ABAG-itm

Vermeidung von Abfällen und Emissionen bei der Sekundäraluminium-Herstellung imProduktionsmaßstab

Projektbericht

im Auftrag der
ABAG-itm GmbH
vormals ABAG-Abfallberatungsagentur
Baden-Württemberg
Stauferstr. 15
D-70736 Fellbach

Projektträger
Aluminium Rheinfelden GmbH
Friedrichstrasse 80
D-79618 Rheinfelden

Projektbegleiter
Prof. Dr. E.Thomanetz
Universität Stuttgart
Bandtäle 2
70569 Stuttgart

Mai 1999

Erarbeitung:
Prof. Dr. E.Thomanetz, Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte und Abfallwirtschaft, Universität Stuttgart, Bandtäle 2, 70569 Stuttgart

Für die kooperative Mitwirkung an diesem Projekt bedankt sich die ABAG bei allen Beteiligten des Hauses Aluminium Rheinfelden GmbH, insbesondere bei Herrn Dr. Franke sowie den Herren Dr. Rossel und Dr. Kern.

Die Durchführung dieses Modellprojekts sowie die wissenschaftliche Begleitung wurde mit Mitteln der Sonderabfallabgabe des Landes Baden-Württemberg unterstützt.

Herausgeber:
ABAG-itm GmbH
vormals ABAG-Abfallberatungsagentur
Stauferstr. 15
70736 Fellbach
Tel.: 0711 / 95 19 11 - 0
Fax: 0711 / 95 19 11 - 20
E-Mail: info@abag-itm.de

Projektleitung:
Dipl.-Ing. Axel Spillner

Mai 1999

Gedruckt auf: weiß mattgestrichen Offset chlorfrei gebleicht (Umschlag)

Alle Rechte der Verbreitung, auch durch Film, Funk und Fernsehen, fotomechanische Wiedergabe, Tonträger jeder Art, auszugsweisen Nachdruck oder Einspeicherung und Rückgewinnung in Datenverarbeitungsanlagen aller Art, sind vorbehalten.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung	5
1. Allgemeines zum Projektträger und zu den Projektzielen	7
2. Stand der Technik bei der Sekundäraluminium-Produktion.	9
2.1 Salztrommelofentechnik	9
2.2 Weitere Verfahren zur Sekundäraluminium-Produktion	10
3. Charakterisierung der im Zuge des Projekts realisierten Recyclinganlage	13
3.1 Betriebsteil 1: Zwischenlagerung und Zerkleinerung	14
3.1.1 Materiallager	14
3.1.2 Zerkleinerungsaggregate und Magnetscheidung	14
3.1.3 Fördereinrichtungen	15
3.2 Betriebsteil 2: Pyrolyse-Decoatinganlage mit Blankglühe	16
3.2.1 Eintragssytem Pyrolyse	16
3.2.2 Pyrolysedrehrohr	16
3.2.3 Austragssystem Pyrolyse	17
3.2.4 Blankglühe	17
3.2.5 Brennkammer	17
3.2.6 Rauchgaswäsche	18
3.2.7 Eindampfung Abschlämmwasser	19
3.2.8 Ableitung gasförmiger Emissionen	19
3.3 Betriebsteil 3: Aluminium-Schmelzanlage	19
4. Projektverlauf und besonders erwähnenswerte Problemlösungen	27
5. Massenbilanz der Recycling-Pyrolyseanlage	29
6. Angaben zum Wärmehaushalt der Recycling-Pyrolyseanlage	33
7. Abfälle aus der Recycling-Pyrolyseanlage	39
8. Emissionen der Recycling-Pyrolyseanlage	41
9. Offene Fragen und weitergehender Untersuchungsbedarf	43
10. Beurteilung des Gesamtprozesses	45

Tabellenverzeichnis

Seite

Tabelle 1: Alternative Verfahren zur Sekundäraluminium-Produktion 11

Tabelle 2: Typische Gehalte wesentlicher Legierungselemente des in der Recycling-Pyrolyseanlage erzeugten Aluminiums 20

Tabelle 3: Zeitplan des Projekts 27

Tabelle 4: Ermittlung der Wärmeleistung und des Wärmebedarfs des Input-Mix 34

Tabelle 5: Ermittlung der Wärmeleistung des Schwelgases 35

Tabelle 6: Ermittlung wärmetechnischer Basisdaten der Blankglühe 36

Tabelle 7: Abfälle aus der Recycling-Pyrolyseanlage und ihre Entsorgungs- und Verwertungswege 40

Tabelle 8: Gasförmige Emissionen der Recycling-Pyrolyseanlage (Kamin) 41

Tabelle 9: Gasförmige Emissionen der Schmelzöfen 41

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Inputmaterial der Pyrolyse-Recyclinganlage und Outputmaterial (im Hintergrund) 21

Abb. 2: Ansicht der Pyrolyse-Recyclinganlage 21

Abb. 3: Grundfließbild der Pyrolyse-Recyclinganlage 23

Abb. 4: Aufstellungsplan der Pyrolyse-Recyclinganlage 25

Abb. 5: Input-Mix für die Pyrolyse-Recyclinganlage 29

Abb. 6: Massenbilanz der Pyrolyse-Recyclinganlage 31

Abb. 7: Blockbild des externen Aufbereitungsprozesses für die Krätze aus der Pyrolyse-Recyclinganlage 39

Abb. 8: Spezifische Abfallmengen, Vergleich Salztrommelofen - Recycling-Pyrolyseanlage 40

Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts wurde bei der Firma Aluminium Rheinfelden eine innovative Recyclinganlage, auf der Basis Pyrolyse, zur Erzeugung von hochwertigen Sekundäraluminium-Werkstoffen aus unterschiedlichen aluminiumhaltigen gebrauchten Produkten und Konsumartikeln realisiert. Einsatzmaterialien sind organikreiche Schrotte und Aluminium-Verbundmaterialien, wie DSD-Aluminiumfraktionen. Die Recyclinganlage kann hiervon rund 4 Mg pro Stunde (ca. 96 Mg/d) verarbeiten, wobei ca. 2,25 Mg Aluminium pro Stunde (ca. 54 Mg/d) resultieren.

Die Pyrolyse ist ein Prozeß, bei dem organisches Material unter Luftabschluß bzw. Luftmangel thermisch - hier zwischen 500 und 600 °C - zersetzt wird, wobei Pyrolysegase und Pyrolysekoks entstehen und das Aluminium in blanker Form anfällt. Als Pyrolysereaktor dient ein indirekt beheizter Drehrohrofen. Die für die Beheizung des Drehrohrs nötige Wärme wird anlagenintern durch Verbrennung der Pyrolysegase erzeugt. Als optimaler Anlageninput erwies sich ein Mix, welcher im Mittel zu rund 60 % aus DSD-Material, den sog. flexible packagings, besteht. Für dieses, vorwiegend aus beschichteten Aluminiumfolien bestehende, organik- und damit heizwertreiche Material (Papier, Pappe, PE), existiert heute kein anderes Aufbereitungsverfahren, welches direkt zum Flüssigmetall führt. Das pyrolytisch abgetrennte, vom Pyrokoks abgesiebte, anschließend blankgeglühte und von Störmetallen befreite Aluminium wird in spezielle Schmelzöfen („Vortex") eingerührt. Hieraus gelangt das Metall entweder direkt flüssig in die Gießerei oder wird in Masseln (sows) abgegossen. Das erzeugte Sekundäraluminium hat hervorragende Qualität und dient u.a. als Rohstoff für innovative hochwertige Leichtmetall-Legierungen.

Neben dem Ziel des Aluminiumrecyclings trat das hier entwickelte Verfahren mit den Ansprüchen an, deutlich weniger Problemabfälle und gasförmige Emissionen zu erzeugen, als das derzeit verbreitete, für verunreinigte Aluminiumschrotte und Krätzen eingesetzte Salztrommelofen-Verfahren. Beide Ansprüche konnten in vollem Umfange erfüllt werden.

Während beim herkömmlichen Salztrommelofen-Verfahren pro Mg erzeugtes Aluminium letztlich im Mittel 250 kg Salzschlacke-Auslaugungsrückstände und bis zu 40 kg dioxinbelastete Stäube anfallen, sind dies beim neuen Recycling-Pyrolyseverfahren rund 25 kg Salzschlacke-Auslaugungsrückstände und 1,7 kg dioxinbelastete Stäube. Dies entspricht einer Verminderung jener abzulagernden Sonderabfälle um rund 91%, was eine erhebliche Deponieentlastung darstellt. Allerdings fallen beim Recycling-Pyrolyseverfahren noch andere zu deponierende Abfälle an, die jedoch als wenig umweltrelevant einzuschätzen sind: Brennkammerschlacke, Wäscherschlamm, Rauchgasreinigungssalze und Shredderstäube - insgesamt ca. 45 kg pro Mg erzeugtes Aluminium.

Bereits bei der Anlagenkonzeption wurde den rauchgasseitigen Emissionen besondere Beachtung beigemessen. Durch Installation einer aufwendigen, an der 17. BImSchV orientierten Rauchgasreinigung ist es gelungen, die strengen gesetzlichen Grenzwerte für alle Parameter - einschließlich der Dioxine - nicht nur sicher einzuhalten, sondern diese deutlich zu unterschreiten. Die letzten Messungen des TÜV konnten dies bestätigen. Eine solche umweltfreudliche Betriebsweise wurde vor allem dadurch ermöglicht, daß ein Teil der im Inputmaterial enthaltenen Energie für die Aufrechterhaltung der hohen, behördlich geforderten Brennkammertemperaturen um 1200 °C genutzt werden kann.

Die Wirtschaftlichkeit der Recycling-Pyrolyseanlage ist grundsätzlich gegeben. Sie hängt naturgemäß vom - derzeit stark schwankenden - Weltmarktpreis für Aluminium ab sowie auch von den Preisen für das Inputmaterial. Auch die Übertragbarkeit der Anlagentechnik für den Sektor der Sekundäraluminium-Produktion ist grundsätzlich gegeben. In Anbetracht der Besonderheit der Anlage, aus organikreichen Schrotten und Aluminium-Verbundmaterialien, wie DSD-Aluminiumfraktion, Flüssigmetall produzieren zu können, und vor dem Hintergrund der Umweltfreundlichkeit dieser Sekundäraluminium-Produktion erscheint es durchaus vorteilhaft, weitere solche Anlagen zu erstellen - ggf. auch als Ersatz für herkömmliche umweltbelastendere Sekundäraluminium-Produktionsanlagen.
Insgesamt stellt das hier entwickelte Verfahren ein gelungenes Beispiel für stoffliches Recycling auf hohem verfahrenstechnischen und umwelttechnischen Niveau dar.

1. Allgemeines zum Projektträger und zu den Projektzielen

Das nunmehr seit 100 Jahren am Standort Rheinfelden befindliche Aluminiumwerk - das erste in Deutschland, heute Firma Aluminium Rheinfelden mit 405 Beschäftigten, ist derzeit auf den folgenden vier Sektoren tätig:

- In der Geschäftseinheit „Fließpreßhalbzeug" werden Butzen gefertigt, Präzisionsstanzteile aus Reinaluminium, welche z.B. für die Herstellung von Aerosoldosen, Tuben, Kondensatorenbechern, KFZ-Filtergehäusen oder Autofeuerlöschern dienen sowie auch für die Herstellung von Thermoböden für Edelstahlkochgeräte.

- In der Geschäftseinheit „Carbon Products" werden Feuerfestauskleidungen, Anoden und Elektrodenmassen für die Aluminium- und Ferrolegierungsindustrie erzeugt.

- Die Geschäftseinheit „Vacono" baut und liefert Anlagen und Einrichtungen zur Emissionsminderung sowie Rückgewinnung leichtflüchtiger Kohlenwasserstoffe und Chemikalien in Raffinerien und Tanklagern.

- In der Geschäftseinheit „Werkstoffe der Kreislaufwirtschaft" werden innovative Leichtmetall-Werkstoffe entwickelt und produziert, wobei insbesondere Aluminiumschrotte als Ausgangsmaterialien dienen, allerdings in metallisch blanker, unverschmutzter Form. So wurden z.B. im Jahre 1994 rund 15 800 Mg solcher Sekundärrohstoffe eingesetzt. Nicht angenommen werden konnten aus betriebstechnischen und umwelttechnischen Gründen verschmutzte kunststoff-, papier- und lackbehaftete Aluminiumschrotte oder aluminiumhaltiges DSD-Material.

Dies war Anlaß für die Firma Aluminium Rheinfelden, innerhalb des Geschäftsbereichs „Werkstoffe für die Kreislaufwirtschaft" ein innovatives Verfahren auf der Basis Pyrolyse zu entwickeln, mit welchem folgende Ziele zu erreichen sind:

- **Erzeugung von hochwertigen Sekundäraluminium-Produkten aus kurzlebigen aluminiumhaltigen Produkten und Konsumartikeln**

- **Einsatz von aluminiumhaltigen Ausgangsmaterialien mit hohem organischen Anteil bzw. mit starker organischer Verschmutzung,** welche mit der heute verbreiteten Salztrommelofentechnik nicht behandelt werden können

- **Erzeugung von deutlich weniger Sonderabfällen** als bei der Salztrommelofentechnik

- **Erzeugung von deutlich weniger gasförmigen Emissionen** als bei der Salztrommelofentechnik

Grundsätzlich ist festzustellen, daß der Markt für Sekundäraluminium wächst. Wurden im Jahre 1984 in Deutschland noch 480 Tausend Mg Sekundäraluminium verbraucht (Primäraluminium: ca. 1,15 Mio Mg), so waren es 1990 bereits 730 Tausend Mg (Primäraluminium: ca. 1,3 Mio Mg).

