

Minderung der Feinstaub-/Schadstoffemissionen bei Anlagen nach der 27. BImSchV

Dipl.-Ing. W. Föhlisch, Wolfgang Föhlisch Verbrennungsanlagen und Automatisierungstechnik, Halle

Dipl.-Ing. S. List, Dresden

1 Anforderungen aus der Europäischen Gesetzgebung, Grenzwerte

Zur langfristigen Verbesserung der Luftqualität wurden die Rahmenrichtlinie 96/62/EG über die Beurteilung und Kontrolle der Luftqualität sowie erste Tochterrichtlinien erlassen. Die Überführung der europäischen Vorgaben in deutsches Recht erfordert Änderungen am Bundes-Immissionsschutzgesetz, an Verordnungen zum BImSchG (4., 22., 23. BImSchV), an der TA Luft, an Richtlinien des Bundesministeriums für Umwelt und an VDI/DIN-Richtlinien. Durch die TA Luft werden die Immissionsgrenzwerte in die Genehmigungsverfahren eingeführt und können zu Genehmigungshindernissen werden.¹ Ein „Übersprechen“ der Regelungen auch auf nicht genehmigungsbedürftige Anlagen, wie Anlagen nach der 27. BImSchV (Anlagen zur Feuerbestattung) ist nicht auszuschließen, da Einäscherungsanlagen neben Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe, organischen Spurenstoffen (Dioxine/Furane) auch Staub emittieren. Dies gilt besonders, wenn im Falle von Grenzwertüberschreitungen Maßnahmen zur weiteren Emissionsminderung erforderlich werden.

Bereits bei der Einführung der Feuerbestattung in Europa im 19. Jahrhundert waren die Emissionen aus Einäscherungsöfen Diskussthemata. Beim Kongress der Freunde der Feuerbestattung am 07.06.1876 in Dresden formulierte Richard Schneider 7 Kriterien, nach denen die Feuerbestattung durchgeführt werden sollte, und betonte besonders die Aspekte Pietät, Umweltschutz und Ökonomie:

- 1) Die Leiche soll möglichst rasch verbrannt werden.
- 2) Die Verbrennung soll sicher und vollständig geschehen und es darf nicht etwa nur ein Halbverbrennen oder Verkohlen stattfinden.
- 3) Der Process soll in decenter Weise und nur in für die Verbrennung menschlicher Leichen bestimmten Oefen vollzogen werden.
- 4) Es dürfen dabei für die Nachbarschaft keine belästigenden Verbrennungsproducte, Rauch, übelriechende Dämpfe etc. auftreten.
- 5) Die Asche soll rein und weisslich aussehen und das Sammeln soll leicht und rasch ausführbar sein.
- 6) Der ganze Apparat wie auch die Versenkung soll möglichst billig und soll so beschaffen sein, dass ohne wesentliche Unterbrechungen und Kostenaufwand mehrere Leichname hintereinander verbrannt werden können.²

Seit Veröffentlichung der VDI-Richtlinie 3891³ (1992) wird den Emissionen aus Einäscherungsanlagen in Deutschland verstärkt Beachtung geschenkt. In den folgenden Jahren wurden Emissionsgrenzwerte für diese Anlagen im Rahmen von Genehmigungsverfahren durch die zuständigen Genehmigungsbehörden festgelegt. Dies führte zu unterschiedlicher Behandlung in den verschiedenen Bundesländern. Mit der 27. BImSchV⁴ wurden die Anforderungen bundeseinheitlich festgelegt. Bis zum 30.04.2000 waren auch Altanlagen umzurüsten. Tabelle 1 zeigt die Grenzwerte der 27. BImSchV.

Komponente	Grenzwert
Staubförmige Stoffe als Gesamtstaub	10 mg/m ³
Kohlenmonoxid	50 mg/m ³
Organische Stoffe, als TOC	20 mg/m ³
PCDD/F	0,1 ng TE/m ³

Tabelle 1: Grenzwerte der 27. BImSchV für Einäscherungsanlagen

2 Staubabscheider für Einäscherungsanlagen

Das Trennprinzip aller Entstaubungsanlagen beruht auf der Erzeugung einer Relativbewegung der abzuscheidenden Partikel gegenüber dem umgebenden Medium durch Einwirken äußerer Kräfte. Nach dem Wirkprinzip werden Massenkraftabscheider, Filternde Abscheider, Elektrische Abscheider, Naßarbeitende Abscheider unterschieden. Die nachfolgende Übersicht charakterisiert die Wirkungsweise der Entstaubungsverfahren und trifft Aussagen zur Eignung bzw. dem Einsatz bei Einäscherungsanlagen.

