

# **STAND DER TECHNIK IN DER SEKUNDÄRALUMINIUMERZEUGUNG IM HINBLICK AUF DIE IPPC-RICHTLINIE**

Udo BOIN  
Thomas LINSMEYER  
Franz NEUBACHER  
Brigitte WINTER

MONOGRAPHIEN

Band 120

M-120

Wien, 2000

**Projektleitung**

Brigitte Winter

**Autoren**

Udo Boin (UV&P)  
Thomas Linsmeyer (UV&P)  
Franz Neubacher (UV&P)  
Brigitte Winter (UBA)

**Übersetzung**

Matthew Lamb  
Ulrike Stärk

**Titelphoto**

Kriterien für die Zuordnung von Schrotten zu den einzelnen Schmelzaggregaten

Das Umweltbundesamt möchte sich bei den österreichischen Sekundäraluminiumerzeugern für die kooperative Zusammenarbeit herzlich bedanken.

Dank ergeht an Herrn Dipl.-Ing. Josef Stubenvoll (TBU) für die Bereitstellung der Daten zur Kostenabschätzung der Emissionsminderungstechnologien und für die Durchsicht des Kapitels 2.6.5.

**Impressum**

Medieninhaber und Herausgeber: Umweltbundesamt GmbH (Federal Environment Agency Ltd)  
Spittelauer Lände 5, A-1090 Wien (Vienna), Austria

Druck: Riegelnik, 1080 Wien

© Umweltbundesamt GmbH, Wien 2000  
Alle Rechte vorbehalten (all rights reserved)  
ISBN 3-85457-534-3

## INHALT

	Seite
<b>ZUSAMMENFASSUNG DES UMWELTBUNDESAMTES</b> .....	5
<b>SUMMARY FROM THE FEDERAL ENVIRONMENT AGENCY</b> .....	16
<b>1 EINLEITUNG</b> .....	27
1.1 Aufgabenstellung, Zielsetzung.....	27
1.2 Bezug zur IPPC-Richtlinie.....	27
1.3 Historisches zu Aluminium .....	28
1.4 Bedeutung und Eigenschaften von Aluminium.....	29
1.5 Zahlen zur (Sekundär)-Aluminiumproduktion.....	29
<b>2 TECHNOLOGIE IN DER SEKUNDÄRALUMINIUMERZEUGUNG</b> .....	31
<b>2.1 Einsatzmaterial</b> .....	32
2.1.1 Schrottarten.....	32
2.1.2 Einstufung von Schrotten.....	34
2.1.3 Verschmutzungsgrad.....	34
2.1.4 Aufbereitungsverfahren.....	35
2.1.5 Chargengattierung .....	38
<b>2.2 Technologien und Ofentypen</b> .....	40
2.2.1 Schmelzverfahren .....	41
2.2.2 Herdöfen .....	42
2.2.3 Drehtrommelöfen.....	44
2.2.4 Induktionsöfen .....	46
2.2.5 Kriterien zur Auswahl geeigneter Schmelzöfen.....	47
2.2.6 Schmelzereinigung.....	50
2.2.7 Legieren .....	53
2.2.8 Legierungswechselhäufigkeit .....	53
<b>2.3 Energieeinsatz</b> .....	53
2.3.1 Energieeinsatzformen.....	53
2.3.2 Energiemenge/t Sekundäraluminium.....	53
2.3.3 Energiemenge/t Einsatzmaterial.....	54
<b>2.4 Produkte</b> .....	55
2.4.1 Genormte und vereinbarte Knet- und Gußlegierungen.....	55
2.4.2 Lieferformen .....	55
2.4.3 Lohnschmelzarbeit, Umschmelzaluminium .....	55
<b>2.5 Reststoffe – Abfall</b> .....	56
2.5.1 Salzschlacke .....	57
2.5.2 Filterstaub.....	63

2.5.3	Ofenausbruch .....	66
2.5.4	Krätze (skimmings) .....	66
2.5.5	Allgemeine Überlegungen zur Vermeidung bzw. Verminderung von Abfällen aus der (Sekundär-)Aluminiumproduktion .....	68
<b>2.6</b>	<b>Luftemissionen</b> .....	<b>70</b>
2.6.1	Zusammensetzung der Abluft, Emissionsquellen .....	70
2.6.2	Emissionen als Konzentration .....	71
2.6.3	Dioxine und Furane .....	74
2.6.4	Klimarelevante Emissionen .....	75
2.6.5	Verfahren zur Emissionsminderung .....	76
<b>2.7</b>	<b>Abwasseremissionen</b> .....	<b>86</b>
2.7.1	Emissionsquellen .....	86
2.7.2	Abwasseranfall/Wasserverbrauch .....	86
2.7.3	Abwasserbehandlung .....	87
<b>3</b>	<b>NEUE TECHNOLOGIEN</b> .....	<b>90</b>
<b>3.1</b>	<b>Schrotte und Schrottaufbereitung</b> .....	<b>90</b>
3.1.1	Analytik .....	90
3.1.2	Dosenrecycling .....	90
<b>3.2</b>	<b>Schmelzen/Schmelzebehandlung</b> .....	<b>92</b>
<b>3.3</b>	<b>Abgas- und Filterstaubbehandlung</b> .....	<b>92</b>
<b>3.4</b>	<b>Salzschlacke- und Krätzebehandlung</b> .....	<b>93</b>
<b>4</b>	<b>SEKUNDÄRALUMINIUMERZEUGUNG IN ÖSTERREICH</b> .....	<b>94</b>
4.1	ARHG-Ranshofen .....	94
4.2	ASA-Ranshofen .....	94
4.3	SAG Lend .....	94
4.4	Hütte Klein-Reichenbach .....	94
<b>5</b>	<b>VERGLEICH PRIMÄR- UND SEKUNDÄRALUMINIUMERZEUGUNG</b> .....	<b>95</b>
5.1	Ressourceneinsatz .....	97
5.2	Emissionen .....	98
5.3	Stoffflußdiagramm .....	101
<b>6</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN DES UMWELTBUNDESAMTES ZUR SEKUNDÄRALUMINIUM-ERZEUGUNG</b> .....	<b>102</b>
<b>7</b>	<b>GLOSSAR UND ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>105</b>
<b>8</b>	<b>REFERENZ- UND LITERATURANGABEN</b> .....	<b>107</b>

## ZUSAMMENFASSUNG DES UMWELTBUNDESAMTES

Die vorliegende Studie behandelt angewandte Technologien, Einsatzstoffe, produktspezifische Emissionen und Ressourcenverbrauch in der Sekundäraluminium-Erzeugung. Das Aufkommen, die Vermeidung und Behandlung von Abfällen und somit auch die Verwertung der Reststoffe aus der Sekundäraluminiumindustrie werden unter Berücksichtigung der österreichischen Situation beschrieben. Verfahren zur Emissionsminderung werden beschrieben und Kostenabschätzungen für den Einsatz dieser Technologien gegeben. Dabei werden auch bei vergleichbaren Anwendungen eingesetzte emissionsmindernde Maßnahmen zur Kostenabschätzung herangezogen.

Die Studie wurde im Hinblick auf die EU-Richtlinie über die „Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung“ (RL 96/61/EC) und als Hilfestellung für die von der Europäischen Kommission errichtete „Technical Working Group“ über Nichteisenmetalle verfaßt.

In Abhängigkeit von den Einsatzmaterialien und der gewünschten Produktqualität kommen in der Sekundäraluminium-Erzeugung verschiedene Schmelzaggregate zur Anwendung. Die Auswahl des bestgeeigneten Schmelzverfahrens wird vom Metallanteil der Schrotte (Oxidanteil), Art und Umfang der Verunreinigungen (Glühverlust), der Schrottgeometrie, der Legierungswechselhäufigkeit und Betriebsweise bestimmt. Es werden **Kriterien für die Zuordnung von Schrotten zu den einzelnen Schmelzaggregaten** abgeleitet (Abb. I und Abb. II).

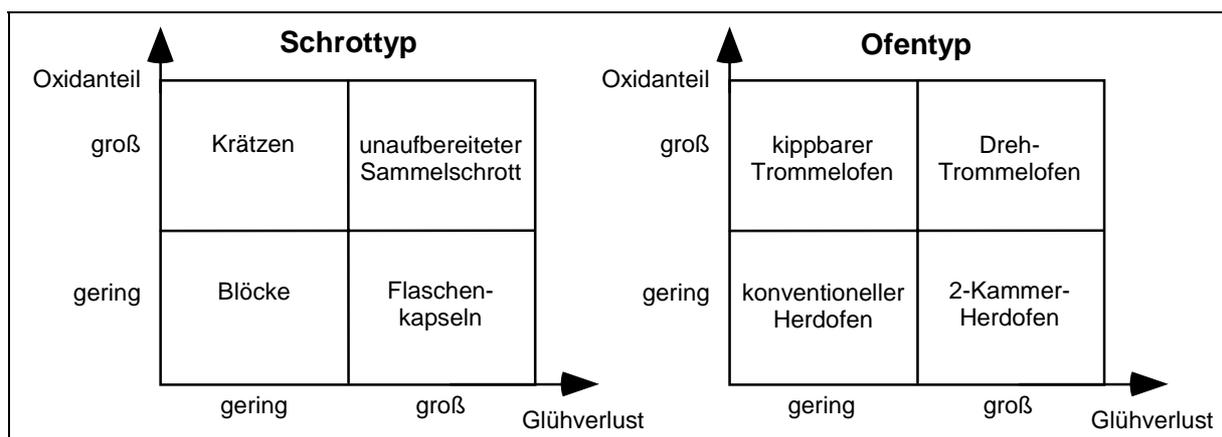


Abb. I: Zuordnung von Schrottarten u. Ofenauswahlkriterien gemäß Oxidanteil u. Glühverlust [BOIN, 1997]

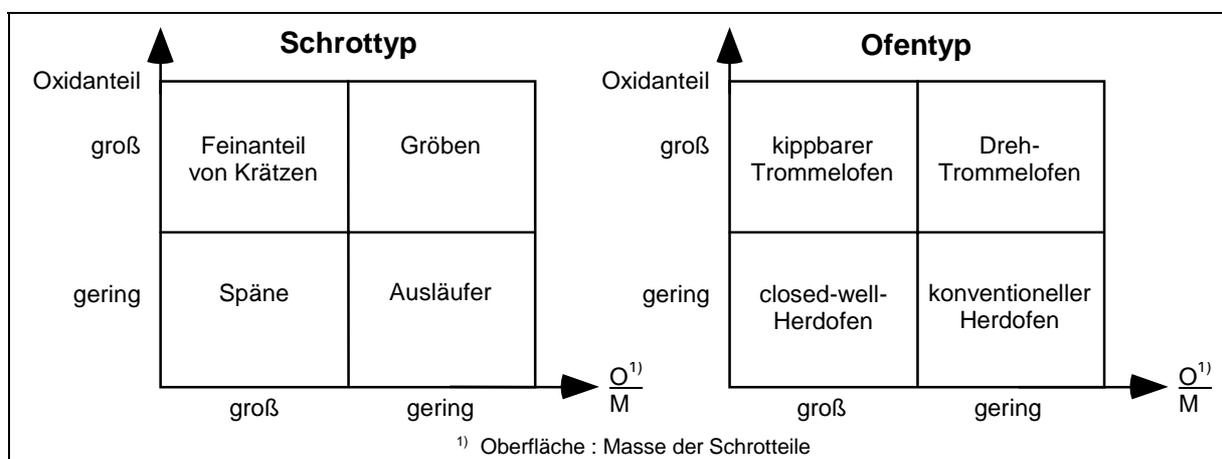


Abb. II: Zuordnung von Schrottarten und Ofenauswahlkriterien gemäß Oxidanteil und Verhältnis von Oberfläche zu mittlerer Teilchengröße [BOIN, 1997]

Dieser qualitativen Zuordnung können in Abbildung III quantifizierbare Kriterien für die Zuordnung von Schrotten zu den einzelnen Schmelzaggregaten entnommen werden.

## SCHMELZAGGREGATE

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, Schrotte mit oder ohne Salz einzuschmelzen. Als Schmelzaggregate finden die salzbetriebenen Drehtrommelöfen, die starr oder kippbar ausgeführt sind, salzlos betriebene Herdöfen (Closed-well Herdöfen, Side-well Herdöfen) oder Induktionsöfen Verwendung.

Für organisch verunreinigte, jedoch oxidarme Schrotte, ist der ohne Schmelzsalz betriebene **Closed-well Herdofen** das geeignete Schmelzaggregat.

In **Side-well Herdöfen** kann großstückiger Schrott in einem Schmelzbecken (Vorherd, side-well) mit flüssigem Metall überflutet werden oder feinstückiger Schrott in einer Metalltrombe eingezogen werden. Dadurch eignet sich dieses Schmelzaggregat besonders für das Einschmelzen von Spänen. Wenn möglich werden Späne in Closed well Öfen, Side well Öfen oder auch in Induktionsöfen eingeschmolzen. Steigt jedoch der Feinanteil und/oder der Oxidanteil so ist der Drehtrommelofen das bessere Schmelzaggregat, ebenso bei Mischspänen und bei häufigerem Legierungswechsel.

Je höher der Oxidanteil in einem Schrott ist (Kategorien IV bis VI, Abb. III), desto eher wird dieser in einem Drehtrommelofen eingeschmolzen. Hierbei wird zwischen starren und kippbaren Drehtrommelöfen unterschieden. Durch Reduktion des Salzfaktors (kg Salz/kg NMP im Einsatz; 1,8-1,0 für **starre Drehtrommelöfen**; bis auf <0,5 bei kippbaren Drehtrommelöfen) ist ein Einsparungspotential für den Anfall von Salzschlacke gegeben. Krätzen werden hauptsächlich unter Salz geschmolzen; der Einsatz des **kippbaren Trommelofens** mit der gleichzeitigen Anwendung eines geringen Salzfaktors (<0,5) vermindert in diesem Fall den Salzschlackenfall (eigentlich Salzkuchen).

**Induktionsöfen** werden in den Sekundärschmelzwerken aufgrund der Anforderung nach sauberen, praktisch oxidfreien Schrotten nur vereinzelt eingesetzt. Haupteinsatzgebiet für Induktionsöfen sind die Gießereien.

Eine konsequente **Schrottvorbehandlung** ermöglicht den Einsatz des aufbereiteten Schrottes im jeweils best geeigneten Schmelzaggregat. Dadurch können Emissionen in die Luft und der Anfall von Abfällen bzw. Reststoffen minimiert werden. Allerdings müssen auch Vorkehrungen für die Behandlung und Entsorgung der Abfälle und Minderung der Emissionen aus der Vorbehandlung der Schrotte gemäß Stand der Technik getroffen werden. Organisch verunreinigter, oxidarmer Schrott kann in Closed-Well Öfen geschmolzen werden, dabei kann der Energieinhalt der organisch belasteten Schrotte durch die integrierte Nachverbrennung für den Schmelzprozeß genutzt werden. Dabei müssen jedoch die Emissionen ebenfalls gemäß Stand der Technik reduziert werden.

Umweltrelevante Parameter der Sekundäraluminium-Erzeugung sind in Abhängigkeit von den eingesetzten Schrotten, deren Vorbehandlung, dem eingesetzten Schmelzaggregat und Abluftreinigungsverfahren Abfälle bzw. Reststoffe, Luftemissionen sowie der Energieeinsatz.

## ENERGIEVERBRAUCH

Für die unterschiedlichen Schmelzaggregate (Induktionsofen, Closed-well Herdöfen, Drehtrommelofen starr und kippbar), die Spänetrocknung, das Raffinieren, Legieren und Warmhalten werden **typische Energieverbräuche** angegeben (Tab. I).

Tab. I: Typische Energieverbräuche der Sekundäraluminiumschmelzverfahren

	Eingesetzte Schrotte	Typische Metallausbeute	Ange- nommene Metallausbeute	Tatsächlicher Energiebedarf		Mittlerer Erdgasbedarf bei Hu =36 MJ/Nm <sup>3</sup>
		(%)	(%)	(MJ/t Einsatz)	(MJ/t Metall)	(Nm <sup>3</sup> /t Metall)
<b>Späne- trocknung</b>	Feuchte Späne	80-90	85	1.836-3.213	2.160-3.780	60-105
<b>Schmelzen</b>						
Induktions- ofen	Masseln, Blöcke, Späne	95-99	98	2.470-3.276 <sup>1)</sup>	2.520-3.340	
Closed-well- Herdofen	sauberer Stückschrott, org. verun- reinigter Schrott	88-95	92	2.320-3.960	2.520-4.300	70-120
Dreh- trommelofen (starr)	Späne, Gröben, Shredder- Schrott, Neuschrott	75-92	74	3.260-3.480	4.410-4.700	123-130
Dreh- trommelofen (starr + O <sub>2</sub> - Brenner)	Späne, Gröben, Shredder- Schrott, Neuschrott	75-92	74	1.385-1.520	1.870-2.050	52-57
Dreh- trommelofen (kipubar)	Krätzen, Gröben	50-80	78	ca. 2.080	ca. 2.670	ca. 75
<b>Raffinieren, Legieren, Warmhalten</b>	Legierungs Elemente wie Si, Cu, Zn, Ti, Mn, Mg, Ni	95-98	97	1.400-2.520	1.440-2.600	40-72
<b>Gesamt Schmelz- werk</b>		75-85	80	3.460-7.200	4.320-9.000	120-250

<sup>1)</sup> inkl. Warmhalten des Metallsumpfs

## ABFÄLLE BZW. RESTSTOFFE

Die **Abfälle bzw. Reststoffe** aus der Sekundäraluminiumerzeugung sind gemäß Stand der Technik zu behandeln und zu verwerten bzw. zu entsorgen. Die wichtigsten Abfälle bzw. Reststoffe aus der Sekundäraluminium-Erzeugung, die durchschnittlich anfallenden Mengen und die Behandlungsmethoden werden in Tabelle II angeführt.

Tab. II: Abfälle der Sekundäraluminiumerzeugung

Abfall bzw. Reststoff (ÖNORM S 2100)	Anfall	Menge	Behandlung	Anmerkung des UBAs zur Behandlung
<b>Salzschlacke</b> (31211)	Schmelzen im Drehtrommelofen	300-500 kg/t Al	Aufarbeiten mit Löse-/Kristallisationsverfahren, Gewinnung der Wertstoffe Al-Granulat, Mischsalz, NMP <sup>*)</sup>	Deponieverbot
<b>Filterstaub</b> (31217)	Abgasreinigung	10-35 kg/t Al 0,1-10 kg/t A <sup>*)</sup>	Deponie mit vorgelagerter Behandlung oder Untertagedeponie; teilw. gemeinsam mit Salzschlacke aufgearbeitet (vorher jedoch Neutralisation auf Na-Basis notwendig); Einsatz in Stahlindustrie; oder bei Einsatz von NaHCO <sub>3</sub> als Additiv ist Filterstaub als Teil des Abdecksalz im DTO einsetzbar.	keine obertägige Deponierung, thermische Behandlung möglich
<b>Ofenausbruch</b> (31108, 31103)	Schmelzofen	ca. 2 kg/t Al	teilweise gemeinsam mit Krätze aufgearbeitet, sonst Laugung + Deponie	keine obertägige Deponierung, Herstellung von Ofenspritzmassen
<b>Krätze</b> (31205)	alle Öfen die ohne Abdecksalz arbeiten, Schmelzereinigung, Gießerei	ca. 25 kg/t Al 40-80 kg/t Al <sup>*)</sup>	Aufarbeitung, Einsatz der Gröbe im Drehtrommelofen, des Krätze Staubes in der Salzschlackenaufbereitung	Deponieverbot

<sup>\*)</sup> bei Einsatz des Closed-Well Ofens

<sup>\*\*)</sup> Nicht metallische Produkte (oxidische Beimengungen von Al-Schrotten)

**Krätzen** sind prozeßbedingte Abfälle bzw. Reststoffe, die vor allem aus Aluminium und Aluminiumoxid bestehen. Zur Aufbereitung wird die Krätze gemahlen, wobei der mineralische Anteil als Staub abgetrennt wird. Das konzentrierte Produkt (Gröbe) wird im Sekundäraluminiumschmelzwerk im Drehtrommelofen wieder eingeschmolzen. Die Feinfraktion (Krätze staub) kann bei der Salzschlackenaufbereitung eingesetzt werden.

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. Eine mögliche Behandlung von Filterstaub ist der Einsatz bei der Produktion von Entschwefelungsmitteln für die Stahlindustrie. Thermische Verfahren können zur Aufarbeitung von Filterstäuben eingesetzt werden. Durch die vorgeschaltete thermische Behandlung sollte eine Aufarbeitung von Filterstäuben in Salzschlackenaufbereitungsanlagen möglich sein. Bei Einsatz von Natriumbicarbonat als Additiv kann der Filterstaub als Abdecksalz von Drehtrommelöfen eingesetzt werden.

**Ofenausbruch** ist prozeßbedingt und daher nicht vermeidbar, er kann zur Herstellung von Ofenspritzmassen eingesetzt werden; in geringem Umfang wird Ofenausbruch wie Krätze aufgearbeitet. In Österreich wird Ofenausbruch der SNR 31108 gemäß Festsetzungsverordnung 1997, BGBl. II 227/1997 als gefährlicher Abfall eingestuft. Ofenausbruch, der nicht die Eigenschaften der Anlage 2 der Festsetzungsverordnung aufweist, fällt unter SNr. 31103 und ist damit kein gefährlicher Abfall. Damit wäre eine obertägige Deponierung erlaubt, eine Verwertung des anfallenden Ofenausbruchs sollte jedoch angestrebt werden.

Das Einschmelzen von Schrotten unter Salz im Drehtrommelofen bedingt den Anfall von **Salzschlacke**. Abdecksalz dient bei der Sekundäraluminiumproduktion zum Schutz vor Oxidation und zur Aufnahme von Verunreinigungen aus der Schmelze. Die Aufbereitung von Salzschlacke erfolgt gemäß Stand der Technik nach dem Löse-Kristallisationsverfahren, die Wertstoffe Aluminium-Granulat, Mischsalz und NMP werden dabei gewonnen.

## LUFTEMISSIONEN

Der Einsatz von Aluminiumschrott in Sekundärschmelzwerken ist mit der Bildung und **Emission von luftverunreinigenden Stoffen** wie Staub, Schwefel- und Stickstoffoxiden, Kohlenmonoxid, unverbrannten Kohlenwasserstoffen, halogenierten Verbindungen wie Dioxinen und Furanen sowie gasförmigen anorganischen Chlor- und Fluorverbindungen verbunden.

Aus Grenzwerten berechnete Emissionen werden einerseits den einzelnen Schmelzaggregaten zugeordnet, andererseits werden typische spezifische Emissionen von Sekundäraluminiumschmelzwerken angeführt (Tab. III), die unter den aus den Grenzwerten berechneten Emissionsfaktoren liegen.

Tab. III: Typische spezifische Emissionen von Sekundäraluminiumschmelzwerken

Schmelz- aggregat	Eingesetzte Schrotte	Gesamt-Emissionen (g/t Metall)					
		HCl	HF	Staub	NO <sub>2</sub>	C <sub>org</sub>	CO
Kippbarer Herdofen	sauberer Stückschrott	2-20	0,1-1,5	1-45	200-900	5-40	30-180
Closed-well- Ofen	sauberer Stückschrott, org. verunreinigter Schrott	20-600	0,2-1,5	2-25	8-900	5-35	20-100
Drehtrommel- ofen (starr)	Späne, Gröben, Shredder-schrott,	50-400	3-15	4-55		150-250	

## ABGASREINIGUNG

Die **Abgasreinigung** in Umschmelzwerken erfolgt gemäß Stand der Technik mittels Gewebefilter und Trocken- bzw. Halbtrockenverfahren oder Flugstromverfahren. Durch Einblasen von Aktivkoks und Rezirkulation des Sorbens bzw. einer Kombination aus quasi trockenem Verfahren mit nachgeschaltetem Wäscher kann die Abscheideleistung v.a. der sauren Komponenten verbessert werden. Alternativ zu dieser Kombination kann auch ein entsprechend größer dimensionierter Wäscher eingesetzt werden, wobei allerdings größere Mengen an Schlamm und Abwasser anfallen.

Emissionen von **Staub** und damit verbundene Emissionen staubförmiger Schwermetalle und partikelförmig gebundener Dioxine und Furane sind wesentlich von den Verunreinigungen der eingesetzten Schrotte und der Abscheidetechnologie abhängig. Moderne Gewebefilter erlauben die sichere Einhaltung von unter 5 mg Staub/Nm<sup>3</sup>.

Trockensorptions- bzw. Halbtrockenverfahren teilweise in Kombination mit nachgeschaltetem Wäscher erlauben überdies auch die Abscheidung der **sauren Schadstoffe** (HCl, HF, SO<sub>2</sub>) aus dem Abgas.

Die wirksamste Maßnahme zur Reduktion von **CO- und C<sub>org</sub>-Emissionen** in Sekundäraluminiumschmelzwerken ist neben geregelter Prozeßführung eine geeignete Schrottaufbereitung, z.B. durch Abschwelen von organischen Verunreinigungen des Einsatzmaterials. Die dabei entstehenden Emissionen sind ebenfalls gemäß Stand der Technik zu minimieren, um Verlagerungen innerhalb der Prozeßkette zu vermeiden.

Durch Optimierung der Prozeßführung, gestufte Verbrennungsluftzufuhr und Verwendung von Low-NO<sub>x</sub>-Brennern ist eine **NO<sub>x</sub>-Emission** von 100 mg/Nm<sup>3</sup> bezogen auf den gemessenen Sauerstoff erreichbar.

Emissionsminderungsmaßnahmen für **Dioxine und Furane** basieren entweder auf der Abscheidung der partikelgebundenen PCDD/F, wie z.B. in Gewebe- und Elektrofiltern, auf der Abscheidung gasförmigen und partikelgebundenen PCDD/F, wie z.B. in Wäschern, beim Flugstromverfahren und in Sprühabsorbern (in Verbindung mit Gewebe- oder Elektrofiltern und Einblasen eines Adsorbens, z.B. Aktivkoks) oder auf der thermischen oder katalytischen Zerstörung der Dioxine und Furane. Mit diesen Verfahren sind PCDD/F-Konzentrationen von mindestens 0,1 ng/Nm<sup>3</sup> erreichbar.

**Verfahren zur Emissionsminderung** werden beschrieben und **Kostenabschätzungen für den Einsatz dieser Technologien** gegeben. Zur Kostenabschätzung werden der Einsatz eines Gewebe- oder Elektrofilters (Tab. IV), der Einsatz eines einfachen Flugstromverfahrens mit Gewebefilter (Tab. V), der Einsatz des quasi trockenen Verfahrens mit Natriumbicarbonat mittels Sprühabsorber, Gewebefilter und Rezirkulation des Sorbens (Tab. VI), der Einsatz des quasi trockenen Verfahrens mittels Sprühabsorber, Gewebefilter und Rezirkulation des Sorbens (Tab. VII), der Einsatz des Naßverfahrens (Tab. VIII) und eine Kombination aus quasi trockenem Verfahren mit nachgeschaltetem Wäscher (Tab. IX) herangezogen.

Tab. IV: Wesentliche Positionen der Kosten für die **Staubminderung** von Rohgaswerten von 600 mg/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> auf garantierte Reingaswerte von 5 mg/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> (**Gewebefilter**) bzw. 5-15 mg/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> (**Elektrofilter**) für eine Abgasmenge von 40.000 Nm<sup>3</sup>/h

	Kosten in ATS/t Metall	
	Gewebefilter	Elektrofilter
Produzierte Menge Metall (t/a)	40.000	
Betriebsstunden (h/a)	5.500	
<b>Grundlagen für die jährliche Belastung</b>		
Investitionskosten (Mio. ATS)	6	
Anzahl der Jahre	15	
Zinssatz (%)	6	
Jährl. Rückzahlung inkl. Zinsen (Mio. ATS/a)	0,62	
<b>Anteilige Investitionskosten inkl. Zinsen</b>	<b>15,44</b>	<b>15,44</b>
<b>Wartung + Verschleiß</b>		
Gewebefilter (Mio. ATS/a)	0,33	8,33
<b>Proportionalkosten</b>		
Elektrische Energie: Gewebefilter	51 kWh/h á 1,0 ATS/kWh	7,00
Elektrische Energie: Elektrofilter	24 kWh/h á 1,0 ATS/kWh	3,30
<b>Technologiekosten</b>		
Filterstaubentsorgung (10-35 kg/t Metall)	2.000-4.000 ATS/t	20-140
<b>Gesamtkosten</b>	<b>ca. 50-170</b>	<b>ca. 40-160</b>

Tab. V: Wesentliche Positionen der Kosten für die Emissionsminderung mittels **einfachem Flugstromverfahren unter Einsatz eines Gewebefilters** bei Zugrundelegung von Rohgaswerten von ca. 500 mg SO<sub>2</sub>/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub>, von ca. 300 mg HCl/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> und von ca. 50 mg HF/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> und garantierten Reingaswerten von unter 300 mg SO<sub>2</sub>/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub>, unter 30 mg HCl/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> und von unter 5 mg HF/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> sowie für die Staubabscheidung von Rohgaswerten von ca. 600 mg/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> und Reingaswerten von unter 5 mg Staub/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> bei einer Abgasmenge von 40.000 Nm<sup>3</sup>/h

	Kosten		
		ATS/Einheit	ATS/t Metall
Produzierte Menge Metall (t/a)	40.000		
Betriebsstunden (h/a)	5.500		
<b>Grundlagen für die jährliche Belastung</b>			
Investitionskosten (Mio. ATS)	15		
Anzahl der Jahre	15		
Zinssatz (%)	6		
Jährl. Rückzahlung inkl. Zinsen (Mio. ATS/a)	1,54		
<b>Anteilige Investitionskosten inkl. Zinsen</b>			<b>38,61</b>
<b>Wartung + Verschleiß</b> (% der Investkosten)	3		<b>11,25</b>
<b>Proportionalkosten</b>			
Bedarf CaO (kg/t Metall)	22	1 ATS/kg	22
Bedarf elektrische Energie (kWh/h)	102	1,0 ATS/kWh	14,03
<b>Technologiekosten</b>			
Filterstaubentsorgung (kg/t Metall)	35-60	2.000-4.000 ATS/t	70-240
<b>Gesamtkosten</b>			<b>ca. 156-326</b>

Tab. VI: Wesentliche Positionen der Kosten für die **quasi-trockene Minderung mit Natriumbicarbonat** unter Zugrundelegung von SO<sub>2</sub>-freiem Abgas (Einsatz von Erdgas) für die Staubabscheidung von Rohgaswerten von ca. 600 mg/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> und Reingaswerten von unter 5 mg Staub/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> mittels **Sprühabsorber und Gewebefilter und Sorptionsrezirkulation** bei einer Abgasmenge von 40.000 Nm<sup>3</sup>/h. Dabei ersetzt Filterstaub einen Teil des Abdecksalzes im Drehtrommelofen, die Verwertung erfolgt schließlich über die Salzschlacke.

	Kosten		
		ATS/Einheit	ATS/t Metall
Produzierte Menge Metall (t/a)	40.000		
Betriebsstunden (h/a)	5.500		
<b>Grundlagen für die jährliche Belastung</b>			
Investitionskosten (Mio. ATS)	14		
Anzahl der Jahre	15		
Zinssatz (%)	6		
Jährl. Rückzahlung inkl. Zinsen (Mio. ATS/a)	1,44		
<b>Anteilige Investitionskosten inkl. Zinsen</b>			<b>36,04</b>
<b>Wartung + Verschleiß</b> (% der Investkosten)	3		<b>10,50</b>
<b>Proportionalkosten</b>			
Bedarf NaHCO <sub>3</sub> (kg/t Metall)	12	3 ATS/kg	36
Bedarf elektrische Energie (kWh/h)	110	1,0 ATS/kWh	15,13
<b>Technologiekosten</b>			
Filterstaubentsorgung über Salzschlacke (kg/t Metall)	15 - 30	1.000 ATS/t	15 - 30
<b>Gesamtkosten</b>			<b>ca. 110-130</b>

Tab. VII: Wesentliche Positionen der Kosten für die **quasi-trockene Minderung** unter Zugrundelegung von Rohgaswerten von ca. 1.000 mg SO<sub>2</sub>/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub>, von ca. 300 mg HCl/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> und von ca. 50 mg HF/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> und garantierten Reingaswerten von unter 200 mg SO<sub>2</sub>/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub>, unter 10 mg HCl/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> und von unter 1 mg HF/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> sowie für die Staubabscheidung von Rohgaswerten von ca. 600 mg/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> und Reingaswerten von unter 5 mg Staub/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> und Reingaswerten von unter 0,1 ng PCDD/F/m<sup>3</sup><sub>tr</sub> mittels **Sprühabsorber und Gewebefilter und Sorptionsrezirkulation** bei einer Abgasmenge von 40.000 Nm<sup>3</sup>/h

	Kosten		
		ATS/Einheit	ATS/t Metall
Produzierte Menge Metall (t/a)	40.000		
Betriebsstunden (h/a)	5.500		
<b>Grundlagen für die jährliche Belastung</b>			
Investitionskosten (Mio. ATS)	20		
Anzahl der Jahre	15		
Zinssatz (%)	6		
Jährl. Rückzahlung inkl. Zinsen (Mio. ATS/a)	2,06		
<b>Anteilige Investitionskosten inkl. Zinsen</b>			<b>51,48</b>
<b>Wartung + Verschleiß</b> (% der Investkosten)	3		<b>15</b>
<b>Proportionalkosten</b>			
Bedarf CaO (kg/t Metall)	22	1 ATS/kg	22
Bedarf Aktivkoks (kg/t Metall)	1	3,5 ATS/kg	3,5
Bedarf elektrische Energie (kWh/h)	110	1,0 ATS/kWh	15,13
<b>Technologiekosten</b>			<b>107,11</b>
Filterstaubentsorgung (kg/t Metall)	35 - 60	2.000 - 4.000 ATS/t	70 – 240
<b>Gesamtkosten</b>			<b>ca. 180 – 350</b>

Tab. VIII: Wesentliche Positionen der Kosten für die Emissionsminderung mittels **Naßverfahren** von ca. 1.000 auf unter 50 mg SO<sub>2</sub>/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub>, von ca. 300 auf unter 5 mg HCl/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> und von ca. 50 auf unter 1 mg HF/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub>, sowie für Staub von ca. 600 auf 5-15 mg Staub/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> mittels **Elektrofilter und Wäscher** bei einer Abgasmenge von 40.000 Nm<sup>3</sup>/h

	Kosten		
		ATS/Einheit	ATS/t Metall
Produzierte Menge Metall (t/a)	40.000		
Betriebsstunden (h/a)	5.500		
<b>Grundlagen für die jährliche Belastung</b>			
Investitionskosten (Mio. ATS)	17		
Anzahl der Jahre	15		
Zinssatz (%)	6		
Jährl. Rückzahlung inkl. Zinsen (Mio. ATS/a)	1,75		
<b>Anteilige Investitionskosten inkl. Zinsen</b>			<b>43,76</b>
<b>Wartung + Verschleiß</b> (% der Investkosten)	2		<b>8,5</b>
<b>Proportionalkosten</b>			
Bedarf Wasser (m <sup>3</sup> /t Metall) und Entsorgung Abwasser	0,3	5 - 30 ATS/m <sup>3</sup>	1,5 – 9
Bedarf CaO (kg/t Metall)	11	1,0 ATS/kg	11
Bedarf elektrische Energie (kWh/h)	90	1,0 ATS/kWh	12,38
<b>Technologiekosten</b>			<b>77,14 – 84,64</b>
Filterstaubentsorgung (kg/t Metall)	10 – 35	2.000 - 4.000 ATS/t	20 - 140
Neutralisationsschlamm Entsorgung (kg/t Metall)	15	1.500 - 3.000 ATS/t	22,5 - 45
<b>Gesamtkosten</b>			<b>ca. 120 - 270</b>

Tab. IX: Wesentliche Positionen der Kosten für die Emissionsminderung mittels **Kombination aus quasi trockenem Verfahren mit nachgeschaltetem Wäscher** von ca. 1.000 auf unter 50 mg SO<sub>2</sub>/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub>, von ca. 300 auf unter 5 mg HCl/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> und von ca. 50 auf unter 1 mg HF/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> sowie für die Staubabscheidung von ca. 600 mg/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> auf unter 5 mg Staub/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> und die Dioxinminderung auf unter 0,1 ng/Nm<sup>3</sup> mittels Sprühabsorber und Gewebefilter bei einer Abgasmenge von 40.000 Nm<sup>3</sup>/h

	Kosten		
		ATS/Einheit	ATS/t Metall
Produzierte Menge Metall (t/a)	40.000		
Betriebsstunden (h/a)	5.500		
<b>Grundlagen für die jährliche Belastung</b>			
Investitionskosten (Mio. ATS)	22		
Anzahl der Jahre	15		
Zinssatz (%)	6		
Jährl. Rückzahlung inkl. Zinsen (Mio. ATS/a)	2,27		
<b>Anteilige Investitionskosten inkl. Zinsen</b>			<b>56,63</b>
<b>Wartung + Verschleiß</b> (% der Investkosten)	3		<b>16,5</b>
<b>Proportionalkosten</b>			
Bedarf CaO (kg/t Metall)	11	1,0 ATS/kg	11
Bedarf Aktivkoks (kg/t Metall)	1	3,5 ATS/kg	3,5
Bedarf elektrische Energie (kWh/h)	160	1,0 ATS/kWh	22
<b>Technologiekosten</b>			<b>109,63</b>
Filterstaubentsorgung (kg/t Metall)	25 - 50	2.000 - 4.000 ATS/t	50 – 200
<b>Gesamtkosten</b>			<b>ca. 160 – 310</b>

## NEUE TECHNOLOGIEN

Weiters wird über **neue Technologien** in der Sekundäraluminiumerzeugung im Bereich der Schrottaufbereitung, des Schmelzens und der Schmelzebehandlung, der Abgasbehandlung und der anfallenden Abfälle bzw. Reststoffe berichtet.

Im Bereich der Schrottaufbereitung eignet sich zur Sortierung und Separation einzelner nichtmagnetischer Metallteile der Schrotte die Röntgenfluoreszenzanalyse. Zur Identifikation einzelner Legierungsbestandteile kann die Atom-Emissions-Spektroskopie genutzt werden.

Feinstückigen Schrott, wie z.B. Späne, kann krätzearm mittels induktiver Metallbadbewegung in einem separaten Reaktor tauchgeschmolzen werden.

Verfahren wurden entwickelt, um Krätzen ohne Salz im Plasma zu schmelzen und damit den hohen Salzschlackenanteil zu vermeiden.

Bei der Behandlung des PCDD/F-haltigen Filterstaubs wird zur Neutralisation der sauren Abgase Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> oder NaHCO<sub>3</sub> anstelle von Ca(OH)<sub>2</sub> eingesetzt, anschließend erfolgt eine Rezirkulation des Filterstaubs mit dem Schmelzsatz im Drehtrommelofen. Natriumbicarbonat bietet den Vorteil, daß es durch die Temperatureinwirkung des heißen Abgases unter Wasserabspaltung in feinsten Natriumcarbonat-Staub zerfällt, der dann mit HCl und HF reagiert. Durch das Fehlen von Calcium im Filterstaub kann dieser einen Teil des Abdecksalzes im Drehtrommelofen ersetzen.

**Primär- und Sekundäraluminium-Erzeugung** werden hinsichtlich Ressourcenverbrauch und Emissionen miteinander verglichen.



Zusammenfassend können folgende **Empfehlungen** betreffend die Sekundäraluminiumerzeugung festgehalten werden:

- Die Schrottvorbehandlung (z.B. Abschwelen, Schwimm-Sink-Verfahren) ist vorrangig zu betrachten, wobei Emissionen gemäß Stand der Technik zu minimieren sind.
- Die vorbehandelten Schrotte sind im für sie best geeigneten Schmelzaggregat einzuschmelzen. Dadurch kann der Anfall von Filterstaub, Salzschlacke und Krätze aber auch die Luftemissionen minimiert werden. Organisch verunreinigte, jedoch oxidarme Schrotte eignen sich zum Schmelzen im salzlos betriebenen Closed-well Herdofen. Feinstückiger Schrott, wie z.B. Späne können im ebenfalls salzlos betriebenen Side-well Herdofen in einer Metalltrombe eingeschmolzen werden. Höher oxidhaltiger Schrott wird unter Salz im Drehtrommelofen eingeschmolzen. Durch Reduktion des Salzfaktors und Einsatz des kippbaren Trommelofen kann der Anfall von Salzschlacke herabgesetzt werden.
- Die aus der Abgasreinigung mittels Kalkhydrat anfallenden Filterstäube dürfen gemäß Stand der Technik ohne geeignete Behandlung keinesfalls obertagig deponiert werden. Verwertungsmöglichkeiten zur Herstellung von Hilfsstoffen für die Stahlindustrie sind bereits Stand der Technik; weitere Behandlungs- bzw. Verwertungsverfahren (z.B. thermische Behandlung) sind in Entwicklung. Bei Einsatz von Natriumbicarbonat als Additiv kann Filterstaub als Teil des Abdecksalzes von Drehtrommelöfen eingesetzt werden.
- Die aufgrund des Salzeinsatzes im Drehtrommelofen anfallende Salzschlacke darf angesichts des hohen wasserlöslichen Anteils und der Freisetzung von toxischen Gasen im Kontakt mit Wasser nicht deponiert werden. Salzschlacke wird gemäß Stand der Technik mittels Löse-Kristallisationsverfahren aufbereitet.
- Besonderes Augenmerk ist auf Ofenausbrüche zu richten, eine Deponierung ohne vorhergehender Behandlung ist aufgrund des teilweise sehr hohen Schadstoffgehalts zu vermeiden.
- Bei der Abgasreinigung in Sekundäraluminiumschmelzwerken sind mehrere Verfahrensvarianten zur Emissionsminderung bekannt, dadurch können Reingaskonzentrationen von Staub von unter 5 mg Staub/Nm<sup>3</sup> und von Dioxinen und Furanen von unter 0,1 ng/PCDD/F/Nm<sup>3</sup> erreicht werden. Mögliche Emissionsminderungsverfahren sind Trocken- bzw. Halbtrockenverfahren in Kombination mit Gewebefilter und Einblasen von Aktivkoks als Adsorbens. Durch Rezirkulation des Sorbens bzw. nachgeschaltete Wäscher kann die Abscheideleistung v.a. der sauren Gase (HCl, HF, SO<sub>2</sub>) erhöht werden.

## SUMMARY FROM THE FEDERAL ENVIRONMENT AGENCY

This study deals with the applied technologies, input materials, production specific emissions and resource consumption in the production of secondary aluminium. The creation, prevention and treatment of waste as well as the recycling of residual material from the secondary aluminium industry are described based on the Austrian situation. Furthermore, cost estimates for selected techniques for the reduction of emissions are given. Processes for reducing emissions are described and cost estimates given. At the same time measures for the reduction of emissions in comparable applications have been used for the cost estimates.

The study was drawn up in view of the EU directive on "Integrated Pollution Prevention and Control" (96/61/EC) and designed as support for the "Technical Working Group" on Non-Ferrous Metals which was set up by the European Commission.

Depending on the input materials and the desired product quality a variety of smelt aggregates are used in the production of secondary aluminium. The selection of the most appropriate smelting process is determined by the metal content of the scrap (oxide content), type and content of impurity (annealing loss), geometry of the scrap, frequency of change in alloy composition and operating conditions. **Criteria for the assignation of scrap to the individual smelt aggregates** were drawn up (fig. I and II).

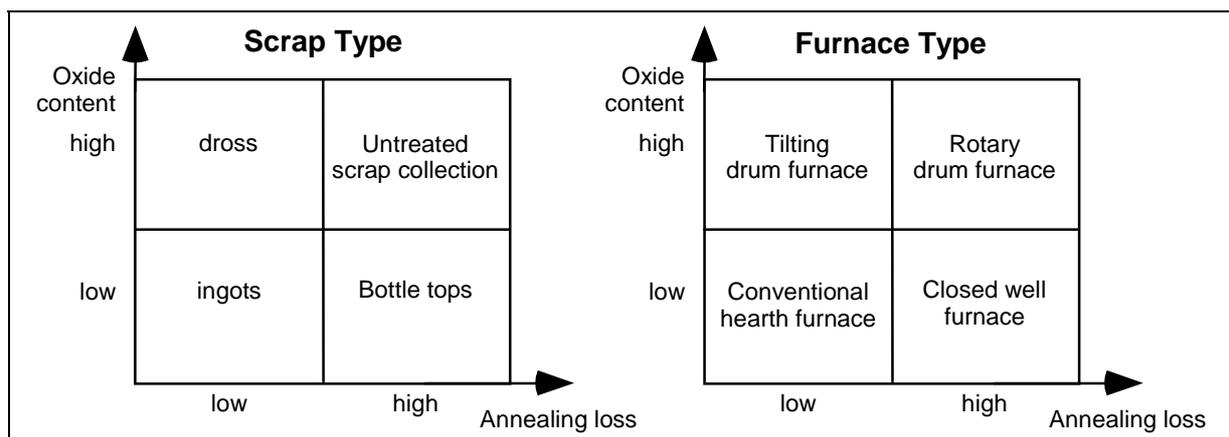


Fig. I: Classification of scrap types and furnace selection criteria by oxide content and annealing loss [BOIN, 1997]

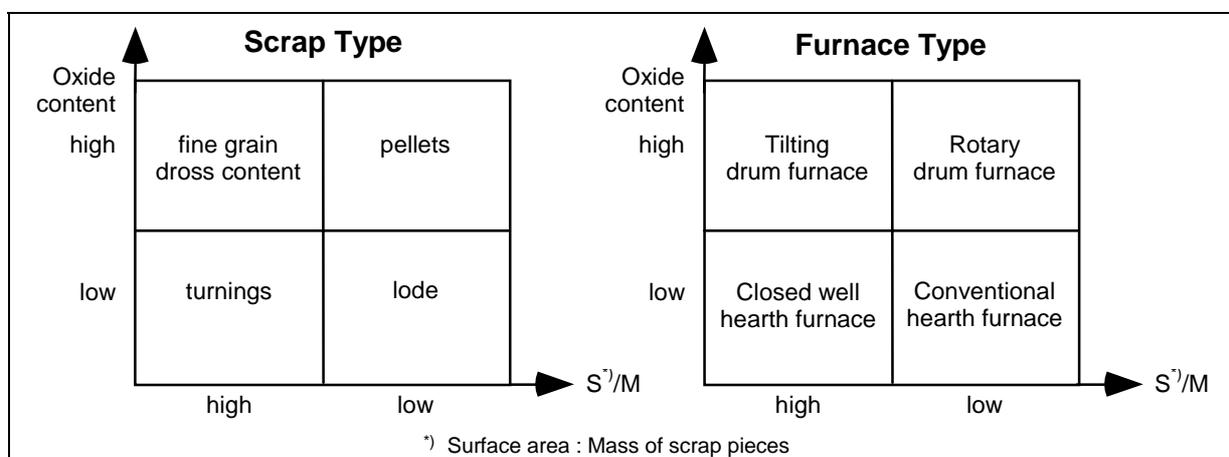


Fig. II: Classification of scrap types and furnace selection criteria by oxide content and ratio of surface area to intermediate part size [BOIN, 1997]

From this qualitative classification, it is possible to take quantifiable criteria for the assignment of scrap types to the individual melt aggregates as in figure III.

## SMELT AGGREGATES

Basically it is possible to melt down scrap with or without the application of salt. The rotary drum furnace, either static or tilting, is the apparatus used for saline operation. Hearth furnaces (Closed-well or Side-well) and induction furnaces are normally used without salt.

The appropriate smelt aggregate for organically contaminated scrap with a low oxide content is the **closed-well hearth furnace**, which does not require salt.

In **side-well furnaces**, coarse scrap can be flooded with molten metal in a melting bath (pre-heat chamber, side-well) or fine scrap can be drawn into a metal spinner. Thus, this aggregate is particularly suitable for the smelting of turnings. Wherever possible turnings are smelted in closed well furnaces, side well furnaces or induction furnaces. The higher the fine and/or oxide content the more appropriate it becomes to use a rotary drum furnace. This is also the case for the smelting of mixed turnings or when the alloy type is changed more frequently.

The higher the oxide content of the scrap (categories IV to VI, fig. III) the more suited it is to being melted in a rotary drum furnace, whereby one distinguishes between fixed and tilting drums. The reduction of the salt factor (kg salt/kg NMP in use; 1.8-1.0 for **static rotary drum furnaces**; up to <0.5 for tilting drums) gives a potential reduction on the volume of salt slag. On the whole, dross is melted under a cover of salt. In this case, the use of the **tilting drum furnace** at the same time as a low salt factor (<0.5) minimises the accumulation of salt slag (or salt cake).

In secondary smelting plants, **induction furnaces** are only used singly due to the necessity for clean, oxide-free scrap. Induction furnaces are mainly used in foundries.

The selection of the most suitable smelt aggregate for the prepared scrap is facilitated by a thorough **pre-treatment of the scrap** thereby minimising emissions into the atmosphere and the accumulation of waste or residue materials. Nevertheless precautions according to the state of the art must also be taken in the handling and disposal of waste and the reduction of emissions resulting from the pre-treatment of the scrap.

