



Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 5826

Das Siemens Schwel-Brenn-Verfahren

U. Richers, B. Bergfeldt
Institut für Technische Chemie

November 1996

Forschungszentrum Karlsruhe

Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 5826

Das Siemens Schwel-Brenn-Verfahren

U. Richers

B. Bergfeldt

Institut für Technische Chemie

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

1996

**Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor**

**Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe**

ISSN 0947-8620

Kurzfassung:

Das Siemens Schwel-Brenn-Verfahren

Das Schwel-Brenn-Verfahren wurde von der Fa. Siemens für die thermische Behandlung von Abfällen entwickelt. In dieser Arbeit werden die in der Literatur publizierten Informationen zusammengefaßt. Neben einer ausführlichen Verfahrensbeschreibung wird auch auf die Entwicklungsgeschichte und die erste großtechnische eingegangen. Weitere Schwerpunkte bilden die Eigenschaften der Reststoffe sowie Stoff- und Energiebilanzen. Außerdem werden die in der Literatur durchgeführten Vergleiche des Schwel-Brenn-Verfahrens mit anderen Systemen zur thermischen Abfallbehandlung vorgestellt.

Eine Auswertung der vorliegenden Informationen zeigt für die Stoff- und Energiebilanzen größere Schwankungen. Außerdem sind nicht alle Stoffe sicher zu bilanzieren. Anhand der gesammelten Informationen kann das Schwel-Brenn-Verfahren nicht sicher beurteilt werden. Es müssen die Erfahrungen aus der ersten großtechnischen Anlage bei Ulm abgewartet werden.

Abstract

The Siemens Thermal Waste Recycling Technology

The Thermal Waste Recycling Technology has been developed by the Siemens company for the thermal waste treatment. In this paper the informations published in the literature are summarized. An exact description of the process and in addition the history of development is reviewed. Further main points are the properties of the ashes, the energy balance and mass balance. Moreover comparisons of the Thermal Waste Recycling Technology with other systems for the thermal waste treatment mentioned in the literature are summarized.

An evaluation of the published data shows deviations in the mass and energy balances. In addition not all substances could be surely balanced. As a result sure valuation of the Thermal Waste Recycling Technology is not possible. Experiences of the technical scale plant have to be remained to be seen.

6.3 Energiebilanzen	30
6.4 Zusammenfassung	33
7 Bewertungen und Vergleiche	33
8 Großtechnische Anwendung	36
9 Zusammenfassung	43
10 Literatur	47
11 Anhang	57
11.1 Weitere Stoffbilanzen für das Schwel-Brenn-Verfahren	57
11.2 Weitere Energiebilanzen für das Schwel-Brenn-Verfahren	58

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1: Pyrolyseanlage Goldshöfe	7
Abbildung 2: Das Schwel-Brenn-Verfahren	8
Abbildung 3: Schematischer Aufbau der Schweltrommel	9
Abbildung 4: Innenansicht der Schweltrommel, Anlage in Yokohama	11
Abbildung 5: Reststoffbehandlung	13
Abbildung 6: Aufarbeitung der Grobfraktion	14
Abbildung 7: Hochtemperaturverbrennung	16
Abbildung 8: Mehrstoffbrenner	17
Abbildung 9: Ansicht der Schweltrommel	20
Abbildung 10: Massenströme des Schwel-Brenn-Verfahrens	27
Abbildung 11: Massenströme des Schwel-Brenn-Verfahrens	27
Abbildung 12: Energiebilanzschema für das Schwel-Brenn-Verfahren	31
Abbildung 13: Sankey-Diagramm für das Schwel-Brenn-Verfahren	32
Abbildung 14: Verfahrensaufbau der Anlage in Fürth	36
Abbildung 15: Temperaturprofil der Schweltrommel bei 50 % Last	39
Abbildung 16: Hochtemperaturbrennkammer	40
Abbildung 17: Verbrennungsteil für eine großtechnische Schwel-Brenn-Anlage	41

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1:	Prozesse bei der Pyrolyse	3
Tabelle 2:	Prozesse bei der thermischen Abfallbehandlung	4
Tabelle 3:	Schwelgaszusammensetzung	12
Tabelle 4:	Hauptbestandteile der Siebfraction	14
Tabelle 5:	Kohlenstoffanteil in der Feinfraktion	15
Tabelle 6:	Vergleich von Schmelzgranulat aus dem Schwel-Brenn-Verfahren	23
Tabelle 7:	Schwermetallkonzentrationen im Schmelzgranulat	24
Tabelle 8:	Eluatanalyse für das Schmelzgranulat	25
Tabelle 9:	Daten zur Stoffbilanz	28
Tabelle 10:	Angaben zur Energieerzeugung beim Schwel-Brenn-Verfahren	32
Tabelle 11:	Energieausbeute bei der thermischen Abfallbehandlung bei einem Heizwert von 10 MJ/kg	34
Tabelle 12:	Abfallzusammensetzung	37
Tabelle 13:	Technische Daten für die Schwel-Brenn-Anlage in Fürth	38
Tabelle 14:	Daten für eine großtechnische Schweltrommel , Durchsatz 5 t/h	39

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	1
2 Grundlagen thermischer Abfallbehandlungsverfahren	2
3 Entwicklungsgeschichte des Schwel-Brenn-Verfahrens	4
3.1 Die Pyrolyseanlage in Goldshöfe	6
4 Beschreibung des Schwel-Brenn-Verfahrens	7
4.1 Vorbehandlung der Abfälle	8
4.2 Verschwelung	9
4.3 Reststoffaufbereitung	12
4.4 Hochtemperaturverbrennung	15
4.5 Kessel	18
4.6 Rauchgasreinigung	19
4.7 Die Demonstrationsanlage in Ulm	20
5 Reststoffe	21
5.1 Eluattests	21
5.2 Metallfraktionen	22
5.3 Inertmaterial	22
5.4 Schmelzgranulat	23
5.5 Verwertungsmöglichkeiten	26
6 Bilanzen	26
6.1 Massenbilanzen	27
6.2 Stoffbilanzen	29

1 Einführung

In der Bundesrepublik Deutschland werden alle Bereiche der Abfallwirtschaft mit der Verabschiedung der TA Siedlungsabfall 1993 und dem Kreislaufwirtschaftsgesetz 1994 aufgrund der Übergangszeiten weitere Veränderungen erfahren.

Die Auswahl der einsetzbaren Verfahren für die Abfallentsorgung werden durch die Vorgaben der TA Siedlungsabfall entscheidend beeinflusst. Die Zuordnungskriterien für Deponien im Anhang B der TA Siedlungsabfall fordern nach dem heutigen Stand der Technik eine thermische Behandlung des Hausmülls, denn nur auf diesem Weg sind die Grenzwerte für den Glühverlust von weniger als 3 Masse-% (Deponieklasse I) bzw. 5 Masse-% (Deponie-klasse II) sicher einzuhalten.

Diese Entwicklung hat das Interesse an thermischen Behandlungsanlagen gefördert und die Entwicklung neuer Techniken forciert. Neben der für die Hausmüllverbrennung etablierten Rostfeuerungen werden heute auf dem Markt auch andere Verfahren angeboten.

Das Schwel-Brenn-Verfahren (SBV) der Firma Siemens ist eines dieser neuen Verfahren für die thermische Behandlung von Abfällen. Im englischen Sprachraum wird dieses Verfahren als Thermal Waste Recycling Technology (TWRT) und frz. als Procédé Thermique de Recyclage (PTR) bezeichnet [Ahrens-1] [Ahrens-3].

Dieses Verfahren wurde für die thermische Behandlung von Hausmüll konzipiert mit dem Ziel, eine vollständige Verwertung der im Restmüll enthaltenen Stoffe [Thomé-K.-2] zu erreichen. Im Gegensatz zur Rostfeuerung, bei der die Abfälle auf einem Rost verbrannt werden, besteht dieses Verfahren aus zwei Stufen. In einem Drehrohr werden die Abfälle zunächst einer Pyrolyse unterworfen. Die entstehenden Reststoffe, Pyrolysegas und Feststoffe, werden aufbereitet und dann in einer Schmelzkammer gemeinsam bei 1300 °C verbrannt.

Für das Schwel-Brenn-Verfahren existiert zur Zeit allerdings noch keine großtechnische Anlage. Die Versuchsanlage bei Ulm ist seit einigen Jahren in Betrieb und wird mit einem stündlichen Durchsatz von 200 kg betrieben [Marb]. Außerdem wurde eine Demonstrationsanlage in Yokohama/Japan von dem japanischen Lizenznehmer MITSUI Engineering gebaut [NN-1] [NN-2] [Kanczarek-1]. Der Bau dieser Demonstrationsanlage dient dem Nachweis der Funktionstüchtigkeit des Verfahrens und der Zertifizierung für den Bau großtechnischer Anlagen in Japan [Anton].

Die erste großtechnische Anlage ist seit Oktober 1994 bei Fürth für den Zweckverband Abfallentsorgung Rangau (ZAR) in Bau [Gajewski]. Außerdem wird über fünf Systementscheidungen für das Schwel-Brenn-Verfahren berichtet [Anton].

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine umfassende Zusammenstellung der Kenntnisse über das Schwel-Brenn-Verfahren, die als Grundlage für eine verlässliche Bewertung seiner Qualität dienen soll. Dazu ist auch eine kurze Übersicht über die Entwicklungsgeschichte erforderlich, die zusammenhängend in der Literatur kaum zu finden ist.

Neben einer genauen Verfahrensbeschreibung bildet eine Betrachtung der anfallenden Reststoffströme einen weiteren Schwerpunkt der Arbeit. Dort wird auch auf die Untersuchungsmethoden eingegangen. Außerdem werden die Erkenntnisse aus den in der Literatur durchgeführten Bewertungen und Vergleiche des Schwel-Brenn-Verfahrens mit den anderen thermischen Behandlungsverfahren zusammengestellt und ausgewertet.

Für ein umfassendes Verständnis des Schwel-Brenn-Verfahrens wird in den beiden nachfolgenden Kapiteln zunächst auf die Grundlagen der thermischen Abfallbehandlungsverfahren und die Entwicklungsgeschichte des Schwel-Brenn-Verfahrens eingegangen. In den Kapiteln 4 bis 6 werden die Verfahrenstechnik, die Reststoffe sowie die Energie- und Stoffbilanzen erläutert. Anschließend werden dann die in der Literatur publizierten Bewertungen und Vergleiche für das Schwel-Brenn-Verfahren erläutert. Zum Abschluß wird auf großtechnische Anlagen und den Stand der Anwendung zum gegenwärtigen Zeitpunkt eingegangen.

2 Grundlagen thermischer Abfallbehandlungsverfahren

Bevor das Schwel-Brenn-Verfahren in der vorliegenden Arbeit genau beschrieben wird, erscheint eine kurze Einführung in die Prozesse zur thermischen Abfallbehandlung sinnvoll. Allgemein wird bei der thermischen Abfallbehandlung zwischen Trocknung, Entgasung, Pyrolyse, Vergasung und Verbrennung unterschieden. Die physikalisch-chemischen Methoden zur Abfallbehandlung, wie z.B. die Hydrierung gehören nicht zu den thermischen Verfahren.

Unter **Trocknung** ist die Abtrennung von Flüssigkeiten aus gasförmigen, flüssigen oder festen Stoffen zu verstehen. Bei der Verbrennung erfolgt eine thermische Trocknung, wobei mit Zuführung von thermischer Energie durch Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung das im Brennstoff enthaltene Wasser entfernt wird. Allerdings entweicht nur die Feuchte aus dem Brennstoff, nicht das chemisch gebundene Wasser, das z.B. als Kristallwasser vorliegen kann. Die thermische Trocknung zeichnet sich durch einen gleichzeitigen Stoff- und Wärmetransport aus.

Unter dem Begriff der **Pyrolyse** ist die Zersetzung von Stoffen unter der Einwirkung von Hitze zu verstehen. Die Pyrolyse wird auch als Schwelung, Entgasung oder manchmal als trockene Destillation bezeichnet. Eine eindeutige Differenzierung zwischen diesen Begriffen gibt es in der Literatur nicht.

Unter der Pyrolyse sind strenggenommen nur die chemischen Zersetzungsvorgänge im Feststoff erfaßt. Die Entgasung beschreibt eigentlich das Austreten der Pyrolyseprodukte aus dem erhitzten Material. Im internationalen Sprachgebrauch wird allgemein die Zersetzung organischer Stoffe durch Wärme unter Sauerstoffausschluß als Pyrolyse bezeichnet. [Bilitevski]

Die Tabelle 1 zeigt die entstehenden Pyrolyseprodukte in Abhängigkeit von der Temperatur. Weitere Informationen zu den Reaktionsprodukten der Abfallpyrolyse findet man in der Literatur [Thomanetz].

Je nach gewählter Temperatur entstehen Brenngase oder Öle und ein fester Rückstand. In einer zweiten Stufe erfolgt die thermische Nutzung oder stoffliche Aufarbeitung dieser Pyrolyseprodukte. Da in den festen Rückständen noch viel Kohlenstoff enthalten ist, muß eine Nachbehandlung erfolgen.

Tabelle 1: Prozesse bei der Pyrolyse [Bischofsberger]

Temperaturbereich[°C]	Reaktionen
unter 150	Trocknung, Bildung von Wasserdampf, Verdampfung leicht flüchtiger Stoffe
150-250	chemisch gebundenes Wasser sowie lose gebundene Seitenketten werden abgespalten
250-500	höhermolekulare organische Substanzen werden durch Abspaltung von Seitengruppen und Abbau der makromolekularen Gerüststrukturen in Gase, ölige und teerartige Verbindungen und festen Kohlenstoff (Koks) zersetzt.
500-800	sowohl aus den flüssigen organischen Produkten als auch aus dem festen Kohlenstoff entstehen vorwiegend H ₂ , CO und CH ₄
800-1200	weitere Spaltung der Kohlenwasserstoffe führt zu einem niedrigeren Heizwert des Pyrolysegases, aber größerer Ausbeute, Reduktion der Metalloxide
über 1200	anorganische Inhaltsstoffe schmelzen, Schlacke flüssig abziehbar

Die **Vergasung** unterscheidet sich von der Pyrolyse durch die Zuführung eines Gases, das die verkohlenden Rückstände in weitere gasförmige Produkte umwandelt. Für die Vergasung ist wichtig, daß der Sauerstoff in den entstehenden gasförmigen Verbindungen nicht aus dem Brennstoff stammt. Als Vergasungsmittel werden Wasserdampf, Kohlendioxid,

Sauerstoff oder Luft verwendet. Die notwendige Reaktionsenergie für den Vergasungsprozess wird durch eine Teilverbrennung des organischen Materials im Innern des Reaktors erzeugt. Das Zielprodukt einer Vergasung ist ein brennbares Gas.

Die **Verbrennung** ist eine oxidative Stoffumwandlung bei Anwesenheit von Sauerstoff, der in Form von Luft oder reinem Sauerstoffgas zugeführt wird. Die im Ausgangsmaterial enthaltene Energie wird in Form von Wärme frei. Da üblicherweise mit Luft verbrannt wird, ist die Abgasmenge durch den Anteil an Luftstickstoff relativ hoch.

Die Trocknung, Pyrolyse (Entgasung) und die Vergasung können als ein eigenständiges Verfahren und als Teilprozesse auftreten. Die Trocknung und die Pyrolyse (Entgasung) stellen Vorstufen für eine nachfolgende Vergasung dar, so daß bei einer Vergasung auch Trocknungs- und Pyrolyseprozesse ablaufen. Bei einer Verbrennung laufen alle vier Prozesse, Trocknung, Pyrolyse (Entgasung), Vergasung und Verbrennung, gleichzeitig in einem Reaktionsraum ab [Bischofberger]. Dieser Sachverhalt wird in der folgenden Tabelle deutlich:

Tabelle 2: Prozesse bei der thermischen Abfallbehandlung

Teilprozeß	thermisches Behandlungsverfahren			
	Trocknung	Pyrolyse	Vergasung	Verbrennung
Trocknung	X	X	X	X
Entgasung		X	X	X
Vergasung			X	X
Verbrennung				X

3 Entwicklungsgeschichte des Schwel-Brenn-Verfahrens

An der Entwicklung des Schwel-Brenn-Verfahrens sind in der Vergangenheit verschiedene Firmen beteiligt gewesen. Im folgenden Text sind die Daten aus verschiedenen Veröffentlichungen zusammengefaßt.

1973-1978	Karl Kiener entwickelt die Grundlagen für ein Pyrolyseverfahren. Es werden verschiedene Versuchsanlagen gebaut [Nels].
1978	Gründung der "Kiener Pyrolyse Gesellschaft für thermische Abfallverwertung mbH" (KPA). Teilhaber waren zunächst zu je 50% die Energieversorgung Schwaben (EVS) und die Fa. Goldshöfe Anlagentechnik. Das Ziel dieser Gesellschaft war der Bau einer Pyrolyseanlage zur Demonstration in Goldshöfe für den Oberalbkreis. Eine kurze Beschreibung der Kiener-Pyrolyse findet man in [Heitmann] (1983) und [Huth].
Frühjahr 1980	Bauftrag vom Oberalbkreis an die KPA
September 1982	Die von KPA und MAN-Nürnberg erstellte Anlage geht in Betrieb [Nels]
Dezember 1982	Die Fa. Goldshöfe Anlagentechnik überträgt ihre Anteile an der KPA und die Patentrechte auf die EVS [Lezenik] [Bericht-1].
1983	Weiterentwicklung des Verfahrens durch die KPA [Lezenik].
Frühjahr 1984	Die EVS sucht einen Industriepartner für die Markteinführung [Lezenik].
1. Juli 1984	Die Kraftwerkunion AG (KWU) übernimmt von der Energieversorgung Schwaben (EVS) 80 % des Stammkapitals der KPA [Bericht-1]. Es wird auch das Niedertemperatur-Pyrolyseverfahren mit den bereits entwickelten Versuchsanlagen übernommen [Berwein-9]. Bei den Versuchsanlagen handelt es sich um Anlagen in Goldshöfe (Durchsatz 3t/h) und in Ulm-Wiblingen (Durchsatz 0,5 t/h).
September 1985	Die KPA wird in KWU-Umwelttechnik GmbH umbenannt.
1987	Die Anlage in Goldshöfe wird an den Oberalbkreis übergeben [Berwein-1]. Das Anlagenkonzept für das Schwel-Brenn-Verfahren entsteht [Berwein-9].
Mitte 1988	Der Bundesminister für Umwelt beauftragt den Arbeitskreis Pyrolyse mit der Betriebsbegleitung der Technikumsanlage in Ulm-Wiblingen [Berwein-4].
Herbst 1988	Die Technikumsanlage für das Schwel-Brenn-Verfahren in Ulm-Wiblingen geht in Betrieb [Berwein-9].
Dezember 1988	Herstellung einer bituminösen Asphalttragschicht aus den inerten Materialien, die bei dem Schwel-Brenn-Verfahren entstehen [Berwein-9].
Februar 1989	bis zu diesem Zeitpunkt wurden in rund 1000 Betriebsstunden etwa 140 t Abfall behandelt [Thomé-K.-2].
Juli 1989	Sytementscheidung für das Schwel-Brenn-Verfahren vom Zweckverband Rangau (Fürth) [NN-5] [Mayer-1] [Kanczarek-3]

29. Juli 1991	Scoping-Termin für die Anlage bei Fürth [NN-5]
1991	Erteilung der Lizenz an die Mitsui Engineering and Shipbuilding Co. Ltd. in Tokio [NN-3] [Anton]
Januar 1992	Die japanischen Ministerien erteilen die Genehmigung für den Bau einer Demonstrationsanlage mit 1 t/h Abfalldurchsatz [Anton] [Kanczarek-3]
Dezember 1992	Die Antragsunterlagen für die Anlage bei Fürth werden bei der Regierung von Mittelfranken eingereicht [Kanczarek-3]
Dezember 1993	Baubeginn der japanischen Demonstrationsanlage bei Yokohama [Anton] [Kanczarek-3]
September 1994	Inbetriebnahme der japanischen Demonstrationsanlage [Anton]
Mitte 1993	Die Anlage in Ulm-Wiblingen erreicht 10.300 Betriebsstunden [Rhodovi].
27. April 1994	Genehmigung der ersten Schwel-Brenn-Anlage bei Fürth [NN-3] [NN-4] [NN-5] [Kanczarek-3]
Ende 1994	Die Anlage in Ulm-Wiblingen erreicht 14.000 Betriebsstunden [Anton]
Mitte 1995	Lizenzvergabe an die Takuma Co. Ltd., Osaka, Japan
Ende 1996	Die Anlage bei Fürth geht in Betrieb [Kanczarek-3]

3.1 Die Pyrolyseanlage in Goldshöfe

Die Pyrolyseanlage in Goldshöfe stellt eine wichtige Vorstufe für das Schwel-Brenn-Verfahren der Fa. Siemens dar. Der Durchsatz wird mit 2,5 bis 2,7 t/h [Bericht-2] bzw. 3 t [Ahrens-1] [Kanczarek-3] [Hauk] angegeben. Abbildung 1 zeigt schematisch den Verfahrensablauf.