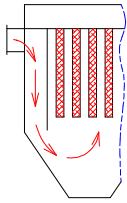
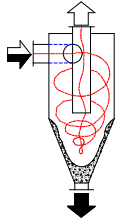
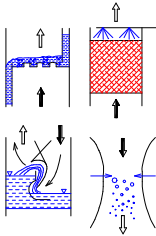
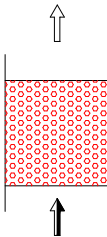
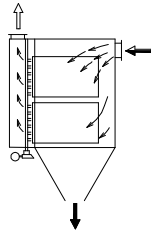
<p>Massenkraftabscheider</p> <ul style="list-style-type: none"> • Trägheitskraft, Schwerkraft • Querstrom-, Gegenstrom-, Umlenk-, Ringspaltabscheider • nur für große Partikel (50..100 µm), Reingasstaubgehalt > 50 mg/m³ • als Einström-Geometrie in Gewebefilter 	
<p>Zyklone</p> <ul style="list-style-type: none"> • Schwerkraft, Zentrifugalkraft • Axial-, Radial-, Multizyklon • Probleme in Krematorien: stark schwankende Volumenströme, kleine Partikel • als Vorabscheider oder Reaktor für Flugstromverfahren 	
<p>Wäscher</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bindung der Partikel an Flüssigkeit (durchströmte Schicht, feste, bespülte Flächen, Anströmen einer Schicht, im Gas verteilte Tropfen) • Probleme in Krematorien: Reingasstaubgehalt, Wasserdampffahne, vergleichsweise hohe Investkosten, hohe Druckverluste 	
<p>Filternder Abscheider (Festbettfilter)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bindung der Partikel an den Körnern der Schüttung bzw. in der Staubschicht auf der Oberfläche durch Diffusion/Trägheit • Probleme in Krematorien: Gefahr des Staubdurchbruchs bei hohen Volumenströmen, Wechsel der Schüttung aufwändig • Einsatz als Adsorptionsfilter 	
<p>Filternder Abscheider (Gewebefilter)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Abscheidung von Partikeln auf luftdurchlässigen Oberflächen/Staubschichten • Textile und keramische Filtermedien (Filterschläuche, -taschen, -kerzen) • Gute Abscheidung aller Partikelgrößen, Staubgehalte < 5 mg/m³ leicht erreichbar • Problem: Brandgefahr 	

Tabelle 2: Staubabscheider für Einäscherungsanlagen

In Deutschland werden in Krematorien hauptsächlich Gewebeabscheider eingesetzt, da damit der sehr niedrige Grenzwert für Gesamtstaub sicher eingehalten werden kann. Vereinzelt

sind auch Wäscher in Verbindung mit einer Quench zur Rauchgaskühlung zum Einsatz gekommen, einige der Anlagen sind wegen ungenügender Staubabscheidung bereits auf trockene Abscheidung mit Gewebefilter umgerüstet worden. Heißgasfilter mit keramischen Medien hatten sich wegen Problemen mit der Abreinigung nicht bewährt. Die Anlagen wurden fast alle umgerüstet.

3 Staubeigenschaften

Untersuchungsergebnisse zu den physikalischen Eigenschaften von abgeschiedenem Staub aus Einäscherungsanlagen enthält Tabelle 3. Die Angaben zur Partikelgröße zeigen, daß die Staubpartikel nahezu vollständig kleiner 20 µm und mehrheitlich kleiner 10 µm sind. Die Staubemission dürfte damit komplett in PM₁₀ fallen. Relevante Massenanteile liegen unter 1,5 µm. Durch anzahlmäßige Betrachtung verschiebt sich die Partikelgrößenverteilung stark zu kleineren Durchmessern. Auffällig ist auch die geringe Schüttdichte, die zu hohen Kosten für die Entsorgung der Filterstäube führt.

