

Stoffströme und Rückstandsmengen in der Rauchgasreinigung von Abfallverbrennungsanlagen

M. Achternbosch, ITAS; U. Richers, ITC

Einleitung und Problemstellung

In der Bundesrepublik Deutschland wird, unabhängig von der aktuellen Diskussion um die Abfallwirtschaft, von Abfallverbrennungsanlagen ein wesentlicher Beitrag zur Entsorgung von Restmüll geleistet. An 57 Standorten werden Abfallverbrennungsanlagen betrieben, die jährlich ca. 13,5 Mio t Abfall entsorgen können. Darüber hinaus befinden sich mindestens 7 Anlagen in der Planung. [1]

In Zukunft müssen Altanlagen ersetzt und aufgrund aktueller rechtlicher Anforderungen, wie z.B. der „Technische Anleitung Siedlungsabfall“, neue Anlagen errichtet werden. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, aus welchen Verfahrens-

stufen die erforderliche Rauchgasreinigung aufgebaut sein soll. Die zum Teil sehr aufwendigen Rauchgasreinigungsanlagen an bestehenden Anlagen sind die Folge der immer weiter herabgesetzten Emissionsgrenzwerte in den letzten 15 Jahren oder ergeben sich aus der Forderung nach einer möglichst weitgehenden Unterschreitung der gesetzlich geforderten Grenzwerte.

Es fehlen Vergleiche, in denen die Verteilung der Schadstoffe in Abhängigkeit vom Aufbau der Rauchgasreinigung unter Berücksichtigung des Hilfschemikalienbedarfs, der erzeugten Rückstände und der Investitionskosten erfasst werden.

Anlagentechnik und Rauchgasreinigung

In der Bundesrepublik Deutschland werden, bis auf wenige Ausnahmen, zur thermischen Abfallbehandlung Rostfeuerungen eingesetzt. Abb. 1 zeigt schematisch den Aufbau einer solchen Anlage.

Der angelieferte Restmüll wird im Bunker (1) zwischengelagert. Mit dem Kran wird die Aufgabevorrichtung für die Zuführung der Abfälle in den Feuerraum (3) beschickt, wo die Abfälle auf dem Rost verbrennen. Die für die Verbrennung erforderliche Luft wird von unten durch Öffnungen im Rost (Primärluft) oder direkt in den Feuerraum (Sekundärluft) eingedüst. Der feste Verbrennungsrückstand, bezeichnet als