Der Grund für diese Entwicklung wird anhand der Zahlen für den Energiebedarf zur Aluminiumproduktion deutlich: So sind für Primäraluminium heute ca. 14 kWh pro Kilogramm anzusetzen, während für Sekundäraluminium lediglich ca. 0,65 kWh pro Kilogramm (ca. 4,6 %) aufgewendet werden müssen. Bezogen auf den Gesamtaluminiumverbrauch in Deutschland liegt daher der Recyclinganteil für Aluminium heute bereits bei rund 45 Prozent.

Bei prognostiziertem weiteren Anstieg der Aluminium-Recyclingquoten, insbesondere im KFZ-Bereich, kann abgesehen werden, daß z.B. die Herstellungskosten für Karosseriebleche aus Aluminium in absehbarer Zeit mit solchen aus Stahl konkurrieren können.

2. Stand der Technik bei der Sekundäraluminium Produktion.

Den Markt für die Sekundäraluminium-Produktion aus Aluminiumschrotten, verunreinigten bzw. beschichteten aluminiumhaltigen Produktionsrückständen, Aluminium-Verbundmaterialien sowie aluminiumhaltigen Abfällen teilen sich heute eine Reihe von Firmen, welche z.T. unterschiedliche Verfahren anwenden.

Im weiteren wird auf den am weitesten verbreiteten, allerdings verhältnismäßig abfall- und emissionsintensiven Prozeß - nämlich die Salztrommelofentechnik näher eingegangen, zumal hierüber die meisten technischen Einzelheiten verfügbar sind.

2.1 Salztrommelofentechnik

In Deutschland wird aluminiumhaltiges Altmaterial überwiegend mittels der Salztrommelofentechnik aufgearbeitet. In Baden-Württemberg sind derzeit zwei Firmen mit Salztrommelöfen zur Sekundäraluminium-Produktion tätig, die Metallwarenfabrik Stockach (5 Öfen) und die Asperger Metallhütte (2 Öfen), in welchen im Jahre 1992 ca. 70 000 Mg Sekundäraluminium produziert wurden (Gesamt-Deutschland: 425 000 Mg).

Bei der Salztrommelofentechnik werden verunreinigte Aluminiumschrotte mit bis zu ca. 10 % anhaftender Organik in ein schmelzflüssiges Salzgemisch (NaCl, KCl, CaF_2) mit einer Temperatur von ca. 750 °C eingebracht, wobei die organischen Komponenten verschwelen und verbrennen und die anorganischen Komponenten verschlacken.

Das Salz legt die Oxidhaut des Aluminiums frei, nimmt Verunreinigungen auf (bis ca. 30% seiner Masse) und schützt gleichzeitig das verflüssigte Aluminiummetall vor Luftzutritt und damit vor Oxidation.

Allerdings können mit Salztrommelöfen aluminiumhaltige Verbundpackungen - z.B. DSD-Material - aus wärmetechnischen Gründen nicht verarbeitet werden. Durch den hohen Anteil der organischen Komponenten Kunststoff und Pappe ist der Heizwert des Inputmaterials für einen ungestörten Prozeßablauf zu hoch.

Pro Mg erzeugten Sekundäraluminiums fallen in Salztrommelöfen ca. 450 kg Abfallsalz in Form von Salzschlacke an, welche in früheren Jahren unbehandelt als Sonderabfall deponiert wurde. So rührt das außergewöhnlich salzbelastete Sickerwasser der bis Ende 1983 betriebenen Sonderabfalldeponie Malsch in Baden-Württemberg von der Ablagerung roher Aluminium-Salzschlacke her, welche ca. 20 Prozent des gesamten Deponieinventars ausmacht.

Salzschlacken bestehen aus ca. 65 % Salz, 30 % oxidischen Verunreinigungen und ca. 5 % Einschlüssen aus metallischem Aluminium. Sie werden in Deutschland heute in den meisten Fällen einer Aufbereitung zugeführt, welche aus Zerkleinerung, Siebung und Auslaugungsprozeßen besteht, gefolgt von einer Rückgewinnung des Salzes durch Kristallisation.

Die vorwiegend wasserunlöslichen Auslaugungsrückstände werden heute als Sonderabfall deponiert - im Mittel ca. 250 kg Abfall pro Mg Sekundäraluminium - während die Salze erneut im Drehrohrofen eingesetzt werden.

Die beim Trommelofenprozeß vorgenommene Minderungsmaßnahme für gasförmige Emissionen besteht i.a. in der sogenannten Trockensorption, bei welcher Calciumhydroxid, z.T. vermischt mit Aktivkoks in den Rohgasstrom eingedüst wird. Hierbei fallen in erheblichem Maße dioxinbelastete Stäube in einer spezifischen Menge zwischen 20 und 40 kg pro Mg erzeugtes Sekundäraluminium an, welche untertage deponiert werden müssen.
Der Dioxingehalt in den Stäuben aus Salztrommelöfen liegt fallweise zwischen 5 und 20 µg/kg ITE und über-

trifft damit deutlich die Dioxinkonzentrationen von Flugstäuben aus Müllverbrennungsanlagen (1 bis 10 µg/kg ITE-PCDD/PCDF).

Der spezifische Energieeinsatz beim Betrieb der Trommelöfen beträgt 1600 bis 1800 kWh pro Mg erzeugtes Sekundäraluminium.
Diese verhältnismäßig hohen Werte resultieren aus den Wärmeverlusten durch das Abgas (ca. 10 000 Nm^3 pro Mg Sekundäraluminium) und aus der Notwendigkeit der Salzeinschmelzung im Ofen (ca. 300 bis 400 kg Salz pro Mg Sekundäraluminium).

Fazit:
Die Sekundäraluminium-Produktion in Salztrommelöfen ist eine in volkswirtschaftlicher Hinsicht grundsätzlich positiv zu bewertende Technik, mit welcher gegenüber der Primäraluminium-Produktion erhebliche Energieeinsparungen möglich sind.

Der Prozeß ist jedoch abfallintensiv: Pro Mg erzeugtes Sekundäraluminium fallen im Mittel 250 kg ausgelaugte Schlacken (nach Aufarbeitung) und bis 40 kg dioxinbelastete Stäube als Sonderabfälle an.

Eine alternative, abfallminimierte und energetisch noch effektivere Technik wäre wünschenswert, mit welcher auch aluminiumhaltige Verbundverpackungen z.B. aus DSD-Sammlungen verarbeitet werden können.

2.2 Weitere Verfahren zur Sekundäraluminium-Produktion.

Neben der Salztrommelofentechnik existieren noch eine Reihe weiterer, vornehmlich singularer Verfahren zur Sekundäraluminium-Produktion.

In der nachstehenden Tabelle werden die grundsätzlichen verfahrenstechnischen Charakteristika und die Unterschiede jener Verfahren aufgelistet.

Detaillierte Verfahrensbeschreibungen oder Verfahrensfließbilder für die einzelnen Prozeße sind aufgrund der herrschenden Konkurrenzsituation bei den Sekundäraluminium-Erzeugern nicht erhältlich.

Tabelle 1: Alternative Verfahren zur Sekundäraluminium-Produktion aus Al-Schrotten und Al-Reststoffen

Verfahren	Verfahrenstechnisches Prinzip	Input-Erfordernisse	Aluminiumausbringung	Abfälle
IDEX-System Decoatingprozess der Firma SAS, Birmingham, UK	Materiazugabe in ein Drehrohr unter Luftmangel; Heizgase aus der Nachverbrennung werden in ein innenliegendes Zentralrohr und dann im Gegenstrom über das Einsatzmaterial geleitet. Danach wird das Heizgas/Schwelgas verbrannt	Materialinput ohne Einschränkungen Anlagenkomponenten sind hierauf abzustimmen	Al stückig, blank	Stäube * Aschen *
Meyer & Lier Verfahren angewandt z.B. bei der Firma Alu Nova, Bad Säckingen und Firma Alugral, Neuß	Drei hintereinandergeschaltete Rohrreaktoren mit Schneckenvortrieb und gesteuerter Luftzufuhr. Materialerwärmung direkt im Gegenstrom durch die Verbrennungsabgase.	Materialinput ohne Einschränkungen Anlagenkomponenten sind hierauf abzustimmen	Al stückig, blank	Stäube * Aschen *
ALCAN-Prozess der Firma Alcan, Ivrea, Italien bei Borgo Franco	Drehrohr, im Gegenstrom mit Rauchgas beheizt	Materialinput ohne Einschränkungen Anlagenkomponenten sind hierauf abzustimmen	Al stückig, blank	Stäube * Aschen *
Intal-Verfahren zur sog. Spänetrocknung, angewandt von verschiedenen Firmen	Drehtrommel, direkt beheizt mit Erdgas- oder Heizölbrenner, in welchem auch die abdestillierten Öldämpfe verbrannt werden	Nur für Al-Späne aus spanabhebender Bearbeitung	Al-Späne, ölfrei, blank	Stäube * Aschen *
Result-Verfahren angewandt von verschiedenen Firmen, z.B. von Firma Trienekens, Grevenbroich	Kalter Prozess: Entschichtung durch Abrasion in einer speziellen mechanischen Trennmaschine	Nur für Folien und Folienverbunde / Nicht für massive oder dickwandige Schrotte	Al Granulate mit Restverunreinigungen	Stäube* abgetrennte Organik *

* Mengen sind nicht bekannt

3. Charakterisierung der im Zuge des Projekts realisierten Recyclinganlage

Wie bereits erwähnt, konnten bei der Firma Aluminium Rheinfelden zwar unverschmutzte und metallisch blanke Aluminiumschrotte recycliert werden, nicht jedoch verschmutzte oder mit Organik beschichtete Aluminiumschrotte oder gar aluminiumhaltiges DSD-Material. Eine Hinwendung zum Recycling der letztgenannten Materialien bedeutete daher die Suche nach einem geeigneten Verfahren, mit welchem eine stoffliche Trennung des Aluminiums von organischen Anhaftungen, wie Farben und Lacke, bzw. von organischen Verbundmaterialien, wie Papier, Pappe oder Kunststoffen, möglich ist.

Als Problemlösung wurde die Pyrolyse ins Auge gefaßt, mit welcher sich grundsätzlich solche Stofftrennungen durchführen lassen. (Pyrolyse = Verschwelung = Verkokung)

Die Pyrolyse ist ein Prozeß, bei dem organisches Material unter Luftabschluß bzw. Luftmangel thermisch zersetzt wird, wobei heizwertreiche Gase und koksartige Rückstände resultieren. Der Wärmeeintrag in das zu zersetzende Material erfolgt daher i.d.R. indirekt, also durch eine Wand. Bei entsprechenden Aufenthaltszeiten sind Pyrolysetemperaturen zwischen 500 und 600 °C für die Zersetzung organischer Stoffe ausreichend.

Die Pyrolyse ist einer der ältesten großtechnisch genutzten thermischen Prozeße (über 150 Jahre Stadtgas- und Kokserzeugung durch Kohlepyrolyse) und erfuhr in den 70-er Jahren eine Renaissance in der Abfallwirtschaft. Von den zahlreichen, im In- und Ausland erstellten Abfallpyrolyseanlagen haben allerdings nur sehr wenige aufgrund technischer und wirtschaftlicher Probleme bis heute überlebt. In Deutschland sei diesbezüglich auf die zweistraßige Drehrohrpyrolyseanlage in Günzburg (Bayern) für die Entsorgung von Siedlungsabfällen hingewiesen, welche von der Firma Babcock gebaut wurde und welche seit 1983 bis heute in Betrieb ist.

Eine erneute Renaissance der Pyrolyse in der Abfallwirtschaft datiert erst einige Jahre zurück: Sie ist verknüpft mit den Namen der Firmen Siemens-KWU, Noell, PKA und Thermoselect, deren Anlagen sich bis dato im Bau oder in der Erprobungsphase befinden, so daß belastbare Betriebsdaten bis heute nicht verfügbar sind. Allerdings wurden Stimmen hörbar, welche von gravierenden technischen Problemen berichten.

Vor dem Hintergrund dieser Situation bewies die Entscheidung der Firma Aluminium Rheinfelden für die Pyrolyse erhebliche unternehmerische Risikobereitschaft.

Das Projekt wurde jedoch sehr sorgfältig geplant und vorab eine Vielzahl wichtiger Informationen zur Pyrolysetechnik und zum Pyrolysebetrieb eingeholt: Mehrere Besuche bei der o.g. Hausmüllpyrolyseanlage in Günzburg gehörten hierzu und auch die Einbeziehung namhafter Pyrolyseexperten sowie auch vorab durchgeführte grundlegende Laboruntersuchungen zu Massen-, Energie- und Schadstoffbilanzen bei der Pyrolyse von DSD-Material an der Universität Stuttgart.

Die von der Firma Aluminium Rheinfelden in der Folge konzipierte und neu erstellte Anlage kann in drei Betriebsteile untergliedert werden:

Betriebsteil 1
Zwischenlagerung und Zerkleinerung der aluminiumhaltigen Reststoffe

Betriebsteil 2
Drehrohrpyrolyse-Decoatinganlage mit nachgeschalteter Blankglühe

Betriebsteil 3
Aluminium-Schmelzanlage

Die technischen Einzelheiten der oben genannten Betriebsteile sind in den folgenden Unterkapiteln beschrieben.

3.1 Betriebsteil 1: Zwischenlagerung und Zerkleinerung der aluminiumhaltigen Reststoffe

3.1.1 Materiallager

Die Halle 17/18 auf dem Werksgelände der Firma Aluminium Rheinfelden, welche früher für die Söderberg-Elektrolyse genutzt wurde, konnte für die Zwischenlagerung der Reststoffe und für die Unterbringung von Anlagenteilen wie folgt hergerichtet werden.