Kenngroße	Einheit	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4
x10	µm	1,58	1,53	1,67	1,73
x50	µm	7,17	6,46	6,72	8,16
x90	µm	17,98	16,7	15,9	22,49
Dichte	kg/m ³	2,47	2,46	2,51	2,61
Analysenfeuchtigkeit	%	3,04	2,11	2,09	0,975
Schüttdichte	kg/m ³	0,149	0,120	0,151	0,155

Tabelle 3: Physikalische Staubeigenschaften

Bekannt ist, daß Schwermetalle und organische Spurenstoffe besonders an kleinen Partikeln adsorbiert sind. Analysen der Staubinhaltsstoffe zeigen eine hohe Belastung mit Schwermetallen und Dioxinen/Furanen (Tabelle 4).

Aus dem großen Anteil sehr kleiner Staubpartikel an der Emission und der hohen Schadstoffbelastung ergibt sich die Anforderung nach hochwirksamer Staubabscheidung.

Element	Einheit	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
Arsen	As	mg/kg	32	< 5	< 5	< 5
Blei	Pb	mg/kg	1630	1100	1100	1200
Cadmium	Cd	mg/kg	37	94	81	120
Chrom	Cr	mg/kg	1700	2300	2700	2500
Kupfer	Cu	mg/kg	261	470	570	420
Nickel	Ni	mg/kg	287	270	290	200
Quecksilber	Hg	mg/kg	530	170	190	500
Zink	Zn	mg/kg	20850	37000	41000	51000
PCDD/PCDF	I-TEQ	ng/kg	100119	9256	13106	77866

Tabelle 4: Staubinhaltsstoffe und adsorbierte Schadstoffe ⁵

4 Festbettfilteranlagen zur Rauchgasreinigung in Krematorien

4.1 Erfahrungen mit Festbettfilteranlagen

Die Vorteile der Festbettfiltertechnik gegenüber den anderen Verfahren zur Abgasreinigung in Einäscherungsanlagen liegen besonders in

- der großen Abscheideeffektivität auch bei geringen Schadstoffkonzentrationen
- der hohen Speicherkapazität und relativen Unempfindlichkeit gegenüber Schadstoffspitzen

- dem Betrieb ohne Bedienungsaufwand
- der zusätzlich möglichen Abscheidung von Schwermetallen (z.B. Quecksilber) und sauren Schadgasen.

Gute Erfahrungen wurden seit 1996 im Krematorium Potsdam mit Einäscherungsanlagen mit Etagenofen, Rauchgaskühlung, Entstaubung im Gewebefilter und nachgeschaltetem Herdofenkoks-Festbettfilter zur Dioxin/Furan-Abscheidung gemacht.⁶ Messungen zeigten die deutliche Unterschreitung der Emissionsgrenzwerte auch nach längerer Betriebsdauer.⁷ Mit vergleichbarer Anlagentechnik werden seit 1998 zwei Einäscherungslinien im Krematorium Aachen betrieben. 1999 ist eine neu errichtete Einäscherungsanlage im Krematorium Gera in Betrieb gegangen. Im Jahr 2000 wurde die Rauchgasreinigungsanlage im Krematorium Görlitz um einen Festbettfilter erweitert. Die Festbettfiltertechnik ist auch die Basis des an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg entwickelten Verfahrens zur oxidativen Zerstörung der Dioxine/Furane.⁸ Die folgenden Bilder zeigen Ergebnisse von Emissionsmessungen an Einäscherungsanlagen mit Festbettfiltern.