In der Anlage werden die Abfälle nach einer Zerkleinerung mit einer Rotorschere auf eine Kantenlänge mit ca. 10 cm in eine Drehtrommel eingefördert. In der leicht geneigten Trommel, die indirekt beheizt wird, erfolgt eine Pyrolyse der Abfälle bei einer Temperatur von etwa 450 °C [Berwein-1]. Die Verweilzeit beträgt 1 bis 1,5 h, die Drehzahl der Trommel wird mit 1 bis 4 U/min [Lezenik] angegeben.

Das entstehende Pyrolysegas wird mit einem Gaswandler aufbereitet. Mit Hilfe eines Koksbedtes werden bei einer Temperatur von ca. 1050 °C hochmolekulare Kohlenwasserstoffe zerstört, und der im Pyrolysegas enthaltene Wasserdampf reagiert mit Kohlenstoff aus dem Koksbedt zu Wasserstoff und Kohlenmonoxid (Wassergasgleichgewicht). Außerdem erfolgt in dem Gaswandler eine Staubabscheidung. Nach dem Gaswandler durchläuft das Gas eine zweistufige Naßwäsche und wird anschließend thermisch genutzt. Der feste Rückstand aus der Schweltrommel wird deponiert. [Berwein-1] [Baumgärtel-1]

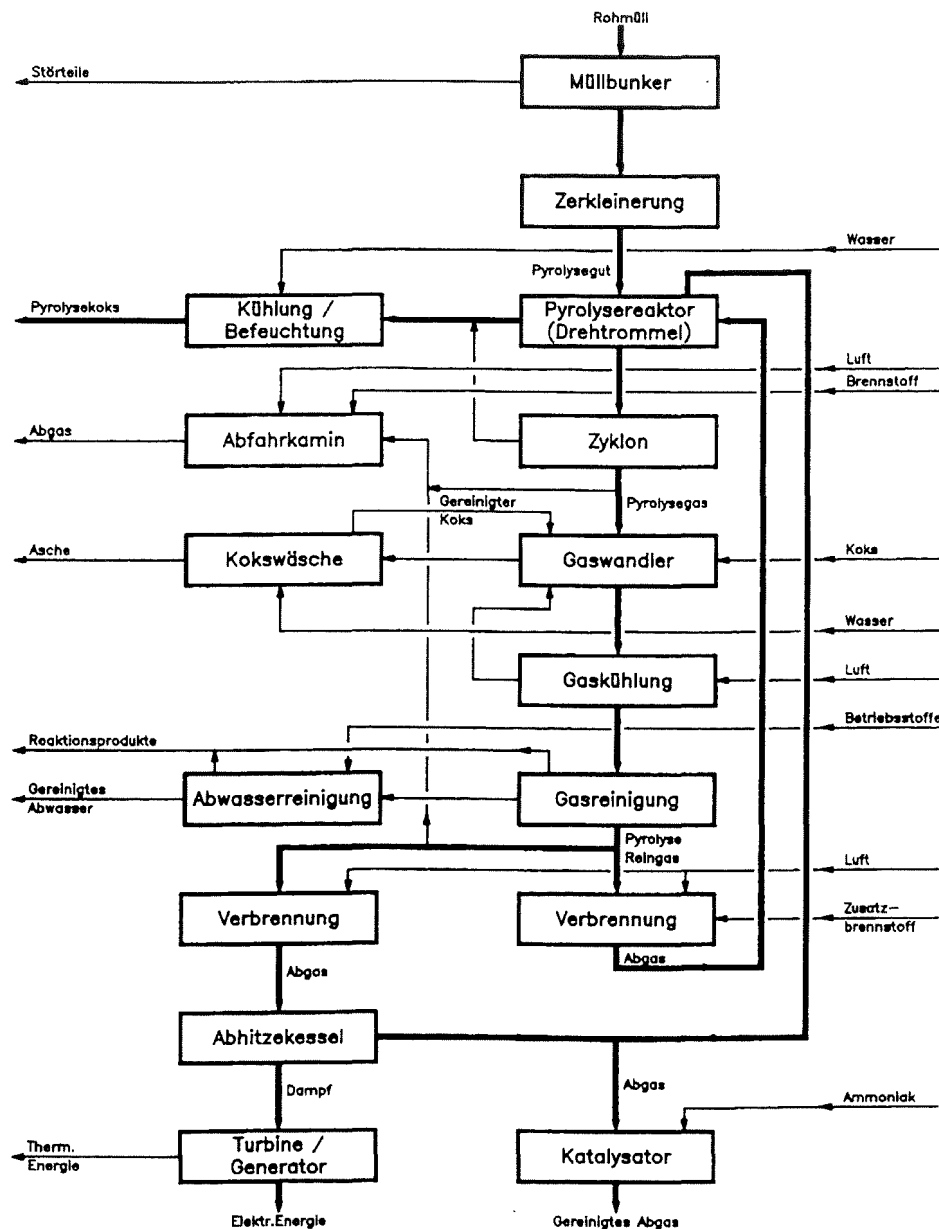


Abbildung 1: Pyrolyseanlage Goldshöfe [Bischofsberger]

Weitere Angaben über dieses Verfahren sind in der Literatur zu finden [Berwein-1] [Lezenik] [Berwein-2] [Nels] [Bischofsberger].

4 Beschreibung des Schwel-Brenn-Verfahrens

In diesem Kapitel werden die einzelnen Prozessschritte des Schwel-Brenn-Verfahrens anhand von Informationen aus der Literatur erläutert. Allerdings ist aus den Publikationen nicht immer sicher zu entnehmen, ob sich die Angaben auf die Demonstrationsanlage in Ulm-Wiblingen oder auf großtechnische Anlagen beziehen. Schwerpunkt in diesem Kapitel sind das Verfahren selbst und die Erkenntnisse aus der Demonstrationsanlage. Auf großtechnische Anlagen wird in Kapitel 8 eingegangen.

Im einzelnen ist das Schwel-Brenn-Verfahren aus den Prozeßschritten Abfallvorbehandlung, Verschmelzung, Reststoffaufbereitung, Hochtemperaturverbrennung, Energieerzeugung und einer Rauchgasreinigung aufgebaut. Die folgende Abbildung zeigt das Verfahrensschema für das Schwel-Brenn-Verfahren:

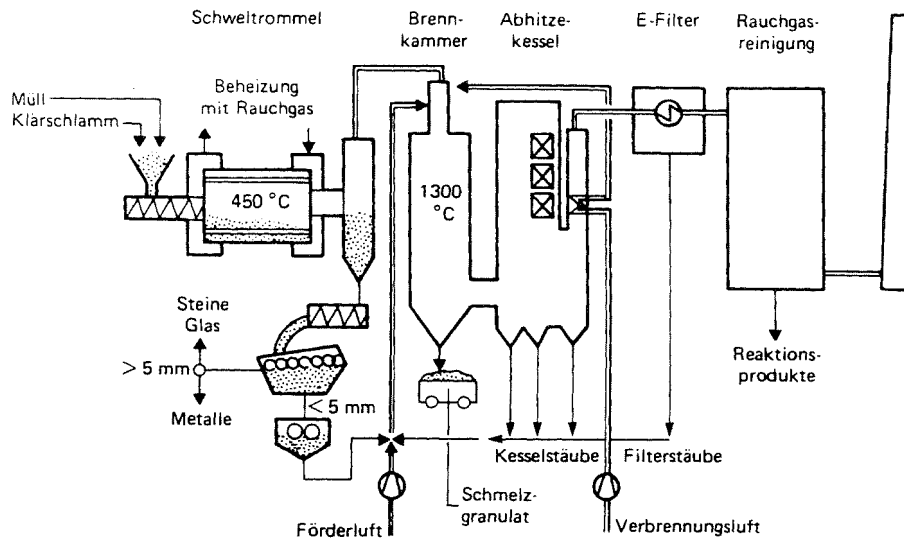


Abbildung 2: Das Schwel-Brenn-Verfahren [Berwein-9]

Der angelieferte Abfall wird in einem konventionellen Müllbunker gelagert. Mit einer Müllkrananlage werden die Aggregate zur Vorbehandlung der Abfälle beschickt und die zerkleinerten Abfälle dann zwischengelagert. Für die Behandlung von Klärschlämmen mit dem Schwel-Brenn-Verfahren ist ein Silo als Speicherraum vorgesehen [Meininger].

Anschließend erfolgt in einem Drehrohr bei ca. 450 °C eine Pyrolyse. Die vorgeschaltete Pyrolysestufe erfüllt in diesem Verfahren die Aufgabe, einen hochwertigen Brennstoff zu erzeugen [Berwein-4]. Das entstehende Gas wird direkt einer Brennkammer zugeführt. In dieser Brennkammer wird auch der aufbereitete Pyrolysereststoff nach einer Abtrennung der Metalle und Inertmaterialien verbrannt. Die entstehenden Rauchgase werden dann in einer Rauchgasreinigungsanlage von Schadstoffen befreit und über einen Kamin abgeleitet.

4.1 Vorbehandlung der Abfälle

Die Abfallvorbehandlung erfolgt in einer einzigen Verfahrensstufe, in der die Abfälle mit einer Rotorschere zerkleinert werden. Alle angelieferten Abfälle, Hausmüll, hausmüllähnlicher Gewerbeabfall und Sperrmüll, werden mit der Rotorschere zerkleinert [Berwein-3]. Der so entstandene "Feinmüll" wird in einem separaten Bunkerbereich gelagert. Die entstehenden Stücke weisen eine Kantenlänge von maximal 200 mm auf [Berwein-9] [Kanczarek-2] [Kanczarek-3][Berwein-5] [Baumgärtel-3] [Berwein-3]. Nach May und Ahrens-Botzong [May-4] liegt die Größe der einzelnen Stücke unter 250 mm. Für die Kantenlänge wird in

der Literatur auch ein Bereich von 200 bis 300 mm [Berwein-8] oder etwa 150 mm [Kanczarek-1] [Ahrens-1] angegeben.

4.2 Verschmelzung

Die Verschmelzung erfolgt in einer Schweltrommel, die durch innen liegende Rohre beheizt wird. Mit einer Müllkrananlage werden kleine Aufgabebunker beschickt, aus denen dann ein Schubboden und eine Abzugsschnecke den Feinmüll dem Pyrolysedrehrohr der Anlage zuführen [Meininger]. Mit Hilfe einer Stopfschnecke gelingt eine Einföderung unter Luftausschluß [Berwein-9] [Kanczarek-2].

Bei der kombinierten Behandlung von Abfällen mit Klärschlamm wird der Klärschlamm direkt vor der Stopfschnecke zugegeben [Kanczarek-1]. Für die Dosierung des Klärschlammes wird eine Dickstoffpumpe eingesetzt [May-4] [Berwein-5]. Es ist ein Klärschlammanteil von bis zu 25 Masse-% möglich [Kanczarek-2]. Nach [Kanczarek-1] kann der mögliche Klärschlammanteil bei einem Trockensubstanzgehalt von ca. 35 Gew.-% bis zu 35 Gew.-% betragen.

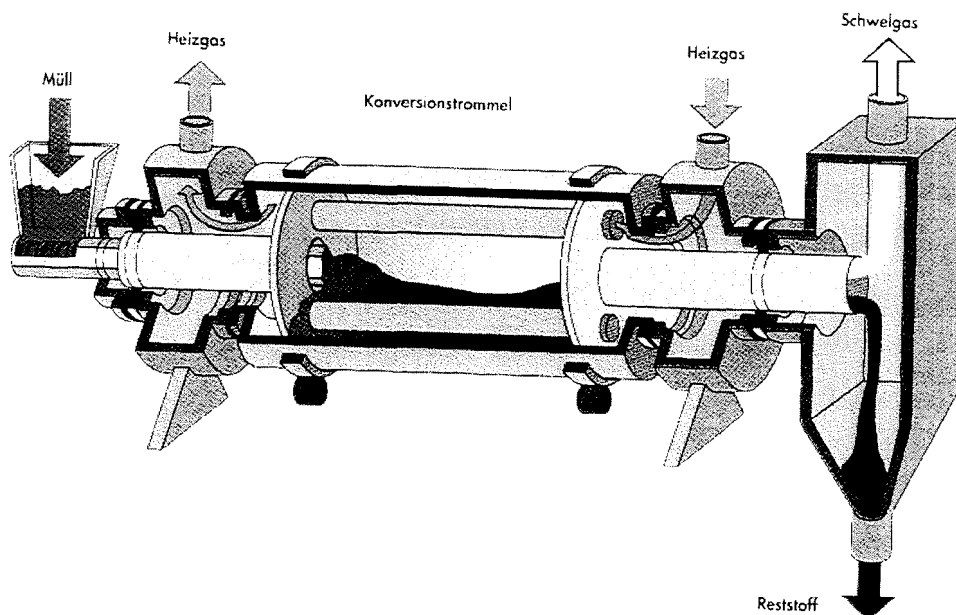


Abbildung 3: Schematischer Aufbau der Schweltrommel [Krupp]

In der Abbildung 3 sind die in die Schweltrommel eingebauten Heizrohre zu erkennen, mit denen die Abfälle durch indirekte Aufheizung auf eine Temperatur von ca. 450 °C erhitzt werden [Berwein-9] [Kanczarek-2]. Damit fließen durch die Schweltrommel zwei Stoffströme, der zu pyrolysierende Abfall und das Heizgas. Die Heizrohre werden im Gegenstrom zur Abfallbewegung vom Heizgas durchströmt [Berwein-5].

Über die Konstruktion des Drehrohres gibt es in der Literatur nur wenige Informationen. Nach [Thomé-K.-1] handelt es sich bei den Dichtungselementen zwischen den rotierenden

und feststehenden Baugruppen um axial kompensierte Gleitringdichtungen. Der Bericht von Lezenik [Lezenik] enthält Anmerkungen zur Abdichtung der Schweltrommel, die sich allerdings auf die Anlage in Goldshöfe beziehen. Überlegungen zu den Werkstoffen für die Schweltrommel sind in [May-3] veröffentlicht.

Nach [Berwein-3] wird das Heizgas für die Schweltrommel mit einem Dampfwärmetauscher vorgeheizt und dann mit Erdgas oder einer anderen Fremdenergieheizung auf 520 °C erhitzt. Diese Temperatur wird auch in anderen Quellen genannt [May-4] [Thomé-K.-1] (600 °C [Berwein-7]). Für die Beheizung der Trommel werden von Kanczarek [Kanczarek-2] in Abhängigkeit von den Standortbedingungen auch anlagenautarke Heizvarianten wie z.B. Heißluft oder extern eingebrachte Brennstoffe wie Erdgas oder Heizöl vorgeschlagen. Nach [Berwein-9] dient Rauchgas, das aus dem Kesselbereich entnommen wird, zur Beheizung der Schweltrommel.

In der Trommel herrscht gegenüber der Atmosphäre und den Heizrohren ein Unterdruck, so daß bei einem Defekt in dem System keine Schwelgase in die Atmosphäre austreten können [Berwein-5]. Der Druck in der Schweltrommel liegt an der kalten Eintrittsseite im Bereich des Umgebungsdrucks, an dem heißen Austrittsseite werden 2 mbar Unterdruck angegeben [Thomé-K.-1].

Die Trommel ist zur Unterstützung des Feststofftransports leicht geneigt [Berwein-9]. Die Neigung wird mit 1,5 ° angegeben [Meininger] [Kanczarek-1] [Anton] [Baumgärtel-2] [Kanczarek-3][Baumgärtel-3]. Die Drehzahl der Trommel schwankt zwischen 1 und 4 U/min [Berwein-9] [Kanczarek-2]. In der Literatur wird auch ein fester Wert von 3 U/min genannt [May-4] [Baumgärtel-2]. Die Verweilzeit der eingeförderten Abfälle beträgt etwa 60 min [Berwein-9] [Meininger] [Anton] [Ahrens-1].

Im Inneren der Trommel sind die Heizrohre horizontal eingebaut [Meininger]. Berwein und Kanczarek [Berwein-9] erwähnen eine schaufelförmige Anordnung der Heizrohre, die sich auf den Querschnitt der Schweltrommel bezieht. Außerdem sind in der Schweltrommel Umlenkbleche eingebaut, die den Transport und eine Umwälzung der Abfälle unterstützen [Berwein-5]. Die folgende Abbildung zeigt die Schweltrommel von innen.

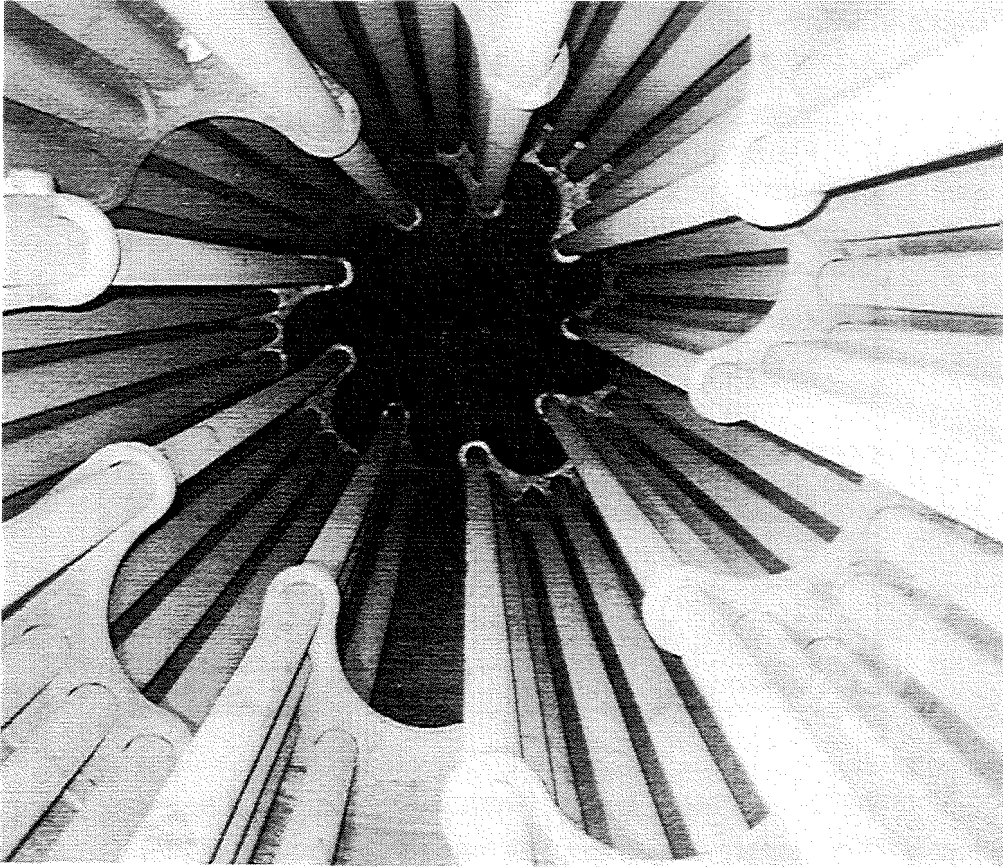


Abbildung 4: Innenansicht der Schweltrommel, Anlage in Yokohama [Siemens] (1995)

Der Grund für die spezielle Anordnung der Heizrohre wird von Berwein und Aurin [Berwein-4] näher erläutert. Durch die schaufelförmige Anordnung der Heizrohre wird der Abfall bis kurz vor den Scheitelpunkt der Trommel transportiert und dann abgeworfen. Neben einer guten Durchmischung der Abfälle wird ein guter Wärmeübergang von den Wandflächen auf den Abfall erreicht [Berwein-4].

Die verschiedenen Mischvorgänge in der Drehtrommel führen zu einer homogenen Zusammensetzung des Schwelgases, so daß trotz der geringen Anlagengröße keine Probleme mit der Regelung auftreten [Berwein-8]. Die Heizwerte der Schwelgase steigen mit dem Heizwert des Abfalls an [May-2].

Der Austrag der gasförmigen Produkte und der festen Reststoffe, die nach der Verschwelung zurückbleiben, wird in der Literatur nicht näher beschrieben. Es werden nur ein "Doppelschleusensystem" und "betriebssichere Gleitringdichtungen mit Zwischenabsaugung" erwähnt [Berwein-5]. Die Temperatur der Reststoffe und Schwelgase beträgt beim Verlassen des Schwelrohrs 450 °C [May-4] [Baumgärtel-2].

Tabelle 3: Schwelgaszusammensetzung [Berwein-8] [Meininger], ähnliche Daten in [May-3]

Komponente	Konzentration [Vol-%]
N ₂	3 - 4
H ₂ O	75 - 45
H ₂	6 - 25
CO	5 - 6
CO ₂	6 - 7
CH ₄	2 - 5
C ₂ H ₄	1 - 2
C ₂ H ₆	0,2 - 0,4
C ₃ H ₆	0,8 - 2,0
C ₃ H ₈	0,1 - 0,2
C ₄ H ₈	0,2 - 0,7
C (höhermol. KW)	4 - 10

Die bei der Verschwelung entstehenden Gase werden direkt über eine Rohrleitung der nachfolgenden Brennkammer zugeführt [Berwein-5]. Für die festen Reststoffe ist eine Aufbereitung erforderlich.

