

Reinhard STROH

Umweltbundesamt

Rolf BOOS

Fa. FTU

Franz NEUBACHER

Sabine BRADAC

Fa. UV&P

Robert SCHLODERER

Günther WAWRSCHINEK

Leopold ZWITTNIG

Reports

UBA-94-096

RESTSTOFFE AUS DER ALUMINIUM-VERHÜTTUNG

Wien, Juli 1994

Bundesministerium für Umwelt,
Jugend und Familie



Autoren: Dr. Reinhard Stroh (Umweltbundesamt)
Dipl.-Ing. Franz Neubacher, Dr. Sabine Bradac (Fa. UV&P)

Impressum:

Medieninhaber und Herausgeber: Umweltbundesamt, 1090 Wien, Spittelauer Lände 5
Druck: Riegelnik, 1080 Wien.

© Umweltbundesamt, Wien, Juli 1994

Alle Rechte vorbehalten
ISBN 3-85457-175-5

Zusammenfassung

Die vorliegende Studie behandelt die Verwertung von Reststoffen aus der Aluminium-Verhüttung. Sie wurde vom vor dem Hintergrund der ECE-Arbeitsgruppe "By-product-Utilization from Stationary Installations", deren Vorsitz Österreich übernommen hat, erstellt.

Die Primärproduktion von Aluminium erfolgt ausgehend von Bauxit über die Schmelzfluß-Elektrolyse und liefert bevorzugt Werkstoffe, welche über weitere Formgebung zu verschiedensten Produkten verarbeitet werden. Die Primärproduktion wurde in Österreich Ende 1992 eingestellt, wird aber noch in Deutschland und anderen europäischen Staaten betrieben. In Tabelle I werden typische Frachten der wichtigsten Reststoffe aus der Herstellung von Primär-Aluminium angeführt.

Tabelle I: Übersicht über die bei der Primär-Aluminiumproduktion gemäß Stand der Technik anfallenden Reststoffe

Reststoff	Rotschlamm	Ofenausbruch	Krätze
Menge (kg/t Al)	1000 - 2000	ca. 30	ca. 20
Vermeidungs-/Verringerungspotential	nein (Gesteinszusammensetzung)	nein	nein
Umweltgefährdende Eigenschaften	Alkalität	CN ⁻ , F ⁻ -Gehalt	Gasbildungspotential, eluierbare Komponenten
Behandlung	Deponie	Vorbehandlung/Deponie	Aufarbeitung
Anmerkungen zur Behandlung	Verwertungsmöglichkeiten in Entwicklung	Aufarbeitung in Entwicklung	Deponieverbot

Die mechanische Aufbereitung von unterschiedlichem Sammelschrott, Spänen und aluminiumhaltigen Reststoffen ermöglicht die Rückgewinnung von Aluminium in der Sekundär-Aluminiumproduktion. Die wichtigsten Reststoffe aus der Sekundär-Aluminiumproduktion, deren Gefährdungspotential, sowie Verwertungs- und Vermeidungsoptionen werden in Tabelle II angeführt.

Die Verarbeitung von flüssigem Aluminium (sowohl Primär- als auch Sekundär-Aluminium) bedingt den Anfall von Krätze, welche vor allem aus Aluminium und Aluminiumoxid besteht. Krätze kann mechanisch aufbereitet werden, sodaß der Metallgehalt wiederum der Sekundär-Aluminiumproduktion zugeführt werden kann, während der metallarme Krätzestaub in der Salzschlackeaufbereitung weiterverarbeitet werden kann.

Um möglichst hohe Ausbeute, bzw. niedrige Verluste im Aluminium-Recycling sicherzustellen, erfolgt die Umschmelzung von stark verunreinigten Schrotten unter Abdecksalz, welches über die Salzschlackeaufbereitung praktisch vollständig im Kreislauf geführt wird. Die bei der Schlackenaufbereitung ausgeschiedene Oxidfraktion, welche aufgrund der Zusammensetzung als Tonerde-Rückstand (TER) bezeichnet werden kann, kommt in der Zementindustrie zum Einsatz (Siehe Tabelle III)

Tabelle II: Übersicht über die bei der Sekundär-Aluminiumproduktion gemäß Stand der Technik anfallenden Reststoffe

Tabelle II: Übersicht über die bei der Sekundär-Aluminiumproduktion gemäß Stand der Technik anfallenden Reststoffe

Reststoff	Salzschlacke	Filterstaub	Ofenausbruch	Krätze
Menge (kg/t Al)	bis 700	2 - 35	ca. 2	ca. 30
Vermeidungs-/Verringerungspotential	gering	gering	nein	nein
Umweltgefährdende Eigenschaften	Gasbildungspotential, eluierbare Komponenten	eluierbare Komponenten PCDD/F	eluierbare Komponenten	Gasbildungspotential, eluierbare Komponenten
Behandlung	Aufarbeitung	Einsatz im Stahlwerk	Deponie	Aufarbeitung
Anmerkungen zur Behandlung	Deponieverbot	ggf. UTD		Deponieverbot

Tabelle III: Übersicht über die bei der Schlackenaufarbeitung gemäß Stand der Technik anfallenden Teilströme mit Verwertung

Reststoff	Al-Granulat	Tonerderückstand	Schmelzsalz
Menge (kg/t Schlacke)	40 - 150	300 - 400	550 - 750
Verwertung	Rückführung in Sekundärproduktion (Drehtrommelofen)	Verwertung in Zementindustrie	Rückführung in Sekundärproduktion als Schmelzsalz

Die Recherchen im Zuge der Studie bestätigen, daß im europäischen Wirtschaftsraum ausreichend Kapazität für die Salzschlackeaufbereitung verfügbar ist, sodaß auf deren Deponierung, welche aufgrund der hohen wasserlöslichen Anteile und der auftretenden gasförmigen Emissionen als umweltgefährdend einzustufen ist, bereits heute zur Gänze verzichtet werden könnte.

Tabelle IV: Gegenüberstellung des Aufkommens von Salzschlacke und Krätzestaub in Kontinentaleuropa und der verfügbaren bzw. in Bau befindlichen Verwertungskapazitäten; Angaben in t/a (Schätzung, Stand September 1993).

	Aufkommen (t/a)	Verwertungskapazitäten (t/a)	Anmerkungen
BRD	220.000	300.000	in Bau befindlich
Österreich	15.000		
Niederlande	20.000		
Italien	200.000	170.000	
Frankreich	80.000	100.000	
Spanien	60.000	60.000	
Norwegen		100.000	
Summe	595.000	730.000	

Aus der Abgasreinigung bei Schmelzprozessen fallen Filterstäube an, welche aufgrund ihres reaktiven Verhaltens gemäß Stand der Technik ohne weitergehende Behandlung nicht auf obertägigen Deponien abgelagert werden dürfen.

Besondere Aufmerksamkeit ist auf Ofenausbrüche mit schädlichen Verunreinigungen, die heute noch deponiert werden, sowie die Behandlung von Abgas- und Kaminanlagen aus stillgelegten Produktionsanlagen zu richten, da diese einen außerordentlich hohen Schadstoffgehalt aufweisen können.

Zusammenfassend können folgende Forderungen betreffend Reststoffe aus der Aluminiumverhüttung formuliert werden:

- Die Sekundär-Aluminiumproduktion verbraucht weniger Energie und Rohstoffe als die Primärproduktion und verursacht weniger Emissionen. Sie ist daher ökologisch vorteilhafter als die Primärproduktion. Daher wäre ein weitestmöglicher Verzicht auf die Primär-Aluminiumproduktion anzustreben.
- Die aus der Abgasreinigung mittels Kalkhydrat anfallenden Filterstäube dürfen gemäß Stand der Technik ohne geeignete Behandlung keinesfalls oberirdisch deponiert werden. Verwertungsmöglichkeiten zur Herstellung von Hilfsstoffen für die Stahlindustrie sind bereits Stand der Technik; weitere Behandlungs- bzw. Verwertungsverfahren sind in Entwicklung.
- Die Sekundäraluminiumproduktion erfordert zu einem wesentlichen Ausmaß den Einsatz von Abdecksalz, um auch minderwertigere Schrottsorten, Späne und Krätzen effizient verwerten zu können. Die dabei entstehende Salzschlacke darf angesichts des hohen wasserlöslichen Anteils und der Freisetzung von toxischen Gasen im Kontakt mit Wasser nicht deponiert werden. Gemäß der Rechercheergebnisse stehen in Westeuropa ausreichende Verwertungskapazitäten zur Verfügung, sodaß ein Verbot der Salzschlackedeposition ausgesprochen werden sollte (siehe Tabelle IV).
- Eine Harmonisierung sowie eine absehbare Entwicklung strenger Umweltschutzvorschriften innerhalb der westlichen Produktionsländer sollte im Sinne eines nachhaltigen Umweltschutzes ehestmöglich realisiert werden.

Summary

This study deals with utilization of residues from the aluminium production. It was done with regard to the ECE Task-Force on "By-product Utilization from Stationary Installations", which is presided by Austria.

The primary production of aluminium is performed by the electrolytical reduction of alumina which is obtained from bauxite. In this way high grade aluminium is obtained which is converted into a variety of products by different means of shaping processes. The primary production in Austria was shut down in 1992. The amount of residues from primary Aluminium production are given in table I.

Table I: *Residues from Primary-Aluminium Production according to state of the art technology*

residue	red mud	furnace linings	dross
amount (kg/t Al)	1000 - 2000	ca. 30	ca. 20
potential for avoidance/reduction	none	none	none
environmentally hazardous properties	alkalinity	CN ⁻ , F ⁻ -content	formation of noxious gases, soluble components
treatment	dumping	pre-treatment/dumping	processing
comment	methods for utilisation being under development	methods for utilisation being under development	ban on dumping

The mechanical processing of all different sorts of scrap and aluminium-containing residues allows the recycling of aluminium in the secondary production. Residues resulting from secondary Aluminium processing are given in table II.

Table II: *Residues from Secondary Aluminium Production according to state-of-the-art technology.*

residue	salt slag	filter dust	furnace linings	black dross
amount (kg/t Al)	< 700	2 - 35	approx. 2	approx. 30
potential for avoidance/reduction	low	low	none	none
environmentally hazardous properties	formation of noxious gases, soluble components	soluble components, PCDD/F	soluble components	formation of noxious gases, soluble components
treatment	processing	use in steel industry	dumping	processing
comment	ban on dumping			ban on dumping

The processing of liquid aluminium (both primary and secondary Aluminium) generates the so-called dross which consists of alumina and oxides. The dross can be recycled by milling and sieving. The coarse fraction containing most of the metal is reused in the secondary aluminium production. The fine fraction consisting mostly of aluminium oxide can be processed together with salt slag.

In order to guarantee maximal recycling yield corresponding to minimal losses of aluminium during the remelting of the metal it is done under a protective cover of salt. The spent salt slag can be processed which allows the recycling of the salt. The only waste from this process consists of aluminium oxide which is utilized in various processes such as the cement production (table III).

Table III: Residues from salt slag processing according to state-of-the-art technology.

residue	coarse Al	alumina residue	cover salt
amount (kg/t salt slag)	40 - 150	300 - 400	550 - 750
utilisation	production of secondary Aluminium	utilization in the cement industry	utilisation as cover salt

The investigations for this study confirmed that at least in the EEC countries there is adequate capacity for salt slag recycling (table IV). Consequently the dumping of salt slags in landfills which causes hazardous liquid and gaseous emissions should be prohibited.

Table IV: Comparison of salt slag amount and ball mill dust in continental Europe and the existing respectively being under construction recycling capacities (estimation, September 1993).

	salt slag amount (t/a)	recycling capacities (t/a)	notes
Germany	220.000	300.000	being under construction
Austria	15.000		
Netherlands	20.000		
Italy	200.000	170.000	
France	80.000	100.000	
Spain	60.000	60.000	
Norway		100.000	
Total	595.000	730.000	

Filter residues from the exhaust gas treatment of the melting processes may not be deposited in landfills due to their hazardous properties.

Special attention has to be paid to the disposal of pot lining refractories which can be contaminated with hazardous materials as well as to dismantled materials from exhaust gas systems and smoke stacks because of the possibility of high contaminations.

Finally the following comments on the by-products of the aluminium processing should be noted:

- The secondary aluminium production consumes less energy and water and produces less emissions than the primary production. Therefore it is more favourable from the ecological point of view. Therefore, corresponding measures should be taken to favour this way of aluminium production.
 - Filter residues of the exhaust gas treatment with lime may not be deposited in landfills. The utilisation of filter residues in steel working industry is state of art; further processes for reusing filter residues are being developed.
 - The remelting of the metal in the secondary industry has to be done under cover of salt to be able to use lowgrade scraps, turnings and dross. The spent salt slag should not be deposited in landfills due to its hazardous properties. The investigations of this study showed that there is adequate capacity for salt slag recycling in the EU countries so that the disposal in landfills can be prohibited (see table IV).
-

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Aufgabenstellung	1
1.2. Die Bedeutung von Aluminium	1
2. Technologie der Primär-Aluminiumproduktion	3
2.1. Technologie	3
2.1.1. Rohstoffgewinnung	3
2.1.2. Schmelzflußelektrolyse	5
2.1.3. Gießerei	6
2.2. Reststoffe	6
2.2.1. Rotschlamm.....	8
2.2.2. Ofenausbruch	9
2.2.3. Filterrückstände	10
2.2.4. Krätze	10
2.3. Energie- und Stoffbilanz.....	12
3. Sekundär-Aluminiumproduktion.....	17
3.1. Technologie	17
3.1.1. Rohstoffe	17
3.1.2. Aufarbeitung von Al-Schrott	18
3.1.3. Schmelzverfahren	25
3.1.4. Schmelzereinigung und Legieren	30
3.1.5. Vergießen	30
3.2. Reststoffe	31
3.2.1. Filterstaub.....	31
3.2.2. Salzschlacke	32
3.2.3. Ofenausbruch	34
3.2.4. Krätze	34
3.3. Energie- und Stoffbilanz.....	35
4. Vergleichende Emissionsbilanz für Primär- und Sekundär-Aluminiumproduktion.....	39
4.1. Feste Rückstände.....	40
4.2. Atmosphärische Emissionen	40
4.3. Wasserverbrauch.....	41
4.4. Energiebedarf	41

5. Entsorgung der Reststoffe: Stand der Technik und betriebliche Praxis	45
5.1. Krätzeentsorgung	46
5.2. Salzschlackenentsorgung	48
5.2.1. Verarbeitung von Salzschlacke bei Raffineria Metalli Capri.....	50
5.2.2. Verarbeitung von Salzschlacke in Cleveland	50
5.2.3. Verarbeitung der Salzschlacke bei der Fa. Aluscan in Norwegen.....	51
5.2.4. Verarbeitung von Salzschlacke bei der Firma K+S (Kali und Salz).....	54
5.2.5. Weitere Entsorgungswege	56
5.3. Entsorgung von Filterstaub	57
5.4. Entsorgung von Ofenausbruch.....	57
5.5. Allgemeine Überlegungen zur Vermeidung von Reststoffen	58
5.6. Rechtliche Bestimmungen bei grenzüberschreitendem Transport der Reststoffe	59
6. Aluminiumproduktion in Österreich	63
6.1. Primärproduktion	63
6.1.1. Produktionsanlage Ranshofen.....	63
6.1.2. Produktionsanlage Lend.....	64
6.1.3. Übersicht über die Entwicklung der Primär-Aluminiumproduktion in Österreich	65
6.2. Sekundär-Aluminiumproduktion.....	66
6.2.1. Produktionsanlage in Ranshofen	66
6.2.2. Produktionsanlage in Lend	67
6.2.3. Weitere Sekundäraluminiumschmelzbetriebe	67
6.2.4. Übersicht über die Entwicklung der Sekundär-Aluminiumproduktion in Österreich	67
6.3. Gießereien.....	69
7. Künftige technologische Entwicklungen zur Vermeidung und Verwertung von Reststoffen	71
7.1. In Entwicklung befindliche Entsorgungstechnologien.....	71
7.1.1. Verwertung von Filterstaub aus der Abgasreinigung.....	71
7.1.2. Verwertung von Tonerderückstand aus der Salzschlacke- und Krätzeverwertung.....	73
7.2. Entwicklung integrierter Technologien zur Vermeidung und Verwertung von Abfällen am Beispiel des Alu-Recycling Kombi-Projektes.....	74
7.3. Abschätzung der umweltrelevanten Kosten.....	75
7.3.1. Kostenstruktur in der Aluminiumverhüttung	75
7.3.2. Abschätzung der spezifisch umweltrelevanten Kosten in der Herstellung von Sekundär-Aluminium	76
8. Literaturverzeichnis	79

1. EINLEITUNG

1.1. AUFGABENSTELLUNG

Die vorliegende Studie behandelt die Verwertung von Reststoffen aus der Aluminium-Verhüttung. Sie wurde vor dem Hintergrund der im Rahmen der ECE tätigen Arbeitsgruppe "By-Product Utilization from Stationary Installations", deren Vorsitz Österreich übernommen hat, erstellt.

Diese Studie soll einerseits einen Überblick zum Stand der Technik und der vorhersehbaren weiteren Entwicklung, sowie andererseits die spezifische Situation in Österreich darstellen.

Stand der Technik im Sinne dieser Studie sind jene Verfahren zur Produktion von Aluminium bzw. der Behandlung der Reststoffe aus der Aluminiumproduktion, die eine Einhaltung von Emissionsgrenzwerten, wie sie beispielsweise in Mitteleuropa vorgegeben sind, ermöglichen.

1.2. DIE BEDEUTUNG VON ALUMINIUM

Aluminium ist in der Erdkruste das häufigste Element und wird der Gruppe der Metalle zugerechnet. Im normalen Sprachgebrauch wird der Begriff "Aluminium" vielfältig verwendet, obgleich hier zumeist unterschiedliche Legierungen mit dem Hauptbestandteil Aluminium gemeint sind. Aluminium ist nach Eisen und Stahl der bedeutendste metallische Werkstoff.

Die Gewinnung von Aluminium erfolgt über die Herstellung von Tonerde aus Bauxit und anschließende Schmelzfluß-Elektrolyse. Das erzeugte Primär-Aluminium ist von vergleichsweise hoher Reinheit, so daß es bevorzugt über weitere Verformung zu verschiedensten Produkten verarbeitet wird. Die Rückgewinnung von Aluminium aus unterschiedlichsten Abfallprodukten erfolgt über sogenannte Umschmelzwerke bzw. Sekundär-Aluminiumproduktion.

In Österreich wurde zwischenzeitlich die gesamte Primär-Aluminiumproduktion, sowohl am Standort Ranshofen wie auch in Lend, stillgelegt. Aufgrund des hohen Schrottaufkommens hat die Sekundär-Aluminiumproduktion auch in Österreich künftig eine weiter steigende Bedeutung. Derzeit stehen gemäß informeller Recherche noch 5 Produktionsanlagen zur Verfügung, wobei 3 davon in Niederösterreich konzentriert sind. Die mechanische Aufbereitung von Krätze ist in Österreich ebenfalls etabliert, die Weiterverarbeitung von Kugelmühlengstaub (falls dieser nicht kurzerhand deponiert wird) aus der Krätzeaufbereitung erfolgt mangels eigener Kapazitäten zusammen mit Salzschlacke in ausländischen Anlagen.

Die Filterstäube aus der Abgasreinigung der Sekundär-Aluminiumproduktion werden über entsprechende Aufbereitung als Hilfsstoff in der Stahlindustrie eingesetzt werden. Der Anfall von Schredderabfall aus der mechanischen Aufbereitung von Sammelschrott kann noch über Jahre auf verfügbaren Deponiekapazitäten in Österreich untergebracht werden, wobei eine energetische und stoffliche Verwertung im geplanten Alu-Recycling Kombi-Projekt in Niederösterreich vorgesehen ist.

Umschmelzlegierungen aus der Sekundärproduktion können jedoch nicht alle Verbrauchssektoren bedienen; der Mehrbedarf durch zunehmenden Aluminiumverbrauch, sowie andere Fehlmengen und unvermeidliche Verluste müssen durch Primär-Aluminium gedeckt werden.

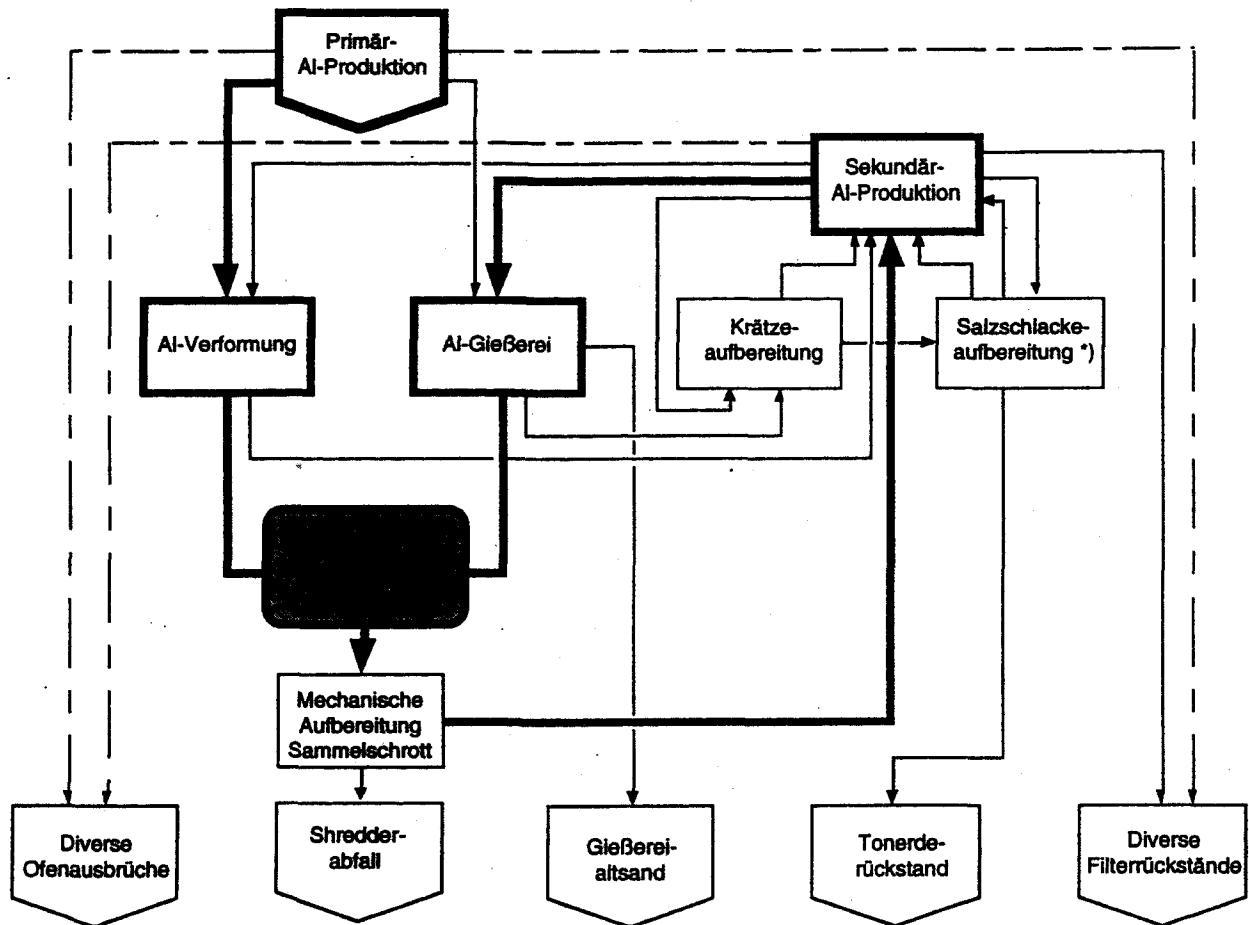


Abb. 1.1.: Übersicht der wesentlichen Produkt- und Reststoffströme in der Verarbeitung und Rückgewinnung von Aluminium gemäß bisherigem Stand der Technik in Österreich

*) erfolgt im Ausland

Für die Aufbereitung und Verwertung von Gießereialsand sind teilweise Aufbereitungsanlagen in größeren Gießereien vorhanden; eine Verwertung von Gießereialsand wird in zwei bereits in Bau befindlichen Projekten an den Standorten Steyr und Liezen vorbereitet.

Die Aufbereitung und Verwertung Ofenausbrüchen ist technisch zwar möglich, jedoch stehen in der Praxis zumeist billigere Deponiemöglichkeiten zur Verfügung. Der Tonerderückstand aus der Salzschlackeaufbereitung kann entweder deponiert werden (siehe Kapitel 3.1.5), oder in Industrieprozessen, z.B. Zementindustrie, eingesetzt werden.

Eine besondere Aufmerksamkeit ist bei der Stilllegung und Demontage von alten Produktionsanlagen erforderlich, da insbesondere im Bereich der Abgassysteme von Schmelzfluß-Elektrolyseanlagen hohe Schadstoffgehalte zu erwarten sind, die eine spezielle technische Behandlung erfordern. Weiters sind jene Mengen an zwischengelagerten Rückständen zu beachten, die eine weitergehende Behandlung erfordern. In diesem Zusammenhang soll bei anstehenden Projekten der Altlastensanierung im Bereich der Aluminiumverhüttung die möglichst vollständige Aufbereitung und Verwertung der unsachgemäß abgelagerten Materialien angestrebt werden.

2. TECHNOLOGIE DER PRIMÄR-ALUMINIUMPRODUKTION

2.1. TECHNOLOGIE

Die Herstellung von Primär-Aluminium erfolgt in mehreren Schritten ausgehend vom Rohstoff Bauxit über die Gewinnung von Tonerde und deren elektrolytischer Reduktion zum Aluminiummetall.

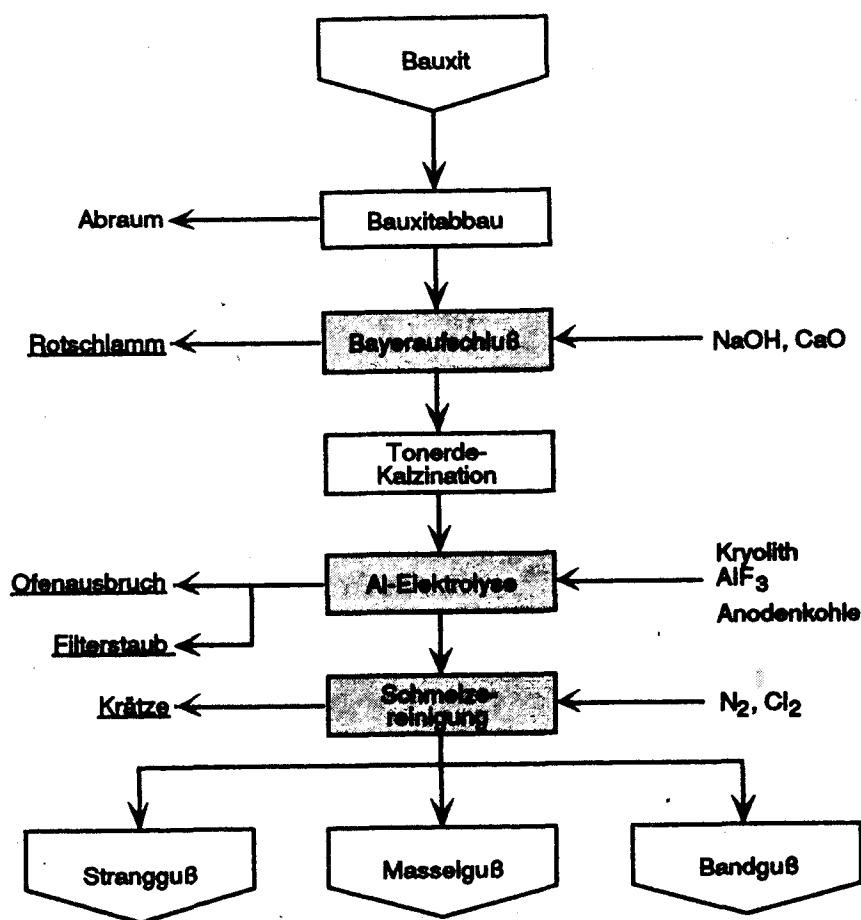


Abb. 2.1.: Fließschema zur Herstellung von Primäraluminium aus Bauxit

2.1.1. Rohstoffgewinnung

Bauxit ist ein Sedimentgestein, das ökonomisch verwertbare Mengen an Aluminiummineralien enthält. Die Hauptbestandteile sind Aluminiumoxide, Eisenoxide bzw. -hydroxide, Titandioxid und Kieselsäure; ihre Anteile variieren je nach Lagerstätte (Tabelle 2.1.). Aus der Zusammensetzung des eingesetzten Gesteins lassen sich Menge und Konsistenz des beim Aufschluß (Bayer-Prozeß) anfallenden Rotschlammes (Fe₂O₃-Anteil im Gestein) abschätzen. In Tabelle 2.1. ist eine Abschätzung der Menge an trockenem Rotschlamm enthalten, die auf der Annahme basiert, daß Silizium, Eisen und Titan jeweils als Hydroxide vorliegen.

Tab. 2.1.: Zusammensetzung verschiedener Bauxitarten in Gewichtsprozenten [Ullmann,1992]

Herkunft	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Glüh- verlust %	spezifisches Rotschlamm- aufkommen (Trockensubstanz) t/t Al
Australien						
Darling	37	26.5	16.4	1.1	19.3	3,0
Range	58	4.5	6.9	2.5	26.8	0,6
Weipa						
Brasilien						
Trombetas	52	5.1	13.9	1.2	28.1	1,0
Frankreich						
Südl. Region	57	4.6	22.6	2.9	15.1	1,3
Guyana						
Mackenzie	59	4.9	2.9	2.4	30.4	0,4
Guinea						
Friguia	49	6.1	14.2	1.6	28.1	1,1
Boke	56	1.5	7.9	3.7	30.1	0,6
Ungarn						
Halimba	52	6.6	23.5	2.9	18.1	1,6
Indien						
Orissa	46	2.7	22.4	1.1	24.2	1,4
Indonesien						
Bintan	53.5	3.9	12.1	1.6	29.2	0,8
Jamaica						
Clarendon	47.8	2.6	17.6	2.3	27.3	1,2
Surinam						
Onverdacht	59	4.3	3.1	2.5	30.9	0,4
Moengo	54	4.2	10.4	2.8	28.9	0,8
USA						
Arkansas	51	11.2	6.6	2.2	28.4	1,0
USSR						
Sevkerourals	54	6.2	14.8	2.4	15.7	1,1
Jugoslawien						
Mostar	52	3.9	21.2	2.7	16.2	1,4

Die wichtigsten Bauxithersteller befinden sich in Australien, Guinea, Jamaika und Brasilien. Diese Länder produzieren weltweit mehr als die Hälfte der Bauxitmenge. Aufgrund ökonomischer Überlegungen erfolgt die Bauxitverarbeitung heute im allgemeinen direkt an den Abbaustellen.

Das gebräuchlichste Verfahren zur Tonerdegewinnung aus Bauxit ist der Bayerprozeß.

Dabei erfolgt nach einer Aufbereitung zur Einstellung einer gleichmäßigen Bauxitqualität die Laugung des Gesteins mit wäßriger NaOH-Lösung unter erhöhtem Druck und erhöhter Temperatur. Die Betriebsparameter variieren von Anlage zu Anlage in Abhängigkeit vom eingesetzten Rohstoff. Die so gewonnene Aluminat-Lösung wird nach Verdünnung durch Sedimentation und Filtration vom Rückstand, dem sogenannten Rotschlamm, abgetrennt. Dieser enthält Hydroxide und Oxide der im Bauxit enthaltenen Begleitelemente wie Eisen, Silizium, Calcium und Titan.

Aus der so mechanisch gereinigten Lauge wird Aluminiumhydroxid ($\text{Al}(\text{OH})_3$) ausgefällt, das im nächsten Prozeßschritt durch Kalzinieren in Tonerde übergeführt wird.

Die Kalzinierung (thermische Spaltung) wird im Drehrohr- oder Wirbelschichtofen durchgeführt. Der Drehrohrföfen ist selbst beim Einsatz von Wärmerückgewinnungseinrichtungen als überholte Technologie anzusehen.

Weltweit haben sich Verfahren durchgesetzt, die mit zirkulierender Wirbelschicht (WS) arbeiten. Der WS-Reaktor wird dabei direkt mit Öl oder Erdgas beheizt. Die Wärmerückgewinnung erfolgt durch Trocknung des filterfeuchten $\text{Al}(\text{OH})_3$ mit heißem Abgas des WS-Ofens, sowie durch Vorwärmung der Verbrennungsluft durch das heiß ausgetragene Al_2O_3 . Dadurch wird das Oxid auf Temperaturen abgekühlt, die einen offenen Transport zulassen. Durch diese Maßnahmen konnte der Energiebedarf bei der Kalzinierung gegenüber der herkömmlichen in Drehröfren ohne Wärmerückgewinnung praktisch halbiert werden.

2.1.2. Schmelzflußelektrolyse

Die elektrolytische Herstellung des Aluminiums erfolgt in sogenannten Hall-Heroult-Zellen, welche sich seit der Entwicklung des Prozesses 1888 bewährt haben.

Heute werden vorzugsweise vorgebrannte Graphitblöcke, die in einem eigenen Werkstoff hergestellt werden, als Anodenmaterial eingesetzt. Darüber hinaus werden auch noch sogenannte Söderberg-Elektroden verwendet.