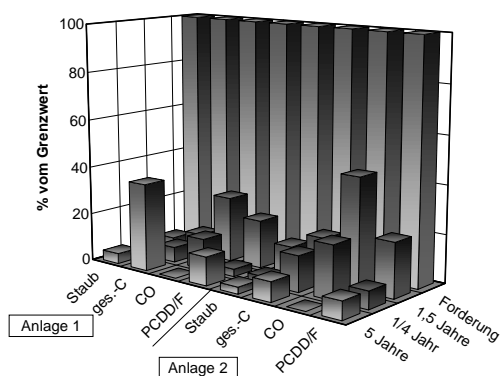


Bild 1: Emissionsmeßwerte Krematorium Potsdam 1996 - 2001

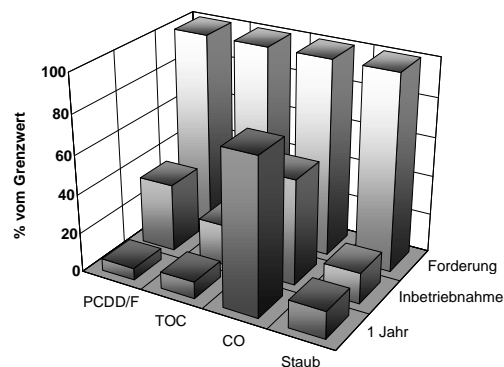


Bild 2: Emissionsmeßwerte Krematorium Gera 2000/2001

4.2 Weiterentwicklung des Festbettverfahrens zum 2-Schichtfilter

Bekannt ist aus Untersuchungen zum Beladungsprofil mit HOK gefüllter Reaktoren, daß die Schadstoffkomponenten unterschiedlich weit in das Bett eindringen. Staub und Quecksilber werden nahezu vollständig in den ersten Zentimetern der Schüttschicht abgeschieden. Tiefer dringen hingegen SO_2 und PCDD/F ein. HCl wird bei HOK von der sich aus dem SO_2 bildenden Schwefelsäure aus den vorderen Filterschichten verdrängt.⁹ Die grundlegende Idee des Verfahrens besteht daher in der Verwendung zweier Schichten mit unterschiedlichem Adsorbensmaterial, einer Vorschicht und einer Hauptschicht.

Die ursprünglich zum Schutz des Festbetts vor eingetragenen Staub gedachte Vorfilterschicht wurde durch Auswahl des geeigneten Adsorbensmaterials (Granulat aus Kalkhydrat und Herdofenkoks) zur Senke für Staub (und angelagerte Schwermetalle), Hg und saure Gasbestandteile sowie einen Teil der Dioxine/Furane ausgelegt. In der nachfolgenden Zeolith-Hauptschicht werden vor allem die Konzentrationen gasförmiger Dioxine/Furane bis unterhalb des Grenzwertes abgesenkt.

Die mit nur wenig Schadstoff beladene Zeolith-Hauptschicht verbleibt in der Anlage und kann thermisch oder unter Einsatz von Oxidationsmitteln (z.B. nach Erkenntnissen der Universität Halle/Wittenberg mit Ozon¹⁰) regeneriert werden. Die Vorfilterschicht wird vor Beginn des Regenerierungsvorganges entfernt. Nach der Regenerierung wird frisches Granulat aufgefüllt. Das bei der Regenerierung anfallende Abgas wird mit einem Katalysator gereinigt und dem Rohgas der Nachbaranlage zugeführt.

Mit der Nutzung unbrennbarer Adsorbentien wird eine deutliche Erhöhung der Betriebssicherheit der Anlagen gegenüber herkömmlichen Aktivkohle/Herdfenkokk-Schütttschichten erreicht. Kostenintensive Einrichtungen zur Überwachung (Delta-CO-Messung) und eine Inertisierungsanlage werden nicht benötigt. Durch Teilung des Festbetts in eine kleine Schicht zur Vorabscheidung und Schadstoffausschleusung (saure Schadgase, Quecksilber) und einer großen Schicht zur Langzeitabscheidung der Dioxine und Furane können das Aufkommen an zu entsorgenden Adsorbensmaterialien und die damit verbundenen Kosten deutlich gesenkt werden.

Der Heizkreis kann auch zur Aufheizung der kalten Schütttschichten nach längerer Betriebspause genutzt werden. Dabei kann der zu erwartende Rauchgas-Taupunkt mit sauberer, trockener Luft durchfahren werden.