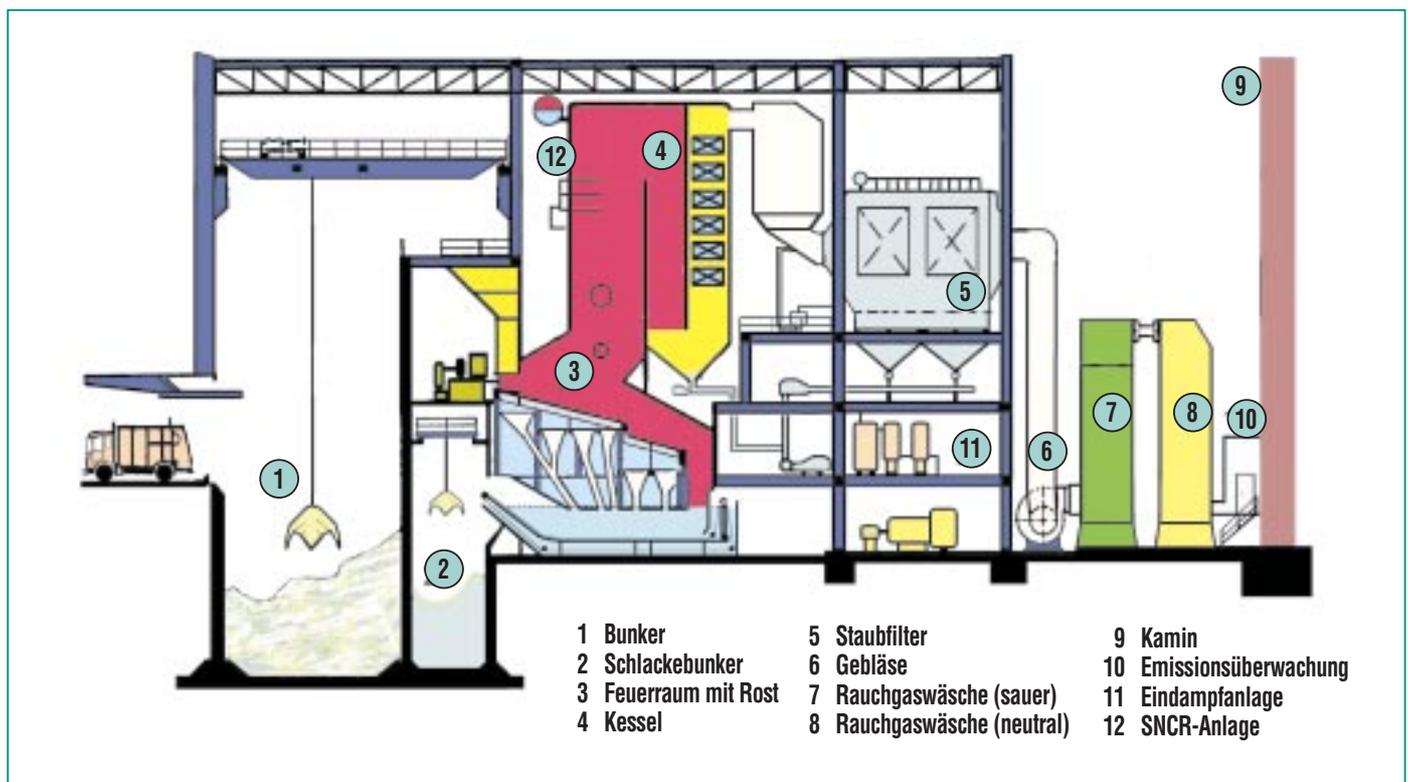


Abb. 1: Schematischer Aufbau einer Abfallverbrennungsanlage mit einfacher nasser Rauchgasreinigung.

Rostasche oder Schlacke, fällt am Rostende in ein Wasserbad und wird dem Schlackebunker (2) zugeführt.

Die heißen Rauchgase, die bei der Verbrennung entstehen, geben ihre Wärmeenergie an den Wasserdampfkreislauf des Kessels (4) ab, der oberhalb des Feuerraums angeordnet ist. Die Temperatur sinkt dabei von ca. 1000 °C auf Werte im Bereich um 200 °C ab. Die im Rauchgas enthaltenen Schadstoffe werden in der nachfolgenden Rauchgasreinigung abgetrennt. Die in Abb. 1 gezeigte Rauchgasreinigung stellt eine relativ einfache Variante von vielen Möglichkeiten dar. Sie ist aus einem Gewebefilter (5) und einem zweistufigen Wäschersystem (7, 8) aufgebaut. Das Gebläse (6) ist zum Ausgleich der Druckverluste erforderlich.

Der im Rauchgas enthaltene Staub wird mit einem Gewebefilter (5) aus dem Rauchgas abgetrennt. Organische Schadstoffe, einschließlich der polychlorierten Dioxine und Furane und Quecksilber, werden ebenfalls im Gewebefilter durch Adsorption an Koks abgetrennt, der vor dem Gewebefilter in den Rauchgaskanal eingeblasen wird. In der ersten Stufe des Wäschersystems wird mit einer sauren Absorptionlösung überwiegend HCl aus dem Rauchgas entfernt. In der zweiten Stufe wird eine neutrale Waschlösung zur Abscheidung von SO₂ verwendet. Zur Reduzierung der Stickoxidemissionen wird das selektive nicht katalytische Reduktionsverfahren (SNCR) eingesetzt (12). Die se-

parate Eindampfung (11) gewährleistet einen abwasserfreien Betrieb der Rauchgasreinigung.

Vorgehensweise und Bilanzraum

Für die Berechnung der Stoffströme wird von einer Modellanlage ausgegangen, denn in früheren Arbeiten wurden für zwei identische aufgebaute großtechnische Rauchgasreinigungsanlagen aufgrund unterschiedlicher Betriebsweisen differierende Stoffströme errechnet [2], [3]. Die erforderlichen Basisdaten wurden bei Betreibern und Herstellern erfragt oder der Literatur entnommen.

Der Bilanzraum umfasst die gesamte Rauchgasreinigungsanlage und berücksichtigt das Rauchgas, die erforderlichen Hilfschemikalien und die Rückstände der einzelnen Verfahrensstufen. Folglich beginnt der Bilanzraum am Kesselende und endet am Kamin. Im Rahmen dieser Arbeit werden Schwefel, Chlor und Cadmium in Form der chemischen Elemente betrachtet. Die Angaben in den dargestellten Sankey-Diagrammen werden auf 1 Tonne Abfall (t_A) bezogen. Nur auf diesem Weg können die unterschiedlichen chemischen Verbindungen, die im verfahrenstechnischen Rauchgasreinigungsprozess entstehen, berücksichtigt werden.

Im Rahmen der Bilanzen wurde für die nassen Rauchgasreinigungssysteme die derzeitige Rechtslage in der Bundesrepublik Deutschland berücksichtigt, die einen abwasserfreien Betrieb fordert. Die Stoffströme in den

Eindampfanlagen werden nicht explizit aufgeführt.

Die Berechnung der Kosten erwies sich aufgrund der vielen Einflussfaktoren als sehr schwierig und beschränkt sich aus diesen Gründen auf die Investitionskosten der einzelnen Anlagenteile ohne Mess- und Regeltechnik und weitere Kosten. Für die Kalkulation wurde von einer Anlage mit einer jährlichen Gesamtkapazität von 200.000 t ausgegangen, die aus zwei identischen Verbrennungslinien mit Rauchgasreinigung aufgebaut ist. Anlagen mit einer deutlich kleineren Gesamtkapazität würden zu hohe Entsorgungskosten verursachen.