Organically contaminated scrap with low oxide content can be smelted in a closed well furnace. The energy value of the organically contaminated scrap can be exploited for the smelting process through integrated afterburning. Nevertheless the resulting emissions also have to be reduced according to state of the art.

Environmental parameters of secondary aluminium production are waste and residue materials, emissions into the air as well as energy input, depending on the scrap used, its pre-treatment and the smelt aggregate and exhaust gas cleaning process employed.

## ENERGY CONSUMPTION

**Typical energy consumption levels** are given for the different smelt aggregates (induction furnace, closed-well furnaces, static and tilting rotary drum furnaces), swarf drying, refining, alloying and holding (Tab. I).

Tab. I: Typical energy consumption of secondary aluminium smelting processes

	Scrap	Typical yield of metal	Assumed yield of metal	Actual Energy consumption		Mean consumption of natural gas n.c.v. <sup>2)</sup> =36 MJ/Nm <sup>3</sup> (Nm <sup>3</sup> /t metal)
		(%)	(%)	(MJ/t input material)	(MJ/t metal)	
<b>turnings drying</b>	wet turnings	80-90	85	1,863-3,213	2,160-3,780	60-105
<b>Melting</b>						
Induction Furnace	pigs, ingots, turnings	95-99	98	2,470-3,276 <sup>1)</sup>	2,520-3,340	
Closed-well-furnace	clean scrap, organically contaminated scrap	88-95	92	2,320-3,960	2,520-4,300	70-120
Rotary drum furnace (static)	turnings, pellets, shredder scrap, new scrap	75-92	74	3,260-3,480	4,410-4,700	123-130
Rotary drum furnace (static + O <sub>2</sub> -burner)	turnings, pellets, shredder scrap, new scrap	75-92	74	1,385-1,520	1,870-2,050	52-57
Rotary drum furnace (tilting)	dross, pellets	50-80	78	ca. 2,080	ca. 2,670	ca. 75
<b>Refining, alloying, holding</b>	Alloying elements such as Si, Cu, Zn, Ti, Mn, Mg, Ni	95-98	97	1,400-2,520	1,440-2,600	40-72
<b>Total melting plant</b>		75-85	80	3,460-7,200	4,320-9,000	120-250

<sup>1)</sup> incl. holding of metal sump

<sup>2)</sup> net calorific value

## WASTE AND RESIDUAL MATERIAL

**Waste and/or residue** from the production of secondary aluminium should be treated and recycled or disposed of according to the state of the art.

Table II shows the most important wastes and residues from secondary aluminium production as well as the average amounts accrued and their methods of treatment.

Tab. II: Waste from secondary aluminium production

Waste and/or residues (ÖNORM S 2100)	Origin	Volume	Treatment	Comments from UBA on treatment
<b>Salt slag</b> (31211)	Melting in rotary drum furnace	300-500 kg/t Al	Reconditioning via solution and crystallisation techniques, Production of reusable substances Al-Granulate, mixed salt, NMP <sup>*)</sup>	Landfill ban
<b>Filter dust</b> (31217)	Exhaust gas cleaning	10-35 kg/t Al 0.1-10 kg/t Al <sup>*)</sup>	Dumping with pre-treatment or underground dumping; Partly reconditioned with salt slag (prior neutralisation on Na-basis necessary); used in the steel industry; or when using NaHCO <sub>3</sub> as additive, filter dust can be used as part of the salt in the rotary drum furnace	Ban on surface dumping, thermal treatment possible
<b>Furnace lining</b> (31108, 31103)	Melting furnace	ca. 2 kg/t Al	Partly reconditioned with dross, otherwise leaching + landfill	No surface dumping Production of injection moulding compounds
<b>dross</b> (31205)	all furnaces not using salt, cleaning of smelter, foundries	ca. 25 kg/t Al 40-80 kg/t Al <sup>*)</sup>	Reconditioning, pellets used in rotary drum furnace, dross dust used in the reconditioning of salt slag	Landfill ban

<sup>\*)</sup> Using Closed Well furnace

<sup>\*\*)</sup> Non metallic products (oxide proportions from Al scrap)

**Dross** is process dependant waste or residue which usually consists of aluminium and aluminium oxide. Reconditioning entails the grinding of dross where the mineral content is separated off as dust. The concentrate (pellets) is then re-smelted in rotary drum furnaces in secondary aluminium melting plants. The fine grain fraction (dross dust) can be employed in the reconditioning of salt slag.

**Filter dust** results from the cleaning of exhaust gases and due to its reactive properties shall not be disposed of in surface landfill without additional treatment according to the state of the art. One potential method of treatment of filter dust is to use it in the production of desulphurates for the steel industry. Thermal processes can be used for the reconditioning of filter dust. If thermally pre-treated it should be possible to recondition filter dusts in salt slag reconditioning plants. When NaHCO<sub>3</sub> is used as additive, filter dust can be used as salt in the rotary drum furnace.

**Furnace lining** is process dependent and thereby inevitable. It can be used in the production of injection moulding compounds for furnaces. To a small extent the furnace lining is reconditioned in the same way as dross.

Furnace lining with the SNR-number 31108 is regarded as hazardous waste in Austria (according to „Festsetzungsverordnung 1997, BGBl. II 227/1997). Furnace lining which does not display properties as outlined in Annex 2 of the „Festsetzungsverordnung“, is categorised under SNR-number 31303 and therefore not hazardous waste. Surface dumping would therefore be allowed; nevertheless, utilization of furnace lining should be aimed at.

Smelting scrap under salt in a rotary drum furnace dictates the amount of **salt slag**. In secondary aluminium production the covering layer of salt serves to protect against oxidation as well as absorbing impurities from the smelt. The reconditioning of salt slag is carried out according to the state of the art via solution and crystallisation processes and yields the reusable substances aluminium granulate, mixed salt and NMP.

## EMISSIONS INTO THE AIR

Using aluminium scrap in secondary smelting plants is associated with the formation and **emission of air-polluting substances** such as dust, sulphur and nitrogen oxides, carbon monoxide, unburned hydrocarbons, halogenated compounds like dioxins and furanes as well as inorganic gaseous chlorine and fluorine compounds.

On the one hand, emission levels for the individual smelt aggregates are calculated from emissions limit values; on the other hand, typical levels of specific emissions from secondary aluminium smelting plants are referred to in Table III which lie under the emission levels calculated from limit values.

Tab. III: Typical levels of individual emissions from secondary aluminium smelting plants

Smelt aggregate	Scrap used	Total-Emissions (g/t Metal)					
		HCl	HF	Dust	NO <sub>2</sub>	VOC	CO
Tilting hearth furnace	Clean piece scrap	2-20	0.1-1.5	1-45	200-900	5-40	30-180
Closed-well-furnace	Clean piece scrap, organically contaminated scrap	20-600	0.2-1.5	2-25	8-900	5-35	20-100
Rotary drum furnace (static)	turnings, pellets, shredder scrap	50-400	3-15	4-55		150-250	

## EXHAUST GAS CLEANING

The **cleaning of exhaust gases** in refineries is carried out according to the state of the art by way of fabric filters and dry or semi-dry processes or flow injection processes. By injecting active coke and recirculating the sorbent and/or combining semi-dry processes with a series scrubber, the filtration efficiency can be improved, in particular for the acidic components. An alternative to this combination would be to use a proportionately larger scrubber. Nevertheless, in this case, large amounts of sludge and sewage water would accumulate.

The **dust** emissions and associated emissions of dust like heavy metals and dioxins and furanes bonded in the form of particles are, more or less, dependant on the scrap and filtration technology being used. Modern fabric filters guarantee levels of under 5 mg dust/Nm<sup>3</sup>.

Furthermore, dry sorption and/or semi-dry processes partly in connection with series scrubber also permit the separation of the **acidic toxins** (HCl, HF, SO<sub>2</sub>) from exhaust gases.

Next to regulated process monitoring, the most important measure to reduce **emissions of CO and VOC** in secondary aluminium smelt plants is an appropriate scrap reconditioning process, e.g. the carbonising off at low temperatures of organic impurities from the input material. The emissions caused should equally be minimised according to the state of the art in order to avoid dislocations within the process chain. By optimising the process control and using stepped combustion air supply and low NO<sub>x</sub> burners it is possible to attain **NO<sub>x</sub> emission levels** of 100 mg/Nm<sup>3</sup> in connection with the oxygen measured.

Measures for the reduction of emissions of **dioxins and furanes** are based upon the precipitation of the particle bound PCDD/F, as in fabric filters and electrostatic precipitators, on the filtration of gaseous and particle bound PCDD/F, as in scrubbers, flow injection process and in spray absorber (in connection with fabric filter or electrostatic precipitator and the injection of an adsorbent e.g. active coke) or on thermal or catalytic break down of the dioxins and furanes. Using these processes it is possible to attain concentrations of < 0.1 ng/Nm<sup>3</sup> PCDD/F.

**Processes for reducing emissions** are described and **cost estimates** for the use of these techniques are given. The cost estimates are based on the use of the techniques: a fabric filter or electrostatic precipitator (tab. IV), a simple flow injection process with fabric filter (tab. V), a semi-dry process with NaHCO<sub>3</sub> using spray absorber, fabric filter and re-circulation of sorbents (tab. VI), a semi-dry process using spray absorber, fabric filter and re-circulation of sorbents (tab. VII), wet processes (tab. VIII) and a combination of semi-dry processes with series scrubbers (tab. IX).

Tab. IV: Main cost factors for **dust reduction** from untreated gas at 600 mg/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> to a guaranteed level of clean gas at 5 mg/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> (**fabric filter**) or 5-15 mg/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> (**electrostatic precipitator**) on a volume of exhaust gas of 40,000 Nm<sup>3</sup>/h.

	Costs in ATS/t metal	
	Fabric filter	Electrostatic precipitator
Volume of metal produced (t/a)	40,000	
Operating hours (h/a)	5,500	
<b>Input factors for annual expenditure</b>		
Investment costs (Mio. ATS)	6	
Number of years	15	
Rate of interest (%)	6	
Annual repayment incl. interest (Mio. ATS/a)	0.62	
<b>Proportional investment costs incl. Interest</b>	<b>15.44</b>	<b>15.44</b>
<b>Maintenance + wear and tear</b>		
Fabric filters (Mio. ATS/a)	0.33	8.33
<b>Proportional costs</b>		
Electrical energy: fabric filters	51 kWh/h á 1.0 ATS/kWh	7.00
Electrical energy: electrostatic precipitator	24 kWh/h á 1.0 ATS/kWh	3.30
<b>Technology costs</b>		<b>30.77</b>
Disposal of filter dust (10 - 35 kg/t metal)	2,000 - 4,000 ATS/t	20 - 140
<b>Total costs</b>		<b>ca. 50 - 170</b>
		<b>ca. 40 - 160</b>

Tab. V: Main cost factors of reducing emissions by way of a **simple flow injection process using a fabric filter** with the following data as basis: untreated gas values of ca. 500 mg SO<sub>2</sub>/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub>, ca. 300 mg HCl/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> and ca. 50 mg HF/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> guaranteeing clean gas values of under 300 mg SO<sub>2</sub>/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub>, under 30 mg HCl/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> and under 5 mg HF/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> as well as for dust filtration of untreated gas values of 600 mg/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> and clean gas values of under 5 mg dust/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> on a volume of exhaust gas of 40,000 Nm<sup>3</sup>/h.

	Costs		
		ATS/unit	ATS/t metal
Volume of metal produced (t/a)	40.000		
Operating hours (h/a)	5.500		
<b>Input factors for annual expenditure</b>			
Investment costs (Mio. ATS)	15		
Number of years	15		
Rate of interest (%)	6		
Annual repayment incl. interest (Mio. ATS/a)	1.54		
<b>Proportional investment costs incl. interest</b>			<b>38.61</b>
<b>Maintenance + wear and tear</b> (% of investment costs)	3		<b>11.25</b>
<b>Proportional costs</b>			
Consumption of CaO (kg/t metal)	22	1 ATS/kg	22
Electrical energy consumption (kWh/h)	102	1.0 ATS/kWh	14.03
<b>Technology costs</b>			
Disposal of filter dust (kg/t metal)	35 - 60	2,000 – 4,000 ATS/t	70 – 240
<b>Total costs</b>			<b>ca. 156 – 326</b>

Tab. VI: Main cost factors for **semi-dry reduction processes using NaHCO<sub>3</sub>** using the following data as basis: SO<sub>2</sub>-free off-gas (use of gas), dust filtration of untreated gas at 600 mg/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> and clean gas levels of under 5 mg dust/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> using **spray absorber** and **fabric filter** and **sorbent recirculation** on a volume of exhaust gas of 40,000 Nm<sup>3</sup>/h. In this case filter dust replaces part of the salt in the rotary drum furnace and recovery and utilization occurs later with the salt slag.

	Costs		
		ATS/unit	ATS/t metal
Volume of metal produced (t/a)	40,000		
Operating hours (h/a)	5,500		
<b>Input factors for annual expenditure</b>			
Investment costs (Mio. ATS)	14		
Number of years	15		
Rate of interest (%)	6		
Annual repayment incl. interest (Mio. ATS/a)	1.44		
<b>Proportional investment costs incl. Interest</b>			<b>36.04</b>
<b>Maintenance + wear and tear</b> (% of investment costs)	3		<b>10.50</b>
<b>Proportional costs</b>			
Consumption of NaHCO <sub>3</sub> (kg/t metal)	12	3 ATS/kg	36
Electrical energy consumption (kWh/h)	110	1.0 ATS/kWh	15.13
<b>Technology costs</b>			
Utilization of filter dust via salt slag (kg/t metal)	15 - 30	1,000 ATS/t	15 – 30
<b>Total costs</b>			<b>ca. 110 – 130</b>

Tab. VII: Main cost factors for **semi-dry reduction processes** using the following data as basis: from untreated gas at ca. 1,000 mg SO<sub>2</sub>/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub>, ca. 300 mg HCl/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> and ca. 50 mg HF/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> and guaranteed levels of clean gas of under 200 mg SO<sub>2</sub>/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub>, under 10 mg HCl/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> and under 1 mg HF/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> as well as a dust filtration of untreated gas at 600 mg/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> and clean gas levels of under 5 mg dust/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> and under 0.1 ng PCDD/F/m<sup>3</sup> using **spray absorber** and **fabric filter** and **sorbent re-circulation** on a volume of exhaust gas of 40,000 Nm<sup>3</sup>/h.

	Costs		
		ATS/unit	ATS/t metal
Volume of metal produced (t/a)	40,000		
Operating hours (h/a)	5,500		
<b>Input factors for annual expenditure</b>			
Investment costs (Mio. ATS)	20		
Number of years	15		
Rate of interest (%)	6		
Annual repayment incl. interest (Mio. ATS/a)	2.06		
<b>Proportional investment costs incl. Interest</b>			<b>51.48</b>
<b>Maintenance + wear and tear</b> (% of inv. costs)	3		<b>15</b>
<b>Proportional costs</b>			
Consumption of CaO (kg/t metal)	22	1 ATS/kg	22
Consumption of active coke (kg/t metal)	1	3.5 ATS/kg	3.5
Electrical energy consumption (kWh/h)	110	1.0 ATS/kWh	15.13
<b>Technology costs</b>			<b>107.11</b>
Disposal of filter dust (kg/t metal)	35 - 60	2,000 – 4,000 ATS/t	70 – 240
<b>Total costs</b>			<b>ca. 180 – 350</b>

Tab. VIII: Main cost factors using **wet processes** for the reduction of emissions from ca. 1,000 down to under 50 mg SO<sub>2</sub>/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub>, from ca. 300 to under 5 mg HCl/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> and from ca. 50 to under 1 mg HF/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> as well as dust levels from ca. 600 down to 5-15 mg dust/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> using **electrostatic precipitator** and **scrubber** on a volume of exhaust gas of 40,000 Nm<sup>3</sup>/h.

	Costs		
		ATS/unit	ATS/t metal
Volume of metal produced (t/a)	40,000		
Operating hours (h/a)	5,500		
<b>Input factors for annual expenditure</b>			
Investment costs (Mio. ATS)	17		
Number of years	15		
Rate of interest (%)	6		
Annual repayment incl. interest (Mio. ATS/a)	1.75		
<b>Proportional investment costs incl. Interest</b>			<b>43.76</b>
<b>Maintenance + wear and tear</b> (% of inv. costs)	2		<b>8.5</b>
<b>Proportional costs</b>			
Water consumption (m <sup>3</sup> /t metal) and sewage water disposal	0.3	5 – 30 ATS/m <sup>3</sup>	1.5 – 9
Consumption of CaO (kg/t metal)	11	1.0 ATS/kg	11
Electrical energy consumption (kWh/h)	90	1.0 ATS/kWh	12.38
<b>Technology costs</b>			<b>77.14 – 84.64</b>
Disposal of filter dust (kg/t metal)	10 – 35	2,000 – 4,000 ATS/t	20 - 140
Disposal of neutralisation sludge (kg/t metal)	15	1,500 – 3,000 ATS/t	22.5 - 45
<b>Total costs</b>			<b>ca. 120 - 270</b>

Tab. IX: Main cost factors for emission reduction with a **combination of semi-dry processes with series scrubber** from ca. 1,000 down to under 50 mg SO<sub>2</sub>/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub>, from ca. 300 to under 5 mg HCl/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> and from ca. 50 to under 1 mg HF/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> as well as for a dust filtration of ca. 600 mg/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> down to under 5 mg dust/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> and the reduction of dioxin to under 0.1 ng/Nm<sup>3</sup> using a spray absorber and fabric filter for a volume of exhaust gas of 40,000 Nm<sup>3</sup>/h.

	Costs		
		ATS/unit	ATS/t metal
Volume of metal produced (t/a)	40,000		
Operating hours (h/a)	5,500		
<b>Input factors for annual expenditure</b>			
Investment costs (Mio. ATS)	22		
Number of years	15		
Rate of interest (%)	6		
Annual repayment incl. Interest (Mio. ATS/a)	2.27		
<b>Proportional investment costs incl. Interest</b>			<b>56.63</b>
<b>Maintenance + wear and tear</b> (% of investment costs)	3		<b>16.5</b>
<b>Proportional costs</b>			
Consumption of CaO (kg/t metal)	11	1.0 ATS/kg	11
Consumption of active coke (kg/t metal)	1	3.5 ATS/kg	3.5
Electrical energy consumption (kWh/h)	160	1.0 ATS/kWh	22
<b>Technology costs</b>			<b>109.63</b>
Disposal of filter dust (kg/t metal)	25 - 50	2,000 – 4,000 ATS/t	50 – 200
<b>Total costs</b>			<b>ca. 160 – 310</b>

## NEW TECHNOLOGIES

This study also gives a report on **new technologies** in secondary aluminium production for the areas of scrap reconditioning, the smelting process and smelt treatment, exhaust gas treatment and the accumulation of wastes and residues.

Concerning scrap reconditioning, X-ray fluorescent analysis is suited to the sorting and separation of individual non-magnetic metal parts of the scrap. Atomic emission spectrometry can be used for the identification of individual alloying constituents.

Fine grain scrap, such as turnings, may be immersion smelted in a separate reactor by way of inductive crucible movement, lowering the dross content.

Processes have been developed to smelt dross in plasma without salt thereby preventing high levels of salt slag.

During the treatment of filter dust containing PCDD/F, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> or NaHCO<sub>3</sub> is used instead of Ca(OH)<sub>2</sub> to neutralise the acidic exhaust gases. The filter dust is then recirculated with the smelt salt in the rotary drum furnace. NaHCO<sub>3</sub> has the advantage that due to the temperature of the hot off-gas it is decomposed, losing its water content, to fine Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> dust, which then reacts with HCl and HF. The filter dust can subsequently be used as part of the salt in the rotary drum furnace, due to the absence of calcium.

This study compares **primary** and **secondary aluminium production** with each other regarding resource consumption and emissions.

In comparison to primary production, the production of secondary aluminium permits savings on energy of up to 85% and lower atmospheric emissions and solid residues by a factor of at least 10.

Based on the study of the interrelations between the application of raw materials, processes and environmental parameters, figure III summarises in the form of a block diagram a smelting plant capable of processing all categories of scrap.

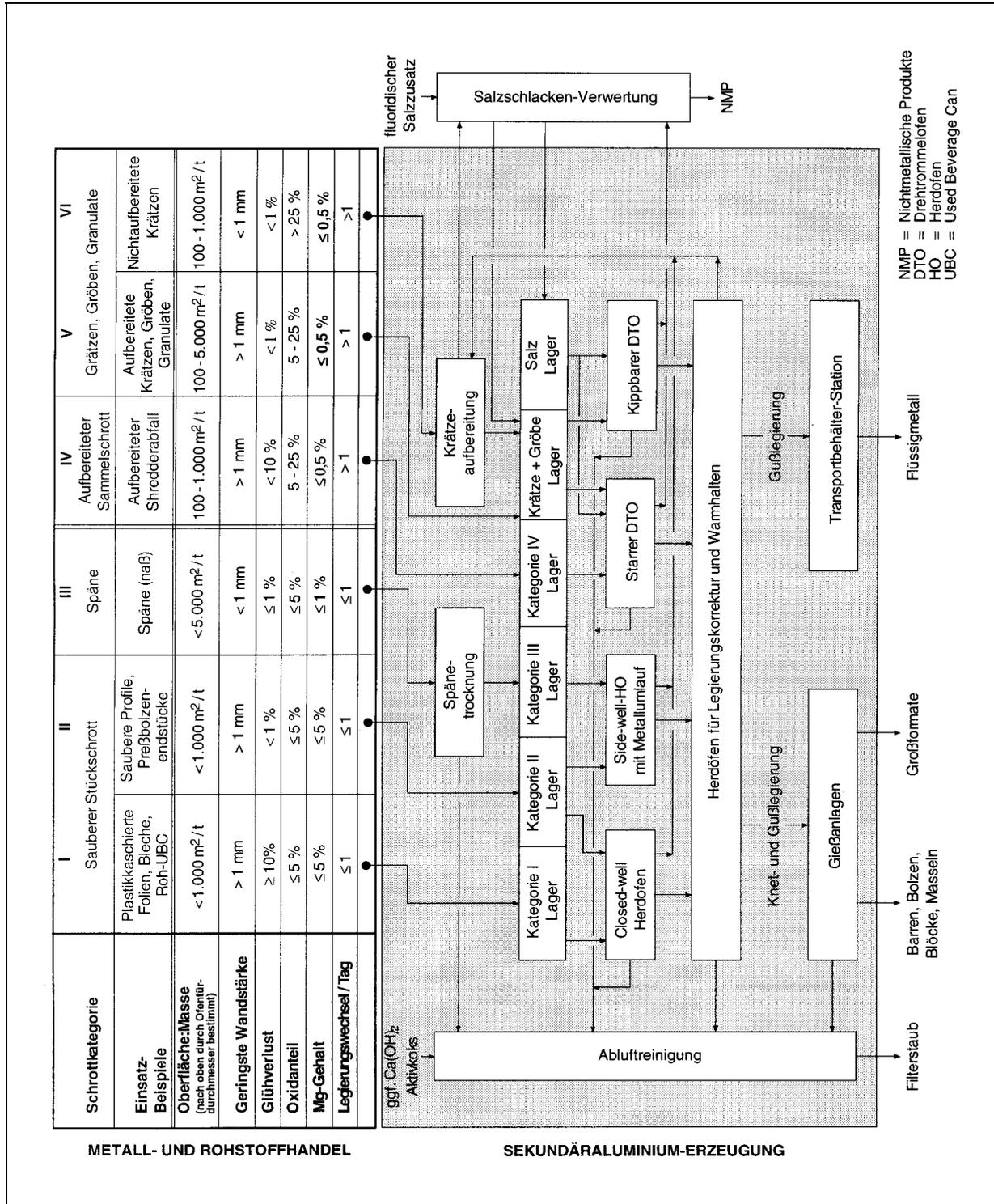


Fig. III: State of the art in secondary aluminium production for the processing of all categories of scrap [Boin, 1998]

**Conclusions and Recommendations** concerning secondary aluminium production can be summarised as follows:

- The pre-treatment processes of scrap (e.g. decoating, sink-float processes) should be given priority, whereby emissions should be minimised according to the state of the art.
- After pre-treatment, the scrap should be smelted down in the smelt aggregate most suited to its type, thereby minimising not only filter dust, salt slag and dross but also the emissions into the air. Scrap which is organically contaminated but still has a low oxide content is suited the closed-well furnace operating without salt. Fine grain scrap such as turnings may equally be smelted in a Side-well furnace (operating without salt) in a metal spinner. Scrap with high oxide content should be smelted under salt in a rotary drum furnace.
- The filter dust accumulating from the cleaning of exhaust gases via calcium hydrate shall, according to the state of the art, never be disposed of in surface landfills without suitable treatment. The state of the art already includes recycling potentials for the production of process materials for the steel industry and further treatment and recycling processes are in the pipe-line. When  $\text{NaHCO}_3$  is used as additive, filter dust can be used as part of the salt in rotary drum furnaces.
- The volume of salt slag accumulating in rotary furnaces where salt is used should not be dumped due to the high soluble content and release of toxic gases when coming into contact with water. According to the state of the art salt slag is reconditioned by way of solution crystallisation processes.
- Particular care should be taken with furnace linings since dumping without prior treatment should be avoided due to the sometimes very high content of toxic substances.
- A variety of different processes for the reduction of emissions are known regarding the cleaning of exhaust gases in secondary aluminium smelting plants which permit levels to be reached of under  $5 \text{ mg dust/Nm}^3$  in clean gas and under  $0.1 \text{ ng/ PCDD/F/Nm}^3$  for dioxins and furanes. The various possible processes for the reduction of emissions are dry or semi-dry processes in combination with fabric filters and the injection of active coke as adsorbent. The filtration efficiency of the acidic gases ( $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{SO}_2$ ) above all, can be increased by re-circulation of the sorbent and/or the use of a scrubber in series.

# 1 EINLEITUNG

## 1.1 Aufgabenstellung, Zielsetzung

Die vorliegende Studie behandelt schwerpunktmäßig Technologien, Einsatzstoffe, produkt-spezifische Emissionen und Ressourcenverbrauch in der Sekundäraluminium-Erzeugung. Ziel der Studie ist es, den „Stand der Technik in der Sekundäraluminium-Erzeugung im Hinblick auf die IPPC-Richtlinie“ zu beschreiben.

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

## 1.2 Bezug zur IPPC-Richtlinie

Die Europäische Kommission organisiert gemäß Art. 16 Abs. 2 der Richtlinie 96/61/EC des Rates vom 24. September 1996 über die „integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung“ („integrated pollution prevention and control“ - IPPC) den Informationsaustausch zwischen den Mitgliedstaaten und der betroffenen Industrie über die besten verfügbaren Techniken, die damit verbundenen Überwachungsmaßnahmen und die Entwicklungen auf diesem Gebiet. Die Erarbeitung der BAT-Dokumente für die im Anhang I der IPPC-Richtlinie angeführten Anlagenkategorien erfolgt in Technical Working Groups, die in Absprache mit dem Information Exchange Forum durch die EU-Kommission eingerichtet werden. Die Arbeit der Technical Working Groups wird durch ein eigens eingerichtetes European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau unterstützt. Dieses Büro wurde am IPTS (Institute for Prospective Technological Studies) in Sevilla eingerichtet.

Die Technical Working Group für Nichteisenmetalle hat im Jänner 1998 ihre erste Tagung in Sevilla abgehalten, wobei im Bereich der Nichteisenmetalle vor allem die Sekundäraluminiumproduktion von Bedeutung für Österreich ist.

Im Sinne Art. 2 Ziffer 11 der IPPC-Richtlinie (96/61/EC) bezeichnet der Ausdruck „Beste verfügbare Techniken“ den effizientesten und fortschrittlichsten Entwicklungsstand der Tätigkeiten und entsprechenden Betriebsmethoden, der spezielle Techniken als praktisch geeignet erscheinen lässt, grundsätzlich als Grundlage für die Emissionsgrenzwerte zu dienen, um Emissionen in und Auswirkungen auf die gesamte Umwelt allgemein zu vermeiden oder, wenn dies nicht möglich ist, zu vermindern.

Der Ausdruck „Techniken“ bezeichnet sowohl die angewandte Technologie als auch die Art und Weise, wie die Anlage geplant, gebaut, gewartet, betrieben und stillgelegt wird.

Als „verfügbar“ gelten jene Techniken, die in einem Maßstab entwickelt sind, der unter Berücksichtigung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses die Anwendung unter in dem betreffenden industriellen Sektor wirtschaftlich und technisch vertretbaren Verhältnissen ermöglicht.

Als „beste“ gelten jene Techniken, die am wirksamsten zur Erreichung eines allgemein hohen Schutzniveaus für die Umwelt insgesamt sind.

Folgende Punkte sind bei der Festlegung der besten verfügbaren Techniken nach der Richtlinie über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung Anhang IV besonders zu berücksichtigen:

- Einsatz abfallarmer Technologie
- Einsatz weniger gefährlicher Stoffe
- Förderung der Rückgewinnung und Wiederverwertung der bei den einzelnen Verfahren erzeugten und verwendeten Stoffe und gegebenenfalls der Abfälle

- Vergleichbare Verfahren, Vorrichtungen und Betriebsmethoden, die mit Erfolg im industriellen Maßstab erprobt wurden
- Fortschritte in der Technologie und in den wissenschaftlichen Erkenntnissen
- Art, Auswirkungen und Menge der jeweiligen Emissionen
- Zeitpunkte der Inbetriebnahme der neuen oder der bestehenden Anlagen
- Für die Einführung einer besseren verfügbaren Technik erforderliche Zeit
- Verbrauch an Rohstoffen und Art der bei den einzelnen Verfahren verwendeten Rohstoffe (einschließlich Wasser) sowie Energieeffizienz
- Die Notwendigkeit, die Gesamtwirkung der Emissionen und die Gefahren für die Umwelt so weit wie möglich zu vermeiden oder zu verringern
- Die Notwendigkeit, Unfällen vorzubeugen und deren Folgen für die Umwelt zu verringern
- Die von der Kommission gemäß Artikel 16 Absatz 2 oder von internationalen Organisationen veröffentlichten Informationen.

In der vorliegenden Studie mit Bezug zur IPPC-Richtlinie sind der Stand der Technik in der Sekundäraluminiumproduktion und Kosten für ausgewählte Emissionsminderungstechnologien dargestellt.

### 1.3 Historisches zu Aluminium

Aluminiumverbindungen haben als natürlicher Alaunstein und daraus extrahierte Produkte bereits in vorchristlicher Zeit Verwendung gefunden. Zu Anfang des 18. Jahrhunderts wurde Aluminiumoxid (Tonerde) aus Ton- oder Alaunvorkommen isoliert. Der heute technische Rohstoff Bauxit wurde erstmalig 1821 von Pierre Berthier anhand eines Vorkommens bei Les Baux in Südfrankreich beschrieben.

In unreiner Form wurde das Metall erstmalig von Oersted durch Reduktion von wasserfreiem Aluminiumchlorid mit Kaliumamalgam hergestellt. Wöhler gelang es, in Zusammenarbeit mit Oersted, 1827 reinere Metallfitter durch Reduktion des Chlorids mit Kaliummetall zu isolieren und 1845 größere Metallkugeln zu produzieren, an denen er bereits einige Eigenschaften des Elements bestimmen konnte. Der Franzose Sainte Claire-Deville ersetzte Aluminiumchlorid durch das weniger hygroskopische Natriumaluminiumchlorid und Kalium durch das billigere Reduktionsmittel Natrium. Deville ist darüber hinaus der eigentliche Begründer der elektrochemischen Aluminiumgewinnung. Bereits 1854 demonstrierte er die Isolierung des Metalls durch Elektrolyse von Natriumaluminiumchloridschmelzen. Auch Kryolith und Aluminiumoxid wurden von ihm bereits in seine elektrochemischen Versuche einbezogen.

Der Durchbruch zur elektrochemischen Metallgewinnung gelang erst, nachdem die Erfindung der Dynamomaschine 1866 durch Siemens elektrische Energie mit hohen Stromstärken verfügbar machte. Heroult in Frankreich und Hall in den USA meldeten unabhängig voneinander 1886 Patente zur Gewinnung von Aluminium durch Elektrolyse von Aluminiumoxid in Kryolithschmelzen zwischen Kohlelektroden an.

Die ersten Aluminiumelektrolysen wurden 1888/89 in Pittsburgh, USA, und Neuhausen, Schweiz, errichtet.

Ausgangsprodukt für die elektrochemische Herstellung von Aluminium ist heute ausschließlich Aluminiumoxid. Für die Gewinnung von Aluminiumoxid ist noch heute das hydrometallurgische Bayer-Verfahren von Bedeutung.

Die Entwicklung der Sekundär-Aluminiumproduktion gewinnt angesichts des steigenden Schrottaufkommens an Bedeutung.

## 1.4 Bedeutung und Eigenschaften von Aluminium

Aluminium ist mit ca. 8% das dritthäufigste Element in der äußeren Erdkruste. In der Natur tritt es ausschließlich in oxidischer Bindungsform in einer Vielzahl von gesteinsbildenden Mineralen v.a. in den weit verbreiteten Aluminiumsilikaten und in hydroxidischer Form in deren Verwitterungsprodukten, den Bauxiten auf. 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 physikalischen Eigenschaften des silbrig-weißen Leichtmetalls sind stark von seiner Reinheit abhängig. Dies gilt v.a. für die anwendungsbezogenen Eigenschaften, die mechanische Festigkeit und die elektrische Leitfähigkeit. Das Reinmetall ist weich und hat eine geringe mechanische Festigkeit. Es wird jedoch bereits durch Spuren anderer Elemente verfestigt. Aluminium-Legierungen weisen hohe Festigkeiten auf, die bei einer Dichte von nur einem Drittel der Dichte von Stählen z.T. den Festigkeiten von Stählen nahekommen.

Aluminium ist ein guter elektrischer Leiter. Zwar liegt die spezifische elektrische Leitfähigkeit um etwa ein Drittel niedriger als die des Kupfers, andererseits beträgt die Dichte des Aluminiums nur etwa ein Drittel der des Kupfers. Unterhalb der niedrigen Sprungtemperatur von 1,19 K ist Aluminium supraleitend.

Für die Anwendung des Metalls und seiner Legierungen ist v.a. sein Verhalten gegenüber Luft-sauerstoff sowie in wässrigen Medien von Bedeutung. Trotz der hohen Affinität gegenüber Sauerstoff ist Aluminium an der Luft sehr korrosionsbeständig. Dies liegt daran, daß sich die Metalloberfläche an der Luft sofort mit einer 5-20 nm dicken, festhaftenden und sehr dichten Oxidschicht bedeckt, die den weiteren Sauerstoffzutritt verhindert. Auch das flüssige Aluminium wird aufgrund einer schützenden dünnen Oxidschicht auf seiner Oberfläche nur sehr langsam oxidiert. Aluminiumstaub ist in Luft brennbar; bei ca. 40 g Al-Staub/m<sup>3</sup> Luft bildet sich ein explosives Gemisch.

## 1.5 Zahlen zur (Sekundär)-Aluminiumproduktion

Tab. 1.1: Primäraluminiumproduktion (Hüttenproduktion) [VDS, Metallstatistik 1996], [World Bureau of Metalstatistic 1999]

1000 t	1992	1993	1994	1995	1996****)	1998
Europa*)	3.443,0	3.320,0	3.138,0	3.222,2	3.307,9	3.697,1
EU	2.172,3	2.108,3	1.989,8	2.158,3	2.198,7	2.347,3
Asien**)	1.382,3	1.528,4	1.584,9	1.664,8	1.633,9	1.750,1
Afrika	613,2	617,3	576,0	628,3	1.015,5	1.043,3
Amerika***)	8.002,0	7.946,4	7.524,9	7.585,9	7.966,0	8.154,7
USA	4.042,1	3.694,8	3.298,5	3.375,2	3.577,2	3.712,7
Kanada	1.971,8	2.308,9	2.254,7	2.172,0	2.283,2	2.374,1
eh. UdSSR	3.251,6	3.186,0	3.014,0	3.105,1	3.165,0	3.307,0
China	1.096,0	1.254,5	1.462,2	1.676,1	1.900,7	2.435,3
Australien	1.236,1	1.376,3	1.310,8	1.292,7	1.370,3	1.943,7
<b>Welt insg.</b>	<b>19.497,5</b>	<b>19.738,7</b>	<b>19.121,4</b>	<b>19.748,3</b>	<b>20.994,2</b>	<b>22.718,2</b>

\*) ohne Polen, Rumänien, ehemalige CSSR, Ungarn, ehemalige UdSSR

\*\*\*) ohne China und Nordkorea

\*\*\*\*) Argentinien, Brasilien, Kanada, Mexiko, Surinam, Venezuela, Vereinigte Staaten

\*\*\*\*\*) 1997 betrug die Hüttenproduktion in Europa 3.360.327 t

Tab. 1.2: Sekundäraluminiumproduktion („Rückgewinnung von Aluminium aus Alt- und Abfallmaterial“)  
[VDS, Metallstatistik 1996], [World Bureau of Metalstatistic 1999]

1000 t	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
Europa <sup>*)</sup>	1.794,8	1.698,9	1.783,4	1.926,0	1.849,8	1.938,1	2.083,4
EU	1.628,5	1.511,6	1.586,1	1.808,2	1.733,9	1.838,2	1.975,4
Asien <sup>**)</sup>	1.295,1	1.202,7	1.381,5	1.391,5	1.402,8	1.489,3	1.365,7
Afrika	47,0	47,0	47,0	52,5	52,0	52,2	52,2
Amerika	2.510,0	3.264,8	3.349,5	3.581,0	3.587,5	3.986,4	3.740,9
USA	2.230,4	2.994,9	2.958,8	3.188,0	3.205,5	3.543,4	3.280,3
Kanada	86,0	90,0	95,0	97,0	101,0	106,0	111,0

<sup>\*)</sup> ohne Polen, Rumänien, ehemalige CSSR, Ungarn, ehemalige UdSSR

<sup>\*\*)</sup> ohne China und Nordkorea

Die europäische Aluminium Industrie beschäftigt ca. 200.000 Arbeitskräfte. Die jährliche Aluminium-Produktion betrug 1994 innerhalb der EU 3.58 Mio. Tonnen, davon waren 44% Sekundäraluminium. 1996 wurden 3,96 Mio. Tonnen Aluminium in der EU produziert, wobei der Anteil der Sekundärproduktion wiederum bei 44% lag.

## 2 TECHNOLOGIE DER SEKUNDÄRALUMINIUMERZEUGUNG

Sekundärschmelzwerke stellen aus primären und sekundären Rohstoffen gezielt Aluminiumlegierungen vorgegebener Zusammensetzung her. Primär- bzw. Hüttenaluminium ist das nach dem Verfahren der Schmelzflußelektrolyse hergestellte Aluminium. Die sekundären Rohstoffe sind jene, die bereits ein- oder mehrmals das Wirtschaftssystem bzw. einzelne Produktionsstufen durchlaufen haben und somit mindestens einen zweiten Kreislauf beginnen.

Die Aluminiumschmelzhütten (Refiner) verarbeiten vorwiegend Aluminium-Sammelschrotte zu Gußlegierungen oder Desoxidationsaluminium, die Umschmelzwerke (Remelter) stellen aus sortenrein gehaltenem Schrott nur Knetlegierungen her (Abb. 2.1).

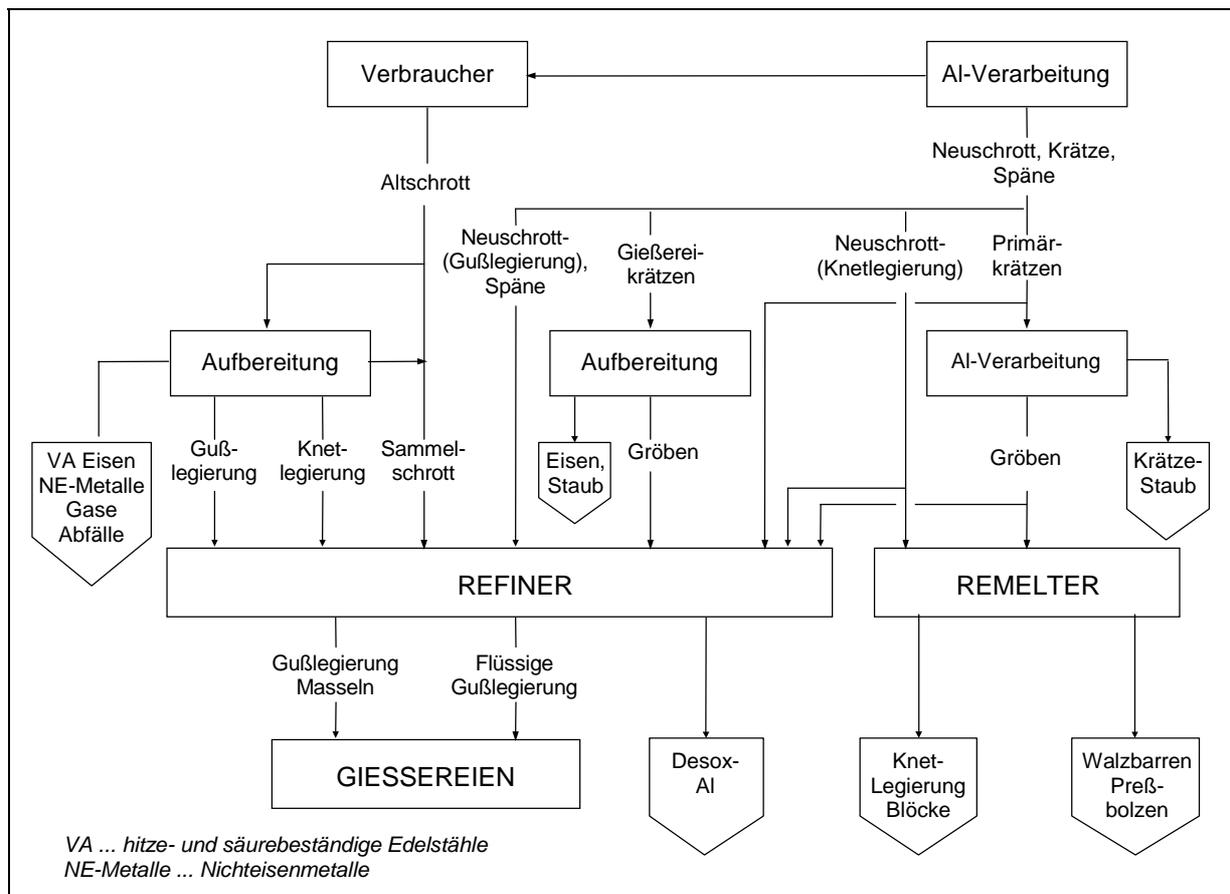


Abb. 2.1: Erzeugung von Sekundäraluminium

Die Erzeugung von Sekundäraluminium untergliedert sich in die Schrottvorbehandlung und den Schmelzprozeß mit anschließender Formgebung. Die Schrottvorbehandlung umfaßt die Eingangskontrolle, die Sortierung, die Aufbereitung und die Lagerhaltung der Schrotte im Sekundäraluminiumschmelzwerk; der Schmelzprozeß umfaßt das Gattieren, das Chargieren, das Schmelzen, das Warmhalten, die Schmelzebehandlung und das Legieren.

Alle Schritte, vom Eingang des Materials über das Gattieren der berechneten Chargen bis zum Verlassen der vom Kunden angeforderten Aluminiumlegierung, unterliegen einer ständigen Kontrolle [PIERCE et al., 1995; ORBON, 1997], unter anderem, um eine lückenlose Rückverfolgbarkeit zu gewährleisten.

## 2.1 Einsatzmaterial

Die Einteilung der sekundären Rohstoffe, im wesentlichen Schrotte aber auch Krätzen, erfolgt nach der Herkunft von den verschiedenen Verbrauchssektoren für Aluminiumlegierungen (Verkehr, Maschinen- und Apparatebau, Elektrotechnik, Bauwesen, Haushalt u. Büro) sowie nach dem Legierungstypus (Tab. 2.1).

Tab. 2.1: Beispiele für die Einstufung von Einsatzstoffen in der Sekundäraluminiumerzeugung

	Knetlegierungen	Gußlegierungen sowie Cu-freie Desox-Legierungen
Neuschrotte	Folienabfälle, Profil- u. Drahtausschuß, Blechstanzabfälle	Gießsteiger, Gußausschuß (z. B. Alu-Kfz-Felgen), Späne
Altschrotte	Kfz-Schilder, Verkehrszeichen, gebrauchte Verpackungsfolien, Drähte, Profile, Flaschenkapseln, Fässer, Tuben, Dosen (UBC - used beverage cans)	Shredderschrott, Flotations-aluminium

Nicht sortenreiner Sammelschrott, wie er vom Schrotthandel den Schmelzwerken angeboten wird, war bislang nur qualitativ beschrieben, d. h. in Klassen eingeteilt wie "saubere Bleche", "Stanzabfälle blank" oder "Leitschienen korrodiert" und "Cu-arm, lose, gemischt". Mit solchen Beschreibungen, ohne objektiv nachprüfbare Parameter, kann keine Standardisierung oder gar Normierung von Rohstoffen vorgenommen werden.

Es wird daher zur Zeit von der Comité Européen de Normalisation (CEN), innerhalb ihres Technical Committee (TC 132) von der Working Group (WG 20) eine Normierung der sekundären Aluminiumrohstoffe erarbeitet.

Die in der vorliegenden Studie erarbeiteten Kriterien und Parameter zur Kategorisierung sind im Sinne des Stoffflusses "rückwärts" von der optimalen Verarbeitungs- und Schmelztechnologie definiert. Sie mögen sich daher durchaus von den Kriterien unterscheiden, die CEN, TC 132, WG 20 für ihre Normierung verwenden wird, zumal hierfür mehr die Belange des grenzüberschreitenden europäischen Rohstoffhandels als die nachfolgenden Schmelztechnologien im Vordergrund stehen.

### 2.1.1 Schrottarten

**Neuschrotte** sind überwiegend saubere Produktionsabfälle aus Primärhütten, Gießereien oder Formgebungsanlagen (Walzen, Pressen, etc.), die dem Materialkreislauf kurzfristig zur Verfügung stehen, d.h. nicht erst nach Ablauf der jeweiligen Nutzungszeit eines Gebrauchsartikels (siehe Altschrotte). Verunreinigungen sind vorwiegend Oxidschichten, aber auch Kunststoffe und Lacke. Die Recyclingrate dieser industriellen Prozeßschrotte liegt nahezu bei 100 % [KIRCHNER, 1989; LEHNERT et al., 1996].

**Altschrott** ist sowohl getrennt gesammelter Schrott als auch mechanisch aufbereiteter Schrott aus Mischmaterialien. Altschrott ist meist durch Lacke, Öle, Silikon- oder Gummidichtungen, Klebeverbunde mit Plastik, Glas- und Karbonfasern, Kork, Holz, Kehrlicht, andere Metalle, usw. stark verunreinigt. In Europa kommt der Hauptanteil des Altschrottes aus dem Bauwesen, dem Maschinenbau und der Elektronik sowie dem Verkehrssektor; in den USA stellen Getränkedosen 56 % des Altschrottaufkommens dar. Die Recyclingraten liegen bezogen auf das eingesetzte Aluminium zwischen ca. 80 % im Maschinenbau und der Elektronik und ca. 90 % im Verkehrssektor [LEHNERT et al., 1996; ROTTWINKEL & SANHEN, 1990] und über 90 % bei Getränkedosen.

Altschrott steht dem Materialkreislauf erst nach Ablauf der jeweiligen Nutzungszeit zur Verfügung, die bei Verpackungsfolien wenige Tage, bei Kfz-Teilen bis zu 15 Jahren und im Bauwesen mehr als 30 Jahre betragen kann.

**Krätzen** entstehen auf der Oberfläche von flüssigem Aluminium und Aluminiumlegierungen, von wo sie als Oxidhaut abgezogen bzw. abgekrätzt werden. Krätzen fallen daher wie Neuschrotte direkt im Produktions- bzw. Verarbeitungsprozeß an und zeigen stark wechselnde Gehalte an Oxid und eingeschlossenem Metall. Das Metall entspricht bei Krätzen aus der Primäraluminiumerzeugung (Primärkrätzen) reinem Hüttenmetall, bei Krätzen aus der Sekundäraluminiumproduktion Knet- oder Gußlegierungen.

Das flüssige Metall in frisch abgezogenen Krätzen ist besonders oxidationsempfindlich. Krätzen werden daher noch am Entstehungsort häufig einer direkten Kühlung unterworfen oder im Krätzekübel mit Salz abgedeckt, um eine weitere Metalloxidation zu unterbinden [HAUTZ, 1987; TAYLOR & GAGNON, 1995; ROBERTS, 1991]. Alternativ können die Krätzen nach verschiedenen Techniken sofort heiß ausgepreßt werden, um das noch flüssige Metall direkt rückzugewinnen [KOS, 1997; ROTH & BEEVIS, 1995; SCHIRK, 1997; SPOEL, 1996; SPOEL & ZEBEEDDEE, 1996].