Bild 3 zeigt den Aufbau des 2-Schichtfilters schematisch. Die Anlagenschaltung nach dem Umbau ist in Bild 4 dargestellt.¹¹

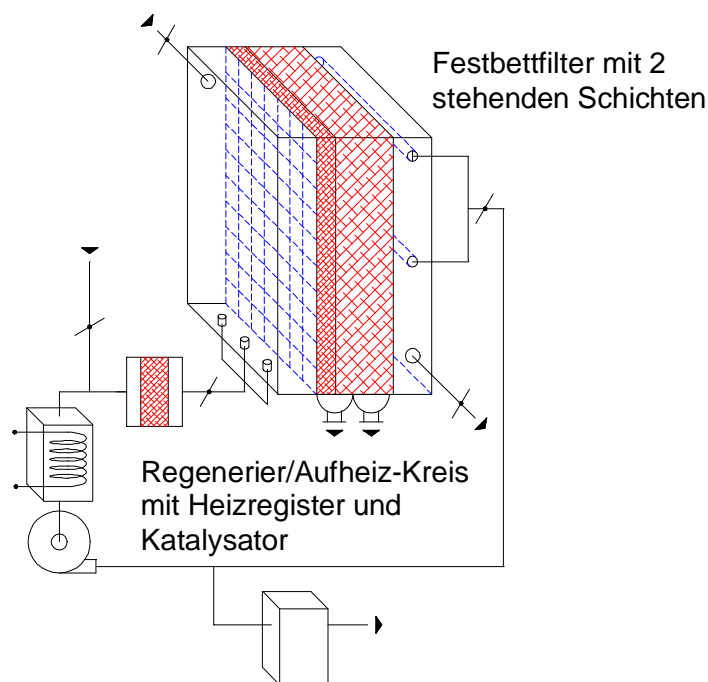


Bild 3: Schema des 2-Schichtfilters

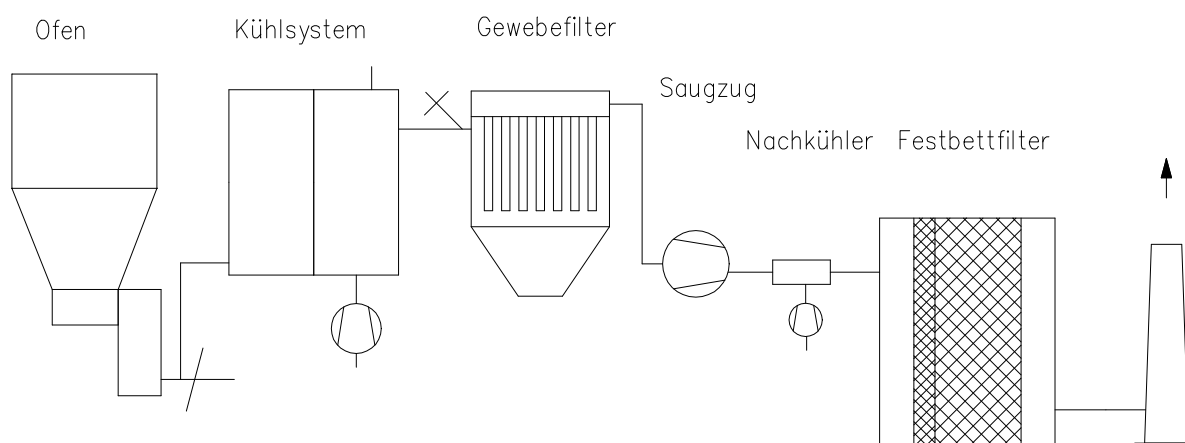


Bild 4: Anlagenschema nach dem Umbau

Die Inbetriebnahmemessung zeigte, daß die Grenzwerte der 27. BImSchV eingehalten und auch saure Schadgase und Quecksilber mit hohen Abscheidegraden zurückgehalten wer-

den. Weitere Emissionsmessungen sollten Aufschluß darüber geben, wann die Schüttungen zu erneuern bzw. zu regenerieren sind.¹² Die Ergebnisse der Messungen sind in Bild 5 den Grenzwerten der 27. BImSchV gegenübergestellt. Bild 6 zeigt den zeitlichen Verlauf der Emissionskonzentrationen weiterer Schadstoffe im Vergleich mit Erfahrungswerten beim Betrieb der Anlagen ohne Festbettfilter.