4.3 Reststoffaufbereitung

Etwa 34 Gew.-% der eingebrachten Abfallmenge fallen als fester Pyrolyserückstand an [Bischofberger], der durch die Reststoffaufbereitung in verwertbare Fraktionen bzw. einen kohlenstoffhaltigen Brennstoff aufgeteilt wird. Für diesen mechanischen Trennvorgang werden in der Literatur verschiedene Informationen mitgeteilt. Ein Vergleich der einzelnen Literaturquellen zeigt, daß die unterschiedlichen Siebe keine signifikante Auswirkung auf den Verfahrensprozeß haben. Die Anzahl der einzelnen Fraktionen für die Weiterverarbeitung verändert sich nicht.

Nach [Ahrens-1] wird zunächst der aus der Schweltrommel ausgetragene Rückstand mit einer Kühlschwingrinne auf etwa 100 °C abgekühlt. In [Meininger] u. [Berwein-4] [Thomé-K.-2] wird eine Abkühlung der festen Reststoffe auf ca. 150 °C erwähnt. Anschließend wird der Feststoff mit einem Kettenbecherwerk zu einer Siebmaschine transportiert [Bischofberger] [Ahrens-1].

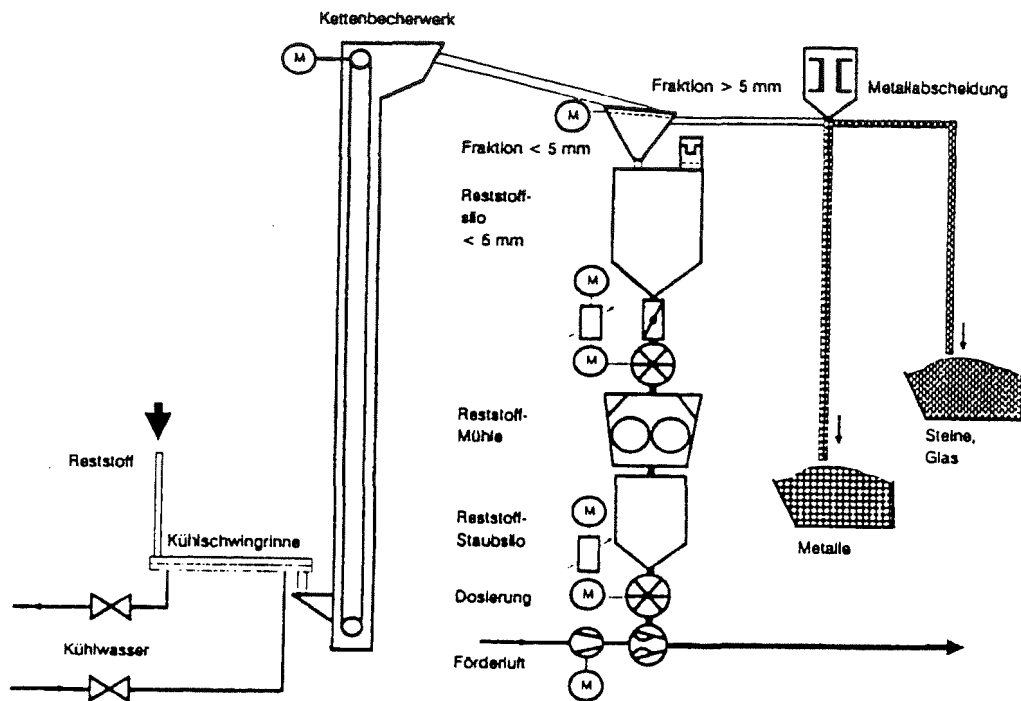


Abbildung 5: Reststoffbehandlung [Berwein-4]

Nach [Anton] [Ahrens-1] [Berwein-3] entstehen bei der Aufbereitung mit Sieben verschiedener Maschenweiten zwei Reststofffraktionen. Der Siebüberlauf (> 5 mm) wird durch weitere Trennoperationen in drei verwertbare Fraktionen aufgeteilt. Der Siebdurchgang mit Korngrößen oberhalb von 1 mm wird mit einem Walzenbrecher auf Korngrößen kleiner 1 mm gemahlen und der Hochtemperaturverbrennung zugeführt.

In [Berwein-9] [Thomé-K.-2] wird nur eine Maschenweite von 5 mm angeführt. An anderer Stelle [Kanczarek-2] wird für die Aufteilung in Grob- und Feinfraktion ein Schwingsieb mit Maschenweiten von 3 bis 5 mm genannt. May und Ahrens-Botzong [May-4] erwähnen eine Siebkaskade mit den Stufen 30 mm, 5 mm und 1 mm.

Der **Siebüberlauf** mit einer Stückgröße von mehr als 5 mm besteht aus Inertstoffen, wie Glas, Steinen und Keramik. Zusätzlich enthält diese Fraktion die Eisen- und NE-Metalle. Der Anteil dieser Fraktion am gesamten Abfallinput beträgt nach [Bischofsberger] 14 Gew.-%. Für eine Verwertung der Grobfraktion wird bei der Aufbereitung zunächst anhaftender Staub in einer Reinigungstrommel mit Luftsichtung abgeblasen [Berwein-3] [May-1] [May-4]. Die weiteren Verfahrensstufen für die Aufbereitung sind in der folgenden Abbildung dargestellt:

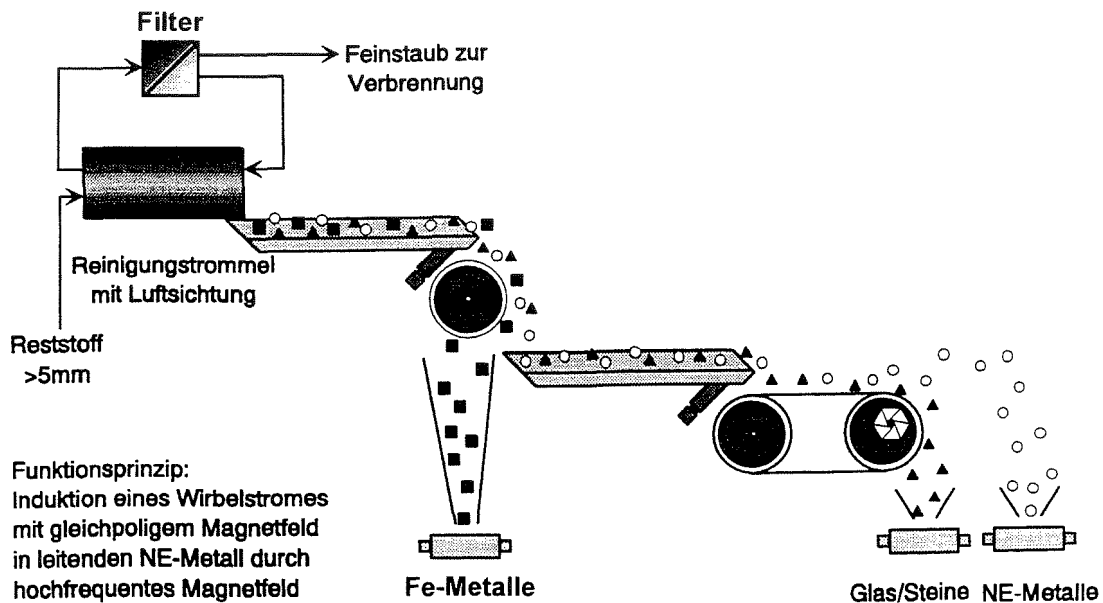


Abbildung 6: Aufarbeitung der Grobfraktion [Berwein-3]

In der ersten Stufe werden die Eisenmetalle mit einem Magneten abgetrennt. In einem zweiten Verfahrensschritt werden mit einem Wirbelstromabscheider die NE-Metalle aussortiert, wobei auch die dünnen Aluminiumfolien erfaßt werden [Ahrens-2]. Am Ende der Aufbereitung entstehen aus dem Siebüberlauf die drei verwertbaren Fraktionen Mineralstoffe, Eisen- und NE-Metalle [Berwein-9].

Etwa 20 Gew.-% des gesamten Abfallinputs gelangen in den **Siebdurchgang** [Bischofsberger]. Der Siebdurchgang besteht aus Mineralstoffen und Kohlenstoff und enthält über 99 % des Kohlenstoffs aus den festen Rückständen der Verschwelung [Anton] [Berwein-3] [Thomé-K.-2]. Die Mineralstoffe in dieser Fraktion enthalten zum überwiegenden Anteil die Oxide von Aluminium, Silizium und Calcium. Für die Hauptbestandteile dieser Feinfraktion werden die folgenden Daten mitgeteilt:

Tabelle 4: Hauptbestandteile der Siebfraktion (< 5 mm) [Berwein-4]

Bestandteil	Mittelwert [Gew.-%]	Bestandteil	Mittelwert [Gew.-%]
C	35	MgO	2
SiO ₂	22	Cl	3
CaO	13	SO ₃	2
Al ₂ O ₃	6	H ₂ O	1
Fe ₂ O ₃	3		

Für den Kohlenstoffanteil in dieser Feinfraktion werden in der Literatur die folgenden Daten angegeben:

Tabelle 5: Kohlenstoffanteil in der Feinfraktion (Siebdurchlauf)

Kohlenstoffanteil [%]	Quelle
30 - 35 %	[Berwein-9]
20 - 40 %	[Kanczarek-2]
30 %	[Hornung], [Meininger] [Berwein-3]
über 30 %	[Thomé-K.-2], [Berwein-4]
15 - 45 %	[Neubert]

Nach Berwein und Kanczarek [Berwein-9] entspricht der Heizwert dieser kohlenstoffhaltigen Feinfraktion dem von Braunkohlen. Die Feinfraktion besitzt einen Heizwert von mehr als 10.000 kJ/kg [Berwein-4]. Meininger et al. [Meininger] geben einen Heizwertbereich von 10.000 bis 13.000 kJ/kg an.

Für die Verbrennung im Hochtemperaturteil der Anlage wird die kohlenstoffhaltige Feinfraktion auf Korngrößen unterhalb von 0,1 mm zerkleinert [Berwein-9] (90µm [May-2]). Nach [Redmann-2] wird diese Fraktion auf eine Korngröße von weniger als 1 mm gebrochen. Für die Zerkleinerung kann eine Schwingrohrmühle eingesetzt werden [Berwein-8]. Die Eigenschaften der erzeugten Feinfraktion in Hinblick auf die Zerkleinerung und die entsprechenden Grundlagen werden in [Berwein-4] kurz erläutert.

Bei gemahlene Brennstoffen besteht allgemein eine große Brand- und Explosionsgefahr. Über entsprechende Untersuchungen mit der gemahlene Feinfraktion, die zur Verbrennung in der Hochtemperaturbrennkammer vorgesehen ist, berichten Berwein und Aurin [Berwein-4]. Die gemahlene Feinfraktion zeigt danach im Vergleich zu Stein- oder Braunkohlen ein geringeres Brand- und Explosionsrisiko. Für entsprechende Daten sei an dieser Stelle auf die Arbeit von Berwein und Aurin [Berwein-4] verwiesen.

4.4 Hochtemperaturverbrennung

Die kohlenstoffhaltige Feinfraktion wird gemeinsam mit dem Schwelgas in der Brennkammer verbrannt, an die ein Nachbrennraum angeschlossen ist. Das Schwelgas aus der Schweltrommel wird der Hochtemperaturbrennkammer direkt zugeführt, die kohlenstoff-

haltige Feinfraktion wird zwischengespeichert und nach Bedarf dosiert [Thomé-K.-1]. Nach [Neubert] werden zusätzlich die Kessel- und Flugstäube direkt in den Brenner aufgegeben.

Die Zuführung von homogenen Brennstoffen, die durch die Verschmelzung und Aufarbeitung entstehen, gestattet eine gute Kontrolle der Verbrennung bei hohen Temperaturen und einem geringen Luftüberschuß [Hornung]. Die folgende Abbildung zeigt die Brennkammer.

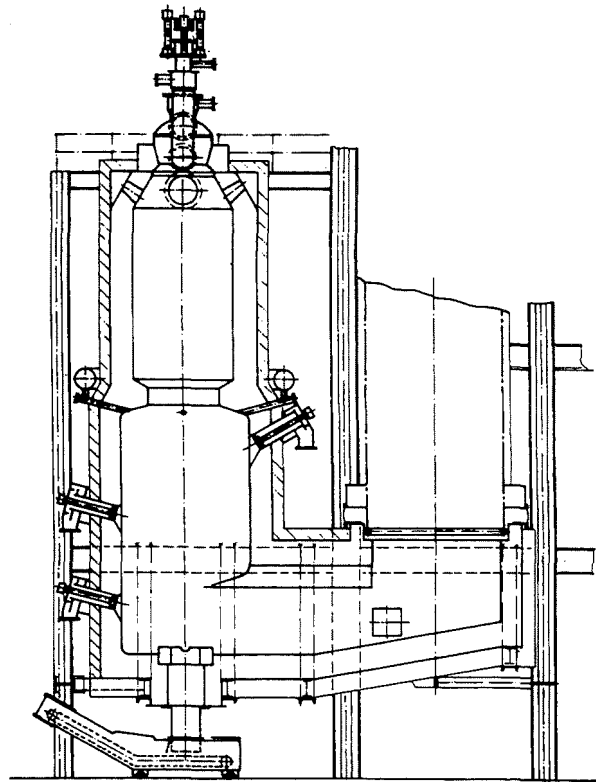


Abbildung 7: Hochtemperaturverbrennung [Berwein-4]

Die Brennkammer ist rotationssymmetrisch aufgebaut [Berwein-8]. Der Brenner ist am Kopf der Brennkammer zentrisch eingebaut [Neubert]. In die Brennkammer sind außerdem Zünd- und Stützbrenner integriert [Ahrens-1]. Die Brennkammergeometrie und eine gestufte Luftzuführung gewährleisten eine sehr gute Verbrennung im Bereich von 1300 °C [Anton] [Berwein-9].

Über die Konstruktion des Hochverbrennungsteils sind nur sehr wenige Informationen bekannt. Die tragenden Wände der Brennkammer, des Nachbrennraums und der Nachbrennkammer werden gekühlt und sind innen mit einer feuerfesten Ausmauerung versehen [May-3]. An anderer Stelle [Berwein-7] werden dagegen nicht gekühlte Wände aus keramischen Material erwähnt.

Der Brenner erzeugt eine senkrecht nach unten brennende Flamme, die auf den Schlackeaustrag ausgerichtet ist [Neubert]. Der feste Brennstoff (kohlenstoffhaltige Feinfraktion) wird aus dem Zwischenspeicher mit einem Gebläse dem Brenner zugeführt [Berwein-8].

Zur NO_x -armen Verbrennung erfolgt im Brenner eine dreistufige Luftzufuhr [Thomé-K.-2].
 Genauere Informationen über den Brenner sind in [May-2] zu finden.

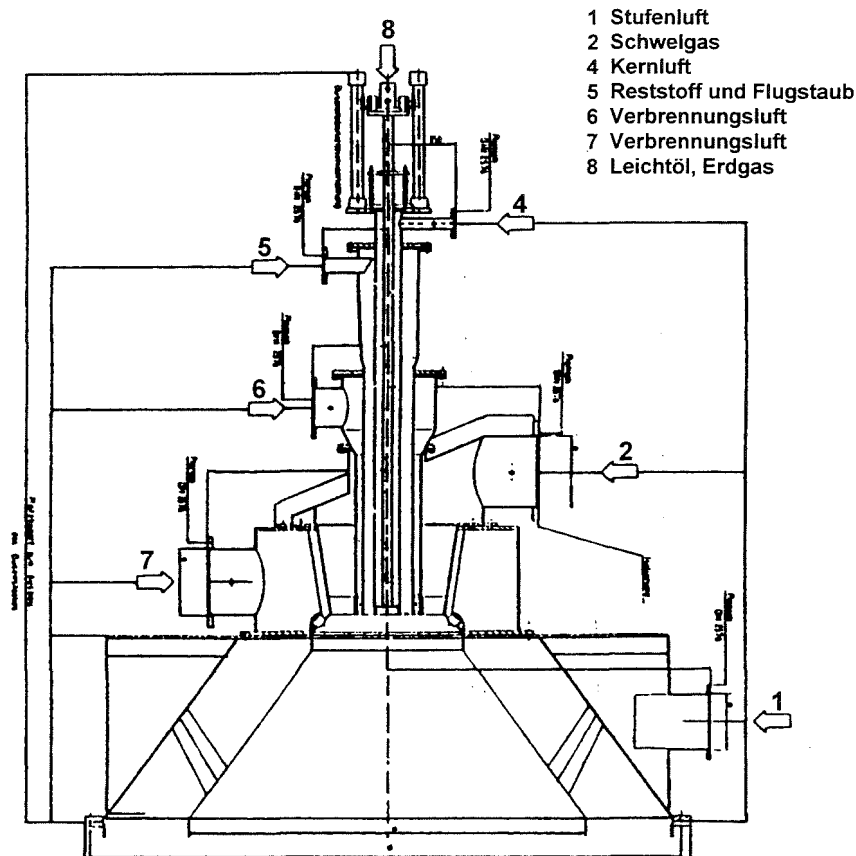


Abbildung 8: Mehrstoffbrenner [Berwein-8]

Die Verbrennung fängt in der Brennermuffel bei einem Lambda-Wert von etwa 0,8 und Temperaturen von ca. 1150 °C an [Berwein-8]. Meininger et al. nennen für den Luftüberschuß einen Lambda-Wert von 1,3. Baumgärtel und Berwein [Baumgärtel-2] erwähnen einen Wert von 1,2 für den Brennkammerausgang. Bei einem Luftüberschuß von Lambda 1,3 werden adiabatische Verbrennungstemperaturen von 1400 bis 1600 °C erreicht.

Dieser geringe Luftüberschuß reduziert die später an die Umgebung abzugebende Reingasmenge in Abhängigkeit von dem Heizwert des Mülls auf etwa 3000 Nm^3/t Müll [Meininger]. Nach [Thomé-K.-1] und [Baumgärtel-1] beträgt die Abgasmenge: 2600 bis 3300 Nm^3 (tr) pro t Müll. In [Thomé-K.-2] wird ein Volumenstrom im Bereich zwischen 2.600 bis 3000 Nm^3/t (tr) Abfall genannt.

Die Dimensionierung der Nachbrennkammer garantiert Verweilzeiten von mehr als 2 s bei Temperaturen über 1200 °C [Berwein-8]. In [Neubert] und [Berwein-9] wird eine Verweilzeit von mehr als 1 s bei Temperaturen von oberhalb 1200 °C angegeben. Nach [Ahrens-1] beträgt die Verweilzeit oberhalb von 1000 °C nach der letzten Luftzugabe etwa 2 s. Am

Ausgang der Hochtemperaturbrennkammer hat das Abgas eine Temperatur von 1250 bis 1300 °C [Thomé-K.-1].

Die hohen Temperaturen in der Brennkammer führen zu einer flüssigen Schlacke, die in einem Naßaustrag glasartig erstarrt. Die Schlackemenge beträgt ca. 14 Gew.-% der Rohmüllmenge [Bischofsberger]. Um einen sicheren Abfluß der Schlacke zu gewährleisten, müssen die Brennkammerwandtemperaturen 100 bis 150 °C über dem Ascheschmelzpunkt liegen [Berwein-4]. Nach Ergebnissen von Berwein und Aurin [Berwein-4] wird bei Temperaturen von etwa 1300 °C ein zuverlässiger Schlackeabfluß erreicht. Die Temperatur von 1300 °C wird mit ungekühlter Verbrennungsluft und Rauchgasrezirkulation erreicht [Neubert]. In diesem Bereich wird die Temperatur konstant gehalten und ist weitgehend unabhängig von dem Heizwert der Abfälle [Ahrens-2]. Weitere Angaben zur Temperatursteuerung und über die Schmelzvorgänge in der Brennkammer findet man in [Berwein-8].

Die flüssige Schlacke erfüllt daneben eine weitere Funktion. Durch ein zähes Fließverhalten der Schlacke, das auch bei Temperaturen bis 1500 °C noch gegeben ist, wird ein stabiler Schutzfilm an den Wandungen der Brennkammerausmauerung gebildet [Berwein-4]. Der Schmelzpunkt des Materials beträgt 1100 bis 1150 °C, die innere Wandtemperatur liegt bei 1050 °C [Thomé-K.-1]. Dadurch haftet eine Schlackeschutzschicht an der Oberfläche [Thomé-K.-1].

4.5 Kessel

Wie bei anderen thermischen Abfallbehandlungsanlagen kann auch bei dem Schwel-Brenn-Verfahren die Wärme aus den Rauchgasen in einem Kessel mit einem Wirkungsgrad von über 75 % in nutzbare Wärmeenergie umgewandelt werden [Thomé-K.-1]. Mit den Strahlungs- und Berührungsheizflächen werden die Rauchgase im Kessel abgekühlt.

Der Kessel ist ein sogenannter Horizontalzugkessel, bei der die Konvektionsbereiche horizontal durchströmt werden [Redmann-1]. Der Kessel besitzt ein Naturumlaufsystem und die Dampfparameter liegen bei 400 °C und 40 bar [Anton] [Kanczarek-1] [Kanczarek-3]. Die Rauchgastemperatur liegt beim Eintritt in den Elektrofilter unterhalb von 240 °C [Ahrens-1] [Ahrens-3]. Nach Redmann [Redmann-2] beträgt die Temperatur an dieser Stelle 200 °C.

