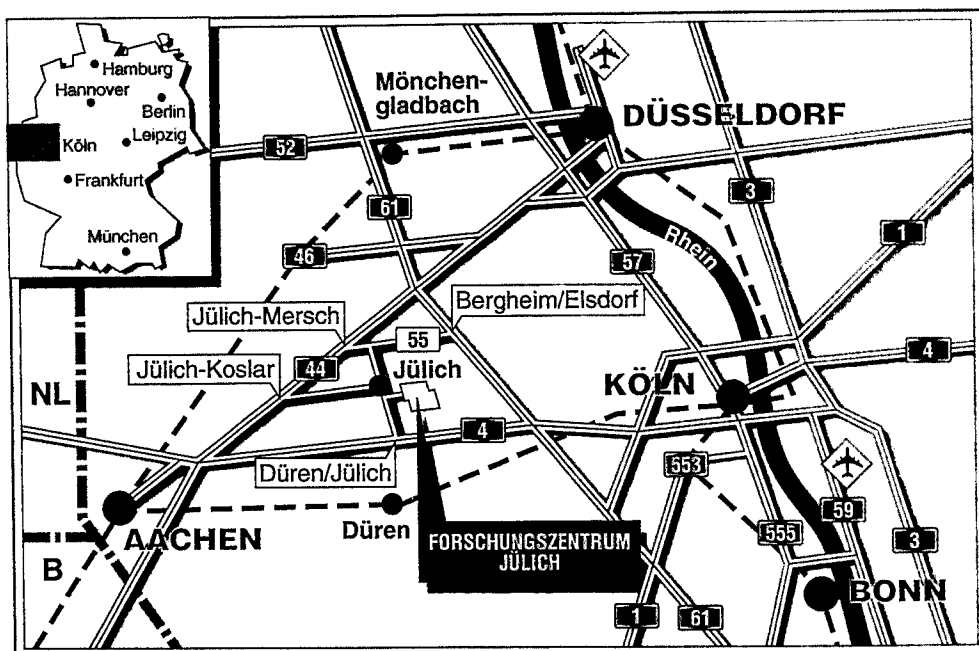


Institut für Chemische Technologie

Abfallverbrennung nach dem TAZAS-Verfahren

-Eine Übersicht-

H. Ringel



Berichte des Forschungszentrum Jülich ; 2536

ISSN 0366-0885

Institut für Chemische Technologie Jül-2536

Zu beziehen durch : Forschungszentrum Jülich GmbH · Zentralbibliothek

Postfach 1913 · D-5170 Jülich · Bundesrepublik Deutschland

Telefon: 0 24 61 / 61-61 02 · Telefax: 0 24 61 / 61-61 03 · Telex: 833 556-70 kfa d

Abfallverbrennung nach dem TAZAS-Verfahren

-Eine Übersicht-

H. Ringel

Abstract

A process for thermal waste treatment with the destruction or separation of hazardous components (TAZAS process - Verfahren zur thermischen Abfallbehandlung unter Zerstörung oder Abtrennung der Schadstoffe) is being developed at the Research Centre Jülich. This new process is characterized by the incineration of waste with concentrated oxygen at high temperatures, the production of a mineralized slag and the recycling of filter dust into the incinerator. Almost all the filter dust is fused into the slag thus dispensing with the need for a disposal of the filter dust. The heavy metals are leached from the dust by the off-gas condensate and may thus be recovered by wet chemistry methods.

For this process development pilot experiments have been carried out. The waste was incinerated at 1350°C with pure O₂ in a special swing furnace with a throughput of 10 kg/h. Although the system has not yet been optimized it already provided a high incineration quality (CO or C_nH_m content in the off-gas 30 ppm and 7 ppm respectively, residual carbon in the slag 20 ppm). The leach resistance of the slag is very high, comparable to that of natural basalt. Filter dusts polluted by heavy metals were also incinerated. The matrix elements of the dust were fused into the slag and at the same time the volatile heavy metals were forced into the fine dust. The accumulation of cadmium, for example, on the fine dust increased by a factor of 300 relative to the waste. This greatly improves the recovery of heavy metals by leaching the dust in the acid condensate.

Kurzfassung

Im Forschungszentrum Jülich wird ein Verfahren zur thermischen Abfallbehandlung unter Zerstörung oder Abtrennung der Schadstoffe (TAZAS-Verfahren) entwickelt. Kennzeichnend für dieses neue Verfahren ist die Verbrennung des Abfalls mit konzentriertem Sauerstoff bei hoher Temperatur, die Erzeugung einer mineralisierten Schlacke und die Rückführung des Filterstaubes in den Verbrennungsofen. Dabei wird nahezu der gesamte Filterstaub in die Schlacke eingeschmolzen, womit eine Deponierung des Filterstaubes entfällt. Die Schwermetalle werden durch das Abgaskondensat vom Staub abgelöst und auf diese Weise naßchemisch wiedergewonnen.

Für diese Verfahrensentwicklung wurden Pilotexperimente ausgeführt. Dabei erfolgte die Abfallverbrennung bei 1350°C mit reinem O₂ in einem besonderen Schwenkofen mit einem Durchsatz von 10 kg/h. Obwohl das System noch nicht optimiert ist, ergab sich bereits eine hohe Verbrennungsgüte (CO bzw. C_nH_m-Gehalt im Abgas 30 ppm bzw. 7 ppm, Restkohlenstoff der Schlacke 20 ppm). Die Auslaugfestigkeit der Schlacke ist sehr hoch, sie entspricht der von natürlichem Basalt. Schwermetallbelastete Filterstäube wurden im Ofen mitverbrannt. Dabei wurden die Matrixelemente des Staubes in der Schlacke eingeschmolzen und gleichzeitig die flüchtigen Schwermetalle in den Feinstaub gedrängt. Das Cadmium reicherte sich z. B. am Feinstaub um einen Faktor 300 bezogen auf den Abfall an. Die Schwermetallrückgewinnung durch Auslaugung des Staubes im sauren Kondensat verbessert sich damit wesentlich.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	5
2. Stand der Technik für die Abfallverbrennung	6
3. Zielsetzung für die Weiterentwicklung der Abfallverbrennung	8
4. <u>T</u>hermische <u>A</u>bfallbehandlung unter <u>Z</u>erstörung oder <u>A</u>btrennung der <u>S</u>chadstoffe (TAZAS-Verfahren)	10
5. Aufbau der Versuchsanlage	14
5.1 Gesamtanlage	14
5.2 Verbrennungsöfen	14
6. Versuchsergebnisse	18
6.1 Abgaszusammensetzung	20
6.2 Schlacke	22
6.3 Flugstaub	24
6.4 Verhalten der Schwermetalle im Kondensat	25
7. Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit	26
8. Schlußfolgerungen	28
Literatur	29

1. Einleitung

Abfälle sind ein besonderes Problem unserer Gesellschaft geworden. Allein in den alten Ländern der Bundesrepublik Deutschland fallen jährlich ca. 220 Mio. t Rückstände aller Art an. Aus dem ansteigenden Umweltbewußtsein der Bürger folgt der Druck diese Rückstände zunehmend sorgfältiger und damit aufwendiger zu entsorgen.

Für die Handhabung dieses Abfallproblems wurde 1986 das "Gesetz über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen (Abfallgesetz, AbfG)" vom deutschen Bundestag verabschiedet. Im Sinne eines Umweltschutzes stellt dieses Gesetz die Grundforderungen "Abfallvermeidung - Abfallverwertung - ordnungsgemäße Abfallentsorgung" auf; wobei die Bedeutung dieser Forderungen in der Reihe ihrer Aufzählung zu sehen ist. Das Ziel dieser ökologischen Abfallwirtschaftspolitik ist es deshalb,

1. die Reduzierung der Abfälle auf den Produktions- und Verbraucherebenen
2. die Steigerung der Abfall-Verwertungsraten
3. die Beseitigung der unvermeidbaren Abfälle auf hohem technischen Niveau

durchzusetzen.

Selbst bei konsequenter Anwendung dieser Regeln ließen sich nach verschiedenen Untersuchungen die im westlichen Deutschland gegenwärtig anfallenden 30 Mio. t Hausmüll jährlich nur um ein Drittel reduzieren /1/, /2/. Tatsächlich steigt trotz beachtlicher Erfolge bei der Vermeidung und Verwertung die zu beseitigende Abfallmenge jährlich um vier Prozent /3/.

Noch schwieriger stellt sich die Situation bei der Entsorgung der Sonderabfälle dar. Durch die Technische Anleitung (TA)-Sonderabfall (entsprechend dem Abfallgesetz) erhöht sich die Anzahl der als Sonderabfall klassifizierten Stoffe sprunghaft von 86 auf 389. Die Jahrestonnage wird dadurch allein im westlichen Deutschland von 5 Mio. t 1988 auf ca. 15 Mio. t in 1991 steigen. Von dieser Tonnage müssen entsprechend den Vorschriften der TA-Sonderabfall etwa 2 Mio. t durch Verbrennen entsorgt werden.

Unserer Umwelt zuliebe muß daher der Beseitigung dieser nicht vermiedenen sehr großen Abfallmenge nach wie vor besondere Beachtung gezollt werden. Dabei sind praktisch nur zwei Wege offen:

- mehr oder weniger direkte Deponierung
- Aufarbeitung der Abfälle durch z. B. Verbrennung gefolgt von Deponierung (oder Verwendung) der Reststoffe.

