

# Das UPSWING-Verfahren – Der Schlüssel zur kostengünstigen Abfallverbrennung

J. Vehlow, H. Hunsinger, S. Kreis, H. Seifert, ITC

## Einleitung und Problemstellung

Seit zu Beginn der neunziger Jahre die Emissionsgrenzwerte erheblich verschärft wurden [1], sind Abfallverbrennungsanlagen mit immer komplexeren Gasreinigungssystemen ausgerüstet worden. Das Bestreben der Anlagenplaner und -bauer war – gemäß dem Schlagwort „best available technology“ – auf eine möglichst weite Absenkung der Emissionen gerichtet, wobei der Aufwand oft in keinem Verhältnis zum ökologischen Nutzen stand. In etlichen Anlagen stiegen die Verbrennungskosten dadurch auf weit mehr als 500 DM pro Tonne Hausmüll.

Schon frühzeitig wurden Wege aufgezeigt, durch geeignete Maßnahmen im heißen Teil der Anlagen und durch technologische Vereinfachungen oder Kombination einzelner Verfahrensstufen den Aufwand für die Gasreinigung zu reduzieren [2, 3, 4]. Ohne den erreichten hohen Emissionsstandard aufzugeben, konnten dadurch erhebliche Kosteneinsparungen erzielt werden. Für derzeit in Betrieb gehende Abfallverbrennungsanlagen in Deutschland werden Verbrennungskosten im Bereich von 200-250 DM pro Tonne Hausmüll angegeben. Damit sind noch nicht alle Einsparpotentiale ausgeschöpft und so wird weiterhin in unserem Hause an einer Optimierung der klassischen Abfallverbrennung gearbeitet.

Vielfersprechend erscheinen aber auch Ansätze, die Behandlung von Abfällen in anderen oder

in Kombination mit anderen thermischen Prozessen vorzunehmen. Ein neuer Vorschlag aus dem Forschungszentrum Karlsruhe zur Kombination einer Abfallverbrennungsanlage mit einem Kraftwerk, das sogenannte UPSWING-Verfahren (**U**nification of **P**ower plant and **S**olid **W**aste **I**ncineration on the **G**rate), wird im Folgenden näher beschrieben und mit anderen Konzepten verglichen. Im Vordergrund steht dabei die Frage, wo in der Abfallverbrennung als kritisch angesehene Komponenten wie saure Schadgase, thermisch flüchtige Schwermetalle oder polychlorierte Dibenzop-dioxine (PCDD) und Dibenzofurane (PCDF) letztendlich verbleiben.

## Mitverbrennung in Industrieöfen

Eine erhebliche Kostenreduktion verspricht auf den ersten Blick die zur Zeit intensiv und kontrovers diskutierte Mitverbrennung von Abfällen in anderen thermischen Prozessen wie Kraftwerken, Zementwerken oder Hochöfen. Für diese Prozesse gelten im Allgemeinen weniger strenge Grenzwerte als für die Abfallverbrennung. Zur Vermeidung einer reinen Schadstoffverdünnung in Industrieöfen beim Ersatz von Regelbrennstoff (z.B. Kohle) durch Siedlungsabfall erlaubt die 17. Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (17. BImSchV), die in Deutschland die Emissionsgrenzwerte aus Abfallverbrennungsanlagen festlegt, nur eine Mitverbrennungsquote von 25% Abfall und enthält in der sogenannten Mischungsregel Vorschriften, wie

die Emissionsgrenzwerte im Einzelfall zu berechnen sind [1]. Auch diese Regelung lässt aber bei Ausschöpfung der Grenzwerte ein gewisses Potential für eine Schadstoffverdünnung zu.

Der Ersatz von Regelbrennstoff wie Öl oder Steinkohle durch Abfallstoffe stellt an deren Qualität bezüglich Brennwert und Schadstoffgehalt Anforderungen, die in jedem Falle eine Vorbehandlung, z.B. eine Sortierung, unerlässlich machen. Neben den Emissionsbegrenzungen ist der Eintrag einzelner im Abfall enthaltener Elemente in Industrieöfen auch im Hinblick auf die Korrosion in heißen Anlagenteilen wie z.B. Abhitzekeßeln und auf die Qualität der Produkte von Bedeutung. So muss z.B. im Zement der Gehalt von Chloriden oder einzelnen Schwermetallen, besonders der des Chroms, begrenzt werden. Bei Kessel- und Flugstäuben aus Kraftwerken, die derzeit vollständig in eine Verwertung gehen, werden an die Elutionsbeständigkeit der Schwermetalle hohe Anforderungen gestellt. Ähnliches gilt für den Quecksilbergehalt in den Kraftwerksgipsen aus der Abgasentschwefelung.

Die wesentlichen Vorbehalte gegen die Mitverbrennung von Abfällen in Industrieöfen sind im Folgenden aufgelistet.

- Die Emissionsgrenzwerte des thermischen Hauptprozesses liegen üblicherweise deutlich über denen der Abfallverbrennung, somit findet auch bei Anwendung der Mischungsregel und Ausnutzung der Grenzwerte eine Verdünnung statt.

- Die thermischen Prozesse akzeptieren nur heizwertreiche und gering kontaminierte Abfallfraktionen.
- Eine Mitverbrennung ist nur dann wirtschaftlich, wenn der Einsatz des Abfalls im Kraftwerk dem Betreiber vergütet wird.

Im Sinne einer integrierten Abfallwirtschaft bringt die Mitverbrennung weder ökologische noch ökonomische Vorteile. Im Gegenteil resultiert aus dem Ausschleusen einer „Brennstofffraktion“ eine Heizwertabsenkung und eine Erhöhung der Schadstoffgehalte des verbleibenden Abfalls. Damit wird aber die zur Erreichung der Qualitätsanforderungen für eine Deponierung [5] oder für eine Verwertung [6] der Rostaschen notwendige Inertisierung schwieriger und erfordert unter Umständen die Zufeuerung von Heizöl in der Abfallverbrennungsanlage – ein sicherlich nicht wünschenswerter Effekt.