Von der erzeugten elektrischen Energie wird ein Teil für den Eigenverbrauch der Anlage benötigt. Die überschüssige elektrische oder thermische Energie kann in öffentliche Versorgungsnetze eingespeist werden. Neben der Verstromung oder der Gewinnung von Prozeßdampf ist auch eine Wärmeauskopplung z.B. für die Fernwärmenutzung möglich [Meininger]. Der Energieüberschuß ist mit dem anderer Abfallverbrennungsanlagen vergleichbar [Thomé-K.-2].

Die Kesselstäube werden in die Brennkammer zurückgeführt [Meininger]. Die Auslegung dieser Rezirkulationsvorgänge orientiert sich an Kohlekraftwerken mit Schmelzkammerfeuerung [Berwein-4]. Berwein und Kanczarek [Berwein-5] erwähnen eine Zumischung zu dem Feinreststoff vor der Verbrennung.

4.6 Rauchgasreinigung

Die Rauchgasreinigung am Ende des Verbrennungsprozesses erfolgt mit den Verfahrensstufen, die aus der Hausmüllverbrennung bekannt sind. Während der langen Entwicklungsgeschichte des Schwel-Brenn-Verfahrens veränderten sich die gesetzlichen Vorschriften und Grenzwerte für die Rauchgasreinigung von Abfallverbrennungsanlagen. In der Literatur werden folglich unterschiedliche Verfahrenskombinationen für die Rauchgasreinigung erläutert. Allerdings geht aus den Publikationen nicht immer deutlich hervor, ob sich die Angaben auf die existierende Anlage im Technikumsmaßstab oder großtechnische Anwendungen beziehen.

- [Redmann-2] (1992) für Ulm-Wiblingen
E-Filter, Sprühtrockner, Zyklon, einstufiger Wäscher, Feinreinigung mit Gewebefilter
- Thomé-Kozmiensky [Thomé-K.-2] (1989)
Elektrofilter - Sprühtrockner - zweiter Elektrofilter - zweistufige Wäsche - Saugzug - Kamin
- May und Ahrens-Botzong [May-4] (1992), [Kanczarek -1] [Kanczarek-3]
Elektro- /oder Schlauchfilter - Sprühtrockner - Gewebefilter - zweistufige Wäsche - Saugzug - Wärmetauscher - SCR-Denox - sorptive Feinreinigung - Kamin.

Die Einhaltung der aktuellen Grenzwerte ist gewährleistet. Auf eine Zusammenstellung von Meßdaten wird an dieser Stelle verzichtet und auf die Literatur verwiesen [Ahrens-2]. Weitere Aussagen zur Rauchgasreinigung sind in anderen Veröffentlichungen [Meininger] [Berwein-4] [Berwein-8] [Baumgärtel-3] [Berwein-7] enthalten.

Die Flugstäube aus dem Elektrofilter werden wie die Kesselstäube wieder in die Brennkammer zurückgeleitet [May-4]. Nach einem anderen Bericht [Klauer] werden die Stäube aus dem Elektrofilter in die Drehtrommel zurückgeführt.

Nach [Ahrens-1] verbleiben 2 bis 3 % als Rauchgasreinigungsrückstand, der als Sondermüll entsorgt werden muß. Werden im Bereich der Rauchgasreinigung zusätzliche Wertstoffe wie HCl, NaCl oder Ca_2SO_4 gewonnen, so müssen nur noch ca. 0,1 % der eingesetzten Abfallmenge deponiert werden.

Meininger et al. [Meininger] geben eine Rückstandsmenge aus der Rauchgasreinigung von 25 kg je 1000 kg Abfall an. Diese geringe Menge ergibt sich aufgrund der Rückführung der

Kessel- und Filterstäube in die Brennkammer. Einschränkend ist darauf hinzuweisen, daß sich diese Angabe nicht auf die modernste Version der Rauchgasreinigung bezieht. Die sorptive Feinreinigung ist in dem genannten Wert nicht enthalten.

Am Ende der Rauchgasreinigung befindet sich ein Flugstromreaktor, der an der Anlage zur Einhaltung der Grenzwerte nach der 17. BImSchV nachgerüstet worden ist. Hier werden überwiegend Dioxine und Furane an einem Gemisch aus Kalk und Aktivkohlenstaub abgeschieden [Egerer]. Der in diesem Flugstromreaktor verwendete Feststoff, eine Kalk-Aktivkohle-Mischung oder Herdofenkoks, kann in der Brennkammer mitverbrannt werden. Auf diesem Weg erfolgt eine thermische Zerstörung der adsorbierten Schadstoffe [Rhodovi]. Anstelle des Flugstromreaktors kann auch ein Aktivkohle-Festbettfilter eingesetzt werden.

4.7 Die Demonstrationsanlage in Ulm

Die Anlage in Ulm-Wiblingen dient seit 1988 als Demonstrationsanlage für das Schwel-Brenn-Verfahren. In dieser Anlage wird Hausmüll der Stadt Ulm behandelt [Kanczarek-2]. Der Durchsatz wird mit 250 kg [Berwein-9] bzw. 300 kg [Ahrens-3] pro Stunde angegeben.

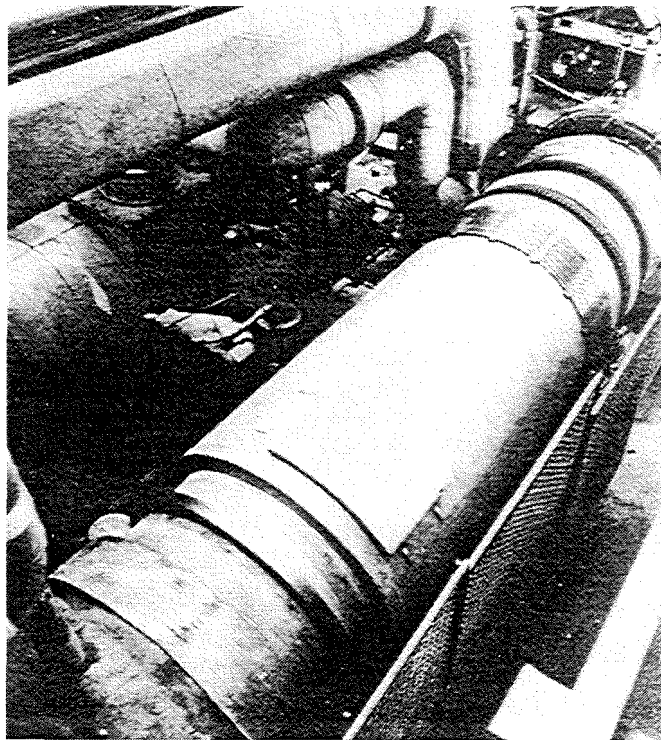


Abbildung 9: Ansicht der Schweltrommel [Berwein-9]

Die Länge der Schweltrommel beträgt 4,6 m und der Durchmesser 0,9 m [Galaske]. Anhand dieser Anlage wurden verschiedene Meßprogramme und Gutachten hinsichtlich der großtechnischen Anwendung erstellt [Marb] [Berghoff].

Mit der Anlage in Ulm-Wiblingen wurden auch Versuche zur thermischen Behandlung der Shredder-Leicht-Fraktion durchgeführt, die bei der Entsorgung alter Kraftfahrzeuge entsteht. Entsprechende Versuche wurden in Kooperation mit dem Verband der Kunststoffherstellenden Industrie (VKE) und der Bayer AG erfolgreich durchgeführt [Rhodovi] [Redmann-2]. In einem Zeitraum von 3 Wochen wurde die Anlage ausschließlich mit der Shredder-Leicht-Fraktion aus der Altautoentsorgung beschickt, wobei insgesamt 30 t dieses Abfalls durchgesetzt worden sind. Eine Modifizierung an der Demonstrationsanlage war nicht erforderlich [Ahrens-3] [Redmann-2]. Störeinflüsse durch die speziellen Abfalleigenschaften können relativ einfach beseitigt werden.

Die Shredderleichtfraktion wurde ohne eine zusätzliche Zerkleinerung eingesetzt [Redmann-2]. Die Heizgastemperatur sank von 520 °C auf 310 °C, gleichzeitig wurde der Shredderabfall auf 480 °C aufgeheizt. Im Vergleich zum Betrieb mit Hausmüll wird über einen höheren Ascheanteil und einen hohen HCl-Gehalt im Abgas berichtet [Redmann-2].

5 Reststoffe

Nach Kapitel 4 entstehen beim Betrieb einer Schwel-Brenn-Anlage verschiedene Reststoffe. Es handelt sich um zwei Metallfraktionen, Inertmaterial und Schmelzgranulat. Für eine Abschätzung der Umweltgefährdung dieser Reststoffe ist ihr Elutionsverhalten von größerer Bedeutung als deren stoffliche Zusammensetzung. Um das Langzeitverhalten von Reststoffen zu untersuchen, werden häufig zwei Elutionstests angewendet, der in Deutschland vorgeschriebene DEV S4 (Deutsches Einheitsverfahren Teil S4) [DIN 38414] und der Schweizer Eluattest TVA [Verordn.]. Im folgenden Text werden die entsprechenden Eluat-tests und die Eigenschaften dieser Reststoffe genauer erläutert.

5.1 Eluattests

Beim DEV S4 wird die Schlacke mit einer Korngröße < 10 mm mit destilliertem Wasser, in einem Verhältnis flüssig : fest (L:S) gleich 10, 24 Stunden in einem Überkopfschüttler eluiert. Der pH- Wert wird dabei nur von der Probe bestimmt und liegt bei frischen Rostaschen aus konventionellen MVA zwischen 10 und 12,5. Von einigen Autoren wird kritisiert, daß in diesem Test nicht berücksichtigt wird, daß die Reststoffe auf einer Deponie mit saurem Regenwasser und CO_2 in Kontakt kommen, wodurch der pH im Eluat gesenkt wird [Faulstich] [Esser] [Merz]. Schwermetalle zeichnen sich im allgemeinen durch ein Löslichkeitsminimum im schwach alkalischen Bereich (pH 9-11) aus. Die gemessenen Schwermetallkonzentrationen im Eluat des DEV S4 liegen dementsprechend meist niedriger als bei Tests, die eine pH-Senkung simulieren [Sloot]. Eine Ausnahme bildet das Pb, dessen Löslichkeit ab pH 11,5 exponentiell ansteigt.

Beim Schweizereluattest (TVA) wird der pH-Wert durch CO₂, das das Probenmaterial durchströmt, eingestellt. Die Probe wird zweimal 24 Stunden mit einem L:S gleich 10 gelaugt. Das mit CO₂ gesättigte destillierte Wasser soll einen Zeiträffereffekt haben [Verordn.]. Im Gegensatz zum DEV S4-Test wird zwar die pH senkende Wirkung des Regens und des Luft-CO₂ berücksichtigt, die Sättigung mit CO₂ bewirkt aber, daß durch die Bildung von Hydrogencarbonaten andere Löslichkeitsgleichgewichte zu beachten sind, was wiederum bei einigen Schwermetallen zu höheren Konzentrationen führen kann.

5.2 Metallfraktionen

Aus dem Siebüberlauf werden zwei verschiedene Metallfraktionen gewonnen. Es werden Eisenschrott und NE-Metalle aussortiert. Beide Fraktionen liegen sehr sauber vor, denn bei Temperaturen im Bereich von 450 °C und einer reduzierenden Atmosphäre werden die Metalle weder geschmolzen noch oxidiert. [Berwein-9]. Die Metalle werden von Farben und anhaftenden Kunststoffen befreit [Thomé-K.-2] [Berwein-6].

Der Eisenschrott besitzt eine Schüttdichte von 400 kg/m³ und einen Reinheitsgrad von 98 % [Berwein-9] [May-1]. An einer anderen Stelle [Berwein-5] werden in der Literatur 92 % genannt. Die Schüttdichte läßt sich durch Verdichtung auf 900 kg/m³ erhöhen [Berwein-9]. Der Eisenschrott erfüllt damit die Anforderungen für eine Verwertung [Berwein-9].

Die NE-Metalle fallen in einer zweiten Schrottfraktion an, die zu 70 % aus Aluminium besteht [Berwein-9]. Berwein und Kanczarek [Berwein-5] erwähnen einen Aluminiumanteil von 73 %. Der Anteil an Aluminium in den Nichteisenmetallen wird zwischen 70 und bis 80% angegeben [Berwein-5] [May-1] [Hornung]. Nach [Berwein-9] bereitet der Fremdmetallgehalt durch eine Cu/Al-Abtrennung mit einem Wirbelstromverfahren keine Probleme.

Aufgrund dieser Eigenschaften werden für die beiden Metallfraktionen Erlöse erwartet [Hornung] [Meininger].

5.3 Inertmaterial

Diese Fraktion stammt wie die beiden Metallfraktionen aus der Aufarbeitung der festen Reststoffe nach der Verschmelzung. Die Inertfraktion liegt nach der Verschmelzung als sehr sauberes Material vor. Durch die Staubabbläsung sind die Verunreinigungen an der Oberfläche nur geringfügig [May-1].

Nach Versuchen des TÜV Bayern (Ergebnisse in [Berwein-9] [Berwein-5] [Kanczarek-2]) werden in Eluierversuchen nach dem DEV-S4 die Grenzwerte für eine Ablagerung in der Deponieklasse I (Deponien für Bodenaushub) nicht überschritten [Meininger].

Für die Korngrößen werden Werte zwischen 5 und 25 mm angegeben. Die Schüttdichte beträgt 1300 kg/m³ [Berwein-5].

5.4 Schmelzgranulat

Das Schmelzgranulat fällt bei der Hochtemperaturverbrennung in der Brennkammer an. Es enthält die Mineralstoffe aus dem Feinreststoff und aus den Kessel- und Filterstäuben, die in den Verbrennungsprozeß zurückgeführt werden [Berwein-9].

Das Schmelzgranulat entsteht bei einer Temperatur von 1250 bis 1300 °C, d.h. 100 bis 150 °C über der Schmelztemperatur der Rohmaterialien [May-4] [Meininger]. Die Schmelze erstarrt in einem Wasserbad zu einem Granulat. Dieses weist eine Rohdichte von 2600 bis 2800 kg/m³ und eine Korngröße von ca. 5 mm auf [Berwein-9] und [May-1]. Die Schüttdichte beträgt 1200 bis 1400 kg/m³ [May-1]

Die folgende Tabelle enthält Analysedaten für das Schmelzgranulat im Vergleich mit dem Granulat aus Kraftwerken mit Schmelzkammerfeuerung.

Tabelle 6: Vergleich von Schmelzgranulat aus dem Schwel-Brenn-Verfahren, Rückstand aus Schmelzkammerfeuerungen für Kohle sowie und natürlicher Lava [Kanczarek-1] [Berwein-9] [Kanczarek-2] [Berwein-8] [Siemens]

Bestandteile	SBV-Granulat (Mittelwerte) [Gew.-%]	Granulat inländischer Steinkohle [Gew.-%]	Basaltlava Carmelenberg/ Ochtendung, Vordereifel (Mittelwerte) [Gew.-%]
SiO ₂	55	45 - 55	45,01
CaO	15	2 - 6,5	9,63
Al ₂ O ₃	16	24 - 31	18,67
Fe ₂ O ₃	5	3 - 10	11,03 (inkl. FeO)
Na ₂ O	3,5	0,4 - 1,5	3,24
K ₂ O	2,5	3 - 5	5,2
MgO	2	1,1 - 3	6,75
PbO	0,09	<0,1	
TiO ₂	0,7	0,9 - 1,2	
MnO	0,2	0,1 - 0,2	0,1
ZnO	0,2	0,1 - 0,3	
SO ₃	0,02	0,3 - 0,7	
Cl	<0,08	<0,01	
PO ₄ (P)	0,7		
Rest-C	<0,06		
Sonstige	1-3	3 - 3,5	0,28

Nach Tabelle 6 zeigt das Schmelzgranulat aus dem Schwel-Brenn-Verfahren eine ähnliche Zusammensetzung wie das Granulat aus einer Schmelzkammerfeuerung. Das Schmelzgranulat besteht nur zu 0,2 Gew.-% aus unverbrannten Material [Egerer]. Hornung [Hornung] nennt einen Restkohlenstoffgehalt von weniger als von 0,1 %. Ähnliche Angaben sind auch in anderen Veröffentlichungen enthalten [Meininger].

In [Ahrens-1], [Ahrens-2], [Berwein-4], [Berwein-10], [Kanczarek-1], [May-1] und [Thomé K.-2] sind für die Bestandteile mit mehr als 1 Gew.-% ähnliche Daten enthalten. Für die umweltrelevanten Schwermetalle sind in der Literatur insbesondere für Quecksilber nur sehr wenige Informationen zu finden. Die entsprechenden Konzentrationsangaben sind in Tabelle 7 zusammengestellt und weisen zum Teil große Schwankungen auf.

Tabelle 7: Schwermetallkonzentrationen im Schmelzgranulat (in [Gew.-%])

Quelle	Blei	Cadmium	Quecksilber
[Ahrens-1]	PbO < 0,20	CdO < 0,001	
[Ahrens-2]	PbO ₂ < 0,20	CdO < 0,001	
[Berwein-4]	Pb 0,085	Cd 0,0004	Hg < 0,00004
[Berwein-10]	Pb 0,08		Hg < 0,000005
[Kanczarek-1]	PbO 0,09		
[May-1]	PbO < 0,30	CdO < 0,001	

In der Literatur werden Analyseergebnisse der Inhaltsstoffe des Schmelzgranulats [Berwein-9] [Kanczarek-2] [Berwein-8] [Siemens] und [Kanczarek-1] und der Eluate nach DEV S4 und TVA an Schmelzgranulaten und Inertfraktion [Berwein-9], [Kanczarek-2], [Berwein-5], [Berwein-8], [Siemens], [Kanczarek-1] aufgeführt. Die zitierten DEV S4-Tests wurden vom TÜV Bayern [Berwein-9] [Berwein-5] [Kanczarek-2] durchgeführt.

Die Ergebnisse der Eluattests zeigen, daß die Konzentrationen im DEV S4-Test unter den Grenzwerten der Deponieklasse 1 von NRW und der TASI liegen (Tabelle 8). Auch die Grenzwerte für endlagerfähige Reststoffe der TVA werden nach dem Schweizer Eluattest eingehalten.

Tabelle 8: Eluatanalyse für das Schmelzgranulat [Kanczarek-1], [May-1] (in [mg/l])

	DEV S4- Eluat Schmelzgranulat	DEV S4-Eluat Inertfraktion >5 mm	Deponiekl 1 NRW	Deponiekl. 1 TASI
pH-Wert	8,9	9,46	5,5 - 10	5,5 - 13
Leitfähigk. uS/cm	85	317	<1000	<10000
TOC				20
Phenole				0,2
Antimon	<0,005	<0,005	0,05	
Aluminium	0,64			
Arsen	<0,005	<0,002	0,05	0,2
Barium	0,15	0,1	0,5	
Beryllium	0,002	0,001	0,004	
Blei	<0,05	<0,05	0,05	0,2
Bor	<0,005	0,019	1,0	
Cadmium	0,002	0,0005	0,005	0,05
Chrom	0,031	<0,01	0,05	
Chrom VI	<0,01	<0,01	0,01	0,05
Eisen	0,63	0,004	1,0	
Kobalt	<0,005	<0,005	0,05	
Kupfer	0,08	0,01	0,1	1,0
Mangan	<0,02	<0,005	0,5	
Nickel	<0,008	<0,005	0,05	0,2
Quecksilber	<0,0005	<0,0005	0,001	0,005
Selen	<0,005	<0,005	0,01	
Silber	<0,004	<0,001	0,01	
Thallium	<0,01	<0,01	0,01	
Vanadium	<0,005	<0,005	0,05	
Zink	0,038	0,01	0,1	2,0
Zinn	<0,006	<0,005	0,5	
Fluor	<0,09	<0,05	1,5	5,0
NH ₄ (N)	<0,05	0,03	0,08	4,0
Chlor	1,3	50	200	
CN	<0,01	<0,01	0,05	0,1
NO ₃ (N)	<0,1	<0,01	11,3	
NO ₂ (N)	<0,03	<0,02	0,15	
PO ₄ (P)	0,29	<0,02	1,6	
SO ₄	22	25	250	
AOX				0,3
Abdampfr. %				3,0

Ein Vergleich des Elutionsverhaltens zwischen dem Schmelzgranulat aus dem Schwel-Brenn-Verfahren und Rostaschen moderner konventioneller Abfallverbrennungsanlagen zeigt keine signifikanten Vorteile für das eine oder andere Verfahren [Vehlow].

5.5 Verwertungsmöglichkeiten

Die Auslaugtests ergeben keinen Hinweis auf eine Gefährdung der Umwelt durch Inertmaterial und Schmelzgranulat. Die Schwermetalle werden durch den Schmelzvorgang in die Matrix des Granulats eingebunden, so daß bei Eluattests nur sehr geringe Mengen eluiert werden. Nach Ergebnissen vom TÜV Bayern (Tabelle 8) kann das Schmelzgranulat auf Deponien der Klasse 1 (Erdaushubdeponien) abgelagert werden.