Krätzen enthalten auch Al-Nitrid (AlN) und reagieren mit Wasser bzw. Feuchte unter H<sub>2</sub>- und NH<sub>3</sub>-Entwicklung. Sie sind daher trocken unter Dach zu lagern.

**Späne** stammen aus der spanabhebenden Formgebung von Knet- und Gußlegierungen. Sie fallen ebenfalls wie Neuschrotte direkt im Verarbeitungsprozeß an, werden aber – insbesondere wegen ihrer Kleinstückigkeit, d. h. dem ungünstigen Verhältnis von Oberfläche zu Masse – wie Krätzen als gesonderter Einsatzstoff behandelt.

Späne können nach folgenden Parametern unterschieden werden:

- Feuchte (trocken, ölhaltig, emulsionshaltig)
- Form (kurz, lang, lose, paketierte, Feinanteil)
- Oxidanteil (in Abhängigkeit von Alter, Lagerung, Trocknung)
- Eisenanteil
- Sortenreinheit
- Legierungstyp

Aus den statistischen Zahlen (Tab. 2.2) läßt sich entnehmen, daß der Anteil der Neuschrotte an der Versorgung der Schmelzwerke relativ zurückgehen dürfte, wogegen der Anteil der Altschrotte eher zunehmen wird.

Tab. 2.2: Entwicklung der Schrottversorgung in Deutschland [VDS, 1994]

	1981	1990	1992
Neuschrotte	30,7 %	21,2 %	17,1 %
Späne	26,0 %	23,7 %	24,0 %
Altschrotte	22,2 %	37,0 %	39,1 %
Krätzen	17,1 %	14,9 %	18,1 %
Vorschmolz	4,0 %	3,2 %	1,7 %
Sekundäraluminiumerzeugung	397.500 t	538.900 t	535.600 t

Dem relativen Rückgang der Versorgung mit Neuschrott und der relativen Zunahme des Einsatzes von Altschrott liegen verschiedene, sich zum Teil überlagernde Effekte zugrunde. Unter anderem hat die Sammel- und Aufbereitungsintensität in den letzten Dekaden zugenommen. Weiters hat Japan – dort gibt es ausschließlich Sekundäraluminiumerzeugung und keine Primärproduktion – große Mengen guten Schrott, bevorzugt Neuschrottqualitäten, importiert.

### 2.1.2 Einstufung von Schrotten

Metallurgisch werden die Schrotte, analog wie Legierungen, anhand ihrer Gehalte an Haupt-, Neben- und Sonderlegierungselementen sowie der wichtigen Spurenzusätze eingeteilt (Tab. 2.3). Diese Zusätze und ihre jeweiligen Gehalte bestimmen entscheidend die Gefügeausbildung und damit die Eigenschaften der Aluminiumlegierungen.

**Knetlegierungen** sind Aluminiumlegierungen mit einem Siliziumgehalt von  $\leq 2,6$  %. Sie werden in aushärtbare (z.B.: AlMgSi, AlCuSi, AlCuMg, AlZnMg, AlZnMgCu, AlCuLi) und nichtaushärtbare Legierungen (z.B.: AlFeSi, AlMg, AlSi, AlMn, AlMgMn, AlZn) eingeteilt. Knetlegierungen lassen sich plastisch verformen [LEHNERT et al., 1996].

Tab. 2.3: Einteilung der Schrotte nach metallurgischen Kriterien

Einteilungskriterien	Elemente
Hauptlegierungselemente	Cu, Si, Mg, Zn, Mn
Nebenlegierungselemente	Fe, Cr, Ti
Sonderlegierungselemente	Ni, Co, Ag, Li, V, Zr, Sn, Pb, Bi
Spurenzusätze	Be, B, Na, Sr, Sb

**Gußlegierungen** weisen einen Siliziumgehalt von ca. 5 bis über 20 % auf, lassen sich nicht plastisch verformen und müssen daher in Formen gegossen werden [LEHNERT et al., 1996]. Nach der Art des Gießverfahrens werden Sand-, Kokillen- und Druckgußlegierungen unterschieden.

### 2.1.3 Verschmutzungsgrad

Wichtige Kriterien für die Verarbeitbarkeit der Schrotte sind der Grad der Verschmutzung durch anhaftendes Fremdmaterial und Oxide, sowie die Stückgröße und das durchschnittliche Verhältnis von Oberfläche zu Masse jedes Schrotteiles.

Art und Umfang der Verschmutzung von Schrotten sind im allgemeinen nur begrenzt definierbar.

So weisen beispielsweise Flaschenkapseln durch die eingeklebte Kunststoffdichtung Glühverluste von etwa 20 % auf. Beim Schmelzen entstehen daraus keine festen Rückstände, jedoch große Mengen an Crackgas und damit organische Schadstoffe im Abgas.

Krätzen können Oxidgehalte von mehr als 50 % aufweisen. Beim Schmelzen führen sie zum Anfall großer Salzschlackemengen; aufgrund nicht vorhandener organischer Verschmutzungen verursachen sie jedoch beim Schmelzen kein zusätzliches Abgasproblem.

Aluminiumschrott aus der Aufbereitung von Altfahrzeugen kann durch die angewandte Klebtechnik beträchtliche Mengen an Kunststoffen, Fasern, Glas und ähnlichem aufweisen, wodurch beim Schmelzen sowohl ein erhöhter Salzschlackeanfall wie auch erhöhte Schadstoffgehalte im Abgas verursacht werden.

Untersuchungen zeigen, daß bei Altschrott stets mit mehreren Prozent Glühverlust im Schmelzprozeß zu rechnen ist. Dem Anteil an nichtmetallischen Bestandteilen wird durch die Feststellung der Metallausbeute Rechnung getragen. Grundsätzlich führen organische Verunreinigungen zu zusätzlichen Abgasmengen und Schadstoffgehalten, anorganische Verunreinigungen zu erhöhtem Salzschlackeanfall.

### 2.1.4 Aufbereitungsverfahren

Da die metallurgischen Raffinationsmöglichkeiten für Aluminiumlegierungen beschränkt sind (Tab. 2.4), ist eine Aufbereitung der eingesetzten Schrotte sowie die Verdünnung von nicht durch Raffination entfernbaren Beimengungen mit vergleichsweise teurem Reinaluminium bzw. geeigneten Neuschrotten meist zwingend notwendig [COOK et al., 1996; MURPHY & LUKASKO, 1993].

Tab. 2.4: Raffinationsmöglichkeiten für Umschmelzaluminium

Raffinationsmöglichkeit	Wirkung
Schmelzen unter Salz	Entfernung von Oxiden
Chlorierung (meist Cl <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> bzw. Cl <sub>2</sub> /Ar)	H <sub>2</sub> , Alkali- u. Erdalkalimetalle
Spülgasbehandlung ohne Cl <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> , nichtmetallische Einschlüsse werden an die Oberfläche flotiert
Salzraffination	Entfernung von Li, Na, Ca, Sr, Oxiden
Verdünnen	Zusatz von Hüttenaluminium
Auflegieren	Zusatz von Legierungselementen

Die Schrottaufbereitung erfolgt teilweise durch die Schmelzhütten selbst (z. B. Späne und Krätzen), teilweise durch Unternehmen der Schrottwirtschaft (Shredderbetriebe, Schwimm-Sink-Aufbereiter). Die Schrottaufbereitung dient einerseits der Entfernung von organischem Fremdmaterial (wie Ölen, Farben, Gummi, Kunststoffen, etc.) und andererseits von Fremdmetallen (wie Eisen, Edelstählen, Messing, u. ä.).

**Neuschrott** kann sortenrein gehalten und bei entsprechender Menge direkt in den Schmelzofen eingesetzt werden. Die Aufbereitung sortenreinen Neuschrottes erfolgt erforderlichenfalls durch Zerkleinern, Abschwelen von anhaftenden Ölen oder Farben und Magnetscheidung zur Abtrennung von Eisen und Stahl (Abb. 2.2). Ist der Neuschrott nicht sortenrein, so ist er prinzipiell dem Altschrott zuzuordnen.

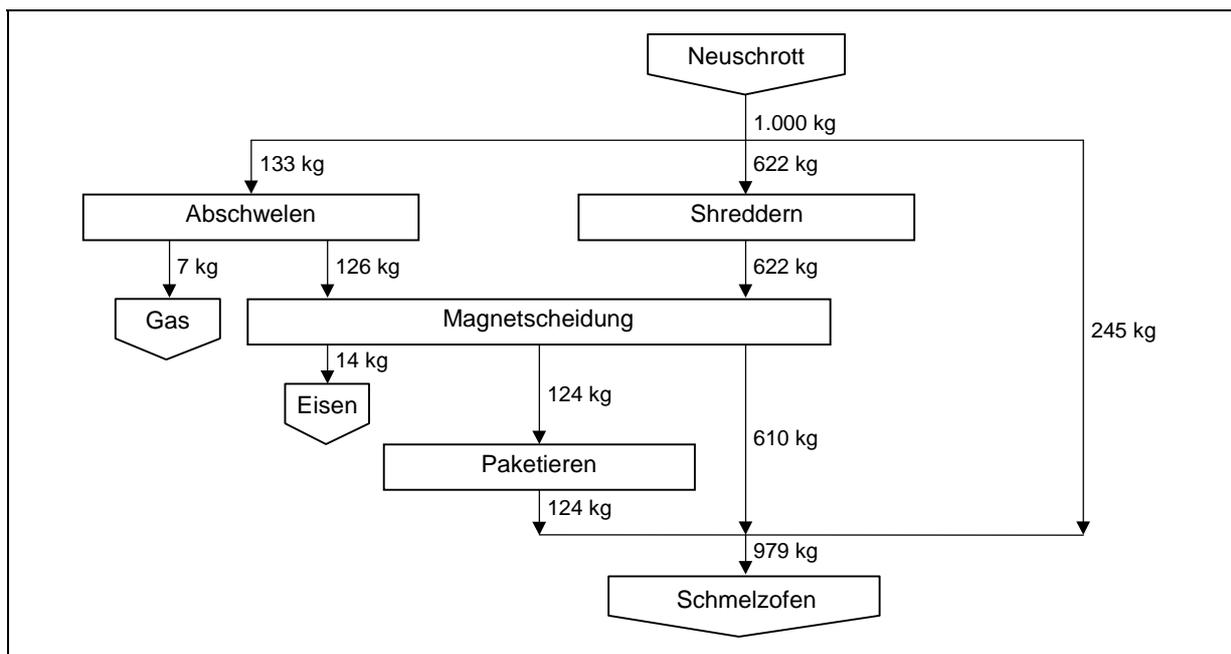


Abb. 2.2: Beispiel für eine Massenbilanz in der Neuschrottaufbereitung

Die Aufbereitung von **Altschrott** (Abb. 2.3) erfolgt in der Regel im Shredder mit integrierter Windsichtung – zur Abtrennung von spezifisch leichtem Shredderabfall – und magnetischer Separation zur Abtrennung von Eisen und Stahl [D'ASTOLFO & BRUGGINK, 1994; HÄRDTLE, 1989; SCHROERS, 1994; VAN LINDEN, 1994]. Die verbleibende Fraktion besteht aus einem Gemenge aller nichtmagnetischen, grobstückigen oder schweren Stoffe, z.B. Buntmetalle, Edelstahl, Gummi, Glas, etc., in dem der Aluminiumgehalt beispielsweise von ca. 3 % vor dem Shredder auf rund 45 % erhöht ist [ALKER, 1992].

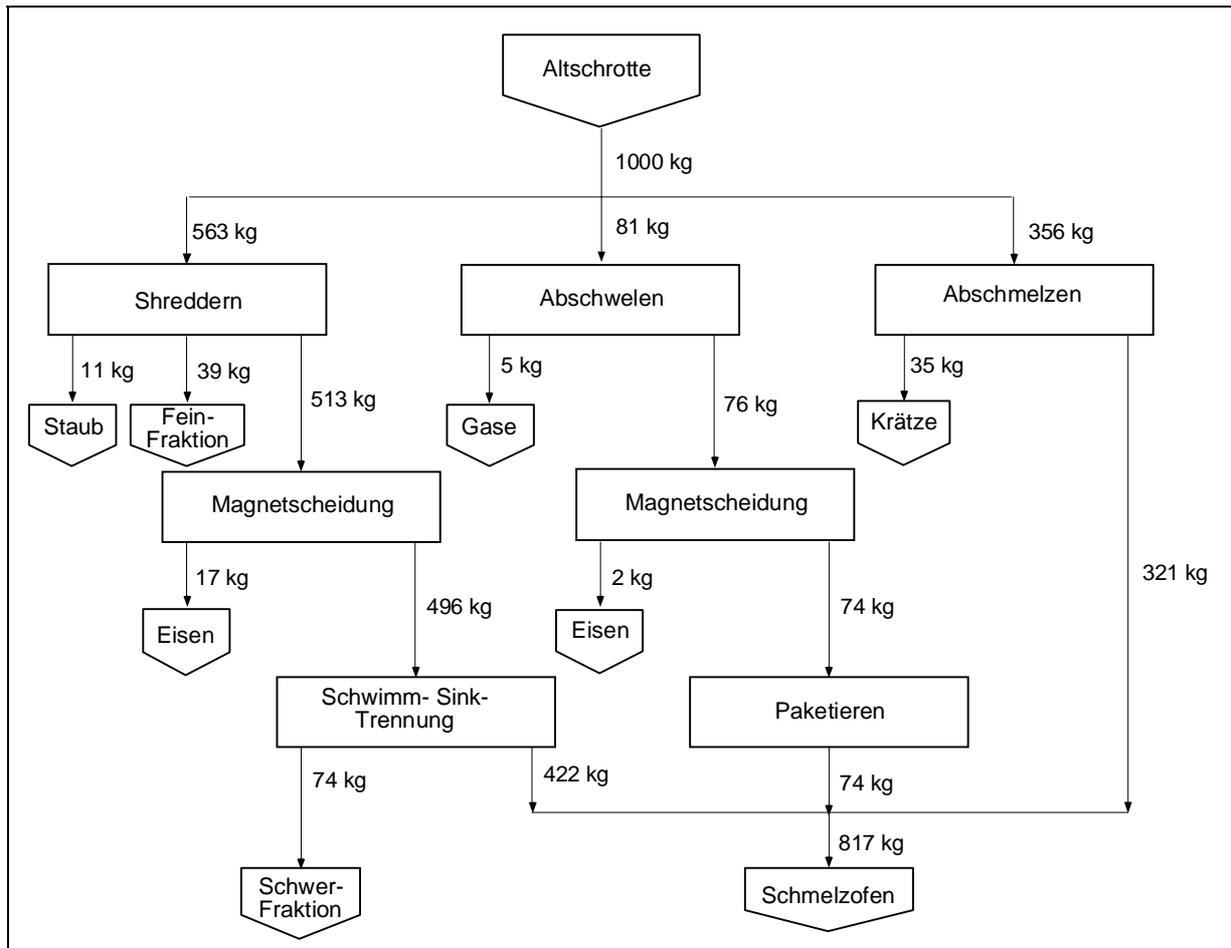


Abb. 2.3: Beispiel für eine Massenbilanz in der Altschrottaufbereitung

Die Nichteisenmetallfraktion (NE-Fraktion) wird in einer zweistufigen Schwimm-Sink-Trennanlage weiter aufbereitet. In der ersten Stufe, die mit einem Wasser-Ferrosilizium-Gemisch einer Dichte von etwa  $1,8 \text{ g/cm}^3$  gefüllt ist, werden die leichten Stoffe wie Holz, Gummi, Kunststoff und Magnesium abgetrennt und manuell nachsortiert. Die schwereren Anteile sinken zu Boden und werden der zweiten Trennstufe zugeführt. Das Ferrosilizium-Wasser-Gemisch weist hier eine Dichte von ca.  $2,8 \text{ g/cm}^3$  auf; Aluminium und seine Legierungen schwimmen daher auf, am Boden verbleibt die als Mischmetall (Pb, Zn, Cu, etc.) bezeichnete Schwerfraktion. Die Dichteseparation nach dem Schwimm-Sink-Verfahren führt zu einer effizienten Abtrennung von nichtmagnetischen Schwermetallen, bewirkt jedoch eine Schrottverunreinigung durch das Schweremedium FeSi in der Höhe von ca. 7 kg je Tonne Schrott [GRIMM, 19989].

Wesentlich für den Einsatz von Aluminium in den Sekundärhütten ist eine gute Trennschärfe der vorgeschalteten Anlage, um die durch anhaftende Verunreinigungen verursachten Probleme im Schmelzbetrieb zu vermeiden. Weiters ist eine sorgfältige Entfernung des Trenn-

mittels FeSi unerlässlich, da es sonst bei der Lagerung des vorbereiteten Aluminiumschrotts zu Korrosion und in der Folge zu Ausbeuteverlusten und Qualitätseinschränkungen beim Schmelzprozeß kommen kann.

Bei starker Verunreinigung mit Öl, Fett, Lack oder Kunststoffüberzügen (wie z.B. in Getränkedosen) werden die Schrotte vor dem Einschmelzen im allgemeinen abgeschwelt [PERRY, 1993]. Ohne entsprechende Abgasreinigung führt das Abschwelen jedoch zu einer Verlagerung der Emissionen in die vorgelagerten Prozeßschritte.

Die **Hot-Crush-Technik** zur Aufbereitung von gemischten Guß- und Knetlegierungen, z.B. von gebrauchten Aluminiumgetränkedosen, basiert auf Änderungen der mechanischen Eigenschaften von Aluminiumlegierungen bei Temperaturen knapp unterhalb der Schmelztemperatur. Die auf ca. 540-580 °C erwärmten Schrottmischungen werden einer Hammermühle oder Brechanlage zugeführt. Hierbei werden die Gußteile zerschlagen, während Knetlegierungen lediglich plastisch verformt werden. Damit resultiert eine unterschiedliche Korngröße, sodaß über anschließendes Sieben die Trennung beider Bestandteile ermöglicht wird [LEHNERT et al., 1996; ROSSEL et al., 1996].

Eine weitere Auftrennung der Nichteisenmetallfraktion erfolgt durch Wirbelstromverfahren oder Linearmotoren, bei denen die NE-Metalle unter Ausnutzung ihrer unterschiedlichen elektrischen Leitfähigkeiten getrennt werden können [BAUMGARTNER, 1992].

Erkaltete oder gekühlte **Krätze** sowie Krätzepreßkuchen werden gemahlen und gesiebt; der grobe, metallreiche Anteil (Gröbe) geht nach einer Magnetscheidung zur Abtrennung von anhaftendem Eisen in das Sekundärschmelzwerk, der Feinanteil wird als Mahlstaub (bzw. Krätzestaub) wie Salzschlacke weiterbehandelt und verwertet (Abb. 2.4) [CASSELLS et al., 1993; YERUSHALMI, 1993].

Abbildung 2.4 gibt die Materialbilanzen für die Aufbereitung (Mahlen und Sieben) einer durchschnittlichen und einer hochmetallhaltigen (Werte in []) Krätze wieder. Entscheidend für die Aufbereitung ist, daß der hohe Oxidanteil des Krätzestaubs von 80 bis 85 % nicht in den Drehtrommelofen eingetragen wird, wo er zusätzliche Salzschlacke generieren würde. Im Falle der Aufbereitung müssen 418 [200] kg Krätzestaub entsorgt werden. Wären diese ohne Aufbereitung in den Schmelzofen eingetragen worden, hätten sie rund 800 [380] kg zusätzliche Salzschlacke erzeugt, die dann aufbereitet hätte werden müssen.

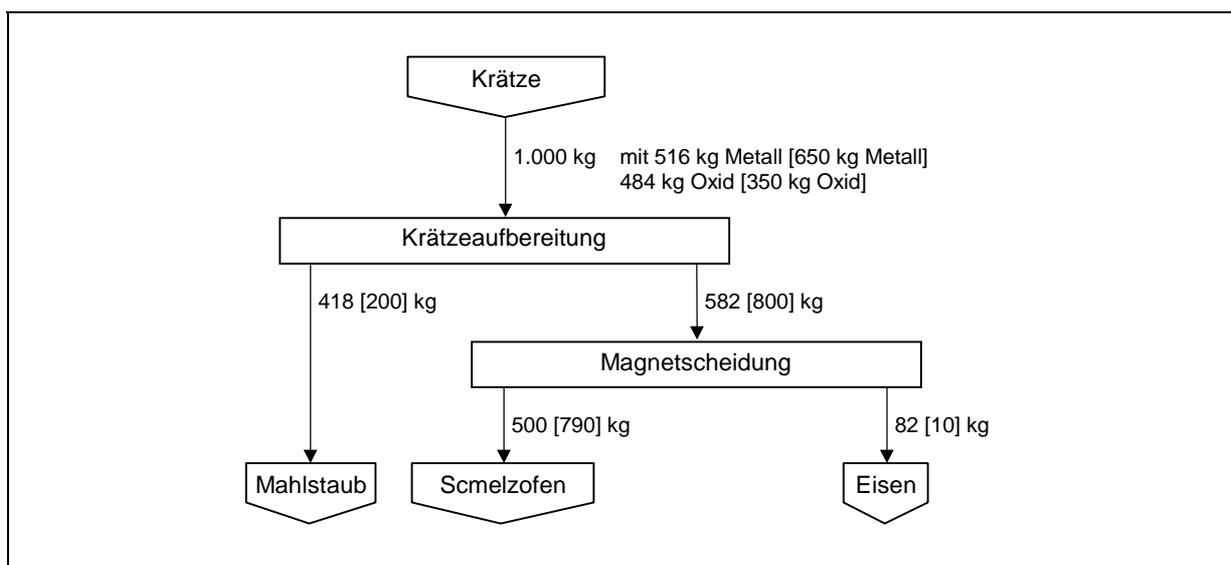


Abb. 2.4: Beispiele für eine Massenbilanz der Aufbereitung einer durchschnittlichen und einer hochmetallischen (Werte in []) Krätze

**Späne** werden üblicherweise als eine Art "Gewölle" angeliefert und sind meist mit Bohr- und Schneidemulsionen verunreinigt. Sie werden nach Erfordernis in speziellen Brechern zerkleinert, entölt und getrocknet, einer Magnetscheidung unterworfen und kompaktiert (Abb. 2.5) [PIETSCH, 1995; PIETSCH, 1993].

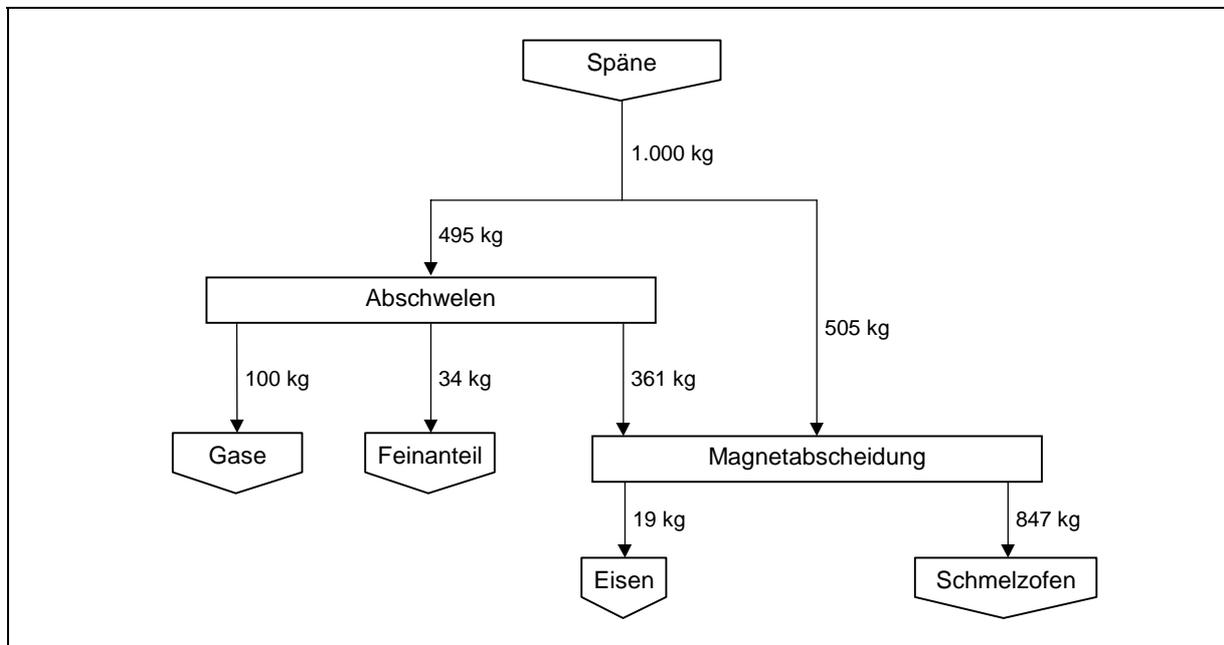


Abb. 2.5: Beispiel für eine Massenbilanz in der Spänaufbereitung

Der Umfang der Schrottaufbereitung kann durch geeignete Verfahrensanweisungen zur Vermeidung von zusätzlichen Verunreinigungen mit Wasser bzw. Feuchte, halogenhaltigen Ölen, Schmutz und anderen Fremdstoffen in den Bereichen Sammlung, Transport, Eingangskontrolle, Lagerung und Schrotthandling wesentlich reduziert werden [PIERCE et al., 1995].

### 2.1.5 Chargengattierung

Da aus diesen nur bedingt spezifizierbaren Einsatzmaterialien genormte bzw. vertraglich vereinbarte Legierungen herzustellen sind, besteht ein Grundprinzip des Aluminiumrecyclings im Verdünnen mit Hüttenaluminium bzw. niedriger legierten Schrotten.

Für die dazu erforderliche Chargengattierung im Schmelzprozeß wird die chemische Zusammensetzung des metallischen Inhalts jeder einzelnen Schrottpartie sowie ihre Metallausbeute, die quasi den ausbringbaren Metallgehalt darstellt, benötigt.

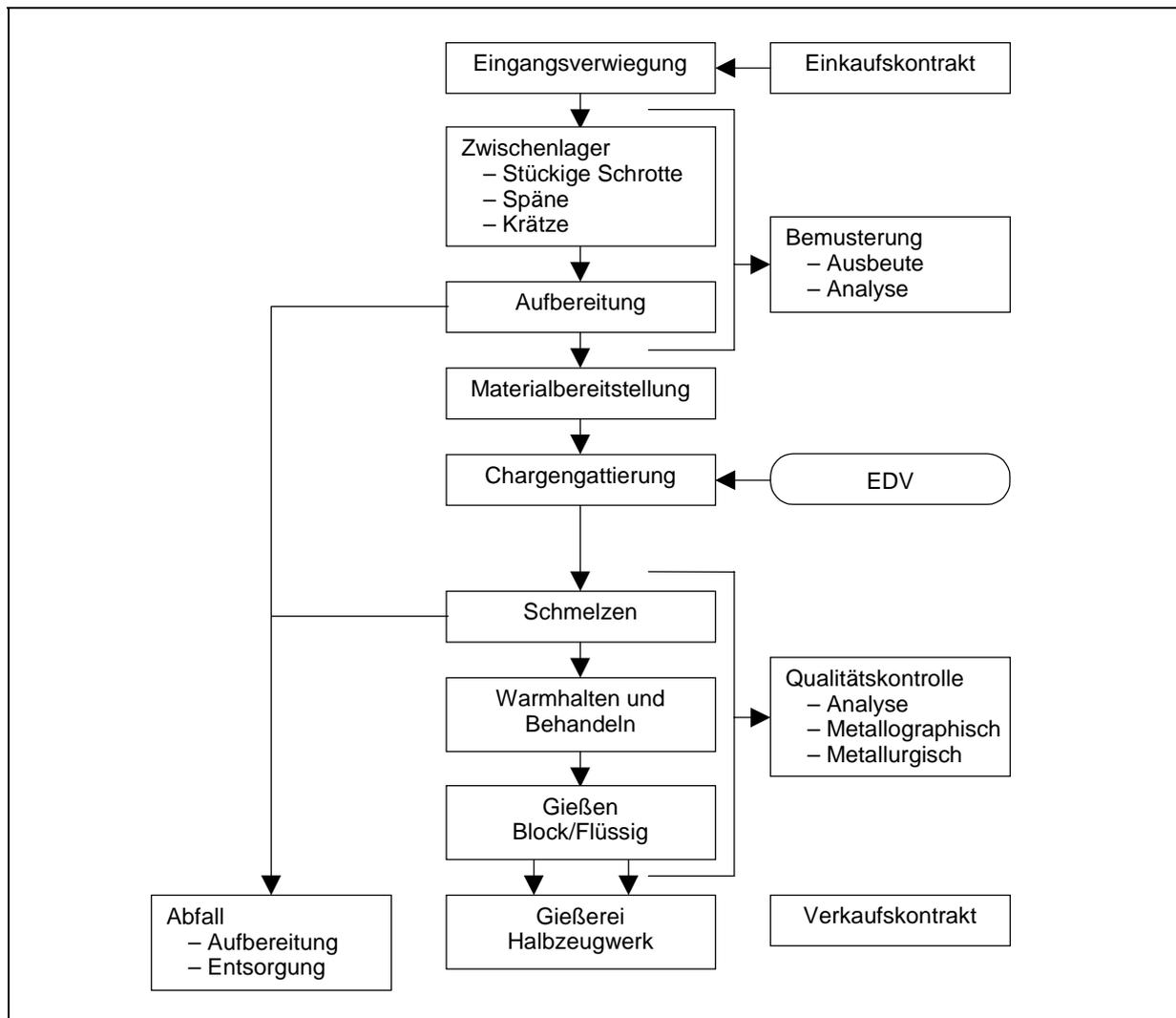


Abb. 2.6: EDV-gestützte Logistik in der Sekundäraluminiumerzeugung [ORBON, 1997]

Für die Bestimmung der Metallausbeute wird von jeder Schrottpartie ein repräsentatives Muster gezogen und in einer Probeschmelze in kleinem Maßstab von etwa 100 bis 500 kg eingeschmolzen. Aus dem Verhältnis Metallproduktauswaage zu Schrotteinwaage ergibt sich die Metallausbeute. Eine Probe des erschlossenen Metalls wird im Labor auf die wichtigsten Legierungs- und Spurenelemente analysiert.

EDV-gestützt werden so für jede angelieferte Schrottpartie Menge, Ausbeute und chemische Analyse gespeichert (Abb. 2.6). Für jede vom Kunden bestellte Aluminiumlegierung kann damit die benötigte und wirtschaftlich optimierte Kombination von Schrotten ermittelt und den Schmelzöfen zugeführt werden.

## 2.2 Technologien und Ofentypen

Die Aggregate zum Schmelzen, Warmhalten, Raffinieren und Legieren variieren je nach Art der einzusetzenden Schrotte und der geforderten Produktqualität. Die von den Refinern vorwiegend eingesetzten Aggregate sind der Drehtrommelofen zum Einschmelzen stark verschmutzter Schrotte und der Herdofen zum Einschmelzen wenig verschmutzter Schrotte bzw. organisch verunreinigte Schrotte mit geringem Oxidgehalt, sowie Herdöfen zum Warmhalten und Legieren (Abb. 2.7). Remelter setzen zum Schmelzen ausschließlich Herdöfen, z.B. Side-well- oder Closed-well-Herdöfen, ein.

Zur Beurteilung, ob grundsätzlich Drehtrommelöfen mit Salzeinsatz oder stationäre Herdöfen ohne Salzeinsatz für eine bestimmte Schrottart in Frage kommen, ist der Oxidanteil von entscheidender Bedeutung. In einem Herdofen wird zusätzlich zum Oxideintrag mit dem Schrott das geschmolzene Metallbad (da nicht von Salz geschützt) oberflächlich oxidiert.

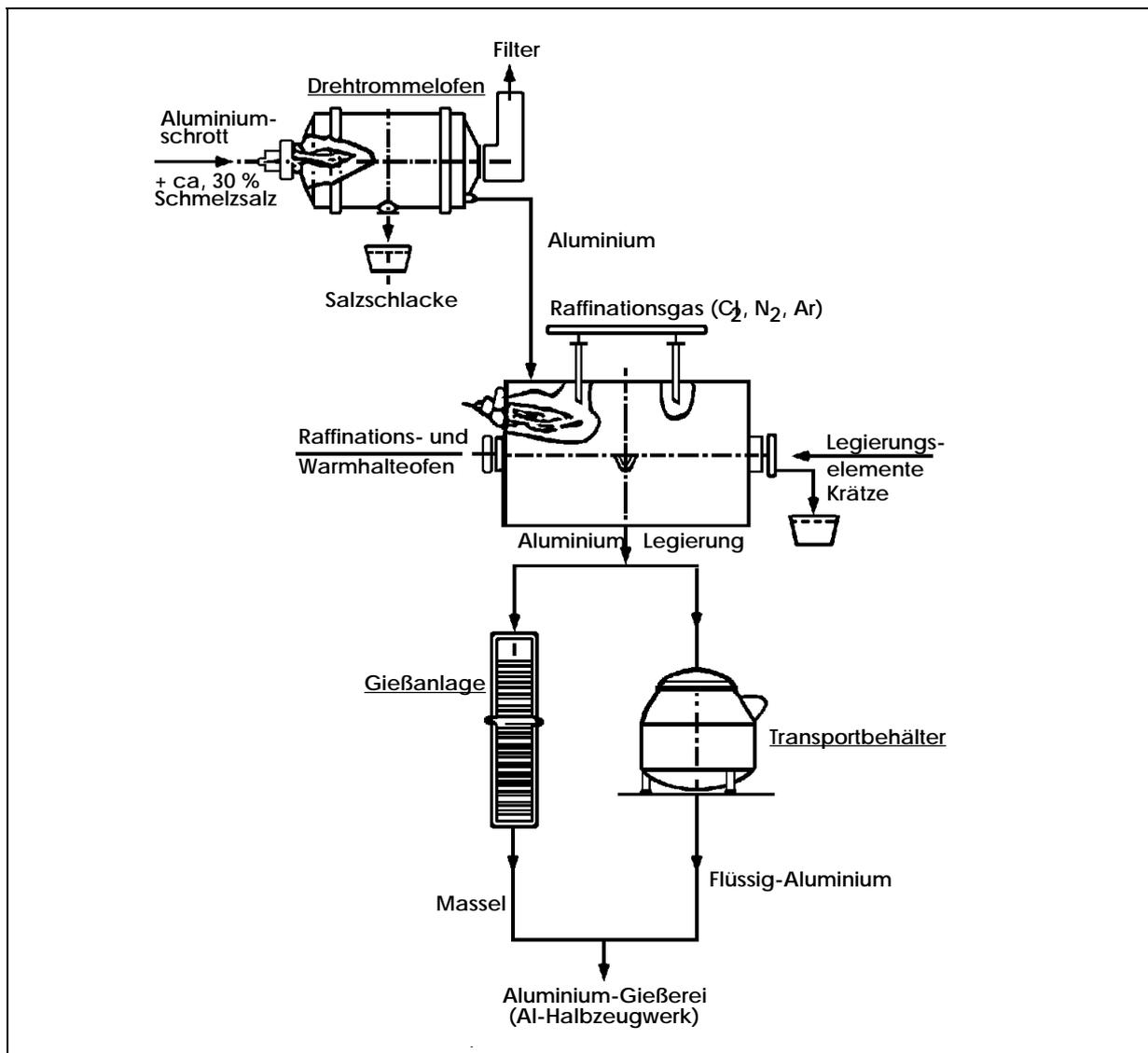


Abb. 2.7: Schmelzen von stark verschmutzten Schrotten im Drehtrommelofen und anschließende Schmelzebehandlung [BRUCHE & ORBON, 1982]

### 2.2.1 Schmelzverfahren

Die Auswahl des bestgeeigneten Schmelzverfahrens zum Einschmelzen von Schrott wird vom Metallanteil, Art und Umfang der Verunreinigungen, der Schrottgeometrie, der Legierungswechselhäufigkeit und der Betriebsweise (kontinuierlich, diskontinuierlich) bestimmt.

Das gebräuchlichste Verfahren zum Einschmelzen von nicht sortenrein gehaltenem und oberflächlich oxidiertem Aluminiumschrott ist das Schmelzen unter Salz im **Drehtrommelofen**, welches auch beim Einsatz minderwertiger Materialien eine hohe Ausbeute bzw. geringe Abbrandverluste sicherstellt [KIRCHNER, 1989].

Zur Vermeidung des Salzschlackeanfalls können Schrotte mit wenig Oxidanhaftungen salzfrei in **Herdöfen** (z. B. Closed-well und Side-well-Öfen) eingeschmolzen werden. Dünnwandige Schrotte mit hohen Gehalten an organischen Verunreinigungen können in sog. 2-Kammer-Herdöfen (**Closed-well-Öfen**) eingeschmolzen werden. Für sehr kleinstückige Schrotte mit einer hohen spezifischen Oberfläche wie zum Beispiel Späne – die auf der zähen Salzsammelze aufschwimmen und daher relativ lange der Brennerflamme und damit besonders der Oxidation ausgesetzt sind – kann die Schmelzzeit dadurch verkürzt und die Metallausbeute erhöht werden, daß man sie in bereits flüssiges Metall eintaucht und dabei schmilzt, zumal Metall eine wesentlich höhere Wärmeleitfähigkeit als Salz hat (**Side-well Herdöfen**). Wenn möglich werden Späne in Closed well Öfen, Side well Öfen oder auch in Induktionsofen eingeschmolzen. Steigt jedoch der Feinanteil und/oder der Oxidanteil so ist der Drehtrommelofen das bessere Schmelzaggregat, ebenso bei Mischspänen und bei häufigerem Legierungswechsel.

Die gesamte Oxidmenge schwimmt auf der Badoberfläche und wird mechanisch als sogenannte Krätze abgezogen; durch Kapillarkräfte enthält die abgetropfte, heiße Krätze allerdings rund 70 % Metall. Je nach Umgebungsbedingungen und Temperatur verbrennen pro Minute gut 1,5 % des Metallinhaltes. Durch Schutzgaseinsatz, Abkühlen unter Luftabschluß oder Abdecken mit Salz kann meist in der Krätze 50-65 % Metallinhalt erhalten werden. Ohne solche Vorsichtsmaßnahmen kann sich der Metallgehalt durch Verbrennen des Aluminiums (Krätzebrand) bis auf 25-30 % verringern.

Das nachfolgende Beispiel (Tab. 2.5) zeigt für zwei verschiedene Schrotte (a – gebrauchtes Aluminiumgeschirr) und (b – blanke Aluminiumtuben) den Mechanismus des Krätzeanfalls. Es wird deutlich, daß schon relativ gering erscheinende Oxidgehalte im Schrott in einem Herdofen zu großen Krätzemengen führen, mit entsprechenden Metallverlusten. Die entstandenen Krätzen müssen dann ihrerseits in einem Drehtrommelofen unter Salz eingeschmolzen werden, da sie bei Rezirkulation in den Herdofen schnell zu exponentiell steigenden Krätzemengen führen würden.

Für die Sekundäraluminiumerzeugung gilt, daß bei Einsatz des salzbeaufschlagten Drehtrommelofens ein geringerer Krätzeanfall vorliegt als bei Einsatz eines ohne Salz arbeitenden Herdofens. Schrotte mit hohen Oxidanteilen werden deshalb im Drehtrommelofen eingeschmolzen. Andererseits können organisch belastete Schrotte mit geringem Oxidanteil im Herdofen (Closed Well Ofen) eingesetzt werden.

Der Einsatz von Schrotten im Drehtrommelofen führt zum Anfall von Salzschlacke, die ihrerseits wiederum behandelt werden muß.

Tab. 2.5: Krätzeanfall in einem Herdofen mit 30 t Fassungsvermögen

<b>a) Einsatzmaterial: gebrauchtes Aluminiumgeschirr</b>			
[kg]	Gesamtmenge	Metallanteil	Oxidanteil
<b>Vorgänge im Ofen</b>			
Einsatzmaterial	30.000	28.500	1.500
auf der Metalloberfläche entstehendes Oxid	50	-	50
Abgezogene Krätze mit 70 % anhaftendem Metall	$1.550 / (1 - 0,7) = 5.167$	$5.167 - 1.550 = 3.617$	1.550
Metallausbeute:	$\frac{\left( 28.500 - 3.617 - \frac{50}{1,9} \right)}{30.000} \times 100 \% = ca. 83 \%$		
Krätzeanfall:	172 kg Krätze / t Einsatz		
<b>b) Einsatzmaterial: blanke Aluminiumtuben</b>			
[kg]	Gesamtmenge	Metallanteil	Oxidanteil
<b>Vorgänge im Ofen</b>			
Einsatzmaterial	30.000	29.500	500
auf der Metalloberfläche entstehendes Oxid	50	-	50
abgezogene Krätze mit 70 % anhaftendem Metall	$550 / (1 - 0,7) = 1.833$	$1.833 - 550 = 1.283$	550
Metallausbeute:	$\frac{\left( 29.500 - 1.283 - \frac{50}{1,9} \right)}{30.000} \times 100 \% = ca. 94 \%$		
Krätzeanfall:	61 kg Krätze / t Einsatz		

## 2.2.2 Herdöfen

Herdöfen sind einerseits das Standardschmelzaggregat der Remelter und werden andererseits von den Refinern üblicherweise als Warmhalteöfen eingesetzt, aber auch zum Schmelzen von organisch belasteten Schrotten mit geringem Oxidanteil (Closed Well Ofen). Herdschmelzöfen erfordern einen homogenen Schrottzulauf gleicher Zusammensetzung mit einem Oxidanteil von  $\leq 5\%$ . Da Herdöfen ohne Salz betrieben werden, ist der Magnesiumabbrand entsprechend gering.

Herdöfen haben unterschiedlich ausgeführte Wannen – weswegen sie manchmal auch als Wannenöfen bezeichnet werden – verfügen üblicherweise über 5 bis max. 100 t Fassungsvermögen und sind durchwegs mit Öl oder Gas beheizt. Die Wärmeübertragung findet in hohem Maße durch Strahlung statt, weshalb die Brennerauswahl, Brenneranordnung und Flammencharakteristik neben Ofenraumdruckregelung und Luftvorwärmung von entscheidender Bedeutung für die Wärmeeffizienz sind.

Je nach Schrottgeometrie, -zusammensetzung und Verunreinigung wird Stückschrott mit großen Eiseneinschlüssen in **Abschmelz-Herdöfen** auf hochgesetzten Schrägen abgeschmolzen oder dünnwandiger Schrott in **Side-well-Herdöfen**, **2-Kammer-Herdöfen** oder **Closed-well-Herdöfen** eingeschmolzen.

In **Side-well-Herdöfen** kann großstückiger Schrott je nach Konstruktionsart und Schrottgeometrie in einem Schmelzbecken (Vorherd bzw. Side-well) mit flüssigem Metall überflutet werden oder feinstückiger Schrott in eine Metalltrombe eingezogen werden. Der Vorherd bzw. Side-well ist von der Schmelzwanne durch eine siphonartige Wand abgetrennt; das flüssige Metall fließt entweder durch Naturumlauf oder durch Metallpumpen in das Seitenschmelzbecken. Dieses Schmelzaggregat eignet sich besonders zum Einschmelzen von Spänen. Wenn möglich werden Späne in Closed well Öfen, Side well Öfen oder auch in Induktionsöfen eingeschmolzen. Steigt jedoch der Feinanteil und/oder der Oxidanteil so ist der Drehtrommelofen das bessere Schmelzaggregat, ebenso bei Mischspänen und bei häufigerem Legierungswechsel.

Dünnwandige Schrotte mit hohen Gehalten an organischen Verunreinigungen ( $\geq 10\%$  ausgedrückt als Glühverlust) können in sogenannten **2-Kammer Herdöfen** (Abb. 2.8) oder **Closed-Well-Öfen** eingeschmolzen werden.

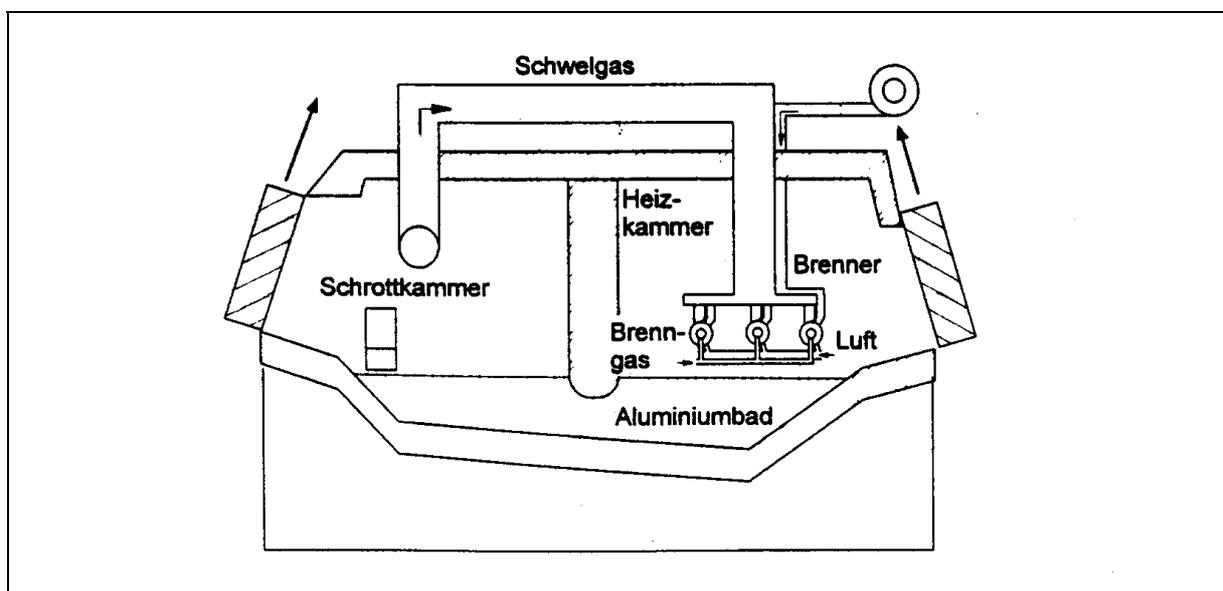


Abb. 2.8: 2-Kammer Herdofen [LEHNERT et al., 1996]

Dünnwandige, stark organisch verunreinigte Schrotte werden in der Schrottkammer auf der Brücke aufgeschwelt und anschließend im flüssigen Metallbad geschmolzen, nicht kontaminierte saubere Kernschrotte (Bolzenabschnitte, Masseln, Blöcke oder Barren  $< 5\%$  Oxidanteil) können aufgrund ihrer geringen spezifischen Oberfläche unter direkter Befuerung in der Heizkammer geschmolzen werden.

Die Heizkammer wird im Fall einer rekuperativen Luftvorwärmung über bis zu vier  $\text{NO}_x$ -arme Hochgeschwindigkeitsbrenner befeuert, die direkt auf das Schmelzbad feuern. Der hohe Austrittsimpuls der Verbrennungsgase sorgt dabei für eine gute Wärmeübertragung vom Verbrennungsgas auf das Aluminiumbad und eine krätzearme Badoberfläche (d.h.  $< 100$  kg abgezogene Krätze/t Einsatzmaterial). Bei rekuperativer Luftvorwärmung kommen Brenner mit wechausbrennender Flamme zum Einsatz.

Die Schrottkammer ist von der Heizkammer durch eine Wand getrennt. In der Schrottkammer werden Kontaminate verdampft und pyrolysiert. Die dabei entstehenden organisch belasteten Abgase werden in die Heizkammer eingedüst und nachverbrannt. Im Gegenstrom gelangen heiße Gase aus der Heizkammer durch eine Öffnung in der Trennwand in die Schrottkammer, in der eine reduzierende Atmosphäre gehalten wird. Unterstützend wirkt dafür ein Zusatzbrenner, der gleichzeitig eine Steigerung der Schmelzleistung um ca. 20 % bewirkt. Eine zwischen Heiz- und Schrottkammer installierte Metallpumpe verhindert das Erstarren des Metalls auf der Schrottseite.

Durch die Umwälzung des flüssigen Aluminiums wird der Wärmeübergang zwischen den Verbrennungsgasen und der kälteren Badoberfläche (und damit die Schmelzleistung) erhöht. Je nach Ofengröße werden diskontinuierlich 5 bis 30 t Aluminium abgestochen und in einen Gießofen oder Konverter zur Weiterbehandlung der Schmelze überführt. Nach dem Abstich taucht die Trennwand gerade noch in das Aluminiumbad ein [LEHNERT et al., 1996].

Metallpumpen gibt es in zwei grundsätzlichen Ausführungen: Induktive Metallpumpen haben den Vorteil, keine drehenden Teile zu besitzen, jedoch den Nachteil, sehr anfällig gegen Verunreinigungen im Metall zu sein. Rotorpumpen haben demgegenüber die Vorteile der leichten Regelbarkeit und einer hohen Förderleistung, jedoch den Nachteil einer relativ kurzen Rotorstandzeit von ca. zwei Monaten.