Bilanzen für die Rauchgasreinigungsanlagen

Im folgenden werden drei Rauchgasreinigungsanlagen kurz beschrieben und die Stoffbilanzen vorgestellt. Die Modellanlagen A und B setzen zur Rauchgasreinigung Nassverfahren ein, wobei Anlage A einen relativ einfachen Aufbau ohne Feinreinigungsstufe hat und Anlage B dagegen aufwendig mit Berücksichtigung einer Feinreinigung konzipiert ist. Anlage C setzt ein konditioniertes Trockenverfahren mit sehr einfachem Aufbau ein.

Modellanlage A

Die Rauchgasreinigung der Modellanlage A entspricht in ihrem Aufbau der Anlage in Abb. 1. Im Rahmen der Berechnungen wird davon ausgegangen, dass das SNCR-Verfahren keinen Einfluss auf die Stoffströme hat. Für diese

Anlage zeigt Abb. 2 die Chlorbilanz. Die Bilanzierungen gehen einheitlich für alle Modellanlagen von 5890 g/t_A Chlor im staubhaltigen Rohgas aus.

Die in der Flugasche enthaltene Chlorfracht beträgt 720 g/t_A und wird im Gewebefilter abgetrennt. Die Hauptmenge der sich in der Gasphase befindlichen Chlorfracht wird mit 4587 g/t_A im HCl-Wäscher abgeschieden. Im SO₂-Wäscher werden nur 569 g/t_A Chlor aus dem Rauchgas entfernt. Eine Aufarbeitung der Abwässer aus den Wäschern erfolgt extern außerhalb des Bilanzraumes. Am Ende der Rauchgasreinigungsstrecke verlassen mit dem Reingas 14,1 g/t_A Chlor die Anlage.

Wie aus Abb. 3 ersichtlich ist, unterscheidet sich die **Schwefelverteilung** in der Anlage deutlich von der des Chlors.

Die Bilanz beginnt mit einer Schwefelfracht im staubhaltigen Rohgas nach Kessel von 1265 g/t_A Schwefel. Die im Filterstaub enthaltene Schwefelfracht wird auf 560 g/t_A berechnet. Mit 70 g/t_A Schwefel werden im folgenden HCl-Wäscher nur geringe Mengen abgeschieden, wogegen im SO₂-Wäscher 621 g/t_A Schwefel abgetrennt werden. Die Abwässer aus den Wäschern werden in einer externen Anlage aufgearbeitet. Mit dem Reingas gelangen 14,1 g/t_A Schwefel in die Atmosphäre.

Abb. 4 zeigt die Verteilung von Cadmium in der Rauchgasreinigungsanlage der Modellanlage A.

Das im Feinstaub angereicherte Cadmium wird im Gewebefilter

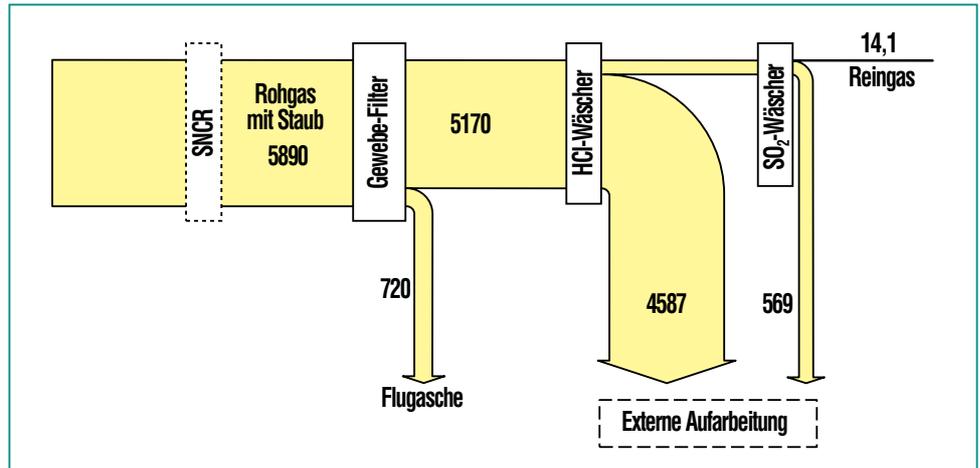


Abb. 2: Chlorbilanz der Modellanlage A; alle Angaben in g/t Abfall.

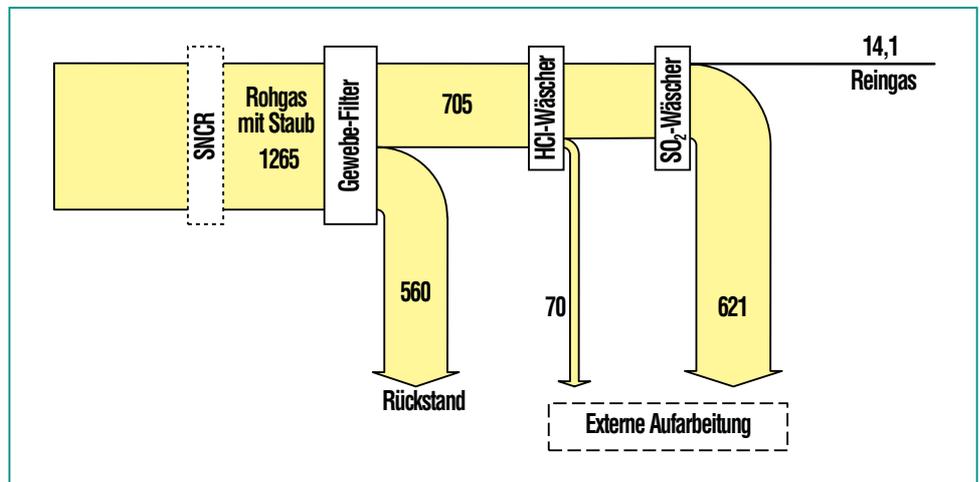


Abb. 3: Schwefelbilanz der Modellanlage A; alle Angaben in g/t Abfall.