Für das Granulat aus dem Hochtemperaturteil des hier vorgestellten Verfahrens sollte eine Verwertung im Landschafts- oder im Wegebau möglich sein, denn in der Vergangenheit konnte das Granulat aus den Schmelzkammerfeuerungen in den genannten Bereichen fast vollständig verwertet werden [Berwein-9]. Wie die in der Tabelle 4 dargestellten Analyseergebnisse zeigen, gleicht das Schmelzgranulat in seinem chemischen Stoffbestand diesem Material. Nach Aussage in [Berwein-9] und [May-1] eignet sich auch die Inertfraktion für den Einsatz als Baumaterial im Wege- und Straßenbau oder für Lärmschutzwälle. Im Straßenbau wurden 1988 erfolgversprechende Versuche durchgeführt [Berwein-8] [Berwein-9].

In der Literatur wird ebenfalls eine Verwertung als Betonzuschlagstoff vorgeschlagen [Meininger]. So zeigten May et al. [May-3], daß die Anforderungen nach DIN 1164 bzw. 4227 und ASTM C151 auch bei Verwendung der beiden Materialien als Zusatz im Zementmörtel erfüllt werden. Werden das Inertmaterial und Schmelzgranulat als Zusatz in einer Bitukies-Asphaltschicht eingesetzt, soll die Stabilität gegenüber der Verwendung von Rundkies und Natursand um 30% erhöht werden [May-1].

6 Bilanzen

Für die Beurteilung eines thermischen Verfahrens zur Abfallbehandlung reicht eine Betrachtung der Verfahrensschritte und der Reststoffe, wie in den vorangegangenen Kapiteln vorgenommen, nicht aus. Es müssen verstärkt Massen-, Stoff- und Energiebilanzen herangezogen werden, die für das Schwel-Brenn-Verfahren in diesem Abschnitt zusammengefaßt werden.

Ein beschränkter Blick auf die an die Umgebungsluft abgegebenen Stoffströme, die Emissionen, bringt keine zusätzlichen Entscheidungskriterien. Die Verfahren zur thermischen Abfallbehandlung unterscheiden sich heute in ihren Emissionen nicht mehr. Die

geforderten Grenzwerte, in der Bundesrepublik Deutschland in der 17. BImSchV festgelegt, werden von allen thermischen Verfahren eingehalten. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle nicht auf die Emissionen eingegangen.

6.1 Massenbilanzen

Die Massenbilanzen zeigen, welche Mengen an Reststoffen an den einzelnen Prozeßstufen des Schwel-Brenn-Verfahrens anfallen. Die folgende Massenbilanz beruht auf einer Auslegung für Hausmüll mit einem Heizwert (H_u) von 10.000 kJ/kg.

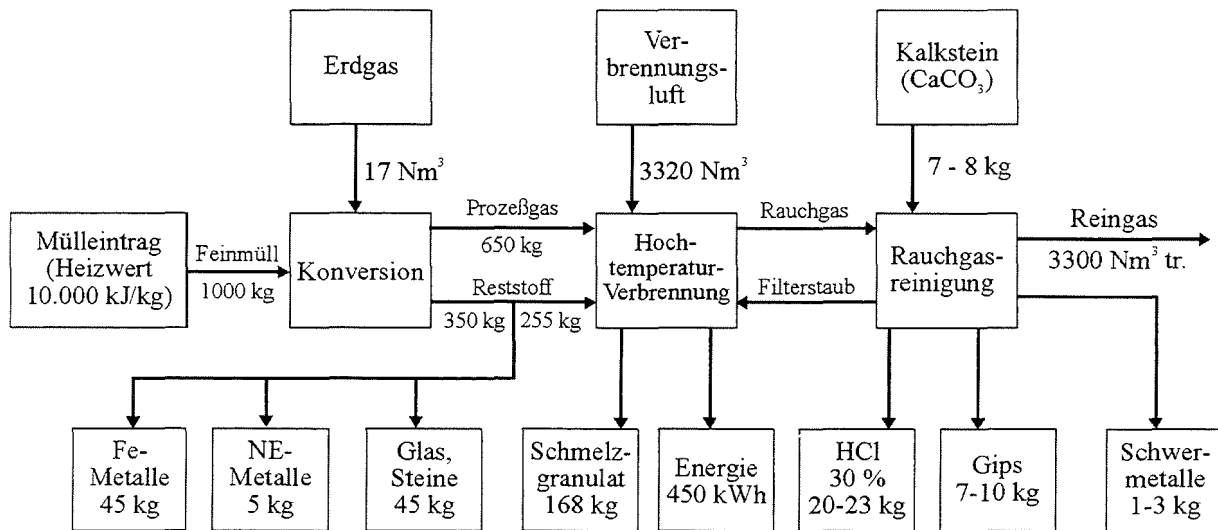


Abbildung 10: Massenströme des Schwel-Brenn-Verfahrens [Berwein-3]

Die Zahlenwerte in Abbildung 10 sind auch in Unterlagen der Fa. Siemens [Siemens] (1993) und anderen Berichten [Anton] veröffentlicht. In der Literatur sind allerdings auch andere Massenbilanzen publiziert.

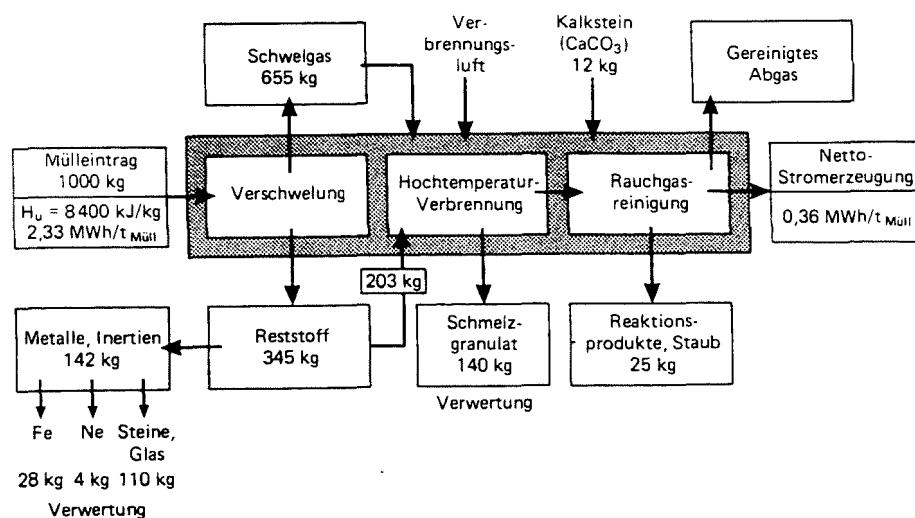


Abbildung 11: Massenströme des Schwel-Brenn-Verfahrens [Berwein-9]

Diese Daten sind so auch in [Berwein-4] zu finden. Die Massenbilanzen in [Kanczarek-2], [NN-2] und [Siemens] (1993) zeigen im Vergleich zu der Abbildung 11 Abweichungen bei der Rauchgasreinigung. Nach [Siemens] (1993) bildet die Hausmüllanalyse des Umweltbundesamtes von 1985 die Basis für diese Massenbilanz. Der entsprechende Heizwert (H_u) wird mit 8400 kJ/kg angegeben.

Vergleicht man Abbildung 10 mit Abbildung 11, so sind sehr große Unterschiede festzustellen. Insbesondere die vom Reststoff der Verschwelung abgetrennte Inertmaterialmenge schwankt zwischen 45 und 110 kg. Die der Hochtemperaturverbrennung zugeführte Menge beträgt 255 kg bzw. 203 kg. Die unterschiedlichen Kalksteinmengen in Abbildung 10 und Abbildung 11 ergeben sich aus anderen Konzeptionen der Rauchgasreinigung. Die Gewinnung von Salzsäure führt zu einem geringeren Bedarf am Neutralisationsmittel Kalkstein (CaCO_3).

Auf eine Diskussion von weiteren Diagrammen zur Massenbilanz wird an dieser Stelle verzichtet. Diese Diagramme sind im Anhang zu finden.

In der Literatur sind noch weitere Zahlenwerte enthalten, die in der folgenden Tabelle zusammengestellt sind.

Tabelle 9: Daten zur Stoffbilanz [Ahrens-3] [May-1]

Stoff	Massenstrom pro 1 t Abfall
Schmelzgranulat	150 bis 200 kg
Eisenmetalle	20 bis 50 kg
Aluminium	5 bis 10 kg
Steine/Glas	50 bis 100 kg

Diese Daten beruhen auf Erfahrungen an der Anlage in Ulm und Abschätzungen der zukünftigen Restmüllzusammensetzung [Ahrens-3] (1993). Die Daten geben etwa den Schwankungsbereich wieder, der sich auch aus dem Vergleich der Abbildung 10 mit Abbildung 11 ergibt. Die Menge an Schmelzgranulat aus der Hochtemperaturverbrennung ist mit 150 bis 200 kg deutlich kleiner als die Schlackemenge bei der Hausmüllverbrennung in Rostanlagen, denn beim Schwel-Brenn-Verfahren wird vor der Hochtemperaturverbrennung eine Inertfraktion abgetrennt. Bei Rostanlagen fallen am Rostende etwa 300 kg je t Abfall als Schlacke an.

Addiert man die Massen in der Tabelle 9, so ergibt sich ein Minimalwert von 225 kg und ein Maximalwert von 360 kg. Als Mittelwert aus diesen beiden Zahlen errechnet sich ein Wert

von 292,5 kg, der sehr gut mit der durchschnittlichen Schlackemenge aus Rostverbrennungsanlagen übereinstimmt.

6.2 Stoffbilanzen

Stoffbilanzen stellen ein wichtiges Instrument für die Beurteilung von technischen Prozessen dar, denn sie ermöglichen genaue Aussagen über den Verbleib von einzelnen Stoffen, d.h. von chemischen Verbindungen oder Elementen. Die Grundlage für belastbare Stoffbilanzen sind zuverlässige Massenbilanzen und Konzentrationsangaben. In den Veröffentlichungen zum Schwel-Brenn-Verfahren sind aber für die Konzentrationen einzelner Stoffe und die Massenbilanz größere Schwankungen festzustellen (Siehe Abschnitt 5.4 bzw. Abschnitt 6.1).

Vor diesem Hintergrund sind die von Vogg [Vogg] berechneten Ergebnisse zum Verbleib bestimmter Schadstoffe nicht überraschend. Mit abgeschätzten Daten kann für Chlor eine plausible Stoffbilanz erstellt werden, bei Schwefel ergeben sich große Bilanzdefizite. Für Cadmium und Blei werden im Vergleich mit Daten der konventionellen Rostfeuerung ebenfalls Bilanzdefizite errechnet, die vermutlich durch nicht erreichte Gleichgewichtszustände bei den dokumentierten Versuchen zu begründen sind [Vogg].

Da in der Literatur zum Schwel-Brenn-Verfahren über Quecksilber nur sehr wenige Daten vorliegen, soll an dieser Stelle kurz auf den möglichen Verbleib von Quecksilber eingegangen werden. Nach [Braun] liegt Quecksilber bei der Abfallverbrennung im Rohgas als Quecksilber(II)-Chlorid vor. Aufgrund der gemeinsamen Verbrennung der Schwelgase mit der kohlenstoffhaltigen Feinfraktion in der Hochtemperaturbrennkammer ist davon auszugehen, daß bei dem Schwel-Brenn-Verfahren das Quecksilber im Rohgas nach dem Kessel ebenfalls als Quecksilber(II)-Chlorid vorliegt. Im Fall eines nassen Rauchgasreinigungssystems, wie es für das Schwel-Brenn-Verfahren vorgesehen ist, würde das Quecksilber in komplexierter Form als leicht lösliches Chloromercurat(II)-Ion in das Waschwasser des ersten Wäschers gelangen.

Für den abwasserfreien Betrieb eines nassen Rauchgasreinigungssystems, wie nach dem Anhang 47 der Rahmen-AbwasserVwV gefordert, müssen die Absalzungen aus den Wäschern eingedampft werden. Um bei der Eindampfung eine erneute Freisetzung von Quecksilber zu vermeiden, muß vorher eine Abscheidung erfolgen. In der Regel wird Quecksilber nach einer Neutralisation der Absalzungen als schwerlösliche Verbindung mit Natriumsulfid, TMT-15 oder einem anderen Stoff abgetrennt.

Der Literatur ist nicht zu entnehmen, ob Quecksilber bei dem Schwel-Brenn-Verfahren auch auf diesem Weg aus dem Prozeß ausgeschleust wird.

6.3 Energiebilanzen

Die Energiebilanzen, entscheidend von Massenbilanzen und Abfallheizwerten beeinflusst, sind ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung technischer Abfallverbrennungsanlagen. Auch wenn Abfallverbrennungsanlagen auf die thermische Behandlung von Abfällen ausgerichtet sind, kommt vor dem Hintergrund der aktuellen Umweltprobleme der Energiegewinnung bei der Abfallverbrennung eine große Bedeutung zu.

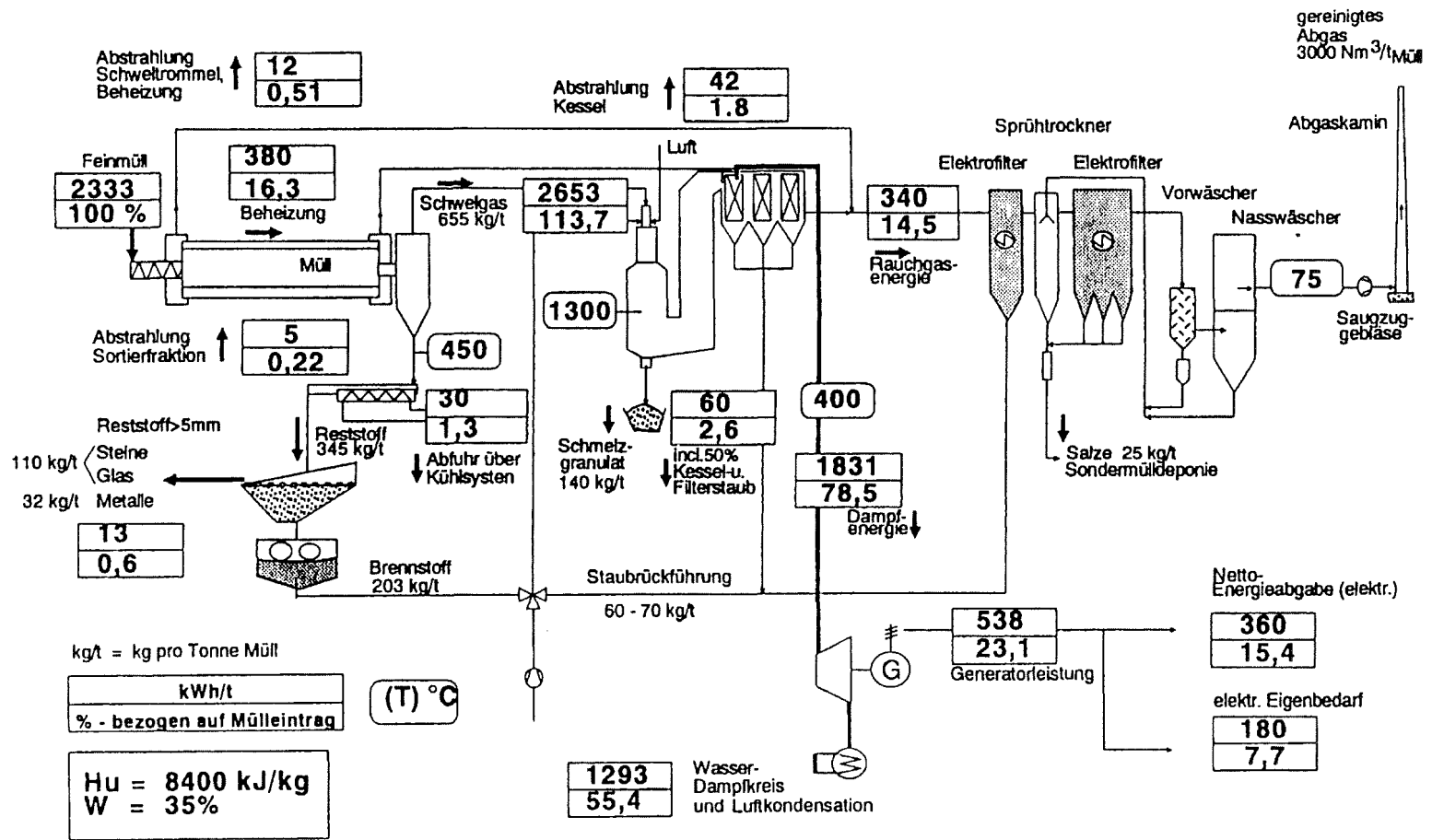
Im folgenden Text wird bei der Energiegewinnung nur die Stromerzeugung betrachtet. Zu dieser Möglichkeit der Energienutzung liegen für das Schwel-Brenn-Verfahren die meisten Daten vor. In Abhängigkeit vom Standort sind auch andere Wege der Energienutzung, Prozeßdampferzeugung, Kraftwärmekopplung oder Kombinationen, möglich.

In Meininger et al. [Meininger] wird ein exaktes Energiebilanz-Schema angegeben. Das abgebildete Schema geht von bundesdeutschem Hausmüll mit einem Heizwert von 8400 kJ/kg und einem Feuchtegehalt von 35 % aus.

Aus Abbildung 12 sind die einzelnen Energiebeträge und der prozentuale Anteil am Gesamtinput abzulesen. Die mit dem Feinmüll zugeführte Energiemenge von 2333 kWh/t entspricht einem mittlerem Heizwert von 8400 kJ/t. Das folgende Sankey-Diagramm zeigt die Aufteilung deutlicher.

Die hohen Verluste im Wasserdampfkreislaufs und der Luftkondensation liegen bei etwa 55 % und sind thermodynamisch begründet. Sie sind unabhängig vom thermischen Prozeß. Aus Abbildung 12 und Abbildung 13 ist für das Schwel-Brenn-Verfahren eine Stromabgabe von 360 kWh/t zu entnehmen. Dies entspricht 15,4 % des Inputs. Weitere Sankey-Diagramme aus der Literatur mit ähnlichen Daten sind im Anhang enthalten.

Abbildung 12: Energiebilanzschema für das Schwel-Brenn-Verfahren [Meininger]



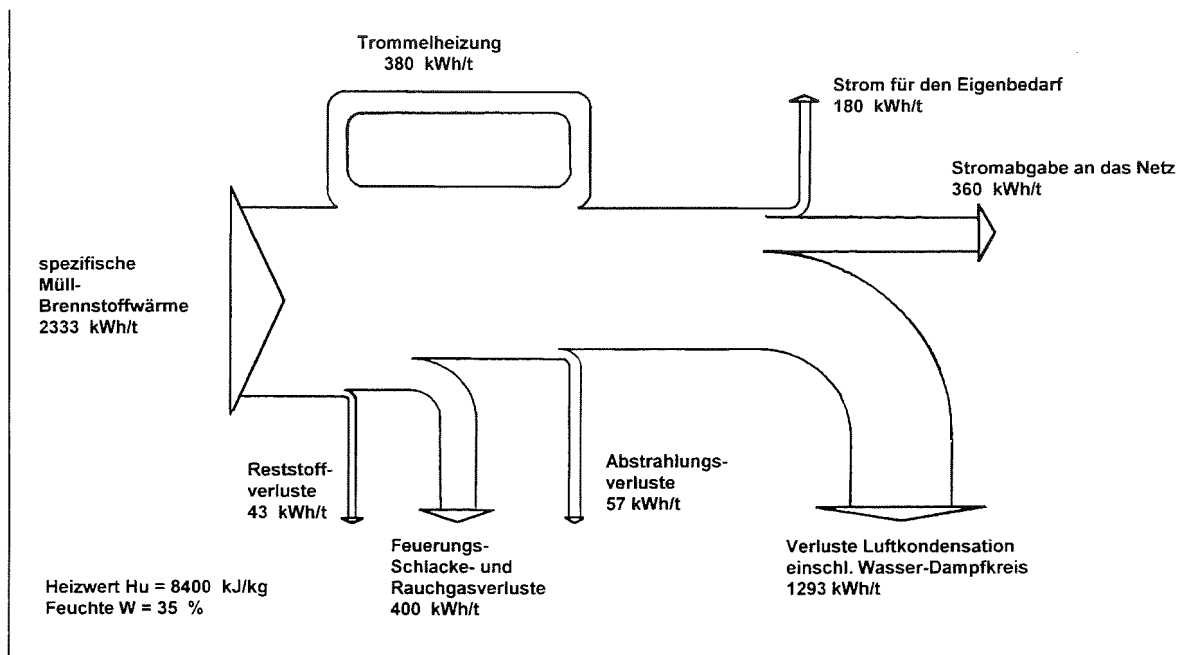


Abbildung 13: Sankey-Diagramm für das Schwel-Brenn-Verfahren [Meininger]

Für die Energieerzeugung werden in der Literatur an verschiedenen Stellen weitere Daten mitgeteilt, die in der folgenden Tabelle zusammengefaßt sind:

Tabelle 10: Angaben zur Energieerzeugung beim Schwel-Brenn-Verfahren

Quelle	Energieerzeugung [MWh/t _{Abfall}]	Bedingungen
[Kanczarek-2] [Berwein-9] [Berwein-4] [NN-2] [Siemens] (1993)	0,33 bis 0,36	Heizwert H_u : 8400 kJ/kg
[Berwein-10]	0,59	Heizwert H_u : 12000 kJ/kg
[Berwein-8]	0,46	Heizwert H_u : 11000 kJ/kg
[Siemens] (1993)	0,45	Heizwert H_u : 10000 kJ/kg
[Siemens] (1995)	0,53	Heizwert H_u : 10000 kJ/kg Erzeugung von Salzsäure und Gips
[Siemens] (1995)	0,55	Heizwert H_u : 10000 kJ/kg Mischsalzerzeugung

Nach [Hornung] und [Baumgärtel-3] sind die energetischen Verwertungsraten des Schwel-Brenn-Verfahrens mit denen von Rostfeuerungsanlagen vergleichbar, wenn in den konventionellen Anlagen keine Filterstäube und Schlacken eingeschmolzen werden. Die Netto-

Stromerzeugung wird in [Ahrens-3] mit 15-17 % der im Abfall gespeicherten Energie angegeben.