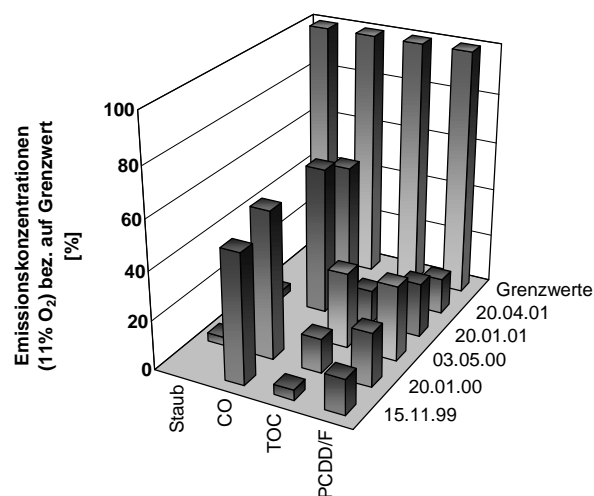


Bild 5: Emissionskonzentrationen im Vergleich zu den Grenzwerten

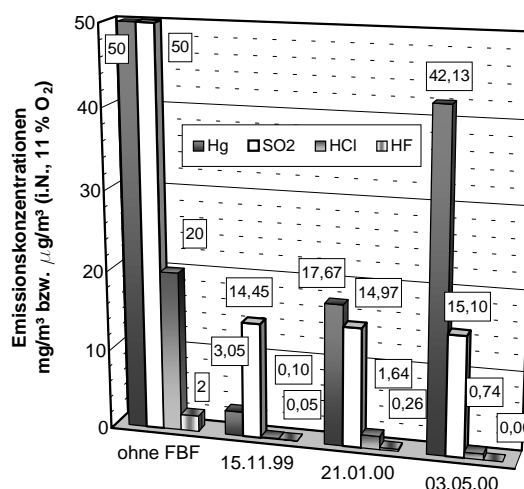


Bild 6: Emissionskonzentrationen weiterer Schadstoffe

Zur Untersuchung der Verhältnisse bei der Schadstoffadsorption in der Schüttschicht wurden in verschiedenen Schichten Proben der Adsorbensmaterialien genommen und hinsichtlich des Gehalts an Dioxinen/Furanen und Quecksilber analysiert. Bild 7 und Bild 8 zeigen die Analyseergebnisse in Bezug auf die Position der Probe in der Schüttschicht. Rechnerisch wurde die anteilige Abscheideleistung verschiedener Schichten der Schüttung ermittelt. Unter Berücksichtigung der Erfahrungswerte für die Schadstoffkonzentrationen beim Betrieb mit und ohne Festbettfilter konnten die Schadstoffkonzentrationsverläufe über der Schüttschicht ermittelt werden. Deutlich ist zu sehen, daß die Adsorption des Quecksilbers fast ausschließlich in der Vorschicht erfolgt, während an der Abscheidung der Dioxine/Furane auch die Hauptschicht wesentlich beteiligt ist. Die Vorschicht ist daher als wirksame Senke für die organischen Spurenstoffe sowie Quecksilber und saure Schadgase anzusehen. Eine sichere Unterschreitung des Emissionsgrenzwerts für PCDD/F kann jedoch nur mit der deutlich größeren Hauptschicht garantiert werden.

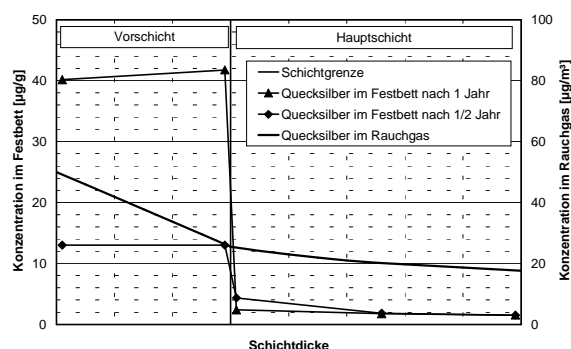


Bild 7: Quecksilber in der Schüttschicht

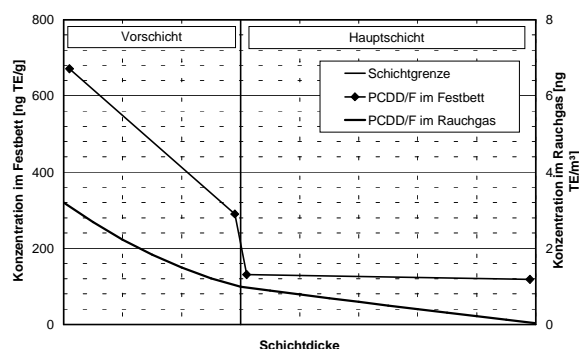


Bild 8: PCDD/F in der Schüttschicht

Als Risiko bei der Planung der Lösung zur thermischen Regeneration der Hauptschicht erwies sich die mögliche Schließung unzulässiger Schadstoff-Kreisläufe durch Desorption von Quecksilber aus der Zeolith-Schüttung der Hauptschicht. Wie die Meßergebnisse zeigen, besteht jedoch keine Notwendigkeit für eine Quecksilberfalle im Regenerierungskreislauf, da in der Hauptschicht kaum Quecksilber abgeschieden wird.