Diese Elektroden bestehen aus einem Rohr, in das Graphitpulver und Binder kontinuierlich aufgegeben wird. In der Hitze des Elektrolyseofens backen die Rohmaterialien zur eigentlichen Elektrode zusammen. Durch dieses Verfahren entfällt der Elektrodenwechsel. Allerdings schwankt die Zusammensetzung der Elektrode und deren elektrische Eigenschaften, sodaß die Einstellung gleichbleibender Betriebsbedingungen schwierig ist.

Der Kohlenstoffverbrauch liegt bei etwa 500 kg/t Al.

Der Elektrolyt besteht aus einer Mischung aus Tonerde und Kryolith, in dem 2-8 % Al_2O_3 gelöst sind. Der Kryolith ermöglicht durch die Bildung eines Eutektikums mit der Tonerde eine Badtemperatur von nur 940-960°C, während reine Tonerde einen Schmelzpunkt von rund 2000°C aufweist.

Kathodisch wird Aluminium abgeschieden, anodisch entsteht O_2 , das über die Reaktion mit dem Anodengraphit hauptsächlich zu CO_2 umgewandelt wird.

Der elektrische Energieverbrauch bei modernen Elektrolyseöfen liegt bei ca 13.4 kWh/kg Al [Krone, 1990]. Durch Optimierungen bei der Elektrolytzusammensetzung bzw. bei den elek-

trischen Einrichtungen der Zellen sind Verbesserungen hinsichtlich des Energieverbrauchs möglich.

Entsprechend dem Stand der Technik sind zur Verringerung der Emissionswerte die Anlagen heute zugekapselt; die Betreuung der Zellen (Chargieren, Krustenbrechen) erfolgt vollautomatisch [VDI, Entwurf 1987].

2.1.3. Gießerei

Das in der Elektrolyse gewonnene, flüssige Hüttenaluminium wird anschließend einer Schmelzreinigungsbehandlung (Spülgasbehandlung, etc.) unterzogen. Nach dem Zusatz von Legierungsbestandteilen erfolgt der Abguß in der Hütte im wesentlichen durch Strangguß von rechteckigen oder runden Formaten als Halbzeuge für eine spätere Walz- oder Strangpreßumformung oder durch Abguß zu Masseln bzw. Blockmaterial als Vorstoff für Gießereien. Weiters können Al-Pulver und Granalien erzeugt werden.

Der kontinuierliche Bandguß zur Erzielung eines für die Produktion von Flachprodukten endabmessungsnahen Halbzeugs befindet sich in Entwicklung.

2.2. RESTSTOFFE

Die nachstehende Tabelle gibt eine Übersicht über die bei der Primärproduktion anfallenden Reststoffe und ihrer Entsorgung bzw. Behandlung.

Tabelle 2.2.: spezifische Abfallmengen bei der Primäraluminiumerzeugung

Reststoff	Anfall / Vermeidung	Menge	Entsorgung bzw. Verwertung (Stand der Technik)
Rotschlamm	Bayer-Prozeß	1 - 2 t/t Al	Entwässerung und Deponie
	Menge abhängig von Zusammensetzung des Gesteins		
Ofenausbruch	Elektrolyseofen	ca. 30 kg/t Al	Laugung und Deponie
	(keine Alternativverfahren zur Herstellung von Al)		
Filterrückstände	nasse Rauchgasreinigung, Elektrolyse	ca. 50 kg/t Al	Konditionierung/ Deponie
	Alternative: trockene Rauchgasreinigung		
Krätze	Schmelzereinigung Gießerei	ca. 20 kg/t Al	Aufmahlen; Al-reiche Fraktion in Sekundär-Produktion; Al-arme Fraktion in Schlackenbehandlung
	(Vermeidung im Herstellungsprozeß nicht möglich)		

Tab. 2.3.: Zuordnung der wesentlichen Reststoffe aus der Aluminium-Verhüttung gemäß ÖNORM S2100 (Stand 1.3.1990) und S 2101 (Stand 1.12.1983)

Reststoff	Schlüsselnummer	Gefährlichkeitskriterien *)	C/P	BB	TB	D
Ofenausbruch - aus metallurgischen Prozessen mit produktionsspezifischen Beimengungen	31108	(7), (9)	-	-	-	K
Leichtmetallkrätzen, Al-hältig	31205	(4), (9)	+	-	-	K
Salzschlacken, Al-hältig	31211	(9)	+	-	-	K
Filterstäube, NE-metallhältig	31217	(7), (9)	+	-	-	K
Rotschlamm	31608	(9)	+	-	-	K
Schlamm aus d. Gas- u. Abgasreinigung	31660	(7), (9)	+	+	-	K
mineralische Rückstände aus der Gasreinigung	31439	(9)	+	+	-	K
verbrauchte Filter-, Aufsaugmassen mit schädlichen Beimengungen (z.B. Aktivkohle, ..)	31435	(9), (10)				
Gießereialsand	31401		-	-	-	K
Gießereiformsand	31425		-	-	+	K
Schredderrückstände	57801		-	-	K	K
Filterstaub aus Schredderanlagen	57802		-	-	K	K
Bigbags (textiles Verpackungsmaterial mit anwendungsspezifischen schädlichen Beimengungen, vorwiegend anorganisch)	58204	(5), (6), (7), (8)	-	-	K	K
Tonerde (Aluminiumoxidschlamm)	31627		-	-	-	K

*) Die Gefährlichkeit von Abfällen ist gegeben, wenn mindestens eines der folgenden 13 Bewertungskriterien zutrifft:

- (1) explosionsgefährlich (gemäß §2 Abs 5Z1 ChemG)
- (2) brandfördernd (gemäß §2 Abs 5Z2 ChemG)
- (3) hochentzündlich (gemäß §2 Abs 5Z3 ChemG)
- (4) leichtentzündlich (gemäß §2 Abs 5Z4 lit a,c,d,e,f ChemG)
- (5) entzündlich (gemäß §2 Abs 5Z5 ChemG)
- (6) sehr giftig (gemäß ChemVO, Anhang B, 1.6 (a), (b))
- (7) giftig (gemäß ChemVO, Anhang B, 1.7 (a), (b))
- (8) ätzend (gemäß §2 Abs 5Z9 ChemG)
- (9) umweltgefährlich: Überschreitung der Eluatklasse IIIb, gemäß ÖNORM S2072
- (10) umweltgefährlich: Überschreitung der Wassergefährdungsklasse 1 (im Sinne der Einstufungskriterien des Kataloges wassergefährdender Stoffe, Deutschland)
- (11) krebserzeugend (im Sinne des ADR, Klasse 9)
- (12) mit gefährlichen Erregern behafteter Abfall (gemäß ÖNORM S2104)
- (13) infektiöser Abfall im Sinne der folgenden Festlegung: Abfall, der mit Erregern von Tierseuchen behaftet ist, die gemäß Tierseuchengesetz sowie weiterer veterinärrechtlicher Vorschriften anzeigepflichtig sind.

C/P: chemisch-physikalische Behandlung
BB: biologische Behandlung
TB: thermische Behandlung
K: Konditionierung
D: Deponie

2.2.1. Rotschlamm

Rotschlamm fällt im Bayerprozeß bei der Drucklaugung von Bauxit mit NaOH an. Es fallen pro Tonne produzierten Aluminium etwa 1-2 t Rotschlamm mit einem Wassergehalt von ca. 50 % an. Weltweit entstehen etwa 40 Mio t/a [Maitra, 1991].

Tab. 2.4.: Zusammensetzung von H₂O-freiem Rotschlamm in Gewichtsprozenten (Allaire, 1992)

Inhaltsstoff	typische Zusammensetzung (%)	Bandbreite (%)
Fe ₂ O ₃	40	24-50
Al ₂ O ₃	25	12-30
SiO ₂	15	5-17
TiO ₂	7	2-18
CaO	1	0.5-6
Na ₂ O	9	3-10
sonstige	3	0-3

Anmerkung: Unter "sonstige" fallen Verbindungen der Begleitelemente Sb, As, Ba, Be, Cd, Cr, Co, Cu, Pb, Mn, Mo, Ni, Se, Sn und Zn.

Das Gefährdungspotential des Rotschlammes für die Umwelt liegt in seiner hohen Basizität. In Österreich wird Rotschlamm als gefährlicher Abfall eingestuft (ÖNORM S 2101, Stand 1.12.1983, Tabelle 2.3.), da er die Eluatklasse IIIb (ÖNORM S 2072, Stand 1.11.1990) überschreitet. Entsprechend den geltenden Bestimmungen muß er vor einer Deponierung so vorbehandelt werden, daß die Eluatklasse IIIb nicht überschritten wird. Diese Vorbehandlung kann beispielsweise aus einer Entwässerung bestehen.

Die weltweit übliche Entsorgungsmethode für diesen Reststoff ist die Deponierung. Die Vorbehandlung kann z.B. darin bestehen, daß der Rotschlamm mit im Kreis geführtem Wasser, das der Deponie entnommen wird, in mehreren Stufen gewaschen und in der letzten Prozeßstufe vor der Deponierung verdichtet wird.

In Australien wurden zahlreiche Versuche durchgeführt, den Rotschlamm zur Bodenverbesserung, als Filtermaterial für Abwässer oder als Flockungshilfsmittel bei der kommunalen Abwasserreinigung einzusetzen [PER, 1993].

Bodenverbesserer sind Stoffe, die die Bodenstruktur (Krümelung, Lockerungsgrad, Gas-Durchlässigkeit, Wasser-Bindungsfähigkeit und dgl.) verbessern, ohne Pflanzennährstoffe zu enthalten. Die Ausbringung von Bodenverbesserern stellt eine Maßnahme zur Erhaltung bzw. Steigerung der Bodenfruchtbarkeit dar. Neben Rotschlamm werden u.a. Eisensulfate, Calciumpolysulfid, Sägemehl oder Silikate verwendet [Römpf 1989].

Inwieweit die so erzielten positiven Effekte die unter Umständen durch die Alkalität bzw. den Schwermetallgehalt des Rotschlammes verursachten Umweltbeeinträchtigungen aufwiegen, kann aufgrund der vorliegenden Informationen nicht beurteilt werden.

Versuche den Rotschlamm in der Baustoffindustrie bzw. für die Eisengewinnung einzusetzen, waren wirtschaftlich nicht erfolgreich. Eine Verwertungsmöglichkeit für Rotschlamm könnte der Einsatz als Feuerfestmaterial für Ofenauskleidungen der Al-Elektrolysezellen sein. Erste Versuche zeigen verbesserte Eigenschaften der Auskleidung aus Rotschlamm gegenüber herkömmlichen Materialien [Allaire, 1992].

2.2.2. Ofenausbruch

Die Zellauskleidung einer Hall-Heroult-Zelle, bestehend aus feuerfestem Material und dem Kathodengraphit, wird nach längerer Betriebsdauer zerstört. Die Elektrolyse muß daher regelmäßig abgestellt werden, um die Auskleidung zu erneuern. Der dabei anfallende Ofenausbruch hat einen Graphitanteil von etwa 55 % und einen Anteil von feuerfestem Material von ca 45 %.

Tab. 2.5.: Übersicht zur Zusammensetzung von Ofenausbruch (Angaben in Gewichtsprozent)

Element	typischer Analysenwert(%)	Bandbreite(%)
C	29	28-43
Al	14	4-16
Si	5	0.1-5
Fe	3	0.2-4
Na	14	12-20
F	18	14-19
Cyanid	0.09	0.09-0.2
Sonstiges	17	14-23

Anmerkung: Unter "Sonstiges" fallen anionische Anteile.

Im folgenden ist eine Schätzung für die in der BRD anfallenden Mengen an Ofenausbruch auf der Basis von 1986 angeführt [Pawlek, 1986]: Bei einer Produktion von 800.000 t Primär-Aluminium mit ca. 2300 Elektrolyseöfen und einer durchschnittlichen Lebensdauer von 5 Jahren sind jährlich etwa 460 Elektrolyseöfen neu auszukleiden. Dabei fallen folgende Mengen an:

- Kohlenstoffauskleidung 12.000 t (entsprechend 15 kg/ t Al)
- Bodenisolaton 10.000 t (entsprechend 12,5 kg/t Al)

Je nach Alter des Elektrolyseofens zum Zeitpunkt der Abstellung, findet man in der Auskleidung bis zu 20 % Fluoridgehalt. Diese Verbindungen sind zum Teil wasserlöslich. Neben Fluoriden findet man in geringen Mengen Cyanide und Nitride, die giftig und teilweise wasserlöslich sind.

Aufgrund der Wasserlöslichkeit und Giftigkeit der erwähnten Inhaltsstoffe ist gemäß österreichischem Recht dieser Reststoff vor einer Deponierung so zu behandeln, daß Umweltbeeinträchtigungen aufgrund von Fluorid- und Cyanid-Emissionen im Deponiebereich (Sickerwasser) vermieden werden.

Diese Vorbehandlung kann beispielsweise in einer Laugung des Ofenausbruchs bestehen (siehe Kapitel 4.4). In Österreich wird Ofenausbruch aufgrund der Giftigkeit der Inhaltsstoffe und Überschreitung der Eluatklasse IIIb als gefährlicher Abfall eingestuft (Tab. 4.4).

Eine nachträgliche Aufarbeitung der einzelnen abgelagerten Materialien entsprechend dem Stand der Technik ist aufgrund der teilweisen Vermischung und der dadurch bedingten Verunreinigung der erhaltenen Produkte außerordentlich schwierig oder praktisch unmöglich.

2.2.3. Filtrerrückstände

Die bei der Elektrolyse entstehenden Gase müssen entsprechend dem Stand der Technik erfaßt und einer Abgasreinigung zugeführt werden. Die typischen Gasfrachten für einen modernen Elektrolyseofen liegen rohgasseitig bei ca 100 kg CO/t, 9 kg SO₂/t, 10 kg HF/t und 40 kg Staub/t Al [VDI, 1987].

Moderne Anlagen arbeiten mit dem Trockenabsorptionsverfahren. In den Abgasstrom wird Tonerde (Al₂O₃) als Absorptionsmittel zugesetzt. Die Staubabscheidung erfolgt über ein Gewebefilter. Dieses Verfahren erlaubt eine Rückführung und Verwertung der beladenen Tonerde in der Elektrolyse [Ullmann, 1992]. Die Schadstoffemissionen können mit diesem Verfahren für gasförmige Fluoride auf unter 0.1 kg/t und für Staub auf 3 kg/t Al gesenkt werden. Eine Verminderung der SO₂-Emissionen kann allerdings nicht erreicht werden. Zu diesem Zweck müssen ergänzende Reinigungsverfahren eingesetzt werden.

In Betrieben, die nicht dem heutigen Stand der Technik entsprechen, wird vielfach noch die Naßreinigung eingesetzt. Es gibt die Möglichkeit einer sauren Gaswäsche, bei der der Fluoridgehalt mittels Kalkzugabe ausgewaschen wird und der alkalischen Wäsche mit NaOH, bei der NaF-Lösungen anfallen, aus denen wiederum Kryolith gewonnen werden kann. Das bei der sauren Wäsche anfallende CaF₂ wird deponiert. Der Abscheidungsgrad von SO₂ ist im Vergleich zur trockenen Gasreinigung besser. Der Wirkungsgrad der Staubabscheidung ist geringer als bei der Trockenabsorption, weswegen es insgesamt zu höheren Emissionen von staubförmigen Fluorverbindungen kommt.

Filterstaub zählt in Österreich gemäß ÖNORM S 2101 (Stand: 1.12.1983) zu den gefährlichen Abfällen (Tab. 2.3.).

2.2.4. Krätze

Im Zuge von Gießereiprozessen ist der Schutz des flüssigen Aluminiums vor Luftzutritt nicht möglich und damit die Bildung einer Oxidhaut unvermeidbar. Das aufschwimmende oxidierte Metall wird von Zeit zu Zeit "abgekratzt". Das erhaltene Produkt, die Krätze besteht hauptsächlich aus Al₂O₃ und unterschiedlichen Gehalten an mitgerissenem Al-Metall.

Tab. 2.6.: Zusammensetzung von Krätze (Angaben in Gewichtsprozent)

Inhaltsstoff	typischer Analysenwert (%)	Bandbreite (%)
Al, metallisch	40-60	20-80
Al ₂ O ₃	30-40	20-50
sonstiges	0-10	

Anmerkung: Unter "sonstiges" fallen Nitride, Phosphide, Carbide sowie Verbindungen diverser Legierungselemente.

Die während des Schmelz- und Reinigungsprozesses in die Krätze gelangten Verunreinigungen, wie AlN, AlP und Al_4C_3 führen bei Kontakt mit Wasser zur Bildung und Freisetzung der entsprechenden Gase NH_3 , PH_3 und CH_4 . Das Gefährdungspotential dieses Gasgemisches liegt in seiner leichten Entzündbarkeit.

Krätze zählt beispielsweise in Österreich zu den gefährlichen Abfällen gemäß ÖNORM S 2101 (Stand: 1.12.1983, siehe Tab. 2.3.) aufgrund des wassergefährdenden Potentials durch eluierbare Komponenten (Salze) und der Bildung von Gasen bei Kontakt mit Wasser. Eine Deponierung wäre erst nach einer Vorbehandlung zulässig, die das Gasbildungspotential und den Anteil an eluierbaren Komponenten soweit reduziert, daß keine Umweltgefährdungen zu erwarten sind. Die Kriterien für die Deponierung sind den gesetzlichen Bestimmungen zu entnehmen (Deponierichtlinien, ÖNORM S 2072, Stand 1.11.1990).

Krätze ist allerdings einer technischen und wirtschaftlichen Verwertung zugänglich, wobei Aluminium zurückgewonnen und der allenfalls salzhaltige Krätzestaub in ähnlicher Weise oder zusammen mit Salzschlacke weiterbehandelt wird. Eine Deponierung entspricht daher nicht dem Stand der Technik.

Tab. 2.7.: Zusammensetzung des bei mechanischer Aufbereitung der Krätze entstehenden Feinanteils (Krätzestaub)(Angaben in Gewichtsprozent)

Inhaltsstoff	typischer Analysenwert (%)	Bandbreite (%)
Al, metallisch	20	10-40
Al_2O_3	60	30-70
NaCl, KCl	10	30
MgO	7	5-12
Fe-, Cu-, Oxide, Sonstiges	3	0.5-5

Weitere auftretende Inhaltsstoffe sind vor allem Nitride, so daß es bei Einwirkung von Feuchtigkeit zur Bildung und Freisetzung von Ammoniak kommt.

Die pro Tonne verarbeiteter Krätze anfallende Menge Krätzestaub variiert zwischen 500 und 600 kg.

2.3. ENERGIE- UND STOFFBILANZ

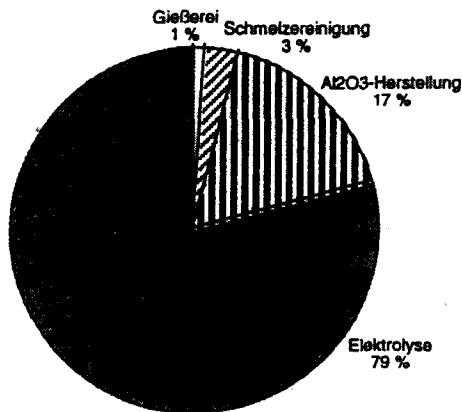
Am Institut für Metallhüttenwesen und Elektrometallurgie der RWTH Aachen wurde 1990 eine detaillierte Studie über die ökologischen Aspekte der Primär- und Sekundäraluminiumerzeugung in der BRD durchgeführt [Krone et al., 1990]. Im Zuge dieser Studie wurden detaillierte Stoff- und Energiebilanzen für Produktionsanlagen gemäß Stand der Technik erstellt und berechnet.

Der Stand der Technik, d.h. Primär-Aluminiumherstellung mittels der Schritte Bayerverfahren und Elektrolyse, ist dabei nicht spezifisch für die BRD, sondern international gültig. Für die Energieerzeugung ist bei einer Umlegung der Ergebnisse auf andere Länder zu beachten, daß die Bereitstellung von Primärenergie unterschiedlich erfolgen kann (z.B. höherer Anteil an Strom aus Wasserkraft).

Die Ergebnisse basieren auf den damals verfügbaren Daten und Abschätzungen, welche sich im Rahmen der technologischen Weiterentwicklung und besseren Erfassungsmethodik verändern können. Für die Gesamtprozesse wurden die einzelnen Produktionsschritte inklusive Bereitstellung der Vormaterialien und der thermischen und elektrischen Energie sowie die mögliche Aufarbeitung entstehender Reststoffe und notwendige Transporte berücksichtigt. Die wesentlichen Ergebnisse sind in den folgenden Abbildungen und Tabellen zusammengestellt.

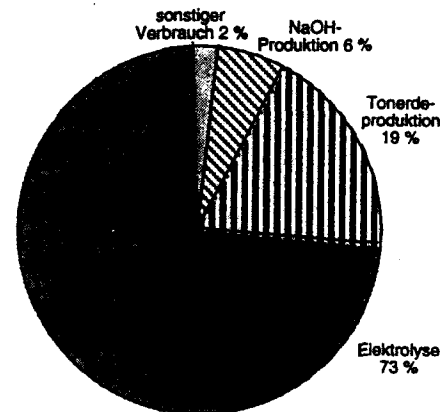
Die Abbildungen 2.2. und 2.3. zeigen den Energie- und Wasserverbrauch der einzelnen Prozeßschritte bei der Primär-Aluminiumherstellung. Man erkennt deutlich den überwiegenden Energieverbrauch für die Elektrolyse. Der hohe Wasserverbrauch für die Elektrolyse wird durch den hohen Kühlwasserverbrauch bei der in der BRD überwiegenden Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen verursacht.

Aus den in den Tabellen 2.8. und 2.9. angegebenen Bilanzen erkennt man, daß die Hauptmenge an festen Rückständen bei der Tonerdeproduktion in Form von Rotschlamm anfällt; die atmosphärischen Emissionen (SO_2) stammen hauptsächlich aus der Verstromung der fossilen Energieträger für die Elektrolyse sowie dem Abbrand der schwefelhaltigen Elektroden.



Gesamt-Primärenergiebedarf: 163.730 MJ/tAl

Abb. 2.2.: Aufteilung des Energieverbrauchs zur Erzeugung von 1 Tonne Primär-Aluminium



Gesamtwasserverbrauch: 57 m³/tAl

Abb. 2.3.: Aufteilung des Wasserverbrauchs zur Erzeugung von 1 Tonne Primär-Aluminium

Bei den angeführten Wasserverunreinigungen handelt es sich im wesentlichen um Verunreinigungen in den Abwässern der Kraftwerke. Verunreinigungen aus den Sickerwässern wurden nicht berücksichtigt [Krone et al., 1990]

Tabelle 2.8.: Stoffbilanzen zur Tonerdeherstellung [Krone et al., 1990]

Prozeßschritt	Einheiten	TONERDEPRODUKTION						Summe
		Kalksteinabbau	Kalzination von Kalkstein	Abbau Steinsalz	Produktion NaOH(50%Mg)	Tonerdeherstellung		
Menge	kg	89,2	89,2	319,5	437,3	1938		
Wasserverbrauch	l	33,9	119,9	694,6	3170,4	9690,0	13708,8	
festen Rückstände	kg	0,013	21,7	42,3	33,4	ca. 2900	2997,4	
atmosphärische Rückstände		Energieerzeugung + Prozeß	Energieerzeugung + Prozeß	Energieerzeugung + Prozeß	Energieerzeugung + Prozeß	Energieerzeugung + Prozeß	Energieerzeugung + Prozeß	
Staub	kg	-	1,722	0,096	1,732	1,112	4,662	
Stickoxide	kg	0,580	0,089	0,224	3,857	9,058	13,808	
Schwefeloxide	kg	0,005	0,233	0,383	9,525	20,659	30,795	
Kohlenmonoxide	kg	0,005	0,045	0,019	0,393	0,477	0,939	
Kohlenwasserstoffe	kg	0,002	0,037	0,096	1,496	3,337	4,968	
Chlor	kg				1,653		1,653	
Chlorwasserstoffe	kg						-	
Chloride	kg						-	
Fluor (g)	kg						-	
Fluor (Staub)	kg						-	
Fluoride	kg						-	
Teer	kg						-	
andere	kg	0,002				0,127	0,129	

Wasserverunreinigungen

gelöste Feststoffe	kg	0,001	0,018		0,306	2,225	2,550
BSB ₅	kg				0,001	1,271	1,272
CSB	kg				0,002	31,465	31,467
festen Schwebstoffe	kg		0,013				0,013
Säuren	kg		0,022	0,026	0,481	0,397	0,026
Metallionen	kg		0,045	0,006	0,131	0,127	0,309
Blei	kg				0,003		0,003
Teer	kg						-
Fluoride	kg						-
andere	kg		0,027	0,016	0,787	2,860	3,690

Tabelle 2.9.: Stoffbilanzen zur Herstellung von Hüttenaluminium aus Tonerde und Gesamtbilanz der Primär-Aluminiumerzeugung [Krone et al. 1990]

Prozeßschritt	Ein- heiten	HERSTELLUNG UND VERGIESSEN VON HÜTTENALUMINIUM										Gesamt Ton- erde u. Hütten- Al-Produktion	abgerundet + 10 % Unsicher- heitsfaktor
		Produktion von Aluminium- fluorid		Anoden- herstellung		Elektrolyse		Schmelz- reinigung Gießen		Summe			
Menge	kg	18,4	438,6	1020	38000	200	100	38300	268,3	324,0	52008,8	57000	
Wasserverbrauch	l	-	-	-	264,2	1,5	20,0	55,1	Prozeß	Summe	3321,4	3650	
feste Rückstände	kg	0,04	2,588	Prozeß	Ener- gieer- zeugung	Ener- gieer- zeugung	Prozeß	Ener- gieer- zeugung	Prozeß	Summe	Energieer- zeugung + Prozeß		
atmosphärische Rückstände	kg	Ener- gieer- zeugung	Ener- gieer- zeugung	Ener- gieer- zeugung	Ener- gieer- zeugung	Ener- gieer- zeugung	Prozeß	Ener- gieer- zeugung	Prozeß	Summe			
Staub	kg	0,022	0,351	13,668	1,387	0,130	14,171	1,387	15,558	20,220	22		
Stickoxide	kg	0,201	2,149	13,566	0,580	0,580	16,496	-	16,496	30,304	33		
Schwefeloxide	kg	0,460	2,895	63,444	7,854	1,500	68,299	8,183	76,482	107,277	118		
Kohlenmonoxide	kg	0,012	0,088	3,162	12,240	0,050	3,312	12,240	15,552	16,491	18		
Kohlenwasserstoffe	kg	0,074	1,053	2,448		0,200	3,775	-	3,775	8,743	10		
Chlor	kg						-	-	-	1,653	1,8		
Chlorwasserstoffe	kg					0,100	-	0,100	0,100	0,400	0,1		
Chloride	kg					0,400	-	0,400	0,400	0,400	0,5		
Fluor (g)	kg				0,255		-	0,255	0,255	0,255	0,3		
Fluor (Staub)	kg			0,204			-	0,204	0,204	0,204	0,2		
Fluoride	kg	0,004	0,044				-	0,048	0,048	0,048	0,05		
Teer	kg		0,123				-	0,123	0,123	0,123	0,14		
andere	kg						-	-	-	0,129	0,14		

Wasserverunreinigungen

gelöste Feststoffe	kg										2,550	2,8
BSB ₅	kg										1,272	1,4
CSB	kg										31,467	35
feste Schwefelstoffe	kg										0,013	0,02
Säuren	kg	0,009	0,175	2,448	0,640		2,632	0,040	2,672	3,598	4,0	
Metallionen	kg	0,003	0,044	0,612			0,659	-	0,659	0,968	1,1	
Blei	kg						-	-	-	0,003	0,003	
Teer	kg						-	0,002	-	0,002	0,002	
Fluoride	kg						-	0,001	0,001	0,001	0,001	
andere	kg	0,074	0,483	1,530			2,087	-	2,087	5,777	6,4	

Technologie der Primär-Aluminiumproduktion - Zusammenfassung

Primäraluminium wird durch Schmelzflußelektrolyse aus Bauxit hergestellt.

Bei der Herstellung von 1t Primäraluminium werden gemäß [Krone et al. 1990] folgende Ressourcen verbraucht:

- 160 GJ Primärenergie (gesamt)
- 48 GJ Strom für die Elektrolyse
- 500 kg Kohlenstoff für die Elektroden
- 60 m³ Wasser

Bei der Herstellung von 1t Primäraluminium entstehen folgende Reststoffe, die gemäß ÖNORM 2101 (Stand: 1.12.83) als gefährliche Abfälle einzustufen sind:

- 1-2 t Rotschlamm
- 30 kg Ofenausbruch
- 50 kg Filterrückstände
- 20 kg Krätze
- 10 kg Krätzestaub aus der Krätzeaufbereitung

3. SEKUNDÄR-ALUMINIUMPRODUKTION

3.1. TECHNOLOGIE

3.1.1. Rohstoffe

Als Rohstoffe für die Sekundär-Aluminiumerzeugung dienen Neuschrott aus Produktionsbetrieben, Altschrott, Späne und Krätze. Diese Materialien sind entsprechend ihrer Herkunft von unterschiedlicher Zusammensetzung und Form, sowie unterschiedlich stark verunreinigt. Von großer Bedeutung für den Schmelzprozeß ist die sorgfältige Aufbereitung der Vorstoffe, um möglichst wenig Verunreinigungen einzubringen.

Sortierte Neuschrotte können direkt wieder zur halbzeug- oder Formgußherstellung eingesetzt werden. Späne, Krätzen und Altschrotte dienen zur Herstellung von Umschmelzaluminium.

Tabelle 3.1.: Einsatzmaterial zur Erzeugung von Sekundäraluminium [Krüger 1994]

Einsatzmaterial	prozentueller Anteil
Neuschrott ohne Krätzen	50%
Altschrott	30%
Krätzen	15-20%
zusätzlich Legierungszusätze und Hüttenaluminium	10%

Neuschrott (Stanzreste, Profilabschnitte, Folien, etc) fällt i.a. sortenrein an und wird je nach Erfordernis zerkleinert und paketierr. Auch in Hüttengießereien werden Neuschrotte in großen Mengen u.a. zur Kühlung des Elektrolysemetalls eingesetzt. Bei einer Schließung der Primärhütten in Mitteleuropa werden diese Neuschrotte weiter anfallen und werden von den Strangußanlagen bzw. Umschmelzwerken zu Knetlegierungen verarbeitet werden [Krüger 1994]. Knetlegierungen sind Legierungen, die im Gegensatz zu Gußlegierungen durch Kalt- oder Warmverformung bearbeitbar sind.

Tabelle 3.2.: Zusammensetzung von Al-Neuschrott [Krüger 1994]

Material	Anteil
Stückiges Material	40-45%
Späne	25-33%
Krätzen	17-30%

Krätzen aus der Primär-Aluminium- und Gießereiindustrie werden mechanisch aufbereitet, wobei der gegebenenfalls hohe Anteil an Oxid und Salz (Reste von Abdecksalz) weitgehend vom Aluminium abgetrennt wird.

Die Abbildung 3.1. stellt im Überblick die Aufbereitungsverfahren für verschiedene Schrottsorten dar.

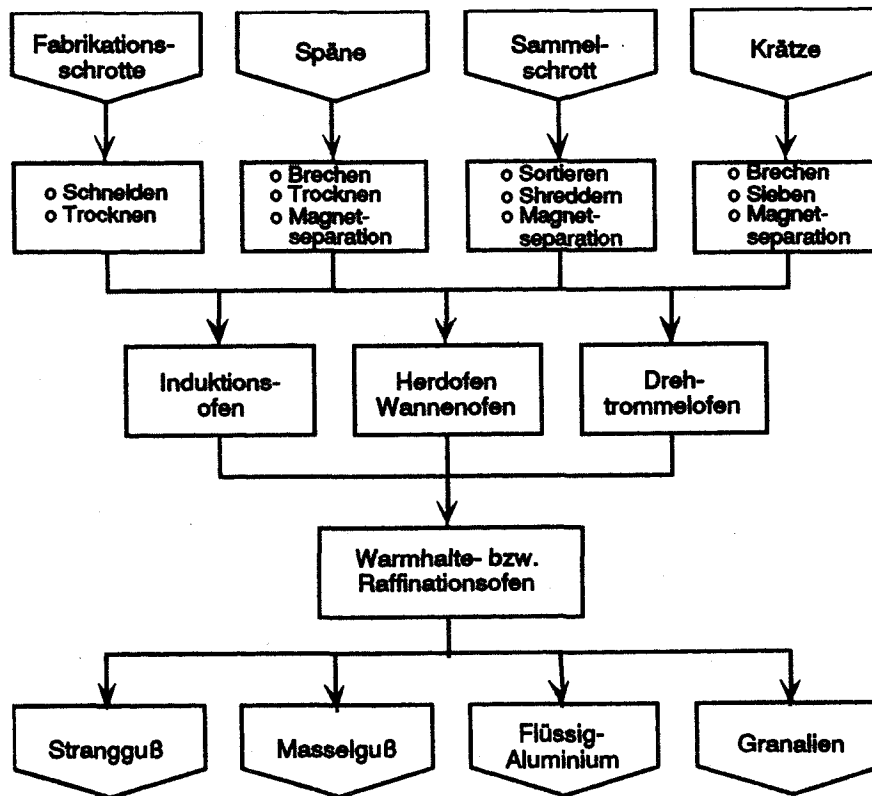


Abb. 3.1.: Verfahrensschritte bei der Sekundär-Aluminiumproduktion

3.1.2. Aufarbeitung von Al-Schrott

(nach: [Krüger, 1994])

Aluminium ist ein sehr unedles Metall, die wesentlichen Legierungspartner zeigen eine geringere Affinität zu Sauerstoff oder Chlor. So ist bereits beim Schmelzen mit bevorzugter Aluminium- Oxidation und Anreicherung der meisten Legierungspartner (oder Verunreinigungen) im Metall zu rechnen. Allein die Alkali- und Erdalkalimetalle bilden eine Ausnahme. Insbesondere bei der Späneverarbeitung und der Krätzeaufarbeitung ist dieser Tatsache Rechnung zu tragen.