### Kombination der Abfallverbrennung mit anderen thermischen Verfahren

#### Die verschiedenen Optionen

Einen alternativen Ansatz zur Kostenreduktion der Abfallverbrennung verfolgt die Kopplung einer Abfallverbrennungsanlage mit einem modernen Kraftwerk, bei der Synergieeffekte durch die gemeinsame Nutzung von Aggregaten wie Kessel und/oder Gasreinigung erzielt werden sollen. Da-

zu wurden Strategien mit unterschiedlichem Integrationsgrad entwickelt bzw. vorgeschlagen, die in Abb. 1 schematisch dargestellt sind.

- Die dampfseitige Einbindung erspart die Turbine, die damit verbundenen Hilfsaggregate und die zugehörigen Bauten (Variante I). Der Investitionsbedarf der Abfallverbrennungsanlage kann so bis zu ca. 20% reduziert werden.
- Die Satelliten-Feuerung [7], die den Abfall auf einem separaten Rost verbrennt und die heißen, ungereinigten Abgase direkt in die Brennkammer eines Kohlekraftwerks einleitet (Variante II), verzichtet auf den Kessel und die komplette Gasreinigung.
- Die Einleitung der entstaubten Abgase der Abfallverbrennung in die Entschwefelungsanlage eines Kohlekraftwerks (Variante III) ersetzt die Wäscher in der Abfallverbrennung.
- Das UPSWING-Verfahren [8] verknüpft die Dampfkreisläufe (Variante I) und speist das teilgereinigte Abgas aus der Abfallverbrennung als Förderluft vor den Kohlemühlen oder als Primärluft in den Ofen eines Kohlekraftwerks ein (Variante IV). Dadurch werden in der chemischen Gasreinigung die zweite Waschstufe, der Katalysator und eine eventuelle Feinreinigung eingespart.

Die unterschiedlichen Varianten sollen im Folgenden kurz erläutert werden. Die Mitverbrennung

im Kohlekraftwerk, die Satellitenfeuerung und das UPSWING-Verfahren sollen zudem hinsichtlich des Verbleibs ausgewählter, dem Abfall entstammender Schadstoffe miteinander verglichen werden.

#### Integration der Dampfkreisläufe

Diese in Abb. 1 als Option I dargestellte einfache Strategie ist anzuraten, wenn die Abfallverbrennungsanlage in enger Nachbarschaft eines Kraftwerks errichtet werden kann. Die Kombination der Dampfkreisläufe kann so gestaltet werden, dass die Dampfparameter im Kessel der Abfallverbrennungsanlage zur Verminderung der Korrosionsgefahr niedrig gehalten werden (Maximaltemperaturen um 250 °C). Eine derartige Verschaltung der Dampfkreisläufe ist kürzlich für eine neu zu errichtende Abfallverbrennungsanlage in Auftrag gegeben worden [9].

#### Satellitenfeuerung

Dieser Verfahrensvorschlag (Option II in Abb.1) beinhaltet den Bau einer Brennkammer für Abfälle in unmittelbarer Nähe eines Kohlekraftwerks. Deren Abgase sollen ohne jegliche Kühlung und Reinigung in die Brennkammer des Kohlekraftwerks eingeleitet werden. Damit wird die aus dem Abfall freigesetzte Energie direkt dem Kraftwerkskessel zugeführt und die Gasreinigung des Kraftwerks wird für beide Prozesse genutzt. Es ist offensichtlich, dass alle im Abgas enthaltenen Schadstoffe aus dem Abfall in das Kraftwerk gelangen.