- Kiesauffüllungen der Gruben der ehemaligen Elektrolyseöfen.
- In den Bereichen Schmelzanlage Verlegung von stahlarmiertem Betonboden.
- Da Aluminiumspänen Mineralöle und Emulsionen anhaften können, wurden in den Lagerungsbereichen für Späne (Späneboxen) Maßnahmen zum Grundwasserschutz wie folgt getroffen: Rohplanum aus Auffüllmaterial, darauf PE-Schutzfolie, darauf Sarnafil-Dichtungsfolie MPG 950-20 (gemäß § 19 WHG), darauf Geotextil-Schutzvlies, darauf ca. 180 mm starker Betonboden.
- Alle übrigen Bereiche der Halle 17/18 erhielten Asphaltdecke.

Die Anlieferung der zu verarbeitenden Materialien geschieht in der Regel per LKW oder Bahnwaggon in das Werk. Die Masse der auf LKW eingehenden Materialien wird auf der Straßenfahrzeugwaage durch Ein- und Ausgangswiegung ermittelt. Bei Anlieferungen per Bahnwaggon gilt das Vorgehen entsprechend für die Gleiswaage.

Die gesamte Materialbestandsführung ist in das firmenseitig vorhandene EDV-System integriert. Das angelieferte Material wird an den zugewiesenen Lagerplätzen unter Dach entladen. Im westlichen Hallenbereich ist ein bevorzugter Lagerbereich für Ballenware vorhanden. Ein Lagerbereich für palettiertes Eingangsmaterial befindet sich auf einem zentralen Lagerplatz in der Hallenmitte.

Die zum Einsatz gelangenden Aluminium-Verbundmaterialien sind nach bisherigen Erfahrungen bei ordnungsgemäßem Anlieferungszustand in Form von komprimierter Ballenware gut stapelbar, ebenso andere gepreßt angelieferte Schrotte, wie z.B. Tuben, Dosen und sog. flexibel packaging.

Aluminiumspäne aus der Metallbearbeitung werden in die insgesamt 7 Späneboxen abgekippt. Die Boxenfläche beträgt insgesamt ca. 390 m², das Nutzvolumen der Boxen ist ca. 1000 m³ .

3.1.2 Zerkleinerungsaggregate und Magnetscheidung

Das Material wird zerkleinert, damit es für den nachfolgenden Prozeß dosiert werden kann und damit unerwünschte Fremdstoffe, z.B. ferromagnetische Bestandteile, mit dem Magneten ohne größeren Wertstoffverlust abgetrennt werden können.

Gemäß Beschickungsplan der Anlage wird das gewünschte Einsatzmaterial dem Lagerplatz mit Gabelstapler bzw. Radlader entnommen und verwogen. Danach wird das Einsatzmaterial in den Aufgabeförderer gegeben, der das Material in den Rotorwellen-Zerkleinerer übergibt.

Es werden zwei grundsätzlich verschiedenartige Materialarten zerkleinert:

- Aluminium-Späne aus der Metallbearbeitung,
- Aluminium-Verbundstoffe, z.B.
    - Al-Fraktion aus dem Dualen System Deutschland, DSD,
    - Lackierte Bleche und Metallwaren, Tuben, Flaschenkapseln.

Durch den Einsatz des langsam laufenden Zerkleinerers wird dabei wunschgemäß nur ein geringer Feinkornan-

teil erzeugt. Die bei der Zerkleinerung entstehenden Stäube werden durch eine Entstaubungsanlage abgesaugt und als Abfall entsorgt.

Das zerkleinerte Material gelangt über einen Gurtförderer zum Trommelmagnet als erster Stufe der Magnetscheidung und dann mittels Vibrationsförderer zur Starkfeldmagnetscheidung als 2. Magnetscheidestufe.

In der 1. Magnetscheidestufe werden grobstückige ferromagnetische Bestandteile aus dem Materialfluß entnommen. In der 2. Magnetscheidestufe werden weitere Bestandteile, so u.a. auch magnetisierbare Edelstähle abgetrennt. Das abgetrennte ferromagnetische Material wird in Containern getrennt gesammelt und der Verwertung zugeführt.

Die technischen Spezifikationen des Zerkleinerungsaggregats und der Magnetscheidung sind wie folgt anzugeben:

Lieferant: Firma J.R.S. Ltd., Redditch, GB
Typus: Ein-Rotorwellen-Zerkleinerer mit nachgeschalteter zweistufiger Kopftrommel-Magnetscheidung.

Antriebsleistung Rotorwelle	2 x 315 kW hydraulisch
Rotorabmessungen	750 x 2000 mm (D x L)
Aufgabe-Massenstrom	6 Mg/h
Ziel-Stückgröße	ca. 75 mm
Maximaler Feinkornanteil	< 3 %
Abscheidegrad für ferromagnetische Metalle	> 99,9 %

3.1.3 Fördereinrichtungen

Die aufbereiteten Verbundstoffe werden mittels Steilförderer und Zuteilungsförderer wahlweise in einen der Materialbunker eingetragen. Das gespeicherte Material wird bedarfsabhängig über Dosierförderer auf den Sammelgutförderer ausgetragen. Dieser übergibt das Material an den Zuteilungsförderer, der es aus der Halle zum Eintragsschacht der Pyrolyseanlage transportiert.

Die technischen Spezifikationen der Fördereinrichtungen sind im folgenden angegeben:

Lieferant: Firma Albrecht Fördertechnik GmbH, Ummendorf
Gummi-Transportbänder für Aufgaben der Zwischenförderung, reversierbarer 1,5 kW Zuteilungsförderer für Materialpuffer

Volumen Materialpuffer	2 x 139 m^3
Leistung Materialsammelband	3 kW
Leistung Steilförderband	4 kW

3.2 Betriebsteil 2: Drehrohrpyrolyse-Decoatinganlage mit nachgeschalteter Blankglühe

3.2.1 Eintragssytem Pyrolyse:

Das im Materialeintragsschacht integrierte Schleusensystem besteht aus gegenläufigen Doppelschiebern, welche aus Sicherheitsgründen mit Stickstoff als Inertgas beaufschlagt sind. Die Materialzugabe in das Pyrolysedrehrohr erfolgt getaktet mittels einer Eintragsschnecke.

3.2.2 Pyrolysedrehrohr

Das Pyrolysedrehrohr wird an der Austragsseite über einen Zahnkranz mittels Hydraulikantrieb angetrieben. Zusätzlich verfügt das Drehrohr noch über einen Notantrieb. Die Drehzahl kann bis 5 pro Minute variiert werden. Auch kann das Drehrohr reversiert werden, was einen sofortigen Stop des Feststoffaustrags zur Folge hat, z.B. im Falle von Betriebsstörungen im Austragsgehäuse bzw. bei der Abförderung der Feststoffe.

Das Drehrohr ist an der Eintragsseite sowie an der Austragsseite mittels Gleitringdichtung und Inertgasspülung abgedichtet. Die Abdichtungen stellen langjährig bewährte Systeme dar (System Pleq).

In das ursprünglich innenseitig glatte Drehrohr wurden im Zuge des Projekts Leisten installiert, durch welche das Vermischungs- und Förderverhalten des Drehrohrs verbessert werden konnte.

Die für den Aufheiz- und Pyrolysevorgang erforderliche Energie innerhalb des Pyrolysedrehrohrs wird durch heiße Verbrennungsabgase aus der Pyrolysegas-Brennkammer zugeführt. Die Wärmezufuhr erfolgt dabei indirekt, wobei die Verbrennungsabgase durch einen, das Drehrohr umgebenden Heiztunnel strömen.

Die Eintrittstemperatur der Heizgase beträgt im Normalbetrieb bis ca. 900 °C. Hierdurch werden die notwendigen Zersetzungstemperaturen zwischen 500 und 600 °C im Innern des Drehrohrs bewirkt.

Nach Passieren des Heiztunnels, welcher zusammen mit dem Drehrohr als großer Gegenstrom-Wärmeaustauscher fungiert, gelangt das abgekühlte Beheizungsgas wieder in die Pyrolysegas-Brennkammer zurück.

Aufgrund der Temperaturverhältnisse im Drehrohrofen und bei einer angestrebten Garungszeit von maximal einer Stunde ist gewährleistet, daß das Material austragsseitig optimal ausgegast ist.

Die technischen Spezifikationen des Pyrolyse-Drehrohrofens sind im folgenden angegeben:

- Lieferant: Babcock BSH AG, Krefeld-Uerdingen	
- Drehrohrlänge insgesamt, mit Ein- und Austragsköpfen	24,6 m
- Drehrohrlänge, beheizbar	19,0 m
- Drehrohrdurchmesser, außen	3,0 m
- Wandstärke des Drehrohrs	20 mm
- Material des Drehrohrs	Stahl 1.4876
- Masse des Drehrohrs mit Ein- und Austragsköpfen	64 Mg

Zusätzliche Anlagenteile:

- Heizmantel-Stahlkonstruktion	
- Stahl-Unterbaukonstruktion	
- Drehrohr-Lagerung und Antrieb	
- Dichtsysteme für Ein- und Austrag	
- Leistung Hauptantrieb	250 kW
- Leistung Hilfsantrieb	15 kW

3.2.3 Austragssystem Pyrolyse

Die Feststoffe, bestehend aus Aluminium mit Pyrolysekoksbeimengungen werden am Ende des Pyrolysedrehrohrs mittels innerhalb des Drehrohrs angebrachter Austragsschaufeln in den Austragskopf gefördert, wonach die Separierung der Feststoffe vom Pyrolysegas im sich anschließenden Ausfallgehäuse erfolgt.

Während das Pyrolysegas auf kürzestem Wege über eine gerade und beheizte Rohrleitung in die Brennkammer gelangt, fallen die Feststoffe in ein Doppelschleusensystem, wobei zur Vermeidung von Lufteinbruch die Schleusenklappen gegeneinander verriegelt sind. Zusätzlich wird das Doppelschleusensystem aus Sicherheitsgründen mit Stickstoff als Inertgas beaufschlagt.

Am Ende des Schleusensystems gelangen die Feststoffe füllstandsüberwacht in den Heißgutförderer, welcher das Material in Richtung Blankglühe abführt.

3.2.4 Blankglühe

Der noch mit Resten von Pyrolysekoks behaftete Aluminium-Hauptstrom wird über den Heißgutförderer der Blankglühtrommel zugeführt, in welcher die Pyrolysekoks-Anhaftungen gezielt oxidiert werden.

Die beim Blankglühen entstehenden Abgase - vorwiegend CO_2 - werden abgesaugt und der Brennkammer zugeleitet.

Das geglühte Material, welches jetzt vorwiegend aus blankem Aluminium besteht, wird aus der Blankglühtrommel ausgetragen und - nach Handauslese von nicht magnetischen Edelstahlteilen - mittels Band abgefördert.

Danach erfolgt eine Aufteilung dieses Stoffstroms auf die beiden Schmelzofenlinien, welche sich an den Erfordernissen des Schmelzofenbetriebs und der Materialqualität orientiert.

Die technischen Spezifikationen der Blankglühe sind wie folgt:

Lieferant: Firma Babcock BSH AG, Krefeld-Uerdingen
Blankglühtrommel auf Rollenlager, Eintrag mittels Schwingförderer, Austrag schöpfend

Außendurchmesser Glühtrommel	2,2 m
Länge Glühtrommel	11 m
Masse	ca. 21 Mg
Drehzahl	bis 10 pro Minute
Durchsatz	ca. 4 Mg/h
Installierte Antriebsleistung	30 kW

3.2.5 Brennkammer

Die Einspeisung der für die Verbrennung des Pyrolysegases erforderlichen Luft erfolgt durch Ventilatoren. Sauerstoffgehalt sowie Temperatur in der Brennkammer werden registrierend überwacht.

Gemäß Genehmigungsbescheid wird eine Brennkammertemperatur von mindestens 1200 °C eingehalten sowie ein Sauerstoffgehalt am Ausgang der Brennkammer von mindestens 6 % sichergestellt.
Das Brennkammerabgas wird zur Beheizung des Pyrolysedrehrohrs verwendet und hiernach der Rauchgasrei-

nigung zugeleitet. Eine anderweitige, wirtschaftlich vertretbare Wärmenutzung der Brennkammerabgase kann aus umweltschutztechnischen Gründen hier nicht erfolgen, da eine weitergehende Absenkung der Abgastemperatur Dioxine entstehen lassen würde. Die Unterdrückung der Dioxin-de-novo-Synthese hatte jedoch bei dieser Anlage Priorität.

Die technischen Spezifikationen der Brennkammer sind im folgenden angegeben:

Lieferant: Firma Dräger Energietechnik GmbH, Wachtendonk
Zweistufige Brennkammer

Außendurchmesser Brennkammer	4,5 m
Länge Brennkammer	10 m
Masse Brennkammer mit Feuerfestauskleidung	170 Mg
Nennwärmeleistung	17,4 MW

3.2.6 Rauchgaswäsche

Das der Rauchgasreinigung zugeführte Brennkammerabgas wird über eine feuerfest ausgekleidete Verbindungsrohrleitung der Quenche zugeleitet.

In der Quenche wird das heiße Brennkammerabgas schockartig auf eine Temperatur von ca. 85 °C abgekühlt. Hierdurch wird die Bildung polychlorierter Dibenzodioxine und Dibenzofurane (PCDD/PCDF) durch Unterdrückung der de-novo-Synthese verhindert. In Verbindung mit dem bei der Hochtemperaturverbrennung von 1200 °C zu erreichenden optimalen Ausbrand ist damit eine bestmögliche Verminderung der PCDD/PCDF-Emissionen zu erreichen.

Der abgekühlte Rauchgasstrom wird dem Venturiwäscher zugeführt. Diesem nachgeschaltet ist der Tangentialwäscher. Die zweistufige Kombinationswaschstufe mit Venturi- und Tangentialwäscher dient insbesondere der Abscheidung von Staub, Chlorwasserstoff und Schwefeldioxid.

Das vorgereinigte Abgas wird durch die redundanten Saugzugventilatoren in den Füllkörperwäscher gefördert und dort nochmals betreffend die Komponenten Chlorwasserstoff und Schwefeldioxid nachgereinigt. Als Additiv zum Waschmedium der Rauchgasreinigung wird Natronlauge eingesetzt, welche in einer Dosiereinrichtung vorgehalten wird.