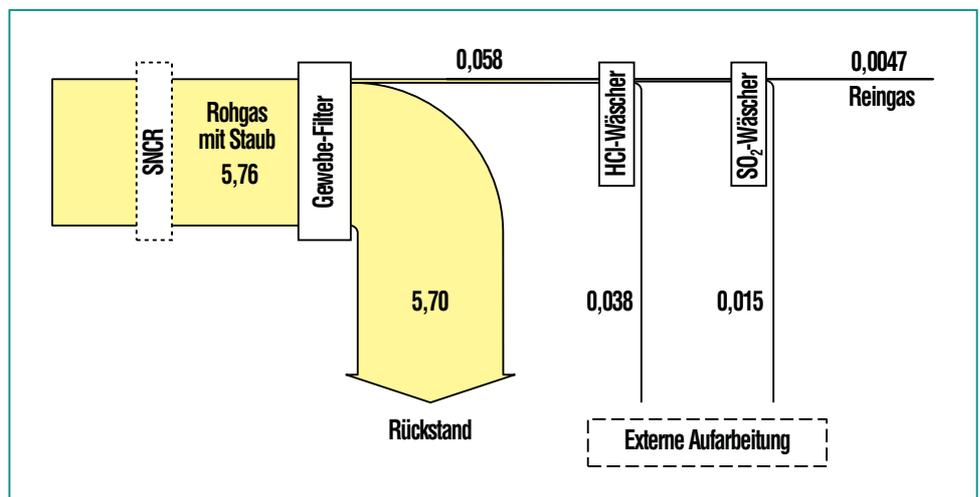


Abb. 4: Cadmiumbilanz der Modellanlage A; alle Angaben in g/t Abfall.

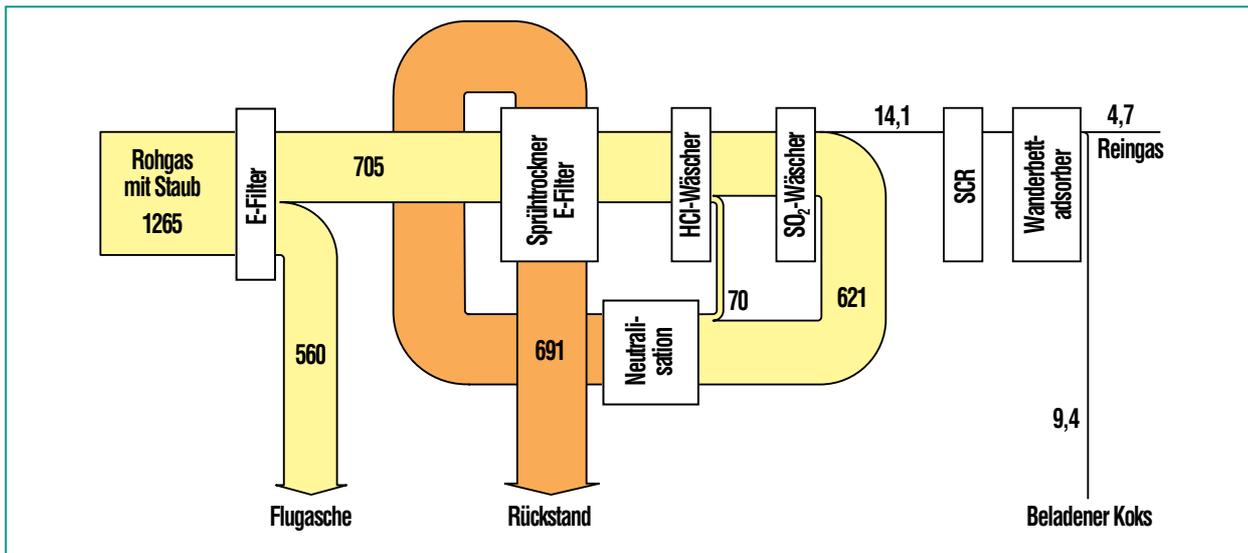


Abb. 7: Schwefelbilanz der Modellanlage B; alle Angaben in g/t Abfall.

scheidung während im SO₂-Wäscher nur 569 g/t_A aus der Gasphase entfernt werden. Die gesamten Abwässer aus den Wäschern und folglich der staubförmige Rauchgasreinigungsrückstand aus dem zweiten Elektrofilter enthalten 5156 g/t_A an Chlorid. Die im Rauchgas verbleibende Chlorfracht durchläuft unverändert den SCR-Katalysator. Der Wanderbettadsorber reduziert die Chlorfracht nochmals um die Hälfte, so dass das Reingas ca. 7 g/t_A Chlor enthält.