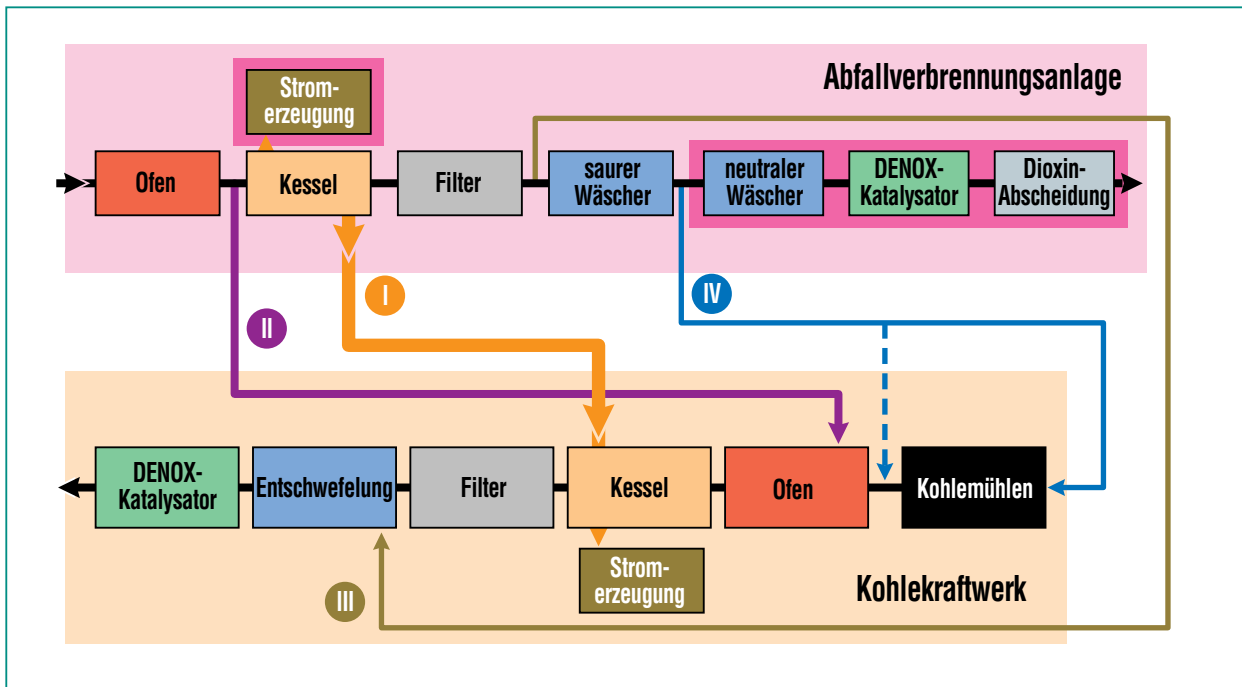


Abb. 1: Verschiedene Optionen der Kombination einer Abfallverbrennungsanlage und eines Kohlekraftwerks (I: Verbindung der Dampfkreisläufe; II: Satellitenfeuerung; III: Reinigung der entstaubten Abgase der Abfallverbrennung im SO<sub>2</sub>-Wäscher des Kohlekraftwerks; IV: UPSWING-Verfahren).

### Einleitung entstaubter Abgase in die Entschwefelungsanlage des Kraftwerks

Die Option III in Abb. 1, bei der das entstaubte Abgas der Abfallverbrennungsanlage direkt in die Entschwefelungsanlage des Kraftwerks eingespeist wird, spart die chemischen Gasreinigungsstufen in der Abfallverbrennung ein. In diesem Falle ist zu bedenken, dass dem Abfall zuzuschreibende Kontaminationen die Vermarktbarkeit des Kraftwerksgipses gefährden können. Besonders zu beachten sind Quecksilber so wie die PCDD und PCDF. Erhöhte Chlorideinträge müssen durch eine Wäsche aus dem Gips entfernt werden. Diese Variante soll im Folgenden nicht näher betrachtet werden.

### Das UPSWING-Verfahren

Das im Forschungszentrum Karlsruhe entwickelte UPSWING-Verfahren verknüpft die Dampfkreisläufe beider Prozesse wie in Option I und trennt die Gasreinigung zwischen der Abfallverbrennungsanlage und dem Kraftwerk auf. Als Kraftwerke kommen Kohlestaub- und Kohlewirbelschichtfeuerungen sowie Schwerölkraftwerke in Betracht. Im Weiteren soll nur die Staubfeuerung betrachtet werden. Die gasseitige Kopplung der beiden Feuerungen erfolgt so, dass sowohl die in modernen Abfallverbrennungsanlagen erreichten Emissionsstandards als auch die Qualität der Reststoffe aus dem Kohlekraftwerk beibehalten werden.

Aus dem Abgas nach dem Abhitzekeessel der Abfallverbrennungsanlage werden alle Schwermetalle außer Quecksilber in einem effizienten Filter bis auf geringe, im Rahmen der Emissionsgrenzwerte der 17. BImSchV liegende Konzentrationen zurückgehalten. Die ebenfalls im Kraftwerk störenden Kontaminanten Quecksilber und Chlorwasserstoff (HCl) werden in einem einfachen sauren Wäscher zu weit mehr als 90% abgeschieden. Die teilgereinigten Gase, die weiterhin Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>), Stickstoffoxide (NO<sub>x</sub>) und gasförmige PCDD/F enthalten, werden entweder als Förderluft in die Kohlemühlen eingeleitet oder aber, was technologisch einfacher zu realisieren sein dürfte, der Primärluft der Kohlebrenner zugemischt. Da eine Rauchgasrückführung in der Kohleverbrennung

häufig praktiziert wird, ist die Verwendung einer Primärluft mit verringertem Sauerstoffanteil nicht prinzipiell neu.

Die aus dem Abfall stammenden kritischen Komponenten Schwermetalle und HCl werden wie in herkömmlichen Abfallverbrennungsanlagen ausgeschleust und in kleinen Reststoffströmen konzentriert. Im Brennraum des Kraftwerks werden die im Abgas verbliebenen gasförmigen PCDD/F thermisch zerstört und das NO<sub>x</sub> wird in der Reburn-Zone weitgehend abgebaut. Das SO<sub>2</sub> aus der Abfallverbrennung wird gemeinsam mit dem aus der Kohle stammenden in der Entschwefelungsanlage des Kraftwerks abgeschieden.

Das UPSWING-Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass es

- die hohen Emissionsstandards einer modernen Abfallverbrennungsanlage beibehält,
- den Verbleib der einzelnen Kontaminanten nachvollziehbar macht,

- durch die Vermeidung des Eintrags von Schwermetallen in das Kraftwerk dessen Reststoffe in ihrer Qualität nicht beeinflusst und

- durch die Einsparung einiger Prozessstufen (in der Abb. 1 rot unterlegt) eine Reduktion der Investitionskosten um bis zu 50% erwarten lässt.

### Vergleich der Umweltverträglichkeit

#### Verhalten einzelner Elemente in der Abfall- und Kohleverbrennung

Siedlungsabfälle und Steinkohle unterscheiden sich als Brennstoffe in wesentlichen Punkten:

- der Heizwert der Kohle ist etwa drei mal so hoch wie der von Siedlungsabfall,
- der Siedlungsabfall wiederum enthält nahezu durchgängig höhere Konzentrationen an umweltrelevanten Elementen.

Bei den in Tabelle 1 zusammengefassten Konzentrationen ausgewählter Elemente zeigt die Kohle nur im Falle des Schwefels und des Arsens höhere Niveaus als der Siedlungsabfall.