Das gereinigte Abgas wird abschließend durch einen Tropfenabscheider und Schalldämpfer geführt, bevor es in den Kamin gelangt.

Die technischen Spezifikationen der Rauchgaswaschanlage sind im folgenden angegeben:

Lieferant: Firma Jakob Handte & Co, GmbH, Tuttlingen
Gaswaschsystem, bestehend aus Quenche, Venturiwäscher, Füllkörperwäscher und Saugzugventilator für folgende Abgas-Volumenströme

- max. Volumenstrom am Quencheintritt	32 000 Nm³/h
- max. Rohgastemperatur am Quencheintritt	1 300 °C
- Rohgastemperatur am Venturiwäscher	ca. 80 °C
- Durchmesser Füllkörperwäscher	3 500 mm
- Gesamthöhe Füllkörperwäscher	11 000 mm
- Installierte Leistung Saugzugventilator	500 kW

3.2.7 Eindampfung Abschlämmwasser

Das Abschlämmwasser der Rauchgasreinigung wird in einen Pufferbehälter gepumpt, welcher sich in einem überdachten Standort neben der Pyrolyseanlage befindet. Von dort wird eine Teilmenge des Abschlämmwassers dem Vorverdampfer (erste Konzentrierungsstufe) aufgegeben.

Aus dem Vorverdampferkreislauf wird die Ausschleusung zu den nachgeschalteten Dünnschichtverdampfern mit den Konzentratpumpen vorgenommen. Die Dünnschichtverdampfer sind mit Schabern für den Feststoffabtrag ausgerüstet. Als Produkt fällt trockenes Eindampfsalz mit einer Restfeuchte von < 1% an.

Inertgas und Dampf werden in einem erdgasbefeuerten Dampfkessel separat erzeugt.

Die technischen Spezifikationen der Abschlämmwasser-Eindampfungsanlage sind im folgenden angegeben:

Lieferant: Firma Dräger Energietechnik GmbH, Wachtendonk
Eindampfkristallisation, bestehend aus Fallfilmverdampfer mit nachgeschaltetem Dünnschichtverdampfer

Verdampfungsleistung	500 kg/h
Salzfracht im Abschlämmwasser	ca. 50 kg/h

3.2.8 Ableitung gasförmiger Emissionen:

Alle gasförmigen Emissionen der Anlage werden über den zweizügigen Schornstein abgeleitet. Im Schornstein-Außenrohr werden die Abgase aus der Rauchgaswäsche geführt. Im Schornsteininneren verläuft konzentrisch das Rohr für das heißere Schmelzofenabgas, welches die Abgase aus der Rauchgaswäsche aufheizt und so deren Thermik verbessert.

Die technischen Spezifikationen des Schornsteins sind im folgenden angegeben:

Lieferant: Firma Steelcon Chimney, Esbjerg AS, Dänemark
Freistehender, doppelwandiger, korrosionsbeständiger Stahlschornstein mit Innenzug

Schornsteinhöhe	50 m
Außendurchmesser Schornstein	2 150 mm
max. Abgasstrom aus Gaswäsche	108 000 Nm^3/h
max. Abgasstrom aus Schmelzstufe	8 000 Nm^3/h
max. Abgasstrom, insgesamt	116 000 Nm^3/h
Abgastemperatur an der Schornsteinmündung	ca. 150 °C

3.3 Betriebsteil 3: Aluminium-Schmelzanlage

Das aus der Blankglühe abgeförderte, durch Handauslese von Edelstahl - Kupfer- und Messingteilen entfrachtete, metallisch blanke Aluminium gelangt in die Schmelzanlage, wo es eingeschmolzen wird.

Hierfür stehen zwei Zweikammeröfen, bestehend aus Heizkammer und Vortex-Einrührsystem zur Verfügung.

Die technischen Spezifikationen der Schmelzöfen sind wie folgt:

- Herkunft der Schmelzöfen: Aus Halle 2, Werk I, (ursprünglich eingesetzt für Dünnbandguß)
- Gesamtmasse eines Schmelzofens ca. 40 Mg

- Inhalt eines Schmelzofens an Flüssig-Aluminium ca. 12 Mg

Ein Zweikammer-System (open well) besteht aus:
- offener Chargierkammer (Vortex-System),
- Flüssigmetall-Umwälzpumpe,
- Heizkammer (= Herdofen),
- Rinnensystem.

Vom Herdofen wird flüssiges Aluminium mit einer Flüssigmetall-Umwälzpumpe über eine Verbindungsrinne in die offene Chargierkammer gefördert und dort in Rotationsbewegung versetzt, wodurch ein Wirbel (Vortex) entsteht.

In den rotierenden Wirbel des flüssigen Aluminiumstromes wird über eine Aufgabeschurre kontinuierlich das aus der Pyrolyse-Decoatinganlage stammende blank geglühte Aluminium zudosiert. Bedingt durch die Rotationsbewegung der Aluminiumschmelze und die Position der Dosierstelle wird das feste Aluminium rasch unter die Badoberfläche gezogen und benetzt, wodurch eine unerwünschte Oxidation des Aluminiums durch den Luftsauerstoff verhindert wird. Darüber hinaus wird die Oxidation des Aluminiums an der Badoberfläche durch aufgebrachtes Schmelzsalz minimiert.

Von der Chargierkammer gelangt der Metallstrom zurück in die Heizkammer des Herdofens. Dort wird die beim Schmelzvorgang aufgewendete Wärme durch Beheizung mit Erdgas-Luft-Brennern nachgeliefert. Das Schmelzofenabgas wird durch einen feuerfest ausgekleideten Bodenkanal (Fuchs) in den Kamin geleitet.

Das schmelzflüssige Aluminium wird niveauabhängig, chargenweise entweder mit Flüssigmetalltiegel und Transportwagen der Gießerei zugeführt oder durch Abfüllung in Masseln abgegossen.

Das erzeugte Metall wird entsprechend seiner Legierungszusammensetzung für den nachfolgenden Gießerei-Prozeß werkstoffanalytisch charakterisiert und seine Spezifikationen dokumentiert.

Beispielhaft werden in der folgenden Tabelle die Konzentrationen bedeutsamer Legierungsbestandteile des in der Anlage erzeugten Aluminiums aus einer Tagesproduktion angegeben. Es handelt sich hierbei um den Mittelwert von 20 Abgüssen (Stichtag: 01.07.1998).

Tabelle 2: Typische Gehalte wesentlicher Legierungselemente des in der Recycling-Pyrolyseanlage erzeugten Aluminiums bei Verarbeitung des Standard-Input-Mix

Legierungselement	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Pb	Sn	Ni
Massen-%	0,32	0,72	0,69	0,47	0,18	0,039	0,33	0,02	0,012	0,026

Die folgenden Abbildungen geben die Ansicht, das Blockbild und den Aufstellungsplan der Recycling-Pyrolyseanlage (Sachstand: Mitte 1998) wieder.

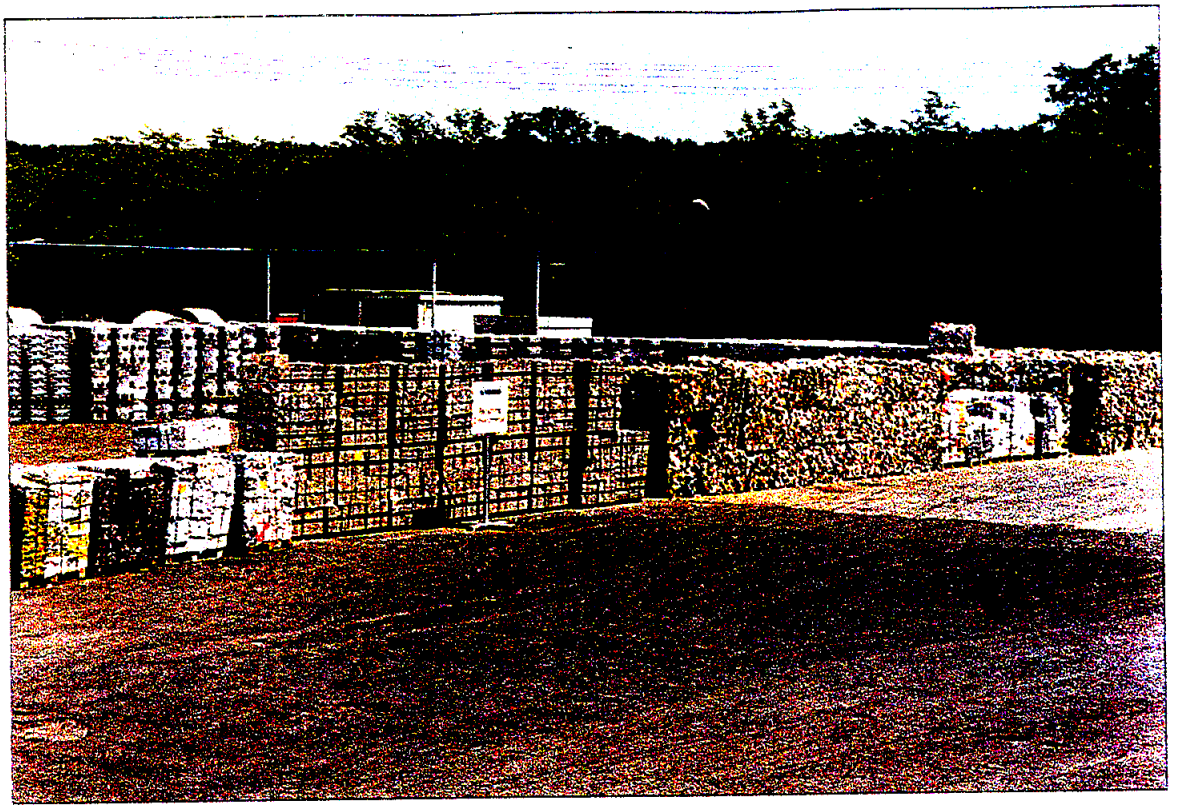

Abb. 1: Inputmaterial für die Pyrolyse-Recyclinganlage und Outputmaterial (im Hintergrund)

Abb. 2: Ansicht der Pyrolyse-Recyclinganlage. Links das Pyrolysedrehrohr, dahinter Brennkammer und Rauchgasreinigung

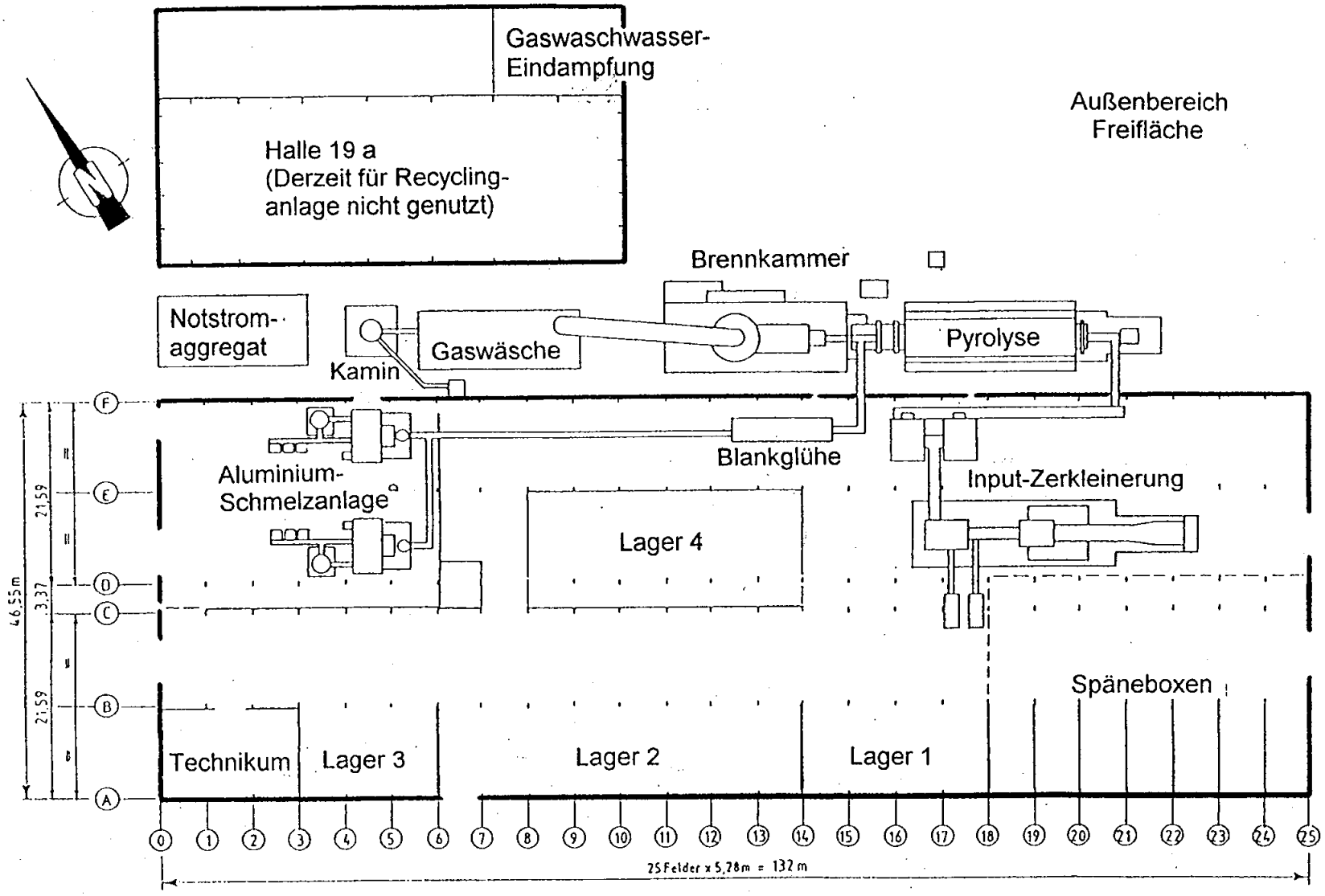

Abb.4: Aufstellungsplan der Pyrolyse-Recyclinganlage sowie der pheripheren Anlagenteile innerhalb und außerhalb der Halle 17/18 auf dem Werksgelände III der Firma Aluminium Rheinfelden