Die Verteilung von **Schwefel** in Anlage B ist in Abb. 7 dargestellt.

Von den 1265 g/t_A Schwefel im staubhaltigen Rohgas werden im Elektrofilter 560 g/t_A abgeschieden. Für Schwefel wird entsprechend zu Chlor im Elektrofilter die gleiche Abscheiderate wie für einen Gewebefilter angenommen. Der Sprühtrockner hat auf den Schwefelgehalt im Rauchgas keinen signifikanten Einfluss, und es werden im folgenden HCl-Wä-

scher aus dem staubfreien Rauchgas mit 70 g/t_A nur geringe Mengen an Schwefel abgeschieden. Die Hauptabscheidung erfolgt im SO₂-Wäscher, wo 621 g/t_A Schwefel von der Absorptionslösung aufgenommen werden. Der nachfolgende SCR-Katalysator hat keinen Einfluss

auf die Schwefelfracht. Die abschließende Feinreinigung senkt die Schwefelfracht auf ca. 4,7 g/t_A.

Die **Cadmiumbilanz** in Abb. 8 geht, wie in allen Modellanlagen, von 5,76 g/t_A als Cadmiumfracht im staubhaltigen Rohgas aus.

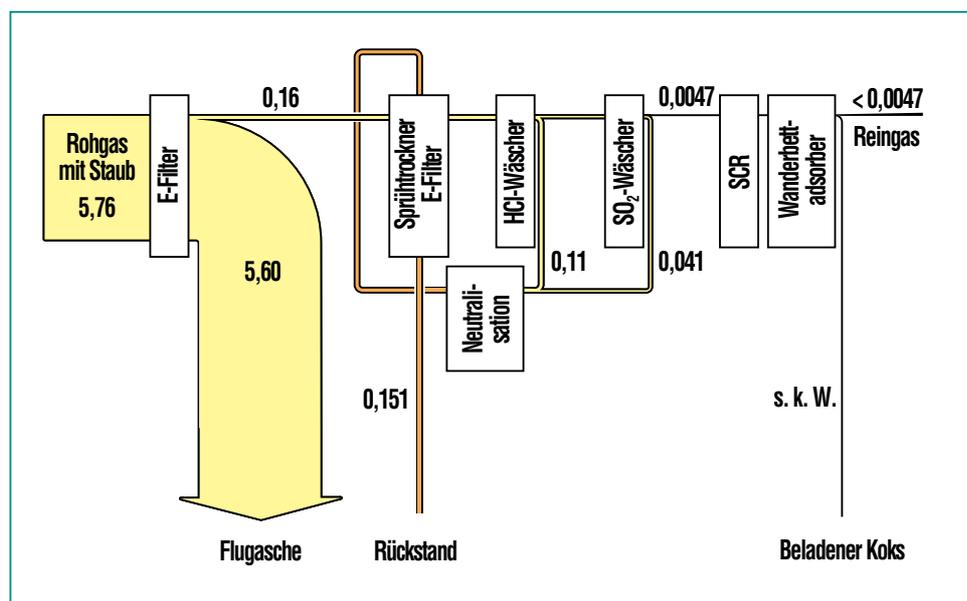


Abb. 8: Cadmiumbilanz der Modellanlage B; alle Angaben in g/t Abfall. (s.k.W.: sehr kleiner Wert).

Im Elektrofilter werden ca. 98% des gesamten Cadmiuminventars abgeschieden, entsprechend 5,6 g/t_A an Cadmium. Nur 0,16 g/t_A an Cadmium gelangen mit dem Rauchgas durch den Sprühtrockner zum HCl-Wäscher, in dem der größte Teil der verbliebenen Fracht abgeschieden wird. Der SO₂-Wäscher nimmt entsprechend den durchgeführten Berechnungen eben-

falls geringe Mengen an Cadmium auf, so dass das Rauchgas nach dem Wäschersystem nur sehr kleine Cadmiummengen (0,0047 g/t_A) enthält. Im abschließenden Wanderbettadsorber findet nochmals eine Abscheidung von Cadmium statt, die aber aufgrund der äußerst niedrigen Konzentrationswerte nicht mehr sinnvoll berechnet werden kann.

Modellanlage C

Das konditionierte Trockenverfahren zur Rauchgasreinigung unterscheidet sich, wie der Abb. 9 zu entnehmen ist, im Aufbau und den verwendeten Hilfschemikalien von den Rauchgasreinigungsanlagen der Anlagen A und B.

In der Rauchgasreinigung der Anlage C werden die Rauchgase nach Austritt aus dem Kessel zunächst durch Eindüsen von Wasser abgekühlt, um optimale Bedingungen für die Abscheidung der Schadstoffe zu erreichen. Zur Abscheidung der Schadstoffe wird dann ein Gemisch aus Calciumhydroxid und Koks staubförmig eingeblasen und im Gewebefilter abgeschieden. Zur Reduzierung der Stickoxide im Rauchgas wird an der Anlage C ein SNCR-Verfahren eingesetzt, das im Kessel installiert ist. In den Sankey-Diagrammen zur Anlage C ist aus Gründen der Vollständigkeit das SNCR-Verfahren eingezeichnet, das aber auf die Stoffströme keinen Einfluss hat.