Zur Berechnung der Inventare einzelner Elemente in den Kompartimenten Kesselasche, Flugasche und entstaubtes Abgas im Kohlekraftwerk bei den drei Szenarien Mitverbrennung, Satellitenfeuerung und UPSWING-Verfahren werden neben den Inventaren die spezifischen Abgasströme pro Tonne Brennstoff, die prozentuale Verteilung der Massenströme und die Transferkoeffizienten benötigt, die den Übergang der Elemente in einzelnen Massenströme hinein jeweils für die Abfallverbrennung und für die Kohlestaubfeuerung beschreiben.

Dabei ist zu beachten, dass die Temperaturniveaus in der Abfall- und der Kohleverbrennung sich erheblich unterscheiden. Während bei der Abfallverbrennung im Gutbett Maximaltemperaturen zwischen ca. 800 und knapp 1000 °C vorliegen, werden in der Kohlestaub-Trockenfeuerung 1000 bis 1200 °C und in der Schmelzkammerfeuerung sogar über 1500 °C erreicht. Die Verbrennungstemperatur hat einen wesentlichen Einfluss auf die Verflüchtigung der Elemente. Die im Folgenden verwendeten Daten sind der Literatur entnommen.

#### Verbleib thermisch flüchtiger Elemente

Der Verbleib einiger bei der Abfallverbrennung kritischer flüchtiger Elemente in den Reststoff-

	Siedlungsabfall		Steinkohle	
	Mittelwert	Bereich	Mittelwert	Bereich
<b>S</b>	4000	1000 - 6000	7000	4000 - 15000
<b>Cl</b>	7000	3000 - 9000	1000	100 - 3000
<b>As</b>	7	2 - 20	20	1 - 60
<b>Cd</b>	10	3 - 20	1	<0,1 - 2,5
<b>Hg</b>	3	0,5 - 10	0,12	0,1 - 0,6
<b>Pb</b>	700	400 - 1500	20	10 - 60

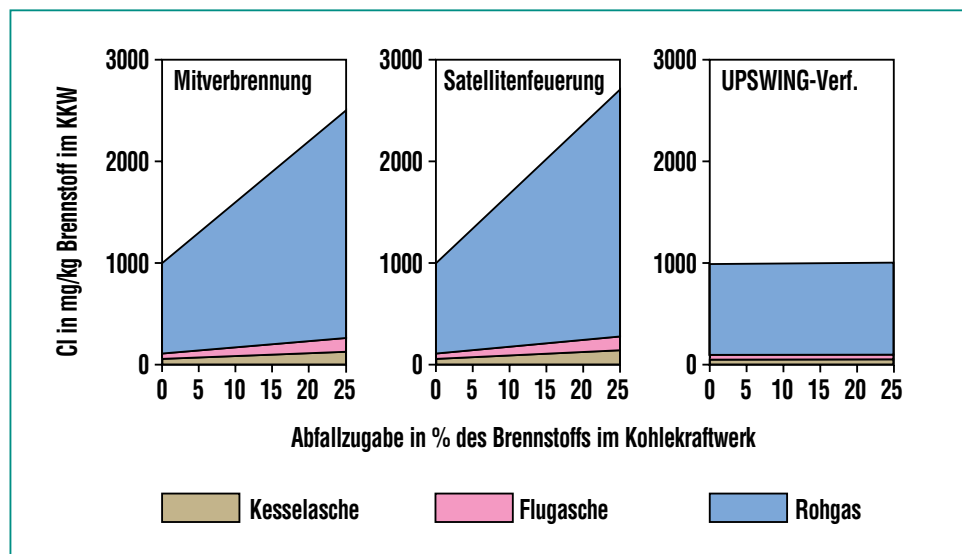
Tab. 1: Mittlere Konzentrationen und Konzentrationsbereiche ausgewählter Elemente in Siedlungsabfall und Steinkohle in mg/kg [10-14].

strömen des Kraftwerks soll exemplarisch für die drei Konzepte Mitverbrennung, Satellitenfeuerung und UPSWING-Verfahren abgeschätzt werden. Bei der Mitverbrennung wird die Menge des eingesetzten Abfalls auf die in Deutschland zugelassene Höchstmarke von 25% begrenzt. In den beiden anderen Szenarien wird das gleiche Massenverhältnis von Kohle und Abfall zugrunde gelegt. Um den Energieeintrag in den Kessel des Kraftwerks konstant zu halten, muss der Durchsatz im Kohlekraftwerk um einen Anteil erniedrigt werden, der dem aus dem Abfall stammenden Energieeintrag entspricht. Der über das Abgas in die Kohleverbrennung eingetragene Anteil der einzelnen Elemente wird jeweils einschließlich seiner Verteilung auf die Kompartimente Kesselasche, Flugasche und Abgas nach der Entstaubung im Kraftwerk berechnet.

Es sei darauf hingewiesen, dass die Inventarberechnungen zwar Hinweise auf den Eintrag eines Elements in einen Reststoff des Kohlekraftwerks geben, die Auswirkungen auf die Umweltverträglichkeit des betreffenden Materials aber ohne Elutionstest und das heißt ohne Proben aus real existierenden Anlagen nicht quantifiziert werden können.

## Chlor

Chlor ist in der Abfall- wie in der Kohleverbrennung ein hochflüchtiges Element, das bevorzugt als HCl in das Abgas übertritt. Siedlungsabfall enthält im Mittel eine sieben mal höhere Konzentration an Chlor als die Steinkohle.