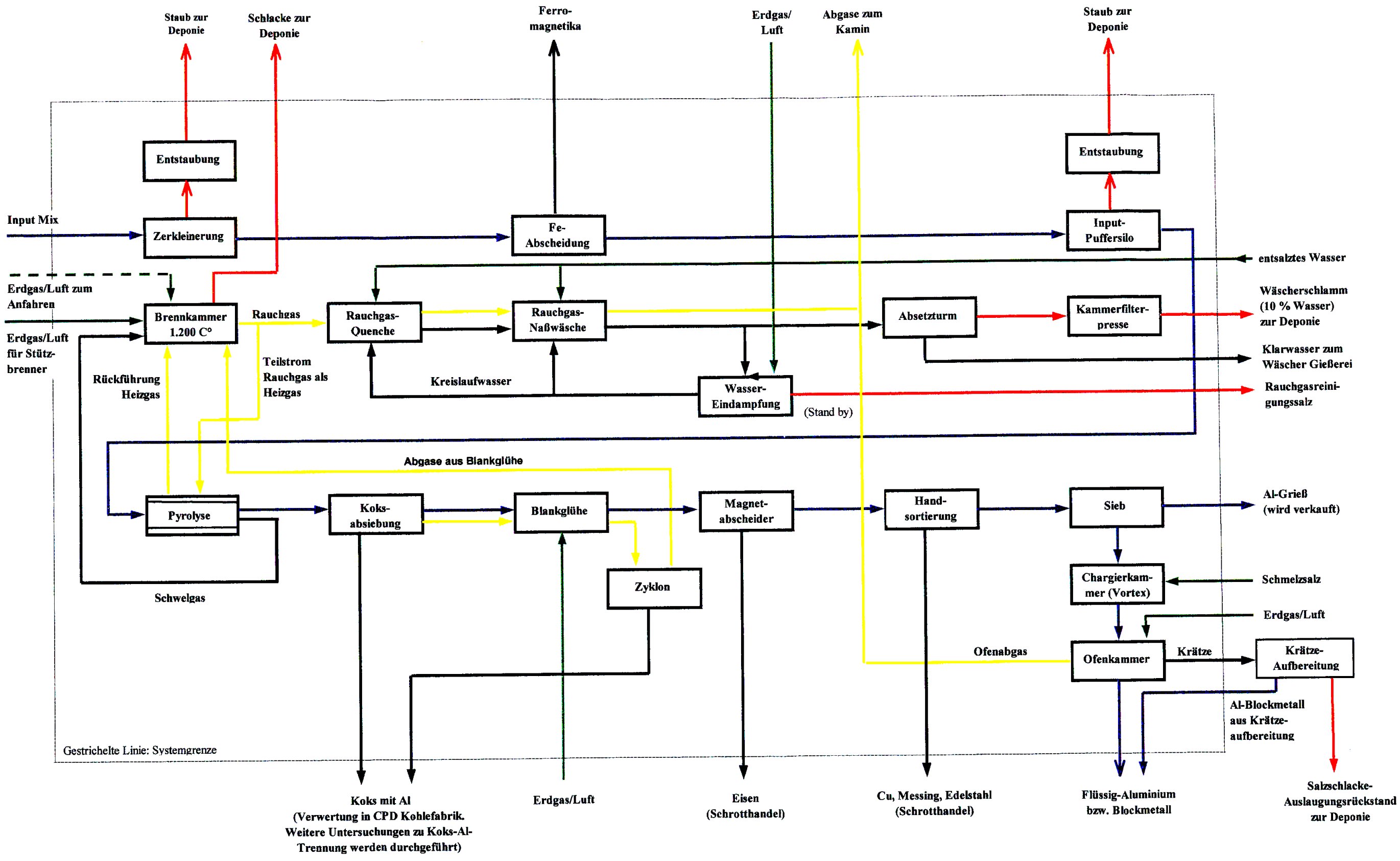

Abb. 3: Grundfließbild der Recycling-Pyrolyseanlage für aluminiumhaltige Abfälle der Firma Aluminium Rheinfelden GmbH, Sachstand Mitte 1998

Haupt-Materialstrom, Aluminium | Abfälle | Hilfsstoffe | Abgas, Rauchgas | Stoffe zur Verwertung

4. Projektverlauf und besonders erwähnenswerte Problemlösungen

Die folgende Tabelle gibt den Zeitplan und dessen Erfüllung wieder.

Tabelle 3: Zeitplan des Projekts

Position	Charakterisierung des Teilvorhabens	Zeitplan	Zeitpunkt der Realisierung
1	Projektbeginn, Vergabe des Basic Engineering	Sep. 1995	Sep. 1995
2	Angebotsvergleich, Bestellung von Komponenten	Nov. 1995	Nov. 1995
3	Einreichung immissions- u. wasserrechtlicher Anträge	Nov. 1995	Nov. 1995
4	Einreichung des Bauantrags	Nov. 1995	Nov. 1995
5	Baubeginn	Feb. 1996	Feb. 1996
6	Montagebeginn	Apr. 1996	Apr. 1996
7	Fertigstellung, Bau und Montage	Aug. 1996	Aug. 1996
8	Inbetriebnahme	Dez. 1996	Dez. 1996
9*	Optimierungsphase	-	Jan. 1997 bis Juni 1998
10	Produktionsphase, Übergang zum Dauerbetrieb	Jan. 1997	ab Juni 1998
11	Meßprogramm, Erfolgskontrolle	ab Mai 97	Juli bis Sept. 1998
12	Projektende	Aug. 1997	Ende 1998

* Die Position 9 „Optimierungsphase" war ursprünglich im Zeitplan so nicht ausgewiesen.

Rückblickend wird deutlich, daß die „Optimierungsphase" den größten Zeitbedarf beanspruchte, was im übrigen weniger durch die Pyrolysetechnik verursacht wurde, als vielmehr durch periphere Systemkomponenten sowie auch durch nicht Vorhersehbares.

Probleme traten z.B. auf durch die vorher nicht abzusehende Notwendigkeit tieferer Fundamentierungen. Vor der Erstellung der Fundamente der Pyrolyse-Drehrohranlage, der Brennkammer, der Rauchgaswäsche und des Schornsteins mußten Fragen zur Bodenmechanik des Baugrunds geklärt werden. Anhand von Schürfen, Rammsondierungen und Kernbohrungen wurde ein Gründungskonzept für die Anlagenfundamente festgelegt, welches z.T. Blockfundamente, z.T. Pfahlgründungen bis über 8 Meter Tiefe beinhaltete. Diesbezügliche Mehraufwendungen konnten jedoch noch innerhalb des Zeitplans abgearbeitet werden.

Ein monatelanger Anlagenstillstand mußte dann im Frühjahr 1997 hingenommen werden, bedingt durch fehlerhaft gelieferte Anlagenkomponenten, insbesondere betreffend undichte Klappen im Austragsgehäuse. Letztere hatten zu gravierenden Folgeschäden an der Anlage geführt, was erhebliche Umbau- und Renovierungsarbeiten und z.T. Neukonstruktionen an den Austragsklappen erforderlich machte.

Neben zahlreichen kleineren - hier nicht zu erwähnenden - Detailverbesserungen an verschiedenen Anlagenteilen erwiesen sich die folgenden, im Zuge der Anlagenoptimierung vorgenommenen Maßnahmen für die Wirtschaftlichkeit des Anlagenbetriebs als besonders bedeutsam:

- Im Rahmen der Prozeßoptimierung wurden im Inneren des ursprünglich glatten Drehrohrs Mitnehmerleisten in Längsrichtung angebracht. Durch diese Einbauten konnte die Materialdurchmischung und somit die Entgasung wesentlich verbessert werden, was letztlich eine deutliche Erhöhung des Drehrohr-Durchsatzes zur Folge hatte.

- Das aus der Blankglühtrommel ausgetragene, geglühte Material besteht zwar vorwiegend aus blankem Aluminium - es enthält jedoch noch geringe Anteile an nicht magnetischen Edelstahlteilen sowie Kupfer und Messing, welche nur schwer maschinell separierbar sind. Als effektive Problemlösung erwies sich hier eine manuelle Auslese von solchem Störmaterial im Anschluß an die Blankglühtrommel. Hierdurch wird ein er-

höhter Gehalt an unerwünschten Metallen im erschmolzenen Aluminium vermieden. Die Qualität des mit der Pyrolyse-Recyclinganlage produzierten Aluminiummetalls (Guß- und Knetlegierungen) genügt damit den firmenseitigen Ansprüchen in vollem Umfange.

- Die beim Schmelzvorgang auf der Badoberfläche der Schmelzöfen zurückbleibende salz- und metallreiche Krätze mußte laufend manuell entfernt werden. Durch eine Eigenkonstruktion der Firma Aluminium Rheinfelden konnte dieser Vorgang voll automatisiert werden, so daß der Abkrätzvorgang jetzt effektiv und in betriebsbedingtem Rhythmus erfolgt.

5. Massenbilanz der Recycling-Pyrolyseanlage

Da die Massenbilanz des Pyrolyse-RecyclingProzeßes in erster Linie von der Art und der Zusammensetzung des Input-Materials abhängt, wird dieses zuerst charakterisiert.

Im Zuge der während der Optimierungsphase durchgeführten zahlreichen Testläufe mit der Recyclinganlage erwies sich der im folgenden charakterisierte Input-Mix aus kaufmännisch-kalkulatorischen Gründen als besonders praktikabel, zumal sich damit qualitativ hochwertiges Aluminium in hoher Ausbeute produzieren ließ. Daher wird dieser Input-Mix auch künftig als Standard-Input eingesetzt werden.

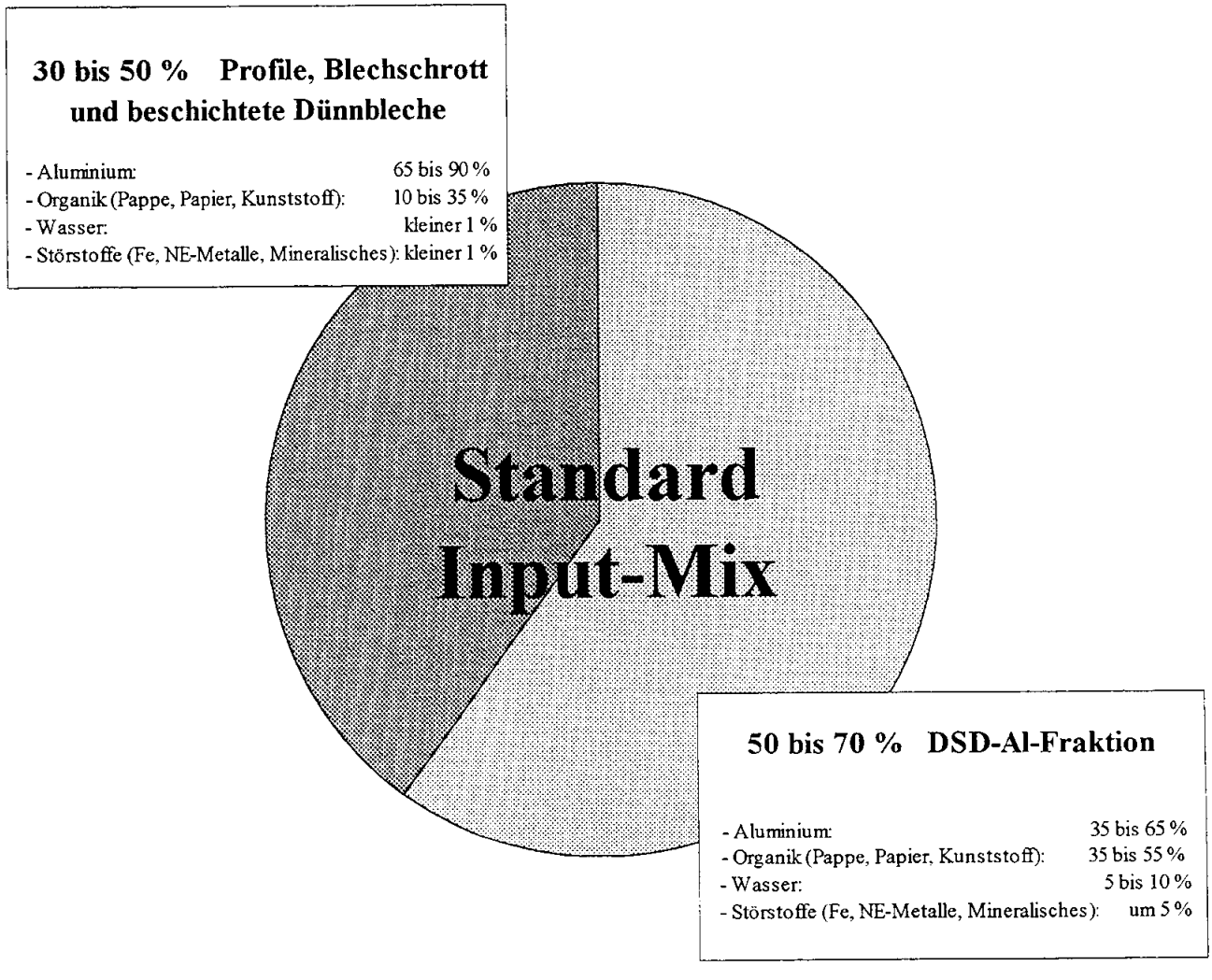

Abb. 5: Input-Mix für die Pyrolyse-Recyclinganlage als Standard-Input für den regulären Produktionsbetrieb

Neben den bestimmenden kaufmännisch-kalkulatorischen Gründen gibt auch technische Gründe für den hier favorisierten Input-Mix.

