einstellen. Durch den zusätzlichen Stickstoffmassenstrom ergibt sich eine entsprechende Verkürzung der Verweilzeit gegenüber den v.g. Einstellungen von $\tau_{V1,V2} \approx 3$ s auf $\tau_{V3} \approx 2$ s. Die genannten Änderungen haben wie erwähnt keinen Einfluß auf das PCDD/F- Niveau, wirken sich jedoch positiv auf die NO-Konzentrationen aus ($\psi_{\text{NO2},V3} \approx 255$ mg/m³). Bei entsprechender Optimierung z.B. durch weitere Absenkung der Stöchiometrie in der ersten Stufe (z.B. $\lambda_{\text{NBK1}} \approx 0,5$) können die NO-Konzentrationen deutlich unter $\psi_{\text{NO2}} \approx 200$ mg/m³ gesenkt werden [13]. Eine solche Optimierung war im Rahmen der hier erfolgten Tastversuche nicht beabsichtigt. Zunächst kann anhand der Ergebnisse gezeigt werden, daß auch bei der Vergasung/Verbrennung kontaminierter Hölzer die Einflußgrößen Temperatur, Verweilzeit, Verweilzeitverhalten gleichermaßen zum Abbau der organischen Spurenstoffe beitragen.

Die Sensibilität der Meßmethode und die damit verbundene Aussagekraft der Untersuchungen sei anhand der Ergebnisse der Versuche **V4** und **V5** diskutiert. In beiden Fällen sind die Nachverbrennungsbedingungen durch Herabsetzung der Temperatur, der Verweilzeit und der Vermischungsleistung (insbesondere gegenüber **V3**) deutlich ungünstiger als in den v.g. Beispielen. Obwohl die PCDD/F-TE Werte für die Versuche **V4** und **V5** wiederum unterhalb von 0,1 ng/m³ liegen, zeigt sich bei den PCDD/F- Summenwerten im Vergleich zu den Versuchen **V1** bis **V3** ein Anstieg um nahezu den Faktor Zehn. Betrachtet man die Verteilungsmuster der PCDD/F in Bild 3, so weisen die Muster der Versuche **V1** bis **V4** die für die Abfallverbrennung typische Verteilung mit einem Maximum der höherchlorierten Dibenzodioxinen und der niederchlorierten Dibenzofurane auf. Im Versuch **V5** ergibt sich bei den Dioxinen ein umgekehrter Verlauf mit einem Maximum der höher

chlorierten Dioxine. Möglicherweise ist die Ursache dafür in dem bei **V5** insgesamt sehr niedrigen Temperaturniveau ($\vartheta_{NBK1,2,3,V5} < 800 \text{ °C}$) zu sehen.

Bisher ist der Abbau der organischen Spurenstoffe im Zusammenhang mit den PCDD/F-Konzentrationen betrachtet worden. Wie eingangs erwähnt sind als weitere organische Verbindungen insbesondere die Chlorbenzole und die Polychlorierten Biphenyle interessant. Zwischen den PCDD/F und den Chlorbenzolen besteht ein direkter Zusammenhang, der u.a. im Hinblick auf die Ermittlung sogenannter Leitkomponenten genutzt wird und auch, wie das Bild 4 deutlich macht, bei den hier in Rede stehenden Untersuchungen gegeben ist. Hinsichtlich der Polychlorierten Biphenyle sei erwähnt, daß diese für alle Versuche in einem Bereich von ca. 1000 bis 3000 ng/m^3 liegen wobei keine Abhängigkeit von den hier betrachteten Parametervariationen erkennbar ist.

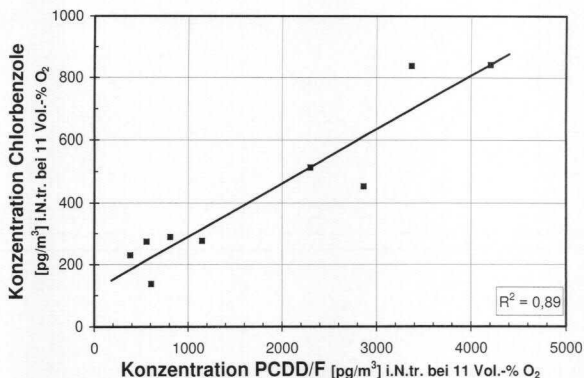


Bild 4. Chlorbenzole in Abhängigkeit von PCDD/F (Versuch 1 bis 5 und zusätzliche, hier nicht weiter erwähnte Einstellungen).

