

Optimierung der Energienutzung bei der

on and similar papers at core.ac.uk

provided by Publikationsserver

Von der Fakultät für Maschinenwesen der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Rainer Quinkertz

aus

Geldern

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. K. Kugeler
Univ.-Prof. Dr.-Ing. B. Friedrich
Prof. Dr.-Ing. H. Barnert

Tag der mündlichen Prüfung: 13. Mai 2002

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter am Lehrstuhl für Reaktorsicherheit und -technik (LRST) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen im Rahmen der Projektarbeiten für den Sonderforschungsbereich (SFB) 525 „Ressourcenorientierte Gesamtbetrachtung von Stoffströmen metallischer Rohstoffe“. Für die Finanzierung dieses Vorhabens danke ich der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG).

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Kugeler dafür, diese Arbeit an seinem Lehrstuhl anfertigen zu dürfen, für einerseits sehr hilfreiche Anregungen, andererseits aber auch großzügigen Freiraum bei der Gestaltung der Arbeit und schließlich für die Übernahme des Referats.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. B. Friedrich und Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Barnert bedanke ich mich für die freundliche Übernahme des Korreferats und bei Herrn Prof. Dr.-Ing. D. Stolten für den Vorsitz der Promotionskommission.

Dem OBERINGENIEUR des LRST, Herrn Dr.-Ing. Z. Alkan, danke ich besonders für die zahlreichen fruchtbaren Diskussionen, für sein Vertrauen sowie die stete Förderung meiner Arbeit.

Besonders dankbar bin ich meinen ehemaligen Kollegen Dipl.-Ing. S. Briem und Dipl.-Ing. M. Dienhart für die mehrjährige erfolgreiche, zuverlässige und freundschaftliche Zusammenarbeit in dem gemeinsamen Projekt und ihre wertvollen Anregungen zu meiner Dissertation.

Auch danke ich ausdrücklich den Kolleginnen und Kollegen am LRST, den studentischen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern sowie den Examens-, Diplom- und Studienarbeiterinnen und -arbeitern, die mich tatkräftig bei dieser Arbeit unterstützt haben.

Auf Grund der ausgesprochen guten und freundschaftlichen Atmosphäre am LRST, die über allein konstruktive Zusammenarbeit weit hinaus ging, habe ich mich immer sehr wohl gefühlt und bin zusätzlich motiviert worden.

Schließlich bedanke ich mich ganz herzlich bei meinen Eltern für die kontinuierliche und großzügige Förderung meiner Ausbildung und bei meiner Freundin Christel für viel Geduld und Verständnis sowie die uneingeschränkte Unterstützung.

Essen, im Juli 2002

Rainer Quinkertz

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Formelzeichen und Abkürzungen	V
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XIII
1 Einleitung und Zielsetzung	1
2 Übersicht über die Aluminiumproduktion	3
2.1 Statistik der Aluminiumwirtschaft	3
2.2 Prozesskette der Al-Herstellung	6
3 Methodik zur energetischen Bewertung	9
3.1 Datengrundlage	9
3.2 Prozesskettenanalyse	10
3.3 Bewertungsgrößen	11
3.3.1 Wirkungsgrade	11
3.3.2 Primärenergieäquivalent	12
3.3.3 Ausbeuten	13
3.4 Grenzen von Bewertungsgrößen	14
3.4.1 Heizwerte von Energieträgern	14
3.4.2 Differenzierung des Primärenergieaufwands	14
3.5 Energieträger	15
3.6 Vorgehensweise zur endenergetischen Analyse	16
3.6.1 Abschneidekriterien	16
3.6.2 Allokationen	18
3.6.3 Energiebereitstellung	19
3.6.4 Bilanzierungswerkzeug	19
3.6.5 Szenariorechnungen	20
3.6.6 Weitere Randbedingungen	20

4	Energieeinsatz bei der Bauxitgewinnung und beim Transport . 23
4.1	Prozesskette des Bauxitbergbaus 23
4.2	Bauxitlagerstätten 24
4.2.1	Geologie..... 24
4.2.2	Bauxitzusammensetzung 25
4.3	Bauxitförderung 25
4.3.1	Standorte und Reserven 25
4.3.2	Bauxitproduzenten..... 26
4.4	Energieaufwand für den Bauxitbergbau 27
4.5	Transport 29
5	Energiebedarf für die Tonerdeherstellung 31
5.1	Prozesskette der Tonerdeherstellung 31
5.2	Produktion weltweit 32
5.3	Technologien der Tonerdegewinnung 33
5.4	Einflussgrößen auf den Energiebedarf..... 34
5.4.1	Energieverlust durch Strahlung und Konvektion 35
5.4.2	Wärmeverluste durch Stoffaustrag 35
5.4.3	Laugekreislauf 36
5.5	Energiebedarf bestehender Anlagen 37
5.6	Modellierung eines Tonerdewerks..... 38
6	Energieeinsatz bei der primären Aluminiumverhüttung 41
6.1	Prozesskette der primären Verhüttung 42
6.2	Elektrolysetechnik..... 42
6.3	Elektrizitätsbedarf der Elektrolyse..... 44
6.3.1	Theoretischer Energiebedarf..... 44
6.3.2	Stromausbeute 45
6.3.3	Zellspannung 45
6.3.4	Energiebedarf heutiger Elektrolysen 48
6.3.5	Zukünftige Entwicklungen 50
7	Energieaufwendungen für die sekundäre Herstellung 51
7.1	Prozessketten der Sekundärproduktion..... 52
7.2	Aufbereitungsverfahren 52
7.2.1	Schredder 53
7.2.2	Manuelle Demontage..... 54
7.2.3	Schwimm-Sink-Anlage 54

7.2.4	Wirbelstromscheider	54
7.2.5	Sieben	55
7.2.6	Handklauben	56
7.2.7	Pyrolyse	56
7.2.8	Pressen	56
7.3	Schmelztechnologien	56
7.4	Recycling ausgewählter Al-Anwendungen.....	59
7.4.1	Verkehrssektor.....	59
7.4.2	Baubranche	63
7.4.3	Verpackungen	65
8	Optimierungspotenziale für den Energieeinsatz	75
8.1	Möglichkeiten der Energieeinsparung	75
8.2	Prozesstechnikverbesserungen bei der Primäraluminiumherstellung..	78
8.2.1	Energiebereitstellungsnutzungsgrade	79
8.2.2	Energieeinsparpotenziale	80
8.3	Optimierung der Energiebereitstellung.....	81
8.4	Recyclingquoten	83
8.4.1	Erfassung sämtlicher Energieeinträge	83
8.4.2	Ressourcenorientierte Betrachtung.....	86
8.4.3	Szenario zur Steigerung der Recyclingquote.....	87
8.4.4	Systemerweiterung zur gesamten Aluminiumproduktion	90
9	Multikriterielle Optimierungsansätze	93
9.1	Allgemeine Überlegungen	93
9.2	Recyclingszenario für CO ₂ -Emissionen	94
9.3	Ökonomische Gesichtspunkte.....	96
10	Zusammenfassung und Ausblick	99
11	Literatur	103

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

Größe	Bezeichnung	Einheit
A	Ausbeute	-
A_B	effektive Fläche des (Elektrolyt-)Bads	m^2
c_p	spez. Wärmekapazität	$\text{kJ}/(\text{kg K})$
E_0	Elektrochemische Zersetzungsspannung	V
E_{Aufwand}	Energieaufwand (allgemein)	MJ, kWh
E_{Nutz}	Nutzenergie	MJ, kWh
$E_{\text{ex, nutzbar}}$	nutzbare Exergie	MJ, kWh
$E_{\text{ex, zu}}$	zugeführte Exergie	MJ, kWh
E_{spez}	spezifischer Energiebedarf	MJ/kg
EQ	Erfassungsquote	-
g	Bereitstellungsnutzungsgrad (allgemein)	-
g_{Br}	Bereitstellungsnutzungsgrad für Brennstoffe	-
g_{el}	Bereitstellungsnutzungsgrad für elektrische Energie	-
η	Wirkungsgrad (allgemein)	-
ζ	exergetischer Wirkungsgrad	-
H_o	Brennwert (oberer Heizwert)	MJ/kg
H_u	Heizwert (unterer Heizwert)	MJ/kg, kWh/kg
I	Stromstärke	A
k	Wärmedurchgangskoeffizient	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
κ	elektrische Leitfähigkeit des Bads	$\text{W}^{-1}\text{cm}^{-1}$
KEA_{Be}	Kumulierter Energieaufwand der Energiebereitstellung	MJ, MJ/fE
KEA_E	Kumulierter Energieaufwand der Entsorgung	MJ, MJ/fE
KEA_H	Kumulierter Energieaufwand der Herstellung	MJ, MJ/fE
KEA_N	Kumulierter Energieaufwand der Nutzung	MJ, MJ/fE

VI Formelzeichen und Abkürzungen

Größe	Bezeichnung	Einheit
l	Interpolarabstand	m
m_i	Masse des Stoffs i	kg
m_{Br}	Brennstoffmasse	kg
Q_{spez}	spezifische elektrische Ladung	A s/kg
Q_{in}	eintretende Wärme	MJ
Q_{Nutz}	Nutzwärme	MJ, kWh
R	Massenverhältnis NaF/AlF ₃ im Elektrolyten	-
R_A	ohmscher Widerstand der Anode	Ω
R_C	ohmscher Widerstand der Kathode	Ω
R_{ex}	externe Widerstände	Ω
R_{Bad}	ohmscher Widerstand des Bads	Ω
RQ_r	ressourcenorientierte Recyclingquote	
RQ_t	technische Recyclingquote	-
T	Temperatur	K, °C
ΔT	Temperaturdifferenz	K
T_u	Umgebungstemperatur	K, °C
U	Spannung	V
U_{AC}	Anodische Überspannung (konzentrationsabhängig)	V
U_{AR}	Anodische Überspannung (reaktionsabhängig)	V
U_C	Kathodische Überspannung	V
W_{el}	Elektrische Arbeit	MJ, kWh
$W_{el, brutto}$	Elektrische Bruttoarbeit	MJ, kWh
$W_{el, netto}$	Elektrische Nettoarbeit	MJ, kWh
W_t	technische (mechanische) Arbeit	MJ
ξ_i	Massenanteil des Stoffs i	-

Abkürzungen

Abkürzung	Erklärung
$4\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Hydroxysodalith
Al	Aluminium
Al_2O_3	Aluminiumoxid (Tonerde)
$\text{Al}(\text{OH})_3$	Hydragillit
$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Kaolinit
AlF_3	Aluminium(tri)fluorid
ALUREC	<u>A</u> luminium <u>r</u> ecycling
A/U/F	<u>A</u> luminium und <u>U</u> mwelt im <u>F</u> enster- und Fassadenbau
$\alpha\text{-AlO}(\text{OH})$	Diaspor
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Hämatit
$\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$	Goethit
B, Br (Index)	Brennstoff
Be (Index)	Bereitstellung
C	Kohlenstoff
CaO	Kalk
CaF_2	Kalziumfluorid
CF_4	Tetrafluormethan
C_2F_6	Hexafluorethan
CH_4	Methan
CO_2	Kohlendioxid
CWPB	<u>C</u> enter <u>W</u> orked <u>P</u> re- <u>B</u> aked
Desox	<u>D</u> es <u>o</u> xidation
DTO	<u>D</u> reh <u>t</u> rommel <u>o</u> fen
DSD	<u>D</u> uales <u>S</u> ystem <u>D</u> eutschland
DWR	<u>D</u> ruck <u>w</u> asser <u>r</u> eaktor
E (Index)	Entsorgung
EAA	<u>E</u> uropean <u>A</u> luminium <u>A</u> ssociation
elektr.	elektrisch
EQ	<u>E</u> rfassungs <u>q</u> uote
fE	<u>F</u> unktionale <u>E</u> inheit
FfE	<u>F</u> orschungsstelle für <u>E</u> nergiewirtschaft
g	gasförmig
$\gamma\text{-Al}(\text{OH})_3$	Gibbsit

VIII Formelzeichen und Abkürzungen

Abkürzung	Erklärung
γ -AlO(OH)	Böhmit
GaBi	Software für <u>g</u> anzheitliche <u>B</u> ilanzierung von Prozessen und Produkten
gew.	gewichtet
GuD	<u>G</u> as- <u>u</u> nd <u>D</u> ampfturbinenprozess
H (Index)	Herstellung
HSS	<u>H</u> orizontal <u>S</u> tud <u>S</u> öderberg
IEA	<u>I</u> nternational <u>E</u> nergy <u>A</u> gency
IKP	<u>I</u> nstitut für <u>K</u> unststoffkunde und Kunststoffprüfung
inkl.	inklusive
ISO	<u>I</u> nternationale <u>O</u> rganisation für <u>S</u> tandardisierung
KEA	<u>K</u> umulierter <u>E</u> nergie <u>a</u> ufwand
LEAM	<u>L</u> ow <u>E</u> mission <u>A</u> luminium <u>M</u> elting
LiF	Lithiumfluorid
LVP	<u>L</u> eicht <u>v</u> erpackungen
mech.	mechanisch
MgF ₂	Magnesiumfluorid
MKO	<u>M</u> ehr <u>k</u> ammer <u>o</u> fen
MVA	<u>M</u> üll <u>v</u> erbrennungs <u>a</u> nlage
N (Index)	Nutzung
N ₂ O	Lachgas (Stickoxid)
NaOH	Natronlauge
Na ₃ AlF ₆	Kryolith
NE	<u>n</u> icht- <u>e</u> isen
O ₂	Sauerstoff
OECD	Organisation für wirtschaftliche Kooperation und Entwicklung
PE	<u>P</u> rimärenergie
PB	<u>P</u> re- <u>B</u> aked
PFPB	<u>P</u> oint <u>F</u> eeder <u>P</u> re- <u>B</u> aked
PVC	<u>P</u> oly <u>v</u> inyl <u>h</u> lorid
prim. (Index)	Primär
r (Index)	ressourcenorientiert
RQ	<u>R</u> ecycling <u>q</u> uote
sek.	sekundär
SFB	<u>S</u> onder <u>f</u> orschungs <u>b</u> ereich
SiO ₂	Kieselsäure (Siliziumdioxid)
SLKW	<u>S</u> chwer <u>l</u> ast <u>k</u> raft <u>w</u> agen

Abkürzung	Erklärung
spez (Index)	spezifisch
SSA	<u>S</u> chwimm- <u>S</u> ink- <u>A</u> nlage
SWPB	<u>S</u> ide <u>W</u> orked <u>P</u> re- <u>B</u> aked
t (Index)	technisch
VSS	<u>V</u> ertikal <u>S</u> tud <u>S</u> öderberg
WS	<u>W</u> irbelstrom <u>s</u> cheider
ZKO	<u>Z</u> wei <u>k</u> ammer <u>o</u> fen

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1. Entwicklung der primären und sekundären Aluminiumproduktion bzw. des Verbrauchs weltweit und in Deutschland.	3
Abb. 2.2. Bauxit-, Tonerde- und Aluminiumproduktion sowie Aluminiumverbrauch verschiedener Staaten mit zugehörigem Anteil an Weltproduktion bzw. -verbrauch.	4
Abb. 2.3. Zeitliche Entwicklung der Aluminiumnutzung in verschiedenen Sektoren.	5
Abb. 2.4. Prozesskette der Aluminiumherstellung mit Bandbreiten eingesetzter Endenergien	7
Abb. 3.1. Vergleich von KEA_H und KEA_N bei der Primäraluminiumherstellung	18
Abb. 4.1: Prozesskette der Bauxitgewinnung	23
Abb. 4.3: Wichtige Bauxitförderländer 1998.	26
Abb. 4.2. Weltweite Verteilung der sicheren Bauxitreserven	26
Abb. 4.4. Primärenergetischer Vergleich exemplarischer Bauxitminen	28
Abb. 4.5. Spezifischer Primärenergiebedarf verschiedener Transportmittel	30
Abb. 5.1. Aggregierte Prozesskette der Tonerdeproduktion	32
Abb. 5.2. Anteile verschiedener Staaten an der weltweiten Tonerdeherstellung 1998	33
Abb. 5.3. Bandbreiten des Endenergiebedarfs für die Tonerdeherstellung	38
Abb. 5.4. Module des Prozesskettenmodells eines Tonerdewerks	39
Abb. 5.5. Vergleich des Wärmebedarfs für Nieder- und Hochtemperaturaufschluss	40
Abb. 6.1. Führende Staaten der Primäraluminiumherstellung 1998	41
Abb. 6.2. Relevante Module, Stoff- und Energieströme der Aluminiumhütte	42
Abb. 6.3. Anteile verschiedener Zelltypen an der 1998 weltweit installierten Kapazität	44
Abb. 6.4. Stromverbräuche verschiedener Elektrolysesysteme	49
Abb. 6.5. Vergleich verschiedener Elektrolysen hinsichtlich des Anodenverbrauchs bzw. des Einsatzes chemischer Energie	49
Abb. 7.1. Wichtige Staaten der Aluminiumschrottverwertung	51
Abb. 7.2. Allgemeine Prozesskette bzw. Ebenen des Recyclings	52
Abb. 7.3. Wirkungsgrad und Primärenergiebedarf verschiedener Ofentypen	58
Abb. 7.4. Prozessketten der Altauverwertung	60
Abb. 7.5. Primärenergiebedarf, Recyclingquoten und Anteile verschiedener Wege des Automobilrecyclings	63
Abb. 7.6. Prozesskette des Verwertungssystems für Fenster und Fassaden	64
Abb. 7.7. Prozesskette der Verwertung von Aluminium-Menüschalen	66
Abb. 7.8. Prozesskette der Rezyklierung von Schraubverschlüssen	68
Abb. 7.9. Prozessketten des Recyclings von Aluminium in Leichtverpackungen (LVP)	69
Abb. 7.10. Prozesskette der Gewinnung von LVP-Aluminium durch vollautomatische Sortierung.	72

Abb. 7.11. Primärenergiebedarf und technische Recyclingquote verschiedener Recyclingwege für Aluminium in Verpackungen	72
Abb. 8.1. Zeitliche Entwicklung des spezifischen Strombedarfs von PFPB-Elektrolysen . . .	75
Abb. 8.2. Entwicklung des Primärenergiebedarfs und des Kraftwerkswirkungsgrads verschiedener Kraftwerkssysteme	76
Abb. 8.3. Qualitative Darstellung des Primärenergiebedarfs der gesamten Al-Herstellung in Abhängigkeit vom Recyclinganteil.	78
Abb. 8.4. Primärenergetische Einsparpotenziale der Primäraluminiumherstellung	81
Abb. 8.5. Spezifischer Primärenergiebedarf der Aluminiumelektrolyse für verschiedene Szenarien der Stromversorgung.	83
Abb. 8.6. Technische Recyclingquote verschiedener Recyclingwege und deren Primärenergiebedarf in Abhängigkeit von der energetischen Bewertung	85
Abb. 8.7. Prozessketten des Al-Recyclings aus dem Restmüll	86
Abb. 8.8. Prozesskette der MVA-Schlackenaufbereitung mit zusätzlichen Schritten zur NE-Metall-Gewinnung.	88
Abb. 8.9. Ressourcenorientierte Recyclingquote der Recyclingketten des Szenarios und deren Primärenergiebedarf in Abhängigkeit von der energetischen Bewertung	90
Abb. 8.10. Primärenergiebedarf der Aluminiumherstellung in Abhängigkeit vom Recyclinganteil und von der energetischen Bewertung.	91
Abb. 9.1. Allgemeiner Weg zu multikriteriellen Optimierungen	93
Abb. 9.2. Spezifische CO ₂ -Äquivalente der Primäraluminiumherstellung	95
Abb. 9.3. Spezifische CO ₂ -äquivalente Emissionen der Aluminiumherstellung in Abhängigkeit von dem Recyclinganteil und der Methodik der energetischen Bewertung.	95

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Einflussgrößen auf Endenergieeinsätze in Prozessen der Aluminiumherstellung .	8
Tabelle 4.1. Merkmale exemplarischer Bauxitminen	27
Tabelle 5.1. Durchschnittliche Wärmeverluste bei der Tonerdeherstellung	35
Tabelle 6.1. Zusammensetzung der Zellspannung.	46
Tabelle 8.1. Bereitstellungsnutzungsgrade ausgewählter Brennstoffe in Deutschland	79
Tabelle 8.2. g_{el} in für die Tonerdeherstellung wichtigen Ländern.	79
Tabelle 8.3. Anteile und g_{el} für verschiedene Primärenergieträger der Stromversorgung von Primäraluminiumhütten weltweit	80
Tabelle 8.4. Kraftwerkswirkungsgrade der Stromversorgung mit bester verfügbarer Technik	82
Tabelle 8.5. Zusammensetzung verschiedener Aluminiumfraktionen und Heizwerte	84
Tabelle 9.1. Treibhauspotenzial verschiedener Gase für einen Zeithorizont von 100 Jahren bezogen auf CO ₂	94

1 Einleitung und Zielsetzung

Mit der Bereitstellung und Nutzung von Gebrauchsgütern sind grundsätzlich direkt und indirekt vielfältige ökologische, ökonomische und soziale Wirkungen verbunden. In den letzten Jahren haben Bemühungen zur Umsetzung des Konzepts der nachhaltigen Entwicklung, das erstmals im Brundtlandt-Bericht [21] formuliert worden und seit der Konferenz der Vereinten Nationen über Umwelt und Entwicklung 1992 in Rio allgemein als wichtigstes Leitbild der Entwicklungsdiskussion anerkannt ist, stetig zugenommen. Dabei wird unter Nachhaltigkeit eine Ressourcenutzung verstanden, die nicht die Bedürfnisse zukünftiger Generationen einschränkt. Die Bedeutung des Begriffs Ressource geht dabei weit über natürliche Rohstoffe im engeren Sinn hinaus und umfasst neben sekundären Rohstoffen auch besonders die Aufnahmekapazität der Umwelt (Boden, Wasser, Luft) als Senke für Reststoffe bzw. Emissionen sowie Kapital und Arbeitskraft als (sozio)ökonomische Ressourcen.

Besonders hoch ist der Ressourcenbedarf bei der Herstellung von Rohstoffen, die nicht gediegen in der Natur vorkommen. Dazu gehören traditionell (unedle) Metalle, denen auf Grund ihrer Eigenschaft als Massengüter besondere Bedeutung zukommt.

Für die Identifikation von ressourcenschonenden Optionen ist eine multikriterielle Bewertung unerlässlich, da sich für verschiedene Zielgrößen aus den vielfältigen Wechselwirkungen oft gegenläufige Effekte ergeben. So steht der Verringerung von Umweltschädigungen und damit dem Schutz ökologischer Ressourcen meist ein großer finanzieller Aufwand, also eine Belastung ökonomischer Ressourcen, gegenüber.

Mit dem Ziel, Handlungsoptionen für eine ressourcenschonende Bereitstellung von metallischen Werkstoffen im Spannungsfeld technischer Entwicklungen sowie ökonomischer, ökologischer und gesellschaftlicher Zielsetzungen aufzuzeigen, wurde der Sonderforschungsbereich (SFB) 525 "Ressourcenorientierte Gesamtbetrachtung von Stoffströmen metallischer Rohstoffe" an der RWTH Aachen eingerichtet. In der ersten Projektphase wurden die Stoffströme zur Aluminiumproduktion analysiert, indem zunächst für sämtliche relevanten Prozesse detaillierte Bilanzen erstellt wurden. Auf dieser Grundlage werden in der Gesamtbetrachtung Wirkungszusammenhänge fachübergreifend dargestellt und verschiedene Maßnahmen des Stoffstrommanagements hinsichtlich Synergie- und gegenläufiger Effekte der Ressourcennutzung untersucht. Insgesamt sollen die Ergebnisse der Untersuchungen einen wichtigen Beitrag zur nachhaltigen Ent-

wicklung der Metallindustrie leisten und richten sich neben der Industrie an Politik und Wissenschaft.

Für die Aluminiumwirtschaft ist der Energieeinsatz zur Beurteilung von Nachhaltigkeit von großer Bedeutung. Insbesondere der hohe Strombedarf der Elektrolyse zur primären Aluminiumherstellung ist mit großem Energieressourcenaufwand sowie zumeist mit hohen energiebedingten Emissionen verbunden. Weiterhin resultieren aus der Energiebereitstellung große finanzielle Belastungen. So betragen die Kosten für elektrische Energie für die Elektrolyse mehr als ein Viertel des Gesamtpreises für Primäraluminium [29]. Aus diesem Grund entscheidet in den meisten Fällen eine gesicherte und preiswerte Stromversorgung über den Standort von Primäraluminiumhütten.

Die energiebedingte Ressourceninanspruchnahme der Aluminiumwirtschaft wird zum einen bedeutend von der Art und Effizienz der Energiebereitstellung beeinflusst, zum anderen aber auch von der Energienutzung in der Prozesskette der Metallherstellung. Da sich beide Effekte überlagern, kann nur die getrennte Analyse von Energiebereitstellung und -nutzung zielführende Aussagen über die jeweiligen Optimierungspotenziale liefern.

Ziel dieser Arbeit ist es, durch die integrative Betrachtung gesamter Prozessketten Wege zu einer rationellen Energieanwendung als wesentlicher Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung in der Aluminiumindustrie aufzuzeigen. Nach der Betrachtung wichtiger statistischer Kenngrößen der Aluminiumwirtschaft zur Identifikation bedeutender Staaten, wichtiger Anwendungen und Prozesse wird die methodische Vorgehensweise zur energetischen Analyse erläutert. Neben der Eingrenzung des Betrachtungsraums sind hierbei die Bilanzierungsmethodik sowie die Auswahl und Definition von geeigneten Bewertungsgrößen von Bedeutung. Daran schließen sich jeweils detaillierte Untersuchungen der Prozesskettenabschnitte der Bauxitgewinnung, Tonerdeherstellung, primären Verhüttung und des Recyclings an. Dabei richtet sich die Detailtiefe der Betrachtung jeweils nach der Bedeutung eines Verfahrens für den Gesamtenergiebedarf der Aluminiumproduktion. Aus den durchgeführten Analysen werden Optimierungspotenziale für den Energieeinsatz sowohl in der primären als auch der sekundären Aluminiumherstellung abgeleitet. Weiterhin werden Potenziale der Energieeinsparung durch geänderte Energiebereitstellungssysteme aufgezeigt. Für die Rückgewinnung von Aluminium aus Leichtverpackungen wird beispielhaft eine multikriterielle Betrachtung von Auswirkungen gesteigerter Recyclingquoten durchgeführt. Schließlich zeigt die zusammenfassende Darstellung mögliche Ansätze für weiterführende Betrachtungen. Insbesondere bietet hierzu die Bilanzierung der Nutzungsphase die Möglichkeit, alternative Werkstoffe hinsichtlich ihrer Ressourcenintensität zu vergleichen.

2 Übersicht über die Aluminiumproduktion

2.1 Statistik der Aluminiumwirtschaft

Aluminium ist das nach Stahl am häufigsten verwendete Metall. Seit der Entwicklung des Hall-Héroult-Verfahrens im Jahr 1886, mit dem die großtechnische Erzeugung von primärem Aluminium ermöglicht wurde, ist die Produktion bis heute exponentiell angestiegen, und die Entwicklung während der letzten Jahre lässt auch auf zukünftiges Wachstum schließen. In Abb. 2.1 ist die Entwicklung der primären und der sekundären Produktion bzw. des Verbrauchs weltweit und in Deutschland dargestellt.

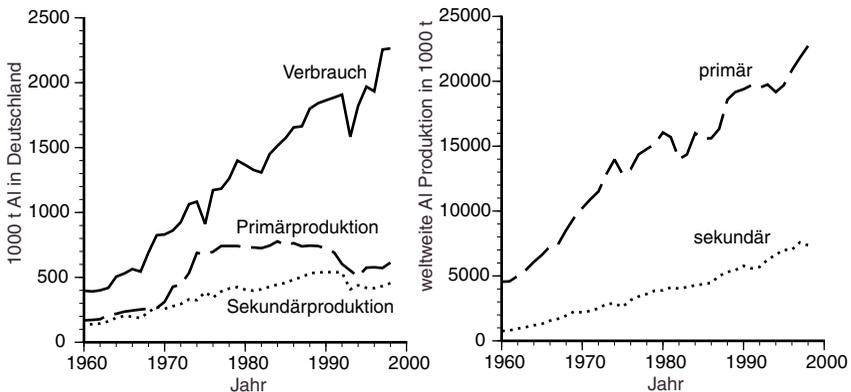


Abb. 2.1. Entwicklung der primären und sekundären Aluminiumproduktion bzw. des Verbrauchs weltweit und in Deutschland [37-40]

Dabei lässt sich der Verbrauch weltweit etwa als Summe von primärer und sekundärer Produktion ermitteln, während in Deutschland zusätzlich Im- und Exporte von Primär- und Sekundärmetall berücksichtigt werden müssen. In den zu Grunde liegenden Statistiken beinhaltet der Verbrauch auch Exporte von Halbzeugen. In den letzten 40 Jahren hat sich der Bedarf mehr als verfünffacht und der Anteil von rezykliertem Metall an der Gesamtproduktion weltweit auf etwa 25%

erhöht. In Deutschland werden etwa 10% der Weltproduktion verbraucht, der Recyclinganteil der inländischen Erzeugung liegt derzeit bei 43%. Allerdings muss mittlerweile mehr als die Hälfte des Bedarfs durch Importe gedeckt werden, da die Primärproduktion in Deutschland seit 1990 aufgrund von Standortschließungen aus Wirtschaftlichkeitsgründen rückläufig ist. Zukünftig ist mit einem weiteren Wachstum des Aluminiumbedarfs zu rechnen, da sich insbesondere im Verkehrssektor zunehmend eine Stahlsubstitution vollzieht und auch im Baubereich die Zahl der Aluminiumanwendungen deutlich steigt. Auch der Anteil der sekundären Produktion wird weiter wachsen, da zunehmend Metall aus langlebigen Produkten aus den Bereichen Bau und Verkehr als Sekundärrohstoff zur Verfügung steht.

Der wichtigste Rohstoff für die primäre Aluminiumgewinnung ist Bauxit, aus dem zunächst Tonerde extrahiert werden muss, die schließlich in der Elektrolyse zu elementarem Aluminium reduziert wird. Abb. 2.2 zeigt Produktions- bzw. Verbrauchszahlen von Bauxit, Tonerde und Aluminium der für die Aluminiumwirtschaft wichtigsten Staaten sowie die jeweiligen Anteile an der Weltproduktion bzw. am Weltverbrauch.

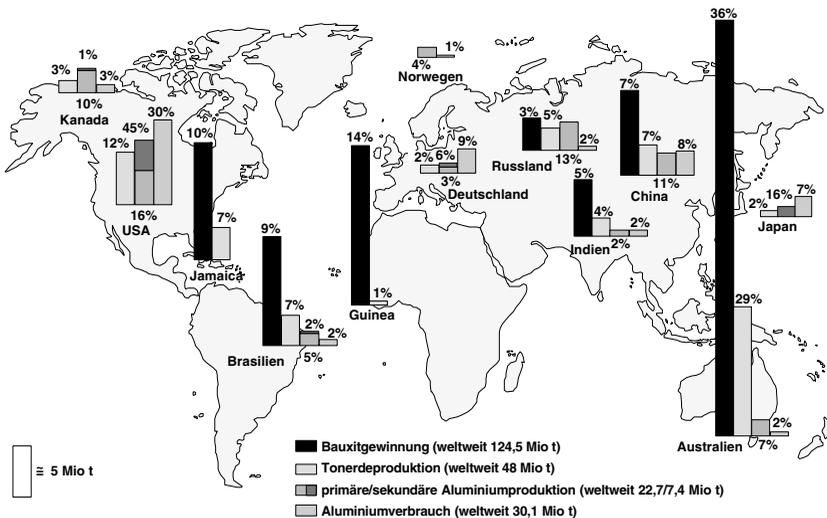


Abb. 2.2. Bauxit-, Tonerde- und Aluminiumproduktion sowie Aluminiumverbrauch verschiedener Staaten mit zugehörigem Anteil an Weltproduktion bzw. -verbrauch [40]

Auffällig ist zunächst, dass durch die 12 abgebildeten Staaten bei allen Produktionsstufen mindestens 2/3 der weltweiten Produktion bzw. Nachfrage abgedeckt werden, d. h. für eine weltweit repräsentative Darstellung der Aluminiumwirt-

schaft sind nur wenige Staaten zu betrachten. Weiterhin ist festzustellen, dass Länder mit der größten Bauxitförderung wie Australien, Guinea, Jamaica und Brasilien selbst nur in sehr geringen Mengen Aluminium verbrauchen und im Falle von Jamaika auch kein Metall erzeugen. Guinea produziert sogar kaum Tonerde, sondern exportiert fast den gesamten Bauxit. Umgekehrt verfügen die größten Nutzungsländer wie USA, Deutschland oder Japan über keine Bauxitvorkommen und produzieren mit Ausnahme der USA auch kaum nennenswerte Mengen Tonerde. Daraus folgt, dass primäre Aluminiumstoffströme global insbesondere von einem sehr hohen Transportaufkommen geprägt sind. Andererseits fallen Sekundärrohstoffe natürlich dort an, wo der Verbrauch hoch ist, so dass etwa auf die USA allein 40% der weltweiten Sekundärproduktion entfallen.

Aufgrund seiner vielfältigen werkstofftechnisch günstigen Eigenschaften wird Aluminium in verschiedenen Sektoren eingesetzt. Die Einsatzbereiche in Deutschland sind in Abb. 2.3 für die Jahre 1960, 1980 und 1998 dargestellt.

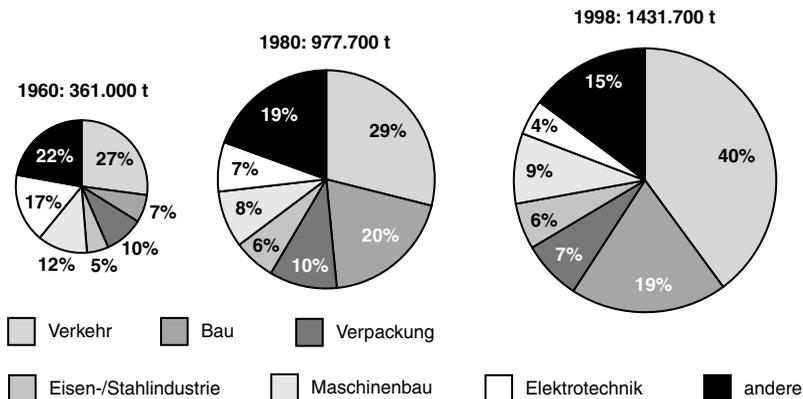


Abb. 2.3: Zeitliche Entwicklung der Aluminiumnutzung in verschiedenen Sektoren [40]

So wird zum Beispiel in der Verkehrsbranche zunehmend Aluminium genutzt, da das Leichtmetall bei guten Festigkeitswerten eine geringe Dichte aufweist, die mit $2,7 \text{ g/cm}^3$ etwa ein Drittel der Dichte von Stahl beträgt [20]. Besonders für Bauteile, die hohen Beschleunigungen ausgesetzt sind, wie Kolben im Motor, ist jedes eingesparte Gramm Masse von Vorteil. Zusammen mit dem Bereich Maschinenbau wird hier mittlerweile etwa die Hälfte des in Deutschland genutzten Aluminiums eingesetzt. Auf Grund der weitgehend chemischen Neutralität wird das Leichtmetall zunehmend in der Verpackungsindustrie eingesetzt. Insbesondere wird damit die hygienische Verpackung von Lebensmitteln oder Medikamenten gewährleistet. Außerdem schützt es mit seiner hohen Barrierewirkung einerseits das Füllgut vor Umwelteinflüssen und verhindert andererseits ein Austreten

von flüchtigen Bestandteilen. Ein weiterer Vorteil ist, dass sich reines oder niedrig legiertes Aluminium trotz seiner Formbeständigkeit gut kalt- und warmumformen läßt. Der Anteil des für Verpackungen genutzten Aluminiums ist zwar in den letzten 20 Jahren geringfügig gesunken, durch die große Zunahme des Gesamtverbrauchs ist der Bedarf in diesem Sektor absolut aber ebenfalls gestiegen. Die elektrische Leitfähigkeit und die hohe Reflexion von Wärmestrahlung werden in der Bauindustrie genutzt. Aluminiumdächer und Wandbekleidungen dienen nicht nur in Flughäfen und Industriehallen als Schutz vor Strahlungswärme, sondern können bei sachgerechter Verbindung und Erdung auch als Blitzableiter wirken. Daher wächst auch weiterhin die absolute Zahl der Aluminiumanwendungen im Bausektor. Dagegen verliert der Bereich der elektrotechnischen Anwendungen anteilig zunehmend an Bedeutung. Während der Gesamtbedarf deutlich zugenommen hat, sind die eingesetzten Aluminiummengen in diesem Bereich seit 40 Jahren ungefähr konstant geblieben. Bei fast allen Anwendungen ist die Korrosionsbeständigkeit von Aluminium ein entscheidender Vorteil. Außerdem ist Aluminium im Gegensatz zu Kunststoffen oder Papier beliebig oft rezyklierbar. Wie Stahl kann es ohne Qualitätsverlust wieder eingeschmolzen werden. Einschränkungen ergeben sich dabei allerdings durch unterschiedliche Legierungsqualitäten (s. Kapitel 3.6.6.1). Der Sektor Eisen-/Stahlindustrie nutzt Aluminium als Reduktionsmittel. Somit liegt das Aluminium hier nach der Nutzung in oxidischer Form vor und ist für den Metallkreislauf zunächst verloren.

2.2 Prozesskette der Al-Herstellung

In Abb. 2.4 sind die Aluminiumprozesskette und die Bandbreiten der spezifischen Endenergieeinsätze in den in dieser Arbeit berücksichtigten Prozessschritten dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind hier die weniger energieaufwendigen Prozessschritte wie z. B. sämtliche Transportprozesse, die grundsätzlich die einzelnen Teilprozesse verbinden, sowie einige vor- und nachgeschaltete Prozesse wie AlF_3 -Herstellung oder Rotschlamm-Deponierung nicht dargestellt. Die Prozessschritte der Endfertigung und Nutzung bleiben in dieser Arbeit unberücksichtigt, da die Vielzahl der Aluminiumprodukte bzw. deren Nutzung zu einer unüberschaubaren Menge von Modulen führt, die es unmöglich macht flächendeckend Daten zu erheben und so verlässliche Aussagen zu treffen. Die Erfassung ist oft geprägt von politischen Entscheidungen (z. B. DSD), deren Berücksichtigung ebenfalls den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde. Rein technisch handelt es sich bei Erfassungsprozessen um Transporte, die berücksichtigt werden.

Grundsätzlich wird in allen Prozessen sowohl elektrische Energie als auch thermische Energie benötigt und entsprechend separat erfasst. Bei den meisten Bauxitgruben wird aufgrund ihrer dezentralen Lage elektrische Energie durch Dieselaggregate oder eigene fossil befeuerte Kraftwerke erzeugt. Daher wird für die Modulgruppe Bauxitgewinnung lediglich der Brennstoffeinsatz erfasst. Über den jeweiligen Heizwert lässt sich der Energieaufwand ermitteln. Primäraluminiumhütten sind

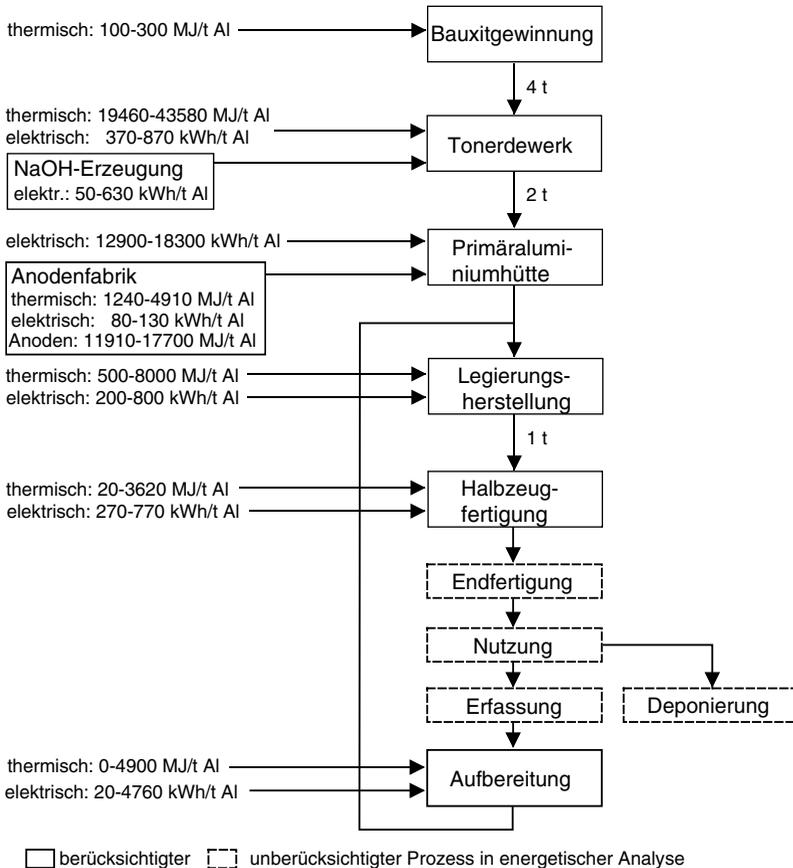


Abb. 2.4. Prozesskette der Aluminiumherstellung mit Bandbreiten eingesetzter Endenergien

durch den sehr großen Strombedarf für die Elektrolyse gekennzeichnet. Bei der getrennt abgebildeten Anodenfertigung ist neben Strom und Brennstoffen insbesondere der stoffgebundene Energieinhalt der Kohlenstoffanoden zu berücksichtigen, der einen wichtigen Energieeintrag für die Aluminiumhütte darstellt.

Die Energieeinsätze weisen meist erhebliche Bandbreiten in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern auf (z. B. variiert der Strombedarf der Elektrolyse in Abhängigkeit von der eingesetzten Technik zwischen 12,9 und 18,3 MWh/t Al). Wichtige Einflussgrößen für die einzelnen Teilprozesse in Abb. 2.4 sind in Tabelle 2.1 dargestellt und werden in den nachfolgenden Kapiteln genauer untersucht. Beim Transport bestimmt in erster Linie die Entfernung die Höhe des Kraftstoff-

Tabelle 2.1: Einflussgrößen auf Endenergieeinsätze in Prozessen der Aluminiumherstellung

Prozessschritt	Einflussgrößen
Bauxitgewinnung	Abraum-Wertmineral-Verhältnis gewinnbarer Aluminiumgehalt im Bauxit Abbauplanung, Logistik
Tonerdeherstellung	Mineralogie des Bauxits verfügbare Al_2O_3 -Gehalt im Bauxit Kieselsäure-Gehalt im Bauxit Wärmetauscherauslegung Prozesstechnik und -steuerung
Primäre Verhüttung	Elektrolysetechnik Prozesssteuerung
Legierungsherstellung	Vorstoffqualität Ofentechnik Logistik, Ofenfahrweise
Aufbereitung	Schrottqualität Aufbereitungsquote Aufschlussgrad

verbrauchs. Für den Energieaufwand des Bauxitbergbaus ist insbesondere der Gehalt an verfügbarem Al_2O_3 entscheidend. Auch bei der Tonerdeherstellung ist vorrangig die Bauxitzusammensetzung für die Höhe des Energiebedarfs entscheidend. Dagegen bestimmen bei der Aluminiumelektrolyse aufgrund der hohen Reinheit des Al_2O_3 als Einsatzstoff allein Anlagentechnik und Prozesssteuerung den Energieeinsatz. Bei der Aufbereitung sekundärer Vorstoffe und dem Schmelzen von Aluminium, das in der industriellen Praxis dann meist die primäre und sekundäre Produktion integrativ verbindet, ist neben technischen Parametern wiederum die Qualität der Einsatzstoffe von besonderer Bedeutung.

3 Methodik zur energetischen Bewertung

Um aussagekräftige Ergebnisse aus den Prozessanalysen zur Aluminiumherstellung ableiten zu können, ist eine konsistente Methodik der Bilanzierung bzw. Datenerfassung und der Bewertung der gewonnenen Größen von fundamentaler Bedeutung. Dazu sind im Folgenden die den Berechnungen dieser Arbeit zu Grunde liegende Datenbasis und die Vorgehensweise zur Ermittlung der Daten erläutert. Weiterhin erfolgt eine Aufstellung und Definition wichtiger Bewertungsgrößen für die vorgesehenen Analysen.

3.1 Datengrundlage

Grundsätzlich sind sämtliche Basisdaten für die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit Bestandteil der Datenbank des Sonderforschungsbereichs (SFB) 525 „Ressourcenorientierte Gesamtbetrachtung von Stoffströmen metallischer Rohstoffe“. Darin sind für die verschiedenen Schritte der Haupt- und vieler Nebenprozessketten der Aluminiumherstellung stoffliche und energetische In- und Outputs, Kosten, Flächeninanspruchnahme und Arbeitsaufwand angegeben.

Zur Datenerhebung werden zum einen Literaturquellen wie Statistiken und Veröffentlichungen herangezogen. Zum anderen stammen viele Daten direkt von Anlagenherstellern und -betreibern. Schließlich werden durch Rechnungen auf Basis der Massen-, Energie- und Stoffhaltungsgleichungen und chemische Reaktionsgleichungen veröffentlichte Daten überprüft bzw. ergänzt.

Statistische Daten der Aluminiumwirtschaft ermöglichen für die verschiedenen Produktionsstufen die Identifikation relevanter Staaten, die detaillierter zu betrachten sind. Weiterhin zeigen Statistiken Verflechtungen zwischen produzierenden bzw. exportierenden und konsumierenden bzw. importierenden Ländern auf und schaffen damit die Basis für die Erstellung realer Prozessketten wie z.B. für in Deutschland verfügbares Primäraluminium. Die entsprechende Prozesskette weist auf Grund vieler verschiedener Vorstofflieferanten eine weitverzweigte Struktur auf, die aber mit Hilfe von statistischen Informationen abgebildet werden kann.

Aus Publikationen, Anlageninformationen und eigenen Berechnungen gewonnene technikspezifische Daten beschreiben Teilprozesse auf einem niedrigeren Aggregationsniveau. Somit können einzelne Anlagen bzw. Verfahren bilanziert werden, die wiederum zu Prozessketten verschaltet werden können. Die detail-

liertere Betrachtung macht auch die Einführung von Parametern möglich, mit deren Hilfe z. B. verschiedene Technikniveaus abgebildet und Szenariorechnungen durchgeführt werden können.

Prinzipiell unterscheiden sich die primäre und die sekundäre Aluminiumproduktion bezüglich der Datenverfügbarkeit. Während bei der Bauxit-, Tonerde und Primäraluminiumgewinnung weltweit nur jeweils weniger als 200 Standorte mit großen Produktionskapazitäten identifiziert werden können, verteilt sich die Rückgewinnung von Aluminium aus den verschiedenen Anwendungen auf Grund der erheblichen Streuung des Metalls während seiner Nutzung auf viele kleinere Betriebe. Somit sind fast alle Standorte aus der Primäraluminiumprozesskette gut dokumentiert, so dass hier sowohl globale als auch standortbezogene Analysen möglich sind. Dagegen folgt schon aus der Vielzahl verschiedener Aluminiumanwendungen die Komplexität der Aufbereitungsverfahren, die eine analoge weltweite Erfassung der Sekundäraluminiumindustrie praktisch unmöglich macht. Aus diesem Grund konzentrieren sich die Untersuchungen der Recyclingaktivitäten auf Deutschland. Zum einen ist die Datenverfügbarkeit gut und zum anderen die Erfassung zahlreicher verschiedener Prozesstechniken gegeben. Die Übertragung der Bilanzierungsergebnisse auf andere Staaten ist zwar im Detail nicht möglich, in jedem Fall können auf dieser Grundlage aber Abschätzungen im Vergleich mit der Primärproduktion durchgeführt und Optimierungspotenziale aufgezeigt werden.

3.2 Prozesskettenanalyse

Die Aluminiumherstellung weist z. T. sehr komplexe Strukturen auf. Die Prozesskettenanalyse stellt ein Instrument zur Bilanzierung derartig umfangreicher Verfahrenskombinationen dar. Dazu wird der zu untersuchende Vorgang in einzelne kleinere Abschnitte (Prozessschritte) zerlegt, die dann getrennt bilanziert werden können. Die Aluminiumherstellung wird dazu zunächst als Verkettung der Prozesse Bauxitgewinnung, Tonerdeherstellung, primäre Verhüttung, Legierungsherstellung, Halbzeugfertigung und Aufbereitung dargestellt (s. Abb. 2.4). Diese einzelnen Prozessstufen werden ggf. dann ihrerseits weiter disaggregiert (s. Kapitel 4, 5, 6 und 7) und alle resultierenden Module einzeln bilanziert. Aus der beschriebenen Vorgehensweise folgt, dass der erforderliche Arbeitsaufwand mit zunehmender Detailltiefe deutlich ansteigt. Daher muss immer eine Abstimmung zwischen dem angestrebten Genauigkeitsgrad und einem angemessenen Aufwand für die Bearbeitung gefunden werden.

Aus einer modularen Bibliothek von Prozessbausteinen können dann alternative Prozessketten generiert werden. Durch Summenbildung jeweils gleicher Moduleingänge bzw. -ausgänge werden entsprechende Größen für Prozessketten berechnet und somit der Vergleich verschiedener Verfahrenswege ermöglicht. Angewendet auf die Aluminiumherstellung kann z. B. durch den Austausch des Elektrolysemoduls der Einfluss verschiedener Techniken auf den Energieauf-

wand der gesamten Prozesskette untersucht werden.

3.3 Bewertungsgrößen

Allgemein werden Bewertungsgrößen verwendet, um verschiedene Produkte oder Prozesse zu charakterisieren und miteinander zu vergleichen. Zur Bewertung der Energienutzung bei der Aluminiumherstellung können damit verschiedene Merkmale alternativer Prozesse bzw. Prozessketten quantifiziert und schließlich optimale Varianten identifiziert werden. Weiterhin dienen Bewertungsgrößen auch der Festlegung von Bilanzgrenzen für die Prozesskettenanalyse, da sie zur Charakterisierung der Relevanz von vor- bzw. nachgelagerten Ketten wesentlich beitragen können. Im Folgenden sind die für die energetische Bewertung von Prozessen und damit für die vorliegende Arbeit relevanten Bewertungsgrößen definiert und erläutert.

3.3.1 Wirkungsgrade

Prinzipiell beschreiben Wirkungsgrade das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand. Der energetische Wirkungsgrad η beschreibt das Verhältnis aus der tatsächlich in einem Prozess genutzten Energie E_{Nutz} und dem zugeführten energetischen Aufwand $E_{Aufwand}$. Wirkungsgrade weisen damit stets Größen zwischen Null und Eins auf.

$$\eta = \frac{E_{Nutz}}{E_{Aufwand}} \quad (3.1)$$

Darin kann sowohl die Nutzenergie als auch der Energieaufwand in verschiedenen Formen wie kinetischer, potenzieller, chemisch gebundener, elektrischer oder thermischer Energie vorliegen. Bei den Verfahren der Aluminiumprozesskette dominieren Elektrizität und Wärme bzw. in Brennstoffen gebundene Energie als eingesetzte Energieträger. Die für den Ablauf der Prozesse tatsächlich benötigten Energieformen sind in erster Linie Nutzelektrizität für die elektrolytische Zersetzung und sensible sowie latente Wärme für Temperaturerhöhungen bzw. Phasenänderungen. Weiterhin sind Formänderungs- oder Kompressionsverfahren von mechanischem Energiebedarf gekennzeichnet. Die Effizienz der Energieumwandlung in einer Anlage kann jeweils durch den Wirkungsgrad nach Gleichung (3.1) ausgedrückt werden.

Neben der gewünschten Nutzenergie wird bei jeder Energieumwandlung als Nebenprodukt Wärme freigesetzt, die ggf. in anderen Prozessen genutzt werden kann. Die thermodynamische Qualität der Abwärme kann über die Exergie der Wärme bzw. der Exergieerhalt eines Prozesses über den exergetischen Wirkungsgrad ζ als Verhältnis von erhaltener Exergie $E_{ex, nutzbar}$ zu zugeführter Exergie $E_{ex, zu}$ nach Gleichung (3.2) ermittelt werden. Dabei bezeichnet die Größe Exer-

gie den Teil der Energie, der in jede beliebige Energieform umgewandelt werden kann.

$$\zeta = \frac{E_{\text{ex, nutzbar}}}{E_{\text{ex, zu}}} \quad (3.2)$$

3.3.2 Primärenergieäquivalent

Wie bereits mehrfach deutlich geworden ist, werden in den meisten Prozessen unterschiedliche Energieformen eingesetzt, die bezüglich ihrer thermodynamischen Qualitäten nicht gleich bewertet werden können. So kann elektrische Energie zu 100% in jede andere Energieform umgewandelt werden, während bei der Verbrennung von Erdgas, Öl oder Diesel nur der exergetische Teil der freiwerdenden Wärme beliebig umgewandelt werden kann. Allerdings muss für einen Vergleich des Einsatzes von Strom mit dem von Brennstoffen oder Wärme die vorgelagerten Aufwendungen der Energiebereitstellung berücksichtigt werden. Dazu müssen entsprechende Prozessketten bis zum Primärenergieträger zurückverfolgt werden. Das Verhältnis von bereitgestellter Endenergie zum gesamten Primärenergieaufwand wird als Bereitstellungsnutzungsgrad g_{el} für Elektrizität und g_{Br} für Brennstoffe bezeichnet und nach Gleichung (3.3) berechnet.

$$g_{el} = \frac{W_{el}}{KEA_{Be}}, g_{Br} = \frac{m_{Br} \cdot H_u}{KEA_{Be}} \quad (3.3)$$

W_{el} : Elektrische Energie, m_{Br} : Brennstoffmasse, H_u : unterer Heizwert

Darin steht KEA_{Be} für die Summe aller für die Bereitstellung notwendigen kumulierten Energieaufwendungen. Im Unterschied zum Wirkungsgrad berücksichtigt der Bereitstellungsnutzungsgrad somit neben den eingesetzten und umgewandelten Energieträgern auch die Aufwendungen für Betriebsmittel und -stoffe. Tatsächlich wird für einen Prozess nämlich nicht nur der Energieträger selbst eingesetzt. Auch für die Errichtung und die Entsorgung einer Anlage werden energetische Aufwendungen getätigt, die ursächlich mit dem Produkt des Prozesses in Verbindung stehen. Hierzu gehören in erster Linie die Betriebsmittel, z. B. die Anlage selbst, aber auch Maschinen und Stoffe, die zum Bau, zur Entsorgung und im Betrieb der Anlage eingesetzt werden. Die Gesamtheit aller energetischen und auf Primärenergie bezogenen Aufwendungen wird *Kumulierter Energieaufwand* KEA genannt. Er umfasst neben dem Einsatz von Brennstoffen und Energieträgern auch Energieaufwendungen für Materialeinsätze für Herstellung und Entsorgung. [66]

Der Kumulierte Energieaufwand KEA ist als Summe der Energieaufwendungen in den Lebensphasen Herstellung, KEA_H , Nutzung, KEA_N und Entsorgung, KEA_E , entsprechend Gleichung (3.4) definiert.

$$KEA = KEA_H + KEA_N + KEA_E \quad (3.4)$$

Zur Quantifizierung sind für alle drei Phasen jeweils die Einsätze von Betriebsmitteln und -stoffen, Roh- und Hilfsstoffen sowie sämtlichen Energien zu erfassen und primärenergetisch zu bewerten.

Der Kumulierte Energieaufwand KEA ist eine Energie und wird meist auf eine funktionale Einheit (fE) bezogen. Hierunter wird das jeweils betrachtete Produkt des Prozesses, dessen Masse, Volumen, Energie (z. B. Strom oder Wärme) oder eine Dienstleistung verstanden.

Mit einer analogen Vorgehensweise können auch kumulierte Emissionen sowie Kosten ermittelt werden, mit deren Hilfe wiederum die Bereitstellung von Stoffen bzw. Energien entsprechend bewertet werden können.

3.3.3 Ausbeuten

Ein wichtiges Kennzeichen für die Effizienz eines Prozesses ist seine Umsatzquote. Ähnlich wie beim Wirkungsgrad wird dazu eingesetzter und produzierter Wertstoff eines Verfahrens ins Verhältnis gesetzt. Somit definiert der Massenquotient aus Produkt und zugeführtem Vorstoff die Ausbeute A eines Prozessschritts:

$$A = \frac{m_{\text{Produkt}}}{m_{\text{Vorstoff}}} \quad (3.5)$$

Besondere Bedeutung kommt dieser Größe bei Untersuchungen zur Wiederverwertung zu. Hier besteht die Recyclingquote aus der Erfassungsquote und der technischen Recyclingquote. Damit wird zum einen den verschiedenen Ebenen des Recyclings Rechnung getragen (s. Kapitel 7) und zum anderen eine ressourcenorientierte Betrachtung ermöglicht [69].

Die Erfassungsquote EQ bezieht die Menge des durch Sammelsysteme verfügbar gemachten Sekundärmaterials auf die Menge des gesamten Materials, das nach der Nutzung zur Verfügung steht:

$$EQ = \frac{m_{\text{erfasstes Sekundärmaterial}}}{m_{\text{gesamtes Sekundärmaterial}}} \quad (3.6)$$

Mit der technischen Recyclingquote RQ_t wird die Relation zwischen aufbereitetem Sekundärrohstoff, beim Aluminiumstoffstrom entsprechend erschmolzenes Sekundärmetall, und erfasstem Sekundärmaterial bezeichnet:

$$RQ_t = \frac{m_{\text{aufbereiteter Sekundärrohstoff}}}{m_{\text{erfasstes Sekundärmaterial}}} \quad (3.7)$$

Bei mehreren Recyclingstufen können die einzelnen Quoten durch Multiplikation zur Gesamtquote zusammengefasst werden. In der Sekundäraluminiumindustrie

werden z. B. Aufbereitungsquoten von Schmelzausbeuten unterschieden.

Das Produkt aus EQ und RQ_t wird als ressourcenorientierte Recyclingquote RQ_r bezeichnet:

$$RQ_r = EQ \cdot RQ_t = \frac{m_{\text{aufbereiteter Sekundärrohstoff}}}{m_{\text{gesamtes Sekundärmaterial}}} \quad (3.8)$$

3.4 Grenzen von Bewertungsgrößen

Um Prozesse hinsichtlich ihrer Energienutzung aussagekräftig beurteilen und vergleichen zu können, müssen die dazu herangezogenen Kenngrößen unbedingt eindeutig definiert sein. Aus diesem Grund werden im Folgenden die im vorangegangenen Kapitel diskutierten Bewertungsgrößen kritisch geprüft und die Grenzen ihrer Interpretationsfähigkeit aufgezeigt.

3.4.1 Heizwerte von Energieträgern

Der Energieinhalt von Brennstoffen wird in der Regel durch den (unteren) Heizwert H_u angegeben. Nach dessen Definition müssen Verbrennungsprodukte vollständig gasförmig bei 25°C vorliegen. Bei Brennstoffen mit hohem Wasserstoffgehalt wie z. B. Erdgas ist diese Randbedingung thermodynamisch bedingt nicht erfüllbar, so dass durch die (Teil-)Kondensation des bei der Verbrennung entstehenden Wasserdampfs insgesamt deutlich mehr Wärme freigesetzt wird als über den Heizwert angegeben ist. Daher können so Wirkungsgrade berechnet werden, die größer als 100% sind und nach der Definitionsgleichung (3.1) wenig sinnvolle Aussagen erlauben. Da der obere Heizwert oder Brennwert H_o den Energieinhalt angibt, der wirklich praktisch umgesetzt werden kann, ist dieser als Bezugsgröße zur Bestimmung von Energieeffizienzen besser geeignet. Dennoch ist es allgemein üblich, den unteren Heizwert für den Energieinhalt von Brennstoffen zu Grunde zu legen. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten werden auch in dieser Arbeit Energieträger bezüglich ihres Heizwerts H_u zu bewerten.

3.4.2 Differenzierung des Primärenergieaufwands

Die Kenngröße Primärenergieäquivalent bzw. Kumulierter Energieaufwand lässt keine Rückschlüsse auf die Art der Primärenergieträger und damit den Verbrauch von Energieressourcen zu. Dabei ist aber der Einsatz von fossilen, nuklearen oder regenerativen Primärenergieträgern grundsätzlich unterschiedlich zu bewerten. Während die Reichweiten erschöpflicher Brennstoffe wie Kohle, Öl und Gas mit zufriedenstellender Genauigkeit ermittelt werden können, kann in der Kernenergie durch Brutprozesse zusätzlicher nuklearer Spaltstoff erzeugt werden. Damit

werden also die Reichweiten dieser Ressourcen erhöht statt vermindert. Auch die Nutzung erneuerbarer Energieträger wie Solarstrahlung, Geothermie, Biomasse, Wind- und Wasserkraft muss im Vergleich zu nicht regenerierbaren Energien unterschiedlich bewertet werden, weil damit keine Reduzierung der auf der Erde verfügbaren Ressourcen verbunden ist. Allerdings sind auch hier die verfügbaren technischen bzw. wirtschaftlichen Potenziale weltweit begrenzt, so dass bei entsprechend intensiver Nutzung eines speziellen Energieträgers dieser für zusätzliche Anwendungen u. U. nicht mehr zur Verfügung steht. In Deutschland ist z. B. das wirtschaftliche Wasserkraftpotenzial weitgehend erschöpft, folglich kann der Anteil am Energieträgermix auch kaum durch gesteigerte inländische Stromproduktion aus Wasserkraftwerken erhöht werden.

Ähnlich der Diskussion über Heiz- und Brennwert gilt auch für die Differenzierung des KEA, dass zwar Konzepte zur Aufspaltung in einen regenerativen und einen nicht regenerativen Teil existieren [65], im Allgemeinen diese Unterscheidung aber nicht getroffen wird. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der endenergetischen Analyse von Prozessen, und die primärenergetische Bewertung dient allein dem gesamtenergetischen Vergleich von Technikvarianten durch Addition verschiedener Energieformen wie z. B. Elektrizität und fossile Brennstoffe auf Primärenergiebasis. Somit genügt die undifferenzierte Angabe von Primärenergieäquivalenten den Anforderungen der angestrebten Untersuchungen. Dabei sind an dieser Stelle nochmals wichtige Randbedingungen für end- bzw. primärenergetische Betrachtungen hervorzuheben. Aus der Größe des ermittelten Primärenergieaufwands kann nicht unmittelbar auf die ihn verursachenden Mechanismen geschlossen werden. So bleibt z. B. zunächst unklar, ob ein hoher Primärenergieaufwand der Schmelzflusselektrolyse von einem hohen spezifischen Endenergiebedarf oder einem geringen Kraftwerkswirkungsgrad hervorgerufen wird. Für eine umfassende energetische Betrachtung sind daher grundsätzlich gleichermaßen end- und primärenergetische Analysen durchzuführen.

3.5 Energieträger

Im Allgemeinen werden primäre und sekundäre Energieträger unterschieden. Dabei bezeichnen erstere Energierohstoffe, die noch nicht umgewandelt wurden, und letztere Energieformen, die durch Umwandlung von primären oder sekundären Energieträgern hervorgegangen sind [66]. Damit handelt es sich bei Energieeinsätzen in Prozessen stets um Sekundärenergien, die in Prozessbilanzen in Form von Strom, Dampf und fossilen bzw. regenerativen Brennstoffen erfasst werden. Viele Verfahrensprodukte gehen allerdings aus exothermen chemischen Reaktionen hervor, durch die häufig ein wesentlicher Beitrag zur Energieversorgung geleistet wird. Dieser wird aber z. B. in Ökobilanzen meist nicht berücksichtigt [41-44].

Bei der Aluminiumherstellung kommen speziell im Sekundärbereich exotherme Reaktionen vor, durch die zusätzlich zu Brennstoffen und Strom Energie ein-

getragen wird. Dazu ist z. B. die Verbrennungswärme organischer Anhaftungen an Aluminiumschrotten zu nennen sowie die als Abbrand bezeichnete Oxidation von Aluminium nach Gleichung (3.9), die zu Metallverlusten beim Recycling führt.



Der „Heizwert“ von Aluminium liegt damit im Bereich von hochwertiger Steinkohle oder Koks und kann schon bei lediglich 5% Prozent oxidischen Aluminiumverlusts ein Viertel der zuzuführenden Wärme bei Schmelzprozessen decken und dabei fossile Energieträger oder Elektrizität substituieren.

In der vorliegenden Arbeit werden daher sämtliche Energieeinträge in Prozessen bilanziert und bei gesamtenergetischen Analysen neben den Primärenergieäquivalent von Brennstoffen, Dampf und Strom auch exotherme Reaktionswärmen berücksichtigt. Dabei werden energetische Aufwendungen für die Herstellung der Stoffe, die nicht als Endenergieträger gelten und doch einen Energieeintrag liefern, nicht bilanziert, da ihre Nutzung ursprünglich nicht aus thermischer Verwertung sondern werkstofflicher Verwendung bestehen sollte.

In Übereinstimmung mit der Methodik des Kumulierten Energieaufwands wird menschliche Arbeit nicht mitbilanziert [66].

3.6 Vorgehensweise zur endenergetischen Analyse

Für die Untersuchungen zu Endenergieeinsätzen bei der Aluminiumherstellung mit dem Ziel der Identifikation von Energieeinsparpotenzialen werden die Teilprozessketten der Bauxitgewinnung, Tonerdeherstellung, primären Verhüttung, Legierungsherstellung und Rezyklierung separat analysiert. Dazu werden zunächst die jeweils weltweit wichtigsten Staaten mittels statistischer Informationen ausfindig gemacht, die ggf. eingehender zu betrachten sind. Weiterhin sind wichtige verfahrensspezifische Einflussgrößen auf den Energiebedarf zu finden, die meist auf Einsparpotenziale hinweisen. Im Falle von besonderer Bedeutung auf Grund eines anteilmäßig auf die gesamte Kette bezogenen hohen Energieinputs werden entsprechende Prozesse genauer analysiert und ggf. modelliert. Schließlich werden durch Modell- bzw. Prozesskettenberechnungen Reduktionsmöglichkeiten für den Energieeinsatz aufgezeigt.

Nachfolgend sind für alle Vorgehensschritte wichtige Gesichtspunkte wie Abschneidekriterien, Allokationen, angewendete Werkzeuge und die Szenariotechnik erläutert.

3.6.1 Abschneidekriterien

Die vollständige Erfassung aller Stoff- und Energieströme im Rahmen einer Prozesskettenanalyse kann schnell zu einer völlig unüberschaubaren und schwer

handhabbaren Datenmenge führen. Die Definition von Abschneidekriterien dient der Ausgrenzung von Stoffen, die z. B. auf Grund ihrer geringen Menge bei der Bilanzierung vernachlässigt werden können. Im Rahmen der energetischen Betrachtung erscheint es sinnvoll, als Bezugsgröße den Gesamtenergiebedarf einer Prozesseinheit zu wählen und die Bilanzierungstiefe in Abhängigkeit vom Anteil an dieser Größe festlegen. Da die Unsicherheit bei der Datenerfassung in jedem Fall mehr als 5% beträgt, wird dieser Wert auch als Grenzwert für die Berücksichtigung der Energieaufwendungen für Teil- oder Nebenprozesse angesetzt.

Kumulierter Energieaufwand der Aluminiumherstellung

Für eine energetisch ganzheitliche Betrachtung sind neben Prozessenergien auch Energieaufwendungen für die Herstellung und Entsorgung von Betriebsmitteln und -stoffen zu erfassen, um deren Relevanz auf den Gesamtenergieeinsatz zu quantifizieren. Daher wurden beispielhaft Kumulierte Energieaufwendungen für die Herstellung der Betriebsmittel des Bauxitbergbaus, des Tonerdewerks, des Schifftransports und der Primäraluminiumhütte ermittelt und zu den Prozessenergien ins Verhältnis gesetzt. Die verschiedenen Nutzungsdauern der Betriebsmittel sind hierzu abgeschätzt worden.

Kumulierte Energieaufwendungen zum Betrieb eines Bauxittagebaus wurden auf der Basis einer Betriebsstudie berechnet [35]. Bei den Betriebsmitteln des hier beispielhaft betrachteten australischen Tagebaus handelt es sich um verschiedene Gewinnungs- und Transportfahrzeuge, deren Massen zu über 95% aus Stahl bestehen. Daher wird vereinfachend angenommen, daß ihr KEA_H aus der Gesamtmasse der Betriebsmittel und dem massenspezifischen KEA von Stahlblech berechnet werden kann [7].

Für ein Tonerdewerk sind bezüglich der Materialien der Betriebsmittel weder Literatur- noch empirische Daten verfügbar. Daher werden für Stahl und Beton, die sowohl massenspezifisch als auch energetisch die dominierenden Materialien darstellen, die erforderlichen Massen abgeschätzt. So wird die Masse Stahlblech für die verschiedenen Apparate und Behälter über berechnete Durchsätze und Verweilzeiten mit Hilfe eines Tonerdewerkmodells (s. Kapitel 5.6) sowie über angenommene Wandstärken ermittelt. Die benötigte Menge Beton wird über die versiegelte Fläche des Betriebsgeländes [2] und eine geschätzte Fundamentstärke berechnet. [53]

Das Transportmodul wird durch den Hochseeschifftransport repräsentiert und die Transportentfernung mit 10000 km angenommen. Ähnlich den Betriebsmitteln der Bauxitgewinnung wird der Materialaufwand zur Herstellung von Stahl dominiert, so dass auch der KEA_H für das Transportmodul über den KEA zur Herstellung von Stahlblech berechnet wird [7].

Für den Alusaf Hillside Smelter in Südafrika sind Massenangaben zu Herstellungsmaterialien veröffentlicht worden. Im einzelnen sind Baustahl, Stahlbeton und Stahl für die Elektrolysezellen berücksichtigt worden [48]. In Abb. 3.1 sind die KEA_H - und KEA_N -Werte für die einzelnen Teilprozesse und

das jeweilige Verhältnis vom KEA_H zum KEA_N des Teilprozesses einerseits und zur Summe der KEA_N über die gesamte Prozesskette (ΣKEA_N) zusammengestellt.

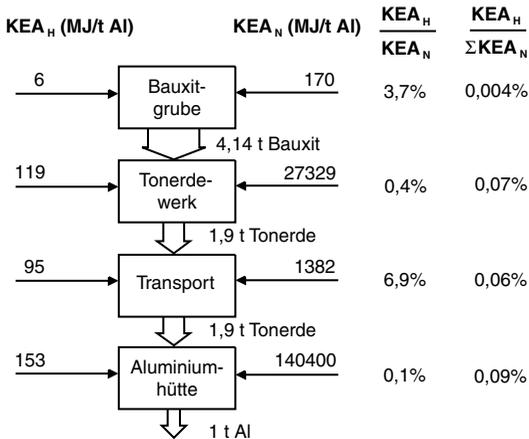


Abb. 3.1. Vergleich von KEA_H und KEA_N bei der Primäraluminiumherstellung

Die Quotientenbildung zeigt, dass bei der Analyse einzelner Prozesse der KEA_H nicht generell vernachlässigbar ist. Für die Bauxitgewinnung und den Transport liegen die Werte bezogen auf den KEA_N im einstelligen Prozentbereich, so dass hier die Einbeziehung der Herstellungsphase in die energetische Bilanzierung der Teilprozesse sinnvoll bzw. notwendig sein kann. Bezogen auf den KEA_N der gesamten Prozesskette beträgt der Energieaufwand zur Herstellung von Betriebsmitteln allerdings für jeden Teilprozess weniger als 0,1% und wird daher im Weiteren nicht berücksichtigt.

3.6.2 Allokationen

In den meisten Fällen liefern Prozesse neben dem gewünschten Zielprodukt weitere Neben- oder auch Koppelprodukte, denen in geeigneter Weise stoffliche und energetische Aufwendungen bzw. Emissionen zuzuweisen sind. Insbesondere werden z. B. beim Recycling von aluminiumhaltigen Produkten mehrere verschiedene Fraktionen gewonnen, von denen die meisten Wertstoffe darstellen.

Allokationen können allgemein über Masse, Volumen, Stoffmenge, monetären Wert Exergie- oder Energieinhalt von Produkten eines Prozesses vorgenommen werden. Dabei erscheint die monetäre Allokation von Stoffströmen weniger geeignet, da somit keine physikalischen Zusammenhänge zu Grunde gelegt werden sondern zahlreiche Parameter zeitlicher und geografischer bzw. staatlicher Art wie z. B. Steuern und Subventionen einfließen. Insbesondere spielt hier der oft

starken Schwankungen unterlegene Marktpreis eine entscheidende Rolle.

Da in den Prozessen zur Aluminiumherstellung sowohl Ziel- als auch Koppelprodukte über ihre Masse erfasst werden, erfolgt auch die Allokation nach dieser Größe. Dabei muss im Einzelfall entschieden werden, welche Produkte Wertstoffe darstellen, denen entsprechende Aufwendungen zuzuweisen sind.

3.6.3 Energiebereitstellung

Für die spezielle Abbildung von Energieversorgungsstrukturen in der Aluminiumwirtschaft ist im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 525 ein Energiemodell entwickelt worden, das in dieser Arbeit zur Berechnung von Primärenergieäquivalenten und energiebedingten Stoffströmen herangezogen wird.

Das Energiemodell besteht aus mehreren in einer Tabellenkalkulation ausgeführten Teilmodellen für die Bilanzierung verschiedener Prozesse und Strukturen der Energieumwandlung und -bereitstellung. Die ein- und austretenden Stoff- und Energieströme werden einerseits tabellarisch ausgegeben und andererseits in Prozessmodulen in der Bilanzierungssoftware GaBi abgelegt.

Folgende Prozesse bzw. Prozessketten sind durch die verschiedenen Teilmodelle abgebildet:

- Bereitstellung verschiedener fossiler und nuklearer Energieträger, differenziert nach Gewinnungsverfahren (übertägig, untertägig) und Transportentfernung
- Stromerzeugung im Landesverbundmix bzw. im Landesdurchschnitt, sofern keine zusammenhängende Netzstruktur vorliegt. Bilanziert sind 16 für die Aluminiumwirtschaft wichtige Staaten
- Verstromung verschiedener fossiler Energieträger in Kraftwerken. Durch Variation der Parameter Prozesstyp, Feuerungstyp, Wirkungsgrad, Kühlverfahren sowie Emissionsminderungsmaßnahmen können standortspezifische Einflussgrößen der Stromerzeugung und nationale Emissionsgrenzwerte berücksichtigt werden. Zusätzlich sind verschiedene Kernkraftwerke mit unterschiedlichen Kühlverfahren sowie Wasserkraftanlagen nach klimatischen Bedingungen bilanziert [5, 11]

3.6.4 Bilanzierungswerkzeug

Für die Bilanzierung verschiedener z. T. komplexer Prozessketten wird ein computergestütztes Werkzeug verwendet. Die Software *GaBi 3* (ganzheitliche Bilanzierung) wird vom IKP¹ in Stuttgart und der PE Product Engineering GmbH in Dettingen entwickelt und vertrieben. Auf der Grundlage einer Datenbank von zahlreichen Prozessmodulen der Stoff- und Energieumwandlung sowie des Transports können Prozessketten abgebildet und hinsichtlich stofflicher und ener-

¹ IKP: Institut für Kunststoffkunde und Kunststoffprüfung, Universität Stuttgart.

getischer In- und Outputs sowie Kosten bilanziert werden. Insbesondere zielt GaBi 3 auf die Erstellung von Sachbilanzen im Rahmen der Produktökobilanz nach ISO 14040 ff. Mit der softwareeigenen Datenbank werden in erster Linie Prozesse in Deutschland und Europa abgebildet; für ausgewählte Produkte liegen weitere länderspezifische Betrachtungen vor. In einer Prozessbilanz sind Aufwendungen für die Herstellung von Betriebsmitteln und -stoffen aggregiert enthalten. [52]

Die Software GaBi ermöglicht die Erweiterung der mitgelieferten Datenbank durch Prozesse und die Verknüpfung von Prozessen zu Prozessketten in sogenannten Plänen. Zusammenhänge zwischen Inputs und Outputs einzelner Prozesse können durch parametrisierte Gleichungen definiert werden. GaBi stellt somit ein universelles Werkzeug zur Verfügung, das mit der Erweiterung der umfangreichen Datenbank um anwenderspezifische Prozesse detaillierte Analysen komplexer Prozessketten erlaubt.

3.6.5 Szenariorechnungen

Zur Abschätzung von Potenzialen der Energienutzung bei der Aluminiumherstellung stellt die Szenariotechnik eine geeignete Methode dar. Aus den Ergebnissen sind dann Handlungsoptionen für eine energieressourcenschonende Metallbereitstellung ableitbar.

Im Unterschied zu der traditionell angewendeten Prognose lässt das Szenario mehrere zukünftige Entwicklungsmöglichkeiten zu und berücksichtigt dabei die Erfahrung, dass die Zukunft nicht genau vorhersehbar ist. Außerdem können komplexe Abhängigkeiten der technischen, ökologischen und ökonomischen Dimension einbezogen werden. Bei der praktischen Erstellung eines Szenarios wird zwischen zwei verschiedenen Methoden unterschieden. Ein exploratives (Startpunkt-gesteuertes oder Was-wäre-wenn-) Szenario stellt basierend auf der Analyse des Ist-Zustands zukünftig mögliche Entwicklungen dar. Ein antizipatives (Endpunkt-gesteuertes oder Was-muss-geschehen-damit-) Szenario geht von einem fixen zukünftigen Zustand aus und schließt auf mögliche zielführende Entwicklungen. [16]

3.6.6 Weitere Randbedingungen

Insbesondere bei der Sekundäraluminiumherstellung ergeben sich spezielle Problemstellungen für die Bilanzierung. Dabei ist zum einen die Bewertung der Legierungsqualität des bereitgestellten Metalls zu nennen und zum anderen die Problematik der modellhaften Berechnung von Monochargen.

3.6.6.1 Legierungsqualitäten

Obwohl sich Aluminium beliebig oft wiedereinschmelzen und somit rezyklieren

lässt, entsteht bei jeder Vermischung verschiedener Legierungen ein Qualitätsverlust durch die Anreicherung von Legierungselementen, die nicht wieder aus der Schmelze entfernt werden können. Auf Grund der sehr großen Zahl unterschiedlicher Aluminiumlegierungen würde ein sortenreines Umschmelzen, auch closed-loop-recycling genannt, ein extrem aufwendiges Erfassungssystem erfordern. In der Praxis existieren daher abgesehen vom Wiedereinschmelzen von Produktionsschrotten der ersten oder zweiten Verarbeitungsstufe kaum closed-loop-recycling-Systeme. Dagegen erfahren sekundäre Rohstoffe beim sogenannten open-loop-recycling nach der Verhüttung eine andere Nutzung in Form einer anderen Legierung. Dazu werden in den Schmelzhütten (Refinern) üblicherweise verschiedene Alt- und Neuschrotte zu Gusslegierungen verarbeitet. Zur Einstellung der Ziellegierung ist die Zugabe weiterer Legierungselemente erforderlich. Im gesamten Metallinventar nimmt somit der Legierungselementeanteil stetig zu, und der Legierungszustand des Aluminiums steigt mit jedem Recyclingumlauf. Ist der maximal zulässige Gehalt an Legierungselementen erreicht, kann eine weitere Rezyklierung nur noch durch sortenreines Umschmelzen oder die Verdünnung mit niedrig legierten Vorstoffen realisiert werden. Angesichts des relativ geringen Sekundäraluminiumanteils (s. Kapitel 2.1) besteht gegenwärtig keine Notwendigkeit, für möglichst viele Produkte ein closed-loop-recycling anzustreben, weil trotz steigendem Legierungsanteil in jedem Fall Primärmetall ersetzt wird und kein Aluminiumschrott deponiert werden muss. Erst bei stagnierender Nachfrage und zunehmendem Rücklauf gewinnen Fragen der sortenreinen Verwertung an Bedeutung. Während letzterer in den nächsten Jahren durch langlebige Produkte aus der Verkehr- und Baubranche zwar zu erwarten ist, kann mittelfristig aber kaum mit sinkendem Aluminiumbedarf gerechnet werden. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit die Legierungsqualität des Metalls nicht bewertet.

3.6.6.2 Monochargen

Wie bereits angedeutet kann in der industriellen Praxis in der Regel weder die primäre von der sekundären Produktion getrennt betrachtet werden noch innerhalb der Wiederverwertung ein geschlossener Produktkreislauf identifiziert werden. Für die modellhafte Bilanzierung von Prozessketten sind allerdings enge Systemgrenzen anzustreben. Dazu müssen aus den zahlreichen Verflechtungen der Aluminiumherstellung Verfahrenswege für spezielle Produkte isoliert und sogenannte Monochargen definiert werden. Dies betrifft insbesondere Schmelz- und Pyrolyseprozesse, die entsprechend modellhaft anzupassen sind.

Das innerhalb des SFB 525 entwickelte Ofenmodell [17] ermöglicht die isolierte Bilanzierung von Schmelzverfahren für einzelne Einsatzstoffe wie z. B. das alleinige Einschmelzen der Aluminiumfraktion im Recycling von Leichtverpackungen.

Pyrolysen werden im Rahmen des Aluminiumrecyclings autotherm betrieben, d. h. ohne externe Energiezufuhr in Form von fossilen Brennstoffen. Die Energie-

versorgung erfolgt allein durch organische Bestandteile der Aufbereitungsfraktion. Durch Vermischung mehrerer Fraktionen mit jeweils verschiedenen Organikanteilen wird ein definierter Organikgehalt eingestellt, der einen optimalen autothermen Betrieb gewährleistet. Daher muss für die Bilanzierung eines speziellen Recyclingpfads bzw. einer bestimmten Fraktion entsprechend der Differenz zum Organikgehalt der Mischcharge für autotherme Bedingungen eine positive oder negative energetische Gutschrift erteilt werden. Der Einfluss einer derartigen Allokation im Rahmen der Bilanzierung von Monochargen wird durch die Berechnungen in Kapitel 8.4.1 verdeutlicht.

4 Energieeinsatz bei der Bauxitgewinnung und beim Transport

4.1 Prozesskette des Bauxitbergbaus

Am Anfang einer jeden Prozesskette steht eine Lagerstätte, aus der Rohstoffe durch einen bergbaulichen Vorgang gewonnen werden. Zur modellhaften Darstellung des Bauxitbergbaus wird eine allgemeine abstrahierte Prozesskette aufgestellt (s. Abb. 4.1).

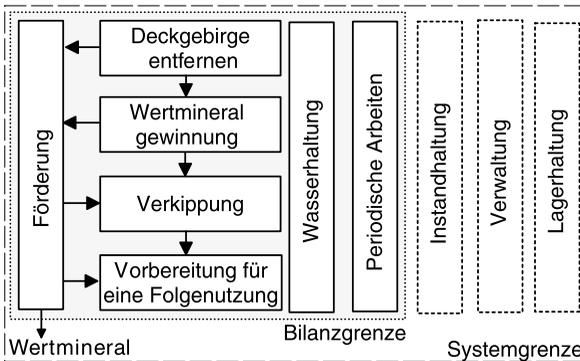


Abb. 4.1: Prozesskette der Bauxitgewinnung

Dazu ist der bergbauliche Prozess in verschiedene Abschnitte gegliedert, die alle einen Beitrag leisten das Wertmineral Bauxit aus der Erdkruste zu extrahieren und es für eine weitere Nutzung verfügbar zu machen. Zu unterscheiden sind dabei auf der einen Seite Prozesse, die für einen festen Betriebspunkt, d. h. eine fixe Koordinate der Mine, betrachtet zeitlich aufeinander folgen und auf der anderen Seite verbindende oder übergeordnete Vorgänge.

Vor der eigentlichen Wertmineralgewinnung muss das darüberliegende Deckgebirge entfernt werden. Dieser Teilprozess kann weiter unterteilt werden. Zur Vorbereitung der Oberfläche als erster Schritt gehört die Beräumung, also z. B. die Entfernung der Vegetation, sowie ggf. die Lockerung der Oberflächenschicht.

Die Gewinnung von kulturfähigen Bodenschichten und von Deckgebirgsschichten können insofern differenziert werden, dass letztere lediglich der Verfüllung dienen während erstere einen wichtigen Wertstoff für eine erfolgreiche Rekultivierung darstellen. Die sich anschließenden Teilprozesse Wertmineralgewinnung und Verkipfung können wie der Teilprozess Aufschluss mittels kontinuierlicher oder diskontinuierlicher Techniken durchgeführt werden. Bei Bauxittagebauen herrscht die diskontinuierliche Verfahrensweise vor. Ziel der abschließenden Vorbereitung einer Folgenutzung ist es, eine planmäßig erstellte Bergbaufolgelandschaft zu schaffen. Neben einer Rekultivierung, also der Wiederherstellung des ursprünglichen Zustands vor der Bergbauaktivität, ist auch eine anderweitige Folgenutzung wie etwa Landwirtschaft denkbar.

Der Teilprozess Förderung verbindet die zuvor beschriebenen Abläufe und umfasst innerbetriebliche Transporte sowohl des Wertminerals als auch der Abraummassen. Die kulturfähigen Deckgebirgsschichten werden der Rekultivierung, die übrigen Deckgebirgsschichten der Verkipfung mittels Fördermitteln zugeführt. Das Wertmineral gelangt durch Fördermittel zum Abnehmer. Bei Bauxittagebauen dominieren dabei insgesamt diskontinuierliche Fördermittel (SLKW¹). Bandförderanlagen kommen eher selten zum Einsatz. Interessant ist in diesem Zusammenhang aber die Nutzung von Höhenunterschieden zur Erzeugung von elektrischer Energie durch den Antrieb von in die Förderbandwalzen integrierte Generatoren beim Transport von einem höheren auf ein tieferes Höhenniveau.

Die Teilprozesse Wasserhaltung und periodische Arbeiten wie Straßenbau oder Staubbekämpfung sind integrative Bestandteile des Bergbauprozesses. Dies trifft auch zu für Vorgänge wie Lagerhaltung, Verwaltung und Instandhaltung, die aber nicht in die Betrachtung mit aufgenommen werden, da sie stofflich und energetisch nur von geringer Bedeutung sind.

4.2 Bauxitlagerstätten

4.2.1 Geologie

Aluminium ist nach Sauerstoff und Silizium das dritthäufigste Element der Erdkruste. Aufgrund seiner chemischen Reaktivität kommt Aluminium nicht elementar in der Natur vor sondern ausschließlich in Mineralgemengen mit Silikaten und Oxiden. Als Rohstoff zur Erzeugung von Primäraluminium werden weltweit fast ausschließlich Bauxite verwendet. Bauxit ist ein inhomogenes Gemenge von Aluminiumhydroxid, Eisen- und Titanoxiden sowie Aluminiumsilikatmineralen. Erzkörper können zum einen weitausgedehnt und flach, zum anderen unregelmäßig geformt oder linsenartig mit einigen hundert Metern Durchmesser und mehreren zehn Metern Dicke ausgebildet sein. Viele der geologisch jüngeren Bauxite

¹ SLKW: Schwerlastkraftwagen

sind nur von geringmächtigen Böden oder Ablagerungen bedeckt. Ältere Lagerstätten sind oft mit hunderten Metern Granitgestein überlagert.

4.2.2 Bauxitzusammensetzung

Gibbsit ($\gamma\text{-Al(OH)}_3$) ist das vorherrschende Aluminiummineral in den geologisch jungen Bauxiten des tropischen Klimagürtels. Ältere Bauxite enthalten in erster Linie Böhmit ($\gamma\text{-AlO(OH)}$) oder Diaspor ($\alpha\text{-AlO(OH)}$). Diese sind seit ihrer Entstehung zunehmend von beträchtlichen Sedimentschichten bedeckt und durch den resultierenden tektonischen Druck sowie chemische Reaktionen umgebildet worden.

Goethit ($\alpha\text{-FeO(OH)}$) und Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) sind die wichtigsten Eisenminerale in Bauxiten. Kieselsäure (SiO_2) kommt vereinzelt als Quarz im Bauxit vor, ist in den meisten Fällen aber als Kaolinit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) gebunden. Geringer konzentrierte Begleitstoffe sind Chrom, Vanadium, Zink und Gallium.

Die physikalischen Eigenschaften der Bauxite sind stark abhängig von der Geologie. So weist Diaspor eine große Härte und eine Dichte von bis zu $3,6 \text{ g/cm}^3$ auf, während Gibbsit von erdig, weicher Konsistenz ist und eine Dichte von $2,0\text{--}2,5 \text{ g/cm}^3$ hat.

Härte, Textur und die Mächtigkeit des Deckgebirges legen die Abbaumethoden der Bauxitgewinnung fest. Vorkommen in Griechenland, Jugoslawien, Ungarn und Russland müssen im Tiefbau (mehrere hundert Meter) gewonnen werden, während tropische Bauxite meist wenige Meter unter der Erdoberfläche lagern und mit leichten Gewinnungsgeräten abgebaut werden können. [63]

4.3 Bauxitförderung

4.3.1 Standorte und Reserven

In Afrika befinden sich sehr große Bauxitvorkommen entlang eines Gürtels, der von der Elfenbeinküste bis nach Madagaskar reicht. Große australische Lagerstätten sind im Westen (Darling Range) und Norden (Cape York) des Kontinents sowie in Queensland zu finden. Die Guayana-Lagerstätten-Provinz in Südamerika erstreckt sich von Venezuela über Guayana, Surinam und Französisch-Guayana bis nach Kolumbien und Brasilien. Nördlich schließt sich die Karibische Provinz von Costa Rica durch Jamaika, die Dominikanische Republik und Haiti bis nach Puerto Rico an. Im asiatischen Raum weist Indien große Gibbsitvorkommen auf, und die Insel Kilimantan (Indonesien) hat reiche Reserven. Zahlreiche Lagerstätten, vorrangig vom Diasporotyp, wurden in China exploriert, und auch in Westsibirien befinden sich bedeutsame Vorkommen. Die sicheren Erzreserven, d. h. die nachgewiesenen ökonomisch gewinnbaren Vorräte betragen zur Zeit fast 23 Mrd t und verteilen sich zu etwa 80% auf nur fünf Staaten (s. Abb. 4.2).

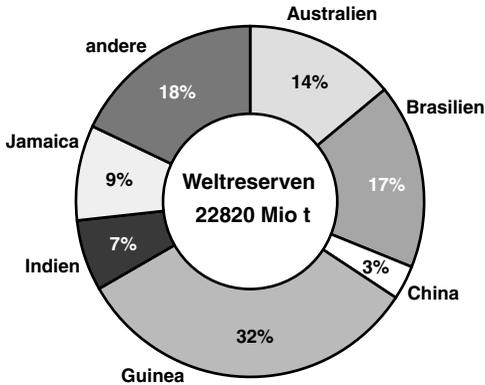


Abb. 4.2. Weltweite Verteilung der sicheren Bauxitreserven nach [64]

Bei einer jährlichen Förderung von 125 Mio. t (s. Kapitel 4.3.2) beträgt die statische Reichweite damit fast 200 Jahre, so dass für Bauxit mittelfristig keine Rohstoffverknappung zu erwarten ist. Bauxitressourcen, die sich zu 33% in Südamerika, zu 27% in Afrika, zu 17% in Asien und zu 13% in Ozeanien befinden, werden sogar auf bis zu 7 5Mr dt geschätzt.

4.3.2 Bauxitproduzenten

1998 belief sich die Weltförderung auf rd. 125 Mio t [64].

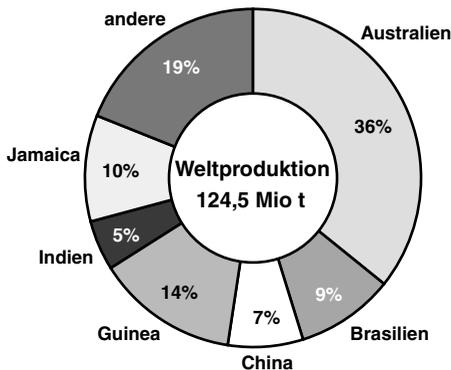


Abb. 4.3: Wichtige Bauxitförderländer 1998 [40]

Die weltweite Bauxitproduktion verteilt sich derzeit auf 82 Standorte in 24

Ländern [57]. Hauptförderländer mit einem Anteil von knapp 70% der Weltförderung waren 1998 Australien (36%), Guinea (14%), Jamaika (10%) und Brasilien (9%) (s. Abb. 4.3).

In den meisten Fällen handelt es sich um großflächige, oberflächennahe, geringmächtige Lagerstätten, die mittels diskontinuierlicher Gewinnungsverfahren im Tagebau abgebaut werden. Der Großteil der Förderung dient der Herstellung von Primäraluminium.

4.4 Energieaufwand für den Bauxitbergbau

Im Rahmen des SFB 525 ist die Struktur des Energieeinsatzes beispielhaft für verschiedene reale Tagebaue untersucht worden, deren wesentliche Merkmale in Tabelle 4.1 zusammengestellt sind.

Tabelle 4.1. Merkmale exemplarischer Bauxitminen (vgl. [60, 61])

	A	B	C	D
Staat	Australien	Griechenland	Venezuela	Jamaika
Mächtigkeit				
Deckgebirge	0,5 - 1 m	5 - 150 m	0,5 m	0,5 m
Bauxit	2 - 4 m	8 m	7-10 m	9 m
Konsistenz	locker	fest	locker	locker
Ausprägung	flözartig	taschenförmig	flözartig	taschenförmig
Rekultivierung	250 ha/a	20-30 ha/a	k.A.	k.A.
Transporte	10 - 19 km	30 - 55 km	4 km	k.A.
Betriebsmittel	Oberfläche vorbereiten: Caterpillar D7, Komatsu D375 Gewinnung: Caterpillar D9 und D11 Bulldozer, Caterpillar 902 Radlader Förderung: Bodenentleerer Komatsu HD1400, Zug Rekultivierung: Caterpillar D7-Dozern	Oberfläche vorbereiten: hydraulische Bohrmaschinen, Sprengstoff, Frontschaufellader, Hydraulikbagger Gewinnung: pneumatische Drehschlagbohrmaschinen oder hydraulische Bohrmaschinen, Tieflöffelbagger Förderung: (S)LKW	Oberfläche vorbereiten: Dozer Förderung: Förderband, Zug, LKW	Oberfläche vorbereiten: Scraper, Kettendozer Gewinnung: Hydraulikbagger oder Draglines Förderung: SLKW

Die Lagerstätten unterscheiden sich in erster Linie durch Mächtigkeit und Be-

schaffenheit von Deckgebirge und Erz sowie durch die Geometrie des Bauxitkörpers. Da jeder Standort grundsätzlich verschiedene Eigenschaften aufweist, sind durch Übertragung von Bilanzierungsergebnissen auf andere Lagerstätten keine sinnvollen Aussagen ableitbar.

Zur Bestimmung des gesamten spezifischen Energiebedarfs der Bauxitgewinnung bzw. der Anteile der einzelnen Teilprozesse sind zunächst sämtliche Betriebsmittel erfasst und die zugehörigen jährlichen Betriebsstunden sowie durchschnittliche stündliche Dieselverbräuche ermittelt worden. Die Division durch die jährliche Bauxitförderung liefert den spezifischen Endenergieeinsatz, die Zuordnung der Betriebsmittel zu den einzelnen Prozessschritten deren Energieintensität. Abb. 4.4 zeigt für die untersuchten Standorte die Verteilung der Energieaufwendungen auf die einzelnen Teilprozesse. Zunächst fällt der im Vergleich zu den

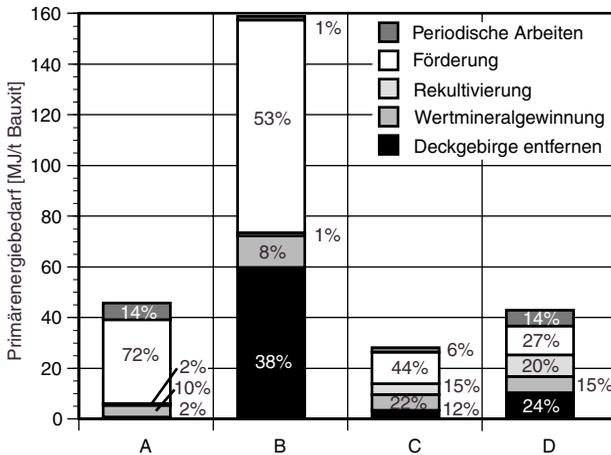


Abb. 4.4. Primärenergetischer Vergleich exemplarischer Bauxitminen

anderen Lagerstätten etwa 4 bis 5 mal höhere Gesamtenergiebedarf des griechischen Standorts (B) auf, der zum einen in der hohen Gesteinsfestigkeit und zum anderen in den vergleichsweise großen Transportentfernungen begründet ist, die wiederum aus der mächtigen Deckschicht resultieren. Aber auch der Energieeinsatz für die Gewinnung ist verglichen mit den anderen Lagerstätten mehr als doppelt so hoch, da die harte Konsistenz des griechischen Bauxits u. a. auch zusätzliche Bohr- und Sprengarbeiten für den Abbau erforderlich macht. Der Vergleich der übrigen drei Standorte, die sich in der Beschaffenheit der Erdschichten kaum unterscheiden, zeigt, dass im Falle ähnlicher Ausprägung der Bauxitvorkommen unterschiedliche innerbetrieblichen Transportentfernungen den Gesamtenergie-

bedarf maßgeblich beeinflussen können (vgl. A und C). Insbesondere beeinflusst dabei die individuelle Abbauplanung einer Bauxitmine maßgeblich den spezifischen Energiebedarf. Andererseits wirken sich bei gleicher Mächtigkeit der Deckschichten verschieden ausgeprägte Erzkörper auf die Höhe des Energieeinsatzes aus. So betragen die Aufwendungen für die Entfernung des Deckgebirges der venezolanischen Lagerstätte mit flözartig anstehendem Bauxit (C) nur etwa ein Drittel derer für den taschenförmigen Bauxit in Jamaika (D). Keine analogen Abhängigkeiten des Energiebedarfs können für die Prozessschritte Rekultivierung und periodische Arbeiten ermittelt werden, da hier in erster Linie gesetzliche Vorgaben und auch unternehmensinterne Umweltpolitik sowie Abbauplanung über Aufwand und damit auch Energieintensität entscheiden.

Da der Anteil des Bergbaus am Energiebedarf der gesamten Prozesskette in jedem Fall kleiner als 1% ist (vgl. Abb. 2.4), sind Optimierungen bei diesem Prozess lediglich für den Minenbetreiber interessant, hinsichtlich der Energieeinsparung bei der Aluminiumherstellung insgesamt dagegen unbedeutend.

4.5 Transport

Transporte verbinden grundsätzlich die verschiedenen Prozessschritte zur Herstellung von Gütern. Da wie aus Abb. 2.2 hervorgeht weltweit Aluminiumbedarf und Bauxitvorkommen geografisch zum Teil sehr weit auseinander liegen, müssen im primären Aluminiumstoffstrom große Massen über weite Entfernungen bewegt werden. Für die Wahl des Transportmittels (Schiff, Güterzug, LKW oder Förderband) ist zunächst die gegebene Infrastruktur entscheidend, dann die Beschaffenheit und Menge des Transportguts und schließlich ökonomische sowie gesetzliche Randbedingungen.

Abb. 4.5 zeigt für die alternativen Transportmittel technikabhängige Bandbreiten des Primärenergiebedarfs bezogen auf die Transportleistung. Ausgehend von einem gesamten Primärenergieaufwand von 165 GJ [56] für eine Tonne Primäraluminium in Deutschland unter Berücksichtigung von inländischer Produktion und sämtlicher Importe fällt dabei somit der Anteil insbesondere der Überseetransporte trotz z. T. großer Entfernungen (z. B. 10000 km von Australien nach Europa) und großer Massen (Bauxit/Aluminium = 4..6) mit etwa 1,5% kaum ins Gewicht. Bei LKW-Transporten werden erst ab Entfernungen von mehr als 1000 km, die in der Praxis für dieses Verkehrsmittel kaum üblich sind, Anteile über 1% erreicht.

Im Weiteren sind daher zwar Transportprozesse grundsätzlich berücksichtigt, nennenswerte Optimierungspotenziale werden hier allerdings nicht gesehen, so dass keine detaillierteren Untersuchungen im Bereich Transport erfolgen.

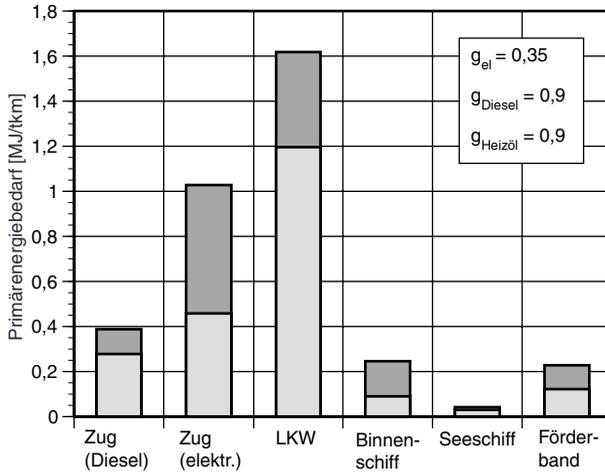


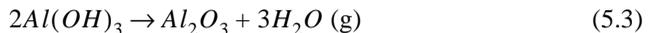
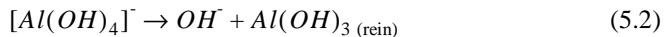
Abb. 4.5. Spezifischer Primärenergiebedarf verschiedener Transportmittel

5 Energiebedarf für die Tonerdeherstellung

5.1 Prozesskette der Tonerdeherstellung

Für die elementare Gewinnung von Aluminium durch Reduktion von Aluminiumoxid muss dieses zunächst aus dem Rohstoff Bauxit extrahiert werden. Dazu hat sich industriell aus technischen und ökonomischen Gründen das Bayer-Verfahren mit anschließender Kalzination durchgesetzt. Weltweit werden so 90% der gesamten Tonerdeproduktion bereitgestellt. Lediglich Produzenten aus Ländern der ehemaligen UdSSR und China verwenden z. T. andere Verfahren, u. a. auch um heimische Rohstoffe wie z. B. Nephelin zu Tonerde verarbeiten zu können.

Die wichtigsten Schritte entlang der Hauptprozesse sind in einem Tonerdewerk die Extraktion (Aufschluss) der im Bauxit enthaltenen Aluminiumhydroxide mit Alkalilauge bei erhöhter Temperatur, die Abtrennung des festen Rückstands (Rotschlamm), die Kristallisation (Ausrühren) des Hydragillits ($\text{Al}(\text{OH})_3$) aus der nach der Abkühlung übersättigten Aluminatlauge und schließlich die Dehydrierung (Kalzination) zur Gewinnung von Al_2O_3 . Daneben müssen große Reststoffmengen entsorgt sowie Verluste an Natronlauge, die über die Eindampfung prinzipiell im Kreis geführt wird, gedeckt werden. Abb. 5.1 zeigt eine entsprechend aggregierte Prozesskette der Tonerdeherstellung. Vereinfacht lassen sich die Vorgänge durch folgende Reaktionsgleichungen beschreiben:



Grundlage des Prozesses ist die Temperaturabhängigkeit der Löslichkeit des Aluminiumhydroxids in Natronlauge. Mit sinkender Temperatur verringert sich die Löslichkeit des Aluminiumhydroxids bei gleichbleibender Konzentration. Daher liegt die Aufschlusstemperatur in Gleichung (5.1) über der Temperatur beim Ausrühren des Hydroxids (Gleichung (5.2)). Weiterhin hat die metastabile Eigenschaft der übersättigten Aluminatlauge einen entscheidenden Einfluss auf den Prozess. Dadurch ist es möglich, den Rotschlamm von der Aluminatlauge zu trennen und zu reinigen. Erst durch eine weitere Abkühlung und die Zugabe gro-

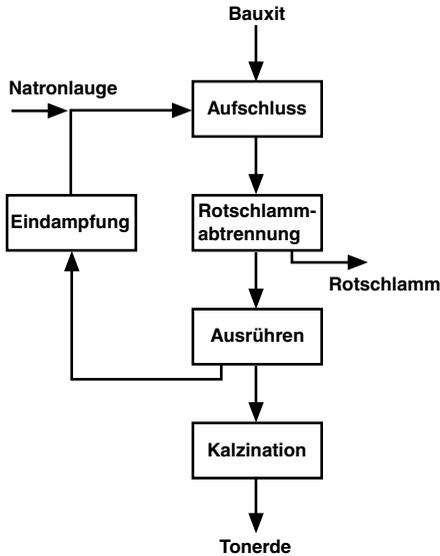


Abb. 5.1. Aggregierte Prozesskette der Tonerdeproduktion

Bei Impfkristallmengen wird die Übersättigung aufgehoben und das Aluminiumhydroxid ausgerührt. Im Anschluss an das Bayer-Verfahren wird das Aluminiumhydroxid in der Kalzination nach Reaktionsgleichung (5.3) zu Aluminiumoxid umgewandelt.

5.2 Produktion weltweit

Abb. 5.2 zeigt die Anteile bedeutender tonerdeproduzierender Staaten an der gesamten Herstellung. Danach verteilen sich etwa zwei Drittel der Weltproduktion auf nur sechs Herstellerländer. Ähnlich der Bauxitförderung entfällt allein auf Australien fast ein Drittel der gesamten Tonerdeerzeugung. Mit Brasilien, Jamaika und China finden sich weitere bedeutende Bauxitförderländer (s. Abb. 4.3) wieder, die zumindest den größten Teil des Rohstoffs heimisch weiterverarbeiten. Dagegen müssen die USA aufgrund fehlender eigener Ressourcen bedeutende Bauxitmengen importieren.

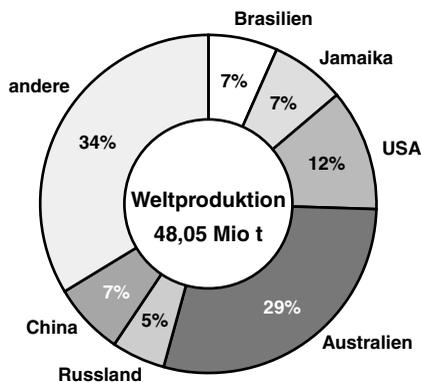


Abb. 5.2. Anteile verschiedener Staaten an der weltweiten Tonerdeherstellung 1998 [40]

5.3 Technologien der Tonerdegewinnung

Vor allem die unterschiedliche Bauxitqualität, d. h. die mineralogische und chemische Zusammensetzung, hat zur Entwicklung zahlreicher verschiedener Anlagentypen geführt. Grundsätzlich lassen sich technikspezifisch hinsichtlich der Aufschlusstemperatur das Hoch- und das Niedertemperaturverfahren unterscheiden. Das Aluminiummineral Gibbssit im Bauxit erfordert Aufschlusstemperaturen von 110-150°C, die Minerale Böhmit und Diaspor höhere Temperaturen von 180-280°C. Dabei führt bei der Verarbeitung von Diaspor die Zugabe von Kalk zu der Senkung der erforderlichen Temperatur auf etwa 240°C. Beide Verfahren werden heute fast ausschließlich kontinuierlich in Autoklavenkaskaden durchgeführt. Varianten bestehen in der Form der Beheizung und der Laugenstromführung. Während in älteren Tonerdewerken indirekt beheizt wurde, werden die resultierenden Verkrustungsprobleme an Wärmetauscherflächen mittlerweile durch direktes Einleiten von Heißdampf in die Autoklaven umgangen. Als nachteilig erweist sich bei dieser Form der Beheizung, dass das Kondensat mit zusätzlichem Energieaufwand durch Eindampfung wieder entfernt werden muss. Außerdem wird die Lauge weiter verdünnt, was den Lösungsvorgang erschwert. Hinsichtlich des Laugenflusses wird das Einstromverfahren, bei dem die gesamte Bauxit-Lauge-Suspension durch sämtliche Autoklaven gefördert wird, vom Zweistromverfahren unterschieden, bei dem 80-85% der Lauge unter Wärmerückgewinnung separat vorgeheizt und verdichtet werden, bevor sie mit dem Rest der Lauge und dem Bauxit in einem der letzten Autoklaven zusammengeführt werden. Dem Vorteil der weniger aufwendigen Pumpen für Flüssigkeiten im Vergleich zu Suspensionen stehen erhöhte Materialanforderungen auf Grund von größerer Korrosionsgefahr durch die höhere Laugenkonzentration gegenüber.

Eine Besonderheit stellt der sogenannte Rohrreaktor dar, bei dem die Autokla-

venkaskade durch ein Rohr ersetzt wurde. Großtechnisch existiert von diesem Typ weltweit lediglich eine Anlage in Stade. Vorteile gegenüber dem Autoklavverfahren ergeben sich vor allem aus erhöhter Turbulenz und Temperatur. Die resultierenden nahezu idealen Stoffübergänge und deutlich höheren Reaktionsgeschwindigkeiten führen zu erheblich verkürzten Verweilzeiten. Damit verringert sich auch das spezifische Anlagenvolumen auf etwa 1/20, was die Investitionskosten entsprechend senkt. Weiterhin erlauben die hohen erreichbaren Prozesstemperaturen derart geringe Aufschlusskonzentrationen, dass für die Ausrührung keine Verdünnung erforderlich ist und demzufolge auch die anschließende Eindampfung entfallen kann. Außerdem reduziert sich auch die spezifisch notwendige Laugenmenge von 13-17 m³/t Al₂O₃ auf 10 m³/t Al₂O₃. Beide Effekte äußern sich in einem reduzierten Energiebedarf.

Bei indirekter Beheizung z. B. des Aufschlussprozesses steht alternativ zu Prozessdampf auch Salzschnmelze als Heizmedium zur Verfügung. Selbst bei vollständiger Nutzung der Kondensationswärme, die bei Dampfheizung praktisch nicht erreicht wird, liegt der Wärmeübertragerwirkungsgrad der Salzheizung mit 85-90% deutlich über dem der Dampfheizung mit 60-70%. Daraus resultieren für das Salzmedium kleinere erforderliche Abmessungen der Wärmeertrager, was wiederum zu verminderten Wärmestrahlungsverlusten von nur 1% gegenüber 5% bei Dampfheizung führt.

Zur Kalzinierung werden gegenwärtig Drehrohr- oder Wirbelschichtöfen eingesetzt. In Drehrohröfen von 2-4 m Durchmesser und bis zu 80 m Länge wird das Aluminiumhydroxid unter drehender Ofenbewegung der Flamme entgegengeführt. Bei optimierten Anlagen wird die hohe Produkttemperatur von 1200°C mittels Rekuperatoren für die Luftvorheizung genutzt. Dadurch lässt sich der Wärmebedarf von 5800 auf 3500 MJ/t Tonerde reduzieren. Eine bessere Wärmenutzung kann mit der Wirbelschichttechnik erreicht werden, durch die der thermische Energiebedarf auf bis zu 3000 MJ/t Al₂O₃ gesenkt wird. Damit beträgt die Wärmenutzung mehr als 80%, so dass die Energieeffizienz des Verfahrens darüber hinaus kaum mehr zu steigern ist [4].

5.4 Einflussgrößen auf den Energiebedarf

Grundsätzlich entscheiden in erster Linie einerseits die Rohstoffqualität und andererseits die eingesetzte Prozesstechnik über die Höhe des Energieaufwands für die Tonerdeproduktion. Theoretisch ist die Enthalpieänderung für die Gesamtreaktion des Bayer-Prozesses (ohne Kalzination) sowohl bei dem Einsatz hydrargilitischer als auch böhmischer Bauxite sehr klein. Der Prozess ist sogar schwach exotherm, da die zuzuführende Lösungswärme für die Extraktion kleiner ist als die abzuführende Kristallisationswärme des Hydroxids beim Ausrühren. Der hohe Energieaufwand entspricht somit den Wärmeverlusten im Gesamtprozess. Die wichtigsten Einflussfaktoren für den Energieverlust in einem Tonerdewerk sind im Folgenden erläutert.

5.4.1 Energieverlust durch Strahlung und Konvektion

Trotz der Isolierung der Anlagenteile verliert der Prozess durch Wärmestrahlung und Konvektion Energie an die Umgebung. In einigen Prozessschritten wie z. B. der Rotschlamm- oder Hydratwäsche ist eine Isolierung apparatetechnisch praktisch nicht möglich. Die Werte der Energieverluste sind merklich von der klimatischen Lage der Oxidfabrik abhängig. Für die Rotschlammabtrennung betragen die Werte zum Beispiel in einem europäischen Tonerdewerk 1045 MJ/t Al_2O_3 . In den Tropen liegt dieser Wert bei ansonsten gleichen Bedingungen tiefer, während er in Kanada oder Nordrussland höher liegt. Neben den Umgebungstemperaturen müssen bei diesen Betrachtungen auch die Windgeschwindigkeiten an den Anlagenteilen berücksichtigt werden. Vor allem die Ausrühranlage ist stark von diesem Einflussfaktor abhängig. Der Wärmedurchgangskoeffizient beträgt bei Windstille etwa $k = 5,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ und bei Sturm $k = 69,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ und kann somit um eine Zehnerpotenz schwanken. Durch Verkrustungen im Inneren der Ausrührbehälter wird die praktische Schwankung der Werte wesentlich verringert. In Tabelle 5.1 sind mittlere Wärmeverluste der einzelnen Prozessschritte aufgelistet. [32]

Tabelle 5.1. Durchschnittliche Wärmeverluste bei der Tonerdeherstellung

Prozessschritt	MJ/t Al_2O_3
Bauxitaufbereitung	200
Aufschluss	1100
Kläreindicker	500
Wärmetauscher vor Ausrührung	200
Ausrühren	1200
Rotschlammwäsche	600
Eindampfen	700
Wirbelschichtkalzination	230
Gesamtverluste	4730

5.4.2 Wärmeverluste durch Stoffaustrag

Bei der energetischen Analyse des Tonerdewerks hat sich gezeigt, dass der Energieinhalt der austretenden Stoffströme signifikanten Einfluss auf den Gesamtenergieverbrauch besitzt. Zu diesen Stoffströmen zählt der Rotschlamm, das Aluminiumoxid, der Dampf und das Abgas, das in der Kalzination entsteht.

Ziel der Rotschlammwäsche ist es daher, den Feststoff mit möglichst wenig anhaftender Lauge auszutragen, um dem Gesamtsystem möglichst wenig Lauge zu entziehen. Entscheidend beeinflusst wird die mit dem Rotschlamm austretende Wärmemenge von dem Flüssigkeitsanteil.

Bei der Wirbelschichtkalzination konnten die Wärmeverluste der austretenden

Abgase, des abgetrennten und verdampften Wassers und des Aluminiumoxids durch Wärmerückgewinnung bereits verringert werden. Dies erfolgt durch die Abgabe der Wärmeenergie des Aluminiumoxids an die eintretende Verbrennungsluft und die Vorheizung und teilweise Dehydratisierung des Aluminiumhydroxids durch die heißen Abgase aus dem Kalzinierofen.

5.4.3 Laugekreislauf

Die Lauge wird im Bayer-Prozess im Kreis geführt und dabei auf dem Weg vom Aufschluss über die Rotschlammabtrennung zur Ausrührung abgekühlt und anschließend über die Eindampfung zum Aufschluss wieder erwärmt. Dabei wird wie bereits angedeutet Wärme im Gegenstrom rückgewonnen. Bei betrieblichen Abweichungen vom Auslegungszustand kann es zu einem bedeutenden Mehrbedarf an Energie kommen. Wird zum Beispiel die Laugenmenge zur Steigerung der Produktion erhöht, ohne dass zusätzliche Wärmeüberträger installiert werden, so kann durch eine unzureichend große Wärmetauscherfläche in den Vorwärmern die rückgewonnene Wärmeenergie nicht vollständig übertragen werden.

Durch eine Veränderung der Bauxitsorte, bzw. -qualität ist es oftmals notwendig, die Aufschlusstemperatur zu erhöhen. In diesem Fall sind zusätzliche Entspannerstufen und Wärmeübertrager notwendig, die oftmals jedoch nicht zur Verfügung stehen und somit zu einem erhöhten Energieverlust führen.

Bedeutenden Einfluss auf die Höhe des spezifischen Energieeinsatzes für den Aufschluss hat auch die Ausbeute des Prozesses, da bei zunehmenden Verlusten auch die spezifische Masse an umzusetzender Suspension steigt und damit auch der Energieaufwand für die Beheizung. Wertmineralverluste entstehen wiederum durch zu niedrige Aufschlusstemperaturen oder Natronlaugekonzentrationen, bei denen schwerlösliche Minerale wie etwa Diaspor nicht in Lösung gehen und stattdessen im abzutrennenden Rotschlamm verbleiben. Weiterhin geht bereits gelöste Tonerde, die in der Lösung vor der Rotschlammabtrennung auskristallisiert, mit dem Rotschlamm verloren sowie Tonerde, die auf Grund zu geringer Verweilzeiten im Autoklaven und/oder eines unzureichenden Aufmahlungsgrads nicht gelöst wurde. Andererseits führt eine zu große Mahlfeinheit bei Bauxiten mit in Quarzform vorliegender Kieselsäure auf Grund der Reaktion zu Sodalith zu Verlusten von Natronlauge und Tonerde. Reaktive Kieselsäure z. B. Kaolinit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ist in Natronlauge löslich und bildet schwerlösliche Natriumsilikate wie z. B. Hydroxysodalith ($4\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), die neben Siliziumoxid auch Aluminiumoxid und Natronlauge enthalten. Durchschnittliche Verluste betragen 2 t Al_2O_3 bzw. 1,2 t NaOH pro Tonne SiO_2 , daher werden in der Regel keine Bauxite mit Gehalten an reaktiver Kieselsäure von über 6-8% verarbeitet.

Geringer konzentrierte Begleitstoffe wie Chrom, Vanadium, Zink und Gallium haben keine Auswirkungen auf die Produktqualität des Bayer-Verfahrens. Allerdings reichern sich Vanadium und Gallium in der kreislaufgeführten Natronlauge

an und müssen daher regelmäßig entfernt werden.

Die Qualität der eingesetzten Bauxite, d. h. ihre mineralogische und chemische Zusammensetzung, hat Auswirkungen auf das zu wählende Aufschlussverfahren, die spezifisch erforderliche Menge Bauxit zur Erzeugung von Tonerde, die spezifisch erforderlichen Mengen an Natronlauge für den Aufschluss, die anfallende Menge an Rückständen sowie die Qualität der erzeugten Tonerde.

In der Literatur sind lagerstättenspezifische Daten zur Qualität der Bauxite verfügbar, insbesondere die Gehalte an den aluminiumhaltigen Wertmineralen Gibbstit, Böhmit und Diaspor und die Gehalte an Kieselsäure. Diese Informationen erlauben die lagerstättenspezifische Zuordnung der Bauxite zu sinnvollen Aufschlussverfahren, für die technikspezifisch Ausbeuten der Tonerde aus der Literatur entnommen werden konnten. Mit Hilfe dieser Ausbeutefaktoren und der Gehalte an Tonerde im Bauxit kann bezogen auf die Lagerstätte und die Tonerdefabrik die spezifische Menge an Bauxit berechnet werden. Damit einher geht auch die Möglichkeit, ebenfalls lagerstätten- und standortspezifisch die anfallende Menge an Rotschlamm zu berechnen, die zu deponieren ist.

5.5 Energiebedarf bestehender Anlagen

Aus Literaturangaben lassen sich für etwa 41% der weltweit installierten Kapazität zur Tonerdeherstellung standortabhängige Daten zum spezifischen Einsatz von Wärme, Strom, Natronlauge und Kalk gewinnen [47]. Von den eingesetzten Hilfsstoffen können Natronlauge und Kalk zum einen mengenmäßig und zum anderen hinsichtlich des herstellungsbedingten Energieaufwands relevant sein und müssen somit bei der energetischen Betrachtung berücksichtigt werden. Zur Bereitstellung von Natronlauge konkurrieren Quecksilber-, Diaphragma- und Membranverfahren, die sich hinsichtlich des spezifischen Energiebedarfs deutlich unterscheiden. Auch für das Kalkbrennen stehen verschiedene Ofentechnologien zur Verfügung, deren Energiebedarf zwischen 3500 und 7800 MJ/t CaO liegt. Abb. 5.3 zeigt die resultierenden Bandbreiten des spezifischen thermischen sowie elektrischen Energiebedarfs der Tonerdeproduktion für die Teilprozesse Aufschluss, Kalzination und die Nebenkette Natronlauge- sowie Kalkproduktion. Den weitaus größten Anteil am Wärmebedarf hat der Aufschlussprozess mit 50-80%, dabei ist der maximale Aufwand beim Autoklavenaufschluss doppelt so hoch wie der minimale, und der Bedarf des Rohrreaktors liegt noch 1 GJ/t Al_2O_3 darunter. Die Varianz des Energieeinsatzes für die Kalzination beträgt dagegen nur 28% bezogen auf den Höchstwert des Drehrohrverfahrens. Der Beitrag durch die Kalkproduktion ist lediglich bei wenigen Tonerdewerken mit besonders hohem Kalkbedarf relevant und kann in dem Fall bis zu 10% des gesamten thermischen Energieaufwands betragen. Unter Berücksichtigung kapazitätsgewichteter Mittelwerte kann die Kalkbereitstellung mit einem Anteil von 1-3% am Gesamtbedarf, der sich dann zu etwa 72% aus Aufschluss und zu 28% aus Kalzination zusammensetzt, jedoch vernachlässigt werden. Die Analyse des Stromverbrauchs

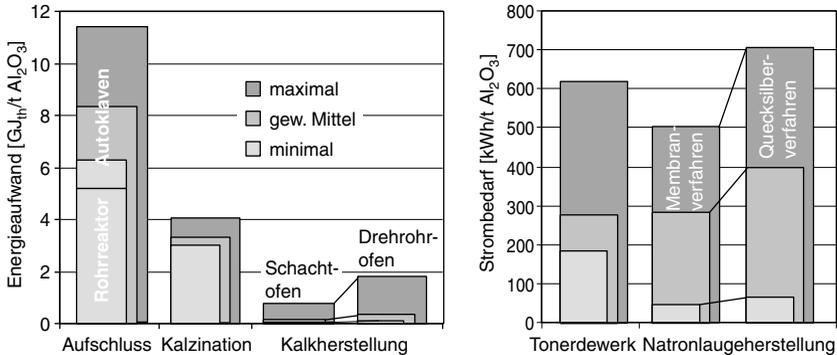


Abb. 5.3. Bandbreiten des Endenergiebedarfs für die Tonerdeherstellung (nach [47, 50, 63])

bei der Tonerdeherstellung zeigt, dass hierbei die Hilfsstoffproduktion den Hauptprozess im Mittel sogar übertrifft. Dabei ist die Bandbreite des spezifischen Laugebedarfs aber offensichtlich deutlich größer als die des prozessbedingten Strombedarfs, so dass bei Anlagen mit geringen Laugeverlusten der Anteil der Laugeherstellung am Gesamtstrombedarf maximal 1/3 beträgt.

Die Literaturlauswertung kann die verschiedenen und häufig verknüpften Abhängigkeiten des Energiebedarfs nicht vollständig erfassen. Insbesondere der wichtige Einfluss der Bauxitqualität kann meist nicht abgebildet werden.

5.6 Modellierung eines Tonerdewerks

Zur Analyse von Energieeinsätzen, -nutzung und -verlusten bei der Tonerdeherstellung ist ein Modell entwickelt worden, mit dessen Hilfe Energiebilanzen in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern wie z. B. Al₂O₃- und SiO₂-Anteile im Bauxit, die Spannbreiten von 28-60% bzw. 1-24% aufweisen, Mineralform des Bauxits (Aufschlussverfahren), Wärmeverluste und Betriebscharakteristika der Wärmetauscher erstellt werden können [54]. So können zum einen Sensitivitätsanalysen bezüglich der Bedeutung der verschiedenen Einflussgrößen durchgeführt und zum anderen energetische Optimierungspotenziale identifiziert werden. Aufgrund der vielen Variationsmöglichkeiten der Prozessführung in Verbindung mit den zahlreichen alternativen Prozessschritten stellt jedes Tonerdewerk ein Unikat dar. Somit ist es unmöglich, ein Modell zu entwickeln, das sämtliche Tonerdewerke der Welt beschreiben kann. Das vorliegende Modell einer Autoklavenkaskade repräsentiert die Anlagen mit dem größten Anteil an der Gesamtkapazität der Tonerdewerke weltweit.

Abb. 5.4 zeigt die Struktur des Modells einer Autoklavenkaskade, das aus 7

Modulen besteht, für die jeweils die Stoff- und Energiebilanz erstellt wurden.

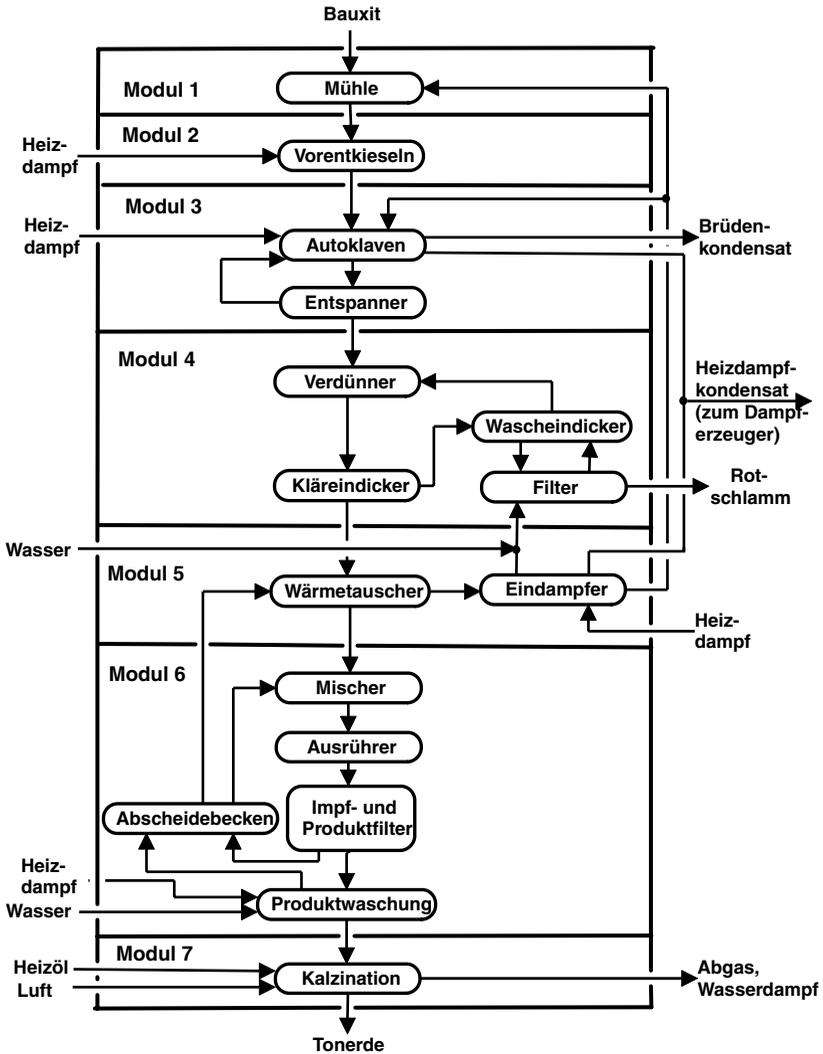


Abb. 5.4. Module des Prozesskettenmodells eines Tonerdewerks

Der Energieaufwand entspricht der über die Bilanzgrenze des Tonerdewerks in das Modul eintretenden Energie. Die Energieverluste an die Umgebung werden für jedes Modul in Energieverluste durch austretende Stoffströme (z. B. Rotschlamm, Hydroxid) sowie Wärmestrahlung und -konvektion unterteilt. In einer beispielhaften Auswertung wurde der Zusammenhang des Energieaufwands und des Energieverlusts im Tonerdewerk von der Abstimmung der Aufschlussparameter auf die gegebene mineralogische Zusammensetzung des Bauxits untersucht (s. Abb. 5.5).