So ist die Brennkammer für einen bestimmten Wärmestrom ausgelegt. Dies bedeutet, daß der Energieinhalt des Input-Mix derart sein muß, daß die Brennkammertemperatur, gemäß den behördlichen Umweltschutzauflagen,

zwischen 1200 und 1300 °C zu halten ist. Ein zu hoher Energieinhalt im Input würde bedingen, daß der Inputstrom gedrosselt werden müsste - ein zu niedriger Energieinhalt würde Erdgas-Stützfeuer in der Brennkammer erforderlich machen. Beides ist kontraproduktiv.

Ein weiterer technischer Grund besteht darin, daß die Legierungszusammensetzung des erzeugten Aluminiums naturgemäß von der Legierungszusammensetzung des Inputs abhängt. Auch diesbezüglich erwies sich der hier gewählte Input-Mix als optimal.

Es sei darauf hingewiesen, daß mit der Pyrolyse-Recyclinganlage grundsätzlich auch andere Inputmischungen verarbeitet werden können sowie auch die angegebenen Inputfraktionen in sortenreiner Form. Entsprechende Erfahrungen liegen vor.

In diesem Zusammenhang sei folgendes angemerkt: Aufgrund der Möglichkeit, mit der Pyrolyse-Recyclinganlage den Materialinput in weiten Grenzen variieren zu können, eröffnet sich für die Firma Aluminium Rheinfelden ein innovatives Feld. Verpackungsaluminium ist immer Primäraluminium - so besteht Folie und Dünnband z.B. aus Reinaluminium oder AlFe, Getränkedosen bestehen aus AlMgMn, Flaschenkapseln aus AlMn, Aerosoldosen und Tuben aus Reinaluminium. Im Gegensatz zum Aluminium aus dem Salztrommelofen-Prozeß, welches zahlreiche metallische Verunreinigungen aufweist, kann in der Anlage der Firma Aluminium Rheinfelden also Recycling-Aluminium auf Basis von legiertem Primäraluminium gewonnen werden.

Basierend auf dem Recycling von Verpackungsaluminium entwickelt die Firma derzeit zwei Recycling-Gußwerkstoffe, welche bestimmte, heute eingesetzte Primäraluminium-Gußwerkstoffe, z.B. im Bereich Automobil-Chassisbau sowie im Bereich allgemeiner Maschinenbau substituieren können. Diese, aus kurzlebigen Wegwerfverpackungen erzeugten neuen Recyclingwerkstoffe, aus welchen langlebige Gebrauchsgüter herzustellen sind, werden als „Upcycling-Werkstoffe“ auf der GIFA 99 im Juni 1999 in Düsseldorf der Fachwelt vorgestellt.

Im folgenden wird die Massenbilanz der Recyclinganlage, basierend auf dem hier dargestellten Input-Mix für regulären Anlagenbetrieb, als Grafik wiedergegeben.

6. Angaben zum Wärmehaushalt der Recycling-Pyrolyseanlage

Um energetische Betrachtungen bei der Recycling-Pyrolyseanlage anstellen zu können, bedarf es einer Vielzahl von Messwerten von der laufenden Anlage sowie zahlreicher Stoffdaten. Für verschiedene Stoffströme müssen, mangels Mess- und Analysenwerten, entsprechend plausible Daten abgeschätzt oder - über Umwege - errechnet werden.

Typisch für einen solchen Stoffstrom ist z.B. das Schwelgas, welches sich aufgrund seines Kondensationsverhaltens meßtechnisch oder analytisch praktisch nicht erfassen läßt.

Vor dem Hintergrund der Datenvielzahl erschien es daher geraten, alle verfügbaren Meß- und Analysenwerte sowie Basis-Stoffdaten im Rahmen eines PC-Programms zu verarbeiten. Die den Berechnungen zu Grunde liegenden Nomenklaturen, Einheiten, Formeln und Algorithmen entsprechen dem FDBR-Handbuch sowie dem VDI-Wärmeatlas.

Im Hinblick auf die Benutzerfreundlichkeit wurde mit der Software Microsoft Excel gearbeitet und die Bedieneroberfläche und die Rechnerausdrucke einfach strukturiert: In der linken Tabellenhälfte befinden sich die Stoffdaten sowie die Variablen und in der rechten Hälfte sind die errechneten Daten.

Die folgenden Rechnerausdrucke geben die Verhältnisse der Recycling-Pyrolyseanlage unter derzeitigen Produktionsbedingungen mit Standard Input-Mix wieder.

Zu Simulationszwecken können alle Eingabevariablen beliebig geändert werden.

Beachte im weiteren die hier getroffene definitorische Unterscheidung: Pyrogas und Schwelgas

Pyrogas = Pyrolyseprodukte + Destillate (H_2, CO, CO_2, Aliphaten, Aromaten, S-,N-Heterocyclen, Teere u.a.)

Schwelgas = Pyrogas + Wasserdampf + Luft

Tabelle 4: Ermittlung der Wärmeleistung und des Wärmebedarfs des Input-Mix

Rechner-Eingabewerte

Variable	*Einheit*	*Wert*
Input-Mix-Massenstrom (täglich)	**Massen%**	**100,0**
	Mg/d	96,3
hypothetische Materialdichte des Input-Mix	Mg/m³	2,0
Schüttdichte des Input-Mix	Mg/m³	0,40
Leckageluft, geschätzt (über Dichtungen etc.)	m³/h	2
Staubaustrag aus Input-Mix-Shredder	Mg/d	0,5
Wassergehalt, Input-Mix (Materialfeuchte)	**Massen%**	**7,0**
Al-Gehalt, Input-Mix	**Massen%**	**57,0**
Organikgehalt, Input-Mix (als Glühverlust)	**Massen%**	**33,0**
Art der pyrolysierbaren Organik im Input	#	PE, Pappe
Art der destillierbaren Organik im Input	#	Mineralöle
Abschätzung: dest.Organik / pyrol.Organik	kg/kg	0,01

Elementaranalyse der Organik im Input-Mix

C-Gehalt, Organik	Massen%	72,4
H-Gehalt, Organik	Massen%	8,6
O-Gehalt, Organik	Massen%	16,2
S-Gehalt, Organik	Massen%	0,7
N-Gehalt, Organik	Massen%	0,9
Cl-Gehalt, Organik	Massen%	1,2
Summe	Massen%	100,0

Rechner-Ausgabewerte

Errechnete Kenngröße	*Einheit*	*Wert*
Input-Mix-Massenstrom (stündlich)	Mg/h	4,0
spezifischer Lufteintrag durch den Input-Mix	m³(N)/Mg	2,00
	kg/Mg	2,59
	Mg/d	0,25
spezifischer Lufteintrag durch Leckagen	m³/d (N)	48
	Mg/d	0,06
Lufteintrag, gesamt (Input, täglich)	Mg/d	0,31
Gehalt an Mineralischem und Me im Input	**Massen%**	**3,0**
Mineralisches + Me (Input, tägl.)	Mg/d	2,9
Wasser, Feuchte (Input, täglich)	Mg/d	6,7
Aluminium (Input, täglich)	Mg/d	54,9
Gehalt an destillierb. Organik im Input-Mix	Massen%	0,3
Destillierbare Organik (Input, täglich)	Mg/d	0,3
Gehalt an pyrolys. Organik im Input-Mix	Massen%	32,7
Pyrolysierbare Organik (Input, täglich)	Mg/d	31,5
Organik, insgesamt (Input, täglich)	Mg/d	31,8
Heizwert Hu, Organik im Input-Mix	kJ/kg	31.990
Heizwert Hu, Input-Mix (ohne Al-Hu)	kJ/kg	10.557
Wärmeleistung, Input-Mix	MJ/d	1.016.605

Angenommene Temperaturen

Temperatur, Input, Tu	°C	15
Temperatur, Pyrolysebeginn, Tstart	°C	350
maximale Pyrolysetemperatur, Tpyr	°C	600

Angenommene Stoff-Kenngrößen (cp als Mittelwerte)

cp, Aluminium (Tu bis Tpyr)	kJ/kg K	1,05
cp, Mineralisches (Tu bis Tpyr)	kJ/kg K	0,90
cp, Wasser (Tu bis 100 °C)	kJ/kg K	4,1868
cp, Organik, gesamt (Tu bis Tstart)	kJ/kg K	2,0
cp, Pyrogas (Tstart bis Tpyr)	kJ/kg K	3,2
cp, Pyrokoks (Tstart bis Tpyr)	kJ/kg K	1,2
Verdampfungsenthalpie, Wasser	kJ/kg	2257
Verdampfungsenthalpie, org. Destillierbares	kJ/kg	380
Pyrolyse-Reaktionsenthalpie, Organik	kJ/kg	80

mittlere Wärmekapazitäten (errechnet mit Polynomen)

cp, Wasserdampf (100 °C bis Tstart)	kJ/kg K	1,961
cp, Wasserdampf (Tstart bis Tpyr)	kJ/kg K	2,115

Wärmebedarf des Input

für Aufheizung (Tu bis 100 °C)	kJ/kg	83
für Verdampfung der Input-Feuchte	kJ/kg	158
für Verdampfung von organ. Destillierbarem	kJ/kg	1
für Aufheizung (100 °C bis Tstart)	kJ/kg	204
für Pyrolyse der pyrolysierbaren Organik	kJ/kg	26,1
für Aufheizung (Tstart bis Tpyr)	kJ/kg	94
Spez. Wärmebedarf des Input-Mix	kJ/Mg	567.195
	kWh/Mg	158
Wärmebedarf des Input-Mix	**MJ/d**	**54.621**
	kWh/d	**15.185**

Tabelle 5: Ermittlung der Wärmeleistung des Schwelgases

Rechner-Eingabewerte

Variable	*Einheit*	*Wert*
Feststoff-Output (Al + Koks + Miner.+ Me)	Mg/d	61,8
Abgesiebte Feinfraktion des Feststoff-Output	Mg/d	3,3
Koks + Mineralisches in der Feinfraktion	Massen%	75,0
Koksgehalt des Al vor Blankglühe	Massen%	0,7
Unerwünschte Metalle (Me) nach Blankglühe	Mg/d	1,9
Zyklonstaub aus Blankglühe	Mg/d	0,3
Al-Grieß aus Nachsiebung	Mg/d	0,5
Schmelzsalz-Zusatz	Mg/d	2,7
Krätze-Ausbringung	Mg/d	8,0
Heizwert Hu, Koks	kJ/kg	30.000
Mittlere Molmasse, Pyrogas (geschätzt)	kg/kMol	180

Rechner-Ausgabewerte

Errechnete Kenngröße	*Einheit*	*Wert*
Feststoffe (Al + Koks + Miner.+ Me)	**Massen%**	**64,2**
Koks + Mineralisches in der Feinfraktion	Mg/d	2,5
Mineralisches in der Feinfraktion	Mg/d	1,0
	Massen%	30
Koks in der Feinfraktion	Mg/d	1,5
	Massen%	45
Al in der Feinfraktion	Mg/d	0,8
	Massen%	25
Al + Koksanhaftungen + Me, vor Blankglühe	Mg/d	58,5
Koksanhaftung am Al vor Blankglühe	Mg/d	0,4
Koks im Drehrohr-Feststoff-Output	Mg/d	1,9
	Massen%	3,1
Wärmeleistung, Koks im Drehrohr-Feststoff-Output	MJ/d	56.865
Al, ohne Koks, ohne Me, nach Blankglühe	Mg/d	55,9
Al, aufbereitet für Schmelzprozeß	Mg/d	55,4
Al-Produktion (Blockmetall oder flüssig)	Mg/d	50,1
Al-Produktion bez. auf Drehrohr-Input-Mix	**Massen%**	**52,0**
Schwelgas (Pyrogas + Wasser + Luft)	Mg/d	**34,3**
Schwelgas (Output, täglich)	**Massen%**	**35,6**
Pyrogas (Output, täglich)	Mg/d	27,3
	m³/d (N)	3.392
	m³/h (N)	141
	m³/d (Tpyr)	10.848
	m³/h (Tpyr)	452
Pyrogasgehalt des Schwelgases	Massen%	79,4
Wasserdampf im Schwelgas (Output, täglich)	Mg/d	6,7
	m³/d (N)	8.384
	m³/h (N)	349
	m³/d (Tpyr)	26.811
	m³/h (Tpyr)	1.117
Wasserdampfgehalt des Schwelgases	Massen%	19,6
Luft im Schwelgas (Output, täglich)	Mg/d	0,3
	m³/d (N)	24,06
	m³/h (N)	1,0
	m³/d (Tpyr)	77
	m³/h (Tpyr)	3
Luftgehalt des Schwelgases	Massen%	0,9
Luft-Sauerstoff im Schwelgas (hypothetisch)	Mg/d	0,07
	Massen%	0,19
Wärmeleistung, Schwelgas	MJ/d	959.740
Heizwert, Hu, des Schwelgases	kJ/kg	27.972

Tabelle 6: Ermittlung wärmetechnischer Basisdaten der Blankglühe

Rechner-Eingabewerte

Variable	*Einheit*	*Wert*
Angaben zum Material-Input		
Al-Input-Massenstrom	Mg/h	2,44
Pyrokoks-Gehalt des Al-Input	Massen%	0,7
Temperatur des Al-Input	°C	350
Angaben zur Blankglüh-Anlage		
Solltemperatur Blankglühe	°C	430
Rauminhalt, Leerzustand	m³	35
aufzuheizende Stahlkonstruktion	Mg	2
Schätzwerte betr. Wärmeverluste		
apparatebedingte Verluste	% Q input	15
Umgebungstemperatur	°C	20