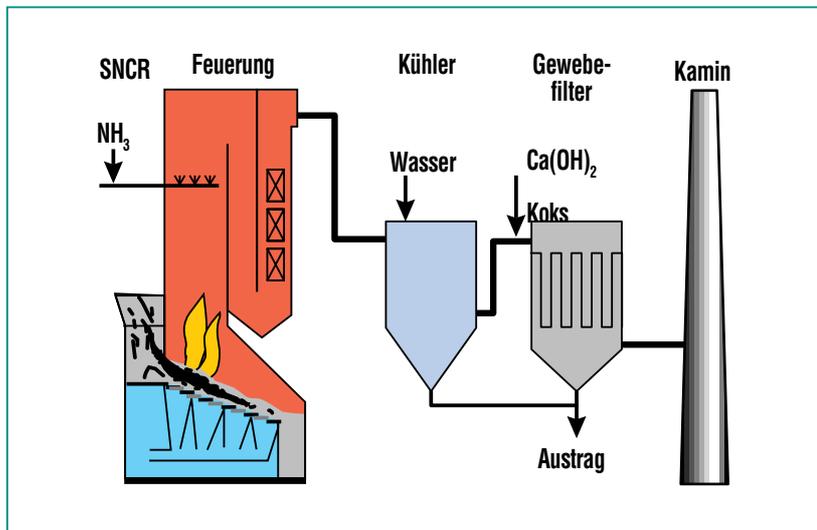


Abb. 9: Schematischer Aufbau der Modellanlage C mit einem konditionierten Trockenverfahren.

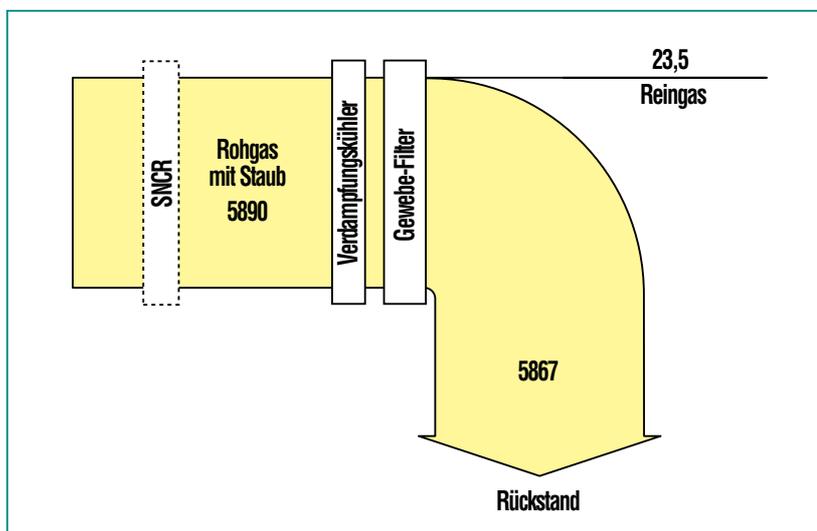


Abb. 10: Chlorbilanz der Modellanlage C; alle Angaben in g/t Abfall.

Wie in Abb. 10 dargestellt, geht auch die **Chlorbilanz** im Falle des konditionierten Trockenverfahrens von 5890 g/t_A an Chlor im staubhaltigen Rohgas nach Kessel aus.

Nach Eindüsung der festen Calciumverbindung wird Chlor überwiegend als Calciumchlorid bzw. als Bestandteil des Flugstaubs im Gewebefilter abgeschieden. Insgesamt sind 5867 g/t_A Chlor im Rückstand enthalten. Im Reingas verbleiben 23,5 g/t_A an Chlor.

Auch beim **Schwefel** ergibt sich, wie in Abb. 11 dargestellt, eine ähnliche Verteilung.

Von den im Rauchgas mit Staub am Kesselaustritt enthaltenen 1265 g/t_A Schwefel werden durch die Zugabe von Calciumhydroxid am nachfolgenden Gewebefilter 1242 g/t_A als Flugstaub bzw. in Form einer Calciumverbindung als Rauchgasreinigungsprodukt abgeschieden. Das Reingas verlässt die Anlage mit einer Schwefelfracht von $23,5 \text{ g/t}_A$.

Cadmium wird entsprechend der Abb. 11, wie im Fall der Anlagen A und B, als Filterstaubbestandteil fast vollständig im Gewebefilter abgetrennt.

Von den $5,76 \text{ g/t}_A$ im staubhaltigen Rohgas nach Kessel sind nach den Berechnungen im Reingas nach dem Gewebefilter mit $0,0047 \text{ g/t}_A$ nur noch sehr geringe Mengen an Cadmium vorhanden.

Vergleich der Rückstandsmengen

Die Rückstandsmengen aus der Rauchgasreinigung werden maßgebend durch die Neutralisation der sauren Schadstoffe HCl und SO_2 sowie durch die Flugstäube bestimmt. Die Berechnungen in dieser Studie gehen von Flugstaubmengen von 16 kg/t_A aus. Von geringerer Bedeutung ist der Einsatz von Koks. Als Neutralisationsmittel werden in dieser Studie für die Nassverfahren NaOH und Ca(OH)_2 und für das Trockenverfahren nur Ca(OH)_2 festgelegt.