**Abb. 2: Chlorinventar (CI) im Kohlekraftwerk (KKW) und seine Verteilung auf Kessel- und Flugasche sowie Rohgas nach Filter bei den verschiedenen Konzepten (maximale Abfallzugabe 25 % des Durchsatzes). Chlor liegt vor allem als HCl im Abgas vor.**

In den drei Grafiken in Abb. 2 sind das Chlorinventar und seine Verteilung auf Kesselasche, Flugasche und entstaubtes Abgas im Kohlekraftwerk im Falle einer Mitverbrennung, der Satellitenfeuerung und des UPSWING-Verfahrens dargestellt. Die Mitverbrennung wie auch die Satellitenfeuerung erhöhen den Chloreintrag in das Kohlekraftwerk erheblich. Eine Mitverbrennung von 25% Abfall oder der Betrieb einer Satellitenfeuerung mit dem gleichen Massenanteil an Abfall führen zu einem Anstieg des Chlorinventars um ca. 50%. Der größte Anteil findet sich als HCl in der Gasphase und lässt die HCl-Konzentration im Abgas des Kraftwerks von ca. 100 auf ca. 250 mg/m<sup>3</sup> ansteigen. Ein Emissionsproblem ist dadurch nicht zu erwarten, da HCl nahezu quantitativ im SO<sub>2</sub>-Wäscher entfernt wird, und zu hohe Konzentrationen an Chlorid im Gips können durch eine Wäsche

reduziert werden. Auf Anzeichen verstärkter Kesselkorrosion ist zu achten.

Eine deutliche Zunahme des Chlorinventars ist auch in den Kessel- und Flugaschen zu erkennen. Eventuelle Überschreitungen von Qualitätsstandards bei einer Verwertung dieser Materialien lassen sich ebenfalls durch eine Wäsche umgehen. In jedem Falle erfordern diese Wäschen aber einen zusätzlichen Aufwand und damit erhöhte Kosten.

Die einfache saure Wäsche des UPSWING-Verfahrens entfernt das HCl aus dem Abgas der Abfallverbrennungsanlage derart effizient, dass die in dieser Variante in das Kraftwerk eingetragene Chlormenge nur marginal ist. Beeinträchtigungen irgendwelcher Qualitätsstandards sind nicht wahrscheinlich.

## Quecksilber

Das hochtoxische Schwermetall Quecksilber hat die höchste thermische Flüchtigkeit aller Metalle und ist im Abfall gegenüber der Steinkohle um den Faktor 20-30 angereichert. Abb. 3 verdeutlicht sowohl im Falle der Mitverbrennung als auch im Falle der Satellitenfeuerung bei einer Abfallzugabe von 25% einen Anstieg des Quecksilberinventars im Kohlekraftwerk um einen Faktor von etwa 8. Wie bei Chlor ist auch hier die Hauptmenge in der Gasphase zu finden. Dadurch werden die im entstaubten Abgas der Kohleverbrennung typischen Quecksilberkonzentrationen von  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  bis auf Werte um  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  erhöht. Dieses Quecksilber liegt wegen der hohen  $\text{SO}_2$ -Konzentrationen überwiegend metallisch vor und lässt sich daher nur unter großem Aufwand – z.B. unter Einsatz von Kohleabsorbentien – abscheiden. Ob und in wie weit eine Kontami-

nation des Kraftwerksgipses und der Flugaschen deren Verwertung beeinträchtigen ist in jedem Fall sorgfältig zu prüfen.

Wie bereits für Chlor gefunden, ist auch im Falle des Quecksilbers der Eintrag in die Stoffströme des Kraftwerks beim UPSWING-Verfahren am geringsten. Die bei einem Abfallanteil von 25% zu erwartende 15-prozentige Inventarerhöhung dürfte weder in der Emission noch in den einzelnen festen Reststoffen irgendwelche Probleme aufwerfen.

## Cadmium

Ein weiteres Problemelement der Abfallverbrennung ist das toxische und thermisch mobile Cadmium, dessen Einträge aus der Abfallverbrennung in das Kohlekraftwerk jeweils denen des Quecksilbers ähneln. Die Mitverbrennung und die Satellitenfeuerung führen zu einer Verdreifung

des Cadmiuminventars im Kraftwerk bei 25% Abfallzugabe. Cadmium ist vor allem in den Kraftwerksflugaschen zu finden, in geringerem Maße werden aber auch die Konzentrationen in den Kesselaschen erhöht. In jedem Falle ist die Qualität dieser Reststoffe zu überprüfen, um deren Zertifizierung für die Verwertung sicher zu stellen.

Da Cadmium und seine Verbindungen nur bei Temperaturen oberhalb  $600^\circ\text{C}$  in der Gasphase vorliegen können, also im Temperaturbereich der Staubabscheidung (um  $200^\circ\text{C}$ ) vollständig an den Flugstaub gebunden sind, ist bei einer effizienten Entstaubung, wie sie das UPSWING-Verfahren vorsieht, nur ein vernachlässigbarer Cadmiumeintrag über das Abgas der Abfallverbrennung in das Kraftwerk zu erwarten.

## Blei

Der Unterschied der Bleikonzentration im Abfall und in der Kohle ist mit einem Faktor von 20-70 erheblich. Wegen der im Verhältnis zum Cadmium geringeren Flüchtigkeit des Bleis und seiner Verbindungen ist ein signifikanter Unterschied des Verhaltens bei den drei betrachteten Verfahren zu erwarten. Bei der Mitverbrennung wird durch den gesamten Eintrag des im Abfall enthaltenen Bleis dessen Inventar im Kraftwerk etwa um den Faktor zehn erhöht, wie Abb. 4 ausweist. Blei ist praktisch vollständig in den festen Reststoffen zu finden.