Stoffdaten und Umrechnungsfaktoren

Umgebungstemperatur	°C	20
mittl. Wärmekapazität, Aluminium	kJ/kg K	1,05
mittl. Wärmekapazität, Pyrokoks	kJ/kg K	1,88
mittl. Wärmekapazität, Stahl	kJ/kg K	0,71
mittl. Wärmekapazität, Luft	kJ/kg K	1,0
mittl. Dichte, techn. Aluminium	Mg/m³	2,8
mittl. Dichte, Stahl	Mg/m³	7,8
Dichte, Luft	kg/m³(N)	1,29
Dichte, CO	kg/m³(N)	1,25
Reaktionsenthalpie: C + O = CO	kJ/kgC	3.964
Heizwert, Hu, Pyrokoks	kJ/kg	30.000
Energie: 1 kJ sind	kWh	0,000278
Energie: 1 kWh sind	kJ	3600
theor. Luftbedarf für C-Oxidation	kg/kg	11,54

Rechner-Ausgabewerte

Errechnete Kenngröße	*Einheit*	*Wert*
Wärmebedarf zur Aufrechterhaltung der Solltemperatur		
Wärmebedarf, Al-Input	kJ/h	204.960
Wärmebedarf, Pyrokoks	kJ/h	2.569
Wärmebedarf, Oxidationsluft	kJ/h	80.812
Wärmeverluste des Apparats	kJ/h	50.884
benötigter Wärmestrom, Q input	**kJ/h**	**339.225**
	kW	**94**
Wärmeproduktion durch die Pyrokoks-Oxidation		
Massenstrom, Pyrokoks	kg/h	17
Wärmeproduktion (vollst. Oxidat.)	**kJ/h**	**512.400**
	kW	**142**
Wärmeaustrag durch den Al-Strom	**kJ/h**	**1.050.420**
	kW	**292**
Wärmeaustrag durch Abgas	**kJ/h**	**106.489**
	kW	**30**
Differenzbetrag zur Aufrechterhaltung des Konti-Betriebs		
Erforderliche Zusatzheizung	**kJ/h**	**983.734**
	kW	**273**
Zusätzliche Informationen		
Wärmebedarf zur Aufheizung des Blankglüh-Apparats		
Wärmebedarf, sporadisch	kJ	113.600
	kWh	32
Bei der Pyrokoks-Oxidation erzeugte CO2-Menge		
CO2-Massenstrom	kg/h	63
CO2-Volumenstrom (Norm)	m³/h(N)	32
CO2-Volumenstrom bei Solltemp.	m³/h	82
Mindest-Luftbedarf zur Pyrokoks-Oxidation		
Luft-Massenstrom	kg/h	197
Luft-Volumenstrom (Norm)	m³/h(N)	153
Luft-Volumenstrom bei Solltemp.	m³/h	393

Der thermische Wirkungsgrad des Pyrolysedrehrohrs ermittelt sich dann aus den errechneten Daten wie folgt:

Für die mit dem Brennkammerabgas dem Pyrolysedrehrohr im Heiztunnel zugeführte Wärme gilt überschlägig:

$$\overline{W}_{zu} = \overline{c}_p \cdot (\overline{V} \cdot \overline{\rho}_f) \cdot (\overline{T}_{ein} - \overline{T}_{aus})$$

mit den folgenden Schätzwerten für Standardbetrieb der Anlage mit dem o.a. Input-Mix:

- mittlere Dichte des Heizgases $\overline{\rho}_f = 1{,}20$ kg/Nm³. Durch den hohen Wassergehalt des Schwelgases von ca. 20 Massen % ist auch das Brennkammerabgas entsprechend wasserhaltig, wodurch die Dichte deutlich niedriger ist, als bei Rauchgasen sonst üblich.
- mittlere Wärmekapazität des Heizgases $\overline{c}_p = 1{,}26$ kJ/(kg·K)

- mittlerer Volumenstrom des Heizgases $\bar{V} = 9000\ Nm^3/h$
- mittlere Eintrittstemperatur des Heizgases $\bar{T}_{ein} = 900\ °C$
- mittlere Austrittstemperatur des Heizgases $\bar{T}_{aus} = 500\ °C$

Es ist dann: $\bar{W}_{zu} = 5\ 443\ MJ/h$

Bei Verrechnung mit dem Wärmebedarf $W_{input} = 2\ 276\ MJ/h$ für den Input-Mix ergibt sich für den thermischen Wirkungsgrad des Pyrolyse-Drehrohrofens:

$$\eta = (\bar{W}_{zu} - \bar{W}_{input}) / \bar{W}_{zu} = 58\ \%$$

Für einen indirekt beheizten Drehrohr-Pyrolyseofen ist dies ein recht guter Wert, welcher dem heutigen Stand der Technik entspricht.

Eine wärmetechnische Berechnung der Brennkammer wurde hier nicht vorgenommen, da diese bestimmungsgemäß nicht für eine optimale Wärmenutzung ausgelegt wurde, sondern ausschließlich zur Aufrechterhaltung der behördlich geforderten hohen Temperaturen mit dem Ziel der Dioxinzerstörung.

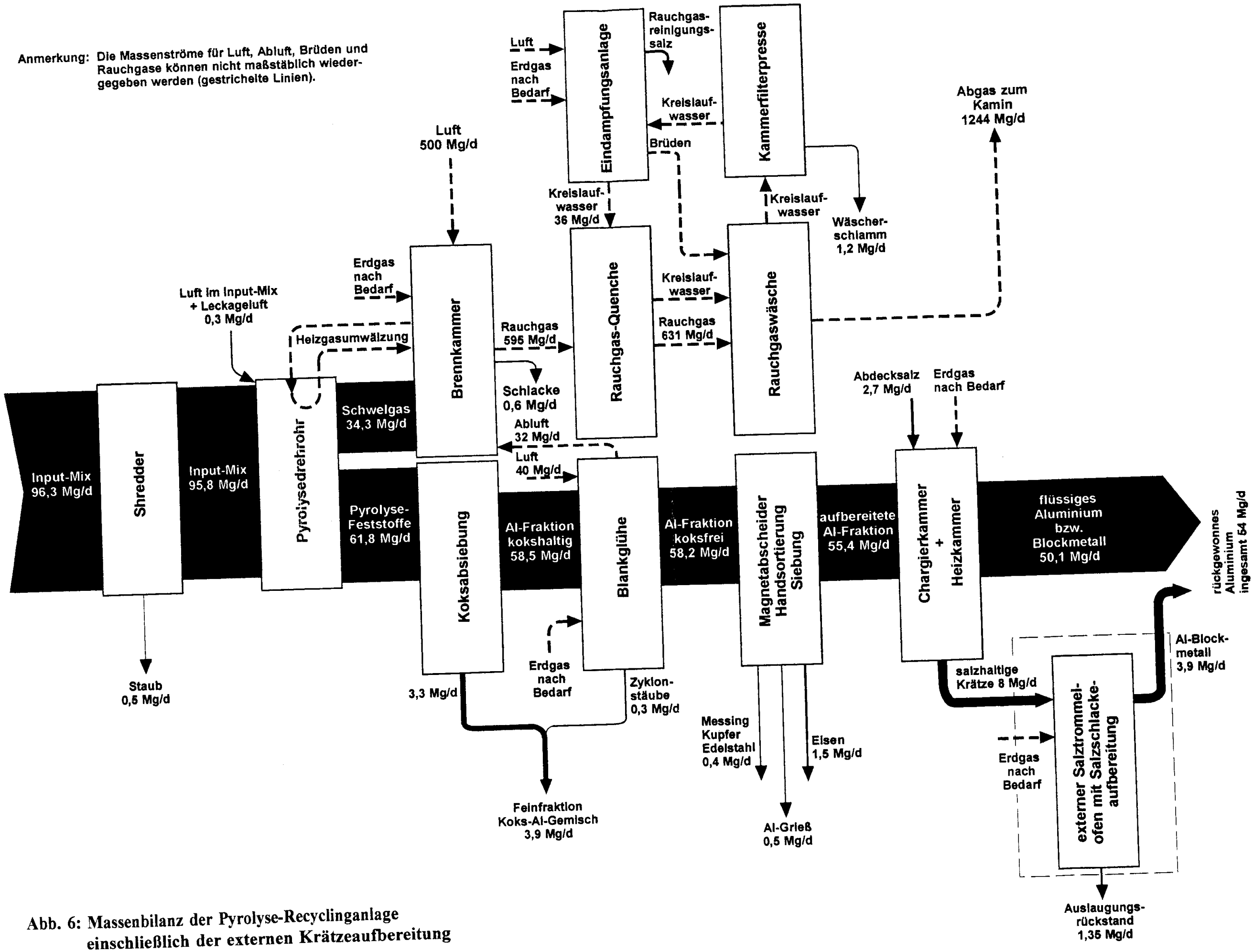

Abb. 6: Massenbilanz der Pyrolyse-Recyclinganlage einschließlich der externen Krätzeaufbereitung

7. Abfälle der Recycling-Pyrolyseanlage

Anhand des Blockbilds und der Massenbilanz der Recycling-Pyrolyseanlage wird ersichtlich, daß beim Anlagenbetrieb verschiedene Abfälle erzeugt werden. Besondere Beachtung verdient dabei die spezielle salzhaltige Krätze, welche zwar den Pyrolyse-Recyclingprozeß als Abfall verläßt, jedoch in einem externen Betrieb mittels der herkömmlichen Salztrommelofentechnik auf Aluminium aufgearbeitet wird, wobei auch das Salz einen Wiederaufbereitungsprozeß erfährt.

Die Zusammenhänge sind im folgenden Blockbild nochmals detaillierter dargestellt:

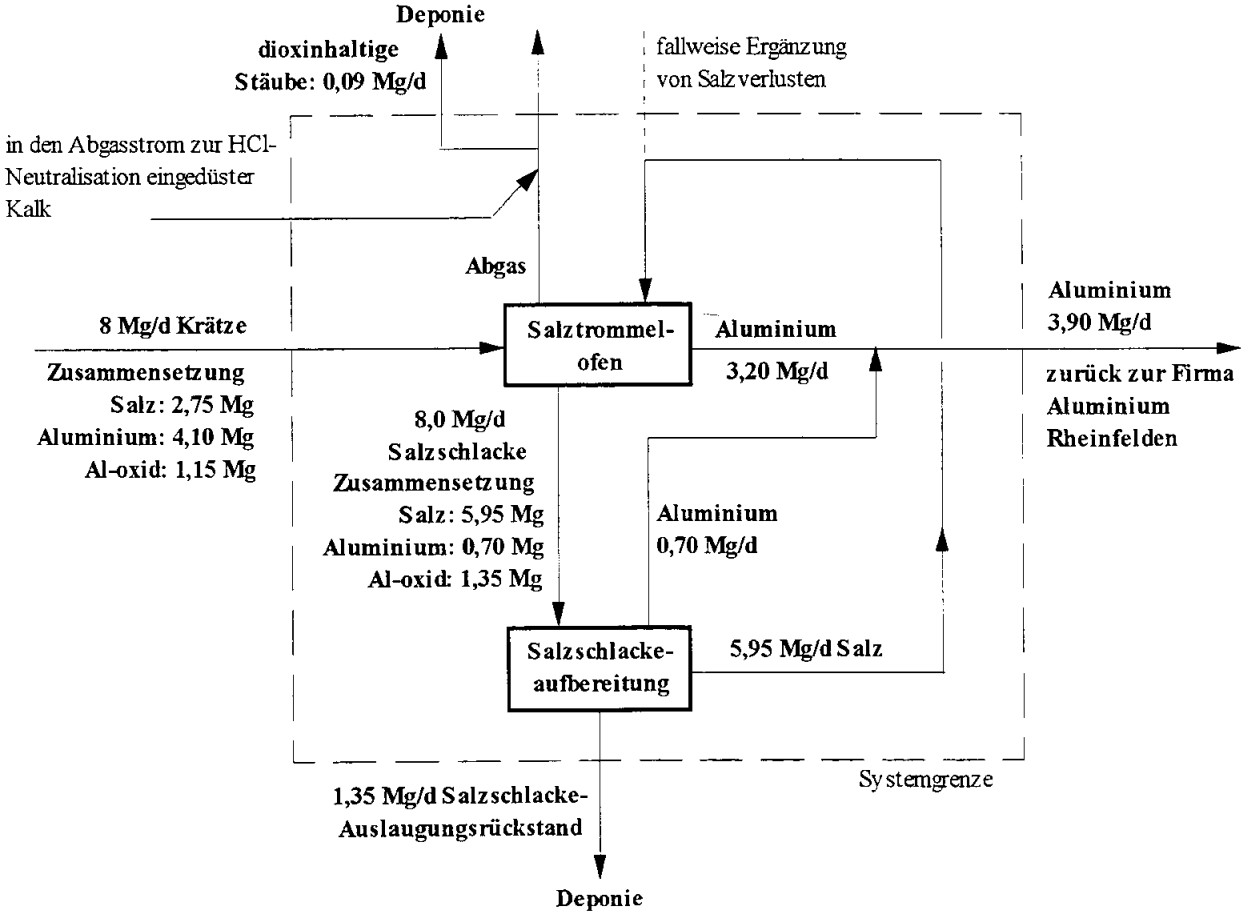

Abb. 7: Blockbild des externen AufbereitungsProzeßes für die Krätze aus der Pyrolyse-Recyclinganlage, einschließlich der Salzschlackeaufbereitung (Alle Zahlenwerte sind bezogen auf die aus der Pyrolyse-Recyclinganlage anfallende tägliche Krätzemenge).

Als zu deponierende Abfälle verbleiben letztlich also die Auslaugungsrückstände in einer spezifischen Menge von 1,35 Mg pro Tag und dioxinhaltige Stäube in einer Menge von 0,09 Mg/d. Um die Vergleichbarkeit mit dem herkömmlichen Trommelofenprozeß zu ermöglichen, werden bei den folgenden Bilanzierungen nicht die Primärabfälle „Aluminiumsalzschlacke" (aus dem Trommelofenprozeß) bzw. „salzhaltige Krätze" (aus der Recycling-Pyrolyseanlage) herangezogen, sondern der nach externer Aufbereitung in beiden Fällen verbleibende abzulagernde Salzschlacke-Auslaugungsrückstand.