Infolge des chemischen Verhaltens des Aluminiums sind auch die "Raffinationsmöglichkeiten" für Umschmelzaluminium gering, wie die folgende Übersicht zeigt (Tabelle 3.3.)

Tabelle 3.3.: Raffinationsmöglichkeiten für Umschmelzaluminium

Prozeß	Prozeßverlauf
Schmelzen unter Salz	Entfernung der Oxide
Chlorierung	Entfernung von Mg
Spülgasbehandlung	Entfernung von Li, Na, Mg, Ca, Sr, Zn, Oxiden, Nitriden, Carbiden
Salzraffination	Entfernen von Li, Na, Ca, Sr, Oxiden
Verdünnen	Zusatz von Hütten Al
Auflegieren	Zusatz von Legierungselementen

Die meisten Verunreinigungen (eigentlich auch die der Legierungselemente) müssen wegen der eingeschränkten Raffinationsmöglichkeiten der Schmelze noch vor dem Schmelzen entfernt werden. Dies kann nur durch Aufbereitungstechniken erfolgen. Hier sind sicherlich in den nächsten Jahren noch Neuentwicklungen zu erwarten.

Die Möglichkeiten der physikalischen Aufbereitung der Aluminiumschrotte sind vor einigen Jahren durch Rossel am Beispiel der VAW [Rossel 1988] dargestellt worden. In etwas veränderter Form wird der Überblick hier wiedergegeben (Siehe Abb. 3.3.)

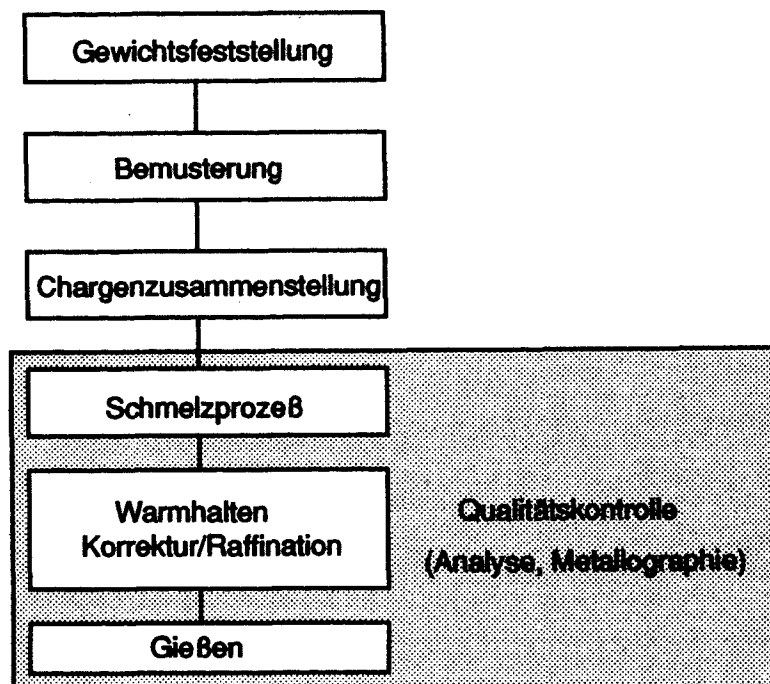


Abb.3.2.: Verfahrensschritte zur Sekundäraluminiumaufarbeitung [Orbon 1987]

Neuschrotte werden sortenrein angeliefert, so daß deren Rückführung als direkter Schrotteinsatz möglich ist. Hierbei wird allerdings bei lackierten und bedruckten Blechschrotten die Abschwelung erforderlich, da die Lacke Schwermetalle mitbringen, die bei direktem Einschmelzen unweigerlich vom Aluminium reduziert werden. Die Mengen scheinen nur im ersten Augenblick unbedeutend. Da jedoch die Blechstärken gering sind, spielen prozentual die Lackierungsgewichte bereits eine Rolle (Siehe Tabelle 3.4).

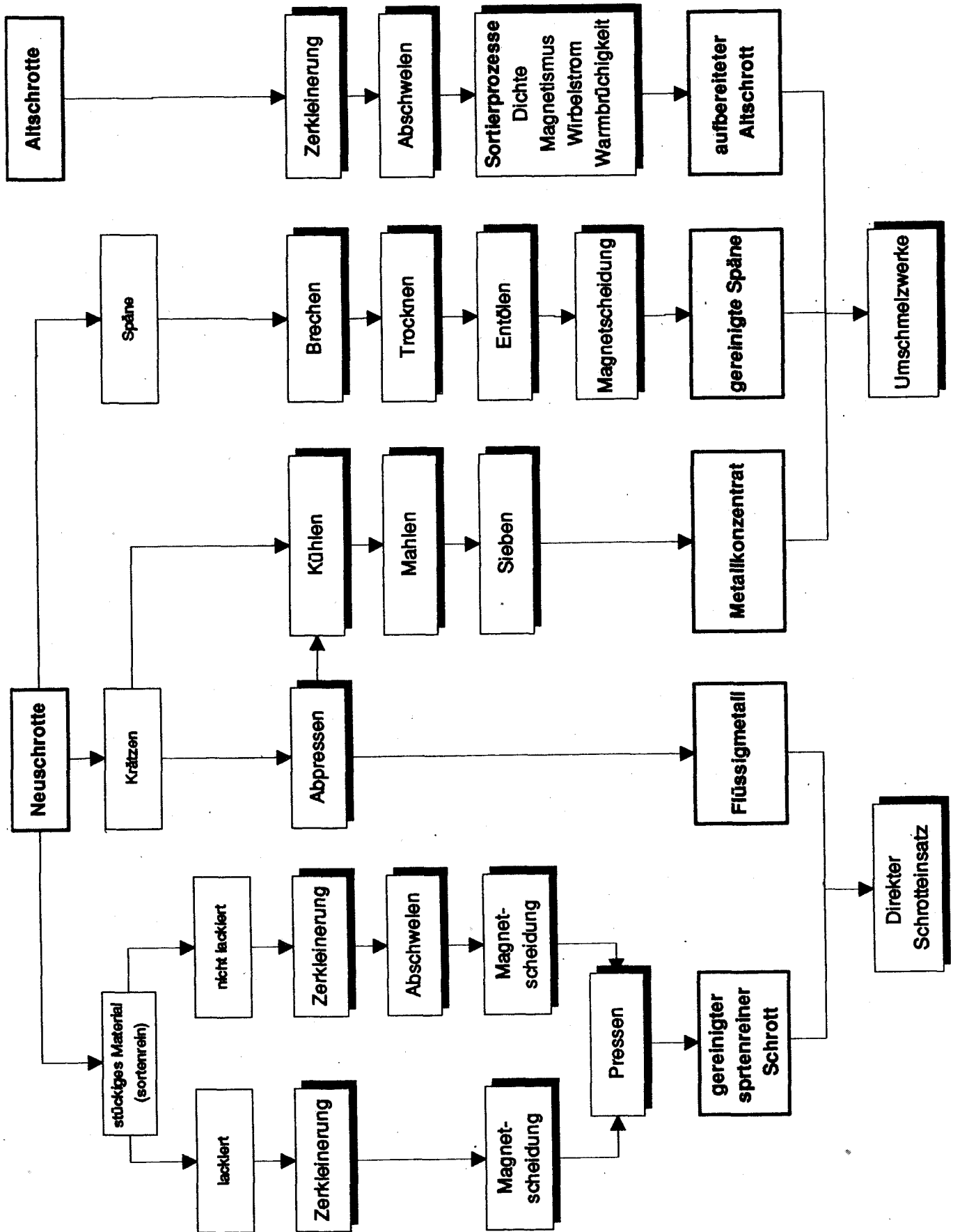


Abb. 3.3.: Aufbereitungsmöglichkeiten von Sekundäraluminium nach [Rossel 1988, Krüger 1994]

Tabelle 3.4.:Lackierung von Weißblech-/Al-Dosen (oben) und Lackzusammensetzung von Weißblechdosen in g/kg (unten) [Gotthelf 1984, Schmitz 1988]

	Rumpfgewicht (g)	Lackgewicht (mg) außen	Lackgewicht (mg) innen	Anteil am Rumpfgewicht (%)					
Aluminiumdose 0,33l	14,2	300	180	3,4					
Weißblechdose	31,5	830	590	4,5					
Pigmente									
weiß	Titandioxid								
blau	Kupferphthalocyanin								
gelb	Bleichromat, Bleimolybdat, Chromtitangelb, Nickel titan mischoxide, Titanchrom mischoxide								
rot	Zinkchromat, Eisenoxid								
Lackzusammensetzung	Al	Mn	Zn	Ti	Cu	Sn	Cr	Ni	Pb
Schultheiß-Bierdose	3	0,4	0,5	170	0,6	20	-	0,5	-
Holsten-Bierdose	3	0,3	0,6	330	0,4	22	0,1	1,2	1,5
Fanta-Dose	7	0,7	0,1	430	0,2	1	0,1	2,0	0,1
River-Citro-Dose	2	0,5	0,5	160	0,6	12	0,3	9,6	0,3

Sind die Neuschrotte nicht sortenrein, so ist eigentlich ihre Zuordnung zu den Altschrotten gegeben.

Altschrott kann in Bezug auf Legierungszusammensetzung, Form, Stückgröße, Beschichtungen, Anhaftungen und Fremdstoffen große Schwankungen aufweisen. Mit einzelnen Aufbereitungsverfahren ist selten die vollkommene Trennung zu erreichen. Fast immer sind mehrere Trennverfahren nacheinander zu durchlaufen, um schließlich einen hochangereicherten Al-Schrott zu erhalten. Die Aufbereitung erfolgt in der Regel im Schredder mit integrierter Windsichtung (Abtrennung von spezifisch leichtem Schredderabfall) und magnetischer Separation (Abtrennung von Eisen und Stahl). Die verbleibende Fraktion besteht aus einem Gemenge aller nichtmagnetischen schweren Stoffe (Buntmetalle, Edelstahl, Gummi, Glas, etc.), indem sich der Aluminiumgehalt von ca. 3 % (vor dem Schredder) auf rund 45 % erhöht [Alker, 1992]. Die Abbildungen 3.4. und 3.5. zeigen den Verfahrensablauf in einem Betrieb in Deutschland (Erftwerk der VAW).

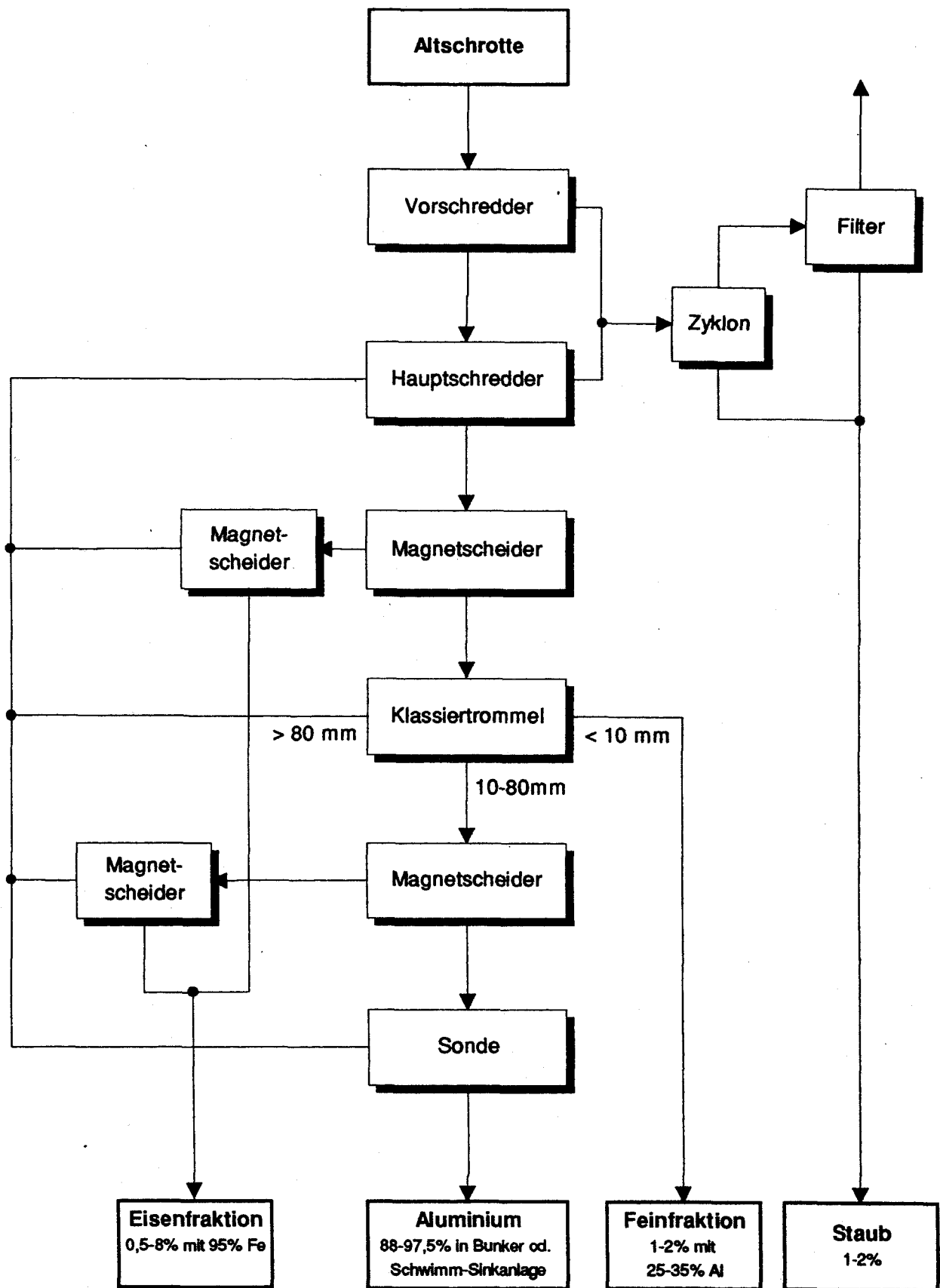


Abb. 3.4.: Verfahrensschema der trockenen Schrottaufarbeitung der VAW in Grevenbroich [Rossel 1988]

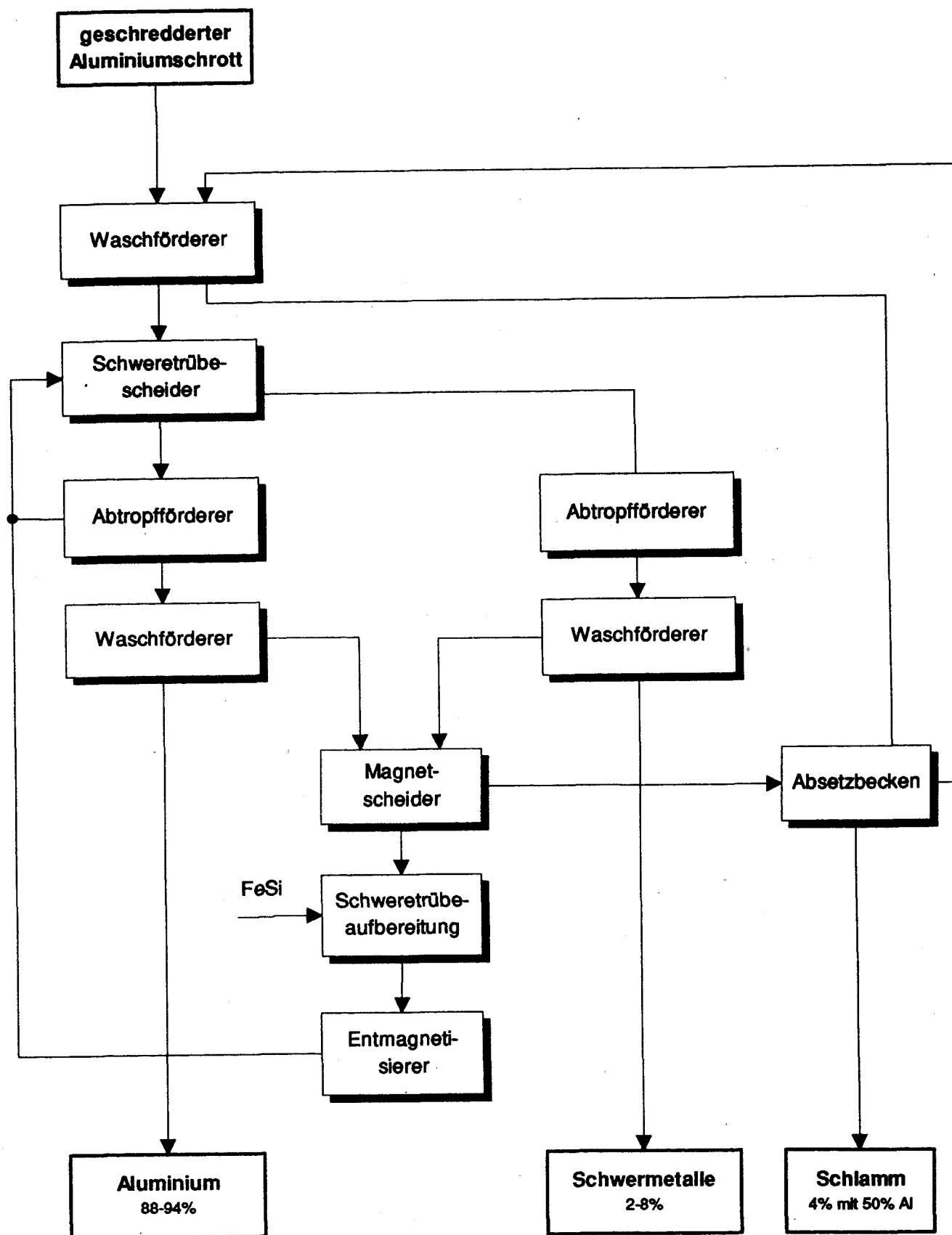


Abb.3.5. Verfahrensschema der Schwimm-Sink-Anlage der VAW in Grevenbroich [Rossel 1988]

Nach der Zerkleinerung folgt zuerst eine Magnetscheidung, häufig mehrstufig, um Eisen zu entfernen. Die verbleibende Nichteisenfraktion, wird in einer zweistufigen Schwimm/Sinktrennanlage weiter verarbeitet. In der ersten Stufe, die mit einem Wasser-Ferrosilizium-Gemisch einer Dichte von etwa $2,2 \text{ g/cm}^3$ gefüllt ist, werden die leichten Stoffe wie Gummi, Kunststoff und Magnesium abgetrennt.

Die schwereren Anteile sinken zu Boden und werden der zweiten Trennstufe zugeführt. Das Ferrosilizium-Wasser-Gemisch weist hier eine Dichte von $3,1\text{-}3,5 \text{ g/cm}^3$ auf. Aluminium und seine Legierungen schwimmen auf, am Boden verbleibt die als Mischmetall (Blei, Zink, Kupfer etc.) bezeichnete Schwerfraktion.

Diese Aufbereitung ist auch bei zweistufiger Arbeitsweise bezüglich der Trennung Aluminium-Nichtmetall unvollkommen, kann aber durch nachgeschaltete Wirbelstromabtrennung deutlich verbessert werden [Meens 1988, Pachzelt 1988].

Dieses Trennverfahren beruht auf der unterschiedlich starken magnetischen Abstoßung verschiedener Stoffe in einem Wechsellagerfeld, welches entweder durch rotierende Dauermagneten oder Linearmotoren erzeugt wird [Dalmijn 1988, Baumgartner, 1992].

Ungeachtet aller folgenden Waschstufen betragen die Verluste des Schweremittels Ferrosilizium (FeSi) etwa

6-8 kg FeSi/t Schrott (Eumet)

2-10 kg FeSi/t Schrott (VAW)

[Pachzelt 1988, Rossel 1988].

Das ist auf die komplexen Teilchenformen mit vielen Hohlräumen und Hinterschneidungen zurückzuführen. Zumindest in Gußlegierungen ist Si kein kritisches Element, anders ist es jedoch beim Eisen. Bei Knetlegierungen ist die Verunreinigung durch FeSi aus produktionstechnischen Gründen nicht tragbar.

Ferrosilizium führt weiters bei der Lagerung des vorbereiteten Aluminiumschrotts zu Korrosion und in der Folge zu Ausbeuteverlusten und Qualitätseinschränkungen beim Schmelzprozeß [Orbon, 1990; Krüger, 1990].

Aus diesem Grund muß das getrennte Gut gewaschen werden. Dadurch kann ein Teil des Schweremittels wieder in den Trennprozeß eingebracht werden. Angaben über die entstehenden Abfallmengen an Schweremitteln sind nicht vorhanden. Gemäß Abb. 3.5. werden rund 4% Schlamm ausgetragen, wobei maximal 50% aus Schweremittel bestehen (das sind ca 2-3% FeSi / t Al).

Die anderen bei der Schwimm/Sinkanlage gewonnenen Fraktionen werden ebenfalls weiter aufbereitet, die abgetrennten Metalle werden einer Verwertung zugeführt, der anfallende Schredder-Abfall wird üblicherweise auf Mülldeponien ("Reaktordeponien") abgelagert.

Diese Verfahren gestatten die Abtrennung der Nichtmetalle, der Magnesiumlegierungen, der Schwermetalle und des Eisens. Eine Trennung in Legierungen oder Legierungsgruppen erfolgt dabei nicht. Diese Trennung wäre notwendig, um Schrott in Herdöfen mit geringer Abdecksalzzugabe schmelzen zu können. Dazu ist nämlich eine einheitliche Zusammensetzung des einzuschmelzenden Schrottes Vorbedingung. Folgende zwei Methoden zur Legierungstrennung wurden bzw. werden angewendet:

Die Firma Refonda (Schweiz) hat einige Zeit eine dritte Sink-Schwimm-Trennstufe bei einer Trenndichte von $2,7 \text{ g/cm}^3$ betrieben, um auf diese Weise Al-Legierungen vom Typ AlMg und AlMgSi von Al-Legierungen des Typs AlCu und AlZn zu trennen. Die Anlage ist aber schon längere Zeit stillgelegt. Deutlich bessere Chancen zur Legierungstrennung ergeben sich durch Nutzung der Warmbrüchigkeit.

So werden bereits in den USA alte Al-Dosen temperaturgesteuert abgeschwelt. Die Deckellegierung AlMg5 wird dicht unter 580°C warmbrüchig, während die Dosenkörperlegierung AlMg1Mn1 erst rund 50°C höher die Festigkeit verliert. Wird der Schrott im Warmbrüchigkeitsbereich des AlMg5 umgewälzt (zwischen 580° und 630°C), so zerbricht die Deckellegierung in feine Teile, während die Dosenkörper unzerstört bleiben. Der Legierungsanteil des AlMg5 ist daher fast quantitativ als Feingut abtrennbar [Rossel 1988, Lossack 1987].

Bei der Verarbeitung von Schrott sind einige grundlegende Vorkehrungen gegen Umweltbeeinträchtigungen durch Verunreinigungen, wie z.B. Öle, Kühlflüssigkeiten und sonstige Chemikalien zu treffen. Bei fehlender Befestigung und Abdichtung der Zwischenlagerflächen ist eine Kontamination von Boden und Grundwasser zu erwarten. Ein Beispiel hierfür ist ein alter Schredderbetrieb südlich von Wien. Aufgrund der festgestellten Bodenkontaminationen wurde dieser Betrieb in den Altlastenkataster aufgenommen und wegen des vermuteten Gefährdungspotentials in die Prioritätenklasse III eingestuft [UBA, 1993].

Die Mindestanforderungen für eine umweltverträgliche Schrottwirtschaft sind im Zusammenhang mit der Altautoentsorgung in einem Erlaß des Umweltministeriums vom Mai 1993 definiert [BMUJF, 1993].

Bei starker Verunreinigung mit Öl, Fett, Lack oder Kunststoffüberzügen werden die Schrotte vor dem Einschmelzen im allgemeinen abgeschwelt.

3.1.3. Schmelzverfahren

Der Stand der Technik zum Umschmelzen der Sekundärrohstoffe ist das Schmelzen unter Salz in einem Drehtrommelofen, welches auch beim Einsatz minderwertiger Materialien eine hohe Ausbeute bzw. geringe Abbrandverluste im Recycling von Aluminium sicherstellt. Daneben finden Herdöfen und Induktionsöfen Anwendung (Tabelle 3.6)

Tab. 3.6.: Gegenüberstellung der Ofentypen, möglicher Rohstoffe und anfallender Reststoffe bei der Sekundär-Aluminiumproduktion

Ofentyp	Rohstoffe	Reststoffe
Drehtrommelofen	verunreinigte Schrotte, Krätze, Späne	Salzschlacke, Filterstaub
Herdofen	reine Schrotte (grobstückig)	teilweise Salzschlacke, Filterstaub
Induktionsofen	reine Schrotte	Filterstaub

Im Trommelofen wird zuerst Salz eingeschmolzen. In die heiße Salzschnmelze wird der Schrott eingetragen, schmilzt auf, Lacke brennen ab, Oxide werden von der Salzschnmelze aufgenommen. Metallschnmelze und Salzschlacke trennen sich. Sodann werden Metall und Schlacke getrennt abgestochen. Das Metall wird noch raffiniert und legiert. Die Salzschlacke wird einer Aufbereitung zur Rückgewinnung von Salz und Metallgranulat zugeführt.

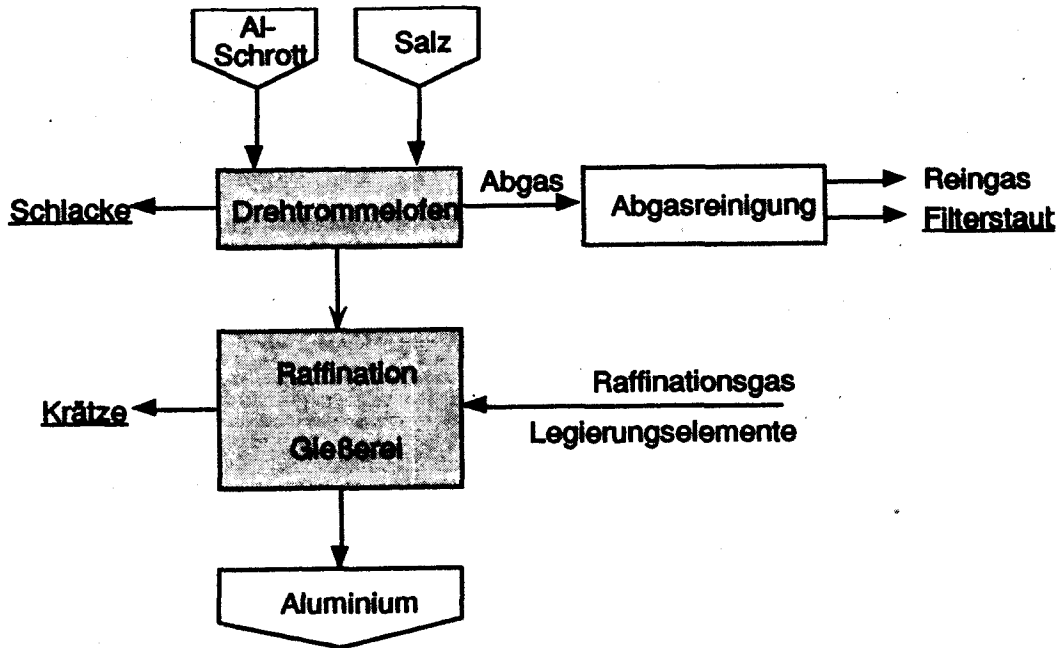


Abb. 3.6.: Fließschema der Sekundär-Aluminiumherstellung

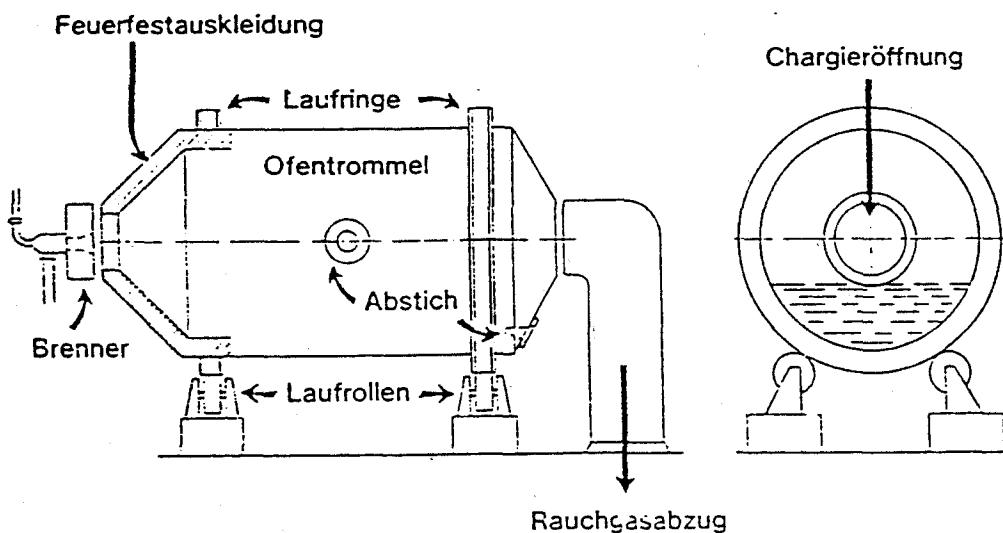


Abb. 3.7.: Schema eines Drehtrommelofens [Krüger 1994]

Die bis zu 850°C heißen Abgase enthalten Alkalichloride, feine Metallstäube, HCl und teilverbrannte organische Komponenten. Bereits heute wird dem heißen Abgas Ca(OH)_2 als Chemisorptionsmittel zugefügt, weitere Maßnahmen (etwa Nachverbrennung unter hochturbulenten Strömungsbedingungen, Schockkühlung auf ca. 200°C) werden erforderlich werden, um organische Restgehalte wirkungsvoll abzubauen.

Der Salzbedarf wird durch den Verunreinigungsgrad der Einsatzstoffe stark beeinflusst und damit auch der Anfall an Schlacke.

Nur bei sehr sauberen Schrotten können auch andere Umschmelzverfahren, die mit wenig bzw. ganz ohne Schmelzsatz auskommen, angewandt werden. Dazu zählen Induktionstiegelöfen und Herdschmelzöfen.

Folgende Schrotte bedingen nach heutiger Kenntnis auch zukünftig Salzeinsatz (mehrere hundert kg/t Einsatz) [Krüger 1994]:

- Krätzegrößen
- Al-Granulat der Salzschlacke
- Späne
- stark oxidierte Schrotte
- Al-Konzentrate aus der Müllsortierung bzw. -aufbereitung

Salz wird auch in Vorherdöfen eingesetzt, allerdings in geringeren Mengen (<50 kg/t Einsatz).

Die im Drehtrommelofen eingesetzte Salzschnmelze besteht aus einer Mischung aus NaCl und KCl (in Europa etwa 2/3 zu 1/3) mit einem Zusatz von einigen Prozent CaF_2 bzw. anderen Fluoriden und soll folgendes bewirken:

- Aufnahme der Verunreinigungen aus dem Einsatzgut
- Freilegung des metallischen Aluminiums durch Ablösung der Oxidhaut
- Verhinderung der Oxidation von Aluminium während des Schmelzprozesses
- Schutz des geschmolzenen Aluminiums vor Gasaufnahme aus der Atmosphäre.

Die Fluoride ermöglichen eine Schmelzpunkts- und Viskositätserniedrigung der Salzschnmelze, vor allem aber das sichere Ablösen der Oxidhäute von Aluminium, was insbesondere bei feinen Partikeln mit hohen Oberflächen von größter Bedeutung ist.

Diffuse Emissionen bzw. der Eintritt von Falschluff beim Schmelzprozeß, die durch den Spalt zwischen rotierendem Ofenkörper und stationärem Deckel verursacht werden, sind durch ein spezielles Dichtsystem, bestehend aus Flansch und Dichtung, die mittels Federn oder hydraulischen System angepreßt werden, weitgehend vermeidbar [AMST, 1993].

Aus Gründen der Einsparung von Abdecksalz werden vermehrt Vorherdöfen zum Schmelzen von Sekundäraluminium eingesetzt. Die Arbeitsweise eines Vorherdofens wird aus Abb. 3.8. ersichtlich.