Bei der Satellitenfeuerung verbleiben knapp 70% des Bleis in der Rostasche der Abfallverbrennung. Die in das Abgas überge-

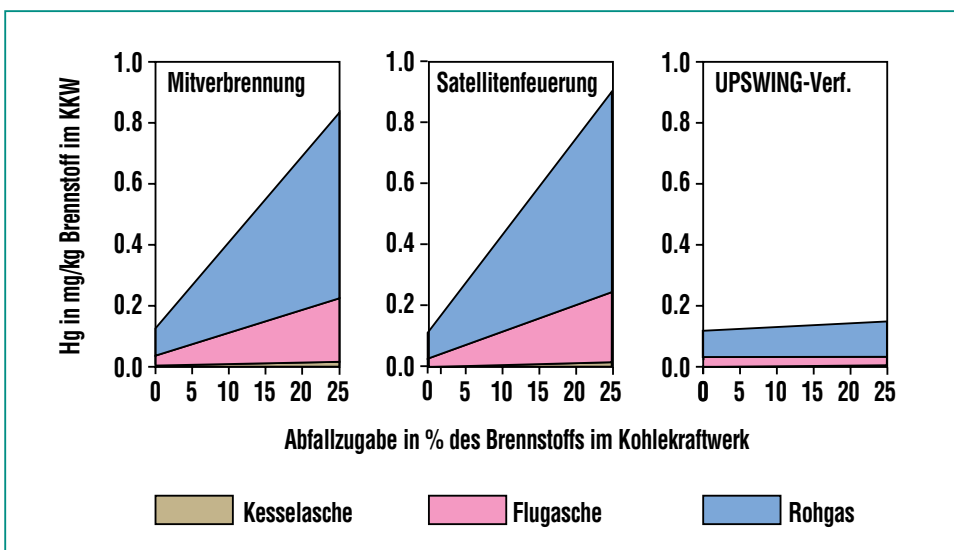


Abb. 3: Quecksilberinventar (Hg) im Kohlekraftwerk (KKW) und seine Verteilung auf Kessel- und Flugasche sowie Rohgas bei den verschiedenen Konzepten (maximale Abfallzugabe 25 % des Durchsatzes). Quecksilber ist bevorzugt gasförmig im Abgas zu finden.

treten und damit in das Kraftwerk gelangende Menge erhöht das Inventar dort immer noch um den Faktor 4. Erst im Falle des UPSWING-Verfahrens, bei dem die Flugstäube und also auch nahezu das gesamte Blei in einem Filter abgeschieden werden, wird der Bleigehalt im Kraftwerk nur noch unwesentlich verändert.

### Weitere Elemente

In der Abb. 5 sind für die in Tabelle 1 aufgeführten Elemente die Inventare im Kraftwerk zusammengestellt, die sich bei einer Mitbehandlung von 25% Abfall in den drei besprochenen Verfahrensvarianten einstellen. Für die oben nicht im Detail abgehandelten Elemente lassen sich daraus folgende Schlüsse ziehen:

- Schwefel und Arsen kommen in der Kohle üblicherweise in höheren Konzentrationen als im Abfall vor. Folglich muss bei der Mitverbrennung das Inventar im Kraftwerk sinken. Die beiden anderen Verfahren tragen den aus dem Abfall verflüchtigten Anteil in das Kraftwerk ein und führen somit zu einer geringen Erhöhung mit leichten Vorteilen auf Seiten des UPSWING-Verfahrens.
- Nickel ist ein Metall, das bei der Abfallverbrennung nahezu vollständig in der Rostasche verbleibt. Eine merkliche Erhöhung des Inventars ist im Kraftwerk nur bei der Mitverbrennung zu erwarten.
- Zink ist in seinem thermischen Verhalten dem Blei sehr ähnlich. Da hier der Konzentrationsunterschied zwischen Ab-

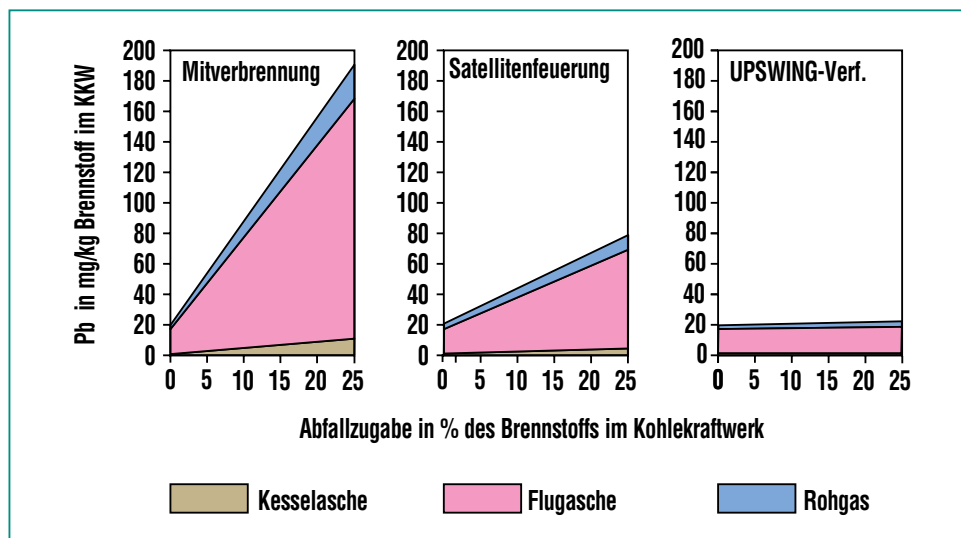


Abb. 4: Bleiinventar (Pb) im Kohlekraftwerk (KKW) und seine Verteilung auf Kessel- und Flugasche sowie Rohgas bei den verschiedenen Konzepten (maximale Abfallzugabe 25 % des Durchsatzes). Die Hauptmenge an Blei wird in die Flugasche transferiert.