Die direkte Deponierung wird heutzutage noch am stärksten genutzt; nur 8 Mio. t der Haushaltsabfälle und 0,5 Mio. t der Sonderabfälle werden verbrannt. Dies ist ein Mißstand, da der Deponieraum immer knapper wird und vor allem weil dies eine Langzeitgefährdung von Boden und Grundwasser durch Schadstoffe bedeutet. Zukünftig sollen daher Abfälle zunächst so behandelt werden, daß nur noch Reststoffe zur Deponie gelangen, die nur unbedeutend gering auslaugbar sind. Für sehr viele Abfälle bietet sich eine Abfallbehandlung durch Verbrennung an. Dies gilt natürlich vor allem für brennbare Abfälle; in aller Regel können aber auch nicht brennbare Abfälle durch eine Hochtemperaturbehandlung weitgehend von ihren Schadstoffen befreit werden.

2. Stand der Technik für die Abfallverbrennung

Der Stand der Technik zur Abfallverbrennung wird durch die im Betrieb stehenden nahezu 50 Hausmüllverbrennungsanlagen /4/, dies sind in aller Regel Rostfeuerungen und durch etwa 30 Sonderabfallverbrennungsanlagen /5/, diese sind in der Regel mit Drehrohröfen ausgestattet, wiedergegeben.

Trotzdem kann die Entwicklung der Technologie zur thermischen Abfallentsorgung nicht als abgeschlossen angesehen werden. Neben der allgemeinen Weiterentwicklung der Verbrennungstechnologie liegt diese vor allem in den restlichen Schadstoffen begründet, die sich im gereinigten Abgas und in den übrigen Reststoffen wie Asche, Filterstaub und Schmutzwasser der Abgasreinigung befinden.

Dadurch sind Auswirkungen der Abfallverbrennung auf die Umwelt gegeben. Diese können in zwei Bereiche unterteilt werden: zum einen die Emission von Schadstoffen am Standort einer Verbrennungsanlage mit dem Abgas und evtl. Abwasser und zum anderen die Reststoffe aus der Verbrennung und Abgasreinigung, die irgendwo abgelagert werden müssen, wie Schlacke, Filterstaub, Salze, Schlämme etc.

Die örtlichen Emissionen sind häufig auf das Abgas beschränkt, das neben den eigentlichen Verbrennungsprodukten H_2O und CO_2 , restliche Schadstoffe wie z. B. Kohlenwasserstoffe, Feinstaub mit Schwermetallen und NO_x enthält. Auch wenn die derzeitigen

Emissionsgrenzwerte für solche Schadstoffe im Abgas bereits niedrig sind und eingehalten werden, so kann trotzdem in der Zukunft durch die Entwicklung der Technologie zur Abgasreinigung mit einer weiteren Reduzierung des Schadstoffausstoßes über diesen Emissionspfad gerechnet werden.

Prinzipiell schwieriger ist die Situation der Umweltbeeinträchtigung durch die anderen Reststoffe der Abfallverbrennung wie Schlacke, Filterstaub und Salze aus der Abgasreinigung. Diese werden z. B. im Falle der Sonderabfall-Verbrennungsanlage Biebesheim entweder auf eine Sondermülldeponie (Schlacke und Flugasche) oder sogar in die Untertagedeponie Herfa-Neurode (Feinstaub und Salze) verbracht. Grundsätzlich ist dies keine wirklich befriedigende Lösung, da hiermit langfristige Beeinträchtigungen der Umwelt nicht ausgeschlossen werden.

Für die moderne Biebesheimer Verbrennungsanlage zeigt die folgende Zusammenstellung eine Mengen- und Stoffbilanz für die Verbrennung von 1 t Sonderabfall. Die Anlage ist mit einer abwasserfreien Abgasreinigungsanlage ausgerüstet, d. h. der Emissionspfad "Abwasser" ist nicht gegeben. Die Werte sind Mittelwerte, die sich aus der Verbrennung von etwa 380 t Sonderabfall über eine Zeit von 68 h ergaben /6/:

Eingang: 1000 kg Sonderabfall (Lackschlämme, Altöl, Kunststoffe, etc.)
 14200 kg Luft (= 9200 m³ mit 11200 kg N₂, 2800 kg O₂, 200 kg H₂O)
 700 kg Wasser (Betriebsmittel wie Verdampfungsverluste aus Schlackenbad, Drehrohrkühlung etc.)
 100 kg Ca(OH)₂, NaOH (für Abgasreinigung)

Ausgang: 15800 kg gereinigtes Abgas
 (11200 kg N₂, 1500 kg O₂, 1900 kg H₂O, 1200 kg CO₂)
 130 kg Schlacke und Kesselstaub
 10 kg Staub
 60 kg Salze mit Feinstaub aus Abgasreinigung

U. a. bemerkenswert ist die sehr große Menge Luft (etwa 14 t), die für die Verbrennung gebraucht wird und die dann als Abgas aufwendig gereinigt werden muß. Für die basische Abgassprühwäsche, d. h. für Neutralisation der sauren Abgasbestandteile wie HCl und SO₂ werden etwa 100 kg Lauge z. B. Natronlauge verwendet; es entstehen etwa 60 kg Salze, die mit Feinstaub und Schwermetallen verunreinigt sind.

3. Zielsetzung für eine Weiterentwicklung der Abfallverbrennung

Unter dem Gesichtspunkt des Umweltschutzes bestehen für eine weitere Entwicklung der Verbrennungstechnologie die folgenden Zielvorstellungen:

1. vollkommene Zerstörung aller organischen Bestandteile
2. weitere Verbesserung der Abgasreinigung
3. Reduzierung oder gar Vermeidung eines Filterstaubes, der Schwermetalle und restliche Kohlenwasserstoffe enthält, entsprechendes gilt für die Reststoffe (Salze, Schlämme) aus einer quasi trockenen oder nassen Abgasreinigung
4. Herstellung einer Schlacke, die keine Schadstoffe enthält oder hinreichend auslaugfest ist. D. h., diese Schlacke soll bei der Ablagerung in einer natürlichen Umgebung nicht mehr Schadstoffe freisetzen können als in dieser Umgebung vorhanden sind. Dies soll Deponien vermeiden, die abgedichtet werden müssen und früher oder später eine Altlast darstellen.

Zu 1:

Die gesicherte Zerstörung der Kohlenwasserstoffe und organischer Gifte wie Dioxine ist durch eine hinreichend hohe Verweilzeit bei hinreichend hoher Temperatur dieser Substanzen im Verbrennungsofen gegeben. Ein Verbrennungssystem, das die üblicher Weise genannten Werte von 3 s bei 1200°C ohne Schwierigkeiten einhält oder etwas übersteigt, sollte die genannten Forderungen problemlos einhalten. Eine hohe Verbrennungsgüte entlastet die Abgasreinigung.

Zu 2:

Eine Verbesserung der Abgasreinigung wäre in jedem Fall möglich (wie z.B. in der Kerntechnik), sie ist im Prinzip nur bestimmt von einer Kosten/Nutzen-Abschätzung und abhängig von der allgemeinen Weiterentwicklung der Gasreinigungstechnologie. Nicht nur eine Verringerung der Schadstoffkonzentration im Abgas sondern natürlich auch eine Verringerung der Abgasmenge würde den Schadstoffausstoß reduzieren.

Zu 3:

Neben einer Verbesserung der Abgasreinigung sind jedoch auch die weiteren genannten Ziele von besonderer Bedeutung. Der Filterstaub sowie die Salze aus der Abgasreinigung enthalten als Schadstoffe die Halogene, restliche organische Verbindungen sowie die flüchtigen Schwermetalle aber auch als Hauptbestandteile die ungiftigen Schlackenbildner wie Si, Al, K, Ca, Na, Fe, Mg. Wenn diese Hauptbestandteile in die Schlacke selbst übergeleitet werden können, dann bliebe ein Filterstaub von unbedeutender Menge übrig, wobei die Schwermetallanteile evtl. abgetrennt und zurückgewonnen werden können.

Zu 4:

Langfristig gesehen, d. h. bei Lösung der oben genannten Probleme bleibt praktisch nur noch Asche bzw. Schlacke bei der Abfallverbrennung übrig. Diesem Reststoff ist dann die größte Bedeutung hinsichtlich des Umweltschutzes beizumessen, da er der eigentliche und unvermeidbare Reststoff aus jeder Abfallverbrennung ist.

Heutzutage verbrennen die meisten Verbrennungsanlagen den Abfall nur zu Asche. Systeme, die die Asche so weit erhitzen, daß flüssige Schlacke entsteht, sind relativ selten. Auch Drehrohröfen die schmelzflüssige Schlacke erzeugen könnten, werden häufig nur so gefahren, daß im wesentlichen nur Asche entsteht, um die Ofenausmauerung zu schonen. Man kann davon ausgehen, daß in der Regel die Ascheschmelztemperatur bei 1150°C bis 1200°C liegt. Um mit Sicherheit einen guten Schlackenfluß zu haben, muß die Brennkammertemperatur bei 1300°C bis 1350°C liegen.

Die einfachste Art, die flüssige Schlacke dem Ofen zu entnehmen, ist, die Schlacke direkt in ein Wasserbad zu tropfen. Dabei entsteht ein glasartiges Granulat, das einfach handhabbar ist und restliche Schwermetalle auslaugfest einbindet. Es wird auch versucht, dieses Granulat als Baustoff zu verwenden. Hierfür wäre es allerdings wesentlich günstiger - aber auch viel aufwendiger - die Schlacke nach der Ofenentnahme langsam auskühlen zu lassen. Dabei entsteht ein mineralisierter Reststoff, der praktisch dem Basalt gleicht, ein idealer Baustoff für verschiedene Verwendungen.