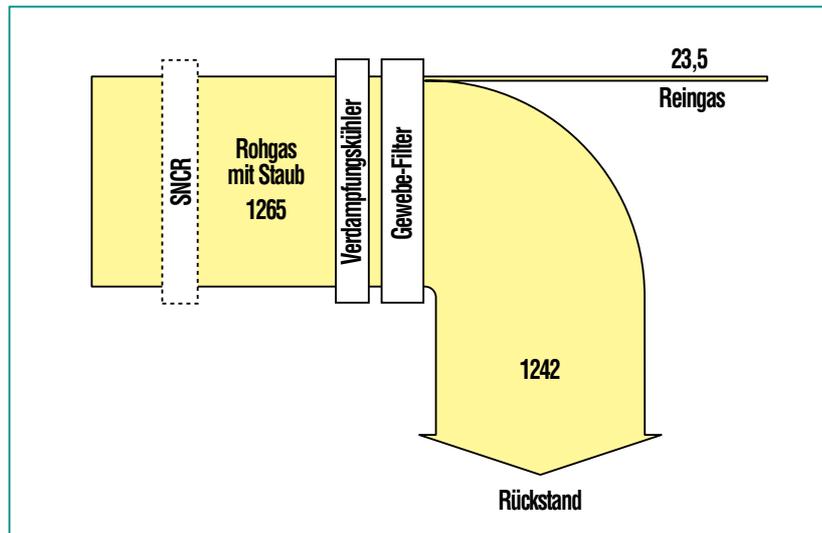


Abb. 11: Schwefelbilanz der Modellanlage C; alle Angaben in g/t Abfall.

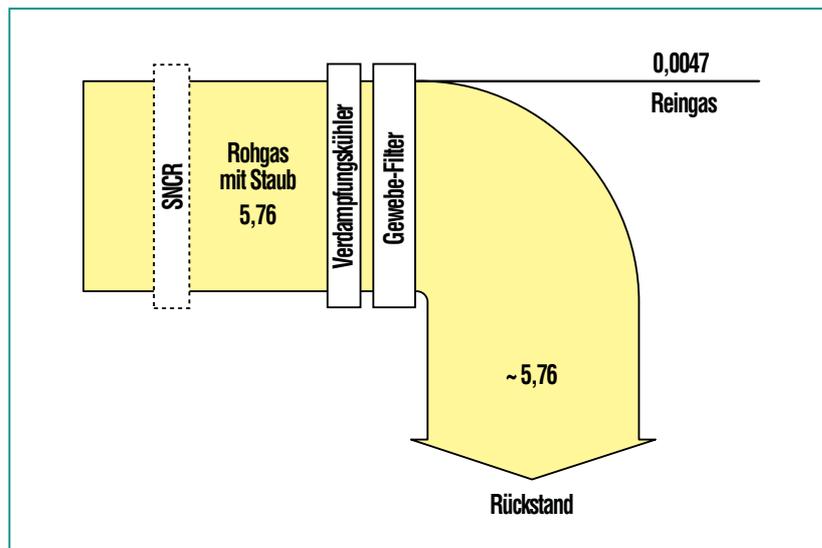


Abb. 12: Cadmiumbilanz der Modellanlage C; alle Angaben in g/t Abfall.

Die eingesetzte Menge an Neutralisationsmitteln ist vom verwendeten Verfahren zur Abscheidung der sauren Schadstoffe abhängig. Nass- und Trockenverfahren benötigen zur Abscheidung der Schadstoffe unterschiedliche stöchiometrische Verhältnisse bei der Zugabe von Neutralisationsmitteln. Das stö-

chiometrische Verhältnis ist definiert als das Verhältnis von Äquivalenten der zugeführten Neutralisationsmittel in die Rauchgasreinigung zu Äquivalenten der sauren Schadstoffe (HCl, HF, SO_2 , etc.) im Rauchgas. Mit dem stöchiometrischen Verhältnis steigen die Rückstandsmengen an. In der folgenden Tabelle 1

Rauchgasreinigung	stöchiom. Faktor zur Berechnung	Schwankungsbereich in der Literatur
nass	1,1	1,1 bis 1,4
quasitrocken	2,5	2,2 bis 3,0
(kond.) trocken	2,8	2,4 bis > 3

Tab. 1: Stöchiometrische Faktoren

sind die in der Literatur erwähnten und im Rahmen der Berechnung verwendeten Werte angegeben.

Durch spezielle Herstellungsverfahren kann die Aktivität der Calciumverbindungen verbessert werden, wodurch der spezifische Verbrauch gesenkt werden kann. Diese hochaktiven Neutralisationsmittel, deren Verwendung relativ hohe Kosten verursacht, werden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Die Berechnungen erfassen zusätzlich den Einsatz von Koks im Gewebefilter, und Wanderbettadsorber sowie von Fällungsmitteln zur Abtrennung von Schwermetallen aus den Absatzungen der Wäscher.