5 Symbolverzeichnis

Symbole

T	Temperatur [K]
V	Versuche V1 bis V5
δ	Massenstromverhältnis
ϑ	Temperatur [°C]
λ	Luftzahl
τ	Verweilzeit
ψ	Konzentration (auf Volumen bezogen, alle Schadstoffe auf 11 Vol.-% O ₂ i.N.tr. bezogen)

Indices

B	Brennstoff
G	Brenngas/Abgas
ges	gesamt
i.N.tr.	im Normzustand, trocken
NBK	Nachbrennkammer (Stufe 1, 2, 3)
R	Rost
RG	Reaktionsgas
V	Versuch V1 bis V5

6 Schrifttum

- [1] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Modellierung und Vergleich verschiedener Feuerungsführungen in Rostsystemen. VDI-Berichte 1313: „Verbrennung und Feuerungen, 18. Deutsch-Niederländischer Flammentag, Delft, 28. und 29.08.1997, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf.
- [2] Kolb, T.; Seifert, W.: Neue Entwicklungen bei der Rückstandsverbrennung. Vortragsveranstaltung CU-TEC-Institut GmbH, Clausthal-Zellerfeld, 9. November 1995.
- [3] Lenoir, D.; Fiedler, H.: Bildungswege für chlorierte Dibenzo-p-dioxine und -furane bei der Abfallverbrennung. Z. Umweltchem. Ökotox. 4 (3) 1992.
- [4] Stieglitz, L.; Vogg, H.: On formation conditions of PCDD/F in fly ash from municipal waste incinerators. Chemosphere 16, S. 1917, 1987.
- [5] Hagenmaier, H.; Brunner, H.; Haag, H.; Kraft, M.: Copper-catalyzed dechlorination/hydrogenation of polychlorinated dibenzo-p-dioxines, polychlorinated dibenzo-p-furanes and other chlorinated aromatic compounds. Environ.Sci.Technol. 21, S. 1085, 1987.
- [6] Vehlou, J.; Vogg, H.: Thermische Zerstörung organischer Schadstoffe. Müllverbrennung und Umwelt, Bd. 5, S. 447, 1991.
- [7] Ballschmiter, K.; Braumiller, I.; Niemczyk, R.; Swerev, M.: Reaction pathways for the formation of polychloro-dibenzodioxines and -dibenzofuranes in combustion processes. Chemosphere 17, S. 995, 1988.
- [8] Hasberg, W.; Römer, R.: Organische Spurenschadstoffe in Brennräumen zur thermischen Entsorgung. Chem.-Ing.-Techn. 60 (1988) 6.
- [9] Birnbaum, L.: Das Verhalten von Chloraromaten bei der Staubabscheidung in Müllverbrennungsanlagen. IUTA-Statuseminar. Februar 1996.
- [10] Scholz, R.; Beckmann, M.: Möglichkeiten der Verbrennungsführung bei Restmüll in Rostfeuerungsanlagen. VDI-Berichte 895: „Prozeßführung und Verfahrenstechnik der Müllverbrennung“, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1991.
- [11] Beckmann, M.: Mathematische Modellierung und Versuche zur Prozeßführung bei der Verbrennung und Vergasung in Rostsystemen zur thermischen Rückstandsbehandlung. CUTEC-Schriftenreihe, 1995.
- [12] Beckmann, M.; Scholz, R.; Wiese, C.; Busch, M.; Pepler, E.: Gasification of Waste Materials in Grate Systems. 4th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers; Espinho-Porto, 01.-04.04.1997.
- [13] Beckmann, M.; Scholz, R.; Wiese, C.; Davidovic, M.: Optimization of Gasification of Waste Materials in Grate Systems. 1997 International Conference on Incineration & Thermal Treatment Technologies, San Francisco-Oakland Bay, California, 12.-16. Mai 1997.