4. Thermische Abfallbehandlung unter Zerstörung oder Abtrennung der Schadstoffe (TAZAS-Verfahren)

Durch eine Reihe von z. T. wesentlichen Verfahrensänderungen in Bezug auf eine übliche Abfallverbrennung sollen mit dem TAZAS-Verfahren /7/ die im Abschnitt 3. genannten Ziele möglichst weitgehend erreicht werden. Diese Verfahrensänderungen bzw. typischen Merkmale für den TAZAS-Prozeß sind im einzelnen:

1. Verbrennung des Abfalls bei hoher Temperatur mit technisch reinem Sauerstoff anstatt mit Luft
2. Rückführung und Einschmelzen des Filterstaubes in die Schlacke unter Verdampfen der flüchtigen Schwermetalle
3. Abtrennung und damit Rückgewinnung eines Großteils der flüchtigen Schwermetalle
4. Konsequente Erzeugung von Schmelzschlacke.

Ein Hauptvorteil bei der Verwendung von Sauerstoff anstatt der Luft für die Abfallverbrennung ist in der drastischen Verringerung der Abgasmenge auf etwa 1/5 zu sehen. Die folgende Zusammenstellung zeigt eine mögliche Stoffbilanz für die Verbrennung von 1 t Sonderabfall mit hohem Kohlenwasserstoff-Anteil (Lackreste, Kunststoffe etc.) mit Sauerstoff. Für die Rechnung wurde vereinfachend angenommen, daß der Sauerstoff vollkommen ausgenutzt werden kann.

Eingang: 1000 kg Sonderabfall
1400 kg O₂
100 kg Hilfsstoffe wie Ca(OH)₂ etc. (für Abgasreinigung)
(nicht in der Bilanz erscheint das Betriebsmittel H₂O das aus Rückführung kommt)

Ausgang: 1200 kg Abgas (CO₂ mit Resten von O₂ und N₂)
1100 kg Wasser (Überschuß aus Verbrennung, Betriebsmittel H₂O wird rückgeführt)
138 kg Schlacke (mit rückgeführtem Staub und Schlamm)
62 kg Salze, Schwermetalle etc.

Demnach kann sich im Vergleich zur Verbrennung mit Luft bei einer Verbrennung von 1 t Abfall mit Sauerstoff die Abgasmenge (mit Verbrennungs- H_2O) von 15,8 t auf 2 bis 3 t verringern.

Im weiteren hat dieses Abgas dann eine prinzipiell andere Zusammensetzung. Es besteht nicht mehr als Hauptanteil aus dem praktisch nicht kondensierbaren N_2 , sondern im wesentlichen aus den beiden kondensierbaren Gasen H_2O und CO_2 . Aus diesem Abgasstoffsystm lassen sich daher die Schadstoffe durch rein physikalische Trennprozesse, wie Kondensation und Verdampfung, weitgehend abtrennen. Die mögliche Steigerung einer Staubabscheidung durch gezielte Kondensation des Wasserdampfes an den feinen Staubpartikeln, d. h. indem die Staubteilchen als Kondensationskeime verwendet werden, wurde in einer Arbeit von T. Grund /8/ untersucht.

Eine weitere prinzipielle Eigenschaft der Verwendung von Sauerstoff ist die - wegen der Vermeidung der großen N_2 -Menge - erhöhte adiabatische Verbrennungstemperatur. D. h. es kann zuverlässiger bzw. mit geringerem Aufwand eine hohe Brennkammertemperatur eingehalten werden. Daraus ergeben sich verschiedene Vorteile. Zum einen werden organische Verbindungen intensiv zerstört und zum anderen kann die Schlacke leichter flüssig gehalten und der rezyklierte Flugstaub zuverlässiger eingeschmolzen werden.

Das zweite wesentliche Merkmal des TAZAS-Verfahrens ist die Rückführung des Filterstaubes in den Verbrennungsprozeß unter Wiedergewinnung der flüchtigen Schwermetalle und damit die Vermeidung der Deponie von mit Schadstoffen belastetem Filterstaub. Grundlegender Gedanke hierfür ist die Beobachtung, daß sich die leicht flüchtigen Schwermetalle im Feinkorn des Flugstaubes besonders hoch anreichern.

So wurde bei Untersuchungen von W. Dannecker /9/ über die Elementgehalte von Elektrofilterstaub in Abhängigkeit von der Korngröße festgestellt, daß die Hauptbestandteile (Aluminium, Kalzium, Kohlenstoff, Eisen und Natrium) etwa gleichmäßig über das Korngrößenspektrum verteilt sind. Dagegen sind die Gehalte des Filterstaubes an Kupfer, Cadmium, Blei und Zink abhängig von der Korngröße des Staubes. An der Feinstaubfraktion ($< 100 \mu\text{m}$) kommt es zu starken Anhäufungen bzw. Anreicherungen dieser Schwermetalle mit einem Faktor von 3 bis 4. Diese Anreicherung ist darin begründet, daß die flüchtigen Schwermetalle bei der Verbrennung verdampfen, anschließend bei der Rauchgasabkühlung wieder kondensieren und dabei sich an Teilchen mit großer spezifischer Oberfläche, d. h. dem Feinstaub, bevorzugt niederschlagen /10/.

Im weiteren wurde von T.R. Keyser u. a. /11/ an Einzelpartikeln gemessen, daß die flüchtigen Schwermetalle z. T. extrem stark an der Partikeloberfläche auftreten und nicht im Partikelinnern. D. h. die Schwermetalle können verhältnismäßig leicht von dieser Oberfläche abgelöst werden. Die Verflüchtigung von verschiedenen Schwermetallen (wie Cd, Pb und Zn) aus Filterstaub bei hoher Temperatur und deren Abscheidung in einer Abgasstrecke unter verschiedenen Bedingungen wurde von U. Rachwalsky /12/ untersucht.

Dieses Verhalten der leicht flüchtigen Schwermetalle in Bezug auf die Verflüchtigung bei hoher Temperatur, ihre Anreicherung in der Feinstaubfraktion und der Anlagerung an der Kornoberfläche benützt das TAZAS-Verfahren zur verstärkten Abtrennung der Schwermetalle und deren Wiedergewinnung. Die Abbildung 1 zeigt ein Verfahrensfleißbild für diesen TAZAS-Prozeß.

Das Rohabgas aus der Verbrennung wird zunächst auf etwa 200°C abgekühlt und gleichzeitig der Grobstaub mit einer Korngrenze im Bereich 50 bis 100 μm aus dem Gas abgetrennt. Dieser schwermetallbelastete Grobstaub wird direkt in die Feuerung zurückgeführt. Dies bedeutet, daß die anhaftenden Schwermetalle wieder verdampfen und somit der Schwermetallgehalt im Rohabgas erhöht wird. Als Folge davon erhöht sich auch bei der Abgaskühlung der Schwermetallgehalt im Feinstaub. Mit diesem Feinstaub gelangen die flüchtigen Schwermetalle letztlich in die Abgasreinigungsstrecke. Hier kondensiert zunächst in einem Kondensator der H_2O -Anteil des Abgases. Kondensat und übrig gebliebenes Abgas fließen direkt in den Abgaswäscher, in dem mit dem sauren Kondensat der Feinstaub, restliche Schwermetалldämpfe und andere Schadstoffe aus dem Abgas ausgewaschen werden. Im sauren Kondensat wird gleichzeitig ein großer Teil der Schwermetalle gelöst. Vom Abgaswäscher gelangen die Trübe, d. h. das Kondensat mit dem ausgelaugten Feinstaub (Schlamm), in einen Filter und das restliche Abgas in die Abgasnachreinigung. In der Abgasnachreinigung wird das Abgas je nach Bedarf, z. B. in einer basischen Wäsche von restlichem HCl und vor allem von SO_2 und NO_x gereinigt. Das gereinigte Abgas besteht im wesentlichen aus CO_2 mit geringen Anteilen an N_2 und restlichem O_2 .