### 2.2.3 Drehtrommelöfen

Das "klassische" Schmelzverfahren der Refiner ist das Einschmelzen von nicht sortenrein gehaltenen, verunreinigten Schrotten unter einer Salzdecke; das "klassische" Schmelzaggregat dazu ist der Drehtrommelofen (Abb. 2.9).

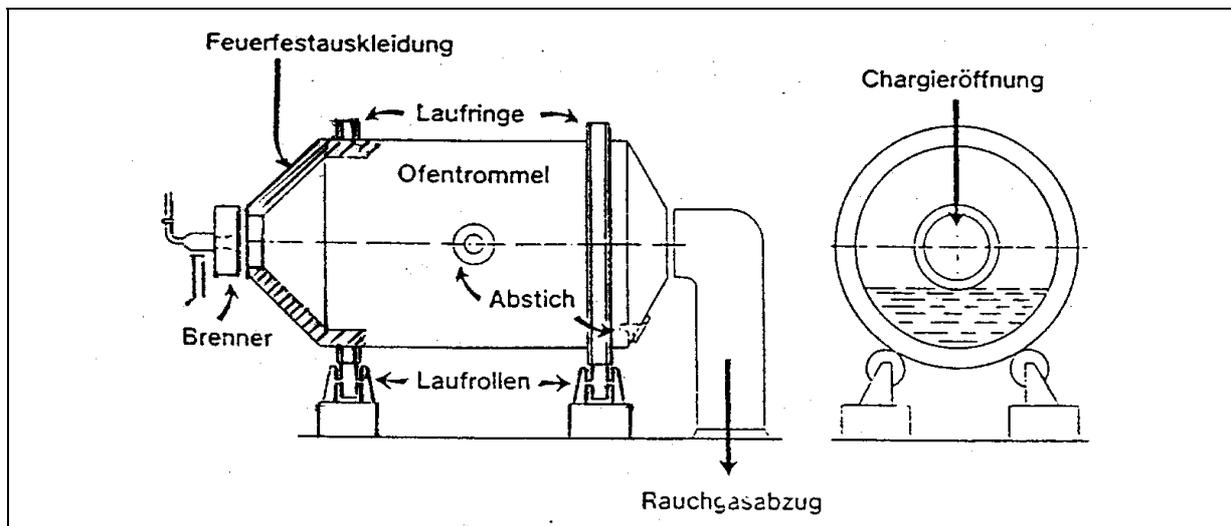


Abb. 2.9: Drehtrommelofen [KRÜGER, 1994]

Das Salz hat prinzipiell zwei Aufgaben: die eingetragenen und entstehenden Oxide und sonstigen anorganischen Beimengungen des Schrotts aufzunehmen und das flüssige Metall vor weiterer Oxidation zu schützen [WOJCIECHOWSKI & KOGAN, 1995; YE & REVET, 1996]. Um diesen Aufgaben gerecht werden zu können, muß das Salzgemisch eine niedrigere Dichte und Schmelztemperatur aufweisen als das Metall [ROY & SAHAI, 1993]. Das in Europa aufgrund vorhandener natürlicher Vorkommen eingesetzte Gemisch von ca. 70 % NaCl und 30 % KCl erfüllt diese Anforderungen.

Zusätzlich wird dem Schmelzsalz ein die Oxidhaut chemisch attackierender Fluoridzusatz beigemischt – in Europa üblicherweise 2-5 % Flußspat. Untersuchungen in den USA haben jedoch gezeigt, daß die Koaleszenzwirkung von Flußspat ( $\text{CaF}_2$ ) relativ gering ist und Additive wie Kryolith ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ) eine deutlich höhere Effizienz zeigen [TENÓRIO & DELGADO, 1997].

Die beim Schmelzen benötigte Salzmenge hängt direkt vom Verunreinigungsgrad der Schrotte ab und wird über den Salzfaktor SF ermittelt, der wie folgt definiert ist:

$$SF = \frac{t \text{ Salz} \times 100}{[t \text{ Schrott} \times (100 - \% \text{ Metallausbeute})]}$$

Drehtrommelöfen werden üblicherweise mit Öl oder Gas unter Verwendung von Luft, zunehmend auch alternativ mit Sauerstoff, beheizt [PAGET et al., 1997]. Die Wärmeübertragung im Drehtrommelofen findet im wesentlichen durch die rotierende, in das Schmelzgut eintauchende heiße Ofenwandung statt, die direkt von der Brennerflamme aufgeheizt wird. Das an der Wandung in dünner Schicht klebende Salz wird dabei überhitzt, wodurch etwa 2-3 % der eingesetzten Salzmenge verdampfen und für eine entsprechende Salzbelastung in den Filterstäuben sorgen.

### Nasses Salzschnmelzverfahren

Wird mit einem Salzfaktor von 1,0 oder größer gearbeitet, kann die Salzschlacke in flüssiger Form abgezogen werden. Der dazu eingesetzte Ofentyp mit starrer Rotationsachse ist das Standardschnmelzaggregat der europäischen Sekundärschnmelzwerke für stark verunreinigte Schrotte in unterschiedlichen Stückgrößen. Das Fassungsvermögen liegt zwischen 10 und 60 Tonnen. Aufgrund seines Chargenbetriebes und seiner Selbstreinigung – durch Rotation reinigt das Schmelzgut laufend die Ofenwandung von möglichen Ansetzungen – ist mit diesem Ofentyp mit jeder Ofenreise ein Legierungswechsel möglich (theoretisch 3-6 Legierungswechsel pro Tag). Es ist allerdings zu berücksichtigen, daß Cu-freie Legierungen nicht in einem Ofen geschmolzen werden können, in dem vorher eine Cu-haltige Legierung produziert wurde; Cu ist eines der Leitelemente für die Einteilung von genormten Aluminiumlegierungen (Cu-frei, Cu-arm, Cu-reich).

Tab. 2.6: Beispiele für den Einfluß des Salzfaktor auf die zu entsorgende Salzschnslackenmenge eines Drehtrommelofens mit 15 t Fassungsvermögen und einer Metallausbeute von 85%

	Salzfaktor SF = 1,8 Zahlen in (t)	Salzfaktor SF = 1,0 Zahlen in (t)
Schrotteinsatz	11,80	13,00
Salzeinsatz	3,20	2,00
Gesamt	15,00	15,00
Metallproduktion	9,85	10,98
Schnslackenfall	5,00	3,95
Filterstaub	0,18	0,14
% Salz in der Schnlacke	64 %	51 %

Bei hohem Salzeinsatz sind Drehtrommelöfen relativ sicher und ohne aufwendige Kontrolle zu betreiben, da ein Metallverbrennen kaum möglich ist. Vor mehr als 15 Jahren galt ein mittlerer Salzfaktor von 1,8; inzwischen versuchen die Sekundärschnmelzwerke mit Salz Faktoren von 1,3 oder in besonderen Fällen mit 1,0 zu operieren (Tab. 2.6).

Die Tabelle 2.6 macht deutlich, daß eine Absenkung des Salz factors, d.h. des Salzeinsatzes, mehrere Vorzüge mit sich bringt: Weniger Salz bedeutet weniger Salzschnlacke, weniger Filterstaub und mehr Metallausbeute. Bei einem Salzpreis von ATS 900/t Salz, einem Schnlackebehandlungspreis von ATS 1.400/t Schnlacke und einem Entsorgungspreis für Filterstaub von ATS 4.000/t Filterstaub bringt die Reduzierung des Salz factors von 1,8 auf 1,0 eine unmittelbare Kostensenkung um rund ATS 360/t Metall. Gleichzeitig kommt es dabei zu einer Reduktion des Salzschnlacken- und Filterstaubaufkommens.

## Trockenes Salzsammelverfahren

Senkt man den Salzfaktor in den Bereich von 0,5, so liegt das Oxid-Salz-Gemisch nicht mehr als flüssige Schlacke, sondern in Form einer fast pulverig-krümeligen Masse vor. Um einen solchen Salzkuchen aus einem Drehtrommelofen entfernen zu können, muß er kippbar ausgeführt sein. In diesem Fall weist der Ofen nur noch eine Öffnung auf, durch die der Ofen beschickt wird, durch die während des Schmelzens die Abgase entweichen und durch die die Schlacke entfernt wird.

Dieser Ofentyp, der in den USA sehr verbreitet ist, erfordert für die Abgasabführung eine Haubenkonstruktion. Durch die Haubenkonstruktion werden große, kaum erfaßbare Falschlufmengen in das Abgassystem gezogen. Um das Volumen des Ofenrauchgases zu reduzieren, werden diese Öfen bevorzugt mit Erdgas-Sauerstoff-Brennern betrieben; dadurch lassen sich der Gasverbrauch in m<sup>3</sup>/t Metall um etwa 40-50 % und das Rauchgasvolumen in m<sup>3</sup>/t Metall um etwa 80-90 % absenken und dabei gleichzeitig die Metallausbeute um einige Prozent erhöhen (max. 4 %) und die Ofenreisezeiten um ca. 50 % verkürzen.

Dieser Ofentyp eignet sich besonders für das Schmelzen hoch-oxidhaltiger Materialien, wie z.B. Krätze; sein Nachteil liegt in der durch den geringen Salzeinsatz bedingten Gefahr von Krätzebrand; d. h. dieser Ofentyp verlangt die stete Aufmerksamkeit des Betriebspersonals. Das Fassungsvermögen der gängigsten Ofenform liegt bei ca. 6-10 Tonnen.

Der Reduzierung des Salz factors ist dadurch eine Grenze gesetzt, daß der Salzgehalt der Schlacke nicht mehr ausreicht, eine flüssige Schlacke zu gewährleisten. Wo der Stockpunkt der Salzschlacke liegt, hängt unter anderem vom mittleren Korndurchmesser der Oxide und ihrer Kornform ab, da sie die innere Reibung der Schlacke maßgeblich beeinflussen. Beide Größen sind nur empirisch für jede einzelne Schrottart feststellbar. Die Reduzierung des Salz factors erfolgt daher nur sehr behutsam, da eine einmal im Drehtrommelofen fest gewordene Schlacke nur noch unter größten Mühen zu entfernen ist. Einen Vergleich wichtiger Kenndaten beider Schmelzverfahren gibt Tabelle 2.7 wieder.

Tab. 2.7: Kenndaten von nassen und trockenen Salzsammelverfahren

Salzsammelverfahren	Naß	Trocken
Typische Salzgehalte der Schlacken	≥ 50 %	< 35 %
Ofentyp	starrer Drehtrommelofen mit Erdgas-Luft-Brenner	kipptbarer Drehtrommelofen mit Erdgas-O <sub>2</sub> -Brenner
Ofenfassungsvermögen	10 - 60 t	6 - 10 t
Ofenreisezeit	4 - 8 h	2 - 3 h
Salzfaktor	≥ 1,0	< 0,5

### 2.2.4 Induktionsöfen

Induktionsöfen bestehen aus einem keramischen, feuerfesten und nicht elektrisch leitenden Tiegel, der von der wassergekühlten Induktionsspule umgeben ist. In der Spule wird das elektromagnetische Feld erzeugt, das die Energie auf das Einsatzmaterial überträgt.

Die Schmelzleistung eines Induktionstiegelofens hängt hauptsächlich von der im Einsatz induzierten elektrischen Leistung ab. Diese ist von der Arbeitsfrequenz abhängig und wird bei gegebener Ofengröße in erster Linie durch die höchstzulässige Badaufwölbung infolge der induktiven Badkraft begrenzt, um ein Hochschleudern von flüssigem Einsatzmaterial zuverlässig zu vermeiden. Da die induktiven Badkräfte mit steigender Frequenz abnehmen, ist bei höherer Frequenz eine größere Leistungsintensität zulässig, d.h. eine bestimmte Schmelzleistung kann von einem kleineren Ofen erbracht werden.

Induktionsöfen (Abb. 2.10) erfordern sehr reines Einsatzmaterial. Sie benötigen einen stets flüssig gehaltenen Metallsumpf, da sonst die Koppelung für die Energiezufuhr nicht möglich ist. Diese Öfen weisen geringe Emissionen, einen hohen energetischen Wirkungsgrad, einen geringen Wasserstoffgehalt der Schmelze und einen geringen Abbrand auf.

Induktionsöfen werden in Sekundärschmelzwerken jedoch aufgrund der hohen Investitionskosten, insbesondere für die elektrischen Nebenausrüstungen, sowie der Anforderung nach saubereren, praktisch oxidfreien Schrotten nur vereinzelt eingesetzt. Haupteinsatzgebiet für Induktionsöfen sind Gießereien.

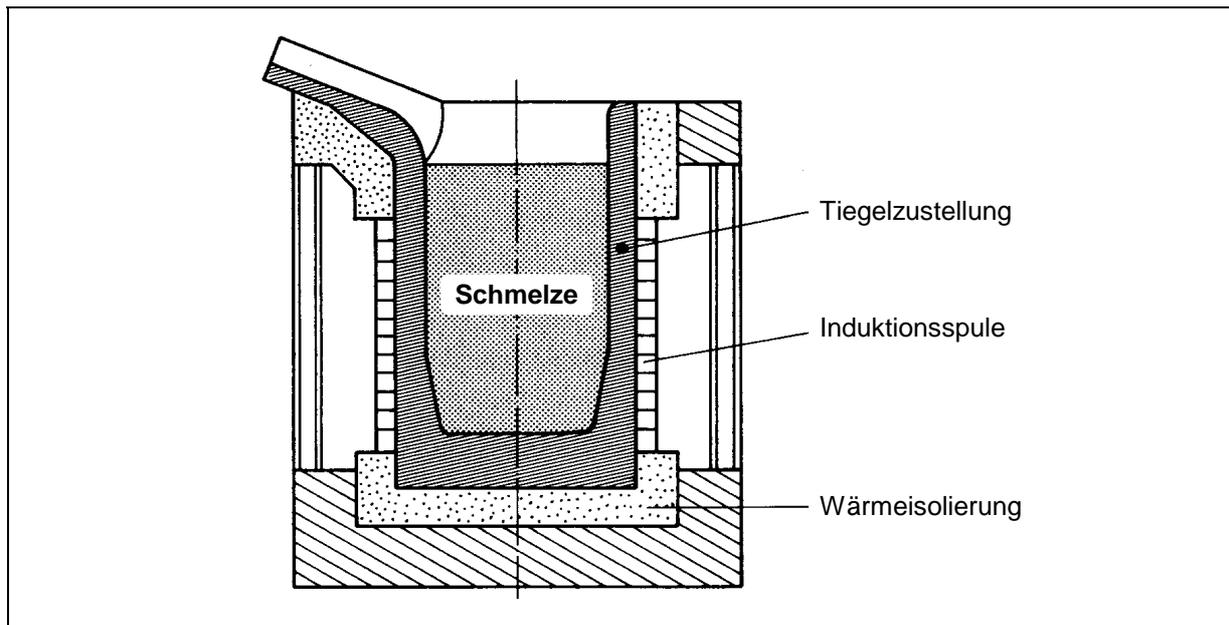


Abb. 2.10: Netzfrequenztiegelofen [SCHAEFER, 1994]

### 2.2.5 Kriterien zur Auswahl geeigneter Schmelzöfen

Die wesentlichen Rohstoffkriterien zur Auswahl der optimal geeigneten Schmelzöfen sind die Verunreinigung der Rohstoffe durch Oxide, anhaftendes Eisen und organisches Fremdmaterial (ausgedrückt durch Gewichtsprozent Glühverlust), der Magnesiumgehalt, das Verhältnis Oberfläche zu Masse der Schrotteilchen sowie das jeweils dünnste Wandstärkemaß der Schrotteilchen. Weiters sind aus technologischer Sicht die Legierungswechselhäufigkeit und die betriebsartbedingten Abfälle und Reststoffe von Bedeutung.

Die wichtigen Kriterien "Oxidanteil" und "Glühverlust" bzw. "Verhältnis Oberfläche zu Masse" sind in den Abbildungen 2.11 und 2.12 als Matrix gegenübergestellt und lassen so schon bei rein qualitativer Anwendung Kategorien von Rohstoffen bzw. Schmelzöfen erkennen. Die in die einzelnen Quadranten eingetragenen Beispiele gelten als typisch.

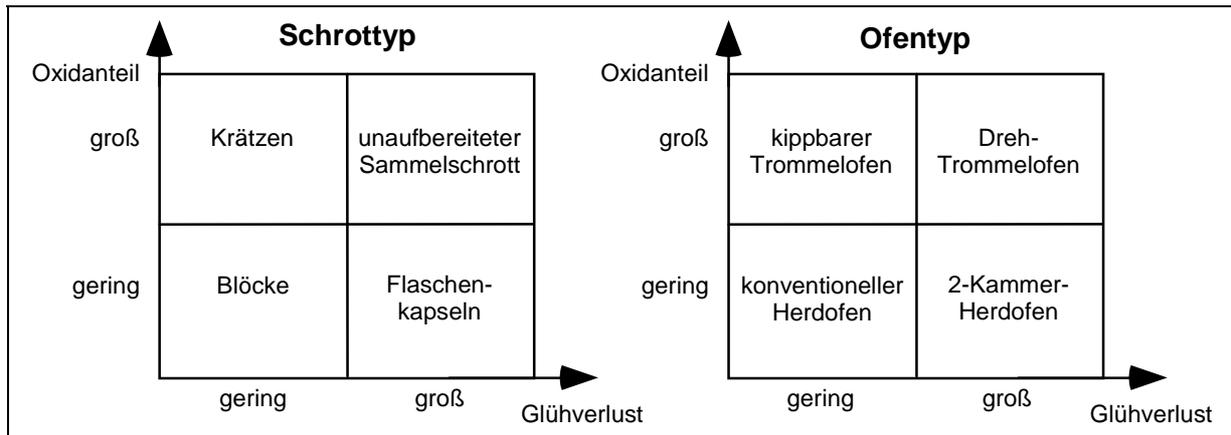


Abb. 2.11: Zuordnung von Schrottarten und Ofenauswahlkriterien gemäß Oxidanteil und Glühverlust [BOIN, 1997]

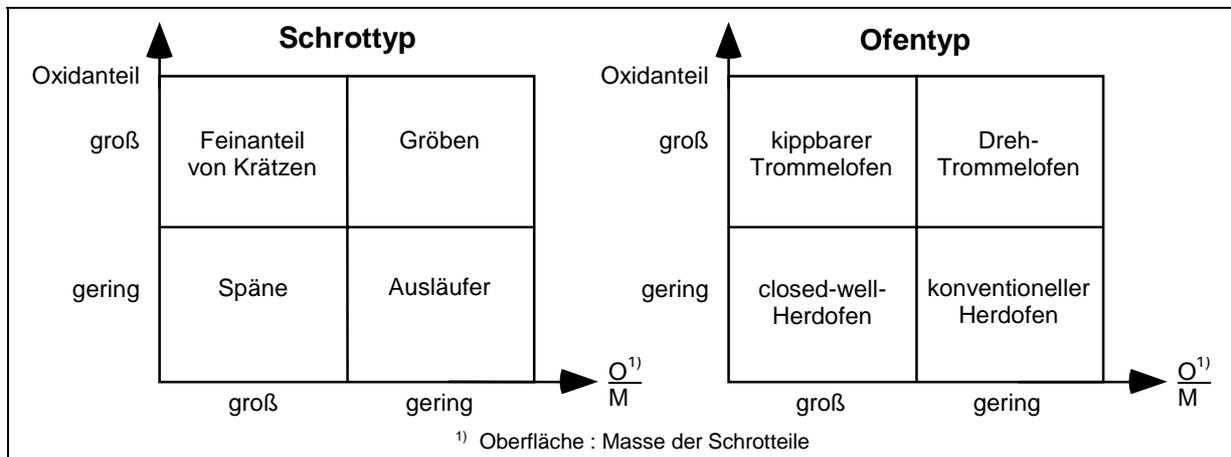


Abb. 2.12: Zuordnung von Schrottarten und Ofenauswahlkriterien gemäß Oxidanteil und Verhältnis von Oberfläche zu mittlerer Teilchengröße [BOIN, 1997]

Ausgehend von dieser qualitativen Zuordnung versucht Tabelle 2.8 quantifizierbare Kriterien für die Zuordnung von Schrotten zu den einzelnen Schmelzaggregaten abzuleiten, die einerseits eine sinnmachende Rohstoffkategorisierung und andererseits eine eindeutige Zuordnung der so definierten Rohstoffkategorien zu optimal geeigneten Schmelzöfen erlauben.

Beim Kriterium "Abfälle" wurde darauf verzichtet, den Anfall von Filterstaub und Ofenausbruch für die einzelnen Ofentypen gesondert darzustellen.

Der Anfall von Filterstaub wird von mehreren unabhängigen Bedingungen bestimmt, wie lose oder feste Oxidanhaftungen, Chargiermethoden, Dauer der Ofenreise, Ofenzug, Salzverdampfung, Feuchteintrag, Anteil an flüchtigen anorganischen Schrottbestandteilen (z. B. Cd, Zn, u.a.), Menge des eingesetzten Additivs (Kalkhydrat, Koksstaub, etc.) sowie Art und Abscheideleistung des Filters. Eine vertretbare Zuordnung zu Schrottkategorien ist nicht ableitbar.

Hinsichtlich der Zuordnung zu Schmelzofentypen kann nur qualitativ gesagt werden, daß Herdöfen ohne Salzeinsatz und mit relativ reinem Schrott beaufschlagt prinzipiell weniger Filterstaub generieren als salzbeaufschlagte Drehtrommelöfen (vergleiche Kapitel 2.5, Tabelle 2.11).

Die feuerfeste Ofenausmauerung aller Schmelzöfen unterliegt einem unvermeidlichen mechanischen, thermischen und chemischen Verschleiß, der sich durch manchmal gleichmäßigen, meist aber ungleichmäßigen Wandstärkeverlust bemerkbar macht. Von Zeit zu Zeit ist daher das verschlissene und mit Oxidanbackungen und Metalleinschlüssen versehene Mauerwerk zu ersetzen. Das ausgehauene, verschlissene Mauerwerk wird als Ofenausbruch bezeichnet.

Tab. 2.8: Kriterien zur Auswahl optimal geeigneter Schmelzöfen

Ofentyp	Rohstoffkriterien				Betriebskriterien			
	Eingesetzte Schrotte	Abmessungen		Verunreinigungen im Einsatzmaterial		Mg-Gehalt (%)	Durchschnittliche Metallausbeute (%)	Legierungswechsel pro Tag
		Oberfläche: Masse <sup>1)</sup> (m <sup>2</sup> /t)	Dünnste Wandstärke (mm)	Gehalt an anhaftendem Eisen <sup>2)</sup>	Glühverlust <sup>3)</sup> (%)			
<b>Kontinuierlicher Betrieb</b>								
Abschmelz-Herdofen	< 100 <sup>5)</sup>	> 10	beliebig groß	≤ 1 %	≤ 5 %	≤ 5 %	8)	Krätze ≤ 1
2 Kammer-Herdofen inkl. Closed-well-Herdofen	< 1.000 <sup>5)</sup>	> 1	so gering wie möglich	≥ 10 %	≤ 5 %	≤ 5 %	85-95	Krätze ≤ 1
Side-well-Herdofen	< 5.000 <sup>5)</sup>	< 1	so gering wie möglich	≤ 1 %	≤ 5 %	≤ 5 %	85-95	Krätze ≤ 1
Induktions-ofen	< 1.000 <sup>6)</sup>	> 10	so gering wie möglich	0	≤ 3 %	≤ 5 %	97-99	Krätze ≤ 1
<b>Diskontinuierlicher Betrieb</b>								
starrer Dreh-trommelofen	100-5.000 <sup>5)</sup>	< 1	so gering wie möglich	< 10	5-25 %	≤ 0,5 %	75-92	Salz-schlacke > 1
kipbarer Trommelofen	100-1.000 <sup>5)</sup>	> 1	so gering wie möglich	< 1	> 25 %	≤ 0,5 %	50-70	Salz-kuchen <sup>7)</sup> > 1

1) mittlere Oberfläche der Schrotteichen : mittlere Masse des Schrotteilhens  
 2) nur anhaftendes Eisen; nicht als Legierungsbestandteil  
 3) Glühverlust (% GV) gibt den Gehalt an organischem Fremdmaterial wieder  
 4) % Oxide = 100 % - % Metallinhalt - % GV (abgeschätzt durch: 100 % - % Metallausbeute der Probeschmelze - % GV)  
 5) nach unten von Ofentürlurchmesser begrenzt  
 6) von Tiegelgröße begrenzt  
 7) Salzkuchen entsteht, wenn das Verhältnis von Salz : Oxid so klein ist, daß die „Schlacke“ nicht mehr flüssig, sondern pastös wird  
 8) Ausbeute hängt von anhaftendem Eisenanteil ab

Eine Zuordenbarkeit zu Schrottkategorien ist ebenfalls nicht abzuleiten. Bezüglich der Schmelzöfen kann jedoch festgehalten werden, daß die Ausmauerung von Drehtrommelöfen grundsätzlich einem höheren mechanischen Abrieb unterliegt als die starrer Herd- oder gar Tiegelöfen; den einzelnen Ofentypen zuordenbare Werte in Form von kg Ofenausbruch je Tonne Metall existieren jedoch nicht.

## 2.2.6 Schmelzereinigung

Bereits sehr geringe Verunreinigungen oder Gehalte von Fremdelementen können die Eigenschaften der Aluminiumlegierungen stark verschlechtern und müssen daher entfernt werden. Durch sorgfältige Schrottaufbereitung und Gattierung wird erreicht, daß die Chargenzusammensetzung weitgehend der gewünschten Legierungszusammensetzung entspricht.

Die Schmelzebehandlung im Konverter, Warmhalteofen oder in den Gießrinnen zielt auf die Entfernung bzw. Absenkung der Gehalte unerwünschter Begleitelemente ab. Sie umfaßt als wesentliche Schritte die Entfernung des in flüssigem Aluminium leicht löslichen Wasserstoffs und die Entfernung der im flüssigen Metall suspendierten Oxide und störenden Begleitelemente, wie z.B.: Mg, Ca, Na, Li.

Die Gehalte von Wasserstoff und Sauerstoff stehen in direktem Zusammenhang. Der Wasserstoff stammt überwiegend aus Wasser, zum Beispiel aus feuchten Legierungselementen oder feuchten Spülgasen, sowie aus Öl- und Fettanhaftungen am Schrott. Neben der Wasserstoffaufnahme bewirkt Wasser zusätzlich noch eine Oxidation des Aluminiums und damit zusätzlichen Metallverlust.

Der Wasserstoffgehalt des flüssigen Metalls kann durch physikalische und chemische Methoden reduziert werden (Tab. 2.9).

Tab. 2.9: Methoden zur Entfernung von Wasserstoff aus flüssigem Aluminium

Physikalische Methoden			Chem. Methode
Temperaturerniedrigung/ Abstehenlassen	Vakuumbehandlung	Partialdruckerniedrigung durch Spülgasbehandlung mit N <sub>2</sub> /Ar	Umsetzung mit Cl <sub>2</sub> (C <sub>2</sub> Cl <sub>6</sub> wird aus ökologischen Gründen nur noch selten eingesetzt)
lange Behandlungsdauer unzureichende Effizienz	relativ saubere Methode apparativ sehr aufwendiges Verfahren sehr energieintensiv	Vorherrschende Methode Verbrauch: 250 - 500 l/t Metall	sehr kurze Behandlungsdauer hoher Wirkungsgrad gleichzeitige Entfernung der Alkali- u. Erdalkalimetalle Aluminiumverluste Verbrauch: 2-5 kg Cl <sub>2</sub> /t Metall 10-170 g/t Metall bei Einsatz von Cl <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> od. Cl <sub>2</sub> /Ar ökologisch bedenklich

Zu den physikalischen Methoden zählen die Temperaturenniedrigung durch Abstehenlassen, die Vakuumbehandlung und die am häufigsten angewandte Schmelzereinigung durch Spülgasbehandlung. Die Gasbehandlung zielt auf die Entfernung kleinster Verunreinigungen ab. Bei dem sog. SNIF-Verfahren (Spinning Nozzle Inert Flotation) wird das Aluminiumbad mit Chlor und Argon oder Stickstoff gereinigt (wegen möglicher Nitridbildung wird für AlMg-Legierungen Argon verwendet). Durch die aufsteigenden Gasblasen werden die Verunreinigungen

gen aus der Schmelze an die Oberfläche ausgetragen wo sie sich in einer Krätzeschicht ablagern. Hierbei erfolgt eine Entfernung der metallischen Verunreinigungen wie Mg, Sr, Na, K, Ca sowie die Entfernung von  $H_2$ . Der Spülgasbedarf beträgt 250-500 l/t Metall.

Durch chemische Methoden wie die Schmelzebehandlung mit Chlorgas bzw. einer Mischung von  $Cl_2$  mit  $N_2$  oder Ar (<5 % Chlor) lassen sich niedrige Gehalte an Alkali- und Erdalkalielelementen einstellen. Chlor bildet beim Einleiten in die Schmelze Aluminiumchlorid, das, sublimiert, an die Badoberfläche steigt und hierbei aufgrund seiner feinen und gleichmäßigen Verteilung äußerst wirksame Spülung und Entfernung der Verunreinigungen hervorruft.

Typische Verbräuche liegen zwischen 2 und 5 kg Chlorgas/t Metall. Je nach Anwendungsfall und angewandter Technologie werden Chlormengen zwischen 10 g/t und 170 g/t Metall benötigt, sofern mit Chlor/Stickstoff- bzw. Chlor/Argon-Mischungen chloriert wird und nicht mit reinem Chlor. Die früher ebenfalls eingesetzten Verbindungen Hexachlorethan und Schwefelhexafluorid ( $SF_6$ ) kommen heute nur mehr selten zur Anwendung, da die gewünschte Produktqualität nicht erreicht werden konnte und es dennoch zur Emission von Chlorgas kommt [NEFF & COCHRAN, 1993; PETERSON et al., 1995]. Schwefelhexafluorid trägt darüber hinaus einen außerordentlich hohen Beitrag zum Treibhauspotential bei (der Faktor ist um 23.900 fach höher als bei  $CO_2$ ) (Basis 100 Jahre) und ist deshalb zu vermeiden.

Die Einleitung der Spülgase erfolgt entweder im Raffinationsofen (furnace fluxing) (Abb. 2.13) oder in den Gießrinnen (in-line fluxing), z.B. mittels rotierendem Impeller (Abb. 2.14).

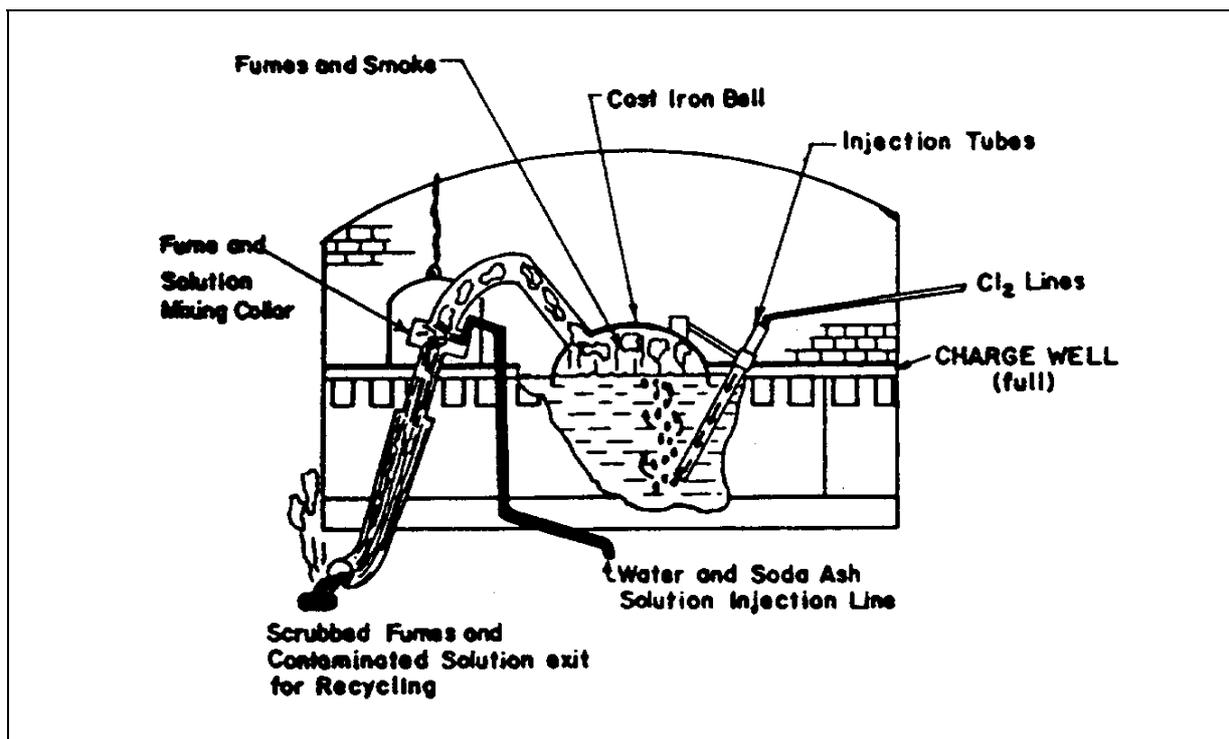


Abb.: 2.13: Furnace fluxing nach dem "Rubber Bell Verfahren" [NEFF & COCHRAN, 1992]

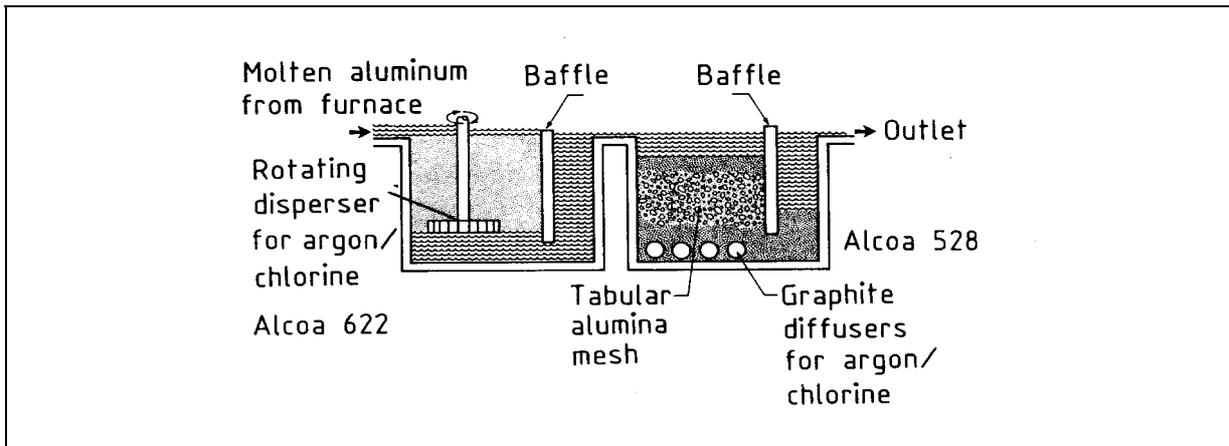


Abb. 2.14: In-line fluxing mittels rotierendem Impeller und Filtration in der Gießrinne [ULLMANN, 1985]

Ohne Chlorgas kann nur dann gearbeitet werden, wenn eine Entfernung von Mg-Verunreinigungen nicht erforderlich ist.

Die durch Gasbehandlung nicht entfernten Verunreinigungen können anschließend durch verschiedene Prozesse aus der Schmelze entfernt werden. Durch Sedimentation wird eine grobe Reinigung unter Ausnutzung der unterschiedlichen Dichten erzielt. Zur Erzielung der höchst möglichen Metallreinheit werden die Oxide unmittelbar vor dem Gießen durch Filtrieren mit Zellen-, Schaumkeramik- oder Glasfasergewebefiltern entfernt. Glasfasern lösen sich allerdings nach einiger Zeit in der Metallschmelze auf; Schaumkeramikfilter sind zwar sehr stabil, aber wenn sie zerbrechen, hinterlassen sie harte Einschlüsse im Metall; Zellenfilter sind die stabilsten, weisen jedoch eine geringere Filterwirkung – insbesondere bei Feinstteilchen – auf.

Beim Alcan Bed Filtrations Verfahren (ABF-Verfahren; Abb. 2.15) wird die Sedimentation der Partikel in den Zwischenräumen des Filtermaterials und deren Adsorption an den Aluminiumkugeln genutzt [LEGGETT & JOHNSON, 1994; LEHNERT et al., 1996].

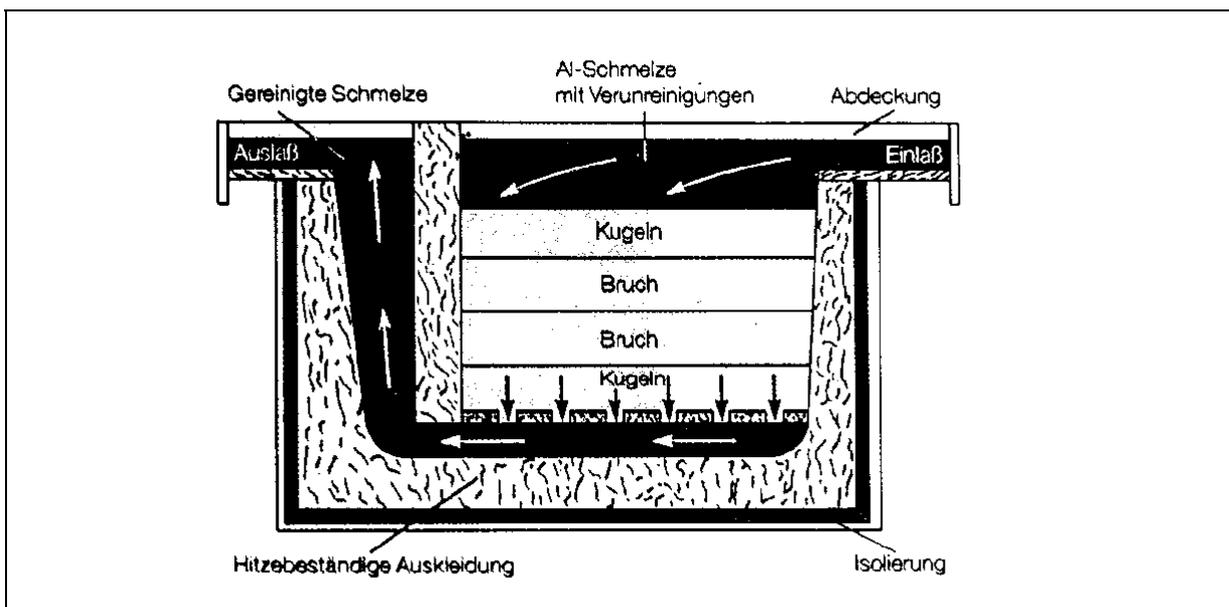


Abb. 2.15: Schmelzebehandlung nach dem ABF-Verfahren [ALCAN, 1988]

### 2.2.7 Legieren

Falls die von den Schmelzöfen kommende Legierung noch nicht die gewünschte Konzentration der Legierungselemente aufweist, werden in den Warmhalte- oder Legierungsöfen die entsprechenden Elemente zugesetzt. Dabei zeigen die verschiedenen Legierungselemente unterschiedliches Lösungsverhalten, dem gegebenenfalls durch Rühren des Metallbades, zum Beispiel durch Umpumpen, Stickstoffeinblasen, etc., Rechnung zu tragen ist.

Als Orientierungswert kann im Jahresmittel für typische Sekundäraluminiumschmelzwerke mit dem Zusatz von rund 70 kg Legierungselementen je Tonne unlegiertem Metall gerechnet werden.

### 2.2.8 Legierungswechselhäufigkeit

Unter der Legierungswechselhäufigkeit ist zu verstehen, wie oft ein Sekundärschmelzwerk pro Tag unterschiedliche Legierungen an Kunden abzuliefern hat. Je häufiger die Abnehmer unterschiedliche Legierungen benötigen, desto weniger kommt als Schmelzaggregat ein Herd- oder Wannenofen in Betracht, da solche Ofentypen stets einen beträchtlichen flüssigen Metallsumpf der vorherigen Legierungszusammensetzung behalten.

Bei der Analyse der Legierungswechselhäufigkeit ist allerdings zu berücksichtigen, auf wieviel Prozent der Produktion wie viele Wechsel pro Tag entfallen. Es ist durchaus denkbar, daß 50 % der Produktion auf den stets gleichen Legierungstyp entfallen und sich die häufigsten Wechsel nur bei einem geringen Produktionsanteil abspielen.

## 2.3 Energieeinsatz

### 2.3.1 Energieeinsatzformen

In der Sekundäraluminiumindustrie übliche Energieträger sind Heizöl, Gas sowie elektrische Energie. Herd- und Drehtrommelöfen werden für die Schmelzarbeit fast durchwegs mit Heizöl oder Erdgas beheizt. Tiegelinduktionsöfen setzen als einziger Ofentyp elektrische Energie zum Schmelzen ein.

Durch gute Luftvorwärmung, Ofenraumdruckregelung, Luft-Brennstoff-Verhältnis-Regelung und Wärmerückgewinnung werden bei Herdöfen thermische Wirkungsgrade von bis zu 50 % erreicht [LEHNERT et al., 1996].

In Drehtrommelöfen werden weitgehend stark verunreinigte Schrotte unter Salzabdeckung eingesetzt. Daraus resultiert ein Abgas, das so korrosiv und abrasiv ist, daß bislang alle Bemühungen um resistente Wärmetauscher zur Nutzung der Abgaswärme gescheitert sind. Daher liegt der thermische Wirkungsgrad von Trommelöfen weit unter dem von gut geregelten Herdöfen. Ersetzt man in Drehtrommelöfen jedoch die Luft (teilweise) durch Sauerstoff [ABERNATHY et al., 1996; YAP & POURKASHANIAN, 1996], verbessert sich die Wärmeübertragung, wodurch sich der Erdgasbedarf und die Ofenreisezeiten (Dauer eines Schmelzzyklus) deutlich verringern.

Der Energiebedarf der Spänetrocknung hängt von der Art der Späne, ihrem Feuchtegehalt und dem Typus der Trocknungsanlage ab.

### 2.3.2 Energiemenge/t Sekundäraluminium

Aus thermodynamischen Berechnungen ergibt sich der theoretische Energiebedarf zum Schmelzen von Aluminiummetall mit rd. 1.060 MJ/t Metall. Dieser Wert ergibt sich als Sum-

me bei Zugrundelegung von 684 MJ für das Erhitzen von 1 t Aluminium auf die Schmelztemperatur von 660 °C, von 360 MJ für das eigentliche Schmelzen und 18 MJ für das weitere Erhitzen auf Gießtemperatur [LEHNERT et al., 1996].

Typische Energieverbräuche für das Schmelzen sind bei Einsatz fossiler Brennstoffe <2.000-4.700 MJ/t Metall (Tab. 2.10), womit sich bezogen auf den theoretischen Energiebedarf von 1.060 MJ/t Metall einen Ofenwirkungsgrad von ca. 20- >50 % ergibt.

### 2.3.3 Energiemenge/t Einsatzmaterial

Die Bezugsgröße Energie pro Tonne Metall ist sowohl für den Bereich der Schrottaufbereitung wie für das Schmelzen problematisch, da sich in beiden Fällen der Energiebedarf am Durchsatz, das heißt an der Schrottmenge bzw. am Schrott- und Salzeinsatz orientiert. Lediglich bei den Warmhalte- und Legierungsöfen ist der Durchsatz gleich dem Metallinhalt.

Praktikable Bezugsgrößen für das Aufbereiten, Schmelzen und Warmhalten bzw. Legieren sind daher:

Aufbereitung.....	Energie/t durchgesetztes Material
Schmelzen .....	Energie/t eingesetztes Material inkl. Salz
Warmhalten/Legieren.....	Energie/t Metallproduktion

Tab. 2.10: Typische Energieverbräuche der Sekundäraluminiumschmelzverfahren

	Eingesetzte Schrotte	Typische Metallausbeute (%)	Angenommene Metallausbeute (%)	Tatsächlicher Energiebedarf		Mittlerer Erdgasbedarf bei $H_u = 36$ MJ/Nm <sup>3</sup> (Nm <sup>3</sup> /t Metall)
				(MJ/t Einsatz)	(MJ/t Metall)	
<b>Spänetrocknung</b>	Feuchte Späne	80-90	85	1.836-3.213	2.160-3.780	60-105
<b>Schmelzen</b>						
Induktionsofen	Masseln, Blöcke, Späne	95-99	98	2.470-3.276 <sup>1)</sup>	2.520-3.340	
Closed-well-Herdofen	sauberer Stückschrott, org. verunreinigter Schrott	88-95	92	2.320-3.960	2.520-4.300	70-120
Drehtrommelofen (starr)	Späne, Gröben, Shredder-Schrott, Neuschrott	75 – 92	74	3.260-3.480	4.410-4.700	123-130
Drehtrommelofen (starr + O <sub>2</sub> -Brenner)	Späne, Gröben, Shredder-Schrott, Neuschrott	75-92	74	1.385-1.520	1.870-2.050	52-57
Drehtrommelofen (kipppbar)	Krätzen, Gröben	50-80	78	ca. 2.080	ca. 2.670	ca. 75
<b>Raffinieren, Legieren, Warmhalten</b>	Legierungselemente wie Si, Cu, Zn, Ti, Mn, Mg, Ni	95-98	97	1.400-2.520	1.440-2.600	40-72
<b>Gesamt Schmelzwerk</b>		75-85	80	3.460-7.200	4.320-9.000	120-250

<sup>1)</sup> inkl. Warmhalten des Metallsumpfs

## 2.4 Produkte

Da der durch die Schrottanlieferungen bedingte Siliziumgehalt meist weit über dem Grenzwert von 2,6 % für Knetlegierungen liegt, stellen Sekundärschmelzwerke (Refiner) nur Gußlegierungen her. Ausnahme ist das Umschmelzen sortenrein angelieferter Knetlegierungen durch Umschmelzwerke (Remelter). Letzteres erfolgt überwiegend auf Lohnbasis.

### 2.4.1 Genormte und vereinbarte Knet- und Gußlegierungen

Die große Vielfalt der Aluminiumlegierungen ist üblicherweise der Normungssystematik unterworfen. Die Metallabnehmer haben jedoch häufig mit den Sekundärschmelzwerken besondere "Werksnormen" (eigentlich eher Werksstandards) vereinbart, in denen für ein oder mehrere Legierungselemente von der Norm abweichende Gehalte (meist niedriger bei sog. tolerierbaren Verunreinigungen) definiert sind.

### 2.4.2 Lieferformen

Die übliche Lieferform der **Gußlegierung** ist der Block - auch Massel genannt - in Formaten, die mit dem jeweiligen Abnehmer vereinbart werden. 5-7 kg sind die meist verbreiteten Blockmaße (je kleiner der Block, desto größer ist die Oberfläche und Oxidmenge je Tonne; je größer der Block, desto schwerer ist die Handhabbarkeit). Die Blöcke werden kreuzweise zu Stapeln von 0,5-1 Tonnen je Stapel auf Fußpaletten aus der selben Legierung gebündelt; der gesamte Stapel kann so in der Gießerei eingeschmolzen werden.

Granalien sind erstarrte Tropfen von 3-20 mm Durchmesser. Sie werden meist zur Desoxidation in Stahlwerken eingesetzt. In diesem Anwendungsbereich ist der Bedarf ca. 1,8 kg Cu-freies Aluminium je Tonne Stahl.

Gries sind erstarrte Aluminiumtropfen von 0,4-3 mm Durchmesser, die durch Verdüsen von flüssigem Metall hergestellt werden. Anwendungsbereich ist die aluminothermische Industrie.

**Knetlegierungen** werden in Form von Walzbarren, Preßbolzen, Preßbarren oder Drahtbarren geliefert. Diese Formen werden in der Regel durch Stranggießvarianten hergestellt.

Im zunehmenden Maße wird die Metallproduktion der Sekundärschmelzwerke den Gießereien "just in time" als flüssiges Metall geliefert. Als Transportbehälter dienen spezielle wärmegeämmte LKW-Transport-Behälter von 3-5 Tonnen Fassungsvermögen.

Die nötige Überhitzung des Metalls wird so vorgenommen, daß das Metall garantiert acht Stunden flüssig bleibt. Daraus ergibt sich die maximale Transportentfernung von vier Stunden LKW-Fahrtzeit, da im Fall der Nichtannahme des Metalls noch zum Sekundärschmelzwerk zurückgefahren werden können muß.

Der Flüssigmetalltransport erfordert zwar einen relativ hohen logistischen Aufwand in den Sekundärschmelzwerken, erspart jedoch den Gießereien Schmelzöfen und ein entsprechend dimensioniertes Blocklager.

### 2.4.3 Lohnumschmelzarbeit, Umschmelzaluminium

Neuschrotte werden von Halbzeugwerken und Gießereien mangels eigener Aufbereitungs- oder Schmelzkapazitäten an Remelter geliefert, um sie dort in Blockware umschmelzen zu lassen. Überwiegend erfolgt dieses Umschmelzen auf Lohnbasis. Darüber hinaus schmelzen einige deutsche, französische und US-amerikanische Refiner auch Primär- und Knetlegierungskräzten im Lohn um, wobei in diesem Fall ein Teil des Refiners als Remelter fungiert.