Ein energieautarker Betrieb einer Schwel-Brenn-Anlage ist nach den Aussagen von Meininger et al. [Meininger] auch dann möglich, wenn Klärschlamm als Brennstoff zugemischt wird. Allerdings ist eine Dosierung in Abhängigkeit von der Menge und des Wassergehaltes erforderlich.

6.4 Zusammenfassung

In der Literatur sind für das Schwel-Brenn-Verfahren für die Massen- und Energiebilanzen viele Informationen und Daten zu finden. Allerdings fehlen bei den Meßdaten und Diagrammen oft ergänzende Informationen über den Ursprung der Daten. So bleibt oft unklar, ob es sich um berechnete Daten oder Meßwerte aus der Technikumsanlage handelt. Außerdem zeigt ein Vergleich sowohl für die Massenbilanzen als auch für die Energiebilanzen sehr große Schwankungsbreiten.

Für die Schwankungen der Daten kommen drei Ursachen in Frage:

- die lange Entwicklungszeit des Verfahrens mit Veränderungen in der Abfallzusammensetzung
- geänderte Gesetzliche Grundlagen (z.B. Verpackungsverordnung)
- Veränderungen in der Rauchgasreinigung des Schwel-Brenn-Verfahrens aufgrund geänderter Emissionsgrenzwerte

Abschließend ist festzustellen, daß aus der Literatur nur ein Überblick über die Massenströme und energetischen Verhältnisse zu entnehmen ist. Im Fall umweltrelevanter Stoffe wie Blei und Cadmium zeigten sich bei der Bilanzierung große Defizite. Über den Verbleib von Quecksilber gibt es so gut wie keine gesicherten Informationen.

Vor diesem Hintergrund ist eine sichere Bewertung des Schwel-Brenn-Verfahrens und ein Vergleich mit anderen thermischen Verfahren zur Abfallbehandlung anhand der publizierten Daten kaum möglich.

7 Bewertungen und Vergleiche

Aufgrund der heutigen Entsorgungssituation ist die thermische Behandlung von Abfällen ein sehr aktuelles Thema. Folglich überrascht es nicht, daß in der Literatur mehrere Publikationen zu Vergleichen und Bewertungen verschiedener thermischer Behandlungsverfahren zu finden sind. Neben der etablierten Abfallverbrennung in Rostanlagen und dem Schwel-

Brenn-Verfahren werden zwei weitere neue Verfahren diskutiert, auf die hier nicht eingegangen wird.

Eine Beurteilung des Schwel-Brenn-Verfahrens für die thermische Abfallbehandlung anhand einer Anlage im technischen Maßstab ist, wie bei den beiden anderen neuen Verfahren, nicht möglich. Entsprechende Anlagen existieren zur Zeit noch nicht. In Bezug auf das Schwel-Brenn-Verfahren beruhen die Vergleiche in der Literatur auf Daten, die in diesem Bericht zusammengestellt worden sind. Ein zusätzlicher Vergleich an dieser Stelle würde daher keine neuen Erkenntnisse liefern. Statt dessen werden in diesem Abschnitt die in der Literatur publizierten Vergleiche der thermischen Behandlungsverfahren zusammenfassend vorgestellt.

Die Arbeit von Kielburger und Schmitz [Kielburger] enthält nur kurze Beschreibungen des Schwel-Brenn-Verfahrens und weiterer Techniken zur thermischen Abfallbehandlung ohne ausführliche Vergleiche der unterschiedlichen Verfahren. Nach Aussagen von Blume [Blume] liegt das Schwel-Brenn-Verfahren bei der Energienutzung etwas unter der Rostverbrennung und bei den Emissionen gibt es keine signifikanten Vorteile für ein Verfahren. Zu den gleichen Aussagen kommt eine andere Arbeit [Tauber], in der umfangreichere Daten mitgeteilt werden. Unter anderem werden für die spezifische Leistungsabgabe einer Rostverbrennungsanlage 500 kW/t Restmüll, für das Schwel-Brenn-Verfahren 450 kW/t Restmüll genannt.

Einen weiteren Vergleich mit Daten zu Stoff- und Energiebilanzen enthält die Arbeit von Becker [Becker]. Für die Wirkungsgrade werden die folgenden Daten mitgeteilt:

Tabelle 11: Energieausbeute bei der thermischen Abfallbehandlung bei einem Heizwert von 10 MJ/kg [Becker]

Verfahren	Wirkungsgrad
Rostfeuerung ohne Einschmelzung der Schlacke und Filterstäube	18 %
Rostfeuerung mit Einschmelzung	11,5 - 15 %
Schwel-Brenn-Verfahren	13 %

Ähnliche Angaben zum Wirkungsgrad mit Informationen zur Technik von verschiedenen Verfahren zur thermischen Behandlung von Abfällen findet man in [Scholz].

Einen detaillierten Vergleich zwischen dem Schwel-Brenn-Verfahren und der Rostfeuerung für den Standort Rugenberger Damm in Hamburg findet man in [Nottrodt]. Die Unterschiede in den Emissionen werden als gering bewertet, so daß sich aus diesen Daten keine Entscheidung für oder gegen ein Verfahren ableiten läßt. Die Berechnungen zum elektri-

schen Wirkungsgrad orientieren sich an den Vorgaben für den Standort. Wie in den anderen Vergleichen liegt der energetische Nutzungsgrad des Schwel-Brenn-Verfahrens niedriger als bei der Rostfeuerung. Für genaue Daten wird auf [Nottrodt] verwiesen.

Eine kritische Betrachtung der in der Literatur publizierten Vergleiche zeigt ein großes Problem. Bei dem Schwel-Brenn-Verfahren ist die Aufbereitung der Reststoffe nach der Schwelstufe integriert und der Eigenbedarf an Energie für den Betrieb erfaßt auch die Reststoffaufbereitung in die drei Fraktionen Eisenmetalle, Nichteisenmetalle und Inertmaterial.

Im Fall der Rostfeuerung fehlt für die Energiebilanz eine exakte Beschreibung des Bilanzraums. Die Rostasche, die am Ende des Rostes entsteht, muß für eine Verwertung aufbereitet werden. Der Begriff Aufbereitung bezieht sich auf die Prozesse der Metallabscheidung und Zerkleinerung. Die Notwendigkeit einer mechanischen Aufbereitung wird zwar in [Nottrodt] erwähnt, aber es bleibt unklar, inwieweit diese mechanische Aufarbeitung in der Energiebilanz berücksichtigt wird.

Der Vergleich von Mayer et al. [Mayer-2] enthält eine Gegenüberstellung zwischen dem Schwel-Brenn-Verfahren und der biologisch-mechanischen Restmüllbehandlung. Zusätzlich vergleichen die Autoren das Schwel-Brenn-Verfahren mit anderen thermischen Behandlungsverfahren. Durch ausführliche Betrachtung der dreistufigen biologisch-mechanischen Abfallbehandlung und des Schwel-Brenn-Verfahrens wird festgestellt, daß es für die Kriterien Umweltverträglichkeit und Reduzierung der Ablagerungsmengen Vorzüge für das Schwel-Brenn-Verfahren gibt. Nur die Toleranz gegenüber Inputschwankungen und die Realisierungsmöglichkeiten werden für die biologisch-mechanische Abfallbehandlung günstiger beurteilt. Für die Daten, die der Betrachtung zugrunde liegen und eine ausführlichere Diskussion wird auf die genannte Arbeit [Mayer-2] verwiesen.

Eine Bewertung des Schwel-Brenn-Verfahrens in Hinsicht auf die Ökologie erfolgt in der Arbeit von Depmeier et al. [Depmeier]. Der Beitrag ähnelt einer Ökobilanz, in dem ein Bilanzraum definiert und eine Sachbilanz erstellt und bewertet wird. Eine Wirkungsbilanz wird allerdings nicht erstellt.

Die Basis der in [Depmeier] durchgeführten ökologischen Bewertung ist ein Vergleich einer Schwel-Brenn-Anlage mit einer fiktiven thermischen Verwertungsanlage für Abfälle. Im Fall der fiktiven Verwertungsanlage wird von einem energieautarken Betrieb und nicht verwertbaren Reststoffen ausgegangen. Auf dieser Basis werden dann die ökologischen Vorteile für das Schwel-Brenn-Verfahren mit Hilfe von Literaturdaten und Annahmen berechnet. Da die Vorgaben für das zum Vergleich herangezogene fiktive Verwertungsverfahren deutlich schlechter sind als von Rostanlagen, können aus der Arbeit von Depmeier kaum Erkenntnisse für einen Vergleich des neuen Schwel-Brenn-Verfahrens mit der konventionellen Rostfeuerung abgeleitet werden.

8 Großtechnische Anwendung

Die erste großtechnische Schwel-Brenn-Anlage wird zur Zeit für den Zweckverband Abfallentsorgung Rangau (ZAR) bei Fürth mit einer Jahreskapazität von 100.000 t gebaut. Der Bau dieser Anlage geht auf eine Entscheidung aus dem Jahr 1989 des Zweckverbandes für dieses Verfahren zurück. Ausführliche Informationen zu dem Genehmigungsverfahren dieser Anlage findet man in [Mayer-1] und in [Rangau]. Außerdem sind an drei weiteren Standorten Entscheide zum Bau von Schwel-Brenn-Anlagen gefällt worden [Kanczarek-3].

In Berichten über eine großtechnische Anwendung des Schwel-Brenn-Verfahrens sind aber nicht nur Informationen über die Anlage in Fürth, sondern auch über frühere Planungen enthalten. An dieser Stelle erfolgt eine allgemeine Zusammenfassung mit dem Schwerpunkt auf der Anlage in Fürth.

Zwischen der halbtechnischen Verbrennungsanlage in Ulm und der großtechnischen Anlage in Fürth gibt einen großen Unterschied. Wie bei einem scale-up vom halbtechnischen auf technischen Maßstab wird die Anlage nicht nur vergrößert, sondern auch in der Anordnung der einzelnen Verfahrensstufen verändert. Die folgende Abbildung verdeutlicht dies.

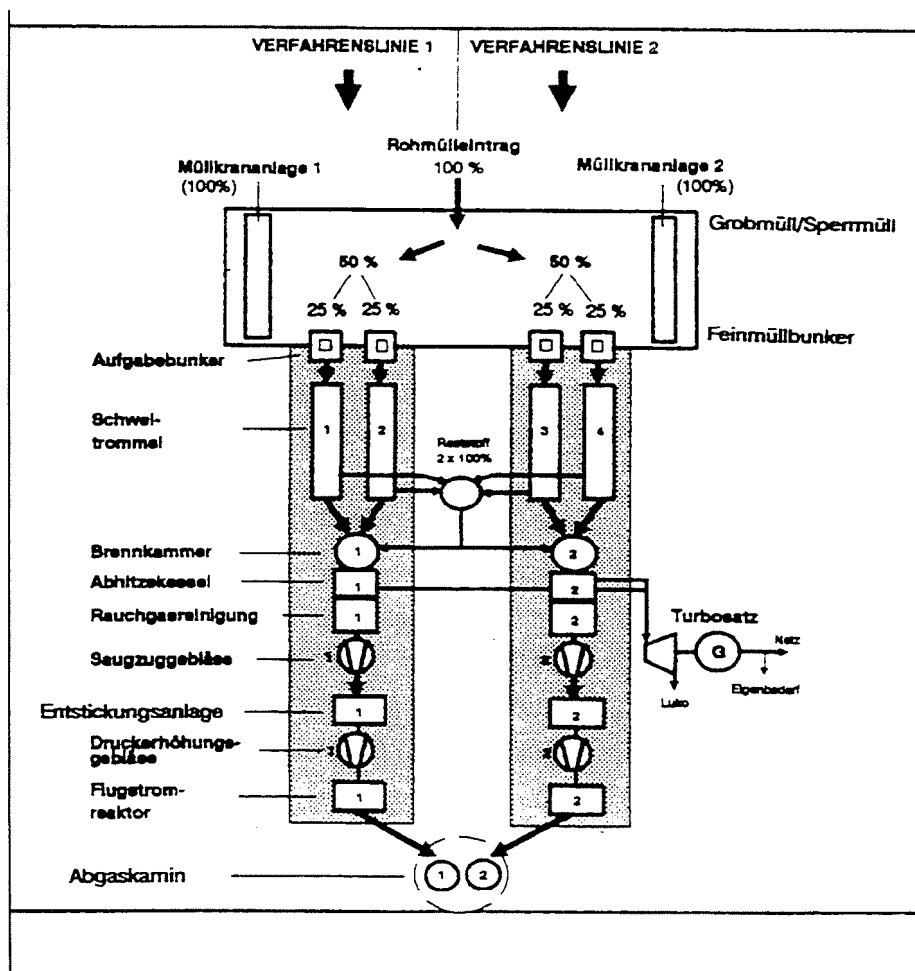


Abbildung 14: Verfahrensaufbau der Anlage in Fürth [Rangau].

Durch die Größe der Schweltrommeln und eine Parallelschaltung von Verfahreseinheiten kann die Größe eine Schwel-Brenn-Anlage verändert werden [Berwein-9] [Siemens]. Für die Auslegung wird von einer Schweltrommel ausgegangen, die für einen Durchsatz von 3 bis 5 t/h berechnet ist. Für größere Anlagenkapazitäten kann die Konversionstrommel auf 7 t/h vergrößert oder eine zusätzliche Verfahreseinheit gebaut werden [Berwein-5].

Nach Abbildung 14 werden im Gegensatz zu der Demonstrationsanlage in Ulm in Fürth zwei Verbrennungslinien errichtet, von denen jede für 50.000 t pro Jahr ausgelegt ist. Außerdem werden jeder Hochtemperaturbrennkammer zwei Drehrohre zugeordnet. Für jedes Drehrohr ist eine Kapazität von 5 t/h angegeben [Kanczarek-3]. Die Drehrohre sind 18,4 m lang und haben einen Durchmesser von 2,8 m [Galaske]. Für beide Verfahrenslinien sind separate Müllbunker vorgesehen. In Tabelle 12 und Tabelle 13 sind die Abfallzusammensetzung und die einzelnen technischen Daten für die Anlage in Fürth zusammengestellt.

Tabelle 12: Abfallzusammensetzung [Rangau], [NN-5] [Kanczarek-3] [Anton]

Hausmüll	36.700	[t/a]
hausmüllähn. Gewerbemüll, Straßenkehrsicht	34.000	[t/a]
Sperrmüll	7.600	[t/a]
Klärschlamm (min. 35 % TS)	21.700	[t/a]

Aus dem Verfahrensschema in Abbildung 14 ergibt sich, daß am Standort Fürth 4 Schweltrommeln installiert werden. Bei einem Gesamtdurchsatz von 20 t/h (Heizwert 8400 kJ/kg) muß jede Schweltrommel für einen Durchsatz von 5 t/h ausgelegt werden. Die Abmessungen für eine Schweltrommel dieser Kapazität sind in Tabelle 14 zusammengestellt.

Tabelle 13: Technische Daten für die Schwel-Brenn-Anlage in Fürth [Rangau], [NN-5]

Heizwert			
Abfallgemisch ohne Klärschlamm	10.000	[kJ/kg]	
Klärschlamm	2.700	[kJ/kg]	
Mischheizwert Abfall/Klärschlamm	8.400	[kJ/kg]	
Schüttdichten			
Haus- und Gewerbemüll, Mittelwert	300	[kg/m ³]	
Haus- und Gewerbemüll, Bandbreite	100 - 400	[kg/m ³]	
Sperrmüll, Mittelwert	100	[kg/m ³]	
Sperrmüll, Bandbreite	50-150	[kg/m ³]	
	Auslegung 1	Auslegung 2	
Müllzusammensetzung			
Haus- und Gewerbemüll	90 Gew.-%	71 Gew.-%	
Sperrmüll	10 Gew.-%	7 Gew.-%	
Klärschlamm	0 Gew.-%	22 Gew.-%	
Mülldaten			
Heizwert Hu	10000 kJ/kg	8400 kJ/kg	
Wassergehalt	23 %	27 %	
Unbrennbares	21 %	25 %	
Gesamtdurchsatz für beide Linien	16,8 t/h	20 t/h	
Spez. Luftmenge (Normzustand, feucht)	2,6 m ³ /kg	2,2 m ³ /kg	
Spez Rauchgasmenge (Normzst., feucht)	3,3 m ³ /kg	2,8 m ³ /kg	
Energieerzeugung			
el. Bruttoenergie	640 kWh/t	537 kWh/t	
el. Eigenbedarf	244 kWh/t	217 kWh/t	
Stromabgabe	396 kWh/t	320 kWh/t	
Frischdampfmenge	ca: 53 t/h		
Dampfparameter	ca. 37 bar, 395°C		
Brutto Energieerzeugung (elektrisch)	ca. 10,8 MW		

Tabelle 14: Daten für eine großtechnische Schweltrommel , Durchsatz 5 t/h [Baumgärtel-3]

Durchmesser	ca. 2,8 m
Länge	ca. 22 m
Neigung der Trommel	1,5 °
Drehzahl	2 min ⁻¹
Verweilzeit	ca. 1 h

Ähnliche Daten findet man in [Vollhardt] und [Thomé-K.-1]. Dort wird zusätzlich eine Heizfläche von 600 m² für die Trommel angegeben.

Als Heizgas für die Pyrolyseprozesse in der Schweltrommel wird bei der Anlage in Fürth Luft verwendet. Die Wärmeenergie wird in einem Dampf-Luft-Wärmetauscher und nachfolgend mit einem Strahlungswärmetauscher aus dem Rauchgas entnommen. Dieses Heizgas wird mit einem Gebläse im Kreis gefahren. Die Temperaturen liegen in den Bereichen, die in Kapitel 4.2 erwähnt worden sind.

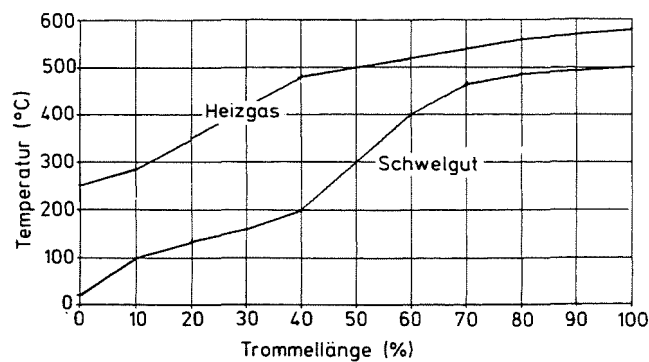


Abbildung 15: Temperaturprofil der Schweltrommel bei 50 % Last [Vollhardt]

Über die Hochtemperaturbrennkammer an der Anlage in Fürth liegen keine sicheren Informationen vor. Eine Abbildung dieser Brennkammer kann man der Arbeit von Baumgärtel und May [Baumgärtel-3] entnehmen.