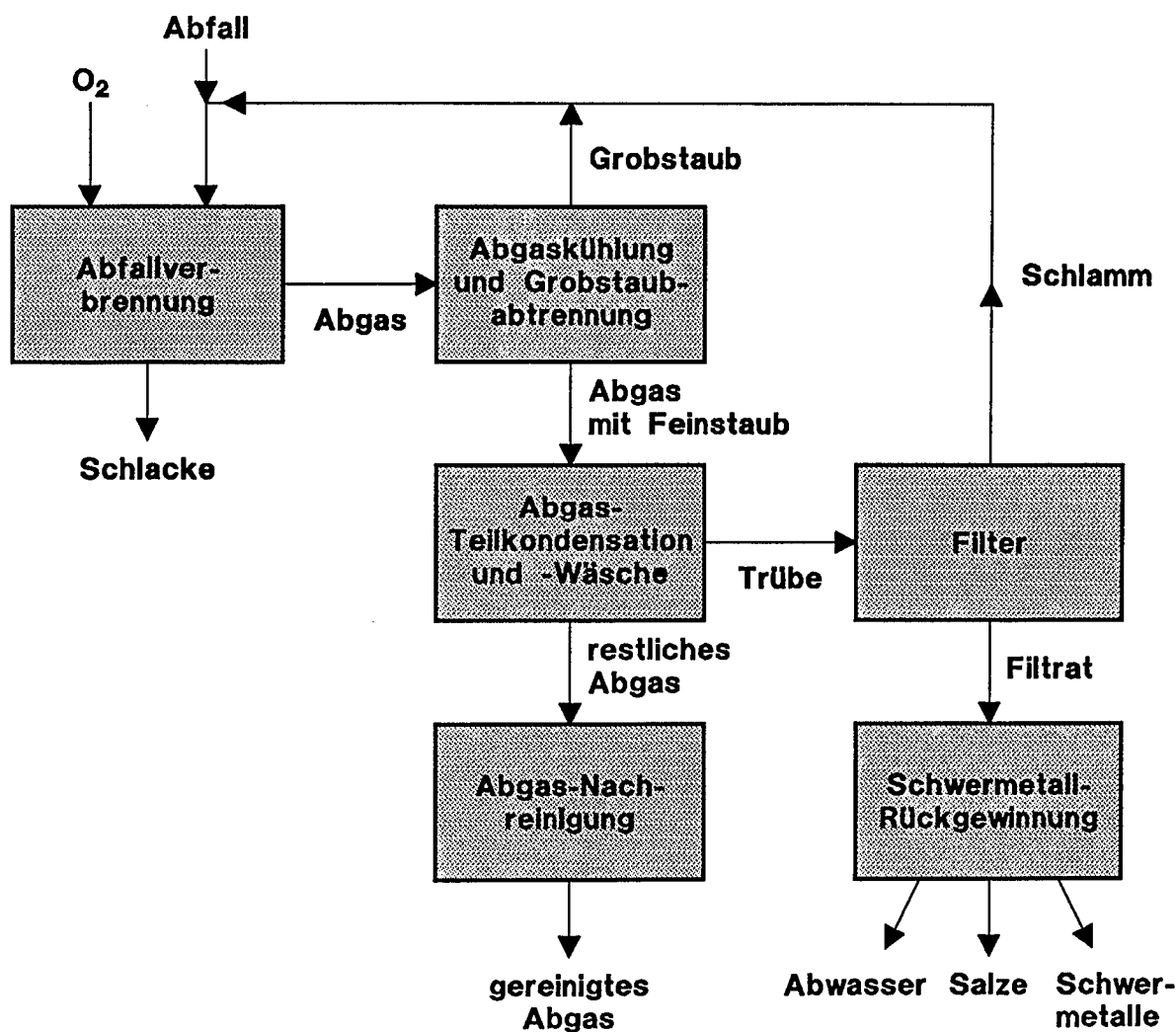


Abb. 1: Verfahrensfließbild für den TAZAS-Prozeß

Die Filtereinheit trennt die Trübe in Schlamm und Filtrat. Aus dem Filtrat müssen die gelösten Schwermetalle z. B. durch Fällung oder Ionenaustausch entfernt werden. Eine solche naßchemische Schwermetallgewinnung wird z. B. von Vogg u. a. /13/ untersucht. Der Schlamm aus der Filterung gelangt zusammen mit dem Grobstaub in die Verbrennungskammer. Evtl. ist es vorteilhaft, den Schlamm vorher in einer weiteren Extraktionsstufe gezielt von bestimmten schwerer löslichen Schwermetallen zu befreien.

Die wesentlichen Merkmale des TAZAS-Verfahrens wurden nun in einer ersten Versuchsserie von M. Herbermann /14/ experimentell untersucht, und zwar:

- Hochtemperatur-Verbrennung von festem Abfall mit reinem O_2
- Rückführung der Filterstäube in die Verbrennung unter Austreiben der Schwermetalle und Einbinden der inerten Filterstaubanteile in die Schlacke
- Untersuchung der Anreicherung der Schwermetalle an den Filterstäuben
- Auslaugung der Filterstäube zur Abtrennung der Schwermetalle
- Bestimmung der Auslaugfestigkeit der Schlacke.

5. Aufbau der Versuchsanlage

5.1 Gesamtanlage

Die Verfahrensuntersuchungen zum TAZAS-Prozeß wurden mit einer Technikumsanlage durchgeführt, deren Aufbau schematisch in der Abbildung 2 wiedergegeben ist. Die Abbildung 3 zeigt ein Bild der Anlage.

Verbrannt wurden die festen Abfälle in einem speziellen Ofen bei einer Brennkammertemperatur von 1350°C . Das Abgas wurde in einem an den Ofen angeflanschten Rohrbündel-Wärmetauscher auf etwa 200°C abgekühlt und in einem Filterkerzen-Staubfilter vom Staub gereinigt. Der Staubfilter konnte aber auch umgangen werden, so daß das staubbeladene Abgas direkt in einen Rohrbündel-Abgaskondensator strömte, in dem der H_2O -Anteil zusammen mit einem Teil der sauren Abgasbestandteile wie Cl, F und SO_2 bei 20°C kondensierte. Dieses saure Kondensat floß - zusammen mit dem restlichen Abgas - in einen Abgaswäscher und sammelte sich dort in einer Kondensatvorlage. Das Kondensat diente einerseits als Lösungsmittel für die Ablösung der Schwermetalle vom abgeschiedenen Filterstaub und andererseits als Waschflüssigkeit für den Abgaswäscher. Im Abgaswäscher wurde das restliche Abgas gereinigt, in dem es durch eine Venturidüse und eine zweistufige Sprühdüsenanordnung strömte. Ein Tropfenabscheider am Kopf des Wäschers sorgte für die Entfernung von Tropfen aus dem Abgas. Das gereinigte Abgas wurde über ein Saugzuggebläse dem Kamin zugeleitet.

5.2 Verbrennungsofen

Den Aufbau des speziellen Verbrennungsofens für die Verbrennungsexperimente zeigt Abbildung 4. Im Prinzip ist dieser sog. "Schwenkofen" ein abgewandelter Drehrohrföfen in dem feste Abfälle mit konzentriertem Sauerstoff bei hoher Temperatur verbrannt