Kennzeichen der Lohnumarbeitung ist, daß der Anlieferer Eigentümer des Metalls bleibt und dem Umschmelzer nur seine Umschmelzkosten erstattet.

Der Vorteil für das Sekundärschmelzwerk liegt dabei im Wegfall des analytischen Kontrollaufwandes und der Legierungsarbeit, da das Metall wie erhalten zurückgeliefert wird. Häufig wird jedoch vom "Remelter" erwartet, daß er ungeachtet der Zusammensetzung des Schrottes Normlegierungen zurückliefert; in diesem Fall wird der gleiche analytische Kontrollaufwand und ggf. die Raffinations- und Legierungsarbeit wie im Falle eines Refiners verursacht.

Das Produkt des Umschmelzens heißt "**Umschmelzaluminium**", ohne daß daraus ein Hinweis auf den Legierungstyp entnommen werden kann.

## 2.5 Reststoffe – Abfall

Typische Rückstände bzw. Abfälle bei der Sekundäraluminiumproduktion sind Krätzen, Salzschlacken, Filterstaub und Ofenausbruch. Tabelle 2.11 gibt eine Übersicht über die bei der Sekundäraluminiumproduktion anfallenden Abfälle bzw. Reststoffe und ihre Behandlung bzw. Entsorgung.

Tab. 2.11: Abfälle der Sekundäraluminiumerzeugung

Abfall bzw. Reststoff (ÖNORM S 2100)	Anfall	Menge	Behandlung
<b>Salzschlacke</b> (31211)	Schmelzen im Drehtrommelofen	300-500 kg/t Al	Aufarbeiten mit Löse- /Kristallisations-verfahren, Gewinnung der Wertstoffe Al- Granulat, Mischsalz, NMP <sup>**)</sup>
<b>Filterstaub</b> (31217)	Abgasreinigung	10-35 kg/t Al 0,1-10 kg/t Al <sup>*)</sup>	Deponie mit vorgelagerter Behandlung oder Untertagedeponie;  teilw. gemeinsam mit Salz- schlacke aufgearbeitet (vorher jedoch Neutralisation auf Na-Basis notwendig);  Einsatz in Stahlindustrie; oder  bei Einsatz von NaHCO <sub>3</sub> als Additiv ist Filterstaub als Ab- decksalz im DTO einsetzbar
<b>Ofenausbruch</b> (31108, 31103)	Schmelzofen	ca. 2 kg/t Al	Teilweise gemeinsam mit Krätze aufgearbeitet, sonst Laugung + Deponie
<b>Krätze</b> (31205)	Alle Öfen die ohne Abdecksalz arbeiten, Schmelzereinigung, Gießerei	ca. 25 kg/t Al 40-80 kg/t Al <sup>*)</sup>	Aufarbeitung und Einsatz im Drehtrommelofen

<sup>\*)</sup> bei Einsatz des Closed Well Ofens

<sup>\*\*)</sup> Nicht metallische Produkte (oxidische Beimengungen von Al-Schrotten)

### 2.5.1 Salzschlacke

Die Menge des in den Drehtrommelöfen eingesetzten Schmelzsalzes hängt vom Verschmutzungsgrad des Materialeinsatzes und vom Salzfaktor (kg Salz/kg NMP im Einsatz) ab und beträgt im Mittel etwa 250-300 kg/t Al und wird in verunreinigter Form als sogenannte Salzschlacke wieder abgezogen. Bei Senkung des Salzfaktors auf unter 0,5 und Einsatz eines kippbaren Trommelofens kann der Salzeinsatz auch unter 200 kg/t Al sinken. Je Tonne produziertem Sekundäraluminium fallen, abhängig vom Verunreinigungsgrad des eingesetzten Rohstoffes (Aufnahmefähigkeit des Salzes für Verunreinigungen: 30-40%), etwa 300-500 kg Schlacke an.

Tab. 2.12: Zusammensetzung von Salzschlacke (Angaben in Gewichtsprozent)

Inhaltsstoff	typischer Analysenwert (%)	Bandbreite (%)
Al, metallisch	8	5-20
Wasserunlösliche Anteile	37	20-40
Wasserlösliche Anteile	55	45-75
PCDD/F	5 ng/kg	2-20 ng/kg

Das umweltgefährdende Potential der Salzschlacke liegt im hohen, wasserlöslichen Salzgehalt und den bei Kontakt mit Wasser entstehenden toxischen und gegebenenfalls explosiven und geruchsintensiven Gasen ( $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $NH_3$ ,  $H_2S$ ,  $PH_3$ ). In Österreich ist gemäß Festsetzungsverordnung 1997, BGBl. II 227/1997 Salzschlacke als gefährlicher Abfall einzustufen und muß daher einer besonderen Behandlung zugeführt werden. Die Salzschlacke darf aufgrund des Gefährdungspotentials und den zur Verfügung stehenden Aufbereitungsmöglichkeiten in Österreich nicht deponiert werden.

Bei der Aufbereitung von Salzschlacke sind gemäß Stand der Technik folgende Fraktionen erfaßbar:

- Aluminiumgranulat (wird in Sekundäraluminiumproduktion wieder eingesetzt)
- Tonerderückstand (Oxidischer Rückstand, NMP) (kann in der Zementindustrie als  $Al_2O_3$ -Träger eingesetzt werden bei < 0,2 % Salzgehalt)
- Schmelzsalz (wird wieder im Drehtrommelofen eingesetzt)
- Abgase mit hohen Anteilen an Wasserstoff und Methan (ca. 65 Vol%); die geringen Anteile an  $H_2S$  und  $PH_3$  werden katalytisch zu Sulfat bzw. Phosphat oxidiert.
- Ammonsulfat aus der Naßreinigung (Einsatz in Düngemittelproduktion)

Tab. 2.13: Zusammensetzung des Tonerderückstands (NMP) in Gewichtsprozent [BECKMANN, 1991]

Inhaltsstoff	Typischer Analysenwert (%)	Bandbreite (%)
$Al_2O_3$	44	40-50
Mg-Al-Spinell	32	30-35
div. andere Al-Verbindg.	6	5-10
$SiO_2$	11	10-15
Na-Silikat, -silikofluorid	1	1-2
$CaF_2$ , Gips	5	4-6
Ba, Sr-Carbonat, -sulfat	0,6	0,2-1
div. Cu, Ni, Pb, Zn-Sulfide	0,5	0,2-1
NaCl, KCl	<0,4	-0.4

Tab. 2.14: Schwermetallgehalt von Tonerderückstand (NMP):

Element	Gehalt (%)	Element	Gehalt (%)
Cu	0,15-0,5	Ni	0,01-0,03
Zn	0,05-0,17	As, Be, Co	jeweils < 0,01
Pb	0,0015-0,15	Hg, Cd	jeweils < 0,0002
Cr	0,0075-0,065	V	< 0,05

### Aufbereitung, Behandlung und Entsorgung von Salzschlacke

Die Aufbereitung von Salzschlacke ist heute bereits Stand der Technik und erfolgt im allgemeinen nach dem Löse-Kristallisationsverfahren (BUS-Verfahren). Dieses Verfahren umfaßt 5 Prozeßschritte:

1. Mechanische Zerkleinerung, Sieben und trockene Aluminium-Abscheidung; z.T. wird der Feinanteil der zerkleinerten Schlacke noch in sog. Walzenmühlen behandelt, wodurch das restliche feine Metall zu dünnen Scheiben ausgewalzt und in seinem Korndurchmesser vergrößert wird. Dadurch läßt sich eine weitere Metallfraktion durch Sieben abtrennen [BAHR, 1980]; allerdings zeigt die Erfahrung, daß viel Salz und NMP in das Metall eingewalzt wird, wodurch sich das Schmelzausbringen stark verringert, so daß man bei einigen Salzschlackenverwertern von dieser zusätzlichen Metallfraktion absieht. Mit diesem Prozeßschritt läßt sich das Aluminium durch einfaches Sieben abtrennen.
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 (NMP)
5. Kristallisieren, Zentrifugieren, Gewinnung des Recyclingsalzes

Die Gesamtemissionen des Prozesses können durch folgende Maßnahmen reduziert werden:

- Durch einen geschlossenen Wasserkreislauf wird der Anfall von Abwässern vermieden; Feuchtigkeitsverluste ergeben sich durch die ausgetragene Restfeuchte des Tonerderückstandes (NMP), des Wasserdampfgehaltes der Abluft und des produzierten Schmelzsalzes.
- Um Staubentwicklungen zu vermindern wird der Zerkleinerungs- und Siebteil der Anlage unter Unterdruck gesetzt und die abgesaugten Luftmengen mit Hilfe von 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<sub>2</sub>O ein entzündliches Gas, das, nach Verdünnung mit Luft unter die Explosionsgrenze, einer zweistufigen Abgasreinigung zugeführt wird. Die erste Stufe besteht aus einem Schwefelsäure-Wäscher zur NH<sub>3</sub>-Abtrennung, in der zweiten Stufe werden H<sub>2</sub>S und PH<sub>3</sub> katalytisch oxidiert und als Sulfate bzw. Phosphate an einem Aktivkohlefilter adsorbiert. Die schwefelsaure Lauge des NH<sub>3</sub>-Wäschers wird im Kreislauf geführt, das sich bildende Ammonsulfat wird gesondert kristallisiert. (Über Schadstoffgehalte und Menge der Abwässer aus dem Naßwäscher wurden keine Angaben gemacht).
- 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 der Aluminiumproduktion anfallen, verwertet werden. Hinsichtlich der Zusammensetzung ergeben sich keine Beschränkungen.

Bei diesem Verfahren fallen folgende Produkte und Abfälle an:

- Al-Granulat: wird in der Sekundäraluminiumproduktion eingesetzt
- Mischsalz: wird im Drehtrommelofen eingesetzt
- Tonerderückstand (NMP): Einsatz als  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Träger in der Zementindustrie
- Ammonsulfat aus der Naßreinigung: wird in Düngemittelproduktion eingesetzt
- Beladene Aktivkohle der Adsorber: wird zur Aufarbeitung an die Hersteller zurückgegeben
- Abwasser aus dem Naßwäscher

Die gewonnenen Mengen Aluminium-Granulat, Mischsalz und Tonerderückstand (NMP) hängen von der Zusammensetzung der eingesetzten Schlacken ab.

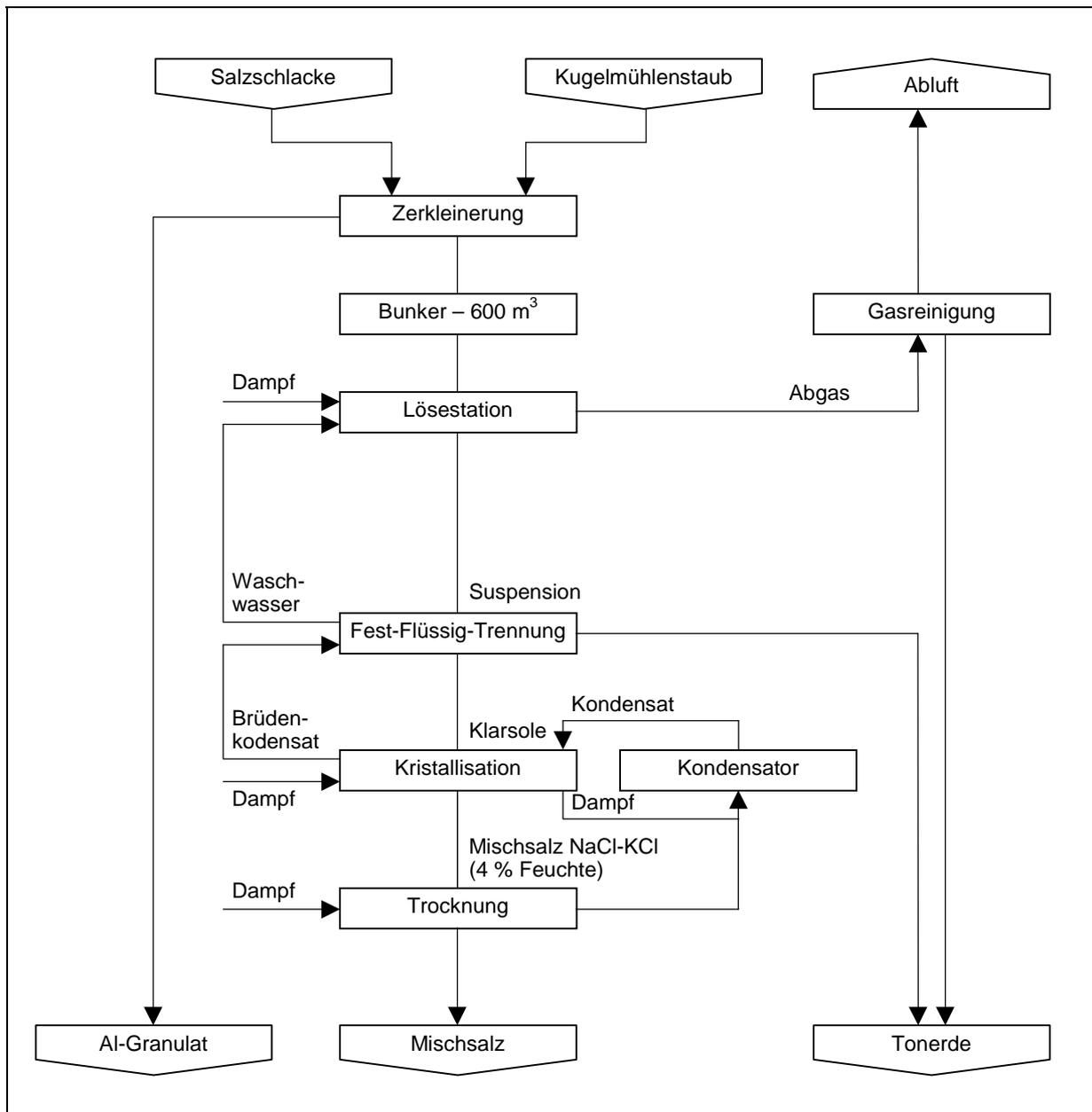


Abb. 2.16: Verfahrensschema des Löse-/Kristallisationsverfahrens [Beckmann, 1991]

## **Weitere Behandlungswege**

### ***Verarbeitung von Salzschlacke bei Raffineria Metall Capri***

Ein ähnliches Verfahren zur Schlackenaufbereitung wurde von der Raffineria Metall Capri 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, die separat einer Abluftverbrennung zugeführt werden. Zur vollständigen Entgasung wird die Lösung alkalisiert und der restliche Ammoniak durch Strippen ausgetrieben. Weitere Unterschiede sind hier die eingesetzte einstufige Eindampfanlage und die Pelletierung der Salzkristalle nach der Trocknung [WÖHLK, 1987].

### ***Verarbeitung von Salzschlacke bei ARTS 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 Einsatzmaterials mit anschließender Klassierung. Die so gewonnenen Fraktionen werden zur Entfernung des löslichen Anteiles mit kaltem Wasser gelaugt und mittels Siebung weiter aufgetrennt. Durch Kristallisation wird der Salzgehalt der Lauge zurückgewonnen. Durch die wiederholte Klassierung erfolgt eine Auftrennung in eine Grobfraktion, 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 (NMP), der z.T. in der Mineralfaser- und Schleifmittelproduktion 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  $MgCl_2$ -/HCl-hältiger Lösung vermieden [YERUSHALMI, 1992].

### ***Verarbeitung der Salzschlacke bei der Fa. Aluscan in Norwegen***

Die an der Westküste Norwegens gelegene Anlage besteht im wesentlichen aus einer Anlegestelle, den Produktionshallen, der ehemaligen Mine (ehemaliges Magnetit-Bergwerk) und einer am Berghang gelegenen Deponie. Die Salzschlacke wird per Schiff angeliefert und in ein überdachtes Lager in der Produktionshalle gebracht.

Die Verarbeitung der Salzschlacke erfolgt mittels Backen- und Rotationsbrechern, deren Abluft mit der abgesaugten Luft aus dem Bereich der verbindenden Förderbänder einem einstufigen Wäscher zugeführt wird. In der Folge wird das Material in Rotationsmühlen mit Wasser gemahlen und das metallische Aluminium abgesiebt. Die Aluminiumfraktion wird getrocknet und mechanisch/magnetisch aufbereitet.

Die von der Al-Fraktion abgetrennte Feststofffraktion besteht aus Tonerde (NMP), kleinen Salzklumpen, Steinen, Blechen und Armierungseisen und wird auf eine nahegelegene Deponie geführt. Die Deponie ist ein vertikaler Schacht, dessen Verbindungen mit der Mine verbetoniert wurden. Die Sickerwässer werden über mehrere hundert Meter durch den mit Sturzmaterial gefüllten Grubenschacht, die Moränenmasse und den Abgangssand in den Fjord gedrückt. Eine Recyclinganlage für Tonerderückstand ist vorgesehen, Detailinformationen über den Aufarbeitungsprozeß sind nicht bekannt.

Die salzhaltige Wassersuspension wird gemeinsam mit dem Abwasser des Wäschers in die Mine gepumpt. Das abgepumpte Prozeßwasser verbreitet sich im Minenkörper und erreicht nach unbestimmter Zeit einen dem Fjord vorgeschalteten Sandfilter. Das Prozeßwasser erfährt eine Sedimentation suspendierter Feststoffpartikel und eine starke Verdünnung mit Süßwasser.

Beim Verfahren der Fa. Aluscan wird kein Recycling von Mischsalz durchgeführt. Vielmehr wird die Salzsole in die Mine gepumpt und die löslichen Anteile werden nach Verdünnung emittiert.

### **Verarbeitung von Salzschlacke bei der Firma K+S (Kali und Salz) – REKAL Verfahren**

Die Salzschlacke dient als Rohstoffersatz für das Kaliwerk, nur KCl wird gewonnen. Das Verfahren umfaßt vier Prozeßschritte und arbeitet weitgehend abwasserfrei, die vorgeschriebenen Emissionsgrenzwerte werden laut Betreiberangaben eingehalten.

1. *Mahlung und Siebung:* Die angelieferte Salzschlacke wird einem Mühlensystem zur Aufmahlung auf eine Kornfeinheit von bis zu 0,6 mm zugeführt. Das enthaltene Aluminium wird in einem nachgeschalteten Siebsystem 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. Der Filterkuchen mit den ungelösten NaCl-Anteilen wird den anfallenden NaCl-Rückständen zugemischt und gemeinsam der Rückstandshalde zugeführt. Die im Heißlöseprozeß anfallenden Gase  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $NH_3$ ,  $H_2S$ ,  $PH_3$  werden einer vierstufigen Gaswäsche zugeführt.
3. *Kristallisation:* Das in der Lösung befindliche KCl wird durch Abkühlung unter Vakuum rekristallisiert, während NaCl 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 anfallenden Gase werden in einer vierstufigen Absorptionsanlage in neutrale feste oder flüssige Stoffe umgewandelt. Unter Einsatz von Zusatzchemikalien 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 ( $Na_3PO_4$  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 Aluminium-Metall, KCl, Tonerde (NMP) mit NaCl, Ammonsulfat und eine phosphat- und sulfathältige Lauge an. Das Aluminium-Metall wird wiederverwertet, KCl im eigenen Betrieb weiterverarbeitet. Die mit NaCl vermischte Tonerde (NMP) wird auf der Salzhalde des Betriebes gelagert. Das NaCl wird durch Niederschläge ausgewaschen und die verbleibende Tonerde (NMP) begrünt. Ammonsulfat kann als Düngemittel und die anfallende Lauge als Granulierhilfsmittel in der Düngemittelproduktion eingesetzt werden.

Eine Gegenüberstellung der Verfahren (Tab. 2.15) führt vor Augen, daß solch eine Aufarbeitung nur für den speziellen Fall des Kaliwerks 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 für bestehende Deponien fragwürdig (ÖNORM S 2072).

### **Verarbeitung von Salzschlacke in der Metallwarenfabrik Stockach GesmbH**

Die Salzschlackenverwertungsanlage verarbeitet nur die Schlacken des eigenen Schmelzwerkes in Deutschland. Das Verfahren stammt von Escher-Wyss und nutzt in der Kristallisation eine Brüdenkompressionsanlage. Der oxidische Rückstand wird im Absetzbecken entwässert.

### **Verarbeitung von Salzschlacke bei SALTS in Wendover, UTAH (USA)**

Die Anlage nutzt Wind- und Solarenergie, um die Salzsolen einzudampfen. Die Größe der Eindampfteiche beträgt rund 360.000 m<sup>2</sup>, die Wasserverdampfung ca. 0,5 m/m<sup>2</sup> und Jahr. Wegen der Wasserverdunstung handelt es sich um ein offenes System, daher sind entsprechend große Frischwassermengen erforderlich.

### **Salzschlackeverarbeitung bei VALCRITEC in Valladolid/Spainien**

Das Verfahren entspricht dem der BUS AG in deren Anlagen in Lünen und Hannover; abweichend ist die Kristallisation via Brüdenkompression und eine Waschung des oxidischen Rückstandes (NMP). Die Kapazität wird mit ca. 100.000 jato angegeben. Im wesentlichen werden Schlacken der beiden Schmelzwerke von Remetal in Bilbao und Valladolid verwertet.

### **Verarbeitung von Salzschlacke bei RVA in Les Islettes/Frankreich**

Die Kapazität wird mit ca. 90.000 jato angeführt. Das Laugungsgas wird zusammen mit Erdgas im Dampferzeuger verbrannt. Ansonsten gleicht das Verfahren dem der BUS AG. Die RVA verfügt über eine eigene Deponie, in die bislang der oxidische Rückstand (NMP) eingelagert wird.

### **Schlackenverarbeitung bei Raffmetal in Vestone/Italien**

Die Kapazität beträgt ca. 25.000 jato. Die Anlage verwertet im wesentlichen die Schlacke des eigenen Schmelzwerkes. Das Verfahren entspricht in den Grundzügen dem der BUS AG, Details sind nicht publiziert.

### **Salzschlackenverarbeitung bei Alcan Alluminio Italiano Spa in Borgofranco d'Ivvea**

Die Kapazität wird mit ca. 15.000 jato angeführt. Es werden die Schlacken des eigenen Schmelzwerkes verwertet. Das Verfahren stammt von Engitec; die Laugung wird über den Wasserstoffpartialdruck gesteuert. Das gesamte Abgas wird zusammen mit Erdgas in einem „flash-evaporator“ verbrannt, in dessen heiße Rauchgase die Salzsole eingedüst und so das Wasser verdampft wird. Es handelt sich um ein offenes System, ein Wasserkreislauf existiert nicht, große Frischwassermengen sind erforderlich.

Tab. 2.15: 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% <sup>(1)</sup>	sehr unvollständig	99% <sup>(1)</sup>
Abgasreinigung	Totale Erfassung (2-stufig)	teilweise Erfassung	totale Erfassung (4-stufig)
Verarbeitung von Kugelmühlstaub (Krätzestaub)	Möglich	nicht möglich	möglich
<b>Rückstände/Abfälle</b> - Prozeß - Abgasreinigung	Tonerde Aktivkohle, Ammonsulfat, Abwasser	Tonerde/Salzw. Abwasser	Tonerde/NaCl Ammonsulfat, Sulfat- und Phosphathaltige Lauge, Abwasser
<b>Abfallbehandlung und -entsorgung</b>	Aktivkohle zum Hersteller Tonerde: Zementwerke Ammonsulfat: Düngemittelproduktion	Tonerde in Bergwerk	Tonerde + NaCl auf Halde Ammonsulfat als Düngemittel Sulfat- u. Phosphatlauge in Düngemittelproduktion
<b>Energieverbrauch</b> (thermisch)	100%	0%	< 40% <sup>(2)</sup>
<b>Emissionen</b> <b>Luft</b> <b>Abwasser</b>	GW < TA Luft Abwasser aus Naßwäscher	GW ~ TA Luft nicht abwasserfrei (Ableitung in Fjord)	GW < TA Luft Abwasser aus Naßwäscher, Sickerwasser von Deponie

<sup>(1)</sup> Eine Entgasung über 99% ist wegen der langsamen AlN-Hydrolyse in der Praxis nicht möglich

<sup>(2)</sup> Vergleich, wobei Energieverbrauch des BUS-Verfahrens als Vergleichsbasis angenommen wurde. Der geringe Energieverbrauch ergibt sich durch die fehlende Trocknung des Rückstandes (Tonerde und NaCl).

## 2.5.2 Filterstaub

Die Abgasreinigung in Umschmelzwerken erfolgt meist mittels **Gewebefilter** und **Trockensorptionsverfahren** oder **Flugstromverfahren**. Sorptionsverfahren beruhen 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, Cl<sub>2</sub>) beiträgt. Als Adsorbens wird z.B. Kalkhydrat, teilweise auch mit Zusatz von Aktivkohle bzw. Aktivkoks, eingesetzt.

Filterstaub entsteht durch mit dem Abgasstrom mitgerissene Feinanteile des chargierten Materials, aus verdampftem und/oder hydrolysiertem Salz, aus CaO-Zugabe zum Abgas salzbeaufschlagter Öfen und aus organischen Bestandteilen des chargierten Materials. Filterstäube aus Spänetrocknungsanlagen und salzfreien Herdöfen weisen einen wesentlich geringeren wasserlöslichen Komponentenanteil auf als solche aus Drehtrommelöfen.

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 0,1-14 ng TE/Nm<sup>3</sup> (Protokoll über persistente organische Verunreinigungen des Executive Body des Abkommens über weiträumige grenzüberschreitende Luftverschmutzung). Diese Werte sind abhängig vom Schmelzaggregat, vom eingesetzten Material und der verwendeten Gasreinigungstechnologien.

Tab. 2.16: Zusammensetzung von Filterstaub (Angaben in Gewichtsprozent)

Inhaltsstoff	Typischer Analysenwert (%)	Bandbreite (%)
CaO	25	0-50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15	6-25
NaCl, KCl	35	20-50
C	6	1-6
Schwermetalle <sup>*)</sup>	-	0.01-10
PCDD/F	5 µg/kg	3-10 µg/kg

<sup>\*)</sup> Anmerkung: Es können beispielsweise Zn, Pb, Cu, Mn, V, Cr, Ni, Sn, Mo, Se, Hg, Cd (in Spuren Co, As, Ti, Be, Sb) enthalten sein. Diese Reihenfolge entspricht dem Mittelwert ihrer Gehalte.

Die Hauptkomponente des Filterstaubs des Abgases aus salzbeaufschlagten Drehtrommelöfen sind unreaktiertes Kalkhydrat und Salze. Bei Einsatz eines salzlos betriebenen Herdofens weist der Filterstaub eine unterschiedliche Zusammensetzung auf (wesentlich geringeren Salzgehalt und CaO-Gehalt). Neben den verdampften Chloriden und Fluoriden (bei Einsatz des Drehtrommelofens), sowie den sekundär gebildeten Komponenten wie Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaCl<sub>2</sub>, CaSO<sub>4</sub> etc. enthält Filterstaub metallisches Aluminium, freien Kohlenstoff und organische Stoffe (z.B. PCDD/F). Die Kornstruktur ist sehr fein, 99% des Staubes sind kleiner als 1 µm, 75% sogar unter 0,5 µm.

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

Tabelle 2.17: Schwermetallgehalt von Filterstaub [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 10-35 kg Filterstaub an. Bei Einsatz des Closed Well Ofens ist der Anfall von Filterstaub jedoch aufgrund des Einsatzmaterials geringer. Angaben werden von 0,1-10 kg Filterstaub/t Aluminium gegeben.

Das umweltgefährdende Potential des Filterstaubes besteht aufgrund der eluierbaren Komponenten und der organischen Stoffe (PCDD/F). In Österreich ist Filterstaub entsprechend der Festsetzungsverordnung 1997, BGBl. II 227/1997 als gefährlicher Abfall einzustufen. Bei einer Deponierung muß derzeit zumindest sichergestellt werden, daß die Eluatklasse IIIb (ÖNORM S 2072, Stand 1.11.1990) nicht überschritten wird und die PCDD/F-Fracht nicht freigesetzt wird. Im allgemeinen ist dies nur durch weitere Vorbehandlung erreichbar, eine andere Möglichkeit besteht in der Ablagerung in Untertagedeponien (nach entsprechender Verpackung in Big-Bags).

### Behandlung und Entsorgung von Filterstaub

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

Eine Behandlung von Filterstaub wird beispielsweise von der Fa. Ryder Point (GB) bei der Produktion von **Entschwefelungsmitteln für die Stahlindustrie** praktiziert. Dem Entschwefelungsmittel 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 Kohlenstoff 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 dem bei diesen Temperaturen gasförmigen  $\text{FeCl}_2$ , das die Schmelze verläßt und im Abgas der Pfanne zu finden ist. Gemäß einem vorliegenden Gutachten ist die Sekundärdioxinbildung durch die de-novo Synthese im Gas, das die Pfanne verläßt, nicht zu erwarten. Inwieweit das mit Chloriden befrachtete Abgas der Pfanne einer Rauchgasreinigung in den Stahlwerken zugeführt wird und somit auch in dieser Hinsicht dem Stand der Technik bzgl. der Emission von Luftverunreinigungen entspricht, ist nicht bekannt.

In Deutschland arbeitet eine erste Anlage zur Aufarbeitung der Filterstäube nach einem **thermischen Verfahren**, wobei der Salzinhalt zurückgewonnen wird. Bei diesem Verfahren erhält man durch Behandlung mit Wasser eine Sedimentationsphase (unlösliche Anteile, Hydroxidschlämme), eine Flüssigphase mit gelösten Salzen, eine Aufschwimmphase (organische Stoffe, schlecht netzbare Anteile), sowie eine Gasphase ( $\text{NH}_3$ , Amine). Für die geklärte Lösung wird die Rückgewinnung der enthaltenen Salze in einer bestehenden Salzschlackenaufbereitungsanlage vorgeschlagen. Für die abgezogenen organischen Anteile und die entstehenden Abgase ist eine Verbrennung denkbar; die Verwertbarkeit des Sedimentationsschlammes ist noch nicht geklärt [ECOPLAN, 1989].

Ein ähnliches, jedoch weitergehendes Verfahren zur Behandlung der Filterstäube wurde mit der Zielsetzung **PCDD/F-Zerstörung, Wertstoffrückgewinnung und Verwertung** oder Ablagerung der Rückstände entwickelt (Abb. 2.17). Durch vorgeschaltete Niedrigtemperaturbehandlung (ca. 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 Kalziumgehalts wird die Lauge karbonatisiert und das  $\text{CaCO}_3$  abgetrennt. Mittels Vakuumkristallisation werden  $\text{NaCl}$  und  $\text{KCl}$  abgetrennt und der Verwertung zugeführt. Denkbar scheint durch die vorgeschaltete thermische Behandlung eine Aufarbeitung von Filterstäuben in **Salzschlackenaufbereitungsanlagen**. Dies kann entweder durch direktes Vermischen der Filterstäube mit der Salzschlacke erfolgen, oder durch getrennte Filterstaublaugung mit Einschleusung der Lauge in die bestehenden Kristallisationsanlagen [URBACH et al., 1993].

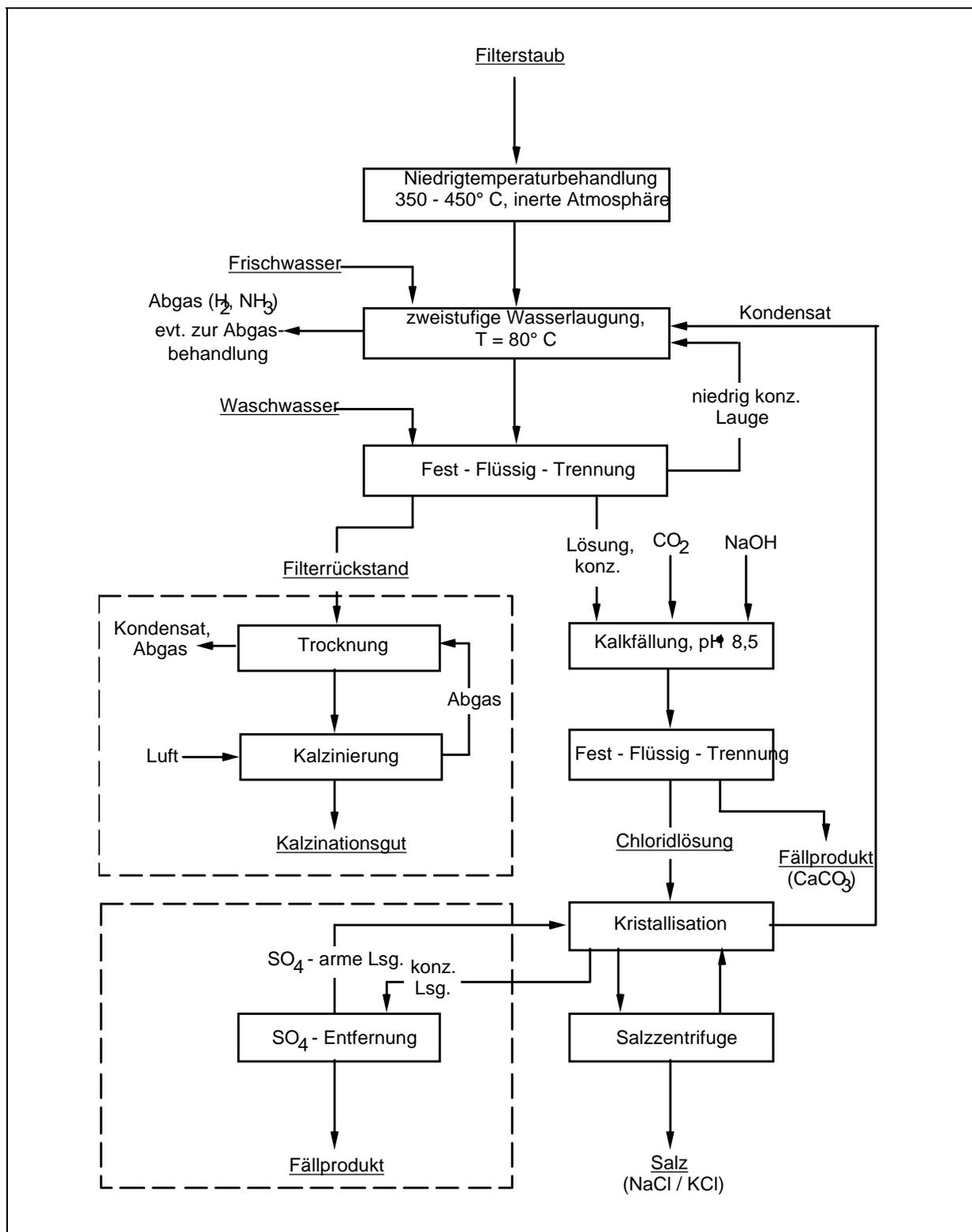


Abb. 2.17: Verfahrenskonzept zur pyro-/hydrometallurgischen Aufarbeitung von Aluminiumfilterstäuben [URBACH et al., 1993]

### 2.5.3 Ofenausbruch

Die durch die Rotation bewirkte Abrasion läßt bei Drehtrommelöfen für die Feuerfestauskleidung nur Standzeiten von ca. 2 Jahren zu. Die beim Austausch nach dieser Zeit anfallende Menge an Ofenausbruch (von Metall und Salz stark penetriert) hängt von der Größe des Ofens ab und kann die Größenordnung von 40-50 t erreichen.

Die Feuerfestauskleidung von stationären Herdöfen hält aufgrund fehlender Abrasion etwa 10 bis 12 Jahre, muß jedoch wegen der thermischen und mineralogischen Beanspruchung laufend ausgebessert werden (alle 3-5 Jahre, dabei fallen ca. 25-30 t gebrauchte Steine an). Die beim Austausch der Zustellung nach etwa 10 Jahren anfallende Menge an Ofenausbruch hängt ebenfalls von Größe und Typ des Herdofens ab; bei großen Closed-well- oder 2 Kammer-Herdöfen kann die Menge an Ofenausbruch 200-300 t betragen.

Der Ofenausbruch ist mit Resten aus der Produktion behaftet (Schlacke, Metall). Vor einer Deponierung ist das Eluationsverhalten festzustellen und aufgrund der vorhandenen Auflagen bzw. gesetzlichen Bestimmungen (Deponieverordnung, BGBl. 164/1996) eine Zuordnung zum Deponietyp zu treffen.

In Österreich wird Ofenausbruch der SNR 31108 gemäß Festsetzungsverordnung 1997, BGBl. II 227/1997 als gefährlicher Abfall eingestuft. Ofenausbruch, der nicht die Eigenschaften der Anlage 2 der Festsetzungsverordnung aufweist, fällt unter Schlüsselnummer 31103 und ist damit kein gefährlicher Abfall.

### Behandlung und Entsorgung von Ofenausbruch

Der aus der Sekundäraluminiumherstellung und aus Gießereien stammende Ofenausbruch wird heute zumeist noch deponiert. Der Einsatz von Ofenausbruch zur Herstellung von Ofenspritzmassen ist grundsätzlich möglich, detaillierte Angaben stehen aber im Moment nicht zur Verfügung. In geringem Umfang wird Ofenausbruch wie Krätze aufgearbeitet.

### 2.5.4 Krätze (skimmings)

Nicht immer ist der Schutz von flüssigem Metall vor Luftzutritt möglich (z.B. bei Gießereiprozessen) und damit die Bildung einer Aluminiumoxidhaut unvermeidbar. Das auf dem Metall schwimmende Oxid wird von Zeit zu Zeit „abgekratzt“. Das erhaltene Produkt, die Krätze, besteht hauptsächlich aus  $Al_2O_3$  mit unterschiedlichen Gehalten an mitgerissenem Al-Metall.

In den USA wird bei Krätzen zwischen „white“ und „black dross“ unterschieden. White dross kommt von Walz- und Preßwerken sowie Gießereien, die in ihren Öfen reines Metall einsetzen und daher keine Kohlenstoffkontamination in ihren Krätzen aufweisen. Überall dort, wo von organischem Material (z.B. durch Öl, Fett, Lacke, Kunststoffe u.ä.) kontaminierter Schrott geschmolzen wird, entsteht eine von Kohlenstoff schwarz gefärbte Krätze, die als „black dross“ bezeichnet wird.

Pro Tonne produziertem Sekundäraluminium fallen etwa 25 kg Krätze an. In einem Herdofen wird zusätzlich zum Oxideintrag mit dem Schrott das geschmolzene Metallbad (da nicht von Salz geschützt) oberflächlich oxidiert. Dabei können pro Tonne Sekundäraluminium 40-80 kg (teilweise auch über 100 kg) Krätze anfallen. Der Aluminiumgehalt von Krätzen läßt sich durch Zusatz geringer Mengen Salz vor dem Abkrätzen erniedrigen [KRONE, 1994], was wiederum zu erhöhtem Salzschlackenfall führt.

Tab. 2.18: Metallausbeute von Krätze, Größe und Krätzestaub

	Krätze	Größe	Krätzestaub
Metallausbeute (%)	20-80	70-85	10-40

Weitere Bestandteile:  $Al_2O_3$ ,  $Al_2O_3.MgO$ ,  $Al_2O_3.SiO_2$  etc.,  $AlCl_3$ ,  $NaCl$ ,  $KCl$ ,  $CaF_2$  etc.

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 liegt in der Brennbarkeit dieses Gasgemisches, das bei Vorhandensein größerer Mengen an  $PH_3$  durch dessen Verunreinigung  $P_2H_4$  selbstentzündlich werden kann.

Krätze zählt in Österreich zu den gefährlichen Abfällen gemäß Festsetzungsverordnung 1997, BGBl. II 227/1997 aufgrund des wassergefährdenden Potentials durch eluierbare Komponenten (Salze) und der Bildung von Gasen bei Kontakt mit Wasser. Im Einzelfall kann der Nachweis der Nichtgefährlichkeit gemäß Festsetzungsverordnung erbracht werden.

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

Tab. 2.19: 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	0-30
MgO	7	5-12
Fe-, Cu-Oxide, Sonstiges	3	0.5-5

Weiter auftretende Inhaltsstoffe sind v.a. Nitride, sodaß 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. Der Anfall von Krätzestaub ist jedoch stark verfahrensabhängig. Bei Krätzen mit einem Metallgehalt von  $\geq 50\%$  liegt der Anteil der Krätzestäube bei 300-350 kg/t Einsatz.

### Behandlung von Krätze

Die Krätze wird aufgearbeitet 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 Krätzeabkühlung in Trommelkühlern, um den Abbrand des Metallgehaltes zu unterbinden, mit anschließender Aufmahlung und Gewinnung verschiedener Siebfraktionen,
- das Auspressen des noch flüssigen Metalls mit einer hydraulischen Presse aus der heißen Krätze nach dem Compa-Verfahren [PECHINEY, 1986] oder dem Verfahren der ALTEK International Inc. 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.

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

Die nach dem Aufmahlen gewonnene Grobfraction (Gröbe) enthält etwa 70-75% (bei günstiger Krätzegeometrie auch bis zu 85%) Al-Metall. Sie wird als Rohstoff in der Sekundäraluminiumproduktion (im Drehtrommelofen) eingesetzt. Die Feinfraction (Krätzestaub) kann bei der Salzschlackenaufbereitung eingesetzt werden [BUS, 1989; Alfaro, 1986].

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

Die komplette Krätze kann auch im Plasma geschmolzen werden, um metallisches Aluminium wiederzugewinnen [LAVOIE, 1993]. Die Krätze aus diesem Prozeß enthält laut Firmenangaben 16% AlN und ist wegen der dadurch bedingten Ammoniakausgasung problematisch zu handhaben. Dieser Prozeß wird in Kanada von ALCAN angewandt und zeichnet sich durch hohe Stromkosten aus.

### 2.5.5 Allgemeine Überlegungen zur Vermeidung bzw. Verminderung von Abfällen aus der (Sekundär-)Aluminiumproduktion

**Krätzen** sind prozeßbedingte Abfälle bzw. Reststoffe, sowohl aus der Primär- als auch aus der Sekundäraluminiumproduktion. Die anfallende Menge hängt auch vom Grad der Verunreinigungen im Schmelzgut ab, ist jedoch hauptsächlich dadurch bedingt, daß die Oberfläche des Aluminiums oxidiert. Die anfallende Krätzemenge ist bei der Primär- und Sekundäraluminiumproduktion in etwa derselben Größenordnung. Bei allen salzfrei betriebenen Schmelzöfen kommen zu dem durch Oxidation der Metallbadoberfläche entstehenden Oxid noch die mit dem Schrott eingetragenen Oxide dazu, dadurch erhöht sich der Krätzeanfall. Um den Krätzeanfall in Grenzen zu halten, sind in salzfrei betriebenen Schmelzöfen nur Materialien einzusetzen, die mit einem Minimum an Oxidanhaftungen versehen sind, d.h. mit Metallausbeuten > 93%.

**Filterstäube** aus der Rauchgasreinigung entstehen bei Primär- und Sekundärproduktion in ähnlichen Mengen. Bei der Sekundäraluminiumproduktion wird der Filterstaubanfall sowohl vom verwendeten Ofentyp wie vom Salzeinsatz bestimmt. Salzbeaufschlagte Drehtrommelöfen weisen einen höheren Filterstaubanfall auf als Herdöfen: verdampfte und hydrolysierte Chloride sowie Feinststaubanteile des chargierten Materials gehen in den Filterstaub; bei Herdöfen (z.B. Closed Well Ofen) entfällt das verdampfte Salz, daher ist der Filterstaubanfall geringer. Es ist aufgrund der strengeren Emissionsbeschränkungen in Zukunft mit einem vermehrten Aufkommen von Filterstäuben zu rechnen. Insbesondere wird sich die Zusammensetzung durch die gebotene Erfassung von Feinstaub ändern (die Dioxingehalte 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. Der vollständige Verzicht auf die Primäraluminiumproduktion wäre

mit einem erhöhten Einsatz von Schmelzverfahren mit Salz und zusätzlichen Reinigungsverfahren (z.B. Chlorspülung zur Magnesiumentfernung) verbunden.

Der typische Abfall bzw. Reststoff aus der Sekundäraluminiumproduktion im **Drehtrommelofen** ist die **Salzschlacke**. Abdecksalz dient bei der Sekundäraluminiumproduktion im Drehtrommelofen zum Schutz vor Oxidation und zur Aufnahme von Verunreinigungen aus der Schmelze. Beim Recycling von verunreinigten und nicht sortenreinen Schrotten (besonders Schrotten mit einem hohen Oxidanteil, d.h. Krätzen) wird auch in Zukunft auf das Salztrommelverfahren nicht verzichtet werden können. Jedoch ist durch Reduktion des Salzfaktors und Einsatz des kippbaren Drehtrommelofens ein Einsparungspotential für den Anfall von Salzschlacke (Salzkuchen) gegeben.

Der Einsatz von **Herd-** (z.B. Closed-well Ofen) und **Induktionsöfen**, die ohne Schmelzsalz auskommen, kann nur bei sortenreinen, gereinigten Schrotten erfolgen. Organisch verunreinigte Schrotte sind für den Einsatz im Closed Well Ofen geeignet. Eine Schmelzreinigung mit Schmelzsalz findet nicht statt. In Side-well Herdöfen kann großstückiger Schrott in einem Schmelzbecken (Vorherd bzw. Side-well) mit flüssigem Metall überflutet werden oder kleinstückiger Schrott in eine Metalltrombe eingezogen werden. Dadurch können z.B. Späne ohne Salz in Side-well Herdöfen eingeschmolzen werden. Wenn möglich werden Späne in Closed well Öfen, Side well Öfen oder auch in Induktionsöfen eingeschmolzen. Steigt jedoch der Feinanteil und/oder der Oxidanteil so ist der Drehtrommelofen das bessere Schmelzaggat, ebenso bei Mischspänen und bei häufigerem Legierungswechsel.

Einen wichtigen Beitrag zur Verringerung des Salzbedarfes beim Umschmelzen von Aluminium bildet die **Schrottvorbehandlung**. Allerdings müssen dann Vorkehrungen für die Behandlung und Entsorgung der Abfälle und Minderung der Emissionen aus der Vorbehandlung gemäß Stand der Technik getroffen werden. Beim Vergleich der einzelnen Verfahren muß auch die Vorbehandlung (z.B. Schrottbehandlung, z.B. Abschwelen) berücksichtigt werden. Bei der Gesamtbeurteilung müssen sämtliche Emissionen in Luft, Wasser und Boden (inkl. Abfall) berücksichtigt werden.

Weil Abfälle bzw. Reststoffe aus der Sekundär-Aluminiumproduktion kaum vermeidbar sind, muß vermehrtes Augenmerk auf die Behandlungsmöglichkeiten dieser Abfälle bzw. Reststoffe gelegt werden.

Aufgrund dieser Überlegungen ergeben sich folgende Schwerpunkte:

- getrennte, sortenreine Erfassung von Aluminiumschrotten
- Verbesserung der Schrottaufbereitung dahingehend, daß der Verbrauch von Abdecksalz reduziert wird bzw. das Umschmelzen von Sekundäraluminium in Herd- oder Induktionsöfen möglich ist
- Behandlung der anfallenden Salzschlacke gemäß Stand der Technik mittels Löse-Kristallisationsverfahren
- Bei der Krätzeaufbereitung wird Aluminium, das im Drehtrommelofen wieder eingesetzt werden kann, und Krätzestaub gewonnen. Dieser kann bei der Salzschlackenaufbereitung miteingesetzt werden.
- Die Abgasreinigung in Umschmelzwerken erfolgt gemäß Stand der Technik mittels Gewebefilter und Trockensorptionsverfahren bzw. Flugstromverfahren. Dabei werden mit dem Staub auch Schwermetalle, HCl, HF, SO<sub>2</sub> und PCDD/F abgeschieden.
- Die Minderungsmöglichkeiten für Filterstaub sind gering und abhängig vom Verfahren (Additivzugabe) und Emissionsminderungsgrad. Der Einsatz von salzlos betriebenen Herdöfen bedingt jedoch einen deutlich geringeren Filterstaubanfall und Filterstaubzusammensetzung.

## 2.6 Luftemissionen

Der Einsatz von Aluminiumschrott in Sekundärschmelzwerken ist mit der Bildung und Emission von luftverunreinigenden Stoffen wie Staub, Schwefel- und Stickstoffoxiden, Kohlendi- und -monoxid, unverbrannten Kohlenwasserstoffen, halogenierten Verbindungen (z.B. PCDD/F) sowie gasförmigen anorganischen Chlor- und Fluorverbindungen verbunden.

### 2.6.1 Zusammensetzung der Abluft, Emissionsquellen

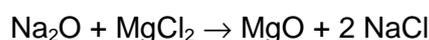
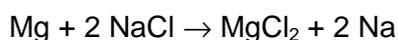
Hauptemissionsquellen für Staub sind die Schrott- und Krätzeaufbereitung sowie die Schmelz-, Warmhalte- und Raffinationsöfen.

Im Abgas von Drehtrommel- bzw. Herd- und Raffinationsöfen finden sich weiters Halogenverbindungen aus dem Schmelzsalz bzw. aus Anhaftungen von PVC und Teflon am Schrott (Tab. 2.20). Emissionen von Fluorwasserstoff treten durch Hydrolyse der fluorhaltigen Schmelzsalzzusätze, wie  $\text{CaF}_2$  oder  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ , im Abgas von Drehtrommelöfen auf.