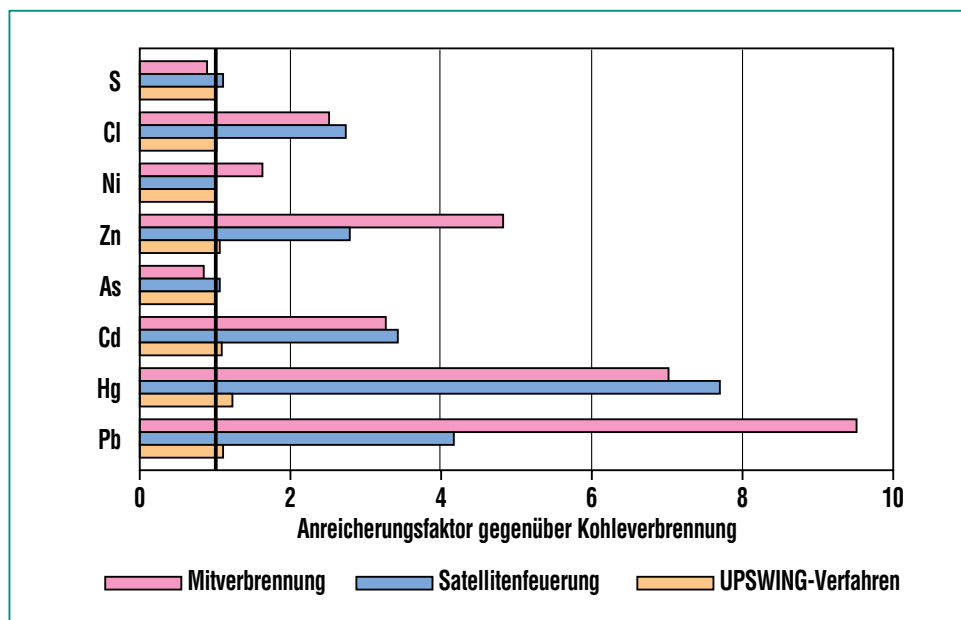


Abb. 5: Anreicherung ausgewählter Elemente im Kohlekraftwerk bei der Mitverbrennung, der Satellitenfeuerung und dem UPSWING-Verfahren (gerechnet für einen Abfallanteil am Gesamtbrennstoff von jeweils 25 %).

fall und Steinkohle geringer ist, fallen auch die bei der Mitverbrennung und der Satellitenfeuerung zu erwartenden Inventarerhöhungen im Kraft-

werk moderater als beim Blei aus. Beim UPSWING-Verfahren ist nur ein vernachlässigbarer Eintrag in das Kraftwerk zu erwarten.

### Zur Rolle der PCDD/F

Nach wie vor steht das Auftreten von PCDD/F bei thermischen Verfahren im Mittelpunkt des Interesses. In der Abfallverbrennung stellt die de-novo-Synthese im Bereich des Abhitzekessels den wesentlichen Bildungsweg für diese Verbindungen dar [15]. In modernen Abfallverbrennungsanlagen liegen die typischen Konzentrationen im Abgas hinter dem Abhitzekessel bei 0.1-1 ng/m<sup>3</sup>. Während die PCDD/F in alten Anlagen mit weniger gutem Ausbrand hauptsächlich im Flugstaub – und dort an Kohlenstoffpartikel gebunden – zu finden waren, liegen sie in heutigen Anlagen wegen der geringen Kohlenstoffgehalte in den Flugstäuben zum großen Teil in der Gasphase vor.

Folglich ist im UPSWING-Verfahren damit zu rechnen, dass ein erheblicher Anteil der PCDD/F-Fracht im Abgas der Abfallverbrennung in das Kohlekraftwerk übergeführt wird. Frühere Untersuchungen in einer Abfallverbrennungsanlage lassen erwarten, dass die in den Brennraum des Kraftwerks eingetragenen PCDD/F praktisch völlig zerstört werden [16]. Dieser Tatbestand muss aber noch in speziellen Versuchen überprüft werden.

Bei der Kohleverbrennung spielt die de-novo-Synthese keine Rolle und PCDD/F werden im Abgas nur in äußerst geringen Mengen gefunden. In wie weit dieses aber noch gilt, wenn das Chlorinventar wie bei der Mitverbrennung oder der Satellitenfeuerung kräftig erhöht wird, ist theoretisch nicht zu

beantworten. Entsprechende Experimente hierzu sind unerlässlich.

### Stickoxide

In modernen großtechnischen Abfallverbrennungsanlagen werden im Abgas Stickoxidkonzentrationen im Bereich 300-500 mg/m<sup>3</sup> gemessen. Sowohl bei der Satellitenfeuerung als auch im UPSWING-Verfahren gelangen diese Stickoxide in die Brennkammer des Kohlekraftwerks, wo sie in erheblichem Maße in der Reburn-Zone wieder zu Stickstoff reduziert werden können. Im Kohlekraftwerk treten auf Grund der hohen Verbrennungstemperaturen durch Oxidation des Luftstickstoffs NO<sub>x</sub>-Konzentrationen von deutlich über 1000 mg/m<sup>3</sup> auf. Das aus der Abfallverbrennung stammende NO<sub>x</sub> könnte also vernachlässigt werden, zumal inzwischen sowohl für Abfallverbrennungsanlagen als auch für Großkraftwerke ein identischer Stickoxid-Emissionsgrenzwert von 200 mg/m<sup>3</sup> (anzugeben als NO<sub>2</sub>) gilt und der üblicherweise im Kraftwerk vorhandene DENOX-Katalysator den geringen Mehreintrag aus der Abfallverbrennung sicher mit abbauen sollte. Es ist also gewährleistet, dass Stickoxide aus der Verbrennung des Abfalls in keinem Falle zu einer Emissionserhöhung im Kraftwerk führen.

### Zusammenfassung und Ausblick

Zur Minimierung der Kosten der thermischen Abfallbehandlung sind mehrere Verfahren vorgeschlagen worden, die diesen Pro-

zess mit anderen thermischen Verfahren kombinieren. Im Kontext dieses Berichtes wurden miteinander verglichen:

- die Mitverbrennung in einem Kohlekraftwerk,
- die Satellitenfeuerung, bei der heißes, ungereinigtes Abgas aus der Abfallverbrennung in den Brennraum eines Kohlekraftwerks eingebracht wird und
- das UPSWING-Verfahren, bei dem teilgereinigtes Abgas aus der Abfallverbrennung als Trägergas in den Kohlemöhlen oder als Primärluft in der Kohlestaubfeuerung genutzt wird.