5 Betriebserfahrungen

Zur Abschätzung der Zeitabstände für Ersatz bzw. Regenerierung der Adsorbens-Schichten kann festgestellt werden, daß der nach 27. BImSchV relevante Grenzwert für Dioxine/Furane auch nach ca. 10000 Einäscherungen deutlich unterschritten wird. Im Vergleich mit bisher ausgeführten Festbettfilteranlagen und anderen möglichen Verfahren ergeben sich für das 2-Schichtfilter folgende Vorteile:

- Erhöhung der Betriebssicherheit durch unbrennbare Schüttschichten
- Kostensenkung durch Wegfall der Überwachungs- und Inertisierungseinrichtungen
- erhebliche Einsparung an zu entsorgenden Adsorbens-Materialien und Entsorgungskosten
- geringerer Druckverlust durch geringere Schichtdicke und gröbere Körnung, kein Anstieg der Druckverluste im Beobachtungszeitraum
- lange Standzeit des Festbetts bezogen auf die Zahl der Einäscherungen
- Abscheidung von Feinstaub, sauren Schadgasen und Quecksilber
- durch hohes Wärmespeichervermögen der Schüttschicht kann das Filter auch nach mehrtägigem Stillstand (z.B. Wochenende) mit Temperaturen oberhalb des Taupunktes angefahren werden
- geringer Wartungs- und Bedienungsaufwand
- für die Anforderungen des Städtischen Bestattungswesens Meißen die mit großem Abstand ökonomisch günstigste Lösung
- ökologisch günstig durch Energieeinsparung, Verminderung der Abfallmenge und die Abscheidecharakteristik.

6 Emissionscharakteristik Dioxine/Furane

In der Literatur wird an vielen Stellen auf den Zusammenhang zwischen Verbrennungsbedingungen und der Entstehung von Dioxinen/Furanen hingewiesen. Namentlich niedrige Emissionskonzentrationen von CO und TOC konnten an vielen Anlagen als Indikatoren für gute Verbrennungsführung und niedrige PCDD/F-Emissionen identifiziert werden. Die aktuelle Rechtslage für Einäscherungsanlagen spiegelt dies durch den strengen Emissionsgrenzwert für CO von 50 mg/m^3 wider. Mit den hier dargestellten umfangreichen Meßdaten wurde versucht, die Signifikanz der Einflussgrößen CO-, TOC- und Staubkonzentration auf die Dioxin/Furan-Konzentration zu zeigen.