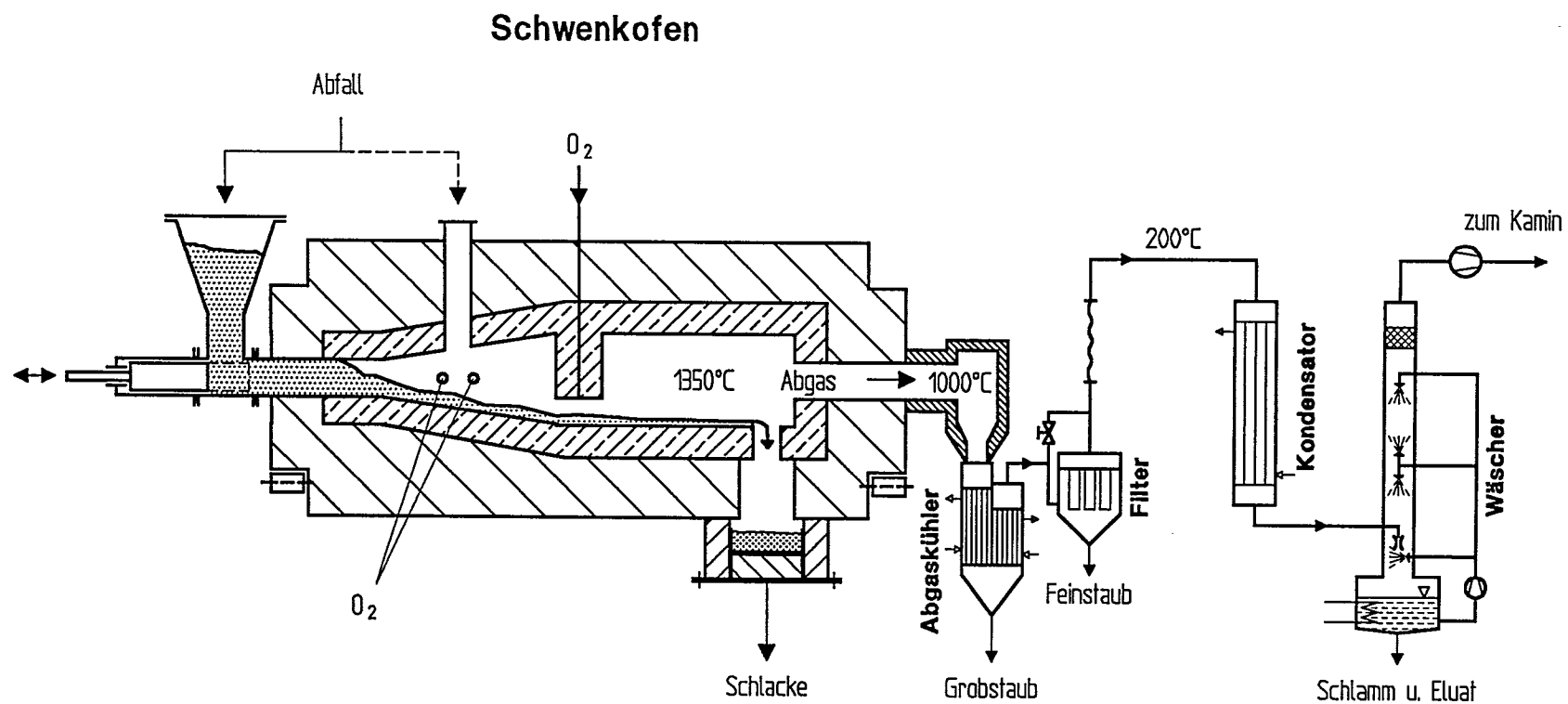


Abb. 2: Schematische Darstellung der Technikumsanlage für den TAZAS-Prozeß

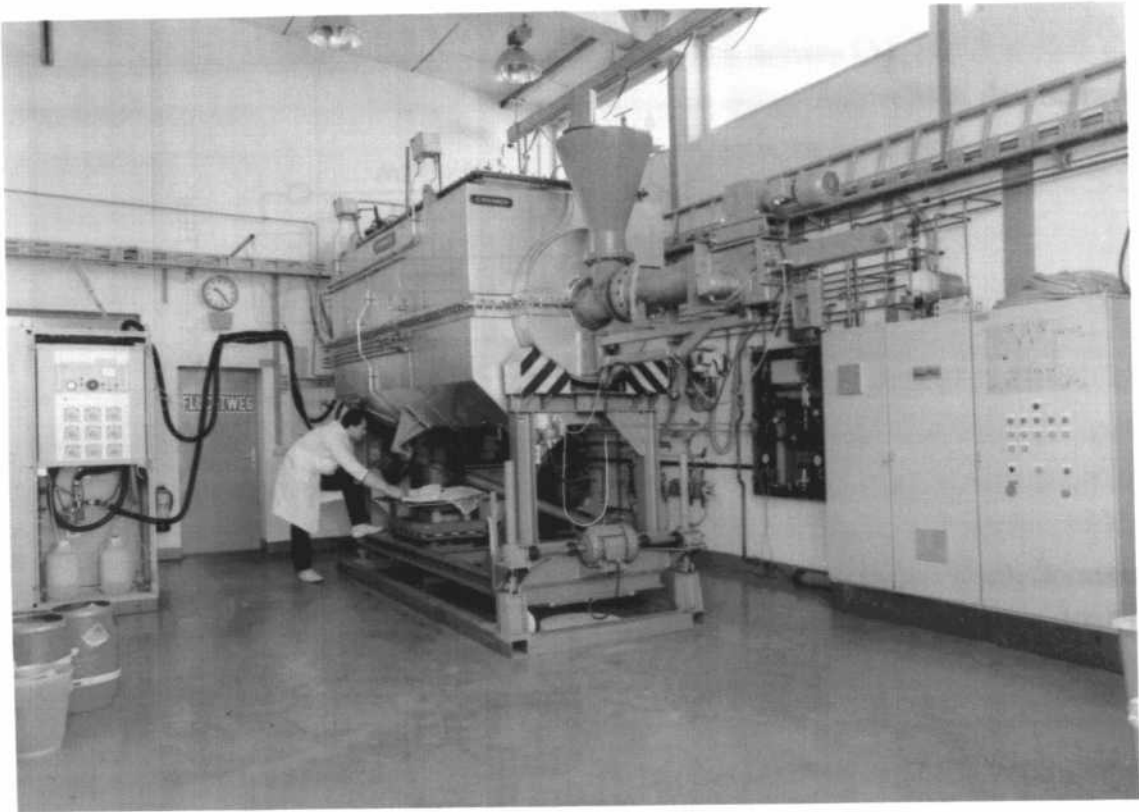


Abb. 3: Technikumsanlage mit Schwenkofen (mitte), Gasanalytik (links), O₂-Versorgung für Stützbrenner und Ofen (rechts). Die Abgasanlage befindet sich hinter dem Ofen.

werden können. Anstatt um eine horizontale Achse zu drehen, schwenkt dieser Schwenkofen lediglich um diese Achse mit einem Schwenkwinkel β von $\pm 23^\circ$. Diese Bauart vereinfachte wesentlich die möglichst luftdichte Anbringung der verschiedenen Zusatzsysteme an den Ofen wie Abfallaufgabe, Hilfsbrenner, Schlackenentnahme und Abgasauslaß.

Der Brennraum des Schwenkofens besteht im wesentlichen aus zwei feuerfest ausgemauerten Kammern von je 0,5 m Durchmesser und 1 m Länge. Beide Kammern sind hintereinander angeordnet und durch einen sog. "Mittelstein" voneinander getrennt. In die erste Kammer - die Hauptbrennkammer - wird der Abfall eingegeben und mit O₂, der über verschiedene Lanzen zudosiert wird, verbrannt. Abgase und Schlacke strömen durch eine Öffnung im Mittelstein von 18 x 15 cm in die zweite Kammer, die Nachbrennkammer. Durch Zugabe von Sekundär-O₂ im Mittelstein erfolgt in dieser Nachbrennkammer der vollständige Ausbrand von Abgas und Schlacke. Beide Kammern können mit je einem Stützbrenner, die mit O₂/Erdgas betrieben werden, aufgeheizt und in der Temperatur geregelt werden.

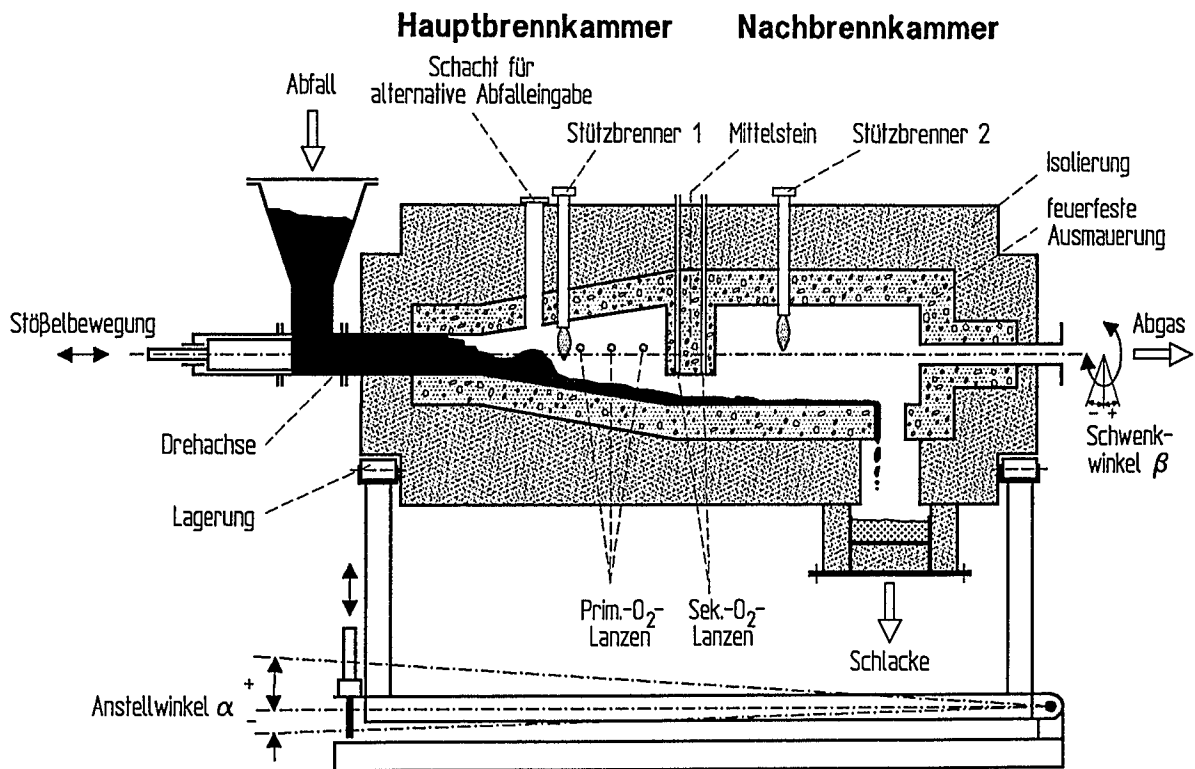


Abb. 4: Aufbau des Schwenko-fens für die Verbrennungsexperimente mit der Techni-kumsanlage

Einen Blick durch den leeren horizontalen Abfalleingabeschacht in die erste Brenn-kammer zeigt die Abbildung 5. Es ist die Flamme des ersten Stützbrenners zu sehen während der Kammeraufheizung ohne Abfallverbrennung.

Der Schlackenfluß im Ofen kann durch die Schwenkbewegung des Ofens und im weite-ren durch die Veränderung der Neigung der Ofenachse um den Neigungswinkel α von -1° bis $+5^\circ$ beeinflusst werden. Die Schlacke selbst fließt aus der Nachbrennkammer in einen Schlackentiegel aus Edelstahl und erstarrt dort. Dieser Tiegel mußte nach jedem Versuchslauf erneuert werden.

Die wesentlichen Auslegungsdaten für den Schwenko-fen sind im folgenden zusammen-gestellt:

- Thermische Leistung	50 kW
- Abfalldurchsatz	10 kg/h
- Abgasmenge	20 - 40 Nm ³ /h
- Stützbrennerleistung	14 kW
- Anzahl der Sauerstofflanzen	5

-	max. Primärsauerstoffmenge	9 m _N ³ /h
-	max. Sekundärsauerstoffmenge	5 m _N ³ /h
-	Verweilzeit der Gase im Ofen	ca. 5 sec
-	Volumen Hauptbrennkammer	96 l
-	Volumen Nachbrennkammer	196 l
-	Volumen Schlackentiegel	70 l

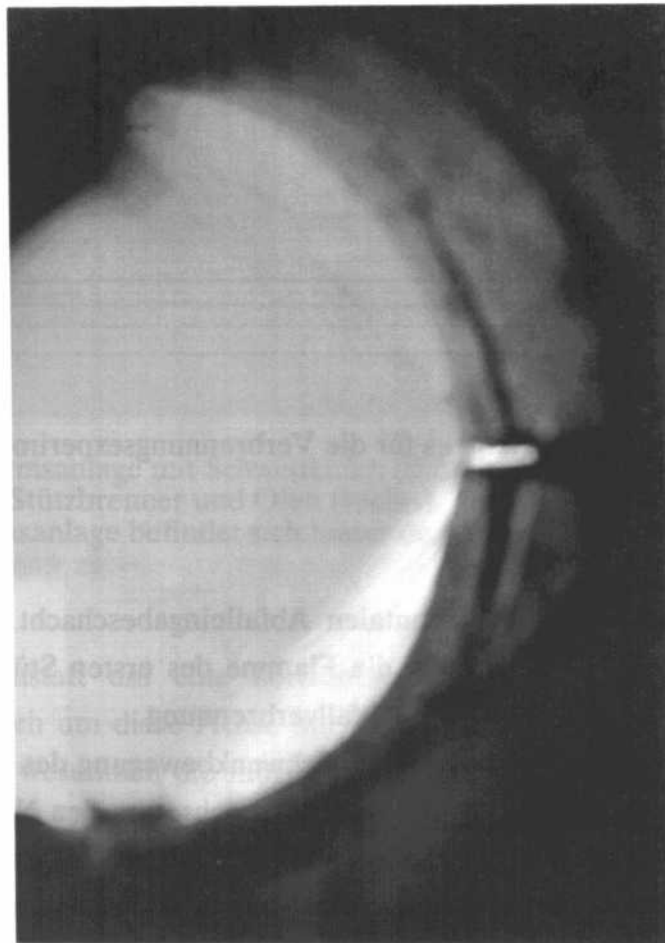


Abb. 5: Blick in die erste Brennkammer während der Kammeraufheizung durch den Stützbrenner