Tab. 2.20: Übersicht über Emissionsquellen und Abgaszusammensetzung in Sekundärschmelzwerken

Anlage	Spänetrocknung	Krätze- Aufbereitung	Schmelzen	Warmhalten, Raffinieren, Legieren	Gießen
Emissionen	Abluft + Rauchgas	Abluft	Abluft + Rauchgas	Abluft + Rauchgas	Rauchgas
Komponenten	Staub, $\text{CO}_2$ , $\text{CO}$ , org. C, $\text{SO}_2$ , $\text{NO}_x$ , ggf. halogenierte KW und HCl	Staub, $\text{H}_2$ , $\text{NH}_3$ , $\text{PH}_3$	Staub, $\text{CO}_2$ , $\text{CO}$ , org. C, $\text{SO}_2$ , $\text{NO}_x$ , HCl, HF, halogenierte KW, PCDD/F, Metalle	Staub, $\text{CO}_2$ , $\text{CO}$ , org. C, $\text{SO}_2$ , $\text{NO}_x$ , $\text{Cl}_2$ , HCl, HF, ggf. halogenierte KW, $\text{P}_2\text{O}_5$ , Metalle	Staub, $\text{CO}_2$ , $\text{CO}$ , org. C, $\text{SO}_2$ , $\text{NO}_x$

Chloremissionen treten auf, wenn eine Spülgasbehandlung mit Chlorgas oder Chlorgas-abgebenden Substanzen, z.B. zur Reduzierung des Magnesiumgehaltes, vorgenommen werden muß. Im allgemeinen findet jedoch in Drehtrommelöfen durch die Zugabe von chloridischem Schmelzsalz ein ausreichender Magnesiumabbrand statt:



$\text{SO}_2$  entsteht sowohl durch Verbrennung des Schwefelanteils der Brennstoffe als auch durch Reaktionen schwefelhaltiger Verunreinigungen der Schrotte.

Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ) und unverbrannte Kohlenwasserstoffe (C-org.) sind Produkte einer unvollständigen Verbrennung von Kohlenstoff und Kohlenstoffverbindungen. Im Temperaturbereich von über  $800^\circ\text{C}$  ist bei konventionellen Feuerungen bei ausreichendem Sauerstoffangebot, ausreichender Verweilzeit und guter Durchmischung eine Restkonzentration von weniger als  $50 \text{ mg CO/Nm}^3$  und von weniger als  $5 \text{ mg C-org/Nm}^3$  üblich. Bei schlechter Durchmischung und damit örtlich nicht ausreichendem Sauerstoffangebot oder bei zu geringer Temperatur treten höhere  $\text{CO}$ - und C-org-Emissionen auf.

Stickoxide entstehen im wesentlichen bei Verbrennungsprozessen aus dem Stickstoffanteil des Brennstoffes und bei Temperaturen von über 1.000 °C auch aus dem Luft-Stickstoff. Die Bildung von NO<sub>x</sub> wird dabei im wesentlichen durch die

- örtlichen Temperaturverhältnisse und die
- Sauerstoffkonzentration
- Verweilzeiten
- Durchmischung Luft-Brennstoff

bestimmt. Eine geringere Bildung von NO<sub>x</sub> ist möglich, wenn die Verbrennungstemperatur niedrig gehalten wird, im Bereich erhöhter Temperaturen geringer Sauerstoffüberschuß vorhanden ist.

P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> wird bei der selten durchgeführten Phosphorbehandlung zur Kornverfeinerung freigesetzt.

Üblicherweise wird in Sekundäraluminiumschmelzwerken die Abluft aus der Spänetrocknung sowie die Abluft der Schmelz-, Warmhalte- und Raffinierungsöfen getrennt erfaßt und behandelt; ebenso sind Krätzeaufbereitungsanlagen meist mit einer eigenen Abluftentstauungsanlage ausgestattet. Die Abluft der Gießeinrichtungen wird üblicherweise nicht behandelt [ARHG, 1997; ASA, 1997; KLEIN-REICHENBACH, 1997; LEND, 1997].

## 2.6.2 Emissionen als Konzentration

Aus den typischen Energieverbräuchen der Spänetrocknung, der einzelnen Schmelzofentypen sowie der Refinations-, Legierungs- und Warmhalteöfen lassen sich unter der Annahme, daß sich aus 1 Nm<sup>3</sup> Erdgas eine theoretische Rauchgasmenge von 10,5 Nm<sup>3</sup> feuchte Abluft ohne Restsauerstoffgehalt ergibt, die resultierenden Abgasmengen und Schadstoffemissionen ermitteln. Da üblicherweise Grenzwerte auf Nm<sup>3</sup> trockene Abluft bezogen sind, sollte man den Feuchtegehalt noch abziehen und kommt damit auf eine Rauchgasmenge von 8,5 Nm<sup>3</sup> trockene Abluft, ohne Restsauerstoffgehalt. Würde die Luft durch reinen Sauerstoff ersetzt werden, so verringert sich die Abgasmenge theoretisch auf bis zu ca. 3 Nm<sup>3</sup> feuchtes Abgas/Nm<sup>3</sup> Erdgas bzw. 1 Nm<sup>3</sup> trockenes Abgas/Nm<sup>3</sup> Erdgas.

Üblicherweise wird jedoch beim Chargieren soviel Falschluff angesaugt, daß sich in der Praxis das Abgasvolumen um den Faktor 5 bis 15 erhöht (Tab. 2.12).

Bei der Berechnung der Emissionen sind typische Betriebsverhältnisse vorausgesetzt; z.B. ist angenommen, daß bei Induktionsöfen oder Herdöfen wirklich salzfrei gearbeitet wird. Sollten jedoch Abdeck- oder Abkrätzsätze eingesetzt werden, so ist mit HCl- und HF-Emissionen zu rechnen (derartige Salze enthalten insbesondere Alkali- und Erdalkalifluoride).

Zur Berechnung der voraussichtlichen Abgasmengen (Tab. 2.12) wurden folgende typische Falschluffaktoren (Menge Rauchgas : Menge Abgas) herangezogen:

- Spänetrocknung.....11-16
- Closed-well-Herdofen.....5-10
- starrer Drehtrommelofen.....7-12
- starrer DTO + O<sub>2</sub>-Brenner.....2-9
- kippbarer Drehtrommelofen.....40-60
- Refinations-Herdofen.....2-4
- Gesamtwerk.....5-10

Tab. 2.21: Typische Energieverbräuche und berechnete spezifische Emissionen der Sekundäraluminiumschmelzverfahren

Verarbeitungsschritt	eingesetzte Schrotte	ange-nommene Ausbeute (%)	Energiebedarf (nur fossile Energieträger)		mittlerer Erdgasbedarf bei Hu = 36 MJ/Nm <sup>3</sup>	mittlerer Rauchgasanfall <sup>5)</sup>	Voraus-sichtliche gesamte Abgas-menge (Nm <sup>3</sup> /t Metall)	Berechnete Emissionen auf Basis von Grenzwerten (siehe Tabelle 2.22) (g/t Metall)						
			(MJ/t Einsatz)	(MJ/t Metall)				(MJ/t Metall)	Nm <sup>3</sup> /t Metall	HCl	HF	Staub	NO <sub>2</sub>	Cl <sub>2</sub>
<b>Späne-trocknung</b>	feuchte Späne	85	1.836-3.213	2.160-3.780	60-105	630-1.100	6.900-17.600 <sup>1)</sup>	200-530	-	140-350	2.070-5.280	-	345-880	690-1.760
<b>Schmelzen in:</b>														
Closed-well-Herdofen	sauberer Stück-schrott, org. verunreinigter Schrott	92	2.320-3.960	2.520-4.300	70-120	735-1.260	3.675-12.600	110-380	-	70-250	1.100-3.780	11-38	185-630	370-1.260
Drehtrommel-ofen (starr)	Späne, Krätzen, Gröben, aufbe-reiteter Sam-melschrott,	74	3.260-3.480	4.410-4.700	123-130	1.290-1.365	9.030-16.380	270-490	45-82	180-328	2.700-4.914	27-49	450-820	900-1.640
Drehtrommel-ofen (kippar)	Krätzen, Gröben	78	2.080 <sup>2)</sup>	ca. 2.670	ca. 75	ca. 230 <sup>4)</sup>	9.200-13.800	276-414	46-69	184-276	4.600-6.900	27-41	460-690	920-1.380
<b>Raffinieren, Legieren, Warmhalten</b>	Legierungs Elemente wie Si, Cu, Zn, Ti, Mn, Mg, Ni	97	1.400-2.520	1.440-2.600	40-72	420-756	840-3.024	25-91 <sup>3)</sup>	-	17-60	250-910	3-9	42-150	84-300
<b>Gesamt Schmelzwerk</b>		80	3.460-7.200	4.320-9.000	120-250	1.260-2.625	6.300-26.350	189-790	31-132	126-527	1.890-7.900	19-79	315-1.320	630-2.635

<sup>1)</sup> arbeitet nur 2 Schichten / Tag

<sup>2)</sup> bei Einsatz von Erdgas-Sauerstoff-Brennern

<sup>3)</sup> Chlorgas

<sup>4)</sup> bei Einsatz von Erdgas-Sauerstoff-Brennern, theoretische Rauchgasmenge sinkt dadurch von 10,5 auf 3 Nm<sup>3</sup>/Nm<sup>3</sup> Erdgas

<sup>5)</sup> Es wurde mit einer Rauchgasmenge von 10,5 bzw. 3 Nm<sup>3</sup> feuchte Abluft/Nm<sup>3</sup> Erdgas gerechnet

Tab. 2.22: Vergleich österreichischer und deutscher Emissionsgrenzwerte für Aluminium

	ÖSTERREICH	DEUTSCHLAND	
	NE-Metallverordnung BGBl. II 1/1998 für Al	TA-Luft (1986) Anlage 3.3 für Al	
	Konzentration (mg/m <sup>3</sup> )	Konzentration (mg/Nm <sup>3</sup> )	bei einem Massenstrom von (g/h)
<b>Staub</b>	20	20	≥ 500
<b>Gesamt C</b>	50	50	
davon: <b>Benzo-(a)-pyren</b>	0,1		
<b>HCl</b>	30	30	≥ 300
<b>HF</b>	5	5	50
<b>SO<sub>2</sub></b>	300 <sup>1,2)</sup> , 500 <sup>3)</sup>	500	≥ 5.000
<b>CO</b>	100 <sup>1)</sup> , 175 <sup>2)</sup> , 250 <sup>3)</sup>		
<b>NO<sub>2</sub></b>	500 <sup>4)</sup> , 300 <sup>5)</sup>	500	≥ 5.000
<b>Emissionen in Dampf- und bzw. oder Partikelform</b>	Pb, Zn, Cr, Cu, Mn, V, Sn	<b>Klasse 3</b> Sb, Pb, Cr, CN, F, Cu, Mn, Pt, Pd, Rh, V, Sn insgesamt 5 <sup>6)</sup>	≥ 25
	insgesamt 5		
	As, Co, Ni, Cr (VI), Se, Te	<b>Klasse 2</b> As, Co, Ni, Se, Te	≥ 5
	insgesamt 1	insgesamt 1 <sup>6)</sup>	
	Cd, Be, Hg, Tl	<b>Klasse 1</b> Cd, Hg, Tl	≥ 1
	insgesamt 0,2	insgesamt 0,2 <sup>6)</sup>	
davon Cd 0,05 Be + Hg 0,1	Cd 0,1	≥ 0,5	
<b>Cl<sub>2</sub></b>	3	3	

<sup>1)</sup> bei gasförmigen Brennstoffen

<sup>2)</sup> bei flüssigen Brennstoffen

<sup>3)</sup> bei festen Brennstoffen

<sup>4)</sup> bei Vorwärmung der Verbrennungsluft oder bei Verwendung einer Verbrennungsluft mit einem Sauerstoffgehalt von mehr als 25%

<sup>5)</sup> bei Verwendung von gas- oder ölbefeuerten Schmelzbrennern ohne Vorwärmung der Verbrennungsluft beim Vorhandensein von Stoffen mehrerer Klassen darf unbeschadet des Absatzes 1 beim Zusammentreffen von Stoffen der Klassen I und II die Massenkonzentration im Abgas insgesamt 1 mg/m<sup>3</sup> sowie beim Zusammentreffen von Stoffen der Klassen I und III oder der Klassen II und III die Massenkonzentration im Abgas insgesamt 5 mg/m<sup>3</sup> nicht überschreiten.

<sup>6)</sup> beim Vorhandensein von Stoffen mehrerer Klassen darf unbeschadet des Absatzes 1 beim Zusammentreffen von Stoffen der Klassen I und II die Massenkonzentration im Abgas insgesamt 1 mg/m<sup>3</sup> sowie beim Zusammentreffen von Stoffen der Klassen I und III oder der Klassen II und III die Massenkonzentration im Abgas insgesamt 5 mg/m<sup>3</sup> nicht überschreiten.

Die Emissionen von HCl, Cl<sub>2</sub>, HF, NO<sub>2</sub>, CO, C-org. und Staub (Tab. 2.21) ergeben sich aus den Emissionsgrenzwerten der österreichischen "Verordnung über die Begrenzung der Emission von luftverunreinigenden Stoffen aus Anlagen zur Erzeugung von Nichteisenmetallen", BGBl. II 1/1998, die in Tabelle 2.22 den Grenzwerten der TA-Luft gegenübergestellt sind.

Diesen berechneten Emissionswerten (Tab. 2.21) stehen der Behörde vorliegende Werte von Sekundäraluminiumschmelzwerken (mit gemeinsamer Absaugung für Schmelzöfen, Raffinationsöfen, Warmhalteöfen und Gießöfen) gegenüber (Tab. 2.23).

Tab. 2.23: Typische spezifische Emissionen von Sekundäraluminiumschmelzwerken

Schmelz- aggregat	Eingesetzte Schrotte	Gesamt-Emissionen (g/t Metall)					
		HCl	HF	Staub	NO <sub>2</sub>	C <sub>org</sub>	CO
kippbarer Herdofen	sauberer Stückschrott	2-20	0,1-1,5	1-45	200-900	5-40	30-180
Closed-well-Ofen	sauberer Stückschrott, org. verunreinigter Schrott	20-600	0,2-1,5	2-25	8-900	5-35	20-100
Drehtrommel-ofen (starr)	Späne, Gröben, Shredderschrott,	50-400	3-15	4-55		150-250	

Auch RITTER und KELLER (1996) führen spezifische Emissionen, bezogen auf die Metallausbringung, für Staub, HCl, HF, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, Gesamt-C und PCDD/F an, die gut mit den vorliegenden Daten korrelieren.

Das Abgas aus den Chlorierungsöfen weist bei einer Temperatur von ca. 400 °C einen Staubgehalt von ca. 10-20 mg/Nm<sup>3</sup>, einen Cl<sub>2</sub>-Gehalt von 0,5-1,5 mg/Nm<sup>3</sup> und einen HCl-Gehalt von 1-10 mg/Nm<sup>3</sup> auf.

Für amerikanische Schmelz- und Raffinationsöfen werden von der US-EPA folgende mittlere Staubemissionen im Rohgas vor der Abgasbehandlung angegeben (Tab. 2.24):

Tab. 2.24: Rohgas-Staubemissionen amerikanischer Sekundärschmelzwerke [EPA, 1995]

Ofenart	Rohgas	Reingas nach Gewebefilter	Reingas nach Elektrofilter
Abschmelz-Herdöfen	7,25 kg/t Einsatz	1,65 kg/t Einsatz	k.A.
Tiegelöfen	0,95 kg/t Einsatz	k.A.	k.A.
Drehtrommel-Schmelzöfen	2,15 kg/t Einsatz	0,65 kg/t Einsatz	0,65 kg/t Einsatz
Raffinationsöfen	500 kg/t Cl <sub>2</sub> Einsatz	25 kg/t Cl <sub>2</sub> Einsatz	k.A.

### 2.6.3 Dioxine und Furane

PCDD/F-Konzentrationen im Rohgas liegen abhängig von der Verfahrensführung und der Art des Brenners im Bereich von 10-80 ng TE PCDD/F/Nm<sup>3</sup> [RITTER & KELLER, 1996]. Im Protokoll über persistente organische Verunreinigungen des Executive Body des Abkommens über weiträumige grenzüberschreitende Luftverschmutzung werden PCDD/F Emissionen in der Sekundäraluminiumindustrie rohgasseitig von 0,1 bis 14 ng TE/Nm<sup>3</sup> angeführt.

PCDD und PCDF sind Produkte einer unvollständigen oder unvollkommenen Verbrennung, die auf verschiedene Ursachen zurückzuführen sein kann:

- PCDD/PCDF liegen bereits im Brennstoff oder der Verbrennungsluft vor und werden bei der Verbrennung infolge zu geringer Temperatur und/oder zu kleiner Verweilzeit nicht zerstört.
- PCDD/PCDF werden aus im Schrott enthaltenen chlorierten Kohlenwasserstoffen, den sogenannten Precursoren (z.B. polychlorierte Biphenyle, polychlorierte Benzole, polychlorierte Phenole), gebildet. Neben der Bildung aus organischen chlorhaltigen Vorläufersubstanzen

kann aber auch in geringerem Ausmaß die Synthese aus anorganischen Chlorverbindungen auftreten.

- PCDD/PCDF werden aus nicht chlorierten Kohlenwasserstoffen und anorganischen Chlorverbindungen als Chlorquelle neu gebildet ("De-novo-Synthese"). Für das Phänomen der De-novo-Synthese, welche vornehmlich im Temperaturbereich von 200-450 °C in Gegenwart von Sauerstoff auftritt, kommt dem Vorhandensein von partikelgebundenem organischen Kohlenstoff und Chlor, unter katalytischer Teilnahme von Schwermetallen, eine besondere Bedeutung zu.

Die wesentlichen Quellen für Dioxine und Furane im Abgas von Sekundäraluminiumschmelzwerken sind die salzbeaufschlagten Schmelzöfen (Drehtrommelöfen), sowie in geringerem Ausmaß die Spänetrocknung, da hier die Voraussetzungen für die Dioxin- und Furanbildung gegeben sind.

Das Abgas aus Spänetrocknungsanlagen weist Abgastemperaturen von über 400 °C und einen signifikanten O<sub>2</sub>-Partialdruck auf. Im Abgas finden sich Chlor- und HCl-Gas sowie aromatische Kohlenwasserstoffe aus den mit Bohr- und Schneidölen verunreinigten Spänen und Metalloxide in Feinstpartikelform, die als Katalysatoren wirken.

Das Abgas aus den salzbeaufschlagten Schmelzöfen weist Abgastemperaturen von über 600 °C und einen signifikanten O<sub>2</sub>-Partialdruck auf. Im Abgas finden sich ebenfalls aromatische Kohlenwasserstoffe aus den mit Bohr- und Schneidölen verunreinigten Schrotten und Metalloxide in Feinstpartikelform sowie Chlor- und HCl-Gas aus verdampftem Salz bzw. aus Hydrolysereaktionen mit Wasserdampf.

### Probenahme und Analytik von PCDD/PCDF

Die Sammlung und analytische Bestimmung erfolgt in Österreich nach ÖNORM EN 1948, Teil 1-3, 1997 [Emissionen aus stationären Quellen – Bestimmung der Massenkonzentrationen von PCDD/PCDF].

### 2.6.4 Klimarelevante Emissionen

Auf Basis der Untersuchungen von KRÜGER et. al., 1990 und ERTREGG/BUS, 1996 sind die klimabeeinflussenden Emissionen CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O und CH<sub>4</sub> für ein mittleres Sekundär-aluminiumschmelzwerk abgeschätzt und als spezifische Kennzahl umgerechnet worden, wobei der für die Bundesrepublik Deutschland gültige Energiemix – Anteil an der Stromerzeugung BRD (1989): Steinkohle 28 %, Braunkohle 24 %, Öl 1 %, Gas 6 %, Wasserkraft 5 %, Kernkraft 36 % – bei der Erzeugung der Primärenergie herangezogen wurde.

Anhand der veröffentlichten [GRAEDEL & CRUTZEN, 1994] klimarelevanten Faktoren (Annahmen: N<sub>2</sub>O hat einen 290-mal, CH<sub>4</sub> einen 21-mal stärkeren Einfluß auf die Erwärmung der Atmosphäre als CO<sub>2</sub>) kann ein globales Wärmeäquivalent (GWÄ) definiert werden:

$$1 \text{ kg GWÄ} = 1 \times \text{kg CO}_2 + 290 \times \text{kg N}_2\text{O} + 21 \times \text{kg CH}_4$$

Danach weist ein Sekundärschmelzwerk folgende klimarelevanten Emissionen auf:

Produktion des Strombedarfs.....	51 kg GWÄ / t Metall
Transport der Einsatzmaterialien und Produkte sowie Salzschlackenaufarbeitung .....	225 kg GWÄ / t Metall
Schrottaufbereitung.....	29 kg GWÄ / t Metall
Schmelzen und Legieren.....	593 kg GWÄ / t Metall
<b>Gesamt.....</b>	<b>898 kg GWÄ / t Metall</b>

Das früher eingesetzte Schwefelhexafluorid weist im Vergleich zu CO<sub>2</sub> einen 23.900-fachen Einfluß auf die Erwärmung der Atmosphäre auf (Basis 100 Jahre).

### 2.6.5 Verfahren zur Emissionsminderung

Das Abgas eines Sekundärschmelzwerks ist stark staubbelastet und hat einen sauren Charakter, daher wird das Konzept der Abgasreinigungsanlage sowohl durch die Rohgaskonzentrationen, die gesetzlich vorgeschriebenen Reingaskonzentrationen und die vorgesehene Rückstandsentsorgung bestimmt.

Prinzipiell stehen bei ähnlichen Anwendungen folgende Verfahren zur Verfügung:

- thermische Nachverbrennung
- trockene oder halbtrockene Abgasreinigung (Gewebe- oder E-Filter)
- nasse Abgasreinigung (Wäscher)
- katalytischer Abgasreinigung und
- A-Koks-Festbett oder Flugstromreaktor als "Polizeifilter"

In der Praxis erfolgt die Abgasreinigung in Umschmelzwerken meist mittels Gewebefilter, ergänzt durch ein Trockensorptionsverfahren oder ein Flugstromverfahren. In einigen Werken erfolgt die Reduktion der CO- und C<sub>org</sub>-Emissionen durch integrierte Nachverbrennung.

#### **Staub**

Emissionen von Staub und damit verbundene Emissionen staubförmiger Schwermetalle und partikelförmig gebundener Dioxine und Furane sind wesentlich von den Verunreinigungen der eingesetzten Schrotte und der Abscheidetechnologie abhängig.

Moderne Gewebefilter erlauben die sichere Einhaltung von unter 5 mg Staub/Nm<sup>3</sup>. Mit ausreichend dimensionierten Elektrofiltern können bei guter Abgaskonditionierung 5-15 mg Staub/Nm<sup>3</sup> erreicht werden. Die Konditionierung der Abgase für die Entstaubung in Elektrofiltern erfolgt durch Eindüsen von Wasser, wodurch sich das Abgas abkühlt und der Wasserdampfgehalt und damit die Leitfähigkeit der Staubteilchen zunimmt.

Problematisch ist sowohl bei Einsatz von Gewebe- als auch Elektrofiltern der saure, hygroskopische Charakter der abzuscheidenden Salze (AlCl<sub>3</sub>, CaCl<sub>2</sub>, MgCl<sub>2</sub>), da durch diese Stoffe sowohl das Gewebefilter verklebt, als auch die Elektroden korrodiert werden können.

Die Investitionskosten sind für Gewebe- und Elektrofilter etwa gleich und betragen für eine Anlage mit einem Abgasvolumen von ca. 40.000 Nm<sup>3</sup>/h etwa 5-6 Mio. ATS. Als unterschiedliche Betriebskosten fallen der Verbrauch an elektrischer Energie und beim Gewebefilter zusätzlich der Verschleiß der Filtertücher an (Tab. 2.25).

Bei einer angenommenen Standzeit von 2-3 Jahren für den Schlauchwechsel von 1 Mio. ATS ergeben sich spezifische Kosten von ca. 8 ATS/t Metall.

Der gesamte Energiebedarf für ein Gewebefilter wird wesentlich durch dessen Druckverlust bestimmt. Bei einem Druckverlust von 15 mbar, einem Gasvolumenstrom von 40.000 Nm<sup>3</sup>/h, einer Betriebstemperatur des Saugzuges von 200 °C und einem Gesamtwirkungsgrad von 70 % beträgt der Energiebedarf zur Überwindung dieses Druckverlustes ca. 41 kWh/h. Mit angenommenen zusätzlichen Verbrauchern von ca. 10 kWh/h und einem Strompreis von ca. 1,0 ATS/kWh betragen die spezifischen Energiekosten für den Gewebefilter ca. 7 ATS/t Metall. Die Entsorgungskosten für den Filterstaub betragen ca. 2.000 bis 4.000 ATS/t.

Ein Elektrofilter weist einen Druckverlust von ca. 3 mbar auf, was unter sonst gleichen Annahmen wie beim Gewebefilter zu einem Energiebedarf von ca. 8 kWh/h zur Überwindung des Druckverlustes und weiteren Verbrauchern von ca. 16 kWh/h und damit zu Energiekosten von ca. 3 ATS/t Metall führt.

Personalkosten sind nicht berücksichtigt, da sich die Tätigkeit des Personals auf die routinemäßigen Kontrollen während des Betriebes beschränkt; das Wartungspersonal ist in den Wartungskosten berücksichtigt. Betriebskosten setzen sich aus Fixkosten und variablen Kosten (hauptsächlich Proportionalkosten) zusammen.

Tab. 2.25: Wesentliche Positionen der Kosten für die **Staubminderung** von Rohgaswerten von  $600 \text{ mg/Nm}^3_{\text{tr}}$  auf garantierte Reingaswerte von  $5 \text{ mg/Nm}^3_{\text{tr}}$  (**Gewebefilter**) bzw.  $5\text{-}15 \text{ mg/Nm}^3_{\text{tr}}$  (**Elektrofilter**) für eine Abgasmenge von  $40.000 \text{ Nm}^3/\text{h}$

		Kosten	
		Gewebefilter ATS/t Metall	Elektrofilter ATS/t Metall
Produzierte Menge Metall (t/a)	40.000		
Betriebsstunden (h/a)	5.500		
<b>Grundlagen für die jährliche Belastung</b>			
Investitionskosten (Mio. ATS)	6		
Anzahl der Jahre	15		
Zinssatz (%)	6		
Jährl. Rückzahlung inkl. Zinsen (Mio. ATS/a)	0,62		
<b>Anteilige Investitionskosten inkl. Zinsen</b>		<b>15,44</b>	<b>15,44</b>
<b>Wartung + Verschleiß</b>			
Gewebefilter (Mio. ATS/a)	0,33	8,33	
<b>Proportionalkosten</b>			
Elektrische Energie: Gewebefilter	51 kWh/h á 1,0 ATS/kWh	7,00	
Elektrische Energie: Elektrofilter	24 kWh/h á 1,0 ATS/kWh		3,30
<b>Technologiekosten</b>			
Filterstaubentsorgung (10 - 35 kg/t Metall)	2.000-4.000 ATS/t	20-140	20-140
<b>Gesamtkosten</b>		<b>ca. 50-170</b>	<b>ca. 40-160</b>

Für ein Schmelzwerk mit einer Metallproduktion von ca. 40.000 t Metall/a betragen damit unter den in Tab. 2.25 angeführten Annahmen die zusätzlichen Kosten für die Staubminderung ca. 50-170 ATS/t Metall bei Einsatz eines Gewebefilters und ca. 40-160 ATS/t Metall bei Einsatz eines Elektrofilters.

### HCl, HF, SO<sub>2</sub>

Trockensorptionsverfahren erlauben neben der Staubabscheidung und der Abscheidung von partikelgebundenen Schwermetallen und PCDD/F auch die Abscheidung der sauren Schadstoffe HCl, HF und SO<sub>2</sub> aus dem Abgas. Je nach Anwendungsfall werden verschiedene Absorptionsmittel eingesetzt. Zur Abscheidung von SO<sub>2</sub> wird meist CaO verwendet.

Trocken- und Halbtrockensorptionsverfahren bestehen im wesentlichen aus einem Trockenreaktor bzw. Sprühabsorber und einer nachgeschalteten Staubabscheidung mittels Gewebe- oder Elektrofilter.

Vorteilhaft wirkt sich bei Einsatz von Gewebefiltern aus, daß sich auf der Oberfläche der Filterschläuche eine alkalisch-wirksame Schicht ausbildet, die zu einer verbesserten Staubabscheidung und zu einer weitgehenden Bindung der sauren Abgasbestandteile beiträgt.

Bei Halbtrockenverfahren wird Kalkmilchsuspension im Sprühabsorber zerstäubt und getrocknet, bei Trockenverfahren wird Kalk pulverförmig im Trockenreaktor mit den Rauchgasen vermischt. Die Reaktion mit den Schadstoffen erfolgt im gesamten Rauchgasweg von der Einbringung des Absorptionsmittels bis zur nachgeschalteten Staubabscheidung. Zur Verminderung des Kalkbedarfes wird häufig ein Teil des bereits abgeschiedenen Staubes in den Trockenreaktor oder Sprühabsorber oder in die Rauchgasleitung vor der Staubabscheidung zurückgeführt.

Die Ausführung von Trocken- und Halbtrockenverfahren reicht von einfachen Flugstromreaktoren, bei denen das Adsorbens in eine Abgasleitung vor einem Elektro- oder Gewebefilter eingedüst wird, bis zu Sprühabsorptionsverfahren mit nachgeschaltetem Gewebefilter und Sorptionsrezirkulation oder Wirbelschichtverfahren mit nachgeschaltetem Gewebefilter. Die Effizienz der beiden letztgenannten kann so hoch sein, daß ohne Einbuße der Reingasqualität auf nachgeschaltete Wäscher verzichtet werden kann.

Beim Flugstromverfahren wird das Adsorptionsmittel (meist Aktivkohle oder Aktivkoks in Verbindung mit Kalk oder Kalkhydrat zur Abscheidung der sauren Abgaskomponenten) vor dem Gewebe- oder Elektrofilter in den Abgasstrom eingeblasen. Bei geeigneter Verfahrensführung durch partielle Rezirkulation des abgeschiedenen Filterstaubes und geeigneter Abscheideleistung des Filters sind Emissionen von weniger als 0,1 ng TE PCDD/F/m<sup>3</sup> zu erreichen [EBERTSCH & MAIR, 1997].

Tabelle 2.26 beschreibt die wesentlichen Positionen der Kosten der Emissionsminderung mittels einfachem **Flugstromverfahren** unter Einsatz eines Gewebefilters:

Tab. 2.26: Wesentliche Positionen der Kosten für die Emissionsminderung mittels **einfachem Flugstromverfahren unter Einsatz eines Gewebefilters** bei Zugrundelegung von Rohgaswerten von ca. 500 mg SO<sub>2</sub>/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub>, von ca. 300 mg HCl/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> und von ca. 50 mg HF/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> und garantierten Reingaswerten von unter 300 mg SO<sub>2</sub>/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub>, unter 30 mg HCl/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> und von unter 5 mg HF/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> sowie für die Staubabscheidung von Rohgaswerten von ca. 600 mg/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> und Reingaswerten von unter 5 mg Staub/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> bei einer Abgasmenge von 40.000 Nm<sup>3</sup>/h

		Kosten	
		ATS/Einheit	ATS/t Metall
Produzierte Menge Metall (t/a)	40.000		
Betriebsstunden (h/a)	5.500		
<b>Grundlagen für die jährliche Belastung</b>			
Investitionskosten (Mio. ATS)	15		
Anzahl der Jahre	15		
Zinssatz (%)	6		
Jährl. Rückzahlung inkl. Zinsen (Mio. ATS/a)	1,54		
<b>Anteilige Investitionskosten inkl. Zinsen</b>			<b>38,61</b>
<b>Wartung + Verschleiß (% der Investkosten)</b>			<b>11,25</b>
<b>Proportionalkosten</b>			
Bedarf CaO (kg/t Metall)	22	1 ATS/kg	22
Bedarf elektrische Energie (kWh/h)	102	1,0 ATS/kWh	14,03
<b>Technologiekosten</b>			
Filterstaubentsorgung (kg/t Metall)	35-60	2.000-4.000 ATS/t	70-240
<b>Gesamtkosten</b>			<b>ca. 156-326</b>

Als Rückstand aus diesem Verfahren fällt bei der reinen Entschwefelung ein Gemisch aus Kalziumsulfid, Kalziumsulfat und Kalk an. Bei Einsatz in Sekundäraluminiumschmelzwerken enthält der Rückstand darüber hinaus  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{AlCl}_3$  sowie die abgeschiedenen Schwermetalle, organische Schadstoffe und gegebenenfalls Adsorptionsmittel wie z.B. Aktivkoks.

Für ein Schmelzwerk mit einer Metallproduktion von ca. 40.000 t Metall/a betragen damit unter den in Tab. 2.26 angeführten Annahmen die zusätzlichen Kosten für die Emissionsminderung ca. 156-326 ATS/t Metall bei Einsatz eines einfachen Flugstromverfahrens mit einem Gewebefilter. Dadurch ist die Einhaltung von unter 5 mg Staub/ $\text{Nm}^3$ , von unter 300 mg  $\text{SO}_2$ / $\text{Nm}^3$ , von unter 30 mg HCl/ $\text{Nm}^3$  und von unter 5 mg HF/ $\text{Nm}^3$  gegeben.

Die Kosten für die **quasi trockene Minderung mit Natriumbicarbonat** (Tab. 2.27) und **Rezirkulation des Sorbens** können aus vergleichbaren Anlagen der Abfallentsorgung und der Kraftwerkstechnik abgeschätzt werden. Die Betriebskosten beschränken sich im wesentlichen auf den Bedarf an Natriumbicarbonat und elektrischer Energie und auf die Entsorgung der Rückstände (Filterstaub ersetzt Teil des Schmelzsalzes im Drehtrommelofen, Entsorgung erfolgt schließlich über Salzschlacke). Der Verbrauch an Natriumbicarbonat verhält sich überstöchiometrisch zur abzuschheidenden Fracht der sauren Bestandteile der Abgase. Der Energieverbrauch wird wesentlich von den Zerstäubungseinrichtungen des Sprühabsorbers und vom gaseitigen Druckverlust bestimmt.

Personalkosten sind nicht berücksichtigt, da sich die Tätigkeit des Personals auf die Überwachung bei der Anlieferung des Natriumbicarbonats und routinemäßige Kontrollen während des Betriebes beschränkt; das Wartungspersonal ist in den Wartungskosten berücksichtigt.

Tab. 2.27: Wesentliche Positionen der Kosten für die **quasi-trockene Minderung mit Natriumbicarbonat** unter Zugrundelegung von  $\text{SO}_2$ -freiem Abgas (Einsatz von Erdgas) für die Staubabscheidung von Rohgaswerten von ca. 600 mg/ $\text{Nm}^3_{\text{tr}}$  und Reingaswerten von unter 5 mg Staub/ $\text{Nm}^3_{\text{tr}}$  mittels **Sprühabsorber und Gewebefilter und Sorptionsrezirkulation** bei einer Abgasmenge von 40.000  $\text{Nm}^3/\text{h}$

		Kosten	
		ATS/Einheit	ATS/t Metall
Produzierte Menge Metall (t/a)	40.000		
Betriebsstunden (h/a)	5.500		
<b>Grundlagen für die jährliche Belastung</b>			
Investitionskosten (Mio. ATS)	14		
Anzahl der Jahre	15		
Zinssatz (%)	6		
Jährl. Rückzahlung inkl. Zinsen (Mio. ATS/a)	1,44		
<b>Anteilige Investitionskosten inkl. Zinsen</b>			<b>36,04</b>
<b>Wartung + Verschleiß</b> (% der Investkosten)			<b>10,50</b>
<b>Proportionalkosten</b>			
Bedarf $\text{NaHCO}_3$ (kg/t Metall)	12	3 ATS/kg	36
Bedarf elektrische Energie (kWh/h)	110	1,0 ATS/kWh	15,13
<b>Technologiekosten</b>			<b>97,67</b>
Filterstaubentsorgung über Salzschlacke (kg/t Metall)	15-30	1.000 ATS/t	15-30
<b>Gesamtkosten</b>			<b>ca. 110-130</b>

Die Kosten für die **quasi trockene Minderung** (Tab. 2.28) **inklusive Einblasen von Aktivkoks und Rezirkulation des Sorbens** Filterstaub/Aktivkoks/Kalk können aus vergleichbaren Anlagen der Abfallentsorgung und der Kraftwerkstechnik abgeschätzt werden. Die Betriebskosten beschränken sich im wesentlichen auf den Bedarf an Kalk, Aktivkoks und elektrischer Energie und auf die Entsorgung der Rückstände. Der Kalkbedarf verhält sich überstöchiometrisch zur abzuschheidenden Fracht der sauren Bestandteile der Abgase. Der Energieverbrauch wird wesentlich von den Zerstäubungseinrichtungen des Sprühabsorbers und vom gaseitigen Druckverlust bestimmt.

Personalkosten sind ebenfalls nicht berücksichtigt, da sich die Tätigkeit des Personals auf die Überwachung bei der Anlieferung des Kalkes und routinemäßige Kontrollen während des Betriebes beschränkt; das Wartungspersonal ist in den Wartungskosten berücksichtigt.

Tab. 2.28: Wesentliche Positionen der Kosten für die **quasi-trockene Minderung** unter Zugrundelegung von Rohgaswerten von ca. 1.000 mg SO<sub>2</sub>/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub>, von ca. 300 mg HCl/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> und von ca. 50 mg HF/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> und garantierten Reingaswerten von unter 200 mg SO<sub>2</sub>/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub>, unter 10 mg HCl/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> und von unter 1 mg HF/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> sowie für die Staubabscheidung von Rohgaswerten von ca. 600 mg/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> und Reingaswerten von unter 5 mg Staub/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> und Reingaswerten von unter 0,1 ng PCDD/F/m<sup>3</sup> mittels **Sprühabsorber und Gewebefilter und Sorptionsrezirkulation** bei einer Abgasmenge von 40.000 Nm<sup>3</sup>/h

		Kosten	
		ATS/Einheit	ATS/t Metall
Produzierte Menge Metall (t/a)	40.000		
Betriebsstunden (h/a)	5.500		
<b>Grundlagen für die jährliche Belastung</b>			
Investitionskosten (Mio. ATS)	20		
Anzahl der Jahre	15		
Zinssatz (%)	6		
Jährl. Rückzahlung inkl. Zinsen (Mio. ATS/a)	2,06		
<b>Anteilige Investitionskosten inkl. Zinsen</b>			<b>51,48</b>
<b>Wartung + Verschleiß</b> (% der Investkosten)	3		15
<b>Proportionalkosten</b>			
Bedarf CaO (kg/t Metall)	22	1 ATS/kg	22
Bedarf Aktivkoks (kg/t Metall)	1	3,5 ATS/kg	3,5
Bedarf elektrische Energie (kWh/h)	110	1,0 ATS/kWh	15,13
<b>Technologiekosten</b>			<b>107,11</b>
Filterstaubentsorgung (kg/t Metall)	35-60	2.000-4.000 ATS/t	70-240
<b>Gesamtkosten</b>			<b>ca. 180-350</b>

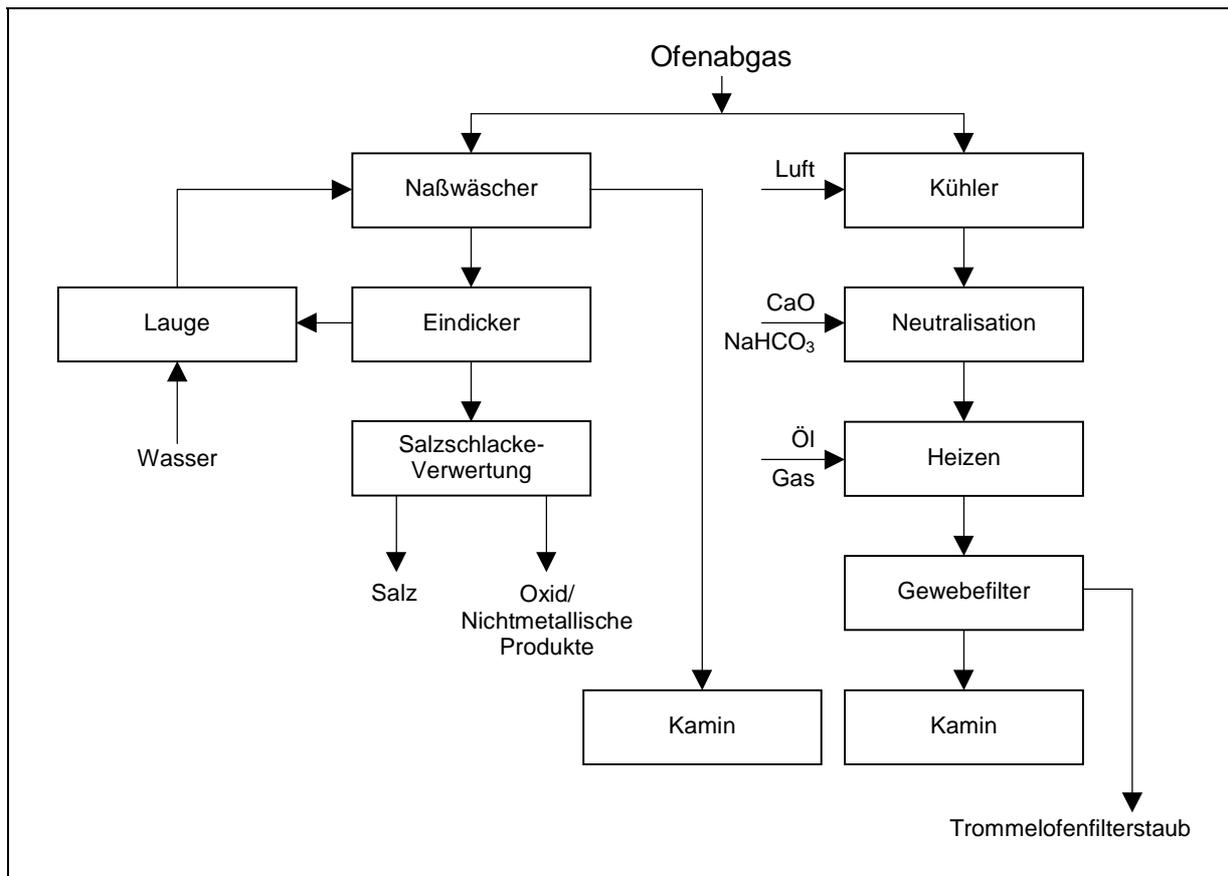


Abb. 2.18: Ofenabgasbehandlung

Vereinzelt werden in amerikanischen und britischen Sekundäraluminiumschmelzwerken in Verbindung mit Sorptions-/Filteranlagen auch alkalische Naßwäscher (einfache Düsenwäscher, Venturiwäscher) eingesetzt (Abb. 2.18). Ihr Abgasreinigungswirkungsgrad ist annähernd vergleichbar mit dem der Trockensorptionsverfahren, jedoch ist die Aufbereitung und Entsorgung des Rückstands und der Waschflüssigkeit aufwendiger als bei den Trockensorptionsverfahren [AHMADZAI, 1991; EPA, 1995].

Die wesentlichen Positionen der Kosten für die Emissionsminderung mittels **Naßverfahren bei Einsatz eines Elektrofilters** werden in Tabelle 2.29 angeführt.

Die Kosten für diese Technologie können aus vergleichbaren Anlagen abgeschätzt werden. Die Betriebskosten beschränken sich im wesentlichen auf den Bedarf an Kalk, Aktivkoks und elektrischer Energie und die Entsorgung der Rückstände.

Der Kalkbedarf verhält sich stöchiometrisch zur abzuscheidenden Fracht an sauren Bestandteilen der Abgase wie HCl, HF und SO<sub>2</sub>. Der Energieverbrauch wird wesentlich von den Umwälzpumpen für die Waschwasserkreise und vom gaseitigen Druckverlust der Entschwefelungsanlage bestimmt.

Personalkosten sind nicht berücksichtigt, da sich die Tätigkeit des Personals auf die Überwachung bei der Anlieferung des Kalkes und routinemäßige Kontrollen während des Betriebes beschränkt; das Wartungspersonal ist in den Wartungskosten berücksichtigt.

Tab. 2.29: Wesentliche Positionen der Kosten für die Emissionsminderung mittels **Naßverfahren** von ca. 1.000 auf unter 50 mg SO<sub>2</sub>/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub>, von ca. 300 auf unter 5 mg HCl/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> und von ca. 50 auf unter 1 mg HF/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub>, sowie für Staub von ca. 600 auf 5-15 mg Staub/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> mittels **Elektrofilter und Wäscher** bei einer Abgasmenge von 40.000 Nm<sup>3</sup>/h

		Kosten	
		ATS/Einheit	ATS/t Metall
Produzierte Menge Metall (t/a)	40.000		
Betriebsstunden (h/a)	5.500		
<b>Grundlagen für die jährliche Belastung</b>			
Investitionskosten (Mio. ATS)	17		
Anzahl der Jahre	15		
Zinssatz (%)	6		
Jährl. Rückzahlung inkl. Zinsen (Mio. ATS/a)	1,75		
<b>Anteilige Investitionskosten inkl. Zinsen</b>			<b>43,76</b>
<b>Wartung + Verschleiß</b> (% der Investkosten)	2		<b>8,5</b>
<b>Proportionalkosten</b>			
Bedarf Wasser (m <sup>3</sup> /t Metall) und Entsorgung Abwasser	0,3	5-30 ATS/m <sup>3</sup>	1,5-9
Bedarf CaO (kg/t Metall)	11	1,0 ATS/kg	11
Bedarf elektrische Energie (kWh/h)	90	1,0 ATS/kWh	12,38
<b>Technologiekosten</b>			<b>77,14-84,64</b>
Filterstaubentsorgung (kg/t Metall)	10-35	2.000-4.000 ATS/t	20-140
Neutralisationsschlamm Entsorgung (kg/t Metall)	15	1.500-3.000 ATS/t	22,5-45
<b>Gesamtkosten</b>			<b>ca. 120-270</b>

Weiters wurde aus der Vielzahl der möglichen Varianten zur Kostenermittlung ein Verfahren mit Sprühtrockner, Gewebefilter und nachgeschaltetem Wäscher herangezogen.

Im Wäscher entsteht aus Kalk und den abgeschiedenen Schadstoffen eine Waschsuspension, die hauptsächlich lösliche (v.a. CaCl<sub>2</sub>) und unlösliche Salze (Gips) enthält. Diese Suspension wird als Kühlmedium im Sprühkühler verwendet. Die Salzfracht wird getrocknet und als Feststoff im Gewebefilter gemeinsam mit den anderen Stäuben abgeschieden.

Die Kosten für diese Technologie (Tab. 2.30) können aus vergleichbaren Anlagen abgeschätzt werden. Die Betriebskosten beschränken sich im wesentlichen auf den Bedarf an Kalk, Aktivkoks und an elektrischer Energie und die Entsorgung der Rückstände. Der Kalkbedarf verhält sich stöchiometrisch zur abzuschiedenden Fracht an sauren Bestandteilen der Abgase wie HCl, HF und SO<sub>2</sub>. Der Mehrverbrauch an Energie im Vergleich zu Tabelle 2.28 wird im wesentlichen von den Umwälzpumpen für die Waschwasserkreise und vom gasseitigen Druckverlust der Naßwäscher bestimmt.

Personalkosten sind nicht berücksichtigt, da sich die Tätigkeit des Personals auf die Überwachung bei der Anlieferung des Kalkes und routinemäßige Kontrollen während des Betriebes beschränkt; das Wartungspersonal ist in den Wartungskosten berücksichtigt.