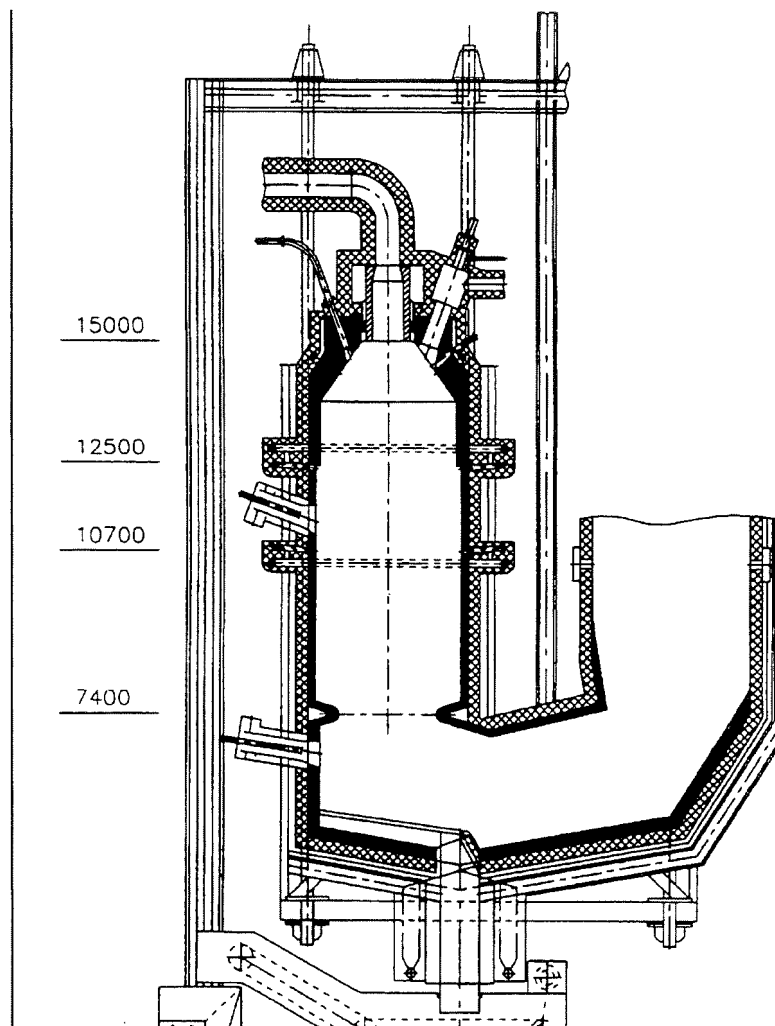


Abbildung 16: Hochtemperaturbrennkammer [Baumgärtel-3]

Wertet man die in dem linken Teil der Abbildung aufgeführten Zahlen als Höhenangaben in mm, so ergibt sich, daß die gesamte Konstruktion etwa 20 m hoch ist. Es ist allerdings nicht sicher, ob die Brennkammer in Fürth entsprechend dieser Abbildung gestaltet wird. In der Literatur sind noch weitere Brennkammerquerschnitte veröffentlicht. Die Querschnitte in [Vollhardt] und [Berwein-7] unterscheiden sich deutlich von Abbildung 16.

Aus Abbildung 17 ist deutlich zu erkennen, daß für die großtechnische Anlage ein Schottenkessel als Abhitzeanlage vorgesehen ist. Eine solche Kesselkonstruktion ist auch [Berwein-7] zu entnehmen. Nach Unterlagen der Fa. Siemens [Siemens] wird dagegen ein Kessel in Dackelbauweise bei den großtechnischen Anlagen installiert.

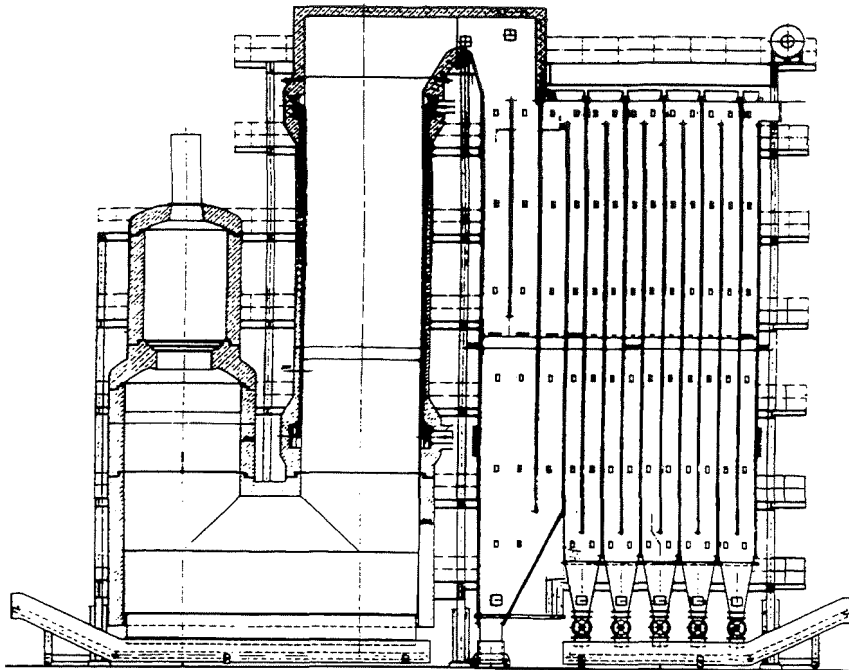


Abbildung 17: Verbrennungsteil für eine großtechnische Schwel-Brenn-Anlage [Vollhardt]

Die Rauchgasreinigung am Standort Fürth erfolgt in mehreren Verfahrensstufen. Nach dem Kessel wird das Rauchgas in einem Elektrofilter entstaubt. Die nächste Verfahrensstufe ist ein Sprühtrockner zur Eindampfung der Absalzungen aus den Wäschern mit nachgeschaltetem Gewebefilter. Die Wäscher sind nach dem Gewebefilter angeordnet und in Vor- und Hauptwäscher gegliedert. Neben anderen Schadstoffen wird im Vorwäscher überwiegend HCl und im Hauptwäscher SO₂ aus dem Rauchgas entfernt. In der nächsten Rauchgasreinigungsstufe wird NO durch eine selektive katalytische Reduktion (SCR-Verfahren) entfernt. Eine Feinreinigung des Rauchgases mit einem Flugstromverfahren bildet den Abschluß der Rauchgasreinigung. [Rangau]

Der im Elektrofilter abgeschiedene Staub und das beladene Adsorbens aus der Feinreinigung werden in die Hochtemperaturbrennkammer zurückgeführt. Der Rückstand aus der Rauchgasreinigung muß deponiert werden. [Rangau]

Die Investitionskosten für die Anlage bei Fürth werden mit 200 Mio DM angegeben [Rangau] (Juli 1992). Die Grundstückskosten und die Planungskosten mit den Aufwendungen für die Genehmigung sind darin nicht enthalten [Rangau]. An anderer Stelle [Rhodovi] (1993) werden 250 Mio DM genannt, ein Drittel des Betrags entfällt auf die Rauchgasreinigung. Für die Verbrennungskosten werden 300 bis 330 DM für 1 t Abfall angegeben [Rhodovi].

Für den Standort Dortmund wird in [Weinzierl] eine interessante Kombination vorgeschlagen. Die komplette Anlage mit einem Gesamtdurchsatz von 45 t/h soll aus drei Verbrennungslinien bestehen. Zwei Verbrennungslinien mit einer Kapazität von jeweils 15 t/h

werden als Rostfeuerung gebaut. Die dritte Verbrennungslinie wird als Schwel-Brenn-Anlage ausgeführt. Durch diese Kombination sollen eine hohe Entsorgungssicherheit, eine gute Verwertbarkeit der Reststoffe und ein hoher Wirkungsgrad für die Energienutzung erreicht werden. [Weinzierl]

In der für Dortmund geplanten Anlage sollen die Filterstäube und eventuell der Rostdurchfall aus den Rostfeuerungen im Hochtemperaturteil der Schwel-Brenn-Linie eingeschmolzen werden [Weinzierl]. Diese Maßnahme muß als problematisch angesehen werden, denn die Schwermetallkonzentrationen im Rauchgas der Hochtemperaturverbrennung dürften stark ansteigen.

9 Zusammenfassung

Das Schwel-Brenn-Verfahren ist ein Verfahren zur thermischen Behandlung von Abfällen und wurde von der Fa. Siemens entwickelt. Die Entwicklungsgeschichte reicht bis in die 70er Jahr zurück. Dieses Verfahren ist bisher nur in einer Demonstrationsanlage im Technikumsmaßstab (Ulm-Wiblingen) mit einem Durchsatz von etwa 250 kg/h erprobt worden. Die erste großtechnische Anlage, die zur Zeit bei Fürth gebaut wird, soll 1996 den Betrieb aufnehmen.

Beim Schwel-Brenn-Verfahren handelt es sich um ein Kombinationsverfahren, bei dem die eigentliche thermische Behandlung der Abfälle in zwei aufeinander folgenden Stufen abläuft. Zunächst werden die Abfälle durch eine Zerkleinerung aufbereitet. In der anschließenden ersten thermischen Behandlungsstufe erfolgt eine Pyrolyse, die bei etwa 450 °C in einer Schweltrommel abläuft. Anschließend werden durch eine Aufbereitung Metall- und Inertmaterialfraktionen aus den festen Rückständen entzogen und einer Verwertung zugeführt. Die zurückbleibende kohlenstoffreiche Feststofffraktion und die bei der Verschwelung entstandenen Gase werden in einer Brennkammer, der zweiten thermischen Verfahrensstufe, gemeinsam verbrannt. Die dabei entstehende Wärme wird in einem nachfolgenden Kessel zur Dampferzeugung genutzt. Die Rauchgase werden nach einer mehrstufigen Reinigung unter sicherer Einhaltung der gesetzlichen Grenzwerte (17. BImSchV) an die Atmosphäre abgegeben.

In der Literatur sind zahlreiche Publikationen zu dem Verfahren selbst und Versuchsergebnissen zu finden. Die veröffentlichten Meßergebnisse sind nicht von der Herstellerfirma selbst ermittelt worden, sondern wurden von unabhängigen Prüfinstituten im Rahmen verschiedener Gutachten gemessen. Eine Zusammenstellung der angefertigten Gutachten, die in den Informationsmaterialien [Siemens] enthalten ist, zeigt, daß mehr Gutachten angefertigt worden sind als in der Literatur erwähnt werden.

Aus den einzelnen Veröffentlichungen geht aber nicht immer eindeutig hervor, ob es sich um Versuchsergebnisse an der halbtechnischen Anlage in Ulm-Wiblingen oder um theoretisch berechnete Erkenntnisse handelt. Außerdem sind die Informationen zum Verfahren teilweise widersprüchlich. Aus der Literatur sind z.B. keine eindeutigen Angaben zur Feststoffaufbereitung oder dem Kesselkonzept zu entnehmen. Die Veränderungen in der Rauchgasreinigungstechnik lassen sich dagegen mit den veränderten gesetzlichen Vorschriften erklären.

Ein weiteres Problem für eine belastbare Bewertung des Schwel-Brenn-Verfahrens anhand der Literatur stellen die veröffentlichten Meßdaten dar. Mit in Tabellen aufgelisteten Eluat-

werten der Reststoffe oder Emissionsdaten wird dargelegt, daß die gesetzlichen Anforderungen erfüllt oder unterschritten werden. Die Größenordnungen der mitgeteilten Zahlen erscheinen zwar plausibel und nachvollziehbar, aber es treten teilweise große Schwankungen auf. Dies gilt insbesondere für die Massen- und Energiebilanzen.

Ein weiteres Problem stellen die Stoffbilanzen dar. Im Vergleich mit den Erfahrungen aus der Rostverbrennung lassen sich aus den Literaturdaten für das Schwel-Brenn-Verfahren für einige Stoffe Bilanzdefizite nachweisen. Dies gilt insbesondere für Cadmium und Blei. Außerdem liegen über Quecksilber so gut wie keine Informationen vor, so daß eine Stoffbilanz für dieses Schwermetall nicht erstellt werden konnte.

Aufgrund der unsicheren Informationen und den Schwankungen bei den Meßwerten wurde in der vorliegenden Arbeit auf einen eigenständigen Vergleich des Schwel-Brenn-Verfahrens mit der Rostfeuerung verzichtet. Die Erkenntnisse aus den in der Literatur publizierten Vergleichen wurden in einem Kapitel zusammengefaßt.

Danach sind die Unterschiede in den Emissionen gering, so daß anhand dieses Kriteriums keine Entscheidung für oder gegen ein Verfahren gefällt werden kann. Aus den publizierten Vergleichen ist zu entnehmen, daß die Energieausbeute des Schwel-Brenn-Verfahrens etwas schlechter ist als bei der Rostfeuerung ohne Einschmelzung der Schlacke. Wird dagegen die Schlacke eingeschmolzen, so ist die Rostfeuerung dem Schwel-Brenn-Verfahren unterlegen.

Allerdings ist die Bewertung der Verfahren nach dem Kriterium der möglichen Energiegewinnung mit Unsicherheiten behaftet. Bei dem Schwel-Brenn-Verfahren entstehen relativ reine Reststoffe. Für eine vergleichbare Qualität der Reststoffe muß die Schlacke der Rostfeuerung mechanisch aufbereitet werden. Aus den Vergleichen in der Literatur geht nicht hervor, inwieweit diese mechanische Aufarbeitung bei den Energiebilanzen berücksichtigt wurde.

Die für einen großtechnischen Einsatz sehr wichtige Frage nach den Abfallbehandlungskosten mit dem Schwel-Brenn-Verfahren kann an dieser Stelle nicht beantwortet werden. Aus der Literatur sind keine belastbaren Informationen zu entnehmen.

Vor dem Hintergrund der Erkenntnisse in dieser Arbeit ist eine sichere Bewertung des Schwel-Brenn-Verfahrens nicht möglich. Es erscheint aber sinnvoll, die wichtigsten Vor- und Nachteile des Schwel-Brenn-Verfahrens und der Rostfeuerung an dieser Stelle kurz zusammenzustellen.

Die seit vielen Jahren großtechnisch angewendete Rostfeuerung stellt ein einstufiges Verbrennungssystem dar, bei dem sich an den Feuerraum direkt der Kessel zur Wärmerückgewinnung anschließt. Das Schwel-Brenn-Verfahren ist als Kombiverfahren zu bezeichnen, denn es ist aus einer Pyrolysestufe und einem Hochtemperaturverbrennungsteil aufgebaut. Der zweistufige Aufbau des Schwel-Brenn-Verfahrens führt zu einem höheren verfahrenstechnischen Aufwand, so daß im Vergleich zur Rostfeuerung zwangsläufig höhere Investiti-

ons- und Betriebskosten entstehen. Außerdem wird ein Teil der im Kessel erzeugten Energie in der vorgeschalteten Pyrolysestufe zur Aufheizung der Abfälle benötigt, so daß im Vergleich zur Rostfeuerung ein höherer Eigenenergiebedarf zu erwarten ist.

Als Vorteile für das Schwel-Brenn-Verfahren ist die sehr gute Qualität der nach der Pyrolysestufe ausgeschleusten Fraktionen zu nennen, die sehr gut verwertbar sind. Außerdem fallen keine Filter- und Kesselstäube an, denn diese Materialien werden in die Brennkammer zurückgeführt. Ein weiterer Vorteil ist der relativ geringe Luftüberschuß in der Brennkammer, so daß kleinere Rauchgasmengen gebildet werden. Ob die Erzeugung einer geschmolzenen Schlacke ein realer Vorteil ist, bleibt fraglich. Eine bessere Akzeptanz dürfte die Verwertung erleichtern, aber ökologisch ist die Erzeugung einer geschmolzenen Schlacke nicht erforderlich.

Abschließend ist festzustellen, daß die Fa. Siemens in den letzten Jahren ein neues und interessantes Verfahren zur thermischen Behandlung von Abfällen entwickelt hat. Die in der Literatur veröffentlichten Informationen zu Massen-, Stoff- und Energiebilanzen lassen aber keine sichere Bewertung zu. Ob das Schwel-Brenn-Verfahren eine Alternative zu der konventionellen Müllverbrennung auf dem Rost darstellt, kann nur durch den Betrieb der großtechnischen Anlage bei Fürth nachgewiesen werden.

10 Literatur

- [Ahrens-1] Ahrens-Botzong, R. und Redmann, E.:
"Das Schwel-Brenn-Verfahren: Restmüllbehandlung wie die Abfallpolitik vorgibt".
BWK 45 (1993) Nr. 5 S. 225-228
- [Ahrens-2] Ahrens-Botzong, R. und Redmann, E.:
"Das Schwelbrennverfahren zur Behandlung von Abfällen und Klärschlamm".
UWSF - Z. Umweltchem. Ökotox. 3 (1991) Nr. 2, S. 76-78
- [Ahrens-3] Ahrens-Botzong, R. und Redmann, E.:
"Behandlung von Restmüll: Das Schwel-Brenn-Verfahren".
UTA 4 (1993) Nr. 2, S. 121-125
- [Anton] Anton, F.
"Das KWU-Schwelbrennverfahren".
in: VDI (Hg.): "Thermische Abfallentsorgung". VDI Bericht 1192.
S: 349-379. Tagung in Veitshöchheim, 27.-28. Juni 1995.
VDI-Verlag Düsseldorf 1995
- [Baumgärtel-1] Baumgärtel, G.:
"The Siemens Thermal Waste Recycling Process - a modern technology for converting waste in usable products".
Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 27 (1993) S. 15-23
- [Baumgärtel-2] Baumgärtel, G. und Berwein, H.-J.:
"The Siemens Thermal Waste Recycling Plant, An Almost Residue Free Process to Convert Refuse into Recycable Products".
in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:
"Waste Management International". Vol. 2, S. 207-219
EF Verlag Berlin 1992
- [Baumgärtel-3] Baumgärtel, G. und May, K.W.:
"Das Siemens Schwel-Brenn-Verfahren".
in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:
"Reaktoren zur thermischen Abfallbehandlung". S. 189-200
EF-Verlag Berlin 1993

- [Becker] Becker, J.; Schumacher, W.:
"Überblick über die thermische Abfallverwertung"
Vortragsveranstaltung des Bayrischen Landesamtes für Umweltschutz.
Thema: "Moderne thermische Abfallverwertung"
Wackersdorf, 8. Februar 1994
- [Berghoff] Berghoff, R.:
"Vergleich thermischer Verfahren zur Behandlung von
Sonderabfällen".
Umwelt 21 (1991) Nr. 10, S. v15-v21
- [Bericht-1] Müllpyrolyse - Demonstrationsanlage Goldshöhe im Ostalbkreis
8. Zwischenbericht, Stand 30.06.1985, Erlangen / Stuttgart Juli 1985
- [Bericht-2] Müllpyrolyse - Demonstrationsanlage Goldshöhe im Ostalbkreis
9. Zwischenbericht, Stand 30.11.1985, Erlangen / Stuttgart
Dezember 1985
- [Berwein-1] Berwein, H.J.:
"Der aktuelle Stand der KWU-Schweltechnik".
in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:
"Müllverbrennung und Umwelt 2".
EF-Verlag Berlin 1987
- [Berwein-2] Berwein, H.J.:
"Pyrolysesystem KPA. Emissionen, Betriebserfahrungen, Entwicklungs-
stand und Entsorgungskosten".
in: "Thermische Verfahren der Abfallwirtschaft". Statusbericht 1985.
herausgegeben von der VDI-Gesellschaft Energietechnik im Auftrag des
Bundesministers für Forschung und Technologie und der Projekt-
trägerschaft "Feste Abfälle" beim Umweltbundesamt.
- [Berwein-3] Berwein, H.J.:
"Siemens-Schwel-Brenn-Verfahren - Thermische
Reaktionsabläufe".
VDI Bildungswerk. Seminar 43-50-07. "Feuerungs- Verbrennungs- und
Vergasungstechniken". Düsseldorf, 21.-22. Februar 1994

- [Berwein-4] Berwein, H.J. und Aurin, G.:
 "Das Siemens-Schwelbrennverfahren zur Entsorgung von Hausmüll, Gewerbemüll und Klärschlamm".
 in: Burgbacher, G.:
 "Thermische Abfallbehandlung und Verwertung"
 Reihe Kontakt und Studium Bd. 217,
 Expert-Verlag Eningen 1989
- [Berwein-5] Berwein, H.J. und Kanczarek, A.:
 "Das Schwel-Brenn-Verfahren für Restmüll und Klärschlamm".
 Entsorgungspraxis 9 (1991) Nr. 5, S. 227-234
- [Berwein-6] Berwein, H.J.:
 "Weiterentwickelt: Schwelbrennverfahren".
 Entsorgungspraxis 6 (1988) Nr. 6, S. 242-245
- [Berwein-7] Berwein, H.J.:
 "Ein Weg zur Lösung des Müllproblems: Die Siemens-Schwelbrennanlage".
 Technische Mitteilungen* 81 (1988) Nr. 6, S. 327-332
 * (Haus der Technik, Essen)
- [Berwein-8] Berwein, H.J. und Erlecke, J.:
 "Einsatzmöglichkeiten der Verschwelung als Homogenisierungsstufe in der thermischen Abfallverwertung".
 in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:
 "Müllverbrennung und Umwelt 4".
 EF-Verlag Berlin 1990
- [Berwein-9] Berwein, H.J. und Kanczarek, A.:
 "Müllentsorgung mit einer Schwel-Brenn-Anlage".
 Brennstoff Wärme Kraft 42 (1990) Nr. 10, S. r26-r36
- [Berwein-10] Berwein, H.J.:
 "Vergleich feuerungsintegrierter Schmelzverfahren".
 VDI Bildungswerk. Seminar 43-60-05. "Reststoffentsorgung unterschiedlicher Rauchgasreinigungsverfahren".
 Düsseldorf, 20.-21. Juni 1995
- [Bilitevski] Bilitevski, B.; Härdtle, G.; Marek, K.:
 "Grundlagen der Pyrolyse von Rohstoffen".
 in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:
 "Pyrolyse von Abfällen". S: 1-77.
 EF-Verlag Berlin 1985