6. Versuchsergebnisse

Wegen genehmigungsrechtlicher Gründe war es bis jetzt nur möglich, ein Sonderabfall-simulat im Ofen zu verbrennen. Unter anderem wurden die folgenden Feststoffe einge-

geben: Kohle, Koks, Basalt, Klärschlamm sowie Filterstaub und Asche aus einer Hausmüllverbrennungsanlage. Dabei hat sich die Abfalleingabe mit dem Stößel (Abb.4) nicht bewährt, da der Abfall durch die Verbrennungshitze teilweise im Eingaberohr zusammenbackte und der Stößel öfters klemmte. Deshalb wurde in der Regel der Abfall durch den vertikalen Eingabeschacht in den Ofen geworfen. Dies konnte aber nur diskontinuierlich z. B. in einem Abstand von jeweils 15 min geschehen und da im weiteren keine automatische Regelung für die O_2 -Dosierung vorhanden war, traten entsprechende Schwankungen in der Abgaszusammensetzung auf. Es konnte aber trotz dieser Unzulänglichkeiten bereits eine gute Verbrennung von Feststoffen mit reinem O_2 experimentell demonstriert werden.

Die Abbildung 6 zeigt den Vorgang der Abfallverbrennung in der ersten Brennkammer. Der Abfall wurde durch den vertikalen Schacht eingeworfen. Man kann die nahezu flammenlose Oxidation des Abfalls mit O_2 erkennen.



Abb. 6: Blick durch den horizontalen Abfalleingabeschacht in die Hauptbrennkammer während der Abfallverbrennung

6.1 Abgaszusammensetzung

Die Abbildung 7 zeigt für eine Betriebsdauer von 2,5 h den Konzentrationsverlauf der Hauptkomponenten CO_2 und O_2 im Abgas des Schwenkofens. Die Spitzen im Kurvenverlauf entsprechen den Zeitpunkten, bei denen jeweils weitere Abfallchargen von ca. 2 kg in den Ofen eingegeben wurden. Durch den Einsatz verschiedener O_2 -Lanzen konnte der Restsauerstoffgehalt im Abgas zunehmend reduziert werden. Wenige Minuten nach einer neuen Abfallaufgabe waren Restsauerstoffgehalte von 1 - 2 Vol.-% möglich. Für die Verbrennung von z. B. Kohle mit einer Stückgröße von 3 cm stellt dies einen beachtlichen Wert dar, der selbst in modernen staubbefeuerten Kohlekraftwerken nicht erreicht wird.

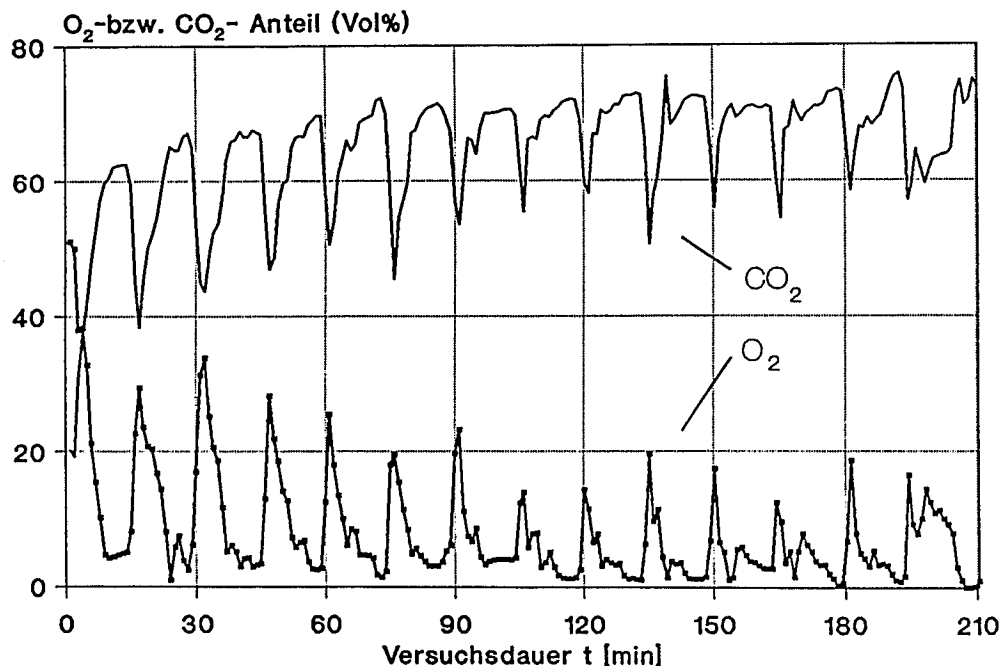


Abb. 7: Sauerstoff- und Kohlendioxidanteil im Ofenabgas

Für den gleichen Versuch zeigt die Abbildung 8 den Verlauf des H_2O -Anteils im Abgas. Entsprechend der Abnahme von H_2O - und O_2 im Abgas mit der Versuchsdauer stieg der CO_2 -Gehalt im Rauchgas kontinuierlich an und betrug am Ende des Versuchs etwa 75 Vol.-%. Für die verschiedenen Versuche lagen die Schwankungsbreiten für

- H_2O zwischen 5 und 60 Vol.-% und
- CO_2 zwischen 30 und 90 Vol.-%.

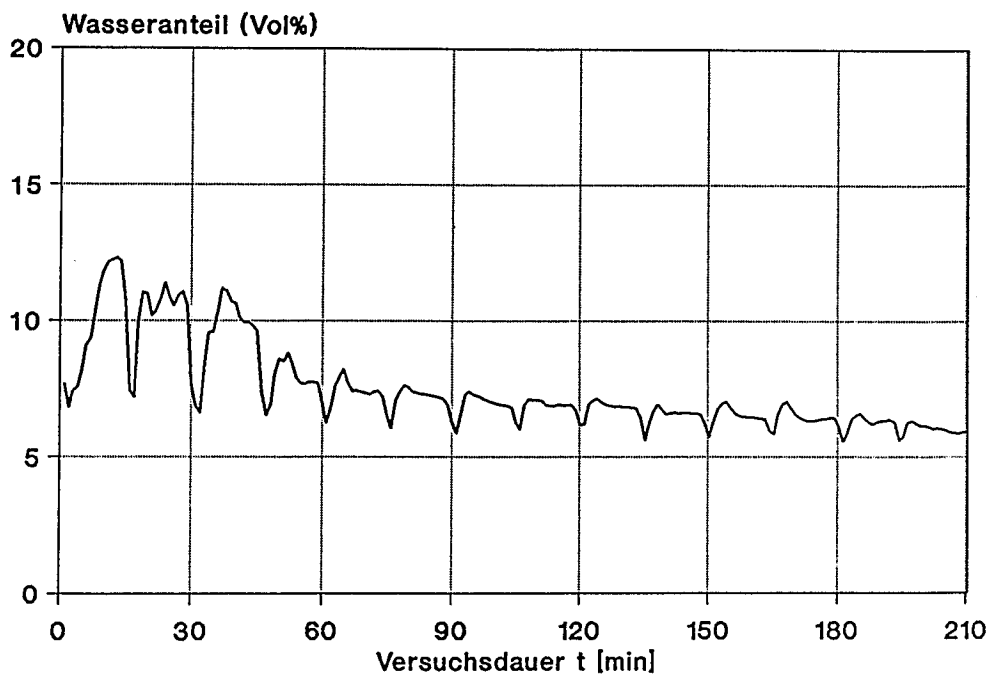


Abb. 8: Wassergehalt im Ofenabgas

In der Abbildung 9 ist für einen bestimmten Versuchsabschnitt der CO-Gehalt im Abgas zusammen mit dem zugehörigen Sauerstoffverhältnis für die Verbrennung (λ - Wert) wiedergegeben. Es zeigt sich, daß der CO-Gehalt ziemlich unabhängig vom λ -Wert recht stabil ist, der Mittelwert beträgt 30 ppm. Ein entsprechendes Verhalten zeigt die Restkonzentration der Kohlenwasserstoffe (C_nH_m) im Abgas; bei einer max. Bandbreite von 5 - 10 ppm C_nH_m ist der Mittelwert etwa 7 ppm.

Dagegen war der NO_x -Gehalt im Mittel nicht zufriedenstellend. Für das feuchte Rohabgas stellte sich ein typischer Wert von 2000 ppm ein. Es hat sich jedoch gezeigt, daß dieser sehr hohe Wert vor allem auf Falschlucht zurückzuführen ist, die bei dem normalen Unterdruckbetrieb von 2 bis 10 mbar in den Ofen gesaugt wurde. Wurde auf diesen Unterdruck kurzfristig verzichtet, so konnten auch minimale NO_x -Werte von 100 ppm erreicht werden.