Die Beschickung des Vorherdofens erfolgt über eine Rüttelrinne. Diese wird gefüllt in die Vorwärmkammer eingefahren, der Schrott wird hier mit dem Abgas des Hauptherdes getrocknet und vorgewärmt. Sodann wird das Tor zum Vorherd geöffnet, die Rüttelrinne fährt vor, das Chargiergut fällt auf das Bad. Nachdem die Rüttelrinne zurückgefahren ist, schließt das Tor zum Vorherd. Die Abgase des Vorherdes werden über einen Eduktorbrenner den Schwelgasbrennern des Hauptherdes zugeführt.

Über eine Pumpenkammer wird fortgeführt Flüssigmetall aus dem Hauptherd in den Vorherd gepumpt, dort schmilzt Metall auf, das in den Hauptherd zurückfließt. Die Abgase des Hauptherdes dienen der Metallvorwärmung und der Erhitzung der Regenerativkammern der Regenerativbrenner. Die Abgase werden dann dem Filtersystem zugeführt. Alle 6 h werden 16-18 t Al flüssig in Tiegeln zu Verbrauchern gefahren.

Gegenüber dem Salzbadtrommelofen bietet der Vorherdofen Vorteile hinsichtlich des Energieverbrauches bzw. des Masseeinsatzes, wie aus Tabelle 3.7. ersichtlich ist [Krüger 1994]

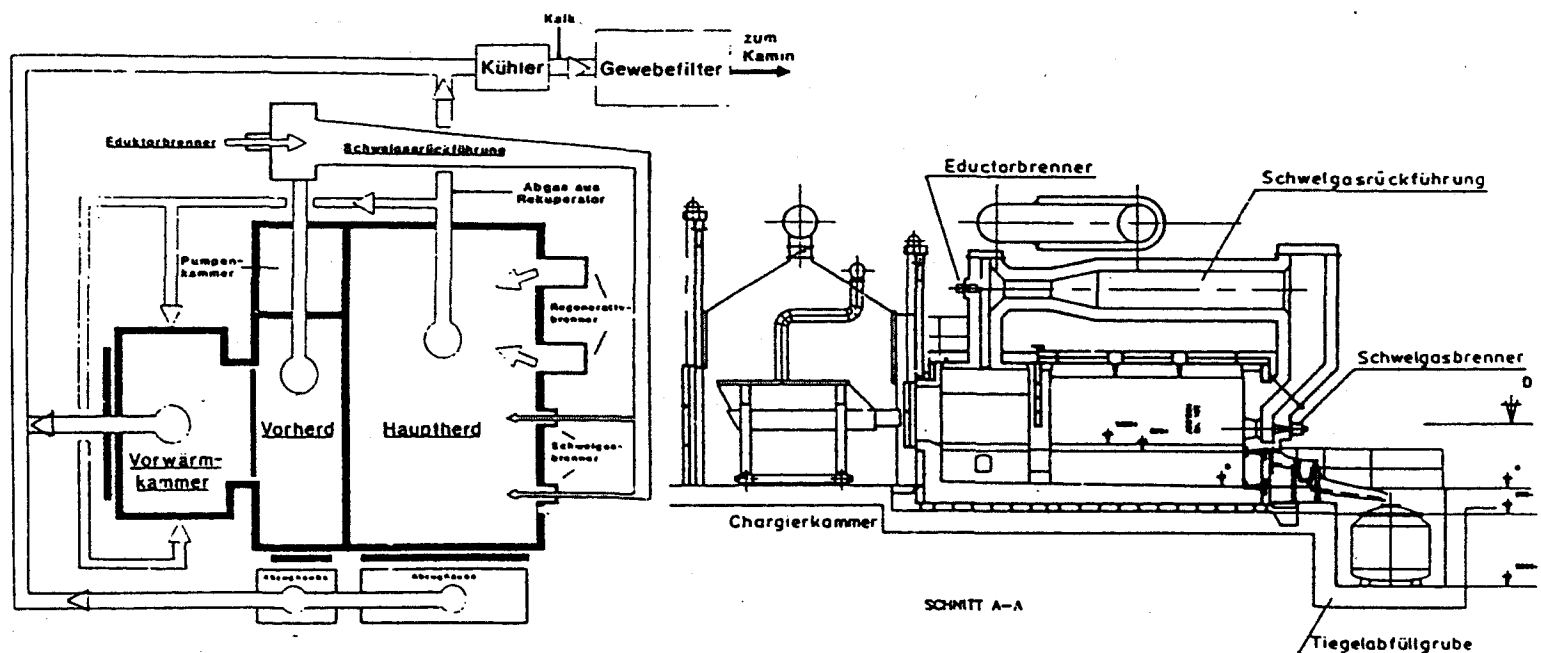


Abb.3.8.: Draufsicht (links) und Seitenansicht (rechts) des Vorherdofens [Giepen 1991, Rossel 1991]

Tabelle 3.7.: Masseneinsatz und Energieverbrauch beim Schmelzen von Al-Getränkedosen im Salzbadtrommelofen und im Vorherdofen [Reisener 1990]

	Salzbadtrommelofen		Vorherdofen	
	t/t Al	GJ/t Al	t/t Al	GJ/t Al
Schrottransport und Paketieren	1,24	0,95	1,12	0,86
Salztransport	0,46	0,35	0,03	0,02
Schreddern und Magnetscheiden	1,22	0,48	1,11	0,43
Al-Schmelzen	1,14	-	1,05	-
Salzschmelzen	0,46	8,95	0,03	4,3
Krätzeaufbereitung	-	-	0,13	0,74
Salzschlacketransport	0,62	0,47	0,04	0,03
Salzschlackeaufbereitung	0,62	2,9	0,04	0,19
Ofeninhalt	1,60 t/t AL		1.08 t/t Al	
Gesamttransport	2,32 t/t Al		0,32 t/t Al	
Energiebedarf	14,10 GJ/t Al		6,37 GJ/t Al	

Durch diesen Vergleich wird deutlich, daß im Trommelofen pro t Al deutlich mehr Material als im Vorherdofen zu schmelzen ist.

Dem höheren Metallausbringen bei niedrigerem Energie- und Salzverbrauch (verglichen mit Salztrommelöfen) stehen aber auch Nachteile gegenüber:

- Der Herdofen hat ein Fassungsvermögen von 90 t, mit einem Sumpf von 70 t. Damit ist jeder noch so kleine Legierungswechsel schwierig und zeitraubend. Am besten wird ein und dieselbe Qualität hergestellt.
- Eine schnelle Anpassung an unterschiedliche Kundenwünsche ist somit nicht möglich.
- Der Vorherd wird alle 4 h abgekrätzt, der Hauptherd nur alle 48 h. Die Krätze werden im Trommelofen unter Salz verarbeitet.

Die Chancen größerer Flexibilität bei geringerem Energieverbrauch als ein Vorherdofen besitzt ein gasbeheizter Schachtofen der vom Institut für Metallhüttenwesen und Elektrometallurgie der RWTH Aachen entwickelt worden ist (Siehe Abb.3.9.)

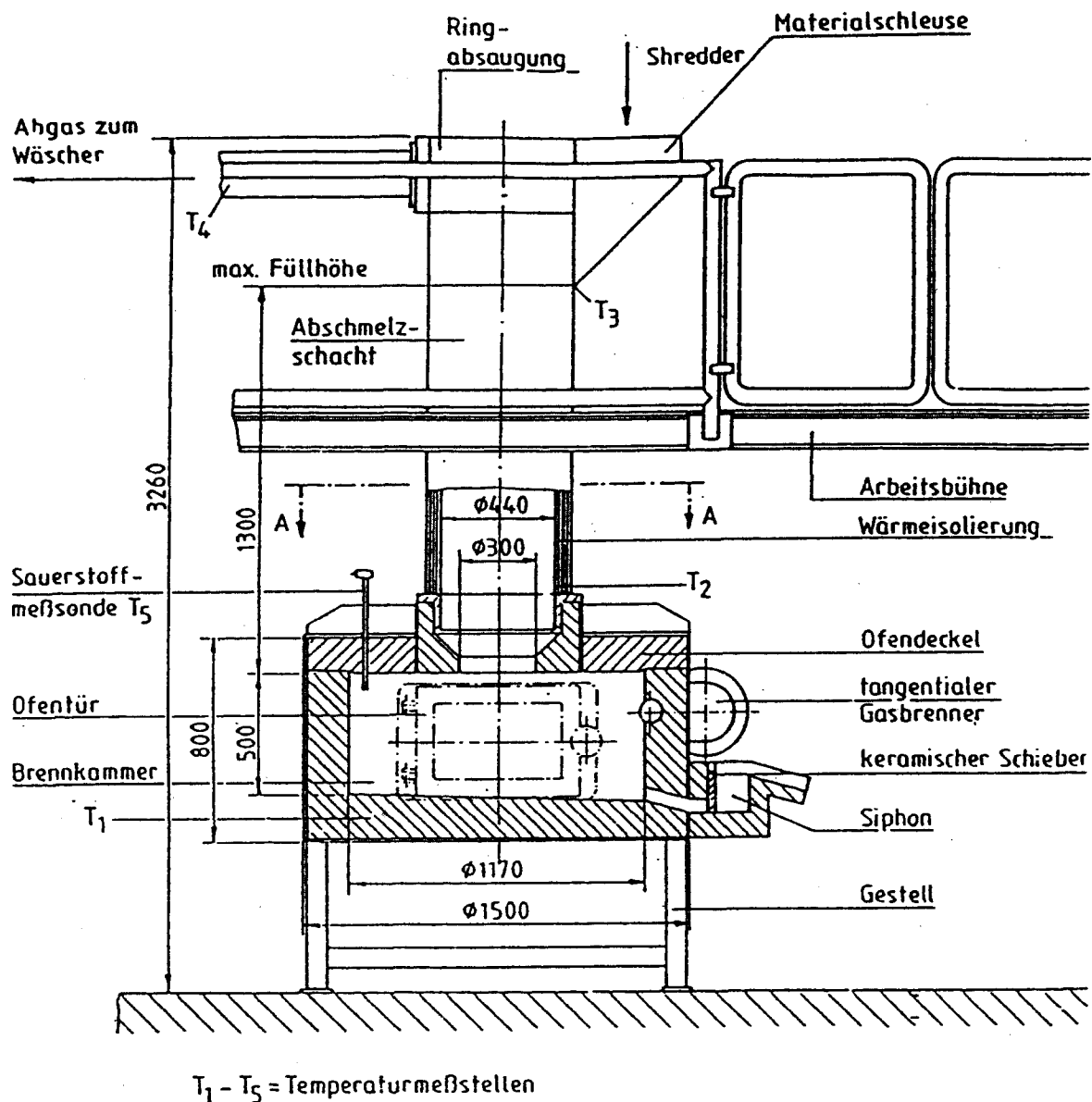


Abb.3.9.: Hochleistungsschachtofen zum Schmelzen von Al-Schrott

Dieser Ofen ist für stückige Schrotte geeignet und ist als reines Schmelzaggregat gedacht. Alles Flüssigmetall verläßt den Ofen sofort über einen Syphon. So sammeln sich im Ofen hochschmelzende Metalle und Krätze. Von Zeit zu Zeit wird nicht chargiert, sondern die nur kurze Beschickungssäule völlig heruntergefahren. Danach wird der Herd ausgekrätzt und die Säule wieder aufgefüllt. Zu dieser Zeit kann auch ein Legierungswechsel erfolgen.

Somit können unterschiedliche Schrotte im quasi kontinuierlichen Betrieb verarbeitet werden, ohne daß es zur Legierungsverminderung kommt.

Das Ausbringen erreicht je nach Schrotteinsatz 88-94%, die Schmelzleistung dieses noch kleinen Ofens erreicht 0,5-0,7 t/h bei einem gemessenen Energiebedarf von 1,6-2,0 GJ/t Metall.

Die Fahrweise ohne Sumpf erlaubt ein Abschmelzen. Selbstverständlich müssen die Schmelzreste (Krätze) aufgearbeitet werden (Magnetscheidung, Salzschnmelzen).

3.1.4. Schmelzereinigung und Legieren

Durch sorgfältige Gattierung wird in den Schmelzbetrieben erreicht, daß die Chargenzusammensetzung weitgehend der gewünschten Legierungszusammensetzung entspricht. Daher kann die anschließende Behandlung im Konverter bzw. Warmhalteofen auf die Entfernung bzw. Absenkung der Gehalte unerwünschter Begleitelemente und den allfällig erforderlichen Zusatz von ergänzenden Legierungselementen beschränkt werden.

Die Schmelzreinigung erfolgt durch eine Spülgasbehandlung zur Entfernung metallischer Verunreinigungen, wie Mg, Sr, Na, K, Ca, sowie H_2 .

Von den Hauptlegierungselementen Kupfer, Magnesium, Mangan, Silizium und Zink ist nur Magnesium mit herkömmlichen Mitteln zu entfernen. Bei den anderen besteht nur die Möglichkeit des Verdünnens bzw. Auflegierens. Infolgedessen ist eine kontinuierliche Arbeitsweise fast immer unmöglich. Die Probenahme bei eingehenden Schrottpartien, die Gattierung der Schmelzen, die schnelle Analyse zur Chargenkorrektur und die Endanalysen jeder einzelnen Charge sind von entscheidender Bedeutung (Siehe Abb. 3.2.).

Als Spülgase werden Cl_2 bzw. Mischungen dieses Gases mit N_2 oder Ar verwendet. Ohne Chlorgas kann nur dann gearbeitet werden, wenn eine Entfernung von Mg-Verunreinigungen (Bildung von $MgCl_2$) nicht erforderlich ist. Das zur Reinigung ebenfalls eingesetzte Hexachlorethan kommt heute nicht mehr zur Anwendung, da die gewünschte Werkstoffqualität nicht erreicht werden konnte und es zur Bildung toxischer Gase kam.

Durch die aufsteigenden Gasblasen können die nichtmetallischen Einschlüsse aus der Schmelze an die Oberfläche ausgetragen werden.

Die gewünschte Legierungszusammensetzung wird durch zusätzliches Chargieren von Legierungselementen in reiner Form bzw. über Vorlegierungen in den Warmhalteofen eingestellt.

3.1.5. Vergießen

Die auf diese Weise hergestellten Aluminiumlegierungen kommen meist in Form von Masseln oder bevorzugt in flüssiger Form in speziellen, wärmeisolierten Transportbehältern in den Versand.

3.2. RESTSTOFFE

Die nachstehende Tabelle gibt eine Übersicht über die bei der Sekundär-Aluminiumproduktion anfallenden Reststoffe und ihre Entsorgung bzw. Behandlung.

Tab. 3.8.: Reststoffe der Sekundäraluminiumerzeugung

Reststoff	Anfall / Vermeidung	Menge	Entsorgung bzw. Verwertung (Stand der Technik)
Filterstaub	Abgasreinigung Drehtrommelofen	15 - 35 kg/t Al	Untertagedeponie, Einsatz in Stahlindustrie
Salzschlacke	Schmelzen im Drehtrommelofen Alternative: nur für Reinschrotte, Schmelzen ohne Salz	400 - 700 kg/t Al	Aufarbeitung mit Löse-/ Kristallisations- verfahren Gewinnung der Wertstoffe Al- Granulat, Mischsalz, TER
Ofenausbruch	Drehtrommelofen	ca. 2 kg/t Al	Deponie
Krätze	Schmelzereinigung, Gießerei	ca. 30 kg/t Al	Aufarbeitung und Verwertung

3.2.1. Filterstaub

Die Abgasreinigung in Umschmelzwerken erfolgt gemäß Stand der Technik mittels Gewebefilter und Trockenabsorptionsverfahren oder Flugstromverfahren. Letzteres beruht auf der Eindüsung eines pulverförmigen Adsorbens in das Abgas und der anschließenden Abscheidung des beladenen Adsorbens und des Flugstaubes an den Schläuchen eines Gewebefilters. Auf der Oberfläche der Schläuche bildet sich eine alkalisch wirksame Schicht, die zu einer verbesserten Staubabscheidung und zu einer weitgehenden Bindung der sauren Abgasbestandteile (HCl, HF, Cl₂) beiträgt. Als Adsorbens wird z.B. Kalkhydrat, teilweise auch mit Zusatz von Aktivkohle bzw. Aktivkoks, eingesetzt.

Hinsichtlich der Zusammensetzung von Filterstäuben sind die verwendeten Abgasreinigungstechniken und die unterschiedlichen Einsatzmaterialien ausschlaggebend, daher variieren die Konzentrationen umweltrelevanter Schwermetalle in einem weiten Bereich, ebenso die Konzentrationen an organischen Schadstoffen wie PCDD/PCDF, PAK und PCB. Die PCDD/F-Fracht des Abgases schwankt im Bereich von 1-50 ng/Nm³.

Tabelle. 3.9.: Typische Zusammensetzung von Filterstaub (Angaben in Gewichtsprozent)

Inhaltsstoff	typischer Analysenwert (%)	Bandbreite (%)
CaO	35	2-50
Al ₂ O ₃	40	5-50
NaCl, KCl	15	5-25
C	6	1-6
Schwermetalle *)	-	0.01-10
Al, metallisch	4	0-10
PCDD/F	50 µg/kg	10-100 µg/kg

*) Anmerkung: Es können beispielsweise Ba, Cd, Co, Cr, Fe, Ni, Pb enthalten sein.

Die Hauptkomponente ist unreagiertes Kalkhydrat. Neben den verdampften Chloriden und Fluoriden, sowie den sekundär gebildeten Komponenten wie Al₂O₃, CaCl₂, CaSO₄ etc. enthält Filterstaub metallisches Aluminium, freien Kohlenstoff und organische Stoffe (z.B. PCDD/F). Die Kornstruktur ist sehr fein: 99% des Staubes ist kleiner als 1 µm, 75% sogar unter 0,5 µm.

Der Gehalt an Schwermetallen wurde von Krone [Krone 1994] in folgenden Bandbreiten angegeben:

Tabelle 3.10.: Schwermetallgehalt von Filterstaub (Bandbreiten) nach [Krone 1994]

Metall	Fe	Pb	Cu	Zn
Konzentrationsbereich	0,5-6,3%	0,1-0,4%	0,1-0,7%	0,2-0,8%

Pro Tonne produziertem Sekundäraluminium fallen etwa 15-35 kg Filterstaub an.

Das umweltgefährdende Potential des Filterstaubes besteht aufgrund der eluierbaren Komponenten (Chloride) und der organischen Schadstoffe (PCDD/F).

In Österreich ist Filterstaub entsprechend ÖNORM S 2101 als gefährlicher Abfall einzustufen. Bei einer Deponierung muß sichergestellt werden, daß die Eluatklasse IIIb (ÖNORM S 2072, Stand 1.11.1990, nicht überschritten wird und die PCDD/F-Fracht nicht freigesetzt wird (z.B. Untertagedeponie).

3.2.2. Salzschlacke

Die Menge des in den Drehtrommelöfen eingesetzten Schmelzsalzes beträgt etwa 250-300 kg/t Al und wird in verunreinigter Form als sogenannte Salzschlacke wieder abgezogen. Je Tonne produziertem Sekundäraluminium fallen, abhängig vom Verunreinigungsgrad des eingesetzten Rohstoffes (Aufnahmefähigkeit des Salzes für Verunreinigungen: 30-40 %), etwa 400-700 kg Schlacke an.

Tabelle 3.11.: Typische Zusammensetzung von Salzschlacke (Angaben in Gewichtsprozent)

Inhaltsstoff	typischer Analysenwert (%)	Bandbreite(%)
Al, metallisch	7	4-15
Al ₂ O ₃ , Aluminate	25	15-35
NaCl, KCl	60	55-75
CaF ₂	1	1-2
Sonstiges	7	Rest
PCDD/F	5 ng/kg	2-20 ng/kg

Anmerkung: Unter "Sonstiges" fallen Elemente, wie Co, Ni, Pb, Cr, Cu, Mn, V, Zn, Ba, Zn und Fe (Legierungselemente, Begleitstoffe der Schrotte).

Das umweltgefährdende Potential der Salzschlacke liegt im hohen, wasserlöslichen Salzgehalt und den bei Kontakt mit Wasser entstehenden, toxischen und gegebenenfalls explosiven und geruchsintensiven Gasen (H₂, CH₄, NH₃, H₂S, PH₃). In Österreich ist gemäß ÖNORM S 2101 (Stand 1.12.1983, Salzschlacke als gefährlicher Abfall einzustufen (Tab. 2.3.).

Eine Deponierung ist aufgrund des Gefährdungspotentials und den zur Verfügung stehenden Aufarbeitungsmöglichkeiten zu vermeiden (siehe Zusammenfassung).

Bei der Aufarbeitung der Salzschlacke gemäß dem Stand der Technik (siehe Kap. 4.2.) fällt letztlich etwa 30 % Tonerderückstand (TER) an, der in der Zementindustrie als Al₂O₃-Träger eingesetzt wird.

Tabelle. 3.12.: Zusammensetzung des Tonerderückstands (TER) in Gewichtsprozent (Beckmann, 1991).

Inhaltsstoff	typischer Analysenwert (%)	Bandbreite(%)
Al ₂ O ₃	44	40-50
Mg-Al-Spinell	32	30-35
div. andere Al-Verbindungen	6	5-10
SiO ₂	11	10-15
Na-Silikat, -silikofluorid	1	1-2
CaF ₂ , Gips	5	4-6
Ba, Sr-Karbonat,-sulfat	0.6	0.2-1
div. Cu, Ni, Pb, Zn-Sulfide	0.5	0.2-1
NaCl, KCl	< 0.4	- 0.4

Der Schwermetallgehalt des Tonerderückstand wird in Tabelle 3.13. angegeben [Krone 1994]

Tab. 3.13.: Schwermetallgehalt von Tonerderückstand [nach Krone 1994]

Element	Gehalt	Element	Gehalt
Cu	0,5-1,5%	Ni	0,01-0,03%
Zn	0,05-0,17%	V,As,Be,Co	jeweils <0,01%
Pb	0,0015-0,15%	Hg,Cd	jeweils <0,001%
Cr	0,0075-0,05%		

In Untersuchungen des Eluats des TER's wurde festgestellt, daß die Schwermetalle schwerlöslich sind (Beckmann, 1991). Vor einer allfälligen Deponierung sind aber gesonderte Untersuchungen anzustellen. Außer dem Einsatz in der Zementindustrie sind einige potentielle Verwertungsmöglichkeiten in Entwicklung (s. Kapitel 6.1.).

3.2.3. Ofenausbruch

Die Ausmauerung der Drehtrommelöfen muß alle 1-2 Jahre erneuert werden. Dabei fallen pro Ofen etwa 15 t gebrauchte Steine an.

Der Ofenausbruch ist mit Resten aus der Produktion behaftet (Schlacke, Metall). Vor einer Deponierung ist das Eluationsverhalten festzustellen und aufgrund der gesetzlichen Bestimmungen (Deponierichtlinien, ÖNORM S 2075, Stand 1990) eine Zuordnung zum Deponietyp zu treffen.

3.2.4. Krätze

Die in der Sekundär-Aluminiumproduktion anfallende Krätze entspricht in der Zusammensetzung im wesentlichen jener, die bei der Primär-Aluminiumproduktion anfällt. Im allgemeinen weist sie jedoch einen höheren Salzgehalt auf. Wegen der ebenfalls erhöhten Kohlenstoffgehalte und der damit verbundenen Schwarzfärbung der Krätze, wird sie im englischsprachigen Raum oft als "black dross" bezeichnet. Pro Tonne produziertem Sekundäraluminium fallen etwa 30 kg Krätze an [Krone et al., 1990].

Zum umweltgefährdenden Potential gelten die unter 2.1.4.4. getroffenen Feststellungen.

Tabelle 3.14.: Zusammensetzung von Aluminiumkrätze, verunreinigter Krätze und Krätzestaub [Krone 1994]

Krätze	verunreinigte Krätze	Krätzestaub
< 80 (90) % metall. Al	< 20% metall. Al	< 10% metall. Al
Al ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ .MgO, Al ₂ O ₃ .SiO ₂ etc., AlCl ₃ , NaCl, KCl, CaF ₂ etc.		

Der Aluminiumgehalt von Krätze läßt sich durch Zusatz geringer Mengen Salz vor dem Abkrätzen erniedrigen [Krone 1994].

3.3. ENERGIE-UND STOFFBILANZ

Als Beispiel einer Energie- und Reststoffbilanz für die Sekundär-Aluminiumproduktion gemäß Stand der Technik (Drehtrommelofen und Schlackeverwertung) sei die Studie von Krone et al., 1990 angeführt, die von folgender Zusammensetzung der Einsatzstoffe ausgegangen ist:

Tabelle 3.15.: Zusammensetzung der Einsatzstoffe zur Sekundäraluminiumerzeugung

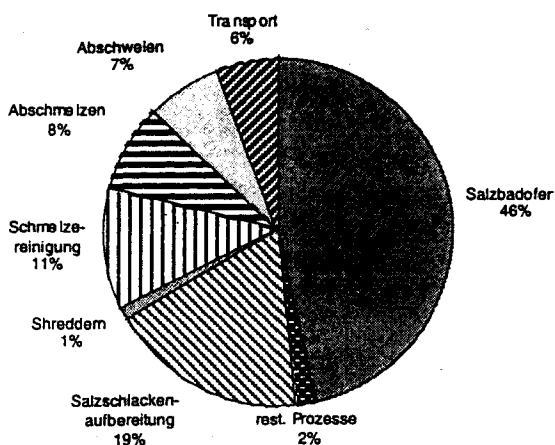
Einsatzstoff	Neuschrott	Späne	Altschrott	Kratzgröße	Vorschmolz
Anteil (%)	24	24	33	16	3

Abb. 3.12. zeigt das auf dieser Basis erstellte Mengenflußdiagramm einer Sekundär-Aluminiumproduktion.

Tab. 3.16. faßt die Schadstoffbilanz der Sekundär-Produktion zusammen. Die Hauptmenge an festen Rückständen fällt im Schmelzwerk an, der größte Anteil der atmosphärischen Emissionen stammt aus der Energiegewinnung für Heiz- und Transportzwecke.

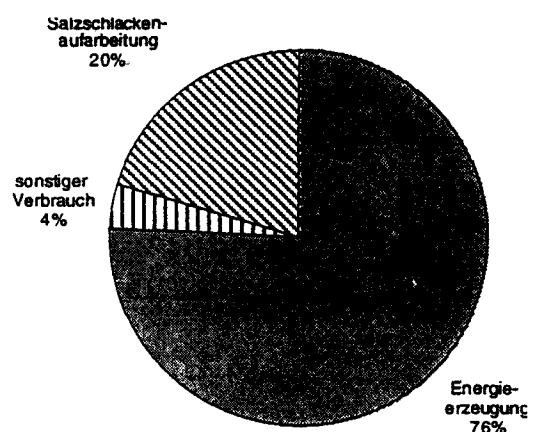
Der spezifische Energieverbrauch ist in Abb. 3.10. dargestellt. Der Hauptenergiebedarf liegt im Einschmelz- und Schmelzreinigungsprozeß (ca 58%).

Der größte Wasserverbrauch entsteht bei der Energieerzeugung durch Kühlwasserverbrauch in kalorischen Kraftwerken. Der Wasserbedarf der Salzschlackenaufbereitung beruht auf Feuchtheitsaustrag mit den Produkten Mischsalz und Tonerderückstand.



Gesamtenergiebedarf: 19.5 MJ/t_{Al}

Abb. 3.10.: Aufteilung des Energieverbrauchs für die Erzeugung von 1 Tonne Sekundäraluminium



Gesamtmenge: 1,6 m³ H₂O/t_{Al}

Abb. 3.11.: Aufteilung des Wasserverbrauchs für die Erzeugung von 1 Tonne Sekundäraluminium



Tabelle 3.16.: Schadstoffbilanz der Sekundär-Aluminiumherzeugung pro Tonne Aluminium [Krone et al., 1990]

Prozessschritt	Einheit n	Schadstoffemission durch Prozessschritte					Schadstoffe aus Energie- erzeugung	Summe	gerundet 10 % + Unsicherheits- faktor
		Transport	Shreddern	Schwimm- Sink.-Tr.	Hüttenwerk	Salzschlak- kauf- arbeitung			
Menge	kg	2576	431	227	1134 (1000)	722	1671,2 MJel		
Wasserverbrauch	l	-	-	14,8	42,6	300	1123	1480,4	1600
feste Rückstände	kg	-	23	-	43	-	18,7	84,7	93
atmosphärische Rückstände									
Staub	kg	0,042	0,001		0,250	0,073	0,019	0,385	0,4
Stickoxide	kg	0,519			1,900		1,343	3,762	4,1
Schwefeloxide	kg	0,047			1,310		0,243	1,600	1,8
Kohlenmonoxide	kg	0,079			0,042		0,147	0,268	0,3
Kohlenwasserstoff	kg	0,072			-			0,072	0,08
Wasserstoff	kg					0,681		0,681	0,75
Methan	kg					2,384		2,384	2,6
Chlor	kg				0,002			0,002	0,002
Chlorwasserstoff	kg				1,140			1,140	1,3
Kohlenstoff	kg				0,540			0,540	0,6
Fluorwasserstoff	kg				0,029			0,029	0,03
Schwefelwasserstoff	kg					0,005		0,005	0,006
Phosphorwasserstoff	kg					0,001		0,001	0,001
Ammoniak	kg					0,009		0,009	0,001
Wasserverunreinigungen									
gelöste Feststoffe	kg								
BSB ₅	kg								
CSB	kg								
feste Schwebstoffe	kg								
Säuren	kg						0,102	0,102	0,11
Metallionen	kg						0,024	0,024	0,03
andere	kg						0,093	0,093	0,10

Sekundär- Aluminiumproduktion - Zusammenfassung

Sekundäraluminium (recycletes Aluminium) wird durch Umschmelzen von Neuschrott, Altschrott, Spänen und Krätzen hergestellt.

Altschrott beinhaltet neben Aluminium auch Schwermetalle (Eisen, Zink, Kupfer), mineralische Bestandteile und organische Stoffe (Lacke, Kunststoffhüllen), die vor dem Umschmelzen abgetrennt werden müssen.

Altschrott kann aus vielen unterschiedlichen Aluminiumlegierungen bestehen. Eine Trennung dieser Legierungen im Nachhinein ist nur in seltenen Fällen möglich. Sortenreine Legierungen können am besten durch getrennte Sammlung erhalten werden.

Beim Umschmelzen von Aluminiumschrott muß die Oberfläche der Schmelze mit Salz (NaCl/KCl) abgedeckt werden, um Oxidation zu vermeiden.

Gemischte Schrotte und Schrotte mit starken Verunreinigungen müssen in einem Trommelofen eingeschmolzen werden und benötigen ca. 460 kg/t Al Abdecksalz (je nach dem Grad der Verunreinigung).

Sortenreine Schrotte, welche in einem Herdofen eingeschmolzen werden, benötigen ca. 30kg/t Al Abdecksalz.

Bei der Erzeugung von 1 t Sekundäraluminium entstehen folgende Reststoffmengen, die gemäß ÖNORM 2101 (Fassung vom 1.12.83) als gefährliche Abfälle einzustufen sind:

- 15-35 kg Filterstaub
- 400 - 700 kg Salzschlacke
- 2 kg Ofenausbruch
- 30 kg Krätze

Die Salzschlackenmenge ist beim Einschmelzen in einem Herdofen geringer als in einem Salztrommelofen.

Der Gesamtenergiebedarf beträgt etwa 20 MJ/t, der Gesamtwasserverbrauch etwa 2 m³/t.

4. VERGLEICHENDE EMISSIONSBILANZ FÜR PRIMÄR- UND SEKUNDÄR-ALUMINIUM-PRODUKTION

In einer umfangreichen Studie wurden ökologische Aspekte der Primär- und Sekundär-Aluminiumerzeugung in der Bundesrepublik Deutschland detailliert untersucht und berechnet [Krone et al, 1990]. Für die Bilanzierung der Primär-Produktion wurde die Herstellung von Aluminium aus Bauxit in Elektrolyseöfen nach Stand der Technik herangezogen. Grundlage für die Bilanzierung der Sekundärseite war der Prozeß im Drehtrommelofen mit vorgelagerter Schrottaufbereitung und nachgeschalteter Aufbereitung von Schlacke (mit Verwertung der Tonerde in der Zementindustrie), Krätze und Krätzestaub nach dem Löse-Kristallisationsverfahren.