Für Anlage B liegt die Verdampfung der aus den Wäschern an-

fallenden Abwässer eigentlich außerhalb der Bilanzgrenzen. Um die gesamten anfallenden Rückstandsmengen der betrachteten Anlagen miteinander vergleichen zu können, werden die bei externer Verdampfung anfallenden Rückstandsmengen in erster Näherung den Rückstandsmengen bei interner Verdampfung im Sprühtrockner gleichgesetzt. Insgesamt fallen in den Modellanlagen die in Tabelle 2 angegebenen Rückstandsmengen an.

Wie der Tabelle 2 entnommen werden kann, sind die gesamten Rückstandsmengen für die beiden Nassverfahren mit ca. 30 kg/t_A gleich. Aufgrund des höheren stöchiometrischen Faktors gegenüber den Nassverfahren ergibt sich beim Trockenverfahren ein mehr als 40 % höherer Reststoffanfall.

Zusammenfassung

Die Bilanzen zeigen bei den Elementen Chlor und Schwefel zwischen den einzelnen Modellanlagen Unterschiede. Die Emissionen dieser Elemente sind im Fall der nassen Rauchgasreinigungsverfahren mit nachgeschalteter Feinreinigungsstufe am niedrigsten. Im Vergleich dazu liegen die Emissionen der konditioniert trockenen Rauchgasreinigungsanlagen auf einem höheren Niveau. Die Einhaltung der gesetzlichen Grenzwerte der 17. BImSchV ist in allen Anlagen sicher möglich.

Die erreichten Emissionswerte werden bei der trockenen Rauchgasreinigung durch Art und Menge des Hilfschemikalieneinsatzes beeinflusst. Dies bedeutet, dass im Fall der konditionierten trockenen Rauchgasreinigung durch eine weitere Anhebung des stöchiometrischen Faktors die Emissionen auf das Niveau von nassen Rauchgasreinigungssystemen abgesenkt werden können.

Eine sichere Differenzierung zwischen den verschiedenen Rauchgasreinigungsanlagen gelingt für die anderen bilanzierten Elemente (Schwermetalle) nicht. Die

Modellanlage	Rückstand aus Neutralisation [kg/t _A]	Flugstaubmenge [kg/t _A]	Kalk/Koks oder Koks [kg/t _A]	TMT-15 [kg/t _A]	Rückstand aus externer Verdampfung [kg/t _A]	Gesamt [kg/t _A]
Anlage A	12,6	16	1	0,019	–	29,7
Anlage B	extern	16	1	–	12,6	29,7
Anlage C	24,5	16	2,2	–	–	42,7

Tab. 2: Gesamte Rückstandsmengen in den Modellanlagen

Anlage	Aufbau der Rauchgasreinigung	[Mio DM/2 Linien]
Anlage A	SNCR / Gewebefilter / Wäschersystem inkl. Verdampfer	19
Anlage B	Elektrofilter / Sprühtrockner / Elektrofilter / Wäschersystem / SCR / Wanderbettadsorber	30
Anlage C	SNCR / Kühler / Gewebefilter	14

Tab. 3: Abgeschätzte Investitionskosten der Modellanlagen ohne Bauleistungen und Mess- und Regeltechnik.

Konzentrationen der betrachteten Metalle sind sehr klein, so dass eine Abhängigkeit von der Rauchgasreinigungsanlage nicht mehr festzustellen ist.

Der Bedarf an Hilfschemikalien und damit die Rückstandsmengen wurden auf der Basis festgelegter stöchiometrischer Faktoren berechnet. Diese Zusammenhänge wurden erstmals fundiert auf einem Weg ermittelt, der einen belastbaren Vergleich verschiedener Rauchgasreinigungsanlagen ermöglicht. Erwartungsgemäß ergaben die Berechnungen eine Abstufung. Die Trockenverfahren haben einen höheren Bedarf an Hilfschemikalien und erzeugen folglich höhere Rückstandsmengen.

Ein Vergleich der Investitionskosten in Tabelle 3 zeigt darüber hinaus, dass die nasse Rauchgasreinigung mit Feinreinigung sich durch hohe Investitionskosten auszeichnet. Für eine konditioniert trocken arbeitende Rauchgasreinigung liegen die Investitionskosten deutlich niedriger.

Den niedrigeren Investitionskosten bei Trockenverfahren stehen allerdings größere Rückstandsmengen gegenüber, deren Entsorgung mit höheren Kosten verbunden ist. Vor diesem Hintergrund erscheint die Modellanlage A mit einer einfachen nassen Rauchgasreinigung als interessante Alternative. Gegenüber konditionierten Trockenverfahren zur Rauchgasreinigung fallen bei

nur wenig höheren Investitionskosten deutlich geringe Rückstandsmengen an.

Literatur

- [1] M. Bart, B. Johnke, W. Butz, *Thermische, mechanisch-biologische Behandlungsanlagen und Deponien für Siedlungsabfälle in der Bundesrepublik Deutschland*, Umweltbundesamt, 2. Auflage (10/1999)
- [2] M. Achternbosch, U. Richers, *Müll und Abfall 30 (1998)* S. 246-253
- [3] M. Achternbosch, U. Richers, *FZKA 5874*, Forschungszentrum Karlsruhe (1997)