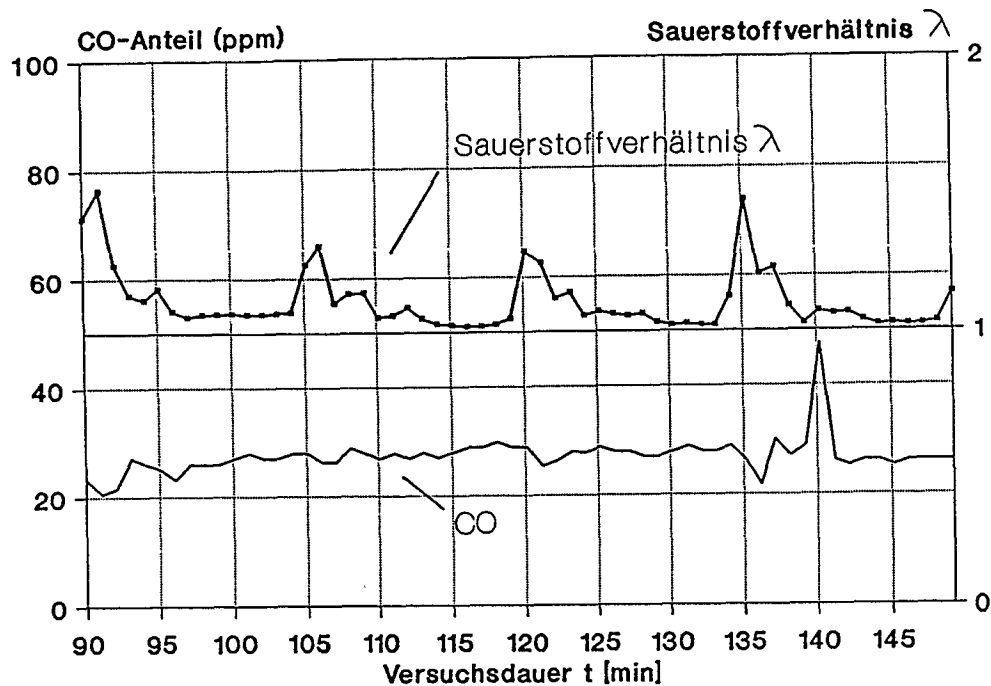


Abb. 9: CO-Gehalt im feuchten Ofenabgas und Sauerstoffverhältnis λ für die Verbrennung

6.2 Schlacke

Untersuchungen zum Aufenthalt der flüssigen Schlacke im Schwenkofen ergaben, daß die Verweilzeit im Bereich von 15 min bis zu 3 h liegt. Die mittlere Verweilzeit kann zu 1 - 2 h angenommen werden.

Einen Überblick für die Zusammensetzung der Schlacken aus den verschiedenen Versuchen mit unterschiedlichen Abfallarten gibt die Tabelle 1. Für die hohe Qualität der Verbrennung spricht insbesondere der für alle Versuche niedrige Restkohlenstoff in den verschiedenen Schlacken.

Die Auslaugfestigkeit der Schlacke wurde für die Elemente As, Cd, Cu, Pb, Ni, Zn, Cr und Al nach dem Schweizer Eluattest (SET) ermittelt. Wenn überhaupt meßbar, so lagen die SET-Werte für alle Elemente unter 0,2 mg/l. Im weiteren wurde die Auslaugfestigkeit der Schlacken mit der Auslaugfestigkeit von natürlichem Basalt verglichen; es ergab sich praktisch kein Unterschied. Der Einsatz der mineralisierten Schlacke als Verfüllmaterial oder als Baumaterial dürfte daher möglich sein. Schlackendeponien wären

damit vermeidbar. Die Abbildung 10 zeigt eine Probe dieser Schlacke, die im wesentlichen der einzige Reststoff bei einer Abfallverbrennung nach dem TAZAS-Prozeß ist.

Element	Gehalte in mg/kg
Zn	500 - 1200
Pb	160 - 530
Cu	600 - 3300
Cd	0 - 18
As	11 - 63
Si	12000 - 264000
S	370 - 1080
C	16 - 24

Tab. 1: Zusammensetzung der Schlacken für 16 verschiedene Versuche



Abb. 10: Gebrochene basaltartige Schlacke aus der Abfallverbrennung nach dem TAZAS-Prozeß (Maßstab 1:1)

6.3 Flugstaub

Zur Ermittlung der Staubkonzentration im Ofenabgas wurden Filterkerzen der Porengröße 10 μm verwendet, Filterkerzen von z. B. 5 μm -Porengröße verstopften zu schnell. Es ergaben sich Staubgehalte im Rohabgas von nahezu 0,1 mg/Nm³. Dieser extrem kleine Meßwert für den Staubgehalt scheint auf zwei Gründen zu beruhen. Zum einen wirkt die zweite Brennkammer, in der nur eine mittlere Gasgeschwindigkeit von 0,3 m/s herrscht, bereits als Absetzkammer für große Staubpartikel und zum anderen war die verwendete 10 μm -Filterkerze zu grob für den übrig gebliebenen Feinstaub. Dieser Sachverhalt sowie die Korngrößenverteilung des Staubes ist durch weitere Messungen zu untersuchen.

Den mittleren Elementgehalt des Staubes für einige Elemente zeigt die Tabelle 2. Im weiteren zeigt die Tabelle die Anreicherung verschiedener Schwermetalle im Staub bezogen auf die entsprechenden Schwermetallgehalte im Abfall. Für Cd erreichte diese Anreicherung z. B. einen Wert von 302, d. h. die Cd-Konzentration im Staub war im Faktor 302 höher als im Abfall. Im Vergleich hierzu ist der Cd-Anreicherungsfaktor für eine bestimmte kommerzielle Sonderabfallverbrennungsanlage z. B. nur 3. Die beabsichtigte starke Anreicherung der Schwermetalle auf den Feinstaub, um nach dem TAZAS-Verfahren deren Rückgewinnung zu verbessern, konnte demnach voll erreicht werden.

Der Restkohlenstoff des Staubes von 1,7 Gew.-% stellt einen guten Ausbrand dar und ist vergleichbar mit einer konventionellen Anlage.

Element	Anteil [mg/kg]	Anreicherungsfaktor Staub/Abfall
Cd	100	302
Pb	5330	166
As	1190	-
Zn	10300	36
Cu	1690	9
Ni	18200	91
Fe	216200	5
Al	39630	-
Si	110200	-
C	17000	-

Tab. 2: Massenanteile verschiedener Elemente im Staub sowie Anreicherungsfaktoren von Schwermetallen im Staub bezogen auf den Abfall

6.4 Verhalten der Schwermetalle im Kondensat

Nach dem TAZAS-Prozeß sollen die Schwermetalle von den Feinstäuben mit dem sauren Kondensat abgelöst, der übrigbleibende - möglichst schwermetallfreie - Schlamm aus dieser Extraktion in den Verbrennungsofen zurückgeführt und in die Schlacke eingeschmolzen werden. Versuche zu diesem Prozeßschritt wurden lediglich im Labormaßstab ausgeführt, um die Einflüsse der Betriebsschwankungen bei den Versuchen mit dem Schwenkofen auszuschließen.

Für die Lösungsversuche wurden Elektrofilterstäube aus verschiedenen Abfallverbrennungsanlagen verwendet. Die Lösebedingungen waren: pH-Wert = 1 für eine Zeit von 5 min und zwar bei 60°C und 5°C. Die Arbeitstemperatur 60°C sollte einen konventionellen Naßwäscher, die tiefere Temperatur von 5°C den in Frage kommenden Kondensationswäscher simulieren. Die Tabelle 3 zeigt für diese Lösebedingungen die jeweils in Lösung gegangene Schwermetallmenge in % (= Lösungsrate). Cd ging jeweils zu praktisch 100 % in Lösung, wohingegen Pb nur ungenügend vom Staub abgelöst werden konnte. Der Unterschied zwischen 60°C und 5°C war relativ unbedeutend.

Schwermetall	Lösungsrate (%) bei		Austrag (%) bei 1250°C
	60°C	5°C	
Cd	100	100	-
Cu	83	78	43
Zn	70	68	28
Ni	21	21	23
Fe	14	13	29
Pb	11	8	68

Tab. 3: Lösungsrate für verschiedene Schwermetalle bei pH = 1 sowie deren Austrag beim Einschmelzen der Lösungsrückstände

Die Schwermetallfreisetzung bei der Rückführung der ausgelaugten Stäube in den Verbrennungsofen wurde, entsprechend einer Versuchsanordnung nach /12/, ebenfalls nur im Labormaßstab untersucht. Dabei wurden die Staubproben bei einer Temperatur von 1250°C einer O₂-Atmosphäre ausgesetzt. Die gemessene Verflüchtigungsrate der

Schwermetalle ist ebenfalls in der Tabelle 3 aufgeführt. Vor allem das Blei, das schwer in Lösung ging, wird bei diesem Prozeß besonders stark verflüchtigt. Als Folge davon dürfte der Bleigehalt des Feinstaubes in der Abgasstrecke einer Verbrennungsanlage besonders stark ansteigen. Prinzipiell ergäbe sich dadurch bereits eine Möglichkeit, das Blei trotz geringer Lösungsrate in ausreichender Menge im Abgaskondensat in Lösung zu bringen. Unabhängig davon sollte aber untersucht werden, das Blei z. B. durch eine Änderung des pH-Wertes im Lösungsreaktor verstärkt zu lösen.

7. Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit

Häufig werden als Argument gegen die Verbrennung mit konzentriertem O₂ die hohen Kosten der Sauerstoffherstellung herangezogen. Der nachfolgende Vergleich der Investitions- und Betriebskosten beider Verbrennungsprozesse zeigt, daß die Verbrennung mit reinem O₂ neben ökologischen auch ökonomische Vorteile mit sich bringen kann.

Investitionskosten

Die Investitionskosten einer konventionellen Sondermüllverbrennungsanlage mit 60.000 t/a Jahresdurchsatzleistung lagen 1990 für eine komplette Anlage bei rund 350 Mio. DM. 60 % dieser Kosten werden zur Errichtung der gesamten Rauchgasreinigungsanlage aufgewendet. Die Entstickungsanlage ist mit etwa 10 % der Gesamtinvestition zu verbuchen.