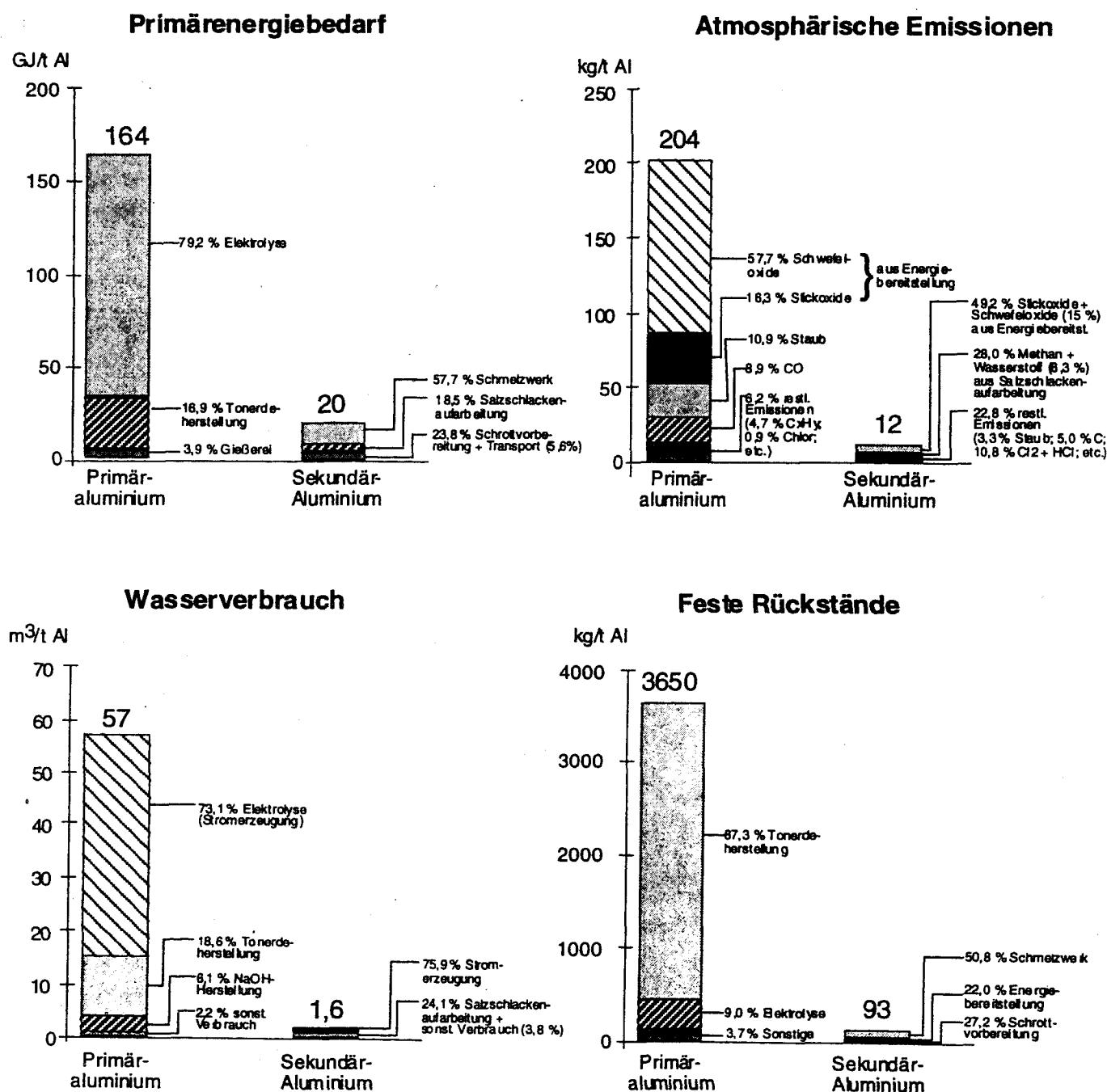


Abb. 4.1.: Vergleich zwischen der Primär- und Sekundär-Aluminiumproduktion auf Basis von Emissionsbilanzen [Krone et al, 1990]

Insgesamt wurde festgestellt, daß in Bezug auf Energie- und Wasserverbrauch sowie an gasförmigen Emissionen (zu beachten ist, daß in der BRD im Vergleich zu Österreich die Energiegewinnung zu einem höheren Prozentsatz mit kalorischen Kraftwerken erfolgt und sich daher für Österreich ein geringerer Anteil der gasförmigen Emissionen aus der Energieerzeugung ergibt) und festen Rückständen die Sekundär- gegenüber der Primär-Aluminiumerzeugung Vorteile aufweist. Diese Erkenntnisse der Studie gelten in analoger Weise (Einschränkungen hinsichtlich Energiegewinnung und Stand der Technik siehe oben) auch für die Aluminiumproduktion in anderen Ländern.

4.1. FESTE RÜCKSTÄNDE

(nach: [Krüger, 1994])

Bei der Primärerzeugung entstehen pro Tonne erzeugtem Aluminium 3.650 kg feste Rückstände und zwar davon ca. 87% = 3200 kg feuchter Rotschlamm bei der Tonerdeproduktion. Bei einer Erzeugung von ca. 1,2 Mio. t Tonerde im Jahr 1988 in der Bundesrepublik Deutschland bedeutet das eine deponierte Rotschlammmenge von ca. 1,9 Mio.t. Es hat nicht an Versuchen gefehlt, diesen Reststoff aufzuarbeiten - bisher jedoch ohne jeden größeren Erfolg. Weitere feste Rückstände fallen bei der Stromerzeugung für die Elektrolyse an und bestehen zum überwiegenden Teil aus den Aschen der Kohleverstromung.

Demgegenüber steht bei der Sekundärproduktion ein Anfall von 93 kg/t Sekundäraluminium entsprechend insgesamt ca 50.000 t fester Abfälle in der BRD im Jahr 1988 (in Österreich etwa 20.000 t/a, siehe Kapitel 6), wenn der bei der Salzschlackeaufbereitung anfallende Oxidrückstand verwertet wird. Die Abfälle stammen zur Hälfte aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe zu Heiz- und Transportzwecken und der Schrottvorbereitung (Schreddern) sowie aus dem Schmelzwerk selbst.

Letztere bestehen zu ca. 70% aus Filterstäuben, die in den Abschmelz-, Abschwel- und Trommelöfen sowie den Konvertern nachgeschalteten Gewebefiltern abgeschieden und bis vor kurzem noch deponiert werden mußten. Zu Aufarbeitung dieses Abfallstoffes sind Verfahren entwickelt worden.

Die bei der Salzschlackeaufbereitung im Waschwasser enthaltenen geringen Mengen an Ammoniumsulfat und -phosphat sollen in Deutschland gewonnen und an die Düngemittelindustrie abgegeben werden.

4.2. ATMOSPHÄRISCHE EMISSIONEN

(nach: [Krüger 1994])

Die bei der Primärerzeugung entstehenden atmosphärischen Emissionen, die insgesamt ca. 204 kg/t Al ausmachen, stammen zu ca. 85% aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe für Prozeßenergien (Tonerdeherstellung) und zur Kohleverstromung (Elektrolyse) und bestehen im wesentlichen aus Schwefel- und Stickoxiden, Staub etc. Nur ein geringer Anteil sind prozeßbedingte Emissionen wie Fluor und Fluoride aus der Schmelzflußelektrolyse bzw. Chlor und Chloride aus der Schmelzebehandlung.

Bei der Sekundärerzeugung sind auch die spezifischen atmosphärischen Emissionen mit ca. 12 kg/t Al wesentlich geringer als die bei der Primärerzeugung.

Hier bestehen sie zu ca. 50% aus Schwefel- und Stickoxiden sowie Staub und kommen aus der Verbrennung fossiler Rohstoffe, vorwiegend zur Erzeugung thermischer Energie zu Heiz- aber auch Transportzwecken. Der Anteil an prozeßbedingten atmosphärischen Emissionen liegt ebenfalls in der Größenordnung von 50% und stammt zu ca. 20% (Chlorwasserstoff, Chlor, Kohlenstoff) aus dem Schmelzprozeß.

Weitere ca. 30% bestehen aus Wasserstoff und Methan und stammen aus der Aufarbeitung der Salzschlacke. Dabei entstehen außerdem noch Schadstoffe, die in die Atmosphäre abgegeben werden, und zwar 0,01 kg NH_3 /t Al, 0,006 kg H_2S /t Al sowie 0,001 kg PH_3 /t Al, entsprechend 0,014 kg NH_3 , 0,008 kg H_2S und 0,004 kg PH_3 /t Salzschlacke.

4.3. WASSERVERBRAUCH

(nach: [Krüger, 1994])

Auch beim Wasserverbrauch ist die Sekundärerzeugung günstiger als die Primärerzeugung von Aluminium. Der Bedarf bei der Primärerzeugung beträgt 57 m^3 /t Al, enthält auch Kreislaufwasser, und entsteht zu ca. 73% bei der Bereitstellung der für die Elektrolyse notwendigen elektrischen Energie. Der Prozeßwasserverbrauch für die Herstellung von Primäraluminium selbst liegt unter 1 m^3 /t Al und damit in der gleichen Größenordnung wie der Verbrauch für die Sekundäraluminiumgesamterzeugung mit 1,6 m^3 /t Al.

Der überwiegende Teil dieser Prozeßwasserverluste (ca. 20%) entsteht bei der Salzschlackenaufarbeitung durch Austrag mit den Produkten Mischsalz und Oxidrückstand und kann durch Wasser aus der Brüdenkondensation gedeckt werden.

Für den Bereich der Schadstoffemissionen im Abwasser der Primärproduktion sind genauere Aussagen bisher kaum möglich. Nach den vorliegenden Informationen stammen derartige Verunreinigungen zum überwiegenden Teil aus Kraftwerken, die Strom aus der Verbrennung fossiler Energie erzeugen. Für die genauere Betrachtung wäre dann auch eine Berücksichtigung z.B. der Deponiesickerwässer erforderlich. Bei der Sekundäraluminiumerzeugung sind alle Vorstoffaufbereitungsverfahren, der Schmelzprozeß selbst sowie die Salzschlackenaufarbeitung abwasserfrei.

4.4. ENERGIEBEDARF

(nach: [Krüger, 1994])

Die Resultate der Energiebilanz der Primär- (Tabelle 4.1.) und Sekundäraluminiumgewinnung (Tabelle 4.2.) ergeben einen kumulierten Primärenergiebedarf der Aluminiumgewinnung aus Bauxit von 163.730 MJ/t unlegiertes Primäraluminium, wohingegen der der Sekundärerzeugung 19.505 MJ/t unlegiertes Sekundäraluminium und damit 11,9% davon beträgt. Der Hauptanteil der Energie entfällt bei der Primärerzeugung mit ca. 79% auf die Elektrolyse, gefolgt von ca. 17% für die Tonerdegewinnung.

Die Tabellen 4.1 und 4.2 geben den Energieverbrauch aus Sicht der Aluminiumherstellung wieder. Der Primärenergieverbrauch (E_{prim}) ist der direkte Einsatz fossiler Energieträger im Produktionsprozeß (z.B. Graphitelektroden, Heizöl, Erdgas). Bei der Berechnung des Gesamtprimärenergieverbrauchs (Gesamt E_{prim}) wird ein Verlust von 8,5% für

Bereitstellung, Transport und Umwandlung berücksichtigt (das ergibt einen Wirkungsgrad von 91,5%). Dieser Wert gilt in gleicher Weise für die Mitgliedsländer der ECE.

Im Gegensatz dazu unterscheidet sich der Wirkungsgrad der elektrischen Energie stark in den einzelnen Ländern. In der Studie von [Krone 1990] wird für Deutschland ein Wirkungsgrad von 32,2% zugrundegelegt. Auf österreichische Verhältnisse übertragen ergibt sich ein Wirkungsgrad von 68,5% [Brennstoffstatistik 1992, eigene Berechnungen], sodaß sich in Österreich ein geringerer Primärenergiebedarf ergibt.

Tabelle 4.1 : Einzelenergieinhalte und Gesamtenergiebedarf zur Erzeugung von 1 t Primäraluminium (Erklärung im Text)

Prozeßschritt	Menge (t)	E _{prim} (MJ)	E _{el} (MJ)	Gesamt E _{prim} (MJ)	Anteil am Gesamtbedarf (%)
Tonerdeherstellung	1,94	20.425,6	1.726,1	27.683,6	16,9
Schmelzflußelektrolyse	1,02	23.011,0	56.100,0	129.617,9	79,2
Schmelzereinigung	1,02	3,0	6,5	4.472,7*	2,7
Vergießen	1,00	1.790,0	-	1.956,3	1,2
Summe				163.730,5	100,0

* einschließlich 2% Schmelzverlust an Aluminium entsprechend 4 452,5 MJ

Bei der Sekundärproduktion entfallen ca. 47% auf den Einschmelzvorgang im Trommelofen sowie 11% auf die Schmelzereinigung und das Vergießen. Für die Schrottverarbeitung und Krätzeaufbereitung werden insgesamt ca. 18% der Energie benötigt - etwa eben soviel wie für die Salzschlackenaufarbeitung. Der Transportanteil ist, verursacht durch das dezentrale Aufkommen und die damit verbundenen Transporte, mit ca. 6% des Gesamtaufkommens relativ hoch. Der vergleichbare Wert für den Tonerdetransport bei der Primärerzeugung wird nicht berücksichtigt, da er sich mit weniger als 0,2% des Gesamtenergiebedarfs abschätzen läßt [Fecker 1989]. Absolut betrachtet liegen jedoch beide Werte mit ca. 1.000 MJ/t Aluminium in der gleichen Größenordnung.

Tabelle 4.2.: Einzelenergieinhalte und Gesamtenergiebedarf zur Erzeugung von 1 t Sekundär-aluminium (Erklärung im Text)

Verfahrensschritt				Deutschland		Österreich	
	Menge (kg)	E _{therm} (MJ)	E _{el} (MJ)	Gesamt E _{prim} (MJ)	Anteil am Gesamt- bedarf (%)	Gesamt E _{prim} (MJ)	Anteil am Gesamt- bedarf (%)
Transport	2.576	927,4	-	1.013,5	5,6	1.013,5	6,6
Schreddern	431	-	79,74	247,6	1,4	116,4	0,8
Magnetscheidung	765	-	1,66	5,2	-	2,4	-
Schwimm-Sink-Trennung	227	-	61,34	190,5	1,1	89,5	0,5
Abschwelen/Trocknen	396	1.116,7	21,38	1.286,8	7,1	1.251,6	8,1
Paketieren	71	-	6,89	21,4	0,1	10,1	0,1
Krätzeaufbereitung	292	-	20,03	62,2	0,3	29,2	0,2
Abschmelzen	163	1.369,2	-	1.496,4	8,3	1.496,4	9,6
Einschmelzen Salzbadofen	1.134	4.540,2	1 140,3	8.503,3	46,6	6.626,6	42,8
Salzschlackenaufbereitung	722	2.166,0	324,9	3.376,2	18,5	2.841,5	18,4
Schmelzereinigung/Gießen (Legieren)	1.000	1.801,0	15,0	2.014,9	11,1	1.990,2	12,9
Energiebedarf für die Herstellung von 1000 kg Sekundär-aluminium mit 6,6% Legierungsbestandteilen				18.218,0	100,0	15.467,4	100
Energiebedarf bezogen auf die Herstellung von 1000 kg unlegiertem Sekundär-aluminium				19.505,4		16.560,4	

Vergleichende Emissionsbilanz - Zusammenfassung

Die Sekundärproduktion von Aluminium verbraucht weniger Energie und Rohstoffe als die Primärproduktion.

Bei der Sekundärproduktion von Aluminium entstehen weniger Emissionen und fallen weniger Abfälle an als bei der Primärproduktion.

	feste Rückstände	atmosphärische Emissionen	Wasserverbrauch	Energiebedarf
Primäraluminium	3,7 t/t Al	204 kg/t Al	57 m³/t Al	164 MJ/t AL
Sekundäraluminium	0,1 t/t Al	12 kg/t Al	2 m³/t Al	20 MJ/t AL

5. **ENTSORGUNG DER RESTSTOFFE: STAND DER TECHNIK UND BETRIEBLICHE PRAXIS**

Die folgende Tabelle gibt die geschätzten Mengen von Reststoffen aus der Sekundäraluminiumproduktion in Deutschland und der EU wieder [Krone 1990, Krone 1994].

Tabelle 5.1.: Spezifischer Reststoffanfall [Krone 1990] und hochgerechnete Mengen fester Reststoffe aus der Sekundäraluminiumproduktion (k.A.: keine Angabe).

Reststoff	spez. Anfall in der BRD (kg/t Al)	Menge in der BRD (t/a)	Menge in Österreich (t/a)	Menge in der EU (t/a)	Verwertung/ Verwendung
Eisenmetalle (ohne Auto- recycling)	43	20-25.000	k.A.	40-60.000	Eisen- und Stahlindustrie
Nichteisenmetalle (ohne Autorecycling)	34	15-20.000	k.A.	40-60.000	Nichteisenmetall- industrie
Krätze (aus Primär- und Sekundär- produktion)	20	20-30.000	k.A.	60-90.000	Rückgewinnung
Krätzestaub und Krätze minderer Qualität	5	(10.000)	1.000 - 2.000	(30.000)	Rückgewinnung, Deponie
Salzschlacke	(600)	max.200.000	17.000	max.500.000	Rückgewinnung, Deponie
Oxidrückstand	(250)	max. 60.000	-	max 150.000	Deponie, Zwischenlager, Rückgewinnung
Flugstaub	30	15-20.000	1.000	45-60.000	Deponie, Zwischenlager, Rückgewinnung
nichtmetallisches Feinmaterial	35	10-15.000	k.A.	30-50.000	Deponie
Ofenausbruch	2	1-2.000	120	3-6.000	Deponie

Die ursprünglich geschätzten Mengen an Salzschlacke und Oxidrückständen [Krone 1990] mußten aus folgenden Gründen nach unten korrigiert werden [Boin 1994]:

- der spezifische Salzverbrauch (Datenbasis 1988) wurde zu hoch eingeschätzt,
- die Schrottmenge, die in Salztrommelöfen aufgeschmolzen werden mußte, war rückläufig, z.B. wegen verbesserter Aufbereitungstechniken,
- der spezifische Salzverbrauch ging zurück, z.B. durch Prozeßoptimierung (eingeleitet durch hohe Deponierungskosten und
- die Sekundäraluminiumproduktion ging etwas zurück bzw. stagnierte in den letzten Jahren wegen der wirtschaftlichen Entwicklung.

5.1. KRÄTZEENTSORGUNG

Die Krätze wird aufbereitet um den darin enthaltenen Metallgehalt, der bis zu 80% betragen kann, möglichst vollständig zurückzugewinnen. Dabei kann nach drei verschiedenen Verfahrensweisen vorgegangen werden [Moritz, 1991]:

- eine schnelle Krätzekühlung in Trommelkühlern, um den Abbrand des Metallgehaltes zu unterbinden, mit anschließender Aufmahlung und Gewinnung verschiedener Siebfraktionen,
- das Auspressen des Metalls mit einer hydraulischen Presse aus der heißen Krätze nach dem Compal-Verfahren [Pechiney, 1986] und
- eine zweistufige Aufarbeitung, wobei der erste Schritt im Ausrühren eines Großteils des Metalls aus der noch heißen Krätze besteht. Im zweiten Schritt wird die restliche Krätze schnell gekühlt und anschließend aufgemahlen.

Der Aluminiumgehalt der Produkte dieser Aufbereitungsverfahren verringert sich mit sinkender Korngröße.

Abb. 5.1. zeigt schematisch die Aufbereitung Aluminiumkrätze [Krone 1994]

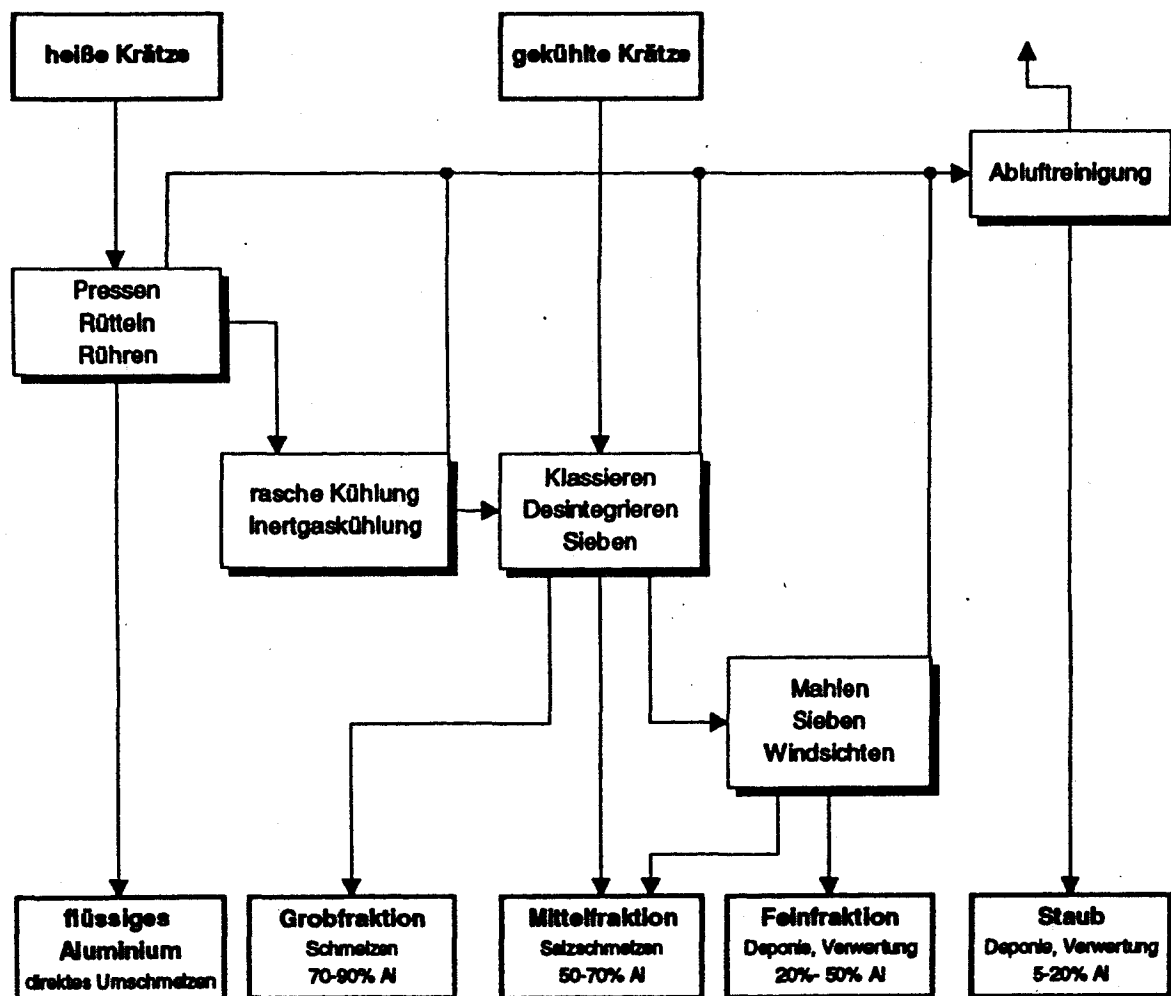


Abb.5.1.: Fließschema der Krätzeaufbereitung (verallgemeinert) [Krone 1994]

Üblicherweise besitzen Primärschmelzanlagen oder Hersteller von Halbzeug spezielle Ausrüstungen, um flüssiges Al direkt von der frisch abgezogenen heißen Krätze zu entfernen oder haben zumindest die Möglichkeit, Krätze schnell bzw. unter Luftabschluß zu kühlen (siehe Tabelle 5.2.). Oft sind diese Anlagen bereits mit Klassiereinrichtungen ausgerüstet. Stückiges Material und flüssiges Aluminium wird direkt im Herdofen oder im Gießereibetrieb wiederverwendet.

Die komplette Krätze kann auch im Plasma geschmolzen werden, um metallisches Aluminium wiederzugewinnen [Lavoie 1993]. Die Krätze aus diesem Prozeß enthält Nitride und ist problematisch zu handhaben. In Europa wird sich dieser Prozeß - der in Kanada von ALCAN angewandt wird - wegen der hohen Stromkosten nicht durchsetzen.

Tabelle 5.2.: Betriebsergebnisse von Heißkrätzeaufbereitungsanlagen

Name	Remetal	Wagner-Biro	Ajax	Sumitomo-Pontzen	Pechiney
Prinzip	Kühlen	Kühlen	Metallabtrennung durch Schütteln und Kühlen	Metallabtrennung durch Rühren und Kühlen	Metallabtrennung durch Auspressen
fl. Aluminium	4-7%	4-7%	25%	30%	50%
Größe	18% > 30mm mit 60% Al	28% > 4mm mit 69% Al	13% mit 63% Al	70% mit 33% Al	-
Feinfraktion	60% < 30 mm mit 55% Al	32% 1-5mm mit 65% Al	46% mit 55% Al	-	-
Staub (Filterkuchen)	220 kg/t Krätze mit 6% Al	400 kg/t Krätze mit 24% Al	160 kg/t Krätze mit 12% Al	-	500 kg Filterkuchen/t Krätze mit 20-30% Al
Metallausbeute	44%	40%	58%	53%	50%

Die Krätzeaufbereitungsanlagen von Sekundärschmelzen sind einfacher aufgebaut. Meistens werden Kugelmøhlen mit Sieben oder Hammermøhlen mit integriertem Windsichter verwendet. Die Krätze wird gemahlen, wobei der mineralische Anteil als Staub abgetrennt wird. Das konzentrierte Produkt (Aluminium) wird im Betrieb selbst wieder eingeschmolzen. Die Krätzestäube und andere Stäube (Korngröße < 0,4mm), die aus dem Abgas mittels Schlauchfilter abgeschieden werden, können als exotherme Pulver an die Stahlindustrie verkauft werden [Krone 1994].

Die nach dem Aufmahlen gewonnene Grobfraktion wird als Größe bezeichnet und enthält etwa 70% Al-Metall. Sie wird als Rohstoff in der Sekundär-Aluminiumproduktion eingesetzt. Die Feinfraktion (Krätzestaub) kann bei der Salzschlackenaufbereitung eingesetzt werden (BUS, 1989; Alfaro, 1986). Allerdings ist der NaCl/KCl-Gehalt sehr gering (<5%), sodaß der Salzschlackenaufbereitungsprozeß belastet wird.

Eine weitere Methode zur Krätzeaufarbeitung, die den Metallgehalt mittels einer Zentrifuge abtrennt [Focon, 1993], verspricht zwar hohe Ausbeuten, wird aber aufgrund der schwierigen Handhabung - Entfernung des erstarrten Aluminiumrings aus der Zentrifuge - bisher großtechnisch nicht eingesetzt.

5.2. SALZSCHLACKENENTSORGUNG

Die Aufbereitung von Salzschlacke ist heute bereits Stand der Technik und erfolgt im allgemeinen nach dem Löse-Kristallisationsverfahren (BUS-Verfahren). Dieses Verfahren umfaßt fünf Prozeßschritte:

1. Mechanische Zerkleinerung, Sieben und trockene Al-Abscheidung: das in der Schlacke enthaltene Aluminium wird aufgrund seiner Duktilität während des Mahl- und Brechvorgangs zu dünnen Scheiben ausgewalzt, wohingegen die Schlacke fein zermahlen wird (Bahr, 1980). Dadurch läßt sich das Aluminium durch einfaches Sieben abtrennen. Mit eingesetzt wird auch Krätzestaub.
2. Verlösen, Entgasen, Herstellung einer Fest/Flüssig-Suspension
3. Abscheiden der im Löseprozeß entstehenden Schadgase
4. Eindicken, Filtration des unlöslichen Anteiles, Gewinnung des tonerdehaltigen Rückstandes
5. Kristallisieren, Zentrifugieren, Gewinnung des Recyclingsalzes

Die Gesamtemissionen des Prozesses können durch folgende Maßnahmen auf ein Minimum reduziert werden:

- Durch einen geschlossenen Wasserkreislauf wird der Anfall von Abwässern vermieden; Feuchtigkeitsverluste ergeben sich nur durch die ausgetragene Restfeuchte des Tonerderückstandes, des Wasserdampfgehaltes der Abluft und des produzierten Schmelzsatzes.
- Um Staubentwicklungen zu vermeiden wird der Zerkleinerungs- und Siebteil der Anlage unter Unterdruck gesetzt und die abgesaugten Luftmengen mit Hilfe von leistungsfähigen Schlauchfiltern gereinigt.
- Beim Lösen der Schlacke entsteht durch Reaktion der in der Schlacke enthaltenen Carbide, Nitride, Sulfide, Phosphide und des restlichen metallischen Aluminiums mit H_2O ein entzündliches Schadgas ($\sim 15 \text{ m}^3/\text{t Al}$), das nach Verdünnung mit Luft unter die Explosionsgrenze einer zweistufigen Abgasreinigung zugeführt wird. Die erste Stufe besteht aus einem zweistufigen Naßwäscher, in der zweiten Stufe werden Restschadstoffe an einem Aktivkohlefilter adsorbiert.

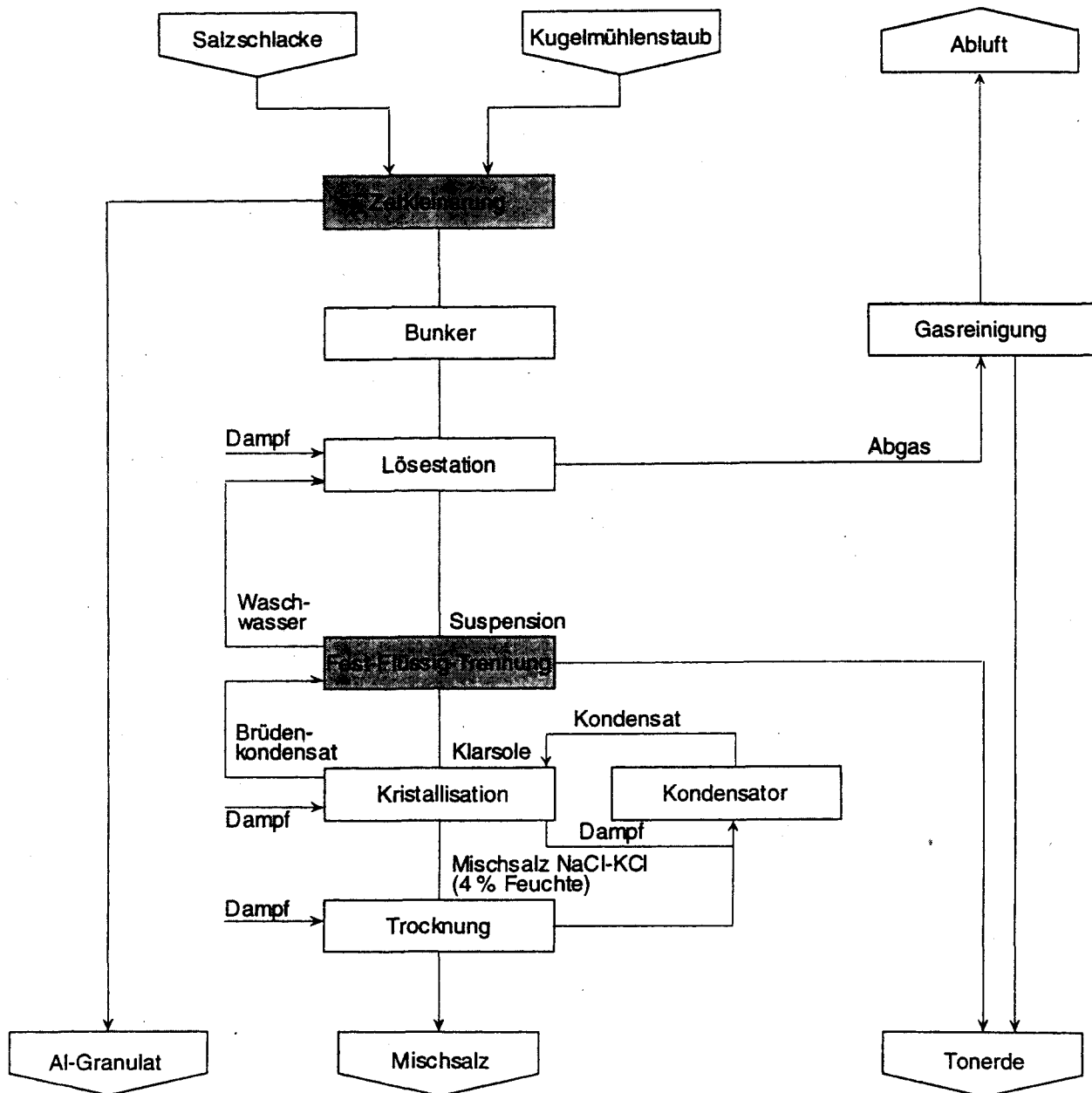


Abb. 5.2.: Verfahrensschema des Löse/Kristallisationsverfahrens [Beckmann, 1991].

Bei den in der BRD befindlichen Anlagen werden laut Betreiberangaben die in der TA-Luft geforderten Emissionswerte deutlich unterschritten [BUS, 1992].

Schallemissionen werden durch eine Kapselung des Zerkleinerungs- und Siebteiles begrenzt.

Mit diesem Prozeß können die bei der Sekundär-Aluminiumproduktion anfallenden Salzschlacken sowie Krätzestäube, die bei der Aufbereitung von Krätzen aus dem Bereich Refination und Gießerei der Aluminiumproduktion anfallen, verwertet werden. Hinsichtlich der Zusammensetzung ergeben sich keine Beschränkungen.

Bei diesem Verfahren fallen folgende Produkte an:

- **Al-Granulat:** wird im Drehtrommelofen eingesetzt
- **Mischsalz:** wird im Drehtrommelofen eingesetzt
- **Tonerderückstand:** Einsatz als Al_2O_3 -Träger in der Zementindustrie [BUS, 1994]
- **Ammonsulfat** aus der Naßreinigung: wird in Düngemittelproduktion eingesetzt
- **beladene Aktivkohle** der Adsorber: wird zur Aufarbeitung an die Hersteller zurückgegeben (BUS-Verfahren, Angaben: Krone, 1990)

Die gewonnenen Mengen der Wertstoffe Al-Granulat, Mischsalz und Tonerderückstand hängen von der Zusammensetzung der eingesetzten Schlacken ab (siehe Tabelle IV und 3.11).