Bei allen thermisch mobilisierbaren Elementen, deren Konzentration üblicherweise in Siedlungsabfällen erheblich höher ist als in Steinkohle, sind bei der Mitverbrennung und auch bei der Satellitenfeuerung erhebliche Erhöhungen der Inventare in den Stoffströmen des Kohlekraftwerks zu erwarten. Dabei muss im Falle des Chlors und des Quecksilbers dafür Sorge getragen werden, dass keine Emissionsprobleme auftreten. Falls im SO<sub>2</sub>-Wäscher Gips produziert werden soll, ist dessen Qualität auf entsprechende Kontaminationen zu überprüfen.

Die Konzentrationen der Schwermetalle Zink, Cadmium und Blei erhöhen sich im Falle der Mitverbrennung und der Satellitenfeuerung zum Teil erheblich. Auch hier ist sicher zu stellen, dass dadurch die Verwertbarkeit der Kessel-



und Flugaschen des Kraftwerks nicht gefährdet ist.

Das UPSWING-Verfahren garantiert durch die Entstaubung und die Entfernung von Quecksilber und Chlorwasserstoff einen vernachlässigbaren Eintrag aller flüchtigen Elemente mit Ausnahme des Schwefels in das Kraftwerk. Das aus dem Schwefel in der Abfallverbrennung entstehende SO<sub>2</sub> passiert den Brennraum des Kraftwerks und wird mit dem SO<sub>2</sub> aus der Kohle gemeinsam im SO<sub>2</sub>-Wäscher abgeschieden.

Organische Verbindungen wie PCDD/F im Abgas der Abfallverbrennung sollten bei den hohen Temperaturen der Kohleverbrennung vollständig zerstört werden. Der Nachweis einer solchen Zerstörung und die Klärung der Frage, ob bei der Mitverbrennung und bei der Satellitenfeuerung die

PCDD/F-Bildung vermieden werden kann, erfordern allerdings experimentelle Untersuchungen.

Die der Abfallverbrennung zuzuordnenden Stickoxide lassen sich in jedem der verglichenen Verfahren leicht auf die heute für die Abfallverbrennung gültigen Grenzwerte reduzieren.

Die Ökonomie der verglichenen Verfahren ist deutlich besser als die der klassischen Abfallverbrennung. Die vorgelegten Abschätzungen attestieren dem UPSWING-Verfahren aus dem Blickwinkel der Umweltauswirkungen heraus eine deutliche Überlegenheit gegenüber der Mitverbrennung und auch der Satellitenfeuerung. Der ökologische Vorteil sollte die Mehraufwendungen im Vergleich zu den beiden anderen Optionen mehr als wettmachen.

## Literatur

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (1990), 17. Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (Verordnung über Verbrennungsanlagen für Abfälle und ähnliche brennbare Stoffe – 17. BImSchV), Bundesgesetzblatt, Teil 1, 2 545, corr. 2 832
- [2] H. Vogg, H. Hunsinger, A. Merz, L. Stieglitz, J. Vehlou, (1991), VDI Berichte 895, 193
- [3] H. Vogg, J. Vehlou, (1993), *Interdisciplinary Science Reviews*, 18, 199
- [4] J. Vehlou, (1996), *UTA Technology and Environment*, 2/96, 144
- [5] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (1993), Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Siedlungsabfall), Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen vom 14. Mai 1993, Bundesanzeiger Jahrgang 45, Nr. 99a

- 
- 
- [6] LAGA (1994) Merkblatt  
*Entsorgung von Abfällen aus  
Verbrennungsanlagen für  
Siedlungsabfälle, verabschiedet  
durch die Länderarbeits-  
gemeinschaft Abfall (LAGA)  
am 1. März 1994*
- [7] H. Hölter,  
(1997), DE 196 17 034 C1  
(13.11.97)
- [8] H. Hunsinger, S. Kreisz,  
H. Seifert, J. Vehlow,  
(1998), DE-OS 19 723 145  
(10.12.1998)
- [9] Martin GmbH (2000),  
[http://www.martingmbh.de/  
englisch /e\\_index.htm](http://www.martingmbh.de/englisch/e_index.htm)
- [10] *International Ash Working  
Group (IAWG):*  
A.J. Chandler, T.T. Eighmy,  
J. Hartlén, O. Hjelmar,  
D.S. Kosson, S.E. Sawell,  
H.A. van der Sloot, J. Vehlow,  
(1997) *Municipal Solid Waste  
Incinerator Residues.*  
Amsterdam: Elsevier
- [11] H. Maier, P. Dahl, H. Gutberlet,  
A. Dieckmann,  
(1992), VGB Kraftwerkstechnik,  
72, 439
- [12] Th. Gerhardt, M. Rebmann,  
H. Spliethoff, K.R.G. Hein,  
(1996 ), VGB Kraftwerkstechnik,  
76, 403
- [13] C. Martel, O. Rentz,  
(1997), VGB Kraftwerkstechnik,  
78, 72
- [14] O. Rentz, H. Sasse, U. Karl,  
H.-J. Schleef, R. Dorn,  
(1998), *Forschungsbericht 204  
02 360, UBA-FB 98-001/2,*  
*Umweltbundesamt Berlin*
- [15] H. Vogg, L. Stieglitz,  
(1986), *Chemosphere*, 15, 1373
- [16] J. Vehlow, H. Braun,  
K. Horch, A. Merz, J. Schneider,  
L. Stieglitz, H. Vogg,  
(1990), *Waste Management &  
Research*, 8, 461