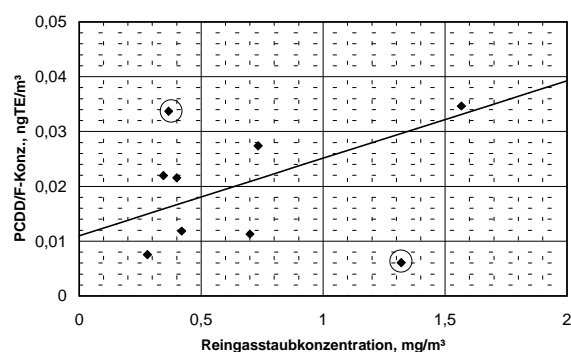


Bild 9: PCDD/F-Konzentration in Abhängigkeit vom Reingasstaubgehalt

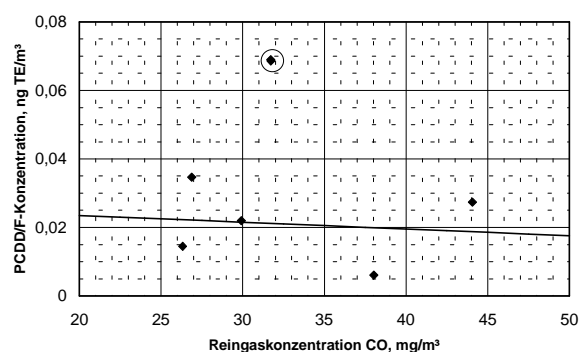


Bild 10: PCDD/F-Konzentration in Abhängigkeit von der CO-Konzentration

In Bild 9 und Bild 10 sind die Meßwerte der Dioxin/Furan-Emissionskonzentration über den entsprechenden Einflußgrößen sowie die Ausgleichsgeraden dargestellt. Nicht berücksichtigte Ausreißer wurden gekennzeichnet. Bei der Reingasstaubkonzentration ist ein Anstieg der Ausgleichsgerade zu sehen. Dies gilt für die Konzentration des TOC entsprechend. Ein Zusammenhang zwischen CO-Konzentration und PCDD/F-Emission war nicht erkennbar. Diese Aussagen sind allerdings nicht zu verallgemeinern, da alle Meßwerte von Einäscherungsanlagen mit Festbettfiltern stammen. Der an den untersuchten Anlagen nicht nachweisbare Einfluß der CO-Konzentration auf die Dioxin/Furan-Emission sollte bei der emissionsrechtlichen Einschätzung von Emissionsdaten durch die Behörden berücksichtigt werden.

Literatur

- ¹ Jost, D.: Umsetzung der ersten EU-Tochtrichtlinie zur Luftqualität. Workshop „Herausforderung Aerosole vor dem Hintergrund der europäischen Umweltgesetzgebung“ Frankfurt, 30./31.05.2001
- ² Stadtarchiv Dresden: Verhandlungen des ersten Europäischen Congresses der Freunde der Feuerbestattung in Dresden, am 6. und 7. Juni 1876. Nach stenographischen Berichten und handschriftlichen Aufzeichnungen der Herren Redner, mitgeteilt von dem Verein „Urne“ zu Dresden.
- ³ VDI-Richtlinie 3891: Emissionsminderung Einäscherungsanlagen (08/92)
- ⁴ 27. Verordnung zum Bundesimmissionsschutzgesetz (27. BImSchV) - Verordnung über Anlagen zur Feuerbestattung (03/97)
- ⁵ List, M.; Fischer, A.; Hartig, P.; List, S.: Ergebnisse der Betriebsuntersuchungen an einer Prototypanlage zur Abgasreinigung und der experimentellen Untersuchungen an einer Teilstromversuchsanlage in einem Krematorium (Abschlußbericht). ILK Dresden, ILK-AB-7/95-547
- ⁶ List, S.; Korb, U.; Föhlich, W.: Fortschritte bei der Rauchgasreinigung in Krematorien. Dresdner Kolloquium Filternde Abscheider, 16.10.97
- ⁷ Böhlmann, A.; Föhlich, W.; List, S.: Langzeiterfahrungen und Tendenzen bei der Staub- und Dioxinabscheidung in Krematorien. Dresdner Kolloquium: Fortschritte beim Abscheiden von festen und gasförmigen Luftschadstoffen – 28.09.99
- ⁸ Sircar, R.: Entwicklung und Anwendung von Minderungstechniken für Schadstoffemissionen aus Einäscherungsanlagen. 1. Rauchgaskolloquium der BTU Cottbus, 14./15.09.1998
- ⁹ Ritter, G.: Möglichkeiten der Schadstoffabtrennung aus Abgasen mit Braunkohlenkoks. In: Adsorptive Nachreinigung von Abgasen aus Verbrennungsanlagen mit Aktivkoxen. Vulkan-Verlag, Essen, 1992
- ¹⁰ Sircar, R.; Tamm, U.; Säuberlich, R.; Eigenwillig, S.: Neue Methoden für die technische Modernisierung von Krematorien. Friedhofskultur 08/99
- ¹¹ List, S.; Schaldach, J.: Die Entwicklung der Festbettfiltertechnik – Erfahrungen mit einem 2-Schichtfilter im Krematorium Meißen. Workshop „Anlagen nach der 27. BImSchV. Entwicklungen und Betriebserfahrungen“ Dresden, 30.11.2000
- ¹² Dioxinabscheidung – Krematorium Meißen. Abschlußbericht ILK Dresden ILK-AB-7/00-916