5.2.1. Verarbeitung von Salzschlacke bei Raffineria Metalli Capri

Ein ähnliches Verfahren zur Schlackenaufbereitung wurde von der Raffineria Metalli Capri (I) und der Mannesmann Anlagenbau publiziert. Im Gegensatz zum bereits beschriebenen BUS-Verfahren erfolgt hier die Laugung nahe dem Siedepunkt in einer Lösekaskade; es entstehen drei Schadgasströme (aufgrund der unterschiedlichen Reaktionsgeschwindigkeiten), die separat einer Abluftverbrennung zugeführt werden. Zur vollständigen Entgasung wird die Lösung alkalisiert und der restliche Ammoniak durch Strippen ausgetrieben. Weitere Unterschiede sind die hier eingesetzte einstufige Eindampfanlage und die Pelletierung der Salzkristalle nach der Trocknung [Wöhlk, 1987]. Nähere Informationen darüber, in welchem Stadium der Entwicklung sich dieses Projekt befindet, sind zur Zeit nicht bekannt. Ebenso ist unbekannt, ob die in Italien angeblich vorhandenen Anlagen tatsächlich und erfolgreich betrieben werden.

5.2.2. Verarbeitung von Salzschlacke in Cleveland

Die Anlage des amerikanischen Betriebes ist für die Aufarbeitung von Krätzen, die auch einen gewissen Salzgehalt aufweisen, konzipiert. Dadurch besteht auch prinzipiell die Möglichkeit, Salzschlacken im Prozeß zu verarbeiten.

Das Verfahren umfaßt eine Mahlung des Einsatzes mit anschließender Klassierung. Die so gewonnenen Fraktionen werden zur Entfernung des löslichen Anteiles mit Wasser gelaugt und mittels Klassierung weiter aufgetrennt. Durch Kristallisation wird der Salzgehalt der Lauge zurückgewonnen. Durch die wiederholte Klassierung erfolgt eine Auftrennung in eine Grobfraction, die im Schmelzofen zur Rückgewinnung des metallischen Aluminiums eingesetzt wird, in eine Al-hältige Feinfraktion, die in der Stahlindustrie Anwendung findet, sowie einen tonerdehaltigen Rückstand, der laut Angaben des Betriebes in der Schleifmittel-Produktion eingesetzt wird.

Das bei der Laugung mit Wasser auftretende Problem der Gasentwicklung wird durch Regelung des pH-Wertes im Bereich von 5-8 mittels Zugabe von MgCl_2 -haltiger Lauge aus der Kristallisation vermieden [Yerushalmi, 1992].

5.2.3. Verarbeitung der Salzschlacke bei der Fa. Aluscan in Norwegen

Die Anlage ist auf dem Gelände eines ehemaligen Magnetit-Bergwerkes in der Gemeinde Nesset des Bezirkes Møre og Romsdal an der Westküste Norwegens gelegen. Sie besteht im wesentlichen aus einer Anlegestelle, den Produktionshallen, der ehemaligen Mine und einer am Berghang gelegenen Deponie.

Das nachstehend abgebildete aktualisierte Fließschema zeigt die Verfahrensschritte des Produktionsprozesses und die geplanten Erweiterungen der Anlage hinsichtlich der zukünftigen Gewinnung von Aluminiumoxid bzw. Aluminiumhydroxid (Abb.5.2.).

Die Anlage ist für die Verarbeitung von 100.000 t/a Salzschlacke ausgelegt und zugelassen, wobei die tatsächlich verarbeiteten Mengen bei 40.000 t (1990) bzw. 73.000 t (1991) lagen [SFT, 1989/1]. Die behördliche Zulassung erstreckt sich jedoch nicht auf Krätze, Kugelmühlen- und Filterstaub [SFT, 1989/2].

Die Salzschlacke wird per Schiff von den einzelnen Kunden angeliefert und mit Loren in das überdachte Lager in der Produktionshalle verbracht (Fassungsvermögen ca. 10.000 t). Die Lieferungen werden nicht getrennt zwischengelagert, so daß eine nachträgliche kunden-spezifische Zuordnung einzelner Chargen nicht möglich ist.

Die Eingangskontrolle der Salzschlacke findet, einer Vorschrift der zuständigen norwegischen Behörde entsprechend, vor der Verschiffung (in Analogie zum "Prior informed consent" (PIC)-Verfahren der Londoner Leitlinien; UNEP 1989) nach folgendem Verfahren statt:

1. Probenahme durch den Lieferanten am Entstehungsort,
2. Analyse der vorgeschriebenen Parameter durch ein unabhängiges Institut,
3. Übermittlung des Analysenzertifikates an den Auftraggeber und in der Folge an ALUSCAN und an die zuständige norwegische Behörde (SFT),
4. Verladung beim Lieferanten nach Zustimmung von SFT [SFT 1992].

Die gemäß Behördenvorschrift zu analysierenden Parameter sind ausschließlich organischer Natur (Hexa- und Pentachlorbenzol, Octachlorstyrol, Decachlorbiphenyl), wobei eine 'Indikatorfunktion' für PCDD/F angenommen wird. Das Verfahren erscheint aus einem pragmatischen Blickwinkel als geeignet, Hinweise auf eventuelle PCDD/F-Kontaminationen zu erhalten. Allerdings muß zuvor die Eignung der genannten 'Indikatoren' anhand von Salzschlackenanalysen bestätigt werden. Grenzwerte wurden seitens SFT nicht bekanntgegeben, ebenso wenig wie Richtwerte, ab denen die vorgeschriebene PCDD/F-Bestimmung durchzuführen ist.

Die Verarbeitung der Salzschlacke erfolgt mittels Backen- und Rotationsbrechern, deren Abluft mit der abgesaugten Luft aus dem Bereich der verbindenden Förderbänder einem einstufigen Wäscher (Wasser) zugeführt wird. In der Folge wird das Material in Rotationsmühlen mit Wasser gemahlen und das metallische Aluminium abgeseibt. Die Abluft dieses Verfahrensschrittes wird ohne Reinigung abgeleitet. Die salzhaltige Wassersuspension wird gemeinsam mit dem Abwasser des Wäschers in die Mine gepumpt. Die Aluminiumfraktion wird getrocknet und mechanisch/magnetisch aufbereitet (Abb.5.3.).

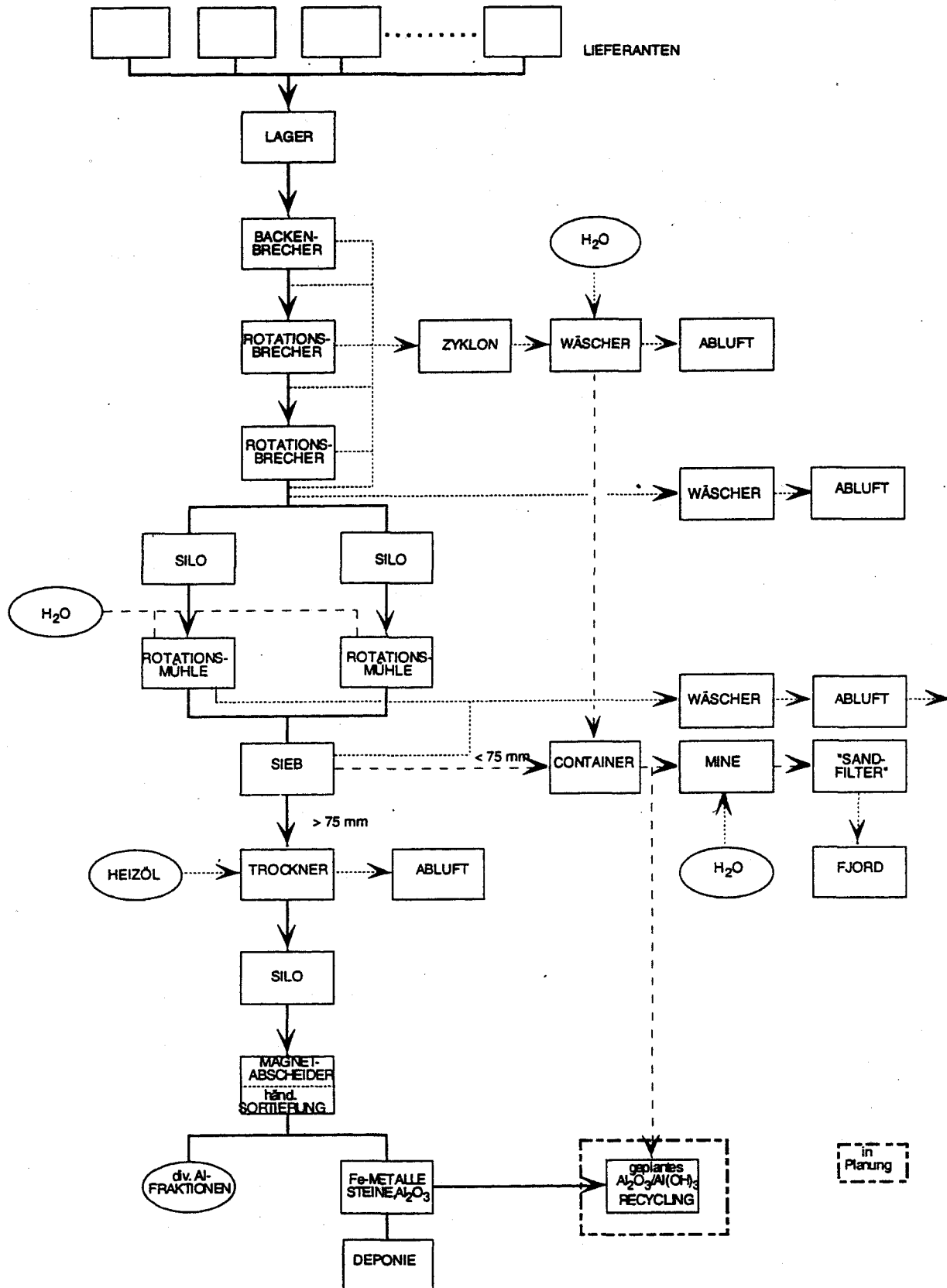


Abb. 5.3.: Fließschema der Salzschlackenverarbeitung der Fa. Aluscan

Nach Beanstandung der Geruchsemissionen im Bereich der Rotationsmühlen und der Filteranlage (Gasentwicklung bei Kontakt der Schlacke mit Wasser) wurde eine Nachrüstung und Optimierung der Absaugung durchgeführt, so daß die Abgase nunmehr einem Wäscher zugeführt werden.

Im Jahr 1992 wurde ein Meßprogramm der gasförmigen Emissionen durchgeführt. Die Beprobungen erfolgten im Abgas der Mühlen und nach den beiden Wäschern. Bei dem Parameter Phosphorwasserstoff (PH_3 , Klasse I der dampf- oder gasförmigen anorganischen Stoffe, TA-Luft '86) ergaben sich bei allen Meßstellen und allen Stichproben deutliche Überschreitungen des Grenzwertes von $1,0 \text{ mg/Nm}^3$. Im ungereinigten Abgas nach den Mühlen war die Überschreitung mit $18,4 \text{ mg/Nm}^3$ am höchsten (NILU). In der Folge wurde seitens der Fa. Aluscan eine Kooperation mit SINTEF, der TU Trondheim und NILU eingegangen, die in einer Neugestaltung der Abluftreinigung mündete [ALUSCAN, 1993/1 ALUSCAN 1993/2]. Nach neuesten Messungen konnten die Emissionskonzentrationen an Phosphorwasserstoff (PH_3) deutlich verringert werden und liegen nunmehr im Bereich des Grenzwertes der TA-Luft von $1,0 \text{ mg/Nm}^3$ [NILU, 1993].

Die von der Al-Fraktion abgetrennte Feststofffraktion besteht aus kleinen Salzkümmen, Steinen, Blechen und Armierungseisen und wird in einer Jahresmenge von ca. 300 t auf eine nahegelegene, genehmigte Deponie geführt [SFT, 1991/DKN, 1991].

Die Deponie ist ein vertikaler Schacht (Z-malm), dessen Verbindungen mit der Mine (D-malm) verbetoniert wurden. Die Sickerwässer werden über mehrere hundert Meter durch den mit Sturzmaterial gefüllten Grubenschacht, die Moränenmasse und den Abgangssand in den Fjord gedrückt (Stokke Industri AS, 1991). Negative Auswirkungen auf die Umwelt werden aufgrund der geringen Schwermetallgehalte im Wasserauszug und der beträchtlichen Verdünnung seitens der Behörden ausgeschlossen [SINTEF, 1991/1 und 2].

Das abgepumpte Prozeßwasser verbreitet sich im Minenkörper und erreicht nach unbestimmter Zeit einen dem Fjord vorgeschalteten 'Sandfilter'. Dieser besteht aus einem mit Abraummaterial gefüllten ehemaligen Magazin, dessen Wirkungsgrad nicht bekannt ist. Da über das effektive Volumen der Mine, der vom Prozeßwasser im Schnitt zurückgelegten Wegstrecke, der mittleren Strömungsgeschwindigkeit und der Verweilzeit keine Angaben gemacht werden können, erscheint die Berechnung einer realistischen Bilanz als unmöglich. Das Prozeßwasser erfährt eine Sedimentation suspendierter Feststoffpartikel - inklusive adsorbierter Schadstoffe - und eine starke Verdünnung mit Süßwasser. Die ermittelten Konzentrationen im Prozeß- und Abwasser erlauben keinen direkten Bezug, da es sich um unkoordinierte Stichproben ohne Anspruch auf Repräsentativität handelt. Die angegebenen Konzentrationen im Abwasser nach 'Sandfilter' liegen unter den Grenzwerten der Wiener Kanalgrenzwertverordnung 1989. Die Schwellen-, Grenz- oder Richtwerte für Grund- und Trinkwasser werden mit Ausnahme von Nickel und z.T. Mangan, Eisen und PAK unterschritten (GSwV 1991; Lebensmittelbuch, 1989).

Einige u.U. aussagekräftige Parameter wie Natrium, Kalium und Chlorid wurden jedoch nicht ermittelt. Emissionen von polychlorierten Dibenzodioxinen und polychlorierten Dibenzofuranen (PCDD/F) sind in Anbetracht der geringen Gehalte in der Salzschlacke und der anzunehmenden Sedimentation in der Mine nicht zu erwarten, wie durch eine Bestimmung in Muscheln aus dem Mündungsbereich bestätigt werden konnte.

Eine betriebsinterne Produktionskontrolle erfolgt gemäß den Auflagen der Behörde [SFT, 1992] durch die tägliche Entnahme von 12 Stichproben vor den Mühlen, die zu wöchentlichen Durchschnittsproben vereint auf Schwermetalle und PCDD/F analysiert werden sollen. Die Anzahl der erforderlichen Proben wird derzeit aufgrund von Kapazitätsengpässen der beteiligten Institute von der Behörde überprüft [NILU, 1991].

Gegenüber dem mitteleuropäischen Stand der Technik müssen beim Verfahren der Fa. Aluscan, wie es sich gegenwärtig darstellt, hinsichtlich der Rückgewinnung von Mischsalz Abstriche gemacht werden. Ein Recycling von Mischsalz wird nicht durchgeführt und ist auch für die Zukunft nicht geplant (Hamit 1992; Aluscan 1992/1). Vielmehr wird die Salzsole in die Mine gepumpt und die löslichen Anteile nach beträchtlicher Verdünnung emittiert.

Eine Recyclinganlage für Tonerde befindet sich im Rahmen eines verbindlichen Vertrages zwischen Aluscan und dem Hersteller seit 1991 im Planungsstadium. Der Baubeginn ist für den Herbst 1993 vorgesehen. Seitens UV&P angefragte Detailinformationen über den Aufarbeitungsprozeß und Referenzanlagen wurden mit der Begründung verweigert, daß eine Geheimhaltung zur Wahrung von 'kommerziellen Vorteilen' erforderlich sei (ALUSCAN, 1992/2). Eine Beurteilung des beabsichtigten Verwertungsverfahrens ist somit aufgrund der zur Verfügung gestellten Unterlagen derzeit nicht möglich.

5.2.4. Verarbeitung von Salzschlacke bei der Firma K+S (Kali und Salz)

Die Anlage der Fa K+S befindet sich derzeit im Planungsstadium. Mit diesem Verfahren sollen 90.000 t/a Salzschlacke verarbeitet werden, wobei die Schlacke als Rohstoffersatz für das Kaliwerk dient und nur KCl gewonnen wird. Das Verfahren umfaßt vier Prozeßschritte (Abb. 5.3) und arbeitet abwasserfrei, die vorgeschriebenen Emissionsgrenzwerte der TA-Luft sollen laut Angaben der Betreiber eingehalten werden [Kali und Salz AG, 1993]:

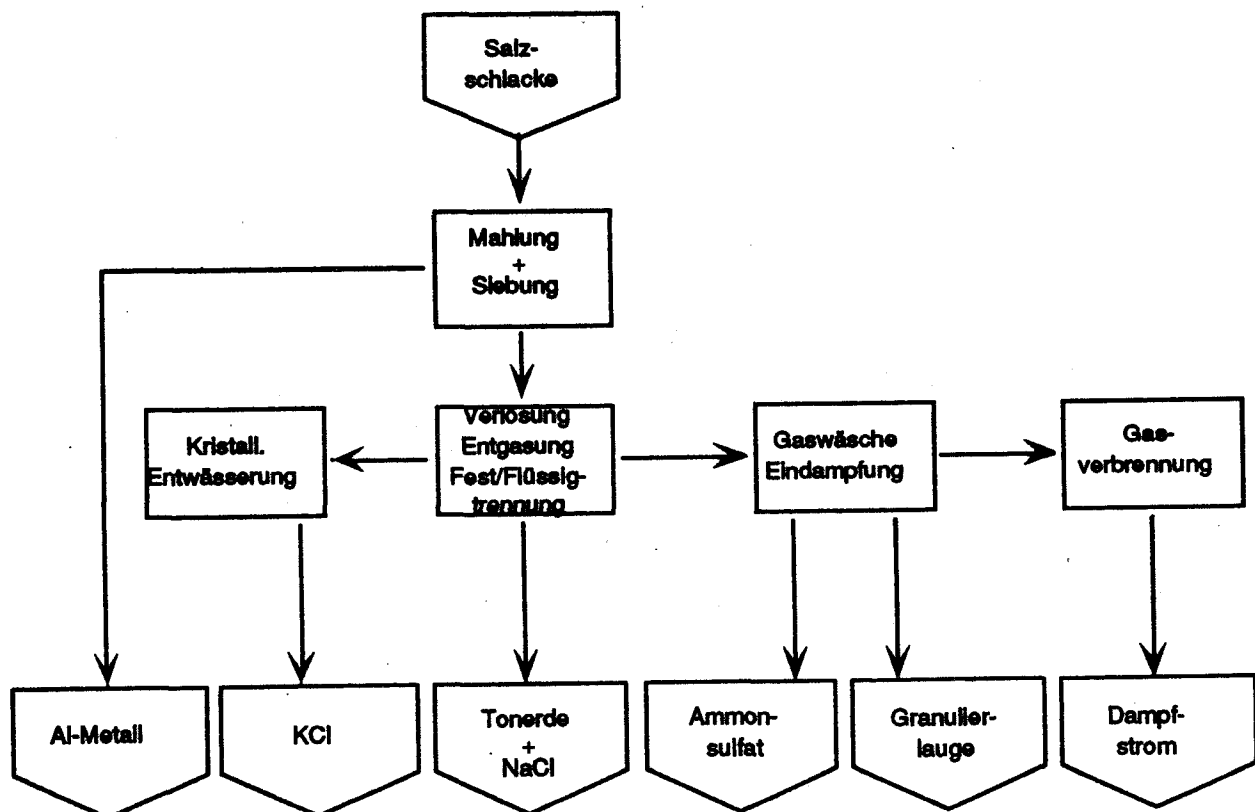


Abb. 5.4.: Fließschema des K+S-Verfahrens

1. **Mahlung und Siebung:** Die angelieferte Salzschlacke wird in geschlossenen Hallen entladen und per Schaufellader einem Mühlensystem zur Aufmahlung auf eine Kornfeinheit von bis zu 0,6 mm zugeführt. In einem den Mühlen nachgeschaltetem Siebsystem wird das enthaltene restliche Aluminium, das bis zu 80% in Korngrößen > 1 mm anfällt, ausgesiebt und einer Wiederverwertung zugeführt.
2. **Verlösung:** Die feineren restlichen Schlackenteile werden einer Heißverlösung in einer NaCl gesättigten und in der Hitze an KCl untersättigten umlaufenden Lösung zugeführt, wobei die in der Schlacke enthaltenen KCl-Anteile vollkommen in Lösung gehen und diese an KCl sättigen. Die Suspension wird einer Filteranlage zugeführt, die die unlöslichen Bestandteile von der an KCl/NaCl gesättigten Lösung trennt und den Filterkuchen weitestgehend entfeuchtet. Die heiße Lösung wird einer Kristallisation zugeführt. Die im Heißlöseprozeß anfallenden Gase H_2 , CH_4 , NH_3 , H_2S , PH_3 werden der vierstufigen Gaswäsche zugeführt.
3. **Kristallisation:** In dieser Stufe wird durch Abkühlung unter Vakuum das in Lösung befindliche KCl rekristallisiert, während das NaCl aufgrund seiner gegenüber dem KCl andersartigen Löslichkeitskennlinie in Lösung verbleibt. Die NaCl-gesättigte Mutterlauge geht erneut zum Löseprozeß, während das gewonnene kristalline KCl nach einer Voreindickung von der Lösung abzentrifugiert und zur weiteren gemeinsamen Verarbeitung der KCl-Fabrikation des Werkes zugeführt wird.
4. **Gasbehandlung:** Die bei der Verlösung anfallenden Gase werden in einer vierstufigen Absorptionsanlage in neutrale feste oder flüssige Stoffe umgewandelt. Unter Einsatz von Zusatz-Chemikalien und einer Eindampfung entsteht in der ersten Stufe Ammonsulfat. In den Stufen 2-4 werden die Gase PH_3 und H_2S zu neutralen Salzen, wie Na_3PO_4 und Na_2SO_4 , umgewandelt. Die anfallenden Gase H_2 und CH_4 werden im Kraftwerk des Werkes zur Dampf- und Stromerzeugung eingesetzt.

Bei diesem Verfahren fallen Al-Metall, KCl, Tonerde mit NaCl, Ammonsulfat und eine Phosphat- und Sulfathältige Lauge an. Das Al-Metall wird nach Angaben der Firma wiederverwertet, das KCl im eigenen Betrieb weiterverarbeitet. Die mit NaCl vermischte Tonerde wird zur Abdeckung der Salzhalde des Betriebes eingesetzt. Das NaCl wird durch Niederschläge ausgewaschen und die verbleibende Tonerde begrünt. Das Ammonsulfat kann als Düngemittel und die anfallende Lauge als Granulierhilfsmittel in der Düngemittelproduktion eingesetzt werden.

Eine Gegenüberstellung der Verfahren (Tab. 5.3.) führt vor Augen, daß eine Aufarbeitung der Salzschlacke wie sie bei der K+S durchgeführt werden soll, nur für den speziellen Fall des Kaliwerks, für das die bergrechtlichen Bestimmungen gelten, in Betracht kommt. Die Deponierung der mit NaCl vermengten Tonerde ist aufgrund der hohen zu erwartenden Salzfrachten im Sickerwasser nach den österreichischen Anforderungen an das Eluationsverhalten fragwürdig (ÖNORM S 2072, Stand 1.11.1990).

Tab. 5.3.: Vergleich der Verfahren zur Salzschlackenbehandlung

	BUS	Aluscan	K+S
Al-Rückgewinnung	ja	ja	ja
Lösen	NaCl/KCl	NaCl/KCl	KCl
Kristallisieren	NaCl/KCl	nicht vorgesehen	KCl
Entgasen der Schlacke	99%(1)	sehr unvollständig	99%(1)
Abgasreinigung	totale Erfassung	teilweise Erfassung	totale Erfassung
Rückstände:			
- Prozeß	Tonerde	Tonerde/Salzwasser	Tonerde/NaCl
- Abgasreinigung	Aktivkohle	Abwasser	1. Ammonsulfat 2. Waschlösung
Verarbeitung von Kugelmühlengstaub	möglich	nicht möglich	möglich
Energieverbrauch (thermisch)	100%	0%	< 40%(2)
Emissionen:			
- Luft	Grenzwert < TA Luft	Grenzwert ~TA Luft	Grenzwert < TA Luft
- Abwasser	abwasserfrei	nicht abwasserfrei (Ableitung in Fjord)	abwasserfrei
Abfallentsorgung	1. Aktivkohle zum Hersteller 2. Tonerde: Zementwerke	Tonerde in Bergwerk	Tonerde + NaCl auf Halde Sulfat- und Phosphatlauge in Düngemittelproduktion (?)

Anmerkungen:

- (1) Eine Entgasung über 99% ist wegen der langsamen AlN-Zersetzung in der Praxis nicht erreichbar
- (2) Vergleich, wobei Energieverbrauch des BUS-Verfahrens als Vergleichsbasis angenommen wurde. Der geringere Energieverbrauch ergibt sich durch die fehlende Trocknung des Rückstandes (Tonerde und NaCl).

5.2.5. Weitere Entsorgungswege

Weiters finden in Europa Exporte von Salzschlacke nach Portugal, Fa. Metallimex, und nach Großbritannien statt [Metallwerke Refonda, 1991]. Nach dem derzeitigen Stand der Recherchen ist es zweifelhaft, daß bei diesen Firmen eine Entsorgung entsprechend dem Stand der Technik erfolgt. Inoffiziellen Informationen zufolge wird in GB die Schlacke bei Ebbe an den Meeresstrand gebracht und nach dem Auswaschen durch die Flut die verbliebenen Al-Stücke aufgesammelt ("nugget picking"). Nach dem letzten offiziellen Informationsstand müssen die nach Portugal exportierten Salzschlacken vom Ursprungsland (CH) zurückgenommen werden.

5.3. ENTSORGUNG VON FILTERSTAUB

Derzeit wird der Filterstaub üblicherweise noch deponiert, wobei diese Vorgangsweise aufgrund der eluierbaren Komponenten, sowie der anorganischen und organischen Schadstoffe (PCDD/F) nicht den Umweltanforderungen bzw. dem Stand der Technik entspricht.

Eine Verwertung von Filterstaub wird beispielsweise von der Fa. Ryder Point (GB) bei der Produktion von Entschwefelungsmitteln für die Stahlindustrie praktiziert. Dem Entschwefelungsmittel "Desulpherlin" auf Basis $\text{CaO-CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ wird ein gewisser Prozentsatz Filterstaub (5-15%) zugesetzt. Beim Einblasen des Pulvers in die Stahlschmelze, das über eine feuerfeste, in die Schmelze eintauchende Lanze erfolgt, werden die Pulverteilchen aufgeschmolzen und alle Verbindungen zerlegt. Dabei entstehender Kohlen- und Wasserstoff (aus organischen Verunreinigungen) geht quantitativ in die Schmelze über, ebenso wie eventuell enthaltene Schwermetalle. Das aus im Filterstaub enthaltenen Chloriden entstehende Chlor reagiert mit Eisen zu den bei diesen Temperaturen gasförmigen FeCl_3 , das die Schmelze verläßt und im Abgas der Pfanne zu finden ist. Gemäß einem vorliegenden Gutachten ist die

"Sekundär-Dioxinbildung durch de-novo Synthese im Gas, das die Pfanne verläßt, nicht zu erwarten. Im Argon (Anmerkung: Das Trägergas für das Entschwefelungsmittel), das Metallchloriddämpfe mit austrägt, fehlen dazu sowohl der Kohlenstoff als auch Sauerstoff und außerdem erfolgt bei den relativ geringen Gasmengen die Abkühlung sehr schnell, wobei insbesondere die Verweilzeit um 300°C nur in der Größenordnung von einigen Sekunden ist."

(Zitiert nach [Hiebler, 1992]).

Inwieweit das mit Chloriden befrachtete Abgas der Pfanne einer Rauchgasreinigung in den Stahlwerken zugeführt wird und das Verfahren somit auch in dieser Hinsicht dem Stand der Technik bezüglich der Emission von Luftverunreinigungen entspricht, ist nicht bekannt.

Beschränkungen hinsichtlich der Zusammensetzung des Filterstaubes aus der Sekundär-Aluminiumproduktion sind nicht bekannt.

5.4. ENTSORGUNG VON OFENAUSBRUCH

Der Ofenausbruch aus der Elektrolyse wurde in der Vergangenheit zumeist auf Bauschuttdeponien abgelagert. Aufgrund aktueller Richtlinien ist eine Deponierung in Österreich nur mehr nach der Entfernung der wasserlöslichen bzw. toxischen CN- und F-Gehalte auf Kompartimentdeponien (siehe Deponierichtlinien, 1990) zulässig.

Ein kommerziell angewandtes Verfahren zur Aufarbeitung ist die Laugung mit heißer NaOH zur Erzeugung von Kryolith. Der Ofenabraum, der Kohlenstoff, 30-40% Kryolith, 30-40% Tonerde und NaF enthält wird mit heißer NaOH behandelt, wobei Kryolith und andere F-hältige Bestandteile in Lösung gehen. Der unlösliche Rückstand wird mit Flußsäure gelaugt, wobei überwiegend Tonerde in Lösung geht. Durch die Vereinigung der beiden Lösungen wird Kryolith ausgefällt.

Mit diesem Verfahren kann jedoch nur etwa die Hälfte des Fluors zurückgewonnen werden, weiters fallen auch hier wieder Rückstände an (Kohlenstoff, Ablauge), womit das Entsorgungsproblem bestehen bleibt.

Weitere Technologien zur Entsorgung von Ofenausbruch, wie beispielsweise die Pyrohydrolyse oder der Einsatz als Brennstoff sind in Entwicklung, derzeit aber noch nicht über das Stadium einer Pilotanlage gelangt [Pawlek, 1986; Blanco, 1991].

Der aus der Sekundär-Aluminiumherstellung und aus Gießereien stammende Ofenausbruch wird heute ebenfalls zumeist noch deponiert. Der Einsatz von Ofenausbruch zur Herstellung von Ofenspritzmassen ist grundsätzlich möglich, detaillierte Angaben stehen aber im Moment noch nicht zur Verfügung.

5.5. ALLGEMEINE ÜBERLEGUNGEN ZUR VERMEIDUNG VON RESTSTOFFEN AUS DER ALUMINIUMPRODUKTION

Aufgrund der komplexen Zusammenhänge bei Herstellung und Recycling von Primäraluminium sowie bei verschiedenen Methoden der Rauchgasreinigung entsprechend den geltenden Luftreinhalte Kriterien können nur qualitative Vermeidungspotentiale angegeben werden.

Die in Deutschland erarbeitete "Musterverwaltungsvorschrift des LAI zur Vermeidung und Verwertung von Reststoffen nach § 5 Abs. 1 Nr. 3 BImSchG" (Stand 1992) für Schmelzanlagen für Nichteisenmetalle enthält zwar Angaben über Minderungsmöglichkeiten, gibt aber keine Gesamtminderungsraten an.

Im folgenden sollen einige prinzipielle Zusammenhänge erläutert werden.

Krätzen sind prozeßbedingte Reststoffe, sowohl aus der Primär- als auch aus der Sekundäraluminiumproduktion. Die anfallende Menge hängt auch von dem Grad der Verunreinigungen im Schmelzgut ab, ist jedoch hauptsächlich dadurch bedingt, daß die Oberfläche des Aluminiums teilweise oxidiert. Die anfallende Krätzemenge ist bei der Primär- und Sekundärproduktion in derselben Größenordnung.

Filterstäube bzw. Schlämme aus der Rauchgasreinigung entstehen ebenfalls bei Primär- und Sekundärproduktion in ähnlichen Mengen. Hier gibt es aus Gründen der Luftreinhaltung praktisch kein Vermeidungspotential. Es ist sogar aufgrund der strengeren Emissionsbeschränkungen in Zukunft mit einem vermehrten Aufkommen von Filterstäuben und Rauchgasreinigungsschlamm zu rechnen. Insbesondere wird sich die Zusammensetzung durch die gebotene Erfassung von Feinstaub ändern (die Dioxin-Gehalte werden höher, ebenso die Gehalte an Schwermetallen).

Ofenausbruch ist prozeßbedingt und daher nicht vermeidbar. Jedoch unterscheidet sich die anfallende Menge an Ofenausbruch beträchtlich bei der Primärerzeugung (30 kg/t Al) und der Sekundärerzeugung (2 kg/t Al).

Eine Verlagerung der Aluminiumproduktion von der Primärproduktion zur Sekundärproduktion (sofern dies aufgrund der geforderten Produktqualität möglich ist) kann zur Vermeidung von Ofenausbruch führen. Ebenso wird weniger Rotschlamm anfallen.

Der typische Reststoff aus der Sekundäraluminiumproduktion ist Salzschlacke. Abdecksalz dient bei der Sekundäraluminiumproduktion zum Schutz vor Oxidation und zur Aufnahme von Verunreinigungen aus der Schmelze. Besonders beim Recycling von verunreinigten und nicht sortenreinen Schrotten wird auch in Zukunft auf das Salztrommelverfahren nicht verzichtet werden können.

In welchem Maß für bestimmte Schrottsorten Herd- und Induktionsöfen, die mit wenig bzw. ohne Schmelzsalz auskommen, eingesetzt werden können, hängt von der Entwicklung des Aluminiumbedarfes ab. Diese beiden Verfahren können nur sortenreine, gereinigte Schrotte umschmelzen, da eine Schmelzereinigung mit Schmelzsalz nicht stattfindet. Eine Korrektur

der Zusammensetzung ist nur in bestimmten Grenzen durch Verdünnen mit Primäraluminium oder durch Zusatz von Legierungselementen möglich.

Würde vollständig auf die Primärproduktion von Aluminium verzichtet, wäre mit einem erhöhten Einsatz von Schmelzverfahren mit Salz und zusätzlichen Reinigungsverfahren (Chlorspülung zur Magnesiumentfernung) zu rechnen.

Einen wichtigen Beitrag zur Verringerung des Salzbedarfes beim Umschmelzen von Aluminium bildet die Schrottvorbehandlung. Allerdings müssen dann Vorkehrungen für die Verwertung oder Entsorgung der Reststoffe aus der Vorbehandlung getroffen werden.

Weil Reststoffe aus der Aluminiumproduktion kaum vermeidbar sind, muß vermehrtes Augenmerk auf die Verwertungsmöglichkeiten dieser Reststoffe gelegt werden.

Aufgrund dieser Überlegungen sollten für die Aluminiumproduktion folgende Strategien in nächster Zukunft verwirklicht werden:

- Weitgehende Verlagerung der Aluminiumproduktion auf die Sekundärproduktion,
- Getrennte sortenreine Erfassung von Aluminiumschrotten,
- Verbesserung der Schrottaufbereitung dahingehend, daß der Verbrauch von Abdecksalz reduziert werden kann, bzw. das Umschmelzen von Sekundäraluminium in Herd- oder Induktionsöfen möglich ist und
- Verwertung der anfallenden Salzschlacke gemäß Stand der Technik mittels abwasserfreiem Löse- Kristallisationsverfahren.

5.6. RECHTLICHE BESTIMMUNGEN BEI GRENZÜBERSCHREITENDEM TRANSPORT DER RESTSTOFFE

Die Maxime der Basler Konvention, deren Hauptaufgabe im Schutz der Entwicklungsländer vor Abfallexporten begründet lag, lautet, gefährliche Abfälle im Sinne der Konvention einem strengen Kontrollregime im Falle des grenzüberschreitenden Verkehrs zu unterwerfen, unabhängig davon, ob diese Abfälle einem Recyclingprozeß oder einer Entsorgung zugeführt werden sollen. Dies führte aber im grenzüberschreitenden Verkehr von Altstoffen zu teilweise großen Schwierigkeiten.

In der Folge entwickelte die OECD ein dreigeteiltes Listensystem mit unterschiedlichen Kontrollmechanismen für verwertbare Altstoffe je nach der Gefährlichkeit des Altstoffes (Grüne, Gelbe und Rote Liste). Für Altstoffe, die in der Grünen Liste genannt werden, sind nur Kontrollen wie für übliche Handelswaren vorgesehen. Für Abfälle der Gelben Liste ist ein Kontrollregime mit verkürzten Entscheidungsfristen vorgesehen sowie die Möglichkeit der Vorautorisierung von Firmen zur Übernahme dieser Abfälle. Für OECD-Mitgliedsstaaten besteht jedoch die Möglichkeit, Abfälle der Grünen, Gelben und Roten Liste einem abweichenden Kontrollregime zu unterwerfen.

Im Februar 1993 wurde von der EG eine Verordnung zum grenzüberschreitenden Transport von Abfällen beschlossen. Diese orientiert sich an der Basler Konvention und den OECD-Bestimmungen, wobei insbesondere das Listensystem übernommen wurde.

Die Ausnahmeverordnung des Bundesministeriums für Umwelt, Jugend und Familie bezüglich grenzüberschreitenden Transport von Reststoffen bzw. Abfällen unterscheidet sich von der OECD-Ratsentschließung insofern, als sie weniger Abfälle als die OECD-Grüne Liste vom strengen Abfallkontrollregime im Falle des Exportes, Importes bzw. der Durchfuhr

ausnimmt. In Österreich werden Abfälle der Gelben Liste der OECD sowie Abfälle, welche nicht ausdrücklich auf der Ausnahmereverordnung genannt sind, wie Abfälle der Roten Liste (Bewilligungspflicht nach dem AWG) kontrolliert.

Für die bei der Aluminiumproduktion anfallenden Reststoffe (Abfälle) kann folgende Klassifizierung vorgenommen werden (s. Tab. 5.4.), wobei sämtliche der in der Tabelle genannten Abfälle einer Bewilligungspflicht des BMUJF im Falle der grenzüberschreitenden Verbringung bedürfen.

Die Zuordnung von Ofenausbruch und Filterstaub ist die Bestimmungen der EG und OECD betreffend nicht ganz eindeutig.

Aluminiumschrott inklusive Späne unterliegen der Ausnahmereverordnung, sofern nichtmetallische Verunreinigungen wie Öl, Fett oder Beschichtungen keinesfalls 5 Gewichtsprozent überschreiten.

Der Gehalt an organisch gebundenen Halogenen (z.B. PVC) darf 0,01 Gewichtsprozent, bezogen auf den Gesamtabfall, nicht überschreiten.

Tab. 5.4.: Klassifizierung der anfallenden Reststoffe gemäß internationalen Richtlinien.

Reststoff/Abfall	OECD	EU	Basler Konvention
Rotschlamm (neutralisiert)	grün, GG110	grün	H12 (?)
Krätze:			
Al-Oberflächen-krätze	grün, GB030	grün	
sonstige Al-haltige Krätzen	gelb, AA050	gelb	H10
Ofenausbruch	gelb, AD040	gelb	Y32, Y33
Anoden aus Petrolkoks	grün, GG050	grün	Y32
Filterstaub	gelb, AA050	gelb	H12, Y43
Salzschlacke	gelb, AA050	gelb	H4.3, H10
Tonerderückstand	gelb, AB100	gelb	-
sonstige Rückstände aus der Tonerdeproduktion	gelb, AA110	gelb	H12 (?)

* Abfälle werden in der Basler-Konvention als gefährlich definiert, wenn sie gewisse Kriterien aufweisen bzw. sich im Anhang der Konvention angeführten Kategorien zuordnen lassen. Für die Reststoffe der Aluminiumverhüttung gelten insbesondere folgende Punkte:

Y32: Abfälle, die anorganische Fluoride enthalten (ausgenommen CaF_2)

Y33: Abfälle, die anorganische Cyanide enthalten

Y43: PCDD-haltige Abfälle

H4.3: Abfälle, die bei Kontakt mit Luft oder Wasser brennbare Gase entwickeln

H10: Abfälle, die bei Kontakt mit Luft oder Wasser toxische Gase entwickeln

H12: Abfälle, die bei Ablagerung sofort oder verzögert Umweltschäden hervorrufen (durch Anreicherung oder toxische Wirkung auf Biotope)

Die EG-Verordnung sowie die OECD-Ratsentschließung nehmen Rotschlamm (neutralisiert) sowie Aluminiumoberflächenkrätze eindeutig vom Abfallkontrollregime aus. Aluminiumschrott ebenso wie Späne und aluminiumhaltige Krätze mit einem entsprechenden Aluminiumanteil sind international gehandeltes Wirtschaftsgut. In Österreich bedarf Aluminiumkrätze im Falle der grenzüberschreitenden Verbringung einer Bewilligung des BMUJF nach dem Abfallwirtschaftsgesetz.

Entsorgung der Reststoffe nach Stand der Technik - Zusammenfassung

ROTSCHLAMM:

Vermeidung:	Abhängig von Primäraluminiumerzeugung
Behandlung:	Deponie

OFENAUSBRUCH

Vermeidung:	Abhängig von Primäraluminiumerzeugung
Behandlung:	Konditionierung/Deponie

KRÄTZE

Vermeidung:	keine
Behandlung:	Aufarbeitung zu Aluminium und Restfraktion (z.B. Krätzestaub)

KRÄTZESTAUB

Vermeidung:	Abhängig von Krätzemenge
Behandlung:	Gemeinsam mit Salzschlacke

FILTERSTAUB

Vermeidung:	gering, abhängig von Emissionsminderungsgrad
Behandlung:	Einsatz im Stahlwerk

SALZSCHLACKE

Vermeidung:	gering, abhängig von Schrottqualität
Behandlung:	Aufarbeitung im Löse-Kristallisationsprozeß

AL-GRANULAT AUS SALZSCHLACKEAUFBEREITUNG

Behandlung:	Einsatz in Sekundäraluminiumerzeugung
-------------	---------------------------------------

TONERDERÜCKSTAND AUS SALZSCHLACKEAUFBEREITUNG

Behandlung:	Verwertung in der Zementindustrie
-------------	-----------------------------------

SCHMELZSALZ AUS SALZSCHLACKEAUFBEREITUNG

Behandlung:	Einsatz in Sekundäraluminiumerzeugung
-------------	---------------------------------------

6. ALUMINIUMPRODUKTION IN ÖSTERREICH

6.1. PRIMÄRPRODUKTION

Die Primärproduktion wurde in Österreich bereits eingestellt. Die Gründe sind in der angesichts der hohen Lohn-, Energie- und Transportkosten mangelnden Wettbewerbsfähigkeit der österreichischen Betriebe zu suchen. Die Elektrolyseanlagen der beiden österreichischen Hersteller in Lend und in Ranshofen wurden im September bzw. Dezember 1992 geschlossen.

6.1.1. Produktionsanlage Ranshofen

In der Anlage in Ranshofen wurde das Rohaluminium in 840 Elektrolyseöfen, die zu zehn Produktionseinheiten mit je 84 Öfen zusammengefaßt waren, produziert. Die Öfen waren mit selbstbackenden Söderberg-Elektroden und einer horizontalen Stromzuführung versehen. Für die Abgasreinigung waren die zehn Hallen zu fünf Gruppen zusammengefaßt, die mit je einer Naßreinigung und einem Kamin (80m) ausgestattet waren. Eine Produktionseinheit hat einen Platzbedarf von etwa 2000 m² und eine Kapazität von 8000 t/a. Die Gesamtkapazität betrug 80.000-85.000 t/a.

Ergänzend zu den wirtschaftlichen Problemen führten die spezifisch hohen Emissionswerte der teilweise veralteten Technologien zur endgültigen Betriebsstillegung, da die Investition in neue Technologien wirtschaftlich nicht vertretbar war.

Tab. 6.1.: Emissionsdaten der alten 1992 stillgelegten und geplanten neuen (jedoch nicht realisierten) Aluminiumelektrolyse in Ranshofen [UBA, 1989]

Emissionen	alte Technologie (kg/t Al)	geplanter Neubau (kg/t Al)
Staub, gesamt	10.3	5
gasförmige Fluoride, gesamt	2.1	0.5
gas- u. staubförmige Fluoride	2.8	0.6
SO ₂	1.89	10.8
spez. Energieverbrauch	16 kWh/ kg Al	14 kWh/kg Al
Einhausungsgrad	80-85%	97.5%

Im Zuge der Stilllegung der Produktionsanlage sollten besondere Abbruch- und Entsorgungsaufgaben beachtet werden:

- Ofenausbrüche: Die Gesamtmenge beträgt rund 20.000 Tonnen, wobei etwa die Hälfte derart aufbereitet werden kann, daß die Rückgewinnung von Kryolith möglich ist.
- Kaminanlagen und sonstige Baulichkeiten: Die Kaminanlagen sind an den abgasseitig berührten Flächen mit einer Schadstoffschicht belegt, welche vor der hierfür erforderlichen thermischen Behandlung in einer Sonderabfallverbrennungsanlage sorgfältig abzutrennen ist.
- Überprüfung und gegebenenfalls Entfernung sowie Behandlung von verunreinigtem Bodenmaterial und Untergrund.
- Nachsorgemaßnahmen bei vorhandenen Deponien.

Die Problematik der Deponierung von Reststoffen aus der Aluminiumverhüttung allgemein läßt sich am Beispiel der Werksdeponie Klostermühle, die als Altlast entsprechend den Bestimmungen des Altlastensanierungsgesetzes ausgewiesen wurde, aufzeigen. Auf dieser Deponie wurden bis Ende 1988 über 40.000 t Salzschlacke abgelagert sowie zusätzlich Rückstände aus der Bodenkohlelaugung, Schlämme, Krätze- und Filterstäube. Das aufgefüllte Deponievolumen beträgt rund 300.000 m³. Im Zuge eines Bewilligungsverfahrens zur Sicherung und Erweiterung der Deponie wurden im Sickerwasser u.a. hohe Salzkonzentrationen sowie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe festgestellt [UBA, 1990].

6.1.2. Produktionsanlage Lend

Die Elektrolyse der SAG bestand aus zwei Produktionseinheiten mit einer Gesamtkapazität von 12000-15000 t/a. Sie wurde 1985 modernisiert und war großteils mit entsprechenden Regel-, Steuer- und Umweltschutzeinrichtungen ausgerüstet. Die Abgasreinigungsanlage wurde in den Jahren 88/89 modernisiert bzw. ausgebaut. Sie hat durch die Kombination von Trocken- und Naßfilter die den Anforderungen der Behörde entsprechenden Emissionsgrenzwerte erreicht [UBA, 1992].

Tab. 6.2.: Emissionsdaten der Aluminiumelektrolyse in Lend (UBA, 1992)

Emissionen	Mengen in kg/t Al	
	1987/88	1990
Staub	16	3.7
Fluor, gasförmig	0.4	0.2
Fluor, staubförmig	6.0	2.0
SO ₂	11	11

Der im Trockenfilter anfallende Filterstaub wurde wieder dem Produktionsprozeß zugeführt.

Die während des Betriebes anfallenden Anodenreste (400t / 1991) wurden teilweise an den Lieferanten (Italien) zur Aufbereitung retourniert, teilweise im Werk selbst recycelt und als sogenannte Kragenmasse bei den Öfen wiederverwendet.

Der Ofenausbruch wurde an Abnehmer in Österreich (Treibacher Chemische Werke) bzw. Italien (Aluzento) abgegeben.

Nach der Schließung der Elektrolyse wurde ein neuer Herdflammmofen mit zwei Kammern installiert, der die Produktion für die Gießereianlagen teilweise übernommen hat.

6.1.3. Übersicht über die Entwicklung der Primär-Aluminiumproduktion in Österreich

Die Primär-Aluminiumherstellung in Österreich wurde angesichts der technischen Gegebenheiten und den wirtschaftlichen Randbedingungen einschließlich des verschärften Umweltschutzes eingestellt und wird nach Einschätzung von brancheninternen Fachleuten auch im nächsten Jahrzehnt nicht wieder aufgebaut.

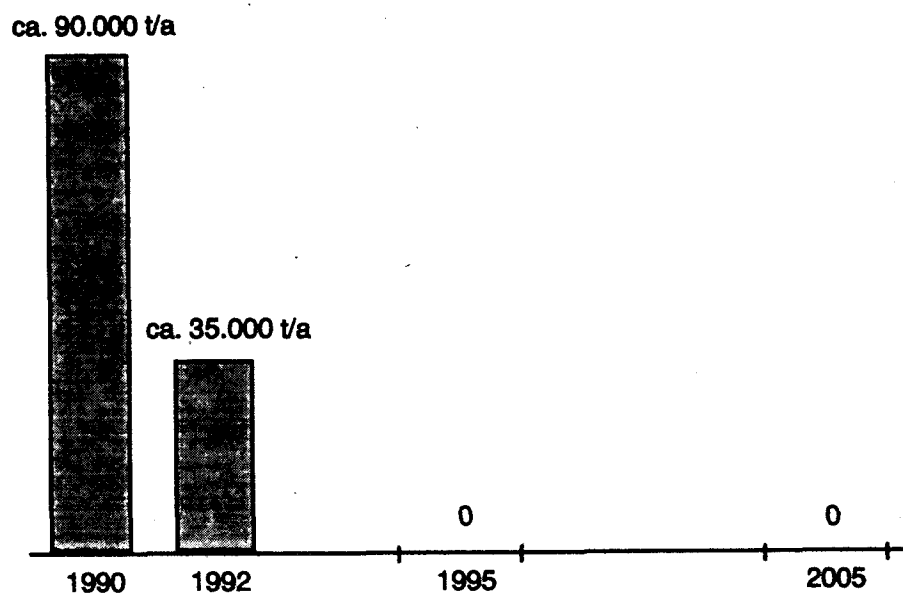


Abb. 6.1.: Entwicklung der Produktion von Primär-Aluminium in Österreich und Abschätzung der künftigen Entwicklung.

6.2. SEKUNDÄR-ALUMINIUMPRODUKTION

Die Produktion von Sekundäraluminium in Österreich beträgt gegenwärtig etwa 55.000 bis 60.000 t/a.

Die größten Produzenten befinden sich in Ranshofen und Lend. Darüber hinaus existieren in Niederösterreich einige kleinere Hersteller.

6.2.1. Produktionsanlage in Ranshofen

Die Anlage umfaßt:

Schrottvorbehandlung bestehend aus:

- Siebanlage für die Späne
- Spänetrockner
- Krätzeaufbereitung
- Schrottpresse (Späne, Folien)

Schmelzanlage bestehend aus:

- 2 Drehtrommelöfen mit Salzbad (Butan/O₂ Brenner)
- 1 Induktionsofen
- 4 Warmhalteöfen (Butan/O₂ Brenner, Raffination mit Stickstoff und Chlor)
- Rauchgaskanal mit O₂-Injection zur Reduzierung der organischen Schadstoffe im Abgas
- trockene Abgasreinigung (Gewebefilter, Einsatz von Kalkhydrat als Absorptionsmittel, Überwachung der organischen Emissionen mittels FID)

Die Produktionskapazität der Anlage beträgt etwa 34.000 t/a mit einem dadurch bedingten Salzschlackeanfall von etwa 17.000 t/a. Die Schlacke wird derzeit nach Aussagen des Betreibers nach Deutschland (Fa. HANSE bzw. Fa. Kali und Salz) exportiert [ASA 1994].

Weitere anfallende Reststoffe sind größenordnungsmäßig 1.000 t/a Filterstaub von der Abgasreinigung, sowie 1.000-2.000 t/a Kugelmühlenstaub aus der Krätzeaufbereitung.

Bezüglich der Zusammensetzung der Reststoffe gelten die in Kapitel 3 getroffenen Aussagen.

Filterstäube aus der Schmelze und der Krätzeaufbereitung werden nach England (Fa. Ryder Point) exportiert und zu Entschwefelungsmittel für die Stahlindustrie verarbeitet. Eine Exportbewilligung gemäß Abfallwirtschaftsgesetz liegt vor [ASA 1994].

6.2.2. Produktionsanlage in Lend

Am Produktionsstandort in Lend sind abgesehen von der stillgelegten Elektrolyseanlage und den Gießereianlagen auch Umschmelzanlagen für die Herstellung von Sekundäraluminium vorhanden:

- Induktionstiegelofen sowie Induktionsrinnenofen
- Herdofen mit Ölbefuerung sowie zwei Herdöfen mit Gasbefuerung
- Closed-Well-Ofen mit einer Kapazität von rund 25 Tonnen.

Gemäß inoffizieller Informationen wird an diesem Betriebsstandort keinerlei Abdecksalz eingesetzt, so daß lediglich höherwertige Schrottsorten verarbeitet werden können, da andernfalls hohe Metallverluste auftreten würden. Aluminiummaterialien mit halogenhaltigen Beschichtungen bzw. mit Polyurethanschäumen dürfen gemäß behördlicher Auflage angeblich nicht verarbeitet werden. In diesem Zusammenhang ist daher festzustellen, daß nach abschlägiger Auskunft des Betreibers in Ranshofen die in Österreich nunmehr gebräuchlichen KFZ-Kennzeichen wegen der PVC-Beschichtung derzeit nicht recycelt werden können.

6.2.3. Weitere Sekundäraluminiumschmelzbetriebe

Neben den oben genannten Großproduzenten sind drei kleinere Schmelzbetriebe in Niederösterreich bekannt.

Gemäß informeller Rücksprache mit zuständigen Personen in der Geschäftsführung ist derzeit lediglich einer dieser drei Betriebe aktiv, welcher mit einem Zweikammer-Herdwannenofen maximal etwa 10.000 t/a produzieren kann. Die Anlage ist mit einem Gewebefilter und Einsatz von Kalkhydrat als Reaktionsmittel ausgestattet. Anfallende Krätze wird zur Verwertung an andere, entsprechend ausgestattete Sekundäraluminiumschmelzwerke geliefert. Der anfallende Filterstaub in einer Menge von rund 25 t/a wurde bisher einer Deponierung zugeführt. In diesem Produktionsbetrieb wird kein Abdecksalz und auch keine Raffination mit Chlorgas durchgeführt. Dementsprechend können nur hochwertige Schrotte mit geringen Anhaftungen eingesetzt und keine hochwertigen Legierungen hergestellt werden.

Ein weiterer Produktionsbetrieb hat seine betriebliche Tätigkeit in Österreich nunmehr eingestellt und wird unter für ihn günstigeren Randbedingungen (Lohnniveau, Umweltstandards) künftig in Osteuropa produzieren.

Das fünfte Unternehmen produziert zumindest vorübergehend nicht, da der wirtschaftliche Konkurs eingetreten ist.

6.2.4. Übersicht über die Entwicklung der Sekundär-Aluminiumproduktion in Österreich

Die Entwicklung der Sekundär-Aluminiumproduktion gewinnt angesichts des steigenden Schrottaufkommens in Österreich an Bedeutung. Die Verwertung von Aluminium ist ökologisch und volkswirtschaftlich sinnvoll, so daß trotz der gegenwärtig schwierigen wirtschaftlichen Randbedingungen künftig mit einer Zunahme der Produktionsleistung zu rechnen ist. Allerdings sind hierfür weitere technologische Verbesserungen im Hinblick auf Emissionsminderung und Vermeidung und Verwertung von Reststoffen zu fordern.

In Niederösterreich befindet sich derzeit ein geplantes Alu-Recycling Kombi-Projekt im Genehmigungsverfahren, in welchem auch minderwertigere Schrottqualitäten verarbeitet werden sollen. Diese Produktionsanlage könnte aus technischer Sicht bereits ab 1996 zur Verfügung stehen.

Möglicherweise wird im gleichen Bundesland voraussichtlich die endgültige Stilllegung von zwei Sekundäraluminiumschmelzwerken mit geringerer Produktionsleistung erfolgen.

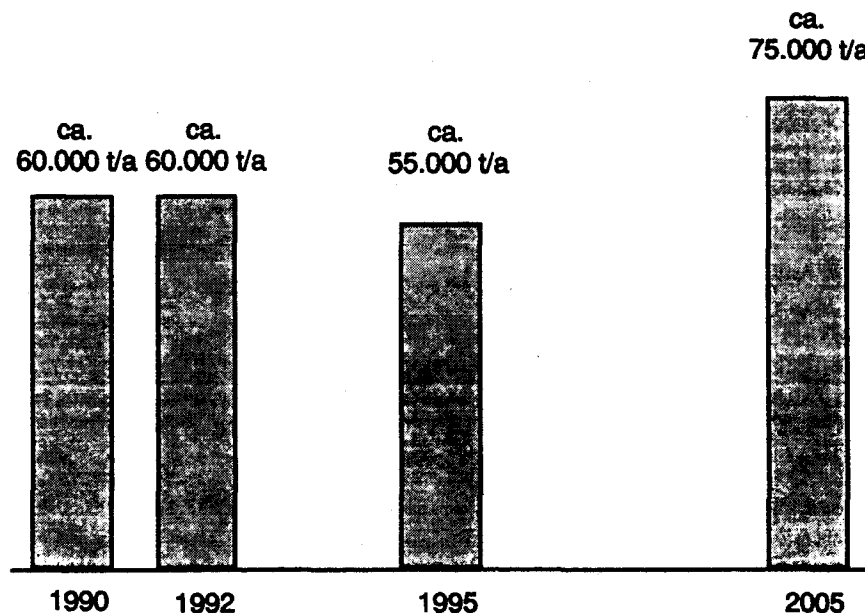


Abb. 6.2.: Entwicklung der Sekundär-Aluminiumproduktion in Österreich und Abschätzung der künftigen Entwicklung.

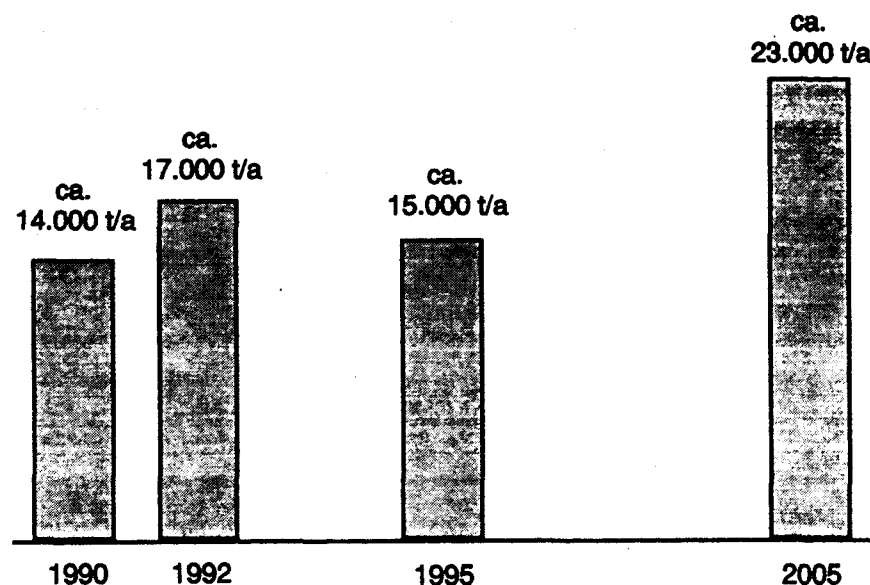


Abb. 6.3.: Entwicklung des Salzschlackeaufkommens in Österreich und Abschätzung der künftigen Entwicklung.

6.3. GIESSEREIEN

Die Stilllegung der Elektrolysen in Ranshofen und Lend führten zu dem Umstand, daß die angeschlossenen großen Gießereien mit über 100.000 t Aluminium aus sauberem Neuschrott und Hüttenaluminium versorgt werden müssen.

Gemäß einer unveröffentlichten Studie, welche im Auftrag eines Aluminiumerzeugers durchgeführt wurde, befinden sich mit Stand Jänner 1992 in Österreich insgesamt über 30 kleinere Al-Gießereien in Betrieb, welche rund 16.000 t/a Primär- und rund 50.000 t/a Sekundäraluminium einsetzen (Information von UV&P).

Die bei der Produktion anfallenden Gießereisande werden heute größtenteils noch deponiert. Nur einige Gießereien verfügen über mechanische Regenerieranlagen für ihre eigenen Altsande.

Zuverlässige Angaben über die verbrauchten und verarbeiteten Mengen Gießereisand im Bereich der Aluminiumgießereien sind derzeit nicht verfügbar.

Aufgrund der steigenden Deponiekosten (fallweise bis zu öS 2.000,--/t) und der in Österreich hohen Neusandkosten (öS 500,-- bis öS 700,--/t) wird es in Zukunft vermehrt zur Aufarbeitung des Sandes kommen.

Für die Aufbereitung und Verwertung von Gießerei-Alt-sanden in Österreich sind derzeit zwei Projekte bekannt, die sich in Bau befinden.

Aluminiumproduktion in Österreich - Zusammenfassung

Ende 1992 wurden in Österreich alle Anlagen zur Produktion von Primäraluminium stillgelegt.

In Österreich gibt es derzeit fünf Sekundäraluminiumhütten, von denen derzeit drei in Betrieb sind (Ranshofen, Lend, ein Werk in Niederösterreich).

Die Errichtung einer Sekundäraluminiumhütte ist in Niederösterreich geplant.

Derzeit werden 55.000 - 60.000 t/a Sekundäraluminium in Österreich hergestellt

Es entstehen 15.000 t/a Salzschlacke, 1000 t/a Filterstaub und 1.000-2.000 t/a Kugelmühlenstaub aus der Krätzeaufbereitung.

7. KÜNFTIGE TECHNOLOGISCHE ENTWICKLUNGEN ZUR VERMEIDUNG UND VERWERTUNG VON RESTSTOFFEN

7.1. IN ENTWICKLUNG BEFINDLICHE ENTSORGUNGSTECHNOLOGIEN

7.1.1. Verwertung von Filterstaub aus der Abgasreinigung

Möglichkeiten zur Aufbereitung von Filterstaub wurden bisher nur im Labormaßstab erprobt und bestehen in einem Naßaufbereitungsverfahren. Durch Laugung mit Wasser erhält man eine Sedimentationsphase (unlösliche Anteile, Hydroxidschlämme), eine Flüssigphase, in der sich die gelösten Salze befinden, eine Aufschwimmphase (organ. Stoffe, schlecht netzbare Anteile), sowie eine Gasphase (NH_3 , Amine). Für die geklärte Lösung wurde die Rückgewinnung der enthaltenen Salze in einer Schlackenaufbereitungsanlage vorgeschlagen. Für die abgezogenen organischen Anteile ist eine Verbrennung denkbar, das Problem der Verwertung der Schlammphase ist noch nicht geklärt [Ecoplan, 1989].

Ein ähnliches, jedoch weitergehendes Verfahren zur Behandlung der Filterstäube wurde mit der Zielsetzung, die enthaltenen PCDD/F zu zerstören, die Wertstoffe rückzugewinnen und eine Nutzung oder umweltverträgliche Ablagerung der Reststoffe zu erreichen, im Labormaßstab entwickelt (Abb. 7.1.). Durch eine Niedrigtemperaturbehandlung (400°C) werden die organischen Substanzen weitgehend zerstört, dadurch wird auch die Schaumbildung bei der anschließenden Laugungsstufe verhindert. Zur Entfernung des in der Salzverwertung störenden Ca-Gehalts wird die Lauge karbonisiert und das CaCO_3 abgetrennt. Mittels Vakuumkristallisation werden NaCl und KCl abgetrennt und der Verwertung zugeführt. Denkbar scheint durch die vorgeschaltete thermische Behandlung eine Aufarbeitung von Filterstäuben in Salzsclackenaufbereitungsanlagen. Dies kann entweder durch direktes Vermischen der Filterstäube mit der Salzsclacke erfolgen, oder durch getrennte Filterstaublaugung mit Einschleusung der Lauge in die bestehenden Kristallisationsanlagen [Urbach et al, 1993].

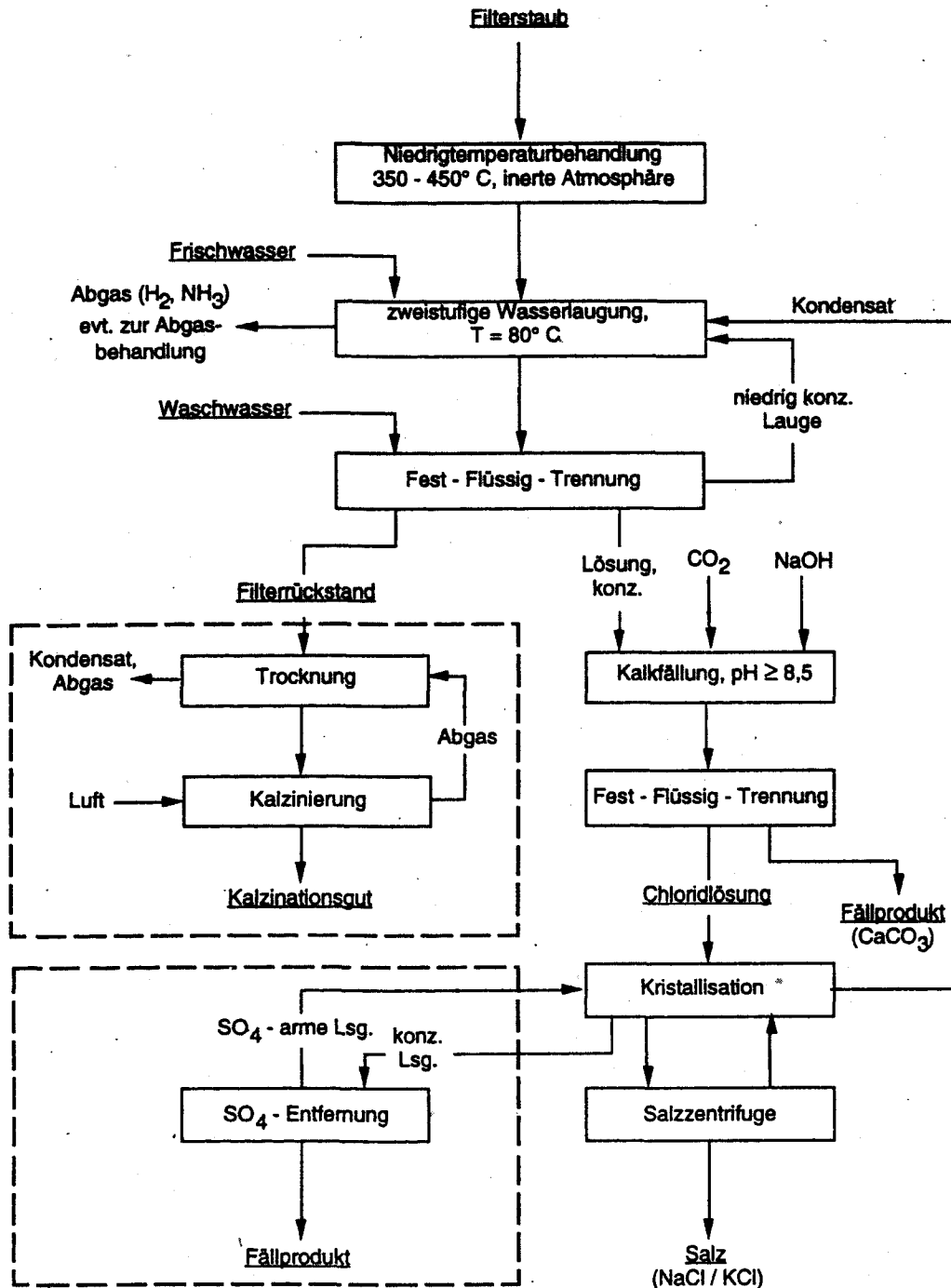


Abb. 7.1.: Verfahrenskonzept zur pyro-/hydrometallurgischen Aufarbeitung von Aluminiumfilterstäuben (Urbach et al., 1993)

Aufgrund der chemischen Eigenschaften von PCDD/F entwickelte die BUS-Chemie [Boin 1994] ein Dekontaminationsverfahren für diese Stäube, wobei die PCDD/F's mit organischen Lösungsmitteln (z.B. Xylol oder Ethylenglykol) extrahiert werden.

Der Flugstaub soll in Spezialcontainern gesammelt und zu der Anlage transportiert werden. Das Verfahrenskonzept kann wie folgt beschrieben werden:

Über einen Schneckenförderer wird der Staub in spezielle Laugungstanks gebracht, wo er mit organischen Lösungsmitteln in einem zweistufigen Prozeß extrahiert wird. Nach der Filtration wird die PCDD/F-hältigen Phase destilliert, um das Wasser zu entfernen. Im Destillat werden die PCDD/F's

durch Reaktion mit Alkalimetallen (Na, Li) zerstört. Die Reaktionsprodukte (Chloride, Oxide, Hydroxide) sind im Lösungsmittel nicht löslich und können abfiltriert werden. Das gereinigte Lösungsmittel wird erneut zur Extraktion verwendet.

Der dekontaminierte Rückstand wird getrocknet, um Lösungsmittelrückstände zu entfernen. Um das enthaltene NaCl/KCl wiederzugewinnen, wird der Rückstand einem Löse- Kristallisationsvorgang unterworfen. Unter Umständen muß eine zusätzliche Säurelaugung durchgeführt werden, um Schwermetalle zu entfernen.

Wegen des hohen Dampfdruckes und der leichten Entflammbarkeit des Extraktionsmittels muß die gesamte Anlage geschlossen unter Vakuum betrieben werden. Aus Korrosionsgründen muß die Anlage in Edelstahl ausgeführt sein.

Nach Angaben der Planer wird die Verarbeitungsgebühr für Filterstaub in der Größenordnung der Deponiegebühren einer Untertagedeponie liegen [Krone 1994].

7.1.2. Verwertung von Tonerderückstand aus der Salzschlacke- und Krätze- verwertung

Alle im folgenden angeführten Möglichkeiten zur Verwertung dieses Reststoffes befinden sich zur Zeit erst im Versuchsstadium.

- Der hohe Al_2O_3 -Gehalt des TER spricht für seine Verwendung als Rohstoff in der Aluminiumindustrie. Nach entsprechenden Reinigungsschritten um insbesondere die störende Kieselsäure zu entfernen kann er dem Bayeraufschluß zugeführt werden.
- Eine Verwendung als Substitut bei der Herstellung von feuerfesten Materialien scheint nach ersten Versuchen in dieser Richtung möglich.
- Wenig erfolgversprechend scheint nach dem heutigen Wissensstand eine Verwendung in der Schleifmittelindustrie, aufgrund der geringen erzielbaren Härten.
- Einsatz in der Stahlindustrie als Entschwefelungsmittel, sowie als Abdeck- als auch als Warmhaltemasse.
- Tests haben gezeigt, daß der TER gute adsorptive Eigenschaften bei der Trockenadsorption von Teer aus Rauchgasen aufweist. Eine großtechnische Anwendung ist geplant.
- Verwendung als Zusatz zu Schlacken aus der Verbrennung gefährlicher Abfälle, um deren korrosive und erosive Eigenschaften zu reduzieren.

Generell gilt, daß eine möglichst gleichmäßige Zusammensetzung des TER's anzustreben ist, um ihn in anderen Industriezweigen einsetzen zu können. Weiters ist eine genaue Kenntnis über das Verhalten der enthaltenen Komponenten und Verunreinigungen erforderlich [Krüger, 1990].

7.2. ENTWICKLUNG INTEGRIERTER TECHNOLOGIEN ZUR VERMEIDUNG UND VERWERTUNG VON ABFÄLLEN AM BEISPIEL DES ALU-RECYCLING KOMBI-PROJEKTES

Beim geplanten Alu-Recycling Kombi-Projekt in Niederösterreich werden neben der Gewinnung von Aluminiumlegierungen stofflich nicht direkt verwertbare Abfälle thermische behandelt und elektrische Energie und Fernwärme erzeugt. Durch die im Kombi-Projekt integrierte Abluft- und Rückstandsbehandlung werden metallische Wertstoffe, Salze und Baustoffe aus bestimmten Abfällen gewonnen. Weiters ist geplant, Deponiegas aus bestehenden Deponien in der unmittelbaren Nachbarschaft zum geplanten Betriebsstandort energetisch zu verwerten.

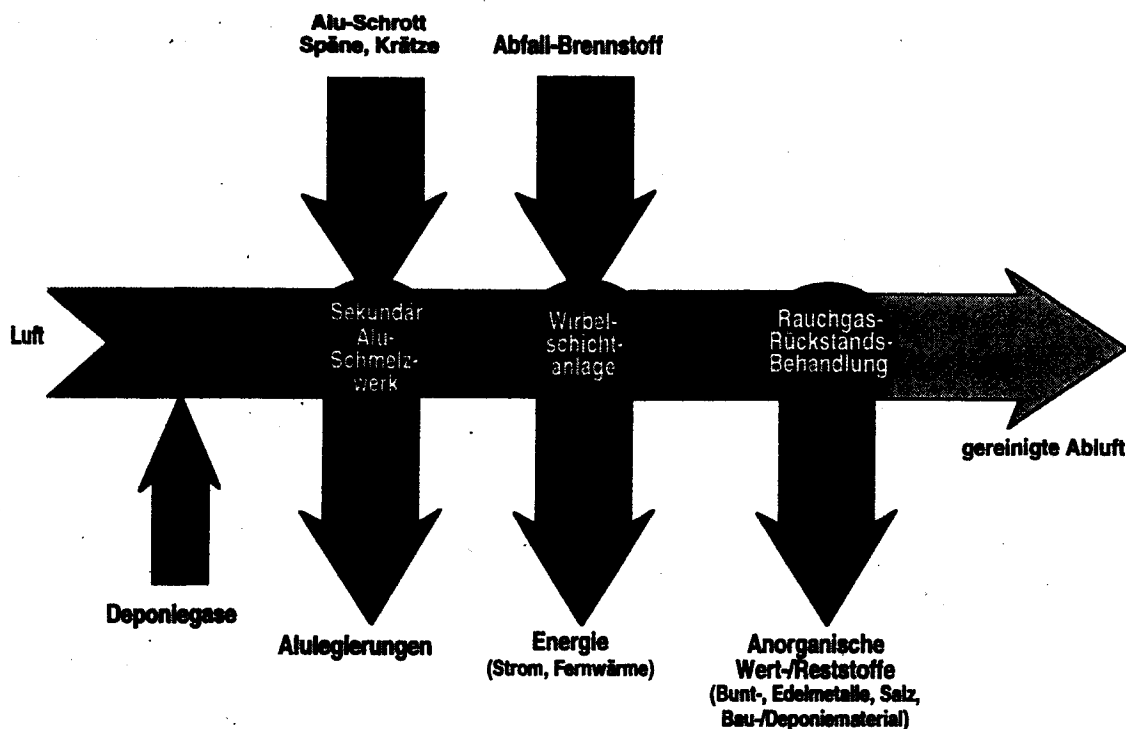


Abb. 7.2.: Alu-Recycling Kombi-Projekt - Prinzipschema [Neubacher et al, 1992]

Das beim Schmelzen der Schrotte, Späne und Krätzen eingesetzte Schmelzsalz soll in einer Aufbereitungsanlage in der BRD weiterbehandelt und wieder eingesetzt werden.

In einer Wirbelschichtanlage wird das Abgas aus dem Schmelzprozeß, das mit organischen und anorganischen Schadstoffen belastet ist, zur Verbrennung von Abfallbrennstoff (Schredderabfall, Rejecte, verunreinigte Kunststoff- und Holzabfälle) eingesetzt. Dabei werden die organischen Schadstoffe weitgehend zerstört, die beim Prozeß freiwerdende Energie kann zur Strom- und Fernwärmegewinnung genutzt werden. Die anorganischen Schadstoffe werden in einer mehrstufigen Rauchgasreinigungsanlage entsprechend dem Stand der Technik abgeschieden und damit die Voraussetzungen für eine anschließende Rückgewinnung von Materialien wie Bunt- und Edelmetalle oder Salz geschaffen.

Die einzelnen Anlagenkomponenten des Alu-Recycling Kombi Projektes sind in Referenzprojekten bereits seit Jahren erprobt, die Gesamtkonzeption des Projektes jedoch ist neu. Das betrifft sowohl die Technologie des Aluminiumschmelzbetriebes, des Wirbelschichtkessels, sowie die Komponenten der Abgas- und Rückstandsbehandlung (z.B. Elektrofilter, Abluftwäscher, Denox-Katalysator, Aktivkohlefilter, Ionenaustauscher und Metallfällungsanlagen zur Wasserbehandlung, Eindampfanlagen, Konditionierungsanlagen).

Bei der Rauchgasreinigung wurden in der Planung die Möglichkeiten zur Stickoxidminderung - das SCR- und das SNCR-Verfahren - systematisch mit den Emissionen der Wirbelschicht-Technologie ohne Entstickungsanlage auf Basis von Emissionsbilanzen miteinander verglichen (die Wirbelschicht-Technologie ermöglicht relativ zu anderen Verbrennungssystemen niedrige Stickoxidemissionen). Das Ergebnis zeigte, daß für die gesamtheitliche Minimierung von Emissionen (Abgas, Abwasser, Abfall, Hilfsstoffe, Energie) die SCR-Technologie eindeutig zu bevorzugen ist [Neubacher et al., 1992].

7.3. ABSCHÄTZUNG DER UMWELTRELEVANTEN KOSTEN

7.3.1. Kostenstruktur in der Aluminiumverhüttung

Die gegenwärtige wirtschaftliche Situation für die Aluminiumproduktion ist insbesondere für westliche Produzenten außerordentlich schwierig. Die Preise am Weltmarkt sind seit etwa zwei Jahren rückläufig, was zum einen durch das überaus große Angebot von billigstem, zum Teil qualitativ minderwertigem Aluminium aus den GUS-Staaten sowie durch zusätzliche Produktionskapazitäten für Primär-Aluminium verursacht wurde. Zum anderen wurde auf der Nachfrageseite, insbesondere durch den Wegfall aus dem Bereich der militärischen Produktion (vor allem UdSSR) und der stagnierenden bzw. rückläufigen Automobilproduktion im Westen ein Verfall des Marktpreises ausgelöst.

Die Abbildung 7.4 zeigt die Kostenstruktur für die Primär- und Sekundärproduktion von Aluminium. Der spezifisch hohe Anteil an Kapitalkosten wird bei der Primäraluminiumherstellung dazu führen, daß die Primärproduktion vor allem in Ländern mit entsprechenden Bauxitvorkommen und günstigen Energiekosten in außerordentlich großen Produktionskapazitäten stattfinden wird.

Die Produktion von Sekundäraluminium wird in Ländern mit hohem Schrottaufkommen bzw. Wohlstand stattfinden, wobei die Kosten für den Einkauf und Aufbereitung von Schrott besonders zu beachten sind. In diesem Bereich könnten jedoch auch die Kosten für die Erfüllung besonders strenger Umweltschutzaufgaben eine Wettbewerbsverzerrung zugunsten der Produktion in Ländern mit niedrigem Umweltstandard bzw. mangelhaftem Vollzug von Umweltschutzvorschriften bewirken. In diesem Zusammenhang ist die Tendenz zur Verlagerung der Sekundäraluminiumproduktion in Richtung Osteuropa besonders relevant.

In Abbildung 6.4. wird die Kostenaufteilung bei der Primär- und Sekundäraluminiumproduktion grob dargestellt. Die Kosten inkludieren die Kosten für Verwaltung, Marketing oder Vertrieb bzw. für Legieren, Reinigen und Vergießen und der Entsorgung. Derzeit betragen die so definierten Kosten für die Herstellung einer Tonne Primäraluminium etwa 14.000-15.000 öS. Die Herstellungskosten für eine Tonne Sekundäraluminium bewegen sich in ähnlichen Größenordnungen [Wawrschinek 1994]. Zu beachten ist, daß die Kosten von der erzeugten Legierung abhängen und daher nicht einheitlich angegeben werden können. Die Herstellungskosten für Sekundäraluminium

werden in erster Linie vom Schrottpreis bestimmt, während beim Primäraluminium die Kapital- und Rohstoffkosten bestimmend sind.

Der Verkaufspreis von Aluminium beträgt je nach Qualität und Börsennotierung derzeit etwa 15.000 öS pro Tonne. Das bedeutet, daß Primäraluminium in Europa derzeit nicht kostendeckend erzeugt werden kann.

Die Kosten zur Erfüllung von Umweltschutzaufgaben betreffen in erster Linie die Kapitalkosten (Bau von Anlagen der Umwelttechnik). Je nach gewähltem Verfahren sind in zweiter Linie Hilfsstoffe bzw. Energiekosten betroffen.

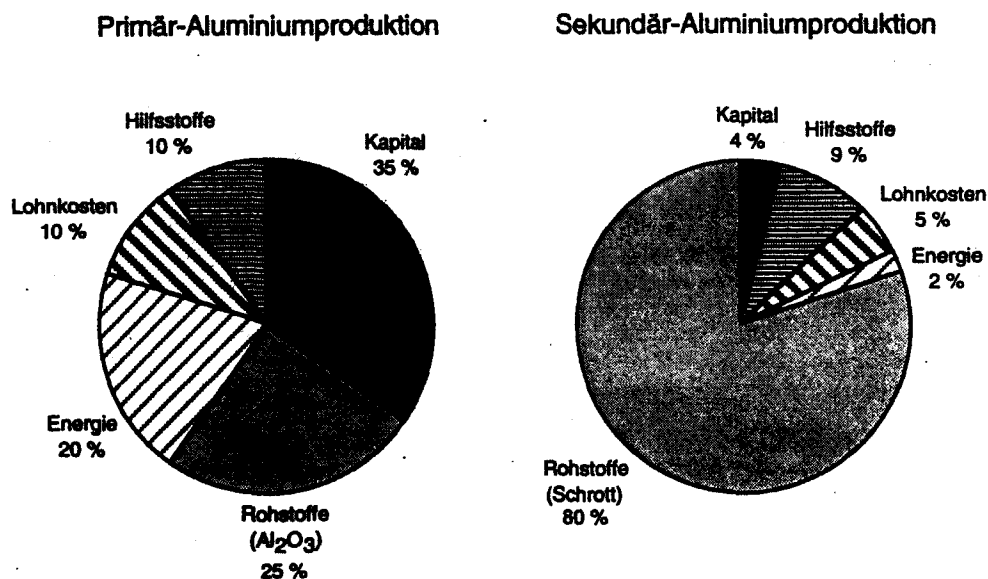


Abb. 7.4.: Vergleich der Kostenstruktur bei der Primär- und Sekundär-Aluminiumproduktion [RSI, 1991].

7.3.2. Abschätzung der spezifisch umweltrelevanten Kosten in der Herstellung von Sekundär-Aluminium

Die folgende Abbildung 7.5. beinhaltet eine Darstellung der spezifischen Kosten für Umweltschutzmaßnahmen im Bereich der Produktion von Sekundär-Aluminium gemäß dem bisherigen Stand der Technik in Österreich. Dabei ist zu beachten, daß die Zahlenangaben grobe Schätzungen auf Basis informeller Recherchen darstellen, welche für eine spezielle Anlage bzw. ein spezifisches Unternehmen unterschiedlich sein können. Die Kosten wurden auf Basis der Situation in Österreich im Jahr 1993 geschätzt und sind auf 1 t Sekundär-Aluminium bezogen. Die Verwertung der Reststoffe erfolgt nach dem Stand der Technik, d.h. Salzschlackenaufbereitung im Ausland, Verwertung von Filterstaub in der Stahlindustrie und Deponierung von Ofenausbruch.

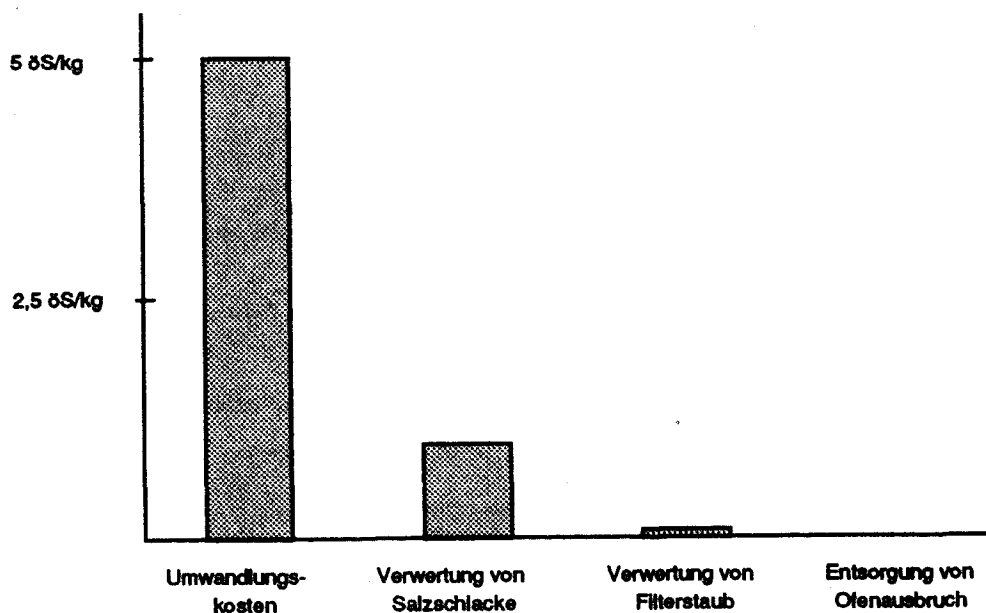


Abb. 7.5.: Prozentualer Vergleich der spezifischen Kosten für umweltrelevante Maßnahmen im Bereich Sekundäraluminium-Produktion (Umwandlungskosten gerechnet als Verkaufspreis - Einkaufskosten).

Die Umwandlungskosten sind als die Differenz zwischen Einkaufskosten und Verkaufspreis definiert, oder anders ausgedrückt als alle Kosten, die außer den Rohstoffkosten anfallen. Die angegebenen Umwandlungskosten von 5 000 öS/t Sekundäraluminium gelten als Richtwert und kann je nach erzeugter Legierungsqualität schwanken.

Die spezifischen Kosten für Maßnahmen gemäß dem Stand der Technik sind nach Aussage von UV&P Größenordnungsmäßig von untergeordneter Bedeutung. Allerdings können die vorhersehbaren Verschärfungen im Bereich der Emissionsgrenzwerte für Luftreinhaltung sowie das Verbot der Ablagerung reaktionsfähiger Materialien auf obertägigen Deponien im Einzelfall beachtliche Mehrkosten verursachen bzw. die Strukturbereinigung und technologische Änderung zugunsten der bekannten saubereren Technologien erzwingen.

Eine Angabe von spezifischen Kosten ist im Bereich von integrierten Technologien nicht eindeutig möglich, da durch die Integration mehrerer Einzelmaßnahmen innerhalb einer Gesamtanlage die Zurechenbarkeit nicht eindeutig möglich ist. Allerdings können integrierte Technologien zu einer Reduktion der Umweltbelastungen führen und sind dadurch in der Lage, künftige strengere Umweltschutzanforderungen zu erfüllen

Künftige Entwicklungen - Zusammenfassung

Die Kosten für die Primäraluminiumerzeugung werden in erster Linie von Anlagenkosten und Energiekosten bestimmt. Bei der Sekundäraluminiumproduktion ist der Hauptkostenfaktor der Schrottpreis.

Die Primärproduktion von Aluminium wird sich in Länder mit großem Bauxitvorkommen verlagern.

Die Sekundärproduktion wird zunehmende Bedeutung in den Wohlstandsländern mit hohem Schrottaufkommen gewinnen.

Die Kosten für Umweltschutzmaßnahmen gemäß Stand der Technik sind bei der Sekundäraluminiumproduktion von untergeordneter Bedeutung.

8. LITERATURVERZEICHNIS

- AGST, J.: Zweite Duisburger Recycling-Tage (Moers 1987)
- ALFARO, I.: "Technische und wirtschaftliche Gesichtspunkte bei der Entstehung und der Verarbeitung von Aluminiumkrätze", in Aluminium 62(4), 259-266, 1986
- ALKER, K.: "Aluminium-Recycling: Analysengerechte Aufbereitung von Schredder-Schrott", in Erzmetall 45(2), 1992, S. 93-100
- ALLAIR, C.: "Use of Red Mud for the Production of Aluminium Reduction Cell Potlining Refractories", in Light Metals 1992, 401-6
- ALUSCAN, 1992/1: Gesprächsnotiz vom 16.01.1992.
- ALUSCAN, 1992/2: Telefax vom 05.02.1992.
- ALUSCAN, 1993/1: Schreiben vom 14.09.1993
- ALUSCAN, 1993/2: Aufbereitung von Salzsclacken der sekundären Aluminiumindustrie; Technische Dokumentation unter Berücksichtigung von Ökologie, Energie und Wirtschaftlichkeit; Mai 1993
- AMST, 1993: Patentiertes Abdichtsystem für Drehtrommelöfen, Firmeninformation
- ASA, 1994: Mitteilung der Firma Austria Sekundär Aluminium (6.6.1994)
- BAHR, A. et al.: "Aufbereiten von Salzsclacken aus Aluminium-Umschmelzwerken", Mitteilungen aus dem Inst. für Aufbereitung der Technischen Universität Clausthal 56 (1980), Nr 10, S. 657-659
- BAUMGARTNER, L.: "Schredder und Schwimm-Sink-Anlage: Zwei unverzichtbare Komponenten in einem geschlossenem Recyclingkreislauf", Vortrag
- BECKMANN, M.: "Aufarbeitung von Aluminiumsalzsclacken in Nordrhein-Westfalen", in Aluminium 67 (1991), Nr 6, S. 586-592
- BLANCO, F. et al.: "Integral Recycling and Reuse of Cathode Cell Residua", Light Metals 1991, Proc. 120 TMS Annual Meet., 527-542
- BMUJF, 1988: Leilinen zur Abfallwirtschaft. Herausgegeben vom Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie, Wien.
- BMUJF: Erlaß betreffend Mindestanforderungen für die Altautoentsorgung vom 17.Mai 1993, Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie, Wien.
- BOIN, U., persönliche Mitteilung (1994) zitiert in [Krone 1994]
- BRENNSTOFFSTATISTIK 1992, Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Bundeslastverteiler (1993)
- B.U.S., 1989: Begriffserläuterungen zur Salzsclackenaufbereitung
- B.U.S., 1992: "Die Aufarbeitung von Aluminiumsalzsclacken"
- B.U.S., 1994: Schriftliche Mitteilung vom 08.02.1994
- DALMIJN, W.L.: "Practical applications of eddy current separators in the scrap recycling industry" in: Aufbereitungstechniken in Hüttenwerken, 21. metallurgisches Seminar (GDMB, wuppertal: 17.-19.11.1988)
- DKN: "Aluscan AS - Deponi for Produksjonsavfall ved Rodsand Gruver", Det Kongelige Næringsdepartement, Schreiben vom 09.09.1991.
- ECOPLAN, 1989: "Studie zur Abgasreinigung der Emissionen aus Aluminium-Umschmelzwerken und zur Aufbereitung und zum Recycling von alkalischen Filterstäuben aus bestehenden Abgasreinigungsanlagen", Studie im Auftrag von VDS, (BRD: 1989).

- FECKER, I.: "Herstellung von Aluminium", Eidgen. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt St. Gallen, 1989
- FOCON: "Ecocent - the new environmental and ecological system for the recovery of aluminium through centrifuging of hot dross", Broschüre der FOCON Foundry Consults GmbH.
- GIEPEN, K.: "Neuartiger Einschmelzofen für beschichtete Al-Schrotte" in : K.Lossak: Stranggießen, (DGM Informationsgesellschaft, Oberursel: 1991) 25-33
- GOTTHELF, H.: Möglichkeiten des wirtschaftlichen Einsatzes von Müllschrott bei der Stahlerzeugung (Dissertation, TU Berlin: 1984)
- HAMIT, 1992: Telefax vom 27.01.1992, Hauge Marketing and International Trade.
- HANSE (Hannoversche Salzschlackeentsorgungsgesellschaft GmbH, Hannover) Materialspezifikation "Oxidrückstand", zitiert bei [Krone 1994]
- HIEBLER, H.; 1992: Gutachten über "Verhalten und Verweilzeit eines pulverförmigen Entschwefelungsmittels auf der Basis $\text{CaO-CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ beim Einblasen in Stahlschmelzen".
- KAL+SALZ AG 1993: Firmeninformation zur Salzschlackenaufarbeitung
- KRONE, K. et al.: "Ökologische Aspekte der Primär- und Sekundäraluminiumerzeugung in der Bundesrepublik Deutschland", in : Metall 44/6 (1990) 559-567.
- KRONE, K.: "Solid Residues in Secondary Aluminium Production - Formation, Reclamation and Utilization", Vortrag gehalten bei der 3. Tagung der ECE-Task Force "By-Product Utilization from Stationary Installations" (Wien: 23.3.1994)
- KRÜGER, J.: "Zukünftige Entwicklungen in der Sekundäraluminiumindustrie", Fachseminar bei den Sommer Metallwerken GmbH 1990.
- KRÜGER, J. et al., 1990: "Aufarbeitung der Rückstände der Sekundäraluminiumindustrie", Institut für Metallhüttenwesen und Elektrometallurgie der Rheinisch-Westfälisch-Technischen Hochschule Aachen.
- KRÜGER, J.: "Sekundäraluminiumerzeugung", Vortrag gehalten bei der 3. Tagung der ECE-Task Force "By-Product Utilization from Stationary Installations" (Wien: 23.3.1994) - Veröffentlichung als Tagungsbericht des Umweltbundesamtes ist geplant.
- LAVOIE, S.; Litalien, M.: "Processing of dross in a plasma arc heated furnace", Veröffentlicht bei der 122. Jahrestagung der "AMS" (Denver/Colorado: Februar 1993) in: Light Metals 1993, AIME Metallurg. Soc. Warrendale, wird veröffentlicht
- LOSSACK, E.: "Bewährte technische Konzepte zum Recycling von Al-Getränkedosen" in: Agst, J.: Zweite Duisburger Recycling-Tage (Moers 1987)
- MAITRA, P.K.: "Effluents from the Integrated Aluminium Industry: Characterisation and possible Uses, in Industry and Environment 14(1), 93-100, 1991
- MEENS, M.; Moyson, F.: "Schrottverarbeitung bei der MHO in Overpelt", in: Aufbereitungstechniken in Hüttenwerken, 21. metallurgisches Seminar (GDMB, wuppertal: 17.-19.11.1988)
- METALLWERKE REFONDA AG, 1991: Entsorgung von Sonderabfällen
- MORITZ D.: "Krätzebehandlung in Aluminiumhütten und Halbzeuggießereien", in Aluminium 65(1), 50-54, 1989
- NEUBACHER, F. et al.: "Minimierung von Emissionen durch gesamtheitliche Konzeption am Beispiel des Alu-Recycling Kombi-Projektes", Vortrag an der TU Graz im September 1992.
- NILU: "Durchführung von 12 Dioxinanalysen von Salzbadkuchen", Norsk Institut for Luftforskning, Schreiben vom 01.10.1991.
- NILU: Analysenbericht vom 10.09.1993

- ORBON, H.: "Aluminium-Recycling am Beispiel einer Sekundärhütte" in: Agst, J.: Zweite duisburger Recycling-Tage (Moers 1987)
- ORBON, H.: "Sink-Schwimmaufbereitung - Anforderungen an das Aufbereitungsverfahren aus der Sicht einer Sekundäraluminiumhütte", Vortrag im Rahmen der 5. Duisburger Recycling-Tage.
- PACHZELT, R.: "Trennung von NE-Schrott aus dem KFZ", in: Aufbereitungstechniken in Hüttenwerken, 21. metallurgisches Seminar (GDMB, wuppertal: 17.-19.11.1988)
- PAWLEK, R.: "Verfahren zur Aufarbeitung des Kathodenausbruchs von Aluminiumelektrolyseöfen", in: Abfallstoffe in der NE-Metallurgie. Wiederverwertung oder Deponie?, VCH Verlagsges., 1986, 117-132
- PECHINEY ALUMINIUM ENGINEERING, 1986: Original Dross Compression Process - Compal
- PER, 1993: Use of Bauxite Residue in the Peel-Harvey Coastal Plain Catchment, Public Environmental Review, Department of Agriculture, Western Australia
- REISNER, J.; Vest, H.; Krüger, J.: "Aluminium- und Weißblechgetränkedosen im Materialkreislauf", Metall 44 (1990), 848-54
- RÖMPP Chemie Lexikon, 9. erweiterte und neu bearbeitete Auflage (Stuttgart, New York: 1989-1992)
- ROSSEL, H.: "Physikalische Aufbereitung von Aluminiumschrotten", in: Aufbereitungstechniken in Hüttenwerken, 21. metallurgisches Seminar (GDMB, wuppertal: 17.-19.11.1988)
- RSI RESOURCE STRATEGIES INC., 1991: Aluminium Industry Issues.
- SCHMITZ, C.: "Konzept einer Umschmelzanlage für gebrauchte Getränkedosen" in: Agst, J.: Zweite Duisburger Recycling-Tage (Moers 1987)
- SINTEF, 1991/1: "Analysenrapport", Stiftelsen for industriell ok teknisk Forskning ved Norges Tekniske Hogskole, J.Nr.1473/91 vom 26.06.1991,
- SINTEF, 1991/2: "Umweltkonsequenzen bei der Deponierung von Resten von Salzschlacken", Stiftelsen for industriell ok teknisk Forskning ved Norges Tekniske Hogskole, Schreiben vom 02.07.1991.
- SFT, 1989/1: "Genehmigung für Verunreinigungen durch Gase und dgl.", Statens forurensningstilsyn, 09.03.1989.
- SFT, 1989/2: "Recycling of salt slag from secondary aluminiumsmelters", Schreiben der Statens forurensningstilsyn vom 28.11.1989.
- SFT, 1991: "Erlaubnis zur Deponierung von Produktionsabfall", Statens forurensningstilsyn, 09.07.1991.
- SFT, 1992: Schreiben vom 07.02.1992, Statens forurensningstilsyn.
- STOKKE INDUSTRI AS: "Schätzung von Grundverhältnissen m.w. in Verbindung mit der Deponierung von Industrieabfall in den früheren Rodsand Gruben", Stokke Industrie AS, 01.03.1991.
- ULLMANN, 1992: Encyclopedia of Industrial Chemistry, A1
- UBA, 1989: Die Immissionssituation um das Aluminiumwerk der AMAG Ranshofen, Monographien, Bd.9
- UBA, 1990: Unterlagen zur Altlast in Ranshofen
- UBA, 1992: Bericht über den Industriestandort Lend (Salzburger Aluminium AG).
- UBA, 1993: Altlasten-Nr. 7633-102/001
- UNEP, 1989/1: "Basel Convention On The Control Of Transboundary Movements Of Hazardous Wastes And Their Disposal", United Nations Environment Programme, 22.03.1989.

- UNEP, 1989/2: "London Guidelines For The Exchange Of Information On Chemicals In International Trade", UNEP: Decision 15/30 des Governing Councils vom 25.05.1989.
- URBACH, R. et al.: "Aufarbeitungsmöglichkeiten dioxinhaltiger Filterstäube aus Aluminiumschmelzwerken, Veröffentlichung in Metall in Sept. 1993
- VDI, 1987: Entwurf zur VDI-Richtlinie Emissionsminderung: Aluminiumschmelzflußelektrolyse, VDI 2286 (Gründruck), VDI Verlag GmbH, Düsseldorf
- WAWRSCHINEK, G.; persönliche Mitteilung (31.5.1994)
- WILHELM, M.: "Wirtschaftliche Metallrückgewinnung durch Ausrühren von Aluminiumkrätze", Metall 38/8 (1984) 762-5
- WÖHLK, W. et al.: 1987: "Recycling of Cover Salt in the Secondary Aluminium Industry", Crystallization and precipitation: Proc. Int. Symp., Saskatoon, Saskatchewan, Canada.
- YERUSHALMI, D., 1992: US Patent Nr.5102453, 7.4.1992.