Tab. 2.30: Wesentliche Positionen der Kosten für die Emissionsminderung mittels **Kombination aus quasi trockenem Verfahren mit nachgeschaltetem Wäscher** von ca. 1.000 auf unter 50 mg SO<sub>2</sub>/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub>, von ca. 300 auf unter 5 mg HCl/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> und von ca. 50 auf unter 1 mg HF/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> sowie für die Staubabscheidung von ca. 600 mg/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> auf unter 5 mg Staub/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> und die Dioxinminderung auf unter 0,1 ng/Nm<sup>3</sup> mittels Sprühabsorber und Gewebefilter bei einer Abgasmenge von 40.000 Nm<sup>3</sup>/h

		Kosten	
		ATS/Einheit	ATS/t Metall
Produzierte Menge Metall (t/a)	40.000		
Betriebsstunden (h/a)	5.500		
<b>Grundlagen für die jährliche Belastung</b>			
Investitionskosten (Mio. ATS)	22		
Anzahl der Jahre	15		
Zinssatz (%)	6		
Jährl. Rückzahlung inkl. Zinsen (Mio. ATS/a)	2,27		
<b>Anteilige Investitionskosten inkl. Zinsen</b>			<b>56,63</b>
<b>Wartung + Verschleiß (% der Investkosten)</b>			<b>16,5</b>
<b>Proportionalkosten</b>			
Bedarf CaO (kg/t Metall)	11	1,0 ATS/kg	11
Bedarf Aktivkoks (kg/t Metall)	1	3,5 ATS/kg	3,5
Bedarf elektrische Energie (kWh/h)	160	1,0 ATS/kWh	22
<b>Technologiekosten</b>			<b>109,63</b>
Filterstaubentsorgung (kg/t Metall)	25-50	2.000-4.000 ATS/t	50-200
<b>Gesamtkosten</b>			<b>ca. 160-310</b>

Für ein Schmelzwerk mit einer Metallproduktion von ca. 40.000 t Metall/a betragen damit unter den in Tab. 2.30 angeführten Annahmen die zusätzlichen Kosten für die Emissionsminderung mittels Kombination aus quasi trockenem Verfahren und Wäscher ca. 160-310 ATS/t Metall. Dadurch ist die Einhaltung von unter 5 mg Staub/Nm<sup>3</sup>, von unter 50 mg SO<sub>2</sub>/Nm<sup>3</sup>, von unter 5 mg HCl/Nm<sup>3</sup>, von unter 1 mg HF/Nm<sup>3</sup> und von unter 0,1 ng PCDD/F/Nm<sup>3</sup> gewährleistet.

## Cl<sub>2</sub>

Zur Abscheidung von Chlor, Chlorwasserstoff und Aluminiumchlorid aus dem Abgas der Raffinationsöfen ("furnace fluxing") werden noch vereinzelt alkalische Wäscher eingesetzt. Diese im Regelfall zweistufig ausgeführten Düsenwäscher werden in der ersten Stufe zur Abscheidung von HCl und AlCl<sub>3</sub> mit Wasser und in der zweiten Stufe zur Abscheidung von Cl<sub>2</sub> mit einer wäßrigen Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-, NaHCO<sub>3</sub>-, NaOH- oder Ca(OH)<sub>2</sub>-Lösung betrieben. Als problematisch hat sich jedoch die Aufarbeitung der Waschflüssigkeiten und die Entsorgung der entstehenden Abfälle erwiesen [ARHG, 1998; NEFF & COCHRAN, 1993]. Daher hat sich auch für die Chlorabscheidung aus dem Abgas nach den Raffinationsöfen das Trockensorptionsverfahren mit Kalk durchgesetzt. Derzeit sind nur ein österreichisches und ein deutsches Schmelzwerk bekannt, die alkalische Wäscher einsetzen.

Beim "in-line fluxing" mit rotierendem Impeller werden im regulären Betrieb weniger als 0,5 ppm Cl<sub>2</sub> emittiert, sodaß in der Praxis keine Emissionsminderungsmaßnahmen eingesetzt werden [NEFF & COCHRAN, 1993].

## CO und C<sub>organisch</sub>

Emissionen von CO und C<sub>org</sub> haben als gemeinsame Ursache eine schlechte Feuerungsführung oder einen zu hohen Kohlenstoffgehalt der Einsatzstoffe.

Die wirksamste Maßnahme zur Reduktion von CO- und C<sub>org</sub>-Emissionen in Sekundäraluminiumschmelzwerken ist daher eine geeignete Schrottaufbereitung, z.B. durch Abschwelen von organischen Verunreinigungen des Einsatzmaterials. (Das Abschwelen verursacht dabei ebenfalls Emissionen, die im Zuge einer Gesamtbetrachtung berücksichtigt werden müssen).

Verbrennungstechnische Maßnahmen sind nur im Temperaturbereich über 800 °C sinnvoll, da darunter schon temperaturbedingt ein unvollständiger Ausbrand und damit verbundene erhöhte Restkonzentrationen von CO und C<sub>org</sub> zu erwarten sind. Zu den feuerungstechnischen Maßnahmen zur Minderung von Restemissionen von CO und C<sub>org</sub> zählen konstante geregelte Prozeßführung und thermische oder katalytische Nachverbrennung der Abluft.

Bei Einsatz von geeigneten Abdichtungseinrichtungen an den Ofenöffnungen (wie sie z.B. für Drehrohröfen in Müllverbrennungsanlagen seit langem Stand der Technik sind) kann in Kombination mit einer entsprechend dimensionierten Nachbrennkammer der Ausbrand wesentlich verbessert und die CO- und C<sub>org</sub>-Emissionen reduziert werden.

## NO<sub>x</sub>

Stickoxide lassen sich sowohl über prozeß-, anlagen- und feuerungstechnische Primärmaßnahmen als auch über Sekundärmaßnahmen reduzieren.

Die Optimierung der Prozeßführung erfolgt bisher vorwiegend durch die Vergleichmäßigung der Flammentemperaturen und des Temperaturprofils in den Abschwel-, Abschmelz-, Schmelz- und Warmhalteöfen, wodurch sich eine Absenkung des gesamten Energiebedarfs ergibt. Die Reduktion der NO<sub>x</sub>-Emissionen ist dabei lediglich ein gewünschter und willkommener Nebeneffekt.

Das Konzept der gestuften Verbrennungsluftzufuhr wird z.B. in 2-Kammer-Herdöfen oder in Closed-well-Herdöfen angewandt, indem das Schwelgas aus der Schrottkammer, in der eine reduzierende Atmosphäre gehalten wird, in der Heizkammer nachverbrannt wird. Die Beheizung der Heizkammer erfolgt dabei über Low-NO<sub>x</sub>-Brenner, die durch den niedrigen Luftanteil im Zentrum der Flamme eine geringe Stickoxidbildung erzielen. Dabei wird im heißesten Teil der Flamme eine reduzierende Atmosphäre gehalten, wodurch die Bildung von thermischen NO<sub>x</sub> vermindert wird. Der Ausbrand erfolgt erst über die Mantelluft im weniger heißen Teil der Flamme.

In den Sekundärschmelzwerken ist mit diesen Primärmaßnahmen eine NO<sub>x</sub>-Emission von unter 100 mg/Nm<sup>3</sup> bezogen auf den gemessenen Sauerstoffgehalt des Abgases erreichbar, was bei einem Schmelzwerk mit einer Kapazität von ca. 7,3 t Metall/h und einem Abgasvolumen von ca. 40.000 Nm<sup>3</sup>/h einer spezifischen NO<sub>x</sub>-Emission von ca. 550 g/t Sekundäraluminium entspricht.

Prinzipielle sekundäre Maßnahmen zur NO<sub>x</sub>-Minderung sind die selektive nichtkatalytische Reduktion (SNCR) durch Eindüsen von Ammoniak oder Ammoniakverbindungen (z.B. Harnstoff) in den Rauchgasstrom, die selektive katalytische Reduktion (SCR) oder die naßchemische Abscheidung. Sekundärmaßnahmen sind jedoch aufgrund der erreichbaren Ausgangskonzentration bei Einsatz von Low-NO<sub>x</sub>-Brennern nicht erforderlich.

**PCDD/PCDF**

Emissionsminderungsmaßnahmen für Dioxine und Furane basieren entweder auf der Abscheidung der partikelgebundenen PCDD/F, wie z.B. in Gewebe- und Elektrofiltern, auf der Abscheidung gasförmigen und partikelgebundenen PCDD/F, wie z.B. in Wäschern, beim Flugstromverfahren und in Sprühabsorbern (in Verbindung mit Gewebe- oder Elektrofiltern) oder auf der thermischen oder katalytischen Zerstörung der Dioxine und Furane (Tab. 2.31).

Tab. 2.31: Effizienz von Dioxinminderungsmaßnahmen

Verfahren	Sorbent	Abscheideleistung	Erreichbare PCDD/F Konzentration
Wirbelschichtverfahren	Zeolith	95 %	0,1 ng/m <sup>3</sup>
Katalytisch	NH <sub>3</sub> oder H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	95-99 %	0,1 ng/m <sup>3</sup>
Sprühabsorber + Gewebefilter	Kalkhydrat und Aktivkohle (500 mg/m <sup>3</sup> )	98 %	0,1 ng/m <sup>3</sup>
Flugstromverfahren + Gewebefilter	Kalkhydrat und Aktivkoks (200 mg/m <sup>3</sup> )	99 %	0,1 ng/m <sup>3</sup>
Wirbelschichtverfahren	Koks (80 mg/m <sup>3</sup> )	99,9 %	0,01 ng/m <sup>3</sup>
Wanderbettverfahren	Anthrazit-Koks	99,99 %	0,01 ng/m <sup>3</sup>

Beim Flugstromverfahren wird das Adsorptionsmittel (meist Aktivkohle oder Aktivkoks in Verbindung mit Kalk oder Kalkhydrat zur Abscheidung der sauren Abgaskomponenten) vor dem Gewebe- oder Elektrofilter in den Abgasstrom eingeblasen. Bei geeigneter Verfahrensführung durch partielle Rezirkulation des abgeschiedenen Filterstaubes und geeigneter Abscheideleistung des Filters sind Emissionen von weniger als 0,1 ng TE PCDD/F/m<sup>3</sup> zu erreichen [EBERTSCH & MAIR, 1997].

Wanderbettadsorber zur Dioxin- und Furanabscheidung sind meist als Gegen- oder Kreuzstromadsorber ausgeführt.

Beim Gegenstromadsorber strömen die Abgase von unten über die Abzugstrichter in ein horizontales Schüttgutbett ein und durch den Freiraum über dem Schüttgutbett wieder aus. Das Schüttgut (Aktivkoks oder Aktivkohle) wird über einen Vorratsbunker und Verteilerschurten eingebracht und durchwandert das Bett langsam von oben nach unten. Die Wandergeschwindigkeit wird durch die Abzugseinrichtung bestimmt.

Beim Kreuzstromadsorber wird das Schüttgut durch eine Jalousien- oder Stabsiebkonstruktion in einem vertikalen Bett abgestützt. Die Abgase durchströmen das Bett horizontal. Durch Trennvorrichtungen wie Lochbleche oder Jalousien kann ein Bett in mehrere Schichten unterteilt werden.

Wird aus einer abströmseitigen Schicht der abgezogene Koks in die vorgelagerte Schicht gefördert, oder werden die Abgase zuerst durch den unteren und dann durch den oberen Bereich eines vertikalen Bettes geleitet, so stellt sich innerhalb der Schichten zwar ein Kreuzstrom, insgesamt aber ein kaskadenförmiger Gegenstrom ein. In beiden Fällen spricht man von einem Kreuz-Gegenstrom-Reaktor.

## 2.7 Abwasseremissionen

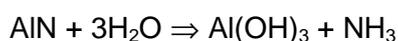
Aufgrund der immanenten Gefahr von Wasserdampfexplosionen bei direktem Kontakt von Wasser und flüssigem Metall ist der Wassereinsatz und damit die Abwassermengen in Sekundäraluminium-Schmelzwerken meist gering. Im Vordergrund der Maßnahmen zur Minderung der Abwasseremissionen eines Sekundäraluminium-Schmelzwerkes stehen die durch Niederschläge entstehenden Oberflächenwässer. Über prozeßspezifische Abwasseremissionen (insbesondere über Abwässer aus der Abgasreinigung der Chlorraffination) von Sekundärschmelzwerken wurden jedoch bisher keine Daten publiziert.

### 2.7.1 Emissionsquellen

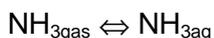
Potentielle Emissionsquellen für Abwasseremissionen in Sekundärschmelzwerken sind vor allem erfaßte Niederschlagswässer und Kühlwässer sowie gegebenenfalls Abwässer aus der nassen Abgasreinigung. Der Großteil der Abwasserinhaltsstoffe ist anorganischer Natur und liegt in ungelöster Form als Metallpartikel, Abrieb oder Staub vor.

Von Bedeutung sind vor allem der Bereich des Schrottlagerplatzes sowie die Lager für Schmelzsalz, Salzschlacke und Krätzen. Während durch unsachgemäß gelagerte Schrotte Wasser in die Schmelzöfen eingebracht werden kann, sind offen gelagertes Schmelzsalz oder Salzschlacke Verursacher der Salzbelastung des Oberflächenwassers.

Krätzen enthalten neben feinst verteilten Aluminium-Tröpfchen meist einige Gewichts-Prozent an AlN, das mit Wasser gemäß



hydrolysiert. Der Ammoniak löst sich in kaltem Wasser und bewirkt dadurch weitere Reaktionen:



Die entstehenden Wässer würden deutlich basisch reagieren und damit fein verteiltes Aluminium unter stetiger Wasserstoffentwicklung umsetzen.

Folgendes Beispiel veranschaulicht die Größenordnung der Gasentwicklung und Abwasserproblematik bei unsachgemäßer Lagerung von Krätzen:

Unter der Annahme eines durchschnittlichen AlN-Gehaltes der Krätzen von 4 % und der Annahme der Hydrolyse von 50 % des in den Krätzen enthaltenen AlN bei Wassereinwirkung reagieren bei der Lagerung von 5.000 t Krätze/Jahr auf einer nicht überdachten Lagerfläche von 20.000 m<sup>2</sup> und einer jährlichen Niederschlagsmenge von 700 mm jährlich ca. 100 t AlN. Dabei entsteht ca. 41 t Ammoniak. Unter der weiteren Annahme, daß sich ca. 80 % des entstandenen Ammoniaks in Wasser lösen, resultiert aus der unsachgemäßen Lagerung der Krätzen ein NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Gehalt von ca. 2,5 g/l im Oberflächenwasser.

### 2.7.2 Abwasseranfall/Wasserverbrauch

Der Abwasseranfall eines Sekundärschmelzwerkes ist meist gering und liegt bei ca. 40 bis 50 l/t Metall, wobei es sich um Wasser handelt, das zur raschen Abkühlung der vergossenen, festen Blöcke in der Gießmaschine direkt aufgesprüht wird. Dazu sind Kühl- und Prozeßwasser zu zählen, weiterer Wasserverbrauch entfällt auf up- und downstream Aktivitäten wie Schwimm-Sinkverfahren, Salzschlackeaufbereitung, Energiebereitstellung, etc. Für die Abwasseremissionen gelten in Österreich die in Tabelle 2.31 dargestellten Grenzwerte.

Der Gesamtwasserverbrauch für die Erzeugung von einer Tonne Sekundäraluminium liegt bei etwa 1.600 l [KRONE et al., 1990]. Dieser Wert beinhaltet ca. 15 l für die Schrottaufbereitung in der Schwimm-Sink-Trennung (diese Anlagen werden jedoch üblicherweise nicht vom Sekundärschmelzwerk selbst betrieben), ca. 43 l Kühl- und Prozeßwasser im Sekundärschmelzwerk, ca. 300 l für die Salzschlackeaufbereitung und ca. 1.123 l für die Energiebereitstellung (Tab. 2.32).

Tab. 2.32: Wasserverbrauch von Sekundäraluminiumschmelzwerken

	Schrottaufbereitung	Salzschlackeaufbereitung	Schmelzwerk
Prozeß- und Kühlwasser [m <sup>3</sup> /t Einsatz]	0,003	0,217	0,048
Prozeß- und Kühlwasser [m <sup>3</sup> /t Metall]	0,015	0,300	0,043

Im Schwimm-Sink-Verfahren ist das eingesetzte FeSi-Pulver ein hoher Kostenfaktor (rund 15.400 ATS/t), sodaß zur Vermeidung von Austragsverlusten im Austragsbereich die aufbereiteten Schrotte kurz mit Wasser nachgespült werden; die Gesamtanlage arbeitet jedoch grundsätzlich abwasserfrei, es muß sogar Wasser zugeführt werden, um die laufenden Austragsverluste zu ergänzen [GRIMM, 1998].

### 2.7.3 Abwasserbehandlung

#### Oberflächenentwässerung (Niederschlagswässer)

Oberflächenwässer werden üblicherweise in Absetzbecken von sedimentierbaren Feststoffen befreit und an den Vorfluter abgegeben.

#### Kühlkreislaufwässer

Kühlkreislaufwässer verschmutzen mit der Zeit, indem sie sich mit Staub oder Gasen anreichern. Sie müssen in der Regel durch Abschlämmen und Zusatz von Frischwasser auf dem notwendigen Qualitätspegel gehalten werden.

#### Prozeßabwässer

Zur Abscheidung von Chlor, Chlorwasserstoff und Aluminiumchlorid aus dem Abgas der Raffinationsöfen ("furnace fluxing") werden noch vereinzelt alkalische Wäscher eingesetzt. Diese im Regelfall zweistufig ausgeführten Düsenwäscher werden in der ersten Stufe zur Abscheidung von HCl und AlCl<sub>3</sub> mit Wasser und in der zweiten Stufe zur Abscheidung von Cl<sub>2</sub> mit einer wäßrigen Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-, NaHCO<sub>3</sub>-, NaOH- oder Ca(OH)<sub>2</sub>-Lösung betrieben. Als problematisch hat sich jedoch die Aufarbeitung der Waschflüssigkeiten und die Entsorgung der entstehenden Abfälle erwiesen [ARHG, 1998; NEFF & COCHRAN, 1993].

Während früher das Abwasser, das neben den Reaktionsprodukten von Cl<sub>2</sub> und HCl mit Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-, NaHCO<sub>3</sub>-, NaOH- oder Ca(OH)<sub>2</sub> auch freies Chlor, HCl und Metallchloride wie AlCl<sub>3</sub> und MgCl<sub>2</sub> enthält, in Sedimentationsbecken geleitet und der abgeschiedene Feststoff deponiert wurde [NEFF & COCHRAN, 1993], wird heute das Abwasser aus der ersten, wäßrigen Stufe der Abgasbehandlung als Dünnsäure im Walzwerk zur Neutralisation von alkalischen Beizbädern eingesetzt. Der im Walzwerk nach der Neutralisation abfiltrierte Feststoff, vorwiegend Al(OH)<sub>3</sub>, wird ebenso wie das Abwasser aus der zweiten, alkalischen Stufe entsorgt [ARHG, 1998].

Tab. 2.33: Vergleich österreichischer und deutscher Abwasseremissionsgrenzwerte

	ÖSTERREICH		DEUTSCHLAND	
	Verordnung über die Begrenzung von Abwasseremissionen aus der Nichteisen-Metallindustrie BGBl. 1995/889 für Al		Rahmen-Abwasser VO (1989) Anhang 39 Nichteisenmetallherstellung	
	Einleitung in ein Fließgewässer mg/l	Einleitung in eine öffentliche Kanalisation mg/l	mg/l	g/t
<b>Temperatur</b>	30 °C	35 °C		
<b>Fischtoxizität</b>	4 <sup>a)</sup>	keine Beeinträchtigungen der biologischen Abbauprozesse	4	
<b>Abfiltrierbare Stoffe</b>	50 <sup>b)</sup>	250 <sup>b)</sup>		
<b>pH</b>	6,5 - 8,5	6,5-9,5		
<b>Al</b>	0,02 kg/t <sup>c)</sup>	0,02 kg/t <sup>c)</sup>		20 <sup>3)</sup>
<b>Pb</b>	0,5	0,5	0,5	15
<b>Cr</b>	0,5	0,5	0,5 (0,1)	10
<b>Co</b>	1	1	1	
<b>Cu</b>	0,5	0,5	0,5	10
<b>Mn</b>	1	1		
<b>Ni</b>	0,5	0,5	0,5	15
<b>Zn</b>	2,0	2,0	1	30
<b>Cl<sub>2</sub></b>	0,5 <sup>d,e)</sup>	0,5 <sup>d,e)</sup>		
<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup> als N</b>	10	10		
<b>CN</b>	0,1 <sup>f)</sup>	0,1 <sup>f)</sup>	0,1	
<b>F</b>	0,3 kg/t <sup>c)</sup>	0,3 kg/t <sup>c)</sup>		300 <sup>2,3)</sup>
<b>P</b>	1,0	-		
<b>Sulfat als SO<sub>4</sub></b>	-	g)		
<b>Sulfit als SO<sub>3</sub></b>	1,0	10		
<b>S<sup>2-</sup></b>			1	
<b>As</b>			0,1	2
<b>Cd</b>			0,2	3
<b>Hg</b>			0,05	1
<b>Ag</b>			0,1	
<b>Tl</b>			1	
<b>Sn</b>			2	
<b>Fe</b>				100
<b>CSB</b>	0,5 kg/t <sup>c, h)</sup>	0,5 kg/t <sup>c, h)</sup>		300 <sup>3)</sup> /500 <sup>2)</sup>
<b>AOX</b>	1,0 <sup>f)</sup>	1,0 <sup>f)</sup>	1	
<b>C-org.</b>	0,05 kg/t <sup>c)</sup>	0,05 kg/t <sup>c)</sup>		20 <sup>3)</sup> /50 <sup>2)</sup>
<b>HCB</b>	0,003 mg/l, 0,3 mg/t <sup>i)</sup>	0,003 mg/l, 0,3 mg/t <sup>i)</sup>	0,003 <sup>1)</sup>	
<b>Cl</b>			0,5	

- 1) *Abwasser aus der Abluftbehandlung der Chlorraffination von Aluminium*
- 2) *Gießen von Aluminium und Halbzeugherstellung*
- 3) *Aluminiumverhüttung*
- a) *Im Rahmen der Fremdüberwachung bei begründetem Verdacht oder konkretem Hinweis der fließgewässerschädigenden Wirkung einer Abwassereinleitung, nicht jedoch im Rahmen der Eigenüberwachung einzusetzen*
- b) *Die Festlegung für den Parameter Abfiltrierbare Stoffe erübrigt eine Festlegung für den Parameter Absetzbare Stoffe.*
- c) *Der Emissionswert bezieht sich auf die Tonne installierte Produktionskapazität für Aluminium, Aluminiumlegierung oder Aluminiumhalbzeug.*
- d) *Die Festlegung für den Parameter Freies Chlor erübrigt eine Festlegung für den Parameter Gesamtchlor.*
- e) *Die Anforderung ist im Abwasserteilstrom aus der Abluftreinigung der Chlorraffination eines Betriebes oder einer Anlage einzuhalten; im Gesamtabwasser eines Betriebes oder einer Anlage darf kein freies Chlor bestimmbar sein.*
- f) *Der Emissionswert ist im Abwasserteilstrom aus der Ofenausbruchlaugung einzuhalten.*
- g) *Der Emissionswert ist im Einzelfall bei Korrosionsgefahr für zementgebundene Werkstoffe im Kanalisations- und Kläranlagenbereich festzulegen.*
- h) *Die Festlegung für den Parameter CSB erübrigt eine Festlegung für die Parameter TOC und BSB<sub>5</sub>.*
- i) *Die Festlegung für den Parameter AOX erübrigt eine Festlegung für den Parameter POX. Die Anforderung ist im Abwasserteilstrom aus der Abluftreinigung der Chlorraffination eines Betriebes oder einer Anlage einzuhalten*
- j) *Die Anforderungen für Hexachlorbenzol ist im Abwasserteilstrom aus der Abluftreinigung der Chlorraffination eines Betriebes oder einer Anlage einzuhalten. Der Emissionsgrenzwert für die spezifische Fracht ist zusätzlich zum Emissionswert für die Konzentration vorzuschreiben; er bezieht sich auf die Tonne installierte Raffinationskapazität für Aluminiummetall oder -legierung mit Chlor oder chlorabspaltenden Substanzen.*

### 3 NEUE TECHNOLOGIEN

Derzeit werden sowohl in den Bereichen Schrottaufbereitung, Schmelzöfen und Schmelzbehandlung sowie Abgasreinigung und Rückstandsbehandlung neue Technologien entwickelt und erprobt [LEHNERT et al., 1996; NAPPA, 1994; VAN LINDEN, 1990].

#### 3.1 Schrotte und Schrottaufbereitung

Die merklich zunehmende Verwendung von Aluminium im Verpackungssektor und im Kfz-Bau bedingt eine Weiterentwicklung in der Schrottwirtschaft, insbesondere hinsichtlich der Separierung von Knet- und Gußlegierungen. Ansatzpunkt hierzu ist die Entwicklung neuer Sortier- und Separationsverfahren [FERGUS & HUI, 1996; GUILLERMET et al., 1996; LEHNERT, 1996; NIJHOF, 1997; VAN DER DONK et al., 1996].

##### 3.1.1 Analytik

Zur Sortierung und Separation einzelner nichtmagnetischer Metallteile eignet sich grundsätzlich die Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA). Eine solche Anlage, bereits erfolgreich für die Trennung von NE-Metallen aus Shredderschrott in Japan eingesetzt, kann bis zu zwölf Nichteisenmetalle in Sekundenbruchteilen erkennen und separieren. Dazu werden die geschredderten Metallteile in Korngrößen von 25 bis 90 mm klassiert und von Schmutz, nichtmetallischen und ferromagnetischen Teilen befreit. Mit Hilfe von Schwingrinnen werden die Teile vereinzelt und passieren anschließend auf einem Förderband den RFA-Detektor, wo sie von einer radioaktiven Quelle zur Emission ihrer charakteristischen Strahlung angeregt werden. Nach Auswertung werden die analysierten Teile mit einem mechanisch-pneumatischen Auswerfer in die entsprechenden Reinmetallbehälter gefördert [LEHNERT et al., 1996].

Bei der Separation mittels Atom-Emissions-Spektroskopie verdampft ein Laserstrahl ca. 1x2 mm Schrottoberfläche. Lacke oder Schmutzschichten werden vorher durch ein oder zwei Laserschüsse beseitigt. Das beim letzten Laserschuß entstehende Plasma wird analysiert. Dieses, eigentlich zunächst nur für die Trennung von Nichteisenmetallen entwickelte Verfahren, kann auch zur Identifikation einzelner Legierungsbestandteile genutzt werden. Mit dieser Technik können problemlos >100 Teilchen/sek analysiert und identifiziert, aber nicht in gleicher Schnelligkeit verlässlich sortiert werden; bei geringerem Durchsatz sinkt die Wirtschaftlichkeit [LEHNERT et al., 1996].

Derzeit wird geprüft, ob sich auch andere Eigenschaftsunterschiede, wie z.B. die unterschiedliche Leitfähigkeit von Aluminiumlegierungen zur Trennung nutzen lassen [LEHNERT et al., 1996].

##### 3.1.2 Dosenrecycling

Der Anteil gebrauchter Aluminiumgetränke-Dosen (UBC) am Altschrottaufkommen in den USA betrug 1991 rund 56 %, entsprechend rund 914.000 t. Es ist daher nicht überraschend, daß in den USA ständig an der Weiterentwicklung von Aufbereitungs- und Schmelzverfahren für UBC's gearbeitet wird. Aufgrund der weiten Transportentfernungen werden die gesammelten Dosen kompaktiert und in Form massiver Blöcke den Schmelzwerken angeliefert. Da einerseits der Lackanteil der UBC im Mittel bei rund 3 % liegt und häufig organisches Fremdmaterial in den Dosen verbleibt, müssen diese vor dem Schmelzen abgeschwelt (entlackt) werden.

Es laufen daher Entwicklungsarbeiten, um die Prozeßschritte

- Kompaktieren
- Transportieren
- Shreddern
- Entlacken
- De-kompaktieren oder
- direktes Einschmelzen der unbehandelten Dosen mit Salz in kippbaren Drehtrommelöfen bzw. ohne Salz in Side-well-Herdöfen

zu optimieren [KENNEY, 1997].

Beim Schmelzen von UBC's muß der Tatsache Rechnung getragen werden, daß Dosenkörper und Deckel aus zwei verschiedenen Legierungen bestehen (Tab. 3.1):

Tab. 3.1: Legierungszusammensetzung von Dosenkörper und Dosendeckel in Used Beverage Cans

	Dosenkörper	Dosendeckel
Leg. NR.	3.004	5.182
% Si	0,30	0,20
% Fe	0,70	0,35
% Cu	0,25	0,15
% Mn	1,0-1,5	0,20-0,50
% Mg	0,8-1,3	4,0- 5,0
% Zn	0,25	0,25
% Cr	-	0,10

Die wichtigste metallurgische Aufgabe besteht darin, den hohen Mg-Gehalt der Deckel-Legierung zu bewahren. Beim Schmelzen unter Salz ist die höhere Metallausbeute mit einem höheren Magnesiumabbrand verbunden; der mittlere Magnesiumgehalt des Dosen-Schmelzmetalls liegt bei ca. 1,6 % Mg. In Herdöfen kann der Magnesiumabbrand in Grenzen gehalten werden, doch liegt wegen des Krätzanfalls die Ausbeute unter der kippbarer Drehtrommelöfen. Es wird daher intensiv an der Entwicklung neuer Schmelzaggregate und neuer Salzsysteeme gearbeitet, um dieses Problem zu lösen.

So erfolgt die Verwertung von Aluminiumdosenschrott überwiegend in Drehtrommelöfen mit einer Kapazität von 4.000-10.000 t/Monat. Diese Anlagengröße zeichnet sich durch wenig Flexibilität bei der Adaptierung an geänderte Rahmenbedingungen aus und bedingt anfänglich hohe Investitions- sowie im Betrieb hohe Transportkosten. Zur Vermeidung dieser Nachteile werden derzeit Kleinanlagen entwickelt [KENNEY, 1997; PERRY, 1994]. Eine Versuchsanlage an der Temple University besteht aus einem Shredder, einem Drehrohrföfen zur Entlackung, einer hydraulischen Presse, einem Vorwärmföfen und einem stationären Herdöfen sowie einer Filteranlage zur Abgasreinigung und einem System zur Wärmerückgewinnung [KENNEY, 1997].

### 3.2 Schmelzen/Schmelzebehandlung

Derzeit wird versucht, feinstückigen Schrott, wie z.B. **Späne**, krätzearm mittels induktiver Metallbadbewegung in einem separaten Reaktor tauchzuschmelzen. Erste Pilotversuche waren erfolgreich [JUNKER & SIMMERATH, 1997].

Eine Möglichkeit zur Ausscheidung der Verunreinigungen ist die **Zugabe von Elementen**, die sich mit der Grundlegierung nicht oder nur schlecht legieren lassen, wie z.B. die Entfernung von Zink durch Zugabe von Blei oder Wismuth. Genauso lassen sich Magnesium und Zinn entfernen, wobei Natrium die Wirksamkeit verbessert. Natrium bildet weiterhin in Aluminium unlösliche Verbindungen mit Sb, Bi, Pb und Sn, die entweder zu Boden sinken oder sich auf der Schmelze abscheiden. Entfernt werden können diese dann durch Abschöpfen oder Filtrieren [LEHNERT et al., 1996].

Das Einschmelzen von Krätzen erfordert große Salzmen gen und ist daher mit dem Anfall großer Mengen von Salzschlacke verbunden. Um dieses Problem zu vermeiden, wurden Verfahren entwickelt, **Krätzen** ohne Salz im Plasma zu schmelzen [BERAULT et al., 1995; GRIPENBERG, 1997; GRIPENBERG et al., 1997]. Die hohen Energiekosten (Energiebedarf >1.000 kWh/t Metall) sollen durch den Wegfall der Salz- und Schlackeentsorgungskosten kompensiert werden. Beim Verbrennen von Aluminium mit Luft entstehen lokal Temperaturen von weit über 2.000 °C. Dabei setzt sich stets etwas Aluminium mit dem Luftstickstoff zu AlN um. Beim Plasmaschmelzen von Krätzen ist der Stickstoff ionisiert und besonders reaktiv, so daß dabei im oxidischen Rückstand AlN-Gehalte von 15-30 % auftreten. Dies macht den Abfall zu einem schwer handhabbaren Problem, da schon Luftfeuchtigkeit ausreicht die NH<sub>3</sub>-Entwicklung zu initiieren [LAVOIE et al., 1991]. Von der BOC Broup Inc., New Providence, N.J. wurde zum gleichen Verfahren 1992 ein Patent angemeldet.

### 3.3 Abgas- und Filterstaubbehandlung

Beim Flugstromverfahren werden durch Einblasen eines Trockenadsorbens, wie z.B. Braunkohlenkoks oder Aktivkohle, partieller Rezirkulation des Filterstaubes und Eindüsung von reinem Sauerstoff ins heiße Ofenabgas PCDD/F-Emissionen von etwa 0,1 ng TE/Nm<sup>3</sup> erzielt [EBERTSCH & MAIR, 1997].

Mehrere Verfahren zur Behandlung der anfallenden PCDD/F-haltigen Filterstäube wurden in verschiedenen Maßstäben geprüft.

- a) Das Einblasen der Filterstäube mit N<sub>2</sub> in das Al-Bad von Herdöfen, um das Reduktionspotential des flüssigen Al zur Zerstörung der Sauerstoffbrücke(n) der PCDD/F zu nutzen. Ineffiziente Reduktion, Nebenreaktionen, große Krätzemengen und Ausfallrisiken haben das Projekt nach ersten Versuchen zu Ende gebracht.
- b) Die Verwendung von Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> oder NaHCO<sub>3</sub> an Stelle von Ca(OH)<sub>2</sub> zur Absorption der sauren Abgase wie HCl und HF und anschließende Rezirkulation des Filterstaubs mit dem Schmelzsalz in die Drehtrommelöfen. NaHCO<sub>3</sub> bietet den Vorteil, daß es durch die Temperatureinwirkung des heißen Abgases unter Wasserabspaltung in feinsten Natriumcarbonat-Staub zerfällt, der dann mit HCl und HF reagiert. Durch das Fehlen von Calcium im Filterstaub kann dieser einen Teil des Abdecksalzes im Drehtrommelofen ersetzen. Die PCDD/F werden dabei mit jedem Kreislauf zu chlorhaltigeren Isomeren aufgechlort wobei ihr TE sinkt. Nachteilig wirkt sich jedoch aus, daß es zu einer deutlichen Aufkonzentrierung flüchtiger Metalle wie Cd, Zn, Pb in der Salzschlacke kommt. Bei deren Verwertung gehen diese Metalle in den oxidischen Rückstand. Andere Quellen erklären, daß Dioxine und Furane nicht aufgechlort, sondern zerstört werden (<0,1 ng/kg Salzschlacke). Schwermetalle wie Cd, Zn und Pb werden aufgrund ihrer Stellung in der elektrochemi-

schen Spannungsreihe von der Aluminiumschmelze zum Metall reduziert und gelöst. Eine Anreicherung in der Salzschlacke soll demnach nicht erfolgen.

- c) Versuche, die Zerstörung der Sauerstoffbrücken der PCDD/F durch Extraktion mit in Toluol feinstdispertiertem, metallischen Natrium bei Raumtemperatur zu zerstören und anschließend den Filterstaub wie Salzschlacke zu verwerten, scheiterten an den hohen spezifischen Kosten.

### 3.4 Salzschlacke- und Krätzebehandlung

Der hohe  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Gehalt im Tonerderückstand der Salzschlacke- und Krätzebehandlung läßt eine Verwendung als Rohstoff in der Aluminiumindustrie erwarten. Nach entsprechenden Reinigungsschritten, insbesondere um die störende Kieselsäure zu entfernen, ist eine Verwertbarkeit im Bayeraufschluß grundsätzlich möglich. Auch scheint der bisher versuchsweise erfolgte Einsatz als Zuschlagstoff in der Zement- bzw. Betonindustrie möglich, wenn eine entsprechende Limitierung der Chlorid- und Schwermetallgehalte sichergestellt werden kann.

## 4 SEKUNDÄRALUMINIUMERZEUGUNG IN ÖSTERREICH

Die Produktion von Sekundäraluminium beträgt in Österreich gegenwärtig etwa 190.000 bis 195.000 t/Jahr. Die drei größten Produzenten befinden sich in Ranshofen und Lend. Darüber hinaus produziert in Niederösterreich ein kleinerer Hersteller Desoxaluminium.

### 4.1 ARHG-Ranshofen

Die ARHG erzeugt ca. 106.000 t Knetlegierungen und ca. 7.000 t Gußlegierungen pro Jahr. Einsatzmaterial für die fünf kippbaren Herdöfen ohne Metallumlauf sind Primärmetall und Neuschrotte; Profilabfälle, Späne und Altschrotte werden zusammen mit Primärmetall im Closed-well Ofen eingesetzt. Die ca. 5.000 t Krätze werden nach Kühlen und Sieben an die ASA weitergegeben. Weiters fallen etwa 20 t Filterstaub und 300 t Ofenausbruch/Jahr an.

### 4.2 ASA-Ranshofen

Die ASA betreibt zwei starre Drehtrommelöfen als Schmelzöfen und vier Herdöfen als Warmhalteöfen. Die Metallproduktion beträgt etwa 35.000 t Gußlegierungen. Einsatzmaterialien sind Neuschrotte, Kapseln, Späne, aufbereitete Altschrotte und Krätzen sowie geringe Mengen Aluminiumdosen. Die Späne werden vor dem Einsatz in einem direkt befeuerten Drehrohr getrocknet und gesiebt. Der Eisenanteil wird über Magnetscheider abgetrennt. Der Altschrott wird direkt eingesetzt. Die Krätzen werden gemahlen und gesiebt; der Eisenanteil der Größe wird über einen Magnetscheider abgetrennt. Die ca. 18.000 t Salzschlacke werden zusammen mit den ca. 1.000 t Krätzestaub zur Aufbereitung exportiert.

### 4.3 SAG Lend

Das Aluminiumschmelzwerk Lend besteht aus zwei Anlagen: In Werk 3 werden aus Hüttenaluminium unter Zusatz von Legierungselementen und sortenreinen Schrotten in einem ölgefeuerten Herdofen hauptsächlich Knetlegierungen geschmolzen. Im Werk 2, dem eigentlichen Sekundärschmelzwerk, werden in zwei 2-Kammer-Herdöfen (Closed-well) im wesentlichen Gußlegierungen geschmolzen. Die Öfen der SAG sind mit einer integrierten Nachverbrennung ausgerüstet. Die Metallproduktion beträgt derzeit ca. 30.000-35.000 t. Einsatzmaterialien sind Neuschrotte und relativ saubere Altschrotte. Die Altschrotte werden von der SAG-Tochter Alurecycling bezogen, die auch die Schrott-Vorbereitung durch Sortieren, einfache Magnetscheidung und Paketieren vornimmt. Der Filterstaubanfall beträgt 3-4 t/Jahr. Der Krätzeanfall liegt bei 2.500 t/Jahr. Die anfallende Krätze wird heiß verpreßt und verkauft. Ofenausbruch aus der Gießerei wird gegen Gebühren entsorgt.

### 4.4 Hütte Klein-Reichenbach

Die Hütte Klein-Reichenbach erzeugt in ihrem 2-Kammer Herdofen etwa 10.000 t/a Desox-Aluminium in Form von Granalien und Masseln. Ausgangsmaterial sind Cu-freie Neu- und Altschrotte, vorzugsweise Stanzabfälle und Bleche. Als einziger Aufbereitungsschritt werden die angelieferten Altschrotte über eine Schere zerkleinert, abgesiebt und gegebenenfalls verpreßt. Das Abgas wird über einen Rekuperator in einen Staubfilter geleitet. Zur Verlängerung der Standzeit und Verringerung der HCl-Emissionen wird Kalk unmittelbar vor dem Staubfilter in den Abgasstrom eingedüst. Der anfallende Filterstaub in einer Menge von rund 18 t/Jahr wurde bisher einer Deponierung zugeführt. Die abgekühlte Krätze wird verkauft.

## 5 VERGLEICH PRIMÄR- UND SEKUNDÄRALUMINIUMERZEUGUNG

Im Hinblick auf das EU-BAT Dokument Nichteisenmetalle, in dem sowohl Primär- als auch Sekundäraluminiumerzeugung behandelt werden, erfolgt ein (Verfahrens-)Vergleich Primäraluminium-, Sekundäraluminiumherstellung. In Österreich wurde das letzte Primäraluminiumwerk 1992 stillgelegt. Rohstoff für die Primäraluminiumerzeugung (Abb. 5.1) ist Bauxit. Zerkleinerter Bauxit wird nach dem Bayer-Verfahren mit NaOH im Rohrautoklaven unter Druck (bis zu 150 bar) und max. 250 °C zu Natriumaluminat verarbeitet. Die Aluminatlauge wird nach Verdünnung vom Rotschlamm getrennt, der die im Bauxit enthaltenen Begleitelemente, vor allem Eisenhydroxid, enthält. Aus der klaren Lauge wird Aluminiumhydroxid ausgefällt, abgetrennt und zu  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Tonerde) gebrannt. Je Tonne erzeugter Tonerde fallen etwa 1-2 Tonnen Rotschlamm mit ca. 50 %  $\text{H}_2\text{O}$  an. Die Tonerde wird im schmelzflüssigen Elektrolyten aus Tonerde und Kryolith gelöst und in der Aluminium-Schmelzflußelektrolyse in Hall-Heroult-Zellen in flüssiges Aluminium und Sauerstoff zerlegt. Das Aluminium scheidet sich dabei auf dem Kathodenboden ab. Die Betriebstemperaturen der Elektrolysezellen liegen bei 940-950 °C. Der spezifische Primärenergieverbrauch für die Aluminiumelektrolyse (berechnet für den Energiemix in der Bundesrepublik Deutschland) liegt bei ca. 56.000 MJ/t Aluminium. Flüssiges Hüttenaluminium wird aus den Elektrolysezellen abgesaugt, in die Gießerei überführt und nach einer Schmelzebehandlung sowie Zusatz von Legierungselementen vergossen [KRONE et al., 1990].

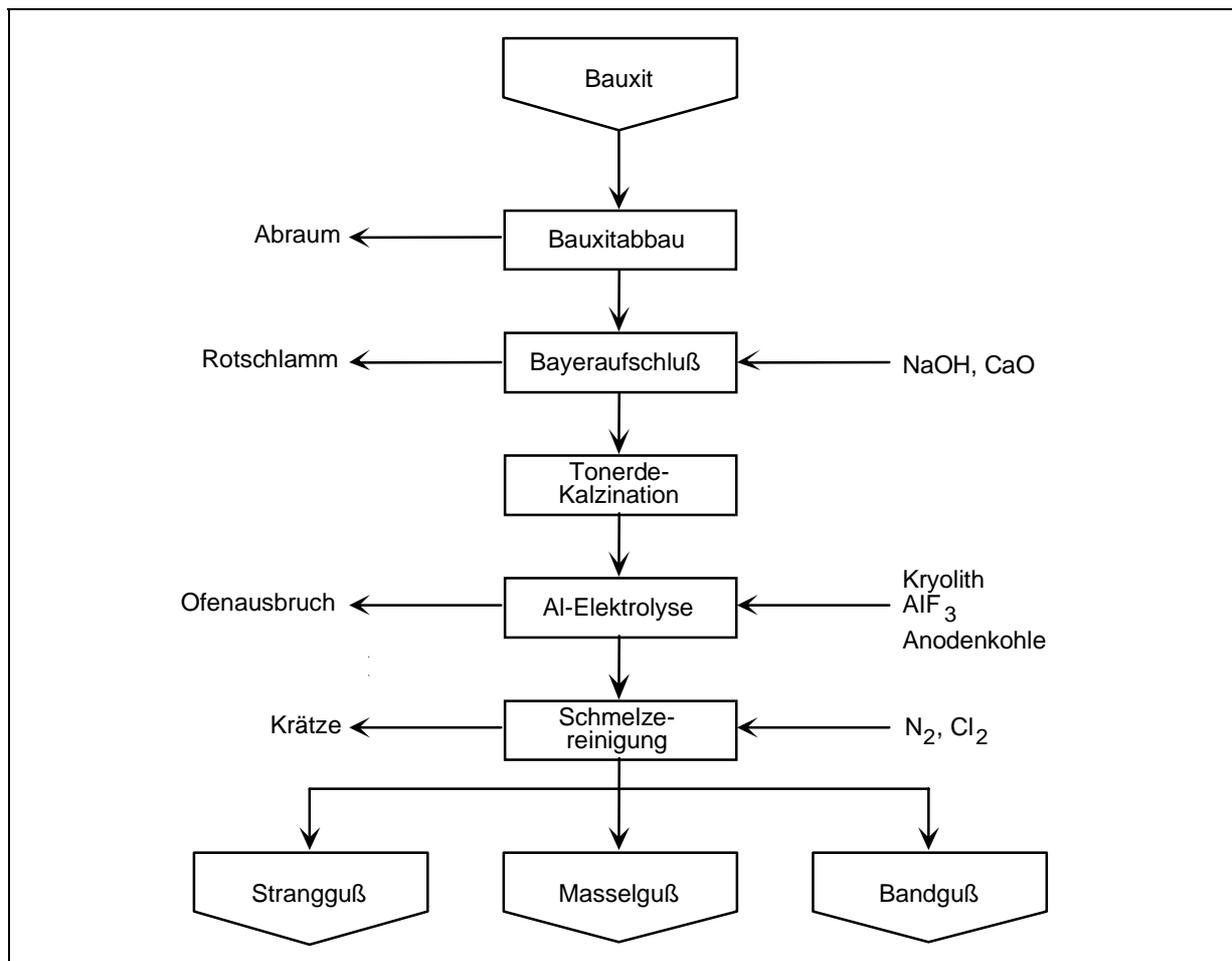


Abb. 5.1: Fließschema zur Herstellung von Primäraluminium aus Bauxit [UBA, 1994]

Einmal in den wirtschaftlichen Kreislauf eingeschleust, ist die Rückgewinnung von Aluminium aus verbrauchten Reststoffen unverzichtbar, da hierdurch in erheblichen Umfang Ressourcen geschont, Energie eingespart und Umweltbelastungen vermindert werden [CREEL, 1990; GILGEN, 1989; KRONE et al., 1990; VILAND, 1990].

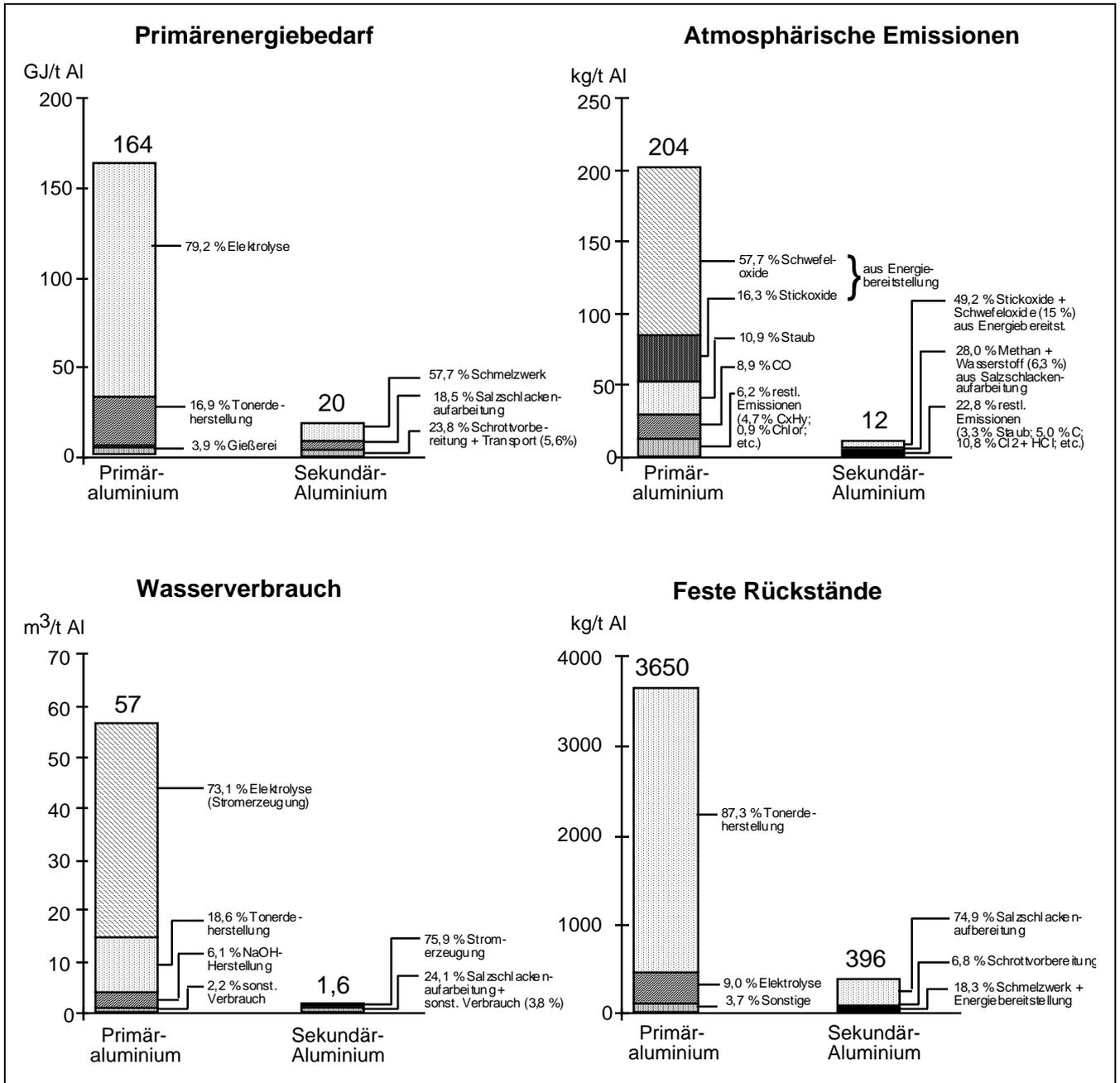


Abb. 5.2: Vergleich zwischen der Primär- und Sekundäraluminiumerzeugung auf Basis von Emissionsbilanzen [KRONE et al., 1990]

Eine vergleichende Betrachtung der Energie-, Schadstoff- und Verbrauchswasserbilanz zwischen der Primärerzeugung aus Bauxit nach dem Bayer-Verfahren mit anschließender Elektrolyse und der Sekundärerzeugung von Aluminium im Drehtrommelofen ergibt in allen Bereichen erhebliche Vorteile zugunsten der Sekundärerzeugung (Abb. 5.2). 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 [KRONE et al, 1990].