- [Bischofsberger] Bischofsberger, W.; Born, R.:
 "Verfahrens- und umwelttechnische Analyse neuer thermischer Prozesse in der Abfallwirtschaft".
 Berichte aus Wassergütwirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen. Technische Universität München. Nr. 89. (1989)
- [Blume] Blume, H.:
 "Thermische Abfallbehandlung in der Diskussion".
 Entsorgungstechnik (1994) Oktober S. 16-20
- [Braun] Braun, H.; Metzger, M.; Vogg, H.:
 "Die Verbesserung der Abscheidung von Quecksilber aus Rauchgasen der Müllverbrennung".
 Chem.-Ing.-Tech. 60 (1988) Nr. 2. S. 135
- [Depmeier] Depmeier, L.; Weigand, P.; Vetter, G.:
 "Ökologische Bewertung des Schwel-Brenn-Verfahrens zur Restmüllverwertung".
 Müll und Abfall 27 (1995) Heft 7 S. 480-489
- [DIN 38414] DIN 38414 Teil 4: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung: Schlamm und Sedimente (Gruppe S), Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S4), Beuth-Verlag Berlin 1984
- [Egerer] Egerer, B.:
 "Hausmüll verwerten, Sondermüll entsorgen".
 Umwelt 23 (1993) Nr. 6, S. 356
- [Esser] Esser, A.; Schwefer, H.-J.:
 "Untersuchung von Schlacke aus Kraftwerken und thermischen Abfallbehandlungsanlagen auf ihre Umweltverträglichkeit".
 Beiheft Müll & Abfall, Heft 31: S. 215-219.
 Erich Schmidt Verlag Berlin 1994
- [Faulstich] Faulstich, M.; Freudenberg, A.; Kley, G; Köcher, P.:
 "Thermodynamische und mineralogische Überlegungen zur Inertisierung fester Rückstände aus der Abfallverbrennung".
 - in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:
 Müllverbrennung und Umwelt 4, S. 339-359,
 EF-Verlag Berlin 1990

- [Galaske] Galaske, W.:
"Auf schwachen Füßen".
Müllmagazin (1995) Heft 3 S. 67-68
- [Gajewski] Gajewski, W.:
"Schwel-Brenn-Anlage in Fürth im Bau".
Umwelt 25 (1995) Nr. 5/6 S. 210-211
- [Hauk] Hauk, R.; Poller, J.:
"Vergasungsverfahren für Abfälle".
VGB Kraftwerkstechnik 74 (1994) Heft 9 S. 790-796
- [Heitmann] Heitmann, A.:
"Thermische Behandlung von Sonderabfällen".
Chem.-Ing.-Tech. 55 (1983) Nr. 5, S. 335-341
- [Hornung] Hornung, E.:
"Abfälle thermisch entsorgen und verwerten".
Umwelt 23 (1993) Nr. 9, S. 492-494
- [Huth] Huth, M.:
"Hochtemperaturtechnik".
Chem.-Ing.-Tech. 57 (1985) Nr. 11, S. 952-954
- [Kanczarek-1] Kanczarek, A.:
"Siemens-Schwel-Brenn-Verfahren-Reststoffverwertung".
VDI-Bildungswerk. Seminar 43-76-03. "Schlackenaufbereitung, -
verwertung und -entsorgung". München, 9.-10 März 1995
- [Kanczarek-2] Kanczarek, A.:
"Abfallverwertung mit dem Schwel-Brenn-Verfahren".
Energieanwendung und Energietechnik 41 (1992)
Nr. 12, S. 514-517
- [Kanczarek-3] Kanczarek, A.; Schneider, T.:
"Das Siemens-KWU Schwel-Brenn-Verfahren".
VDI-Bildungswerk. Seminar 43-60-06. "Entsorgung von Reststoffen und
Abfällen aus unterschiedlichen Rauchgasreinigungssystemen".
München, 7.-8. Mai 1996
auch in:
VDI-Bildungswerk. Seminar 43-76-04. "Schlackeaufbereitung, -
verwertung und -entsorgung". Bamberg, 13.-14. Juni 1996

- [Kielburger] Kielburger, G. und Schmitz, H.J.:
"Thermische Behandlung von Restmüll".
Wasser, Luft und Boden (1993) Nr. 7-8, S. 60-71
- [Klauer] Klauer, J.:
"Abfallbehandlung".
Chem.-Ing.-Tech. 64 (1992) Nr. 4, S. 390-394
- [Krupp] Krupp VDM GmbH, Verdohl, Deutschland,
"Thermische Abfallverwertung - Verfahren, Werkstoffe, case histories".
- [Lezenik] Lezenik, B.:
"KPA-Verfahren".
in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:
"Pyrolyse von Abfällen".
EF-Verlag Berlin 1985
- [Marb] Marb, C. und Riedel H.:
"Thermische Behandlung von Klärschlamm mit Hausmüll nach dem Schwel-Brenn-Verfahren: Betriebs- und Meßergebnisse".
Chem.-Ing.-Tech. 65 (1993) Nr. 4, S. 442-444
- [May-1] May, K.W.; Redmann, E.; Ahrens-Botzong, R.:
"Verwertbare Stoffe aus Restmüll durch das Schwel-Brenn-Verfahren".
Beiheft zu Müll und Abfall Heft 31, S. 73-76
Erich Schmidt-Verlag Berlin 1994
- [May-2] May, K.-W.;
"Siemens ZB KWU Schwelbrennverfahren - Ein Verfahren zur thermischen Behandlung von Hausmüll, hausmüllähnlichem Gewerbemüll, Sperrmüll und Klärschlamm".
in: VDI (Hg.): "Verbrennung und Feuerungen". VDI-Bericht 765.
S. 203-218. Tagung in Stuttgart, 5.-6. Oktober 1989.
VDI-Verlag Düsseldorf 1989
- [May-3] May, W. et al.:
"Schwelbrennanlage: Verfahren und Werkstoffkonzept".
Umwelt 21 (1991) Nr. 6, S. 361-363
- [May-4] May, W.K. und Ahrens-Botzong, R.:
"Das Schwel-Brenn-Verfahren mit integrierter Reststoffverwertung".
Chem.-Ing.-Tech. 64 (1992) Nr. 10, S. 930-931

- [Mayer-1] Mayer, F.; Iblher, P.; Holtwick, A.; Kreiser, H.:
 "Genehmigungsverfahren: Planfeststellung für die
 Schwelbrennanlage in Fürth".
 Müll und Abfall 26 (1994) Nr. 3 S. 121-130
- [Mayer-2] Mayer, F., Rasch, B. und Schwarz, V.:
 "Verfahrensvergleich zur Restabfallbehandlung: Biologisch-
 mechanische Verfahren und Schwel-Brenn-Verfahren".
 Müll und Abfall 25 (1993) Nr. 8, S. 569-584
- [Meininger] Meininger, S., Lezenik, B. und Aurin, G.
 "Nutzung des Wärmeinhalts von Abfallstoffen nach Recycling
 am Beispiel des Schwel-Brenn-Verfahrens".
 Berichte aus Wassergüte und Gesundheitsingenieurwesen,
 Band 86, S.79-100. Technische Universität München 1990
- [Merz] Merz, T.:
 "Rückstand mit Risiko".
 Entsorga 15 (1996) Heft 5 S. 14-26.
- [Nels] Nels, C.:
 "Pyrolysetechnik".
 in: "Müllhandbuch". Abschnitt 7955 (1983).
 Erich Schmidt Verlag, Berlin
- [Neubert] Neubert, W.; Engelhardt, R.:
 "Schmelzbehandlung beim KWU-Schwelbrennverfahren".
 in: Reimann, D.O. (Hg.):
 "Reststoffe aus der Rauchgasreinigung". Beihefte zu Müll und
 Abfall. Heft 29. S. 107-109. Erich Schmidt Verlag Berlin 1990
- [NN-1] NN
 "Anlage für Japan".
 Entsorga 14 (1995) Heft 4 S. 76
- [NN-2] NN
 "Siemens stellt Schwel-Brenn-Verfahren vor".
 Elektrizitätswirtschaft 92 (1993) Heft 16 S. 1015-1017
- [NN-3] NN
 "Durchbruch für das Schwel-Brenn-Verfahren".
 wlb 38 (1994) Heft 7/8 S. 56-58

- [NN-4] NN
"Schwel-Brenn-Verfahren in Fürth genehmigt"
Abfallwirtschaftsjournal 6 (1994) Heft 5 S. 246-247
- [NN-5] NN
"Schwel-Brenn-Anlage Fürth"
Elektrizitätswirtschaft 94 (1995) Heft 18 S.1147-1150
- [Nottrodt] Nottrodt, A.:
"Rostfeuerung und neue thermische Verfahren"
Abfallwirtschaftsjournal 7 (1995) S. 291-297
- [Rangau] Zweckverband Abfallentsorgung Rangau:
"Schwel-Brenn-Anlage Fürth, Allgemeinverständliche
Zusammenfassung der Antragsunterlagen zum Antrag
auf Planfeststellung".
Juli 1992
- [Redmann-1] Redmann, E.; Ahrens-Botzong, R.:
"Die thermische Behandlung von Autoshreder-Leichtfraktion im
Siemens-Schwel-Brenn-Verfahren
VGB Kraftwerkstechnik 73 (1993) Heft 7. S. 626-630
- [Redmann-2] Redmann, E.; Ahrens-Botzong, R.:
"Die thermische Behandlung von Auto-Shredder-Leichtfraktion im
Siemens Schwel-Brenn-Verfahren".
VGB-Konferenz "Thermische Abfallbehandlung 1992".
11.-12. November 1992 (VGB TB 215)
- [Rhodovi] Rhodovi, A.:
"Neue Ergebnisse beim Schwel-Brenn-Verfahren: Kunststoff
heizt gut".
Entsorga (1993) Nr. 7/8, S. 34-39
- [Scholz] Scholz, R.:
"Thermische Verfahren zur Abfallbehandlung; Prozeßführung, Bausteine
und Bewertung".
in: VDI (Hg.): "Thermische Abfallentsorgung". VDI Bericht 1192.
S: 1-78. Tagung in Veitshöchheim, 27.-28. Juni 1995.
VDI-Verlag Düsseldorf 1995
- [Siemens] Siemens Energieerzeugung
Die Schwelbrennanlage - Eine Verfahrensbeschreibung (1993, 1995)

- [Tauber] Tauber, C.:
"Thermische Restmüllbehandlung heute".
Energiewirtschaftliche Tagesfragen 45 (1995) Heft 6 S. 378-385
- [Thomanetz] Thomanetz, E.:
"Vor- und Nachteile der Abfallpyrolyse".
in: Burgbacher, G.: "Thermische Abfallbehandlung und
-verwertung". S. 170-187. Expert-Verlag Ehningen 1989
- [Thomé-K.-1] Thomé-Kozmiensky, K.J.:
"Thermische Abfallbehandlung".
EF-Verlag Berlin 1994
- [Thomé-K.-2] Thomé-Kozmiensky, K.J.:
"Kombination von Verschwelung und Verbrennung".
Abfallwirtschaftsjournal 1 (1989) Nr. 4, S. 34-39
- [Sloot] van der Sloot, H.:
"Comparison of Different Regulatory Leaching Test Procedures
For Waste Materials and Construction Materials".
ECN-C--91-082. (1991)
- [Vehlow] Vehlow, J.:
"Reststoffbehandlung - Schadstoffsensitiven Thermische Abfallbehandlung".
in: Fachverband Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau e.V.,
FDBR (Hg.): "Fakten - Die Thermische Abfallverwertung der Zukunft".
S. 44-66, Tagung (Teil I) in Düsseldorf, 28. September 1995
- [Verordn.] Entwurf zur Vernehmlassung einer Technischen Verordnung über
Abfälle, Bundesamt für Umweltschutz, Bern, 1988 / 1991
- [Volkmann] Volkmann, H.:
"Schwelbrennanlagen - denn Verwertung ist die beste
Entsorgung".
Energie und Automation 11 (1989) Nr. 4, S. 4-7
- [Vogg] Vogg, H.:
"Ausgewählte stoffliche Gesichtspunkte der thermischen
Abfallverwertung". in: Fachverband Dampfkessel-, Behälter- und
Rohrleitungsbau e.V., FDBR (Hg.): "Fakten - Die Thermische
Abfallverwertung der Zukunft". S. 118-125
Tagung (Teil II) in Rosstock, 23. Februar 1996

- [Vollhardt] Vollhardt, F. und Lezenik, B.:
"Schwelbrennverfahren zur thermischen Entsorgung von Müll
und Klärschlamm".
Chem.-Ing.-Tech. 61 (1989) Nr. 7, S. 530-535
- [Weinzierl] Weinzierl, K.; Hauk, R.:
"Kombination von Rostfeuerung und Schwelbrenntechnik im Rahmen
eines Konvoi-Konzeptes als Möglichkeit zur Kostensenkung bei der
Müllentsorgung".
in: VDI (Hg.): "Thermische Abfallentsorgung". VDI Bericht 1192.
S. 149-166. Tagung in Veitshöchheim, 27.-28. Juni 1995.
VDI Verlag Düsseldorf 1995

11 Anhang

11.1 Weitere Stoffbilanzen für das Schwel-Brenn-Verfahren

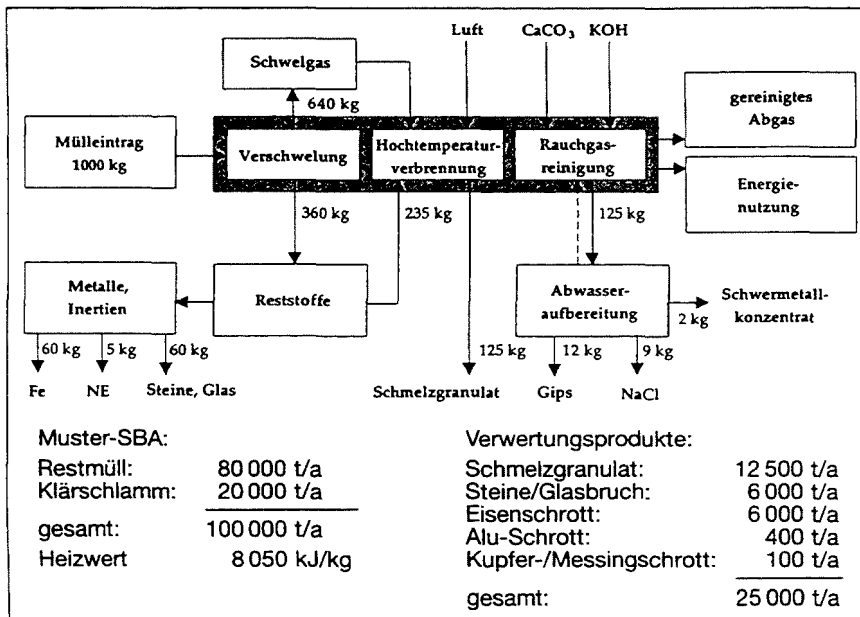


Abbildung A.1: Stoffbilanz für das Schwel-Brenn-Verfahren nach [Depmeier]

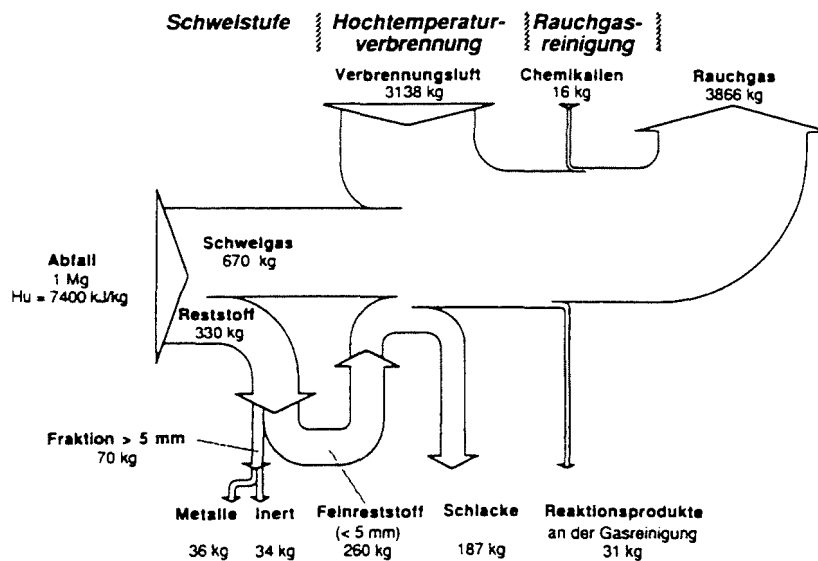


Abbildung A.2: Stoffbilanz für das Schwel-Brenn-Verfahren nach [May-2]

11.2 Weitere Energiebilanzen für das Schmel-Brenn-Verfahren

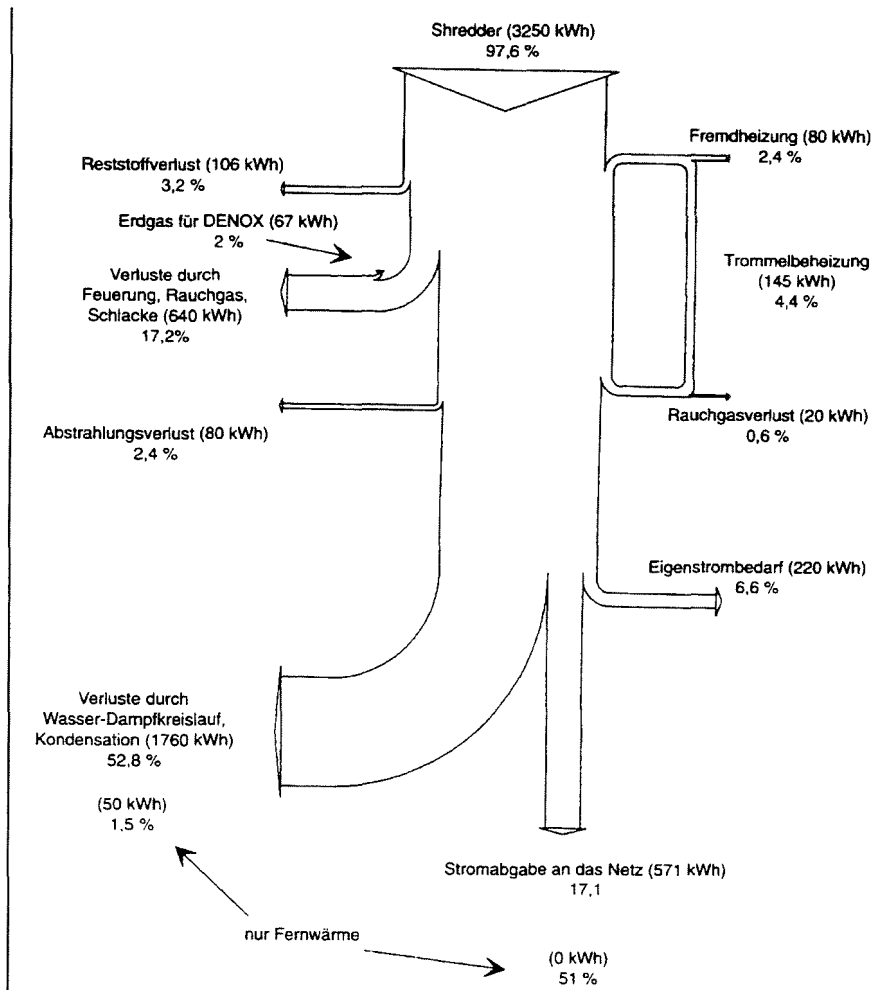


Abbildung A.3: Energiebilanz für das Schmel-Brenn-Verfahren nach [Redmann-1]

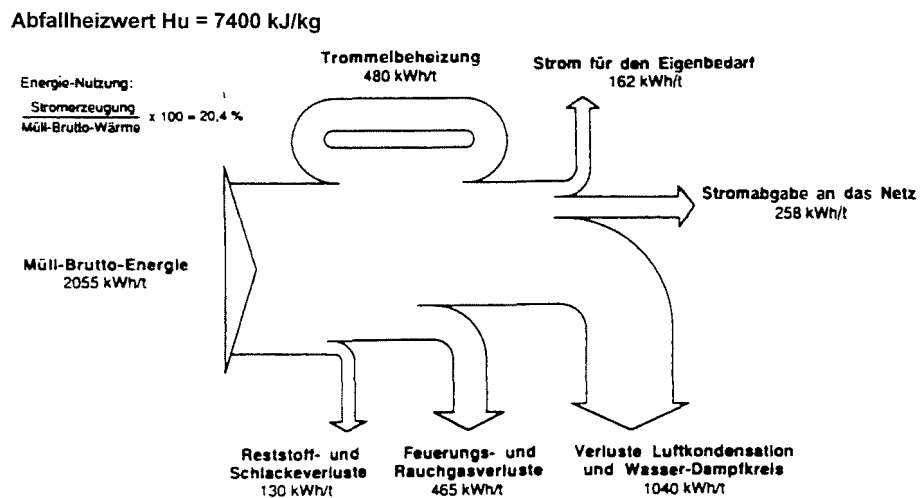


Abbildung A.4: Energiebilanz für das Schmel-Brenn-Verfahren nach [May-2]