Auf die übrigen Abfälle sowie auf deren Entsorgungs- bzw. Verwertungswege wird im folgenden eingegangen.

Tabelle 7: Abfälle aus der Recycling-Pyrolyseanlage und ihre Entsorgungs- und Verwertungswege

Abfall bzw Entfallstoff	spez. Menge in Mg/d	Entsorgung bzw. Verwertung
abgesiebtes Koks-Al-Gemisch (35 % Al)	3,90	interne Verwertung in firmeneigener Kohlefabrik
Salzschlacke-Auslaugungsrückstände	1,35	Sonderabfalldeponie
Wäscherschlamm	1,20	Sonderabfalldeponie
Brennkammerschlacke	0,60	Sonderabfalldeponie
Stäube aus Shredder	0,50	Hausmülldeponie
dioxinbelastete Stäube	0,09	Sonderabfalldeponie, unter Tage
Rauchgasreinigungssalz	0,05	Sonderabfalldeponie

Die vorteilhaften Aspekte der Recycling-Pyrolyseanlage betreffend die Abfallvermeidung bzw. Abfallverminderung werden besonders in der folgenden Grafik deutlich, in welcher die spezifischen Abfallmengen beim herkömmlichen Salztrommelofen den Abfallmengen der Recycling-Pyrolyseanlage, einschließlich Krätzeaufbereitung und Salzschlackeaufbereitung, gegenüber gestellt sind.

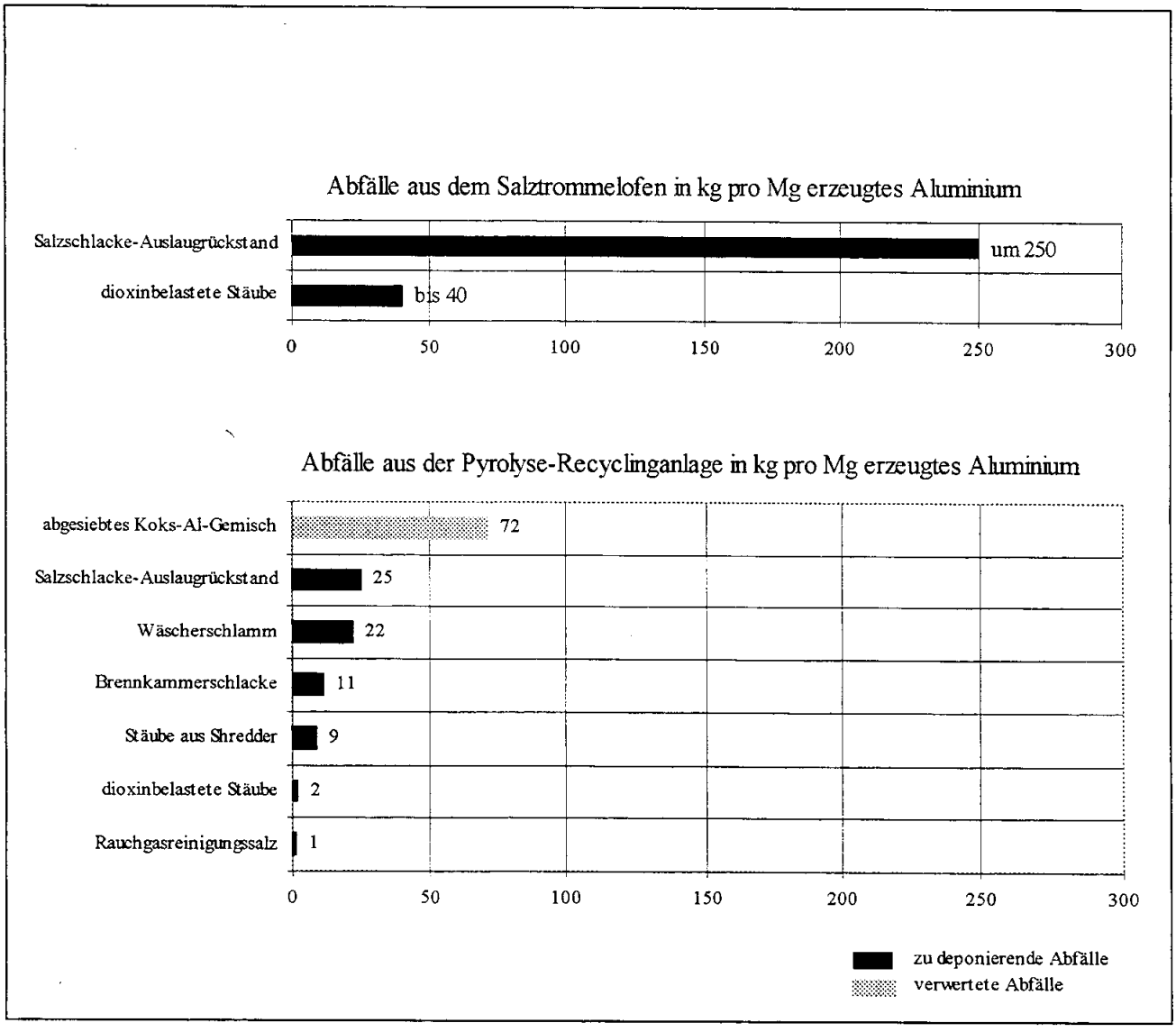

Abb. 8: Abfallmengen im Vergleich: Herkömmlicher Salztrommelofen - Recycling-Pyrolyseanlage.

8. Emissionen der Recycling-Pyrolyseanlage

Die im folgenden wiedergegebenen Emissionswerte wurden bei regulärem Anlagenbetrieb während verschiedener Meßkampagnen im Herbst 1998 vom TÜV Ecoplan, Freiburg, ermittelt.
(Die beiden PAK wurden von der Firma Aneco gemessen).

Die entsprechenden gesetzlichen Grenzwerte (17. BImSchV, TA Luft) sind zum Vergleich wiedergegeben.
Es wird ersichtlich, daß die Anlage alle Grenzwerte deutlich unterschreitet.

Tabelle 8: Gasförmige Emissionen der Recycling-Pyrolyseanlage (Kamin)

Parameter	Einheit	Grenzwert	Meßwert
Staub	mg/Nm³	20	15
Fluor, staubgebunden		5	< 0,022
Gesamt-C		20	2
CO		100	6
NO2		500	137
SO2		100	<1
HCl		10	6
HF		2	< 0,023
Pb		5	2,4
Hg		0,2	0,025
Cd		0,2	0,07
Cu		5	0,023
Sn		5	0,53
Benzo(a)pyren + Dibenzo(a,h)anthracen		0,1	< 0,03
PCDD / PCDF (iTE)	ng/Nm³	0,1	0,06

Das Abgas aus den Schmelzöfen ist wie folgt zu charakterisieren

Tabelle 9: Gasförmige Emissionen der Schmelzöfen

Parameter	Einheit	Grenzwert	Meßwert
Gesamt-C	mg/Nm³	20	1,6
CO		100	< 52
NO2		500	61

9. Offene Fragen und weitergehender Untersuchungsbedarf

Es versteht sich, daß durch die Betriebserfahrungen mit der Recycling-Pyrolyseanlage eine ständige evolutionäre Weiterentwicklung von Anlagentechnik und Betriebsweise stattgefunden hat und weiter stattfindet. Neben den ohnehin erfolgenden Bemühungen zur Optimierung des Einsatzes von Energie- und Hilfsstoffen sind derzeit vor allem die beiden im folgenden angesprochenen Aufgabenschwerpunkte zu nennen:

Eliminierung von Anlagenschwachstellen

Während die zentralen Anlagenbausteine wie Pyrolyse oder Herdöfen zwischenzeitlich weitgehend störungsfrei arbeiten, werden Prozeßstörungen bis hin zu Anlagenstillständen meist von der peripheren Technik verursacht. Hier sind es insbesondere Förderorgane und Materialübergabestellen, welche immer wieder zu Problemen Anlaß geben (Verstopfungen, Verklemmungen, Brückenbildung).

Diesbezügliche Problemlösungen beinhalten fallweise längerdauernde unerwünschte Stillstandszeiten, während denen Umbauten und z.T. Neukonstruktionen erfolgen.

In diesem Zusammenhang werden an den Problemstellen auch technische Maßnahmen getroffen, betreffend bessere Zugänglichkeit, verbesserte Wartungsfreundlichkeit und betreffend die Möglichkeit, bei laufender Anlage rasch Störungen beheben zu können.

Minimierung von Aluminiumverlusten

Vor der Blankglühe fällt einer der mengenmäßig bedeutsamen Abfälle aus der Recycling-Pyrolyseanlage an: die Sieb-Feinfraktion mit insgesamt ca. 3,9 Mg/d, bestehend aus einem Gemisch von Pyrolysekoks und Aluminium, wobei letzteres ca. 35 Massen-% ausmacht. Hierdurch muß ein Aluminiumverlust von ca. 1,4 Mg/d hingenommen werden.

Das Material wird in der firmeneigenen Kohlefabrik (Geschäftsbereich: Carbon Products) verwertet. Untersuchungen zur Minimierung des Aluminiumverlusts aus dieser Quelle durch prozeßtechnische Modifikationen werden durchgeführt.

10. Beurteilung des Gesamtprozesses

Die bei der Firma Aluminium Rheinfelden neu konzipierte und in den letzten drei Jahren realisierte und optimierte Recycling-Pyrolyseanlage zur Gewinnung von Sekundäraluminium aus der DSD-Aluminiumfraktion unter Zusatz verschiedenartiger Aluminiumschrotte läuft zwischenzeitlich im regulären Produktionsbetrieb mit einem Materialdurchsatz von ca. 4 Mg/h.

Das erzeugte Aluminium, welches entweder direkt flüssig in die Gießerei gelangt oder in Masseln abgegossen wird, entspricht in seiner Qualität voll den Erwartungen.

Als optimaler Anlageninput erwies sich ein Mix, welcher im Mittel zu rund 60 % aus DSD-Material besteht. Für dieses vorwiegend aus beschichteten Aluminiumfolien bestehende, organik- und damit heizwertreiche Material (Papier, Pappe, PE), - vorwiegend also sog. flexible packaging - existiert heute kein anderes Aufbereitungsverfahren, welches direkt zum Flüssigmetall führt.

Neben diesem vorteilhaften Aspekt trat das Recycling-Pyrolyseverfahren mit dem Anspruch an, deutlich weniger Problemabfälle zu erzeugen, als das derzeit verbreitete, für Aluminiumschrotte und Krätzen eingesetzte Salztrommelofen-Verfahren. Dieser Anspruch konnte in vollem Umfange erfüllt werden.
Während beim herkömmlichen Salztrommelofen pro Mg erzeugtes Aluminium im Mittel ca. 250 kg zu deponierende Salzschlacke-Auslaugungsrückstände und bis zu 40 kg dioxinbelastete Stäube anfallen, sind dies beim neuen Recycling-Pyrolyseverfahren - bedingt durch die stattfindende Verwertung der ausgebrachten Aluminiumkrätze mittels der Salztrommelofentechnik - rund 25 kg Salzschlacke-Auslaugungsrückstände und 1,7 kg dioxinbelastete Stäube. Dies entspricht einer Verminderung jener abzulagernden Sonderabfälle um rund 91%, was eine erhebliche Deponieentlastung darstellt.

Allerdings fallen beim Recycling-Pyrolyseverfahren noch andere zu deponierende Abfälle an, die jedoch als wenig umweltrelevant einzuschätzen sind: Brennkammerschlacke, Wäscherschlamm, Rauchgasreinigungssalze und Shredderstäube - insgesamt ca. 45 kg pro Mg erzeugtes Aluminium.

Ein weiterer Anspruch des Pyrolyse-Recyclingverfahrens ist der umweltkonforme Betrieb: Bereits bei der Anlagenkonzeption wurde den rauchgasseitigen Emissionen besondere Beachtung beigemessen. Durch Installation einer aufwendigen Rauchgasreinigung ist es gelungen, die strengen gesetzlichen Grenzwerte gemäß 17. BImSchV für alle Parameter - einschließlich der Dioxine - nicht nur sicher einzuhalten, sondern diese deutlich zu unterschreiten. Die letzten Messungen des TÜV konnten dies bestätigen.

Diese umweltkonforme Betriebsweise wird außerdem noch dadurch unterstützt, daß ein Teil der im Inputmaterial enthaltenen Energie für die Aufrechterhaltung der hohen, behördlich geforderten Brennkammertemperaturen um 1200 °C genutzt werden kann.

Die Wirtschaftlichkeit der Recycling-Pyrolyseanlage ist grundsätzlich gegeben. Sie hängt naturgemäß einerseits vom - derzeit stark schwankenden - Weltmarktpreis für Aluminium ab, andererseits von den Stillstandszeiten der Anlage. Letzterem wird durch laufende technische Verbesserungen entgegengewirkt.

Auch die Übertragbarkeit der Anlagentechnik für den Sektor der Sekundäraluminium-Produktion ist grundsätzlich gegeben. In Anbetracht der Besonderheit der Anlage, aus organikreichen Schrotten und Aluminium-Verbundmaterialien, wie DSD-Aluminiumfraktionen bzw. flexible packagings, Flüssigmetall produzieren zu können, und vor dem Hintergrund der Umweltfreundlichkeit dieser Sekundäraluminium-Produktion erscheint es durchaus vorteilhaft, weitere solche Anlagen zu realisieren - ggf. auch als Ersatz für herkömmliche, wesentlich umweltbelastendere Sekundäraluminium-Produktionsanlagen.

Insgesamt stellt das hier entwickelte Verfahren ein gelungenes Beispiel für stoffliches Recycling auf hohem verfahrenstechnischen und umwelttechnischen Niveau dar.