Bei der Verwendung von O₂ kann das Bauvolumen bei gleicher Durchsatzleistung bis auf ein Fünftel reduziert werden. Da die Investitionskosten nicht in gleichem Maße sinken wie die Baugröße, wird lediglich ein Rückgang des Investitionsvolumens um 50 % angenommen.

Legt man ein Sauerstoffverhältnis von $\lambda = 1,5$ zugrunde, so ergibt sich für einen Jahresdurchsatz von 60.000 t/a ein Sauerstoffbedarf von 135.000 t/a. In dieser Größenordnung ist derzeit die Herstellung des Sauerstoffs in kryogenen Anlagen wirtschaftlich am interessantesten. Die Investitionskosten einer solchen Anlage für eine Sauerstoffproduktion vor Ort mit der geforderten Jahreskapazität liegen derzeit bei rund 35 Mio. DM. Es wird angenommen, daß bei einer Verbrennung mit O₂ die Entstickungsanlage entfallen kann.

Eine Gegenüberstellung der Investitionskosten für beide Prozeßvarianten zeigt Tabelle 4. Der Neubau einer Sondermüllverbrennungsanlage mit reinem, technischen Sauerstoff

läßt mit 160 Mio.DM nahezu eine Halbierung der Investitionskosten im Vergleich zu konventionellen Verbrennungsanlagen erwarten.

Anlage	Verbrennung mit O ₂	Verbrennung mit Luft
Feuerungsteil	70	140
Rauchgasreinigung: nur Entstickung	-	35
restliche Anlage	90	175
Sauerstoffanlage	35	-
Summe	193	350

Tab. 4: Gegenüberstellung der Investitionskosten für Verbrennung mit O₂ bzw. mit Luft in Mio.DM

Betriebskosten

Die jährlichen Betriebskosten beider Müllverbrennungsanlagen sind etwa gleich hoch anzusetzen. Es entstehen jedoch zusätzliche Betriebskosten bei der Sauerstoffproduktion. Die Betriebskosten - vor allem Stromkosten - zur Erzeugung eines Normkubikmeters Sauerstoff in einer kryogenen Anlage kann mit 0,15 DM/Nm³ angesetzt werden. Es ergeben sich damit jährlich 15 Mio.DM Betriebskosten zur Herstellung des Sauerstoffs.

Kostenvergleich

Der Unterschied in den Investitionskosten beträgt 157 Mio.DM. Eine Sondermüllverbrennungsanlage, die konzentrierten Sauerstoff zur Verbrennung nutzt, kann daher trotz höherer Betriebskosten etwa 11 Jahre betrieben werden, bis eine Gesamtkostenäquivalenz eintritt. Dies entspricht etwa der Hälfte der normalen Nutzungsdauer einer Sondermüllverbrennungsanlage.

Dieser Kostenausgleich nach 11 Jahren verschiebt sich weiter zu längeren Zeiträumen, wenn man berücksichtigt, daß folgende Aktivposten für das TAZAS-Verfahren mit O₂-Einsatz im Kostenvergleich bisher nicht berücksichtigt wurden:

- es können auch niedrigkalorische Abfälle verbrannt werden oder es kann Brennstoff für die Stützbrenner eingespart werden

- höhere Dampfgutschriften aufgrund besserer Wirkungsgrade, da der Abgaswärmeverlust geringer ist
- Verkauf von Argon und Stickstoff aus der Luftzerlegung sowie evtl. der zurückgewonnenen Schwermetalle
- Wegfall der Deponiekosten für Filterstaub
- Sauerstoffüberschuß für die Verbrennung ist evtl. kleiner als angenommen
- Nutzung des Rauchgas-Kohlendioxids als Quelle zur CO₂-Gewinnung für eine CO₂-Vermarktung. Die derzeit diskutierte Klimaschutzsteuer für CO₂ würde dann nicht mehr anfallen.
- betriebswirtschaftlich nicht zu quantifizierender Schutz der Umwelt und der Ressourcen

8. Schlußfolgerungen

Die Pilotexperimente zum TAZAS-Verfahren zeigten die gute Durchführbarkeit einer Verbrennung von festen Abfällen mit konzentriertem Sauerstoff und die Vorteile für einen verbesserten Umweltschutz, die sich mit dem neuen Verfahren ergeben.

Die organischen Schadstoffe im Abfall können demnach unter Vermeidung des sonst üblichen hohen Stickstoffballastes in der Brennkammer bei etwa 1350°C sehr gut zerstört werden. Der CO- bzw. C_nH_m-Gehalt von 30 ppm bzw. 7 ppm im Abgas und der C-Gehalt der Schlacke von 20 mg/kg zeigen den guten Ausbrand für diese beiden Reststoffe aus der Abfallverbrennung. Dabei ist zu beachten, daß das vorliegende Verbrennungssystem noch in keiner Weise optimiert war.

Die Schwermetalle, die nicht zerstörbare Umweltgifte sind, werden entsprechend dem TAZAS-Verfahren im wesentlichen in die Feinstaubfraktion gedrängt. Sie gelangen mit diesem Feinstaub in den Kondensatwäscher und können damit leichter naßchemisch wiedergewonnen werden. Der Grobstaub verbleibt im Ofen bzw. er wird zusammen mit dem ausgelaugten Feinstaub aus dem Kondensatwäscher in den Ofen zurückgeführt und in die Schlacke eingeschmolzen. Eine Staubdeponierung ist somit vermeidbar.

Die Rückhaltung der restlichen Schadstoffe wie SO₂, Cl, F und evtl. NO_x wird durch die starke Reduzierung der Abgasmenge verbessert.

Eine Abschätzung der Investitions- und Betriebskosten für eine Verbrennung von Abfall mit O₂ im Vergleich zur konventionellen Abfallverbrennung zeigt die mögliche Wirtschaftlichkeit des TAZAS-Verfahrens.

Literatur

1. H. Doedens: "Konzepte zur stofflichen Verwertung und Schadstoffminimierung im Verbund mit thermischer Abfallverwertung" VDI Bericht Nr. 637 (1987) S. 51 - 65
2. H. Bonnenberg: "Die Bedeutung der thermischen Abfallbehandlung von Siedlungsabfällen", VDI Bericht Nr. 637 (1987) S. 7 - 25
3. K. J. Thomé-Kozmiensky: "Forschungs- und Entwicklungsbedarf bei Müllverbrennungsanlagen", Vortrag auf dem Deutschen Ingenieurtag, Aachen (1989)
4. L. Barniske: "Stand der thermischen Abfallbehandlung in der Bundesrepublik Deutschland" VDI Bericht Nr. 637 (1987) S. 27 - 50
5. L. Barniske: "Thermische Behandlung von Sonderabfällen - Gegenwärtiger Stand und Entwicklungsperspektiven" in Behandlung von Sonderabfällen 2, EF-Verlag Berlin (1988) S. 728 - 740
6. G. Erbach: "Stoff- und Mengenbilanz an der Sonderabfallverbrennungsanlage Biebesheim" in Müllverbrennung und Umwelt, EF-Verlag, Berlin (1985) S. 474 - 499
7. H. Ringel: "Verfahren zur thermischen Behandlung von Abfällen sowie Vorrichtung zur Durchführung dieses Verfahrens", Deutsche Patentschrift DE 3724563 C2, Anmeldetag 24. 7. 87
8. T. Grund: "Untersuchungen zur Staubabscheidung in Naßabscheidern durch Wasserdampfkondensation" Bericht Jül-2474 (1991)
9. W. Dannecker: "Schadstoffmessungen bei Müllverbrennungsanlagen", VGB Kraftwerkstechnik, 63 (1983) Nr. 3, S. 237 - 243
10. H. Müller: "Emissionen aus der Verbrennung von Abfällen und BRAM" in Müllverbrennung und Umwelt, FE-Verlag, Berlin (1985) S. 500 - 534
11. T. R. Keyser, u. a.: "Characterizing the surfaces of environmental particles", Environmental Science & Technology, Vol. 12, Nr. 7, (1978) S. 768 - 773
12. U. Rachwalsky: "Untersuchungen zur Verflüchtigung von Schwermetallen bei der Abfallverbrennung mit Sauerstoff", Bericht Jül-2309, ISSN 0366-0885 (1989)
13. V. Vogg, A. Christmann, K. Wiese: "Das 3 R-Verfahren, ein Baustein zur Schadstoffminderung bei der Müllverbrennung", VGB-Kraftwerkstechnik 68, Nr. 3 (1988) S. 258 - 261
14. M. Herbermann: "Pilotexperimente zur Abfallverbrennung mit konzentriertem Sauerstoff", Bericht Jül-2431 (1991)

Danksagung

Die vorliegenden Versuchsergebnisse und Technologieentwicklungen zum TAZAS-Prozeß sind im Rahmen einer mehrjährigen F & E-Arbeit am Institut für Chemische Technologie unter Leitung von Herrn Prof. E. Merz entstanden. Die Herren U. Rachwalsky, T. Grund und M. Herbermann haben in diesem Rahmen ihre Promotionsarbeiten ausgeführt. Ich danke ihnen für die stets gute Zusammenarbeit und ihr Durchstehvermögen.

Mein besonderer Dank gilt den Herren M. Mommertz, H. Langen und H. Schmitz für die gute Kooperation in der Versuchshalle und dem Analytiklabor. Für fotografische Aufnahmen und die Hilfestellung bei der Analytik bedanke ich mich sehr bei den Herren M. Heidendael und H. Vijgen.

Jül-2536

Oktober 1991

ISSN 0366-0885