## 5.1 Ressourceneinsatz

Die Ergebnisse der Studie von KRONE et al. (1990) weisen (auf Berechnungsbasis Energiemix der Bundesrepublik Deutschland) für Primäraluminium einen Primärenergiebedarf von 163.730 MJ/t unlegiertem Aluminium aus. Demgegenüber benötigt die Sekundärerzeugung von Aluminium lediglich 19.505 MJ/t unlegiertem Aluminium und damit nur 11,9 % der Primärerzeugung.

Tab. 5.1: Einzelenergieinhalte und kumulierter Energiebedarf zur Erzeugung von 1 t Primäraluminium [KRONE et al., 1990]

Prozeßschritt	Menge (t)	Energiebedarf		Gesamt Eprim (MJ)	Anteil am Gesamtbedarf (%)
		Eprim (MJ)	Eel (MJ)		
Tonerdeherstellung	1,94	20.425,6	1.726,10	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
<b>Summe</b>				<b>163.730,5</b>	<b>100,0</b>

\* einschließlich 2% Schmelzverlust an Aluminium entsprechend 4.452,5 MJ

Der Hauptanteil des Energiebedarfs entfällt bei der Primärerzeugung (Tab. 5.1) mit ca. 79 % auf die Elektrolyse, gefolgt von ca. 17 % für die Tonerdegewinnung.

Bei der Sekundärproduktion (Tab. 5.2) entfallen ca. 47 % auf den Einschmelzvorgang im Drehtrommelofen sowie 11 % auf die Schmelzereinigung und das Vergießen. Für die Schrottvorbereitung und Krätzeaufbereitung werden insgesamt etwa 18 % der Energie benötigt – etwa ebensoviel wie für die nachgeschaltete Salzschlackenaufarbeitung. Der Transportanteil, verursacht durch das dezentrale Aufkommen und den damit erforderlichen Transporten, liegt mit ca. 1.000 MJ/t Aluminium (ca. 6 % des Gesamtenergieaufwandes) in der gleichen Größenordnung wie bei der Primärproduktion [KRONE et al., 1990].

Auch beim Wasserverbrauch ist die Sekundäraluminiumerzeugung (Abb. 5.4) günstiger als die Primäraluminiumerzeugung (Abb. 5.3). Der Bedarf bei der Primärerzeugung beträgt 57 m<sup>3</sup>/t Aluminium, enthält auch Kreislaufwasser und entsteht zu ca. 73 % bei der Bereitstellung der für die Elektrolyse notwendigen elektrischen Energie (teilweise in kalorischen Kohlekraftwerken).

Der Prozeßwasserverbrauch für die Herstellung von Primäraluminium selbst liegt unter 1 m<sup>3</sup>/t Aluminium und damit in der gleichen Größenordnung wie der Verbrauch für die Sekundäraluminiumgesamterzeugung mit 1,6 m<sup>3</sup>/t Aluminium. Ca. 20 % des Prozeßwasserbedarfs ist für die Salzschlackenaufarbeitung erforderlich [KRONE et al., 1990].

Tab. 5.2: Einzelenergieinhalte und kumulierter Energiebedarf zur Erzeugung von 1 t Sekundäraluminium [KRONE et al., 1990]

Prozeßschritt	Menge (t)	Energiebedarf		Gesamt E <sub>prim</sub> (MJ)	Anteil am Gesamtbedarf %
		E <sub>therm</sub> (MJ)	E <sub>el</sub> (MJ)		
Transport	2.576	927,40	-	1.013,5	5,6
Shreddern	431	-	79,74	247,6	1,4
Magnetscheidung	765	-	1,66	5,2	-
Schwimm-Sink-Trennung	227	-	61,34	190,5	1,1
Abschwelen/Trocknen	396	1.116,70	21,38	1.286,8	7,1
Paketieren	71	-	6,89	21,4	0,1
Krätzeaufbereitung	292	-	20,03	62,2	0,3
Abschmelzen	163	1.369,2	-	1.496,4	8,3
Einschmelzen im Salzbadofen	1.134	4.540,2	1.140,3	8.503,3	46,6
Salzschlackeaufarbeitung	722	2.166,0	324,9	3.376,2	18,5
Schmelzereinigung/Gießen/Legieren	1.000	1.801,0	15,0	2.014,9	11,1
Energiebedarf für die Herstellung von 1.000 kg Sekundäraluminium mit Legierungsbestandteilen				18.218,0	100,0
Energiebedarf bezogen auf die Herstellung von 1.000 kg unlegiertem Sekundäraluminium				19.505,4	

## 5.2 Emissionen

Bei der Primärerzeugung entstehen pro Tonne erzeugtem Aluminium 3.650 kg feste Rückstände und zwar davon ca. 87 % feuchter Rotschlamm in der Tonerdeproduktion. Weitere feste Rückstände fallen bei der Elektrolyse an und bestehen zum überwiegenden Teil aus den Aschen der Kohlekraftwerke.

Demgegenüber steht bei der Sekundärerzeugung ein Anfall von nur 93 kg Rückstände/t Aluminium, wenn der bei der Salzschlackeaufbereitung anfallende Oxidrückstand (Tonerderückstand) verwertet wird. Die Abfälle stammen zur Hälfte aus dem Einsatz fossiler Brennstoffe zu Heiz- und Transportzwecken und der Schrottvorbereitung (Shreddern) 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 werden [KRONE et al., 1990].

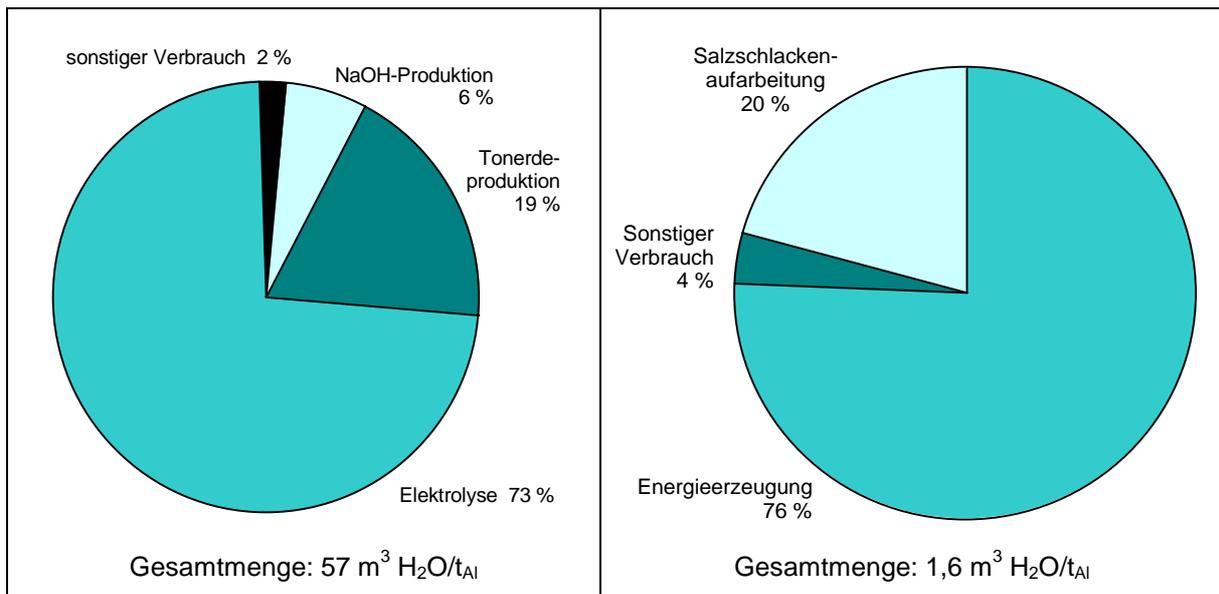


Abb. 5.3: Bilanz des Wasserverbrauchs zur Erzeugung von 1 Tonne Primäraluminium [KRONE et al., 1990]

Abb. 5.4: Bilanz des Wasserverbrauchs für die Erzeugung von 1 Tonne Sekundäraluminium [KRONE et al., 1990]

Die bei der Primärerzeugung entstehenden atmosphärischen Emissionen, die insgesamt ca. 204 kg/t Aluminium 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. Nur ein Teil sind prozeßbedingte Emissionen wie Staub, CO, Kohlenwasserstoffe, Fluor und Fluoride aus der Schmelzflußelektrolyse bzw. Chlor und Chloride aus der Schmelzebehandlung.

Bei der Sekundärerzeugung (Tab. 5.3) sind auch die spezifischen atmosphärischen Emissionen mit ca. 12 kg/t Aluminium wesentlich geringer als die bei der Primärerzeugung. Zu ca. 50 % bestehen sie aus Schwefel- und Stickoxiden sowie Staub und kommen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe, 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 % (HCl, Cl<sub>2</sub>, C<sub>org</sub>) aus dem Schmelzprozeß. Weitere 30 % bestehen aus Wasserstoff und Methan aus der Aufarbeitung der Salzschlacke. Dabei entstehen außerdem folgende Mengen an Schadstoffen, die in die Atmosphäre abgegeben werden, und zwar 0,01 kg NH<sub>3</sub>/t Al, 0,006 kg H<sub>2</sub>S/t Al, 0,001 kg PH<sub>3</sub>/t Al [KRONE et al., 1990].

Für die Abwasseremissionen der Primärproduktion sind genaue Angaben kaum möglich. Die Schadstoffe dürfen vorwiegend aus der Verbrennung fossiler Energieträger zur Stromerzeugung stammen. Für eine genauere Betrachtung wäre auch eine Berücksichtigung der Depo-niesickerwässer erforderlich.

Bei der Sekundäraluminiumerzeugung sind die Aufbereitungsverfahren und der Schmelzprozeß weitgehend abwasserfrei.

Tab. 5.3: Wasser- und Schadstoffbilanz der Sekundäraluminiumerzeugung bezogen auf 1 t Sekundäraluminium [KRONE et al., 1990]

Prozeßschritt	Einheit	Transport	Shreddern	Schwimm-Sink-Trennung	Schmelzwerk	Salzschlacke-aufarbeitung	Energieerzeugung	Ges. *)
Menge	kg	2.576	431	227	1.134 (1.000)	722	1.671,2 MJ <sub>el</sub>	
Wasserverbrauch	l	-	-	14,8	42,6	300	1.123	1.600
Feste Rückstände	kg	-	23	-	43	-	18,7	93
<b>Atm. Emissionen</b>								
Staub	kg	0,042	0,001		0,250	0,073	0,019	0,4
Stickoxide	kg	0,519			1,900		1,343	4,1
Schwefeloxide	kg	0,047			1,310		0,243	1,8
Kohlenmonoxide	kg	0,079			0,042		0,147	0,3
Kohlenwasserstoffe	kg	0,072						0,08
Wasserstoff	kg					0,681		0,75
Methan	kg					2,384		2,6
Chlor	kg				0,002			0,002
Chlorwasserstoff	kg				1,140			1,3
Kohlenstoff	kg				0,540			0,6
Fluorwasserstoff	kg				0,029			0,03
Schwefelwasserstoff						0,005		0,006
Phosphorwasserstoff	kg					0,001		0,001
Ammoniak	kg					0,009		0,011
<b>Abwasseremissionen</b>								
gelöste Feststoffe	kg							
BSB <sub>5</sub>	kg							
CSB	kg							
feste Schwebst.	kg							
Säuren	kg						0,102	0,11
Metallionen	kg						0,024	0,03
Andere	kg						0,093	0,10

\*) aufgerundet + 10 % Unsicherheitsfaktor

### 5.3 Stoffflußdiagramm

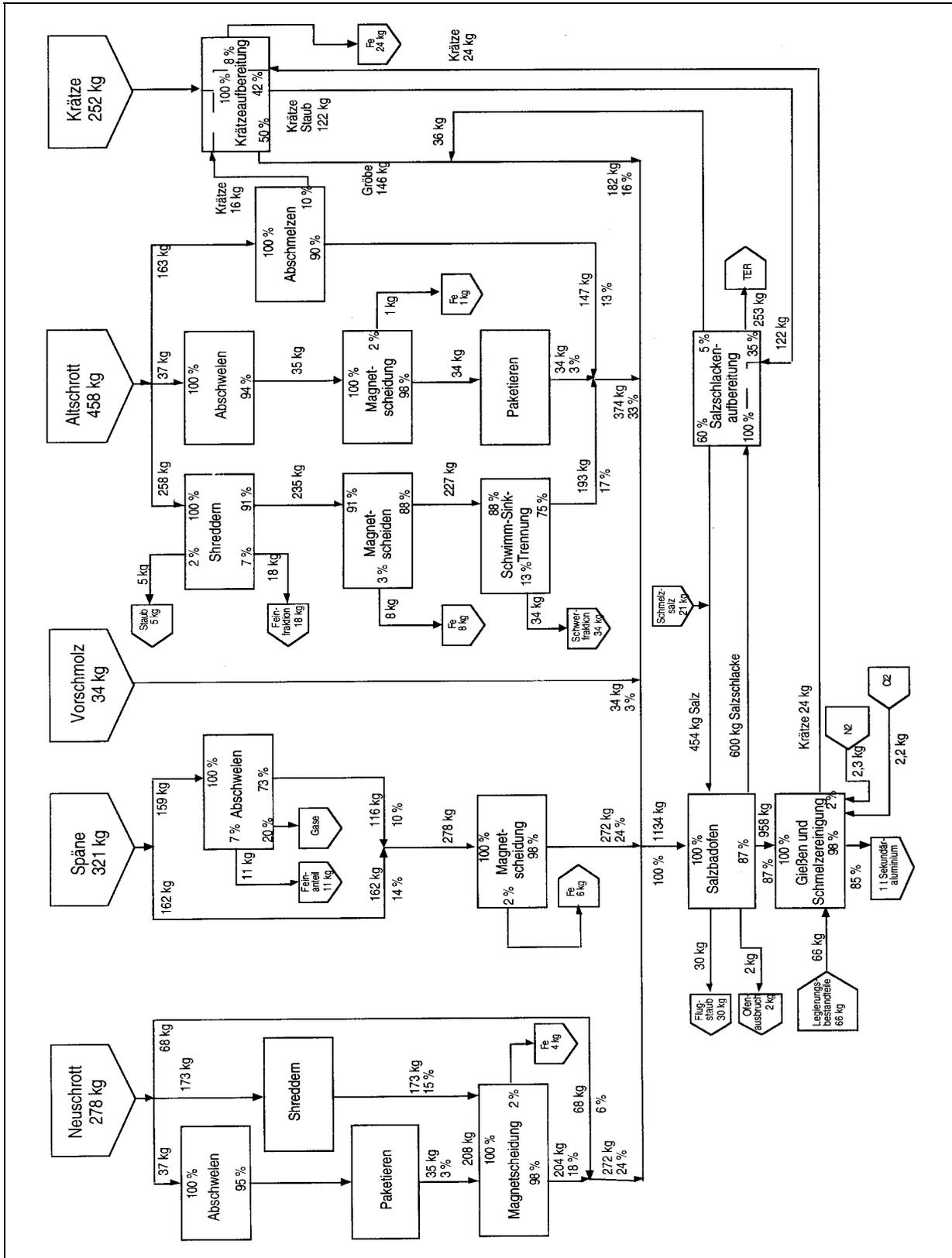


Abb. 5.5: Stoffflußanalyse der Sekundäraluminium-Erzeugung bezogen auf eine Tonne Sekundäraluminium [KRONE et al., 1990]

## 6 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN DES UMWELTBUNDESAMTES ZUR SEKUNDÄRALUMINIUM-ERZEUGUNG

In Abhängigkeit von den Einsatzmaterialien und der gewünschten Produktqualität kommen in der Sekundäraluminium-Erzeugung verschiedene Schmelzaggregate zur Anwendung.

Ein Schmelzwerk, das alle Schrottkategorien verarbeiten könnte, ist zusammenfassend in Abb. 6.1 in Form eines Blockdiagramms dargestellt. Es wurden sechs Schrottkategorien definiert und typische Beispiele angeführt. Die Kriterien für die Zuordnung der Einsatzmaterialien zum best geeigneten Schmelzaggregat sind:

- Verunreinigung der Einsatzmaterialien durch Oxide („Oxidanteil“)
- Anhaftendes Eisen
- Organisches Fremdmaterial („Glühverlust“)
- Magnesium-Gehalt
- Abmessungen der eingesetzten Schrotte, wie dünnste Wandstärke und Verhältnis Oberfläche zu Masse des eingesetzten Schrotteilchens
- Legierungswechsel pro Tag.

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, Schrotte mit oder ohne Salz einzuschmelzen. Als Schmelzaggregate finden die salzbetriebenen Drehtrommelöfen, die starr oder kippbar ausgeführt sind, salzlos betriebene Herdöfen (Closed-well Herdöfen, Side-well Herdöfen) oder Induktionsöfen Verwendung.

Für organisch verunreinigte, jedoch oxidarme Schrotte, ist der ohne Schmelzsalz betriebene Closed-well Herdofen das geeignete Schmelzaggregat.

In Side-well Herdöfen kann großstückiger Schrott in einem Schmelzbecken (Vorherd, side-well) mit flüssigem Metall überflutet werden oder feinstückiger Schrott in einer Metalltrombe eingezogen werden. Dadurch eignet sich dieses Schmelzaggregat besonders für das Einschmelzen von Spänen.

Wenn möglich werden Späne in Closed well Öfen, Side well Öfen oder auch in Induktionsöfen eingeschmolzen. Steigt jedoch der Feinanteil und/oder der Oxidanteil so ist der Drehtrommelofen das bessere Schmelzaggregat, ebenso bei Mischspänen und bei häufigerem Legierungswechsel.

Je höher der Oxidanteil in einem Schrott ist (Kategorien IV bis VI), desto eher wird dieser in einem Drehtrommelofen eingeschmolzen. Hierbei wird zwischen starren und kippbaren Drehtrommelöfen unterschieden. Durch Reduktion des Salzfaktors (kg Salz/kg NMP im Einsatz; 1,8-1,0 für starre Drehtrommelöfen bis auf <0,5 bei kippbaren Drehtrommelöfen) ist ein Einsparungspotential für den Anfall von Salzschlacke gegeben. Krätzen werden hauptsächlich unter Salz geschmolzen; der Einsatz des kippbaren Drehtrommelofens mit der gleichzeitigen Anwendung eines geringen Salzfaktors (<0,5) vermindert in diesem Fall den Salzschlacken-anfall (eigentlich Salzkuchen).

Induktionsöfen werden in den Sekundärschmelzwerken aufgrund der Anforderung nach sauberen, praktisch oxidfreien Schrotten nur vereinzelt eingesetzt. Haupteinsatzgebiet für Induktionsöfen sind die Gießereien.

Die Abluftreinigung erfolgt in den Sekundäraluminiumschmelzwerken gemäß Stand der Technik mittels Gewebefilter und Trockensorptionsverfahren oder Flugstromverfahren.

Emissionen von Staub und damit verbundene Emissionen staubförmiger Schwermetalle und partikelförmig gebundener Dioxine und Furane sind wesentlich von den Verunreinigungen der eingesetzten Schrotte und der Abscheidetechnologie abhängig. Moderne Gewebefilter erlauben die sichere Einhaltung von unter 5 mg Staub/Nm<sup>3</sup>.

Trockensorptionsverfahren erlauben überdies auch die Abscheidung der sauren Schadstoffe (HCl, HF, SO<sub>2</sub>) aus dem Abgas.

Die wirksamste Maßnahme zur Reduktion von CO- und C<sub>org</sub>-Emissionen in Sekundäraluminiumschmelzwerken ist neben geregelter Prozeßführung eine geeignete Schrottaufbereitung, z. B. durch Abschwelen von organischen Verunreinigungen des Einsatzmaterials. Die dabei entstehenden Emissionen sind ebenfalls gemäß Stand der Technik zu minimieren, um Verlagerungen innerhalb der Prozeßkette zu vermeiden.

Durch Optimierung der Prozeßführung, gestufte Verbrennungsluftzufuhr und Verwendung von Low-NO<sub>x</sub>-Brennern ist eine NO<sub>x</sub>-Emission von 100 mg/Nm<sup>3</sup> bezogen auf den aktuellen Sauerstoff erreichbar.

Emissionsminderungsmaßnahmen für Dioxine und Furane basieren entweder auf der Abscheidung der partikelgebundenen PCDD/F, wie z.B. in Gewebe- und Elektrofiltern, auf der Abscheidung gasförmigen und partikelgebundenen PCDD/F, wie z.B. in Wäschern, beim Flugstromverfahren und in Sprühabsorbern (in Verbindung mit Gewebe- oder Elektrofiltern) oder auf der thermischen oder katalytischen Zerstörung der Dioxine und Furane. Mit diesen Verfahren sind PCDD/F-Konzentrationen von < 0,1 ng/Nm<sup>3</sup> erreichbar.

Die Abfälle bzw. Reststoffe aus der Sekundäraluminiumerzeugung sind gemäß Stand der Technik zu behandeln und zu verwerten oder zu entsorgen (Deponie). Das betrifft einerseits Krätze und Krätzestaub aus der Krätzeverarbeitung, Filterstaub und den prozeßbedingten Ofenausbruch sowie andererseits Salzschlacke, die im Hinblick auf Rückgewinnung von Aluminium und Salz sowie durch Verwertung des Tonerderückstandes aufgearbeitet werden kann.



## 7 GLOSSAR UND ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

**Abschmelz-Herdofen:** Herdofen mit zur Wanne hin geneigter Brücke, auf der hoch mit anhaftendem Eisen/Stahl verunreinigter Schrott geschmolzen wird; das flüssige Metall läuft in die Herdwanne, die auf der Rampe verbleibenden Eisen/Stahl Stücke werden herausgezogen.

**Altschrott (old scrap):** Aluminiumschrott aus gebrauchten Produkten.

**Closed-well-Herdofen:** Im Prinzip ein 2-Kammer-Herdofen, bei dem die Schmelzkammer zusammen mit der eigentlichen Heizkammer in einem Ofengehäuse integriert ist.

**Desoxidationsaluminium (deoxidiser):** Legierungen mit hohem Aluminiumanteil (>95 %) zur Bindung von Sauerstoff im flüssigen Stahlbad.

**Drahtbarren:** Gegossene Barren, aus denen durch Warmwalzen Drähte hergestellt werden.

**Drehtrommelofen (rotary furnace):** Schmelzaggregat der Sekundäraluminiumindustrie, in dem Schrott unter Salz geschmolzen wird.

**FeSi:** Ferrosilizium; wird in Schwimm-Sinkanlagen in feinstverteilter Form mit Wasser zu Schwerertrüben dispergiert die zum Abtrennen von Leichtmetallen von schwereren Metallen (Dichten >4 kg/l) dienen.

**Flüssigaluminium (liquid or molten aluminium):** Aluminium und Aluminiumlegierungen, die in flüssiger Form den Gießereien geliefert werden.

**Gattieren (making up a charge):** Zusammenstellung aufbereiteter Schrotte für den Einsatz im Schmelzofen.

**Gußlegierung (casting alloy):** Legierung zur Herstellung von Gußteilen, nicht plastisch verformbar.

**GV:** Glühverlust

**Halbzeug:** Umfaßt in der Al-Industrie die Walzerzeugnisse (Bleche, Bänder), Strangpreß- und Zieherzeugnisse (Rohre, Stangen, Profile, Drähte) sowie Schmiedestücke; zum Halbzeug zählen auch die zum Fließpressen eingesetzten Ronden und Butzen. Da diese Erzeugnisse durch Umformen ("Kneten") hergestellt werden, sind die Einsatzmaterialien nur Knetlegierungen. Aus historischen Gründen zählen Folien nicht zum Halbzeug.

**halogenierte KW (HKW):** Aliphatische oder aromatische Kohlenwasserstoffe, in denen der Wasserstoff teilweise oder vollständig durch ein oder mehrere Halogene ersetzt ist.

**Herdofen:** Wannenartig ausgeführte, ausgemauerte, stationäre Öfen, bei denen die Wärmeübertragung von der Brennerflamme bzw. dem Heißgas überwiegend durch Strahlung erfolgt. Häufig kippbar, um das Entleeren in Gießrinnen zu erleichtern.

**H<sub>u</sub>:** Unterer Heizwert, entspricht der Wärmemenge, die bei der vollständigen Verbrennung einer bestimmten Menge (Nm<sup>3</sup>; kg) eines Brennstoffes frei wird.

**Knetlegierung (wrought alloy):** Legierung zur Herstellung von Preß-, Zieh-, Schmiede- und Walzprodukten, plastisch verformbar.

**Just in time:** Anlieferung von flüssigem Metall genau zum Zeitpunkt, zu dem es die Gießerei zum Vergießen benötigt. Spart der Gießerei einen Schmelzofen und dem Schmelzwerk ein Massel-Lager.

**Koaleszenz:** Zusammenfließen kleiner Tröpfchen.

**Krätze:** Abfall mit hohem Anteil metallischen Aluminium; Krätze bildet sich auf Oberfläche von flüssigem Metall.

**Kreislaufschrott (turn around or inhouse scrap):** Bei der Produktion und Verarbeitung anfallender Schrott, der in eigenen Anlagen wieder eingeschmolzen wird.

**Legierungselemente:** Metalle bzw. Legierungsbestandteile, die elementar oder in Form von Vorlegierungen genau bekannter Zusammensetzung einer Metallschmelze zugegeben werden, um den geforderten Gehalt des entsprechenden Elements auf das geforderte Niveau zu heben; hauptsächlich Si, Cu, Zn, Mg, Ti, Mn, Ni, Li.

**Masseln (ingots):** Legierungen, die als Blöcke vergossen sind.

**NE-Metalle:** Nichteisenmetalle

**Neuschrott (new scrap or production scrap):** Bei der Produktion und Verarbeitung anfallender Schrott.

**NMP:** Nichtmetallische Produkte (non metallic products); Sammelbegriff für die oxidisch-keramischen Beimengen von Al-Schrotten, die nicht verflüchtigt oder reduziert werden und über Krätze bzw. Salzschlacken ausgetragen werden.

**PAK (engl. PAH):** Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (engl. polycyclic aromatic hydrocarbons).

**PCB:** Polychlorierte Biphenyle

**PCDD/F:** Polychlorierte Dibenzo-Dioxine/Furane; Gruppe von 75 bzw. 135 Isomeren.

**Preßbolzen (extrusion billets):** Gegossene Rundbolzen, aus denen Profile z.B. zur Herstellung von Fensterrahmen gefertigt werden.

**Primäraluminium (primary aluminium):** Unmittelbar durch Elektrolyse gewonnenes unlegiertes Aluminium mit einem Reinheitsgrad von üblicherweise 99,7 %.

**PVC:** Polyvinylchlorid

**Raffinieren (refining):** Durch den Zusatz von Raffinationsmitteln bewirkte Korrektur bestimmter Elemente und Entfernung aller gasförmigen und oxidischen Verunreinigungen.

**Recycling:** Rückführung von Abfällen zur Verwertung.

**Refiner:** Produzent von Aluminiumgußlegierungen aus Aluminiumschrott.

**Remelter:** Produzent von Aluminiumknetlegierungen aus Aluminiumschrott.

**Salzschlacke (salt slag):** Beim Schmelzen von Schrott im Drehtrommelofen anfallende Schlacke mit einem Schmelzsalzanteil.

**Side-well-Herdofen:** Herdofen, an dessen Schmelzwanne, durch eine siphonartige Wand abgetrennt, ein Schmelzbecken angebaut ist. In diesem wird mit dem im Herdofen überhitzten Metall weiter, sauberer Schrott tauchgeschmolzen. Das flüssige Metall fließt entweder durch Naturumlauf, oder durch Metallpumpen in das Seitenschmelzbecken (side-well). Je nach Konstruktionsart und Schrottgeometrie kann großstückiger Schrott mit flüssigem Metall überflutet werden oder feinstückiger Schrott in eine Metalltrombe eingezogen werden.

**SL:** Salzschlacke

**TE:** Toxizitätsäquivalentfaktor. Es wird die Toxizität von 2, 3, 7, 8-TCDD = 1 gesetzt, und für jedes der 75 Dioxine und 135 Furan-Isomere die relative Toxizität im Vergleich zum 2, 3, 7, 8-TCDD ermittelt und als Verhältnisfaktor ausgedrückt.

**TOF:** Trommelofenfilterstaub; Sammelbegriff für alle aus Drehtrommelöfen anfallenden Filterstäube.

**UBC:** used beverage can; Sammelbegriff für gebrauchte Aluminiumgetränkedosen.

**VA:** Sammelbegriff für hitze- und säure-beständige Edelstähle.

**Vorschmolz:** Masseln, die aus einer Schrott-Partie erschmolzen wurden, die so inhomogen war, daß Probenahmen zu sehr unterschiedlichen Resultaten führten. Erst über diese Vorschmolzmasseln kann die Zusammensetzung des Schrotts ermittelt werden. Die Vorschmolzmasseln gehen zurück in die Vorstofflagerung und gehen erst dann die Gattierungsrechnung ein. Manchmal wird auch aus lang zu lagernden, aber sehr korrosionsanfälligem Schrott Vorschmolz hergestellt um Metallverluste durch Korrosion zu vermeiden.

**Walzbarren (rolling slabs):** Rechteckige Aluminiumbarren, aus denen durch Walzen und Schneiden Bleche, Bänder und Folien hergestellt werden.

**Warmhalteofen:** Meist als Herdofen ausgeführte Öfen, in denen das flüssige Metall – meist aus mehreren Schmelzöfen – gesammelt wird. Nach Kontrollanalyse wird je nach Bedarf raffiniert, zulegiert, entgast und nach endgültiger Bestätigungsanalyse aus dem Warmhalteofen das Metall entweder zu Masseln vergossen oder flüssig abtransportiert.

## 8 REFERENZ- UND LITERATURANGABEN

- ABERNATHY, R.; MC ELROY, J. & YAP, L. T. (1996): The Performance of Current Oxy-Fuel Combustion Technology for Secondary Aluminium Melting. In: HALE, W. (ed.): Light Metals 1996. The Minerals, Metals & Materials Society 1996, Warrendale, PA: 1,233 - 1,239.
- AHMADZAI, H. (1991): A Comparative View of Control and Regulating Technologies for some Primary Smelting Operations. In: REDDY, R. G.; IMRIE, W. P.; QUENEAU, P. B. (eds.): Residues and Effluents - Processing and Environmental Considerations. The Minerals, Metals & Materials Society 1991, Warrendale, PA: 29 - 45.
- ALCAN (1988): Aluminium: Vom Bauxit zum Aluminium; Recycling: Sekundär-Aluminium heute so gut wie Primär-Aluminium; Aluminium spart Energie. Alcan Deutschland GmbH, Werk Göttingen.
- ALFARO, I.: „Technische und wirtschaftliche Gesichtspunkte bei der Entstehung und Verarbeitung von Aluminiumkrätze“, in Aluminium 62 (4), 259-266, 1986.
- ALKER, K. (1992): Aluminium-Recycling: Analysengerechte Aufbereitung von Shredder-Schrott. Erzmetall 45 (2), 1992: 93-100.
- ARHG (1998): Persönliche Mitteilung. WACHTER: 2.4.1998.
- ARHG (1997): Persönliche Mitteilung. WACHTER, SUPPAN: 29.10.1997.
- ASA (1997): Persönliche Mitteilung. TRNKA: 29.10.1997.
- BAHR, A. et al. (1980): Aufbereitung von Salzschlacken aus Aluminium-Umschmelzwerken. In: Mitteilungen aus dem Inst. für Aufbereitung der Technischen Universität Clausthal 56 (1980), Nr. 10, 657-659.
- BAUMGARTNER, L. (1992): Shredder und Schwimm-Sink-Anlage: Zwei unverzichtbare Komponenten in einem geschlossenem Recyclingkreislauf, Vortrag.
- BECKMANN, M. (1991): Aufarbeitung von Aluminiumsalzschlacken in Nordrheinwestfalen. In: Aluminium 67 (1991), Nr. 6, 586-592.
- BOIN, U. (1997): Persönliche Mitteilung. 24.11.1997.
- BREAULT, R.; TREMBLAY, S. P.; LACHANCE, J. & HUARD, Y. (1995): Market Opportunities for the Alcan Plasma Dross Residues. In: EVANS, J. (ed.): Light Metals 1995. The Minerals, Metals & Materials Society 1995, Warrendale, PA: 823-895.
- BRUCHE, E. & ORBON, H. (1982): RI-Metalle. Recycling Kongress Berlin, 846-852.
- B.U.S. (1989): Begriffserläuterungen zur Salzschlackenaufbereitung.
- CASSELLS, J. M.; RUSIN, P. A.; YOUNG, T. L. & GREENE, M. G. (1993): Removal and Reuse of Aluminum Dross Solid Waste. In: DAS, S. K. (ed.): Light Metals 1993. The Minerals, Metals & Materials Society 1992, Warrendale, PA: 1075-1081.
- COOK, R.; COOPER, P. S. & KEARNS, M. A. (1996): Benefits of Master Alloy Melt Treatments in the Aluminum Foundry Industry. In: HALE, W. (ed.): Light Metals 1996. The Minerals, Metals & Materials Society 1996, Warrendale.
- CREEL, J. M. (1990): Recycling – a Primary/Secondary Producers View. In: BICKERT, C. M. (ed.): Light Metals 1990. The Minerals, Metals & Materials Society 1990, Warrendale, PA: 665 - 667.
- D'ASTOLFO, LR. E. & BRUGGINK, P. R. (1994): Preserving the Value-Chain in Automotive Aluminum Recycling. In: MANNWEILER, U. (ed.): Light Metals 1994. The Minerals, Metals & Materials Society 1994, Warrendale, PA: 1,121-1,127.
- EBERTSCH, G. & MAIR, K. (1997): Emissions- und Reststoffminderung in einer Umschmelzanlage für Sekundäraluminium. Entsorgungspraxis, Nr. 11: 40-43.
- ECOPLAN (1989): Studie zur Abgasreinigung der Emissionen aus Aluminium-Umschmelzwerken und zur Aufbereitung und zum Recycling von alkalischen Filterstäben aus bestehenden Anlagen. Studie im Auftrag von VDS, Düsseldorf.
- EPA (1995): Secondary Aluminum Operations. U.S. Environmental Protection Agency. <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42c12.html>.

- FERGUS, J. W. & HUI, S. (1996): Solid Electrolyte based Sensor for Monitoring the Magnesium Level during Reclamation of Aluminium Scrap. In: HALE, W. (ed.): Light Metals 1996. The Minerals, Metals & Materials Society 1996, Warrendale, PA: 1,061-1,065.
- FOCON: Ecocent – the new environmental and ecological system for the recovery of aluminium through centrifuging of hot dross. Broschüre der FOCON Foundry Consults GmbH.
- GILGEN, P. W. (1989): Aluminium und Ökologie. In: FLEISCHER, G. (Hrsg.): Abfallvermeidung in der Metallindustrie 1. EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH: 167-172.
- GRAEDEL, T. E.; CRUTZEN, P. J. (1994): Chemie der Atmosphäre. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg.
- GRIMM (1998): Persönliche Mitteilung. 9.2.1998.
- GRIPENBERG, H. (1997): Aluminium Dross and Waste Recycling with ALUREC – three years experience from a new salt-free technology. In Third ASM International Conference on the Recycling of Metals, Barcelona, June 11-13: 421-428.
- GRIPENBERG, H.; MÜLLERTHANN, M. & JÄGER, N. (1997): Salt-free Dross Processing with Alurec – two Years Experience. In: HUGLEN, R. (ed.): Light Metals 1997. The Minerals, Metals & Materials Society, Warrendale, PA: 1,171-1,175.
- GUILLERMET, Y. B. R.; LEMAIRE, H.; CAEL, JPH., NIJHOF, G. & ROSSEL, H. (1996): Packaging and Environment in Europe (Eureka Pack-EE) Automated sorting of Aluminium from Domestic Waste. In: HALE, W. (ed.): Light Metals 1996. The Minerals, Metals & Materials Society 1996, Warrendale, PA: 1,041-1,047.
- HÄRDTLE, G. (1989): Vermeidung, Verwertung und Entsorgung von Abfällen aus Alautos. In: FLEISCHER, G. (Hrsg.): Abfallvermeidung in der Metallindustrie 1. EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH.
- HAUTZ, U. (1987): Metall-Recycling aus NE-Krätzen. In: THOMÉ-KOZMIENSKY, K. J. (Hrsg.): Recycling von Metallen. EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH: 41-47.
- JUNKER, SIMMERATH (1997): HTM Hoch Turbulenter Mischer.
- KENNEY, J. C. (1987): Design and Construction of a Small-Scale Used Beverage Can Recycling Unit. In: HUGLEN, R. (ed.): Light Metals 1997. The Minerals, Metals & Materials Society, Warrendale.
- KIRCHNER, G. (1989): Die Bedeutung von Sekundäraluminium für die Aluminiumversorgung. In: FLEISCHER, G. & THOME-KOZMIENSKY, K.J. (Hrsg.): Abfallvermeidung in der Metallindustrie 1. EF-Verlag: 173-179.
- KI.-REICHENBACH (1997): Persönliche Mitteilung. DOBESBERGER; FLANKL; CZEPL: 21.10.1997.
- KOPECKY, A. & SCHAMSCHULA, R. (1977): Mechanische Technologie. 4. Auflage, Springer Verlag, Wien New York: 37.
- KOS, B. (1997): A new Concept for direct Dross Treatment by Centrifuging of hot Dross in Compact Type Ecocent Machines. In: HUGLEN, R. (ed.): Light Metals 1997. The Minerals, Metals & Materials Society, Warrendale, PA: 1,167-1,169.
- KRONE, K.; KRÜGER, J.; ORBON, H.; SOMMER, H. W. & VEST, H. (1990): Ökologische Aspekte der Primär- und Sekundäraluminiumerzeugung in der Bundesrepublik Deutschland. Metall, Vol. 44, Nr. 6: 414-418.
- KRONE, K. (1994): 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.; REISNER, J. & VEST, H. (1989): Aluminium and Tin Beverage cans in the Material Cycle. In: THOMÉ-KOZMIENSKY, K. J. (Hrsg.): Recycling International. Volume 1. EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH.
- KRÜGER, J.; REISNER, J. & VEST, H. (1989): Aluminium- und Weißblechgetränkedosen im Materialkreislauf. In: FLEISCHER, G. & THOME-KOZMIENSKY, K.J. (Hrsg.): Abfallvermeidung in der Metallindustrie 1. EF-Verlag: 189-201.

- LAVOIE, S.; OUBE, C.; OUBE, G. (1991): The Alcan Plasma Treatment Process. Alcan Int. Ltd., Quebec/Canada.
- LAVOIE, S. & LITALIEN, M. (1993): 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.
- LEGGETT, J. & JOHNSON, C. S. (1994): Monolithic Molten Metal Treatment System Liners. In: MANNWEILER, U. (ed.): Light Metals 1994. The Minerals, Metals & Materials Society 1994, Warrendale, PA: 961.
- LEHNERT, W.; DROSSEL, G.; LIESENBERG, O.; HUPPATZ, W.; PAUL, M.; FRIEDRICH, S. & KAMMER, C. (1996): Aluminium Zentrale e.V., Düsseldorf (Hrsg.) Aluminium-Taschenbuch. Band 2 - Umformen von Aluminium Werkstoffen, Gießen von Aluminium-Teilen, Oberflächenbehandlung von Aluminium, Recycling und Ökologie. 15. Auflage: 577-639.
- LEND (1997): Persönliche Mitteilung. BRANDL; HOTTER; KRENN; KRALY; LINSINGER: 30.10.1997.
- MORITZ, D. (1989): Krätzebehandlung in Aluminiumhütten und Halbzeuggießereien. In: Aluminium 65(1), 50-54, 1989.
- MURPHY, J. E. & LUKASKO, J. J. (1993): Vacuum Distillation of Magnesium and Zinc from Aluminum Scrap. In: DAS, S. K. (ed.): Light Metals 1993. The Minerals, Metals & Materials Society 1992, Warrendale, PA: 1061-1065.
- NEFF, D. V. & COCHRAN, B. P. (1993): Chlorination Technology in Aluminum Recycling. In: DAS, S. K. (ed.): Light Metals 1993. The Minerals, Metals & Materials Society 1992, Warrendale, PA: 1053-1061.
- NIJHOF, G. H. (1997): Automatic Sorting of Aluminium Packaging from Domestic Refuse. In: HUGLEN, R. (ed.): Light Metals 1997. The Minerals, Metals & Materials Society, Warrendale, PA: 1,115-1,119.
- ORBON (1997): Persönliche Mitteilung. 10.12.1997.
- PAGET, M. W.; HEFFRON, J. F. & RICHER, P. (1997): The Evolution of Rotary Melting of Recyclage d'Aluminium Quebec Inc,'S: Two Aluminum Dross Processing Plants. In: HUGLEN, R. (ed.): Light Metals 1997. The Minerals, Metals & Materials Society, Warrendale, PA: 1,159-1,161.
- PECHINEY ALUMINIUM ENGINEERING (1986): Original Dross Compression Process – Compal.
- PERRY, O. H. (1993): Decoating of Aluminum Products. In: DAS, S. K. (ed.): Light Metals 1993. The Minerals, Metals & Materials Society 1992, Warrendale, PA: 1039-1045.
- PETERSON, R. D.; WELLS, P. A. & CREEL, J. M. (1995): Reducing Chlorine Usage in Furnace Fluxing: Two Case Studies. In: EVANS, J. (ed.): Light Metals 1995. The Minerals, Metals & Materials Society 1995, Warrendale, PA: 1,197-1,201.
- PIERCE, D. C.; HUBBARD, F. R. & EPSTEIN, S. G. (1995): Are Casthouses Addressing Scrap Charging Safety? In: EVANS, J. (ed.): Light Metals 1995. The Minerals, Metals & Materials Society 1995, Warrendale, PA: 895-897.
- PIETSCH, W. (1993): Briquetting of Aluminum Swarf for Recycling. In: DAS, S. K. (ed.): Light Metals 1993. The Minerals, Metals & Materials Society 1992, Warrendale, PA: 1045-1051.
- PIETSCH, W. (1995): Compaction of Aluminum Chips and Turnings and of other Particulate Aluminum Scrap with Roller Presses for Secondary Aluminum melting without Losses. In: EVANS, J. (ed.): Light Metals 1995. The Minerals, Metals & Materials Society 1995, Warrendale, PA: 799-803.
- RITTER, B.; KELLER, H.-J. (1996): Dioxinminderung bei der Herstellung von Sekundäraluminium. In: VDI Berichte Nr. 1298 Dioxine, VDI Verein deutscher Ingenieure, Düsseldorf: 301-317.
- ROBERTS, R. P. (1991): The Environmental Aspects of the In-Plant Cooling of Aluminum Melting Furnace Drosses. In: REDDY, R. G.; IMRIE, W. P.; QUENEAU, P. B. (eds.): Residues and Effluents - Processing and Environmental Considerations. The Minerals, Metals & Materials Society 1991, Warrendale, PA: 367-377.
- ROSSEL, H.; FILLON, B.; BERTAUD, Y.; BLANC, B.; TEMPLIER, J. C. & FRANQUART, P. (1996): Investigation about thermal Separation of Aluminium Packaging. In: HALE, W. (ed.): Light Metals 1996. The Minerals, Metals & Materials Society 1996, Warrendale, PA: 1,049-1,061.

- ROTH, D. J. & BEEVIS, A. R. (1995): Maximizing the Aluminum Recovered from your Dross and Elimination of any Waste Products in Dross Recycling. In: EVANS, J. (ed.): Light Metals 1995. The Minerals, Metals & Materials Society 1995, Warrendale, PA: 815-819.
- ROTTWINKEL, T. & SANHEN, N. (1990): Aluminium Recycling – A European Perspective. In: BICKERT, C. M. (ed.): Light Metals 1990. The Minerals, Metals & Materials Society 1990, Warrendale, PA: 683-689.
- ROY, R. R. & SAHAI, Y. (1993): Interfacial Tension in Molten Aluminum Alloys and Salt Systems. In: DAS, S. K. (ed.): Light Metals 1993. The Minerals, Metals & Materials Society 1992, Warrendale, PA: 1067-1072.
- SCHIRK, P. G. (1997): Complete Aluminum Dross Processing Technology. In: HUGLEN, R. (ed.): Light Metals 1997. The Minerals, Metals & Materials Society, Warrendale, PA: 1,163-1,167.
- SCHROERS, I. (1994): Automobile Recycling – Today and Tomorrow. In: MANNWEILER, U. (ed.): Light Metals 1994. The Minerals, Metals & Materials Society 1994, Warrendale, PA: 1,129-1,135.
- SPOEL, H. & ZEBEDEE, W. A. (1996): The Hot Aluminum Dross Recycling (HDR) System. In: HALE, W. (ed.): Light Metals 1996. The Minerals, Metals & Materials Society 1996, Warrendale, PA: 1,247-1,251.
- SPOEL, H. (1996): Safety Aspects of the Design and Operation. In: HALE, W. (ed.): Light Metals 1996. The Minerals, Metals & Materials Society 1996, Warrendale, PA: 1,241-1,247.
- TAYLOR, M. B. & GAGNON, D. (1995): The Inert Gas Dross Cooler (IGDC). In: EVANS, J. (ed.): Light Metals 1995. The Minerals, Metals & Materials Society 1995, Warrendale, PA: 819-823.
- TENÓRIO, J. A. S. & DELGADO, F. (1997): Optimization of Salt Composition in the Recycling of Aluminum Cans. In: HUGLEN, R. (ed.): Light Metals 1997. The Minerals, Metals & Materials Society, Warrendale, PA: 1,105-1,107.
- UBA (1994): Reststoffe aus der Aluminium-Verhüttung. Reports, UBA-94-096.
- ULLMANN (1985): Ullmanns Encyclopedia of Industrial Chemistry. Band Vol. A1, 15. Auflage, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim.
- URBACH, R. (1993): Aufarbeitungsmöglichkeiten dioxinhaltiger Filterstäube aus Aluminiumschmelzwerken. Metall. Sept. 1993.
- UV&P (1997): Alu-Recycling Kombi-Projekt – Umweltverträglichkeitserklärung. 11. August 1995.
- VAN DER DONK, H. M.; NIJHOF, G. H. & CASTELIJNS, C. A. M. (1996): Purification of Remelted Aluminium Packagings. In: HALE, W. (ed.): Light Metals 1996. The Minerals, Metals & Materials Society 1996, Warrendale, PA: 1,065 - 1,069.
- VAN LINDEN, J. H. L. (1990): Aluminum Recycling - Everybody's Business Technological Challenges and Opportunities. In: BICKERT, C. M. (ed.): Light Metals 1990. The Minerals, Metals & Materials Society 1990, Warrendale, PA: 675 - 681.
- VAN LINDEN, J. H. L. (1994): Automotive Aluminum Recycling Changes ahead. In: MANNWEILER, U. (ed.): Light Metals 1994. The Minerals, Metals & Materials Society 1994, Warrendale, PA: 1,115-1,121.
- VDS (1994): Persönliche Mitteilung.
- VILAND, J. S. (1990): A Secondary's View of Recycling. In: BICKERT, C. M. (ed.): Light Metals 1990. The Minerals, Metals & Materials Society 1990, Warrendale, PA: 669 - 673.
- WÖHLK, W. et al. (1987): Recycling of Cover Salt in the Secondary Aluminium Industry. Crystallization and precipitation: Proc. Int. Symp., Saskatoon, Saskatchewan, Canada.
- WOJCIECHOWSKI, Jr. J. & KOGAN, M. H. (1995): UBC Flux Optimization at Imsamet, Inc. Aluminum Smelter. In: EVANS, J. (ed.): Light Metals 1995. The Minerals, Metals & Materials Society 1995, Warrendale, PA: 1,297-1,299.
- YAP, L. T. & POURKASHANIAN, M. (1996): Low-NOx Oxy-Fuel Flames for Uniform Heat Transfer. In: HALE, W. (ed.): Light Metals 1996. The Minerals, Metals & Materials Society 1996, Warrendale, PA: 655.

- 
- YE, J. & REVET, A. (1996): Effect of Impurities in Industrial Salts on Aluminum Scrap Melting. In: HALE, W. (ed.): Light Metals 1996. The Minerals, Metals & Materials Society 1996, Warrendale, PA: 1,225-1,231.
- YERUSHALMI, D., (1992): US PATENT Nr. 5102453, 7.4.1992.
- YERUSHALMI, D. (1993): Production of Aluminum Oxide Products (NMP) from Secondary Dross and Saltcake Treatment. In: DAS, S. K. (ed.): Light Metals 1993. The Minerals, Metals & Materials Society 1992, Warrendale, PA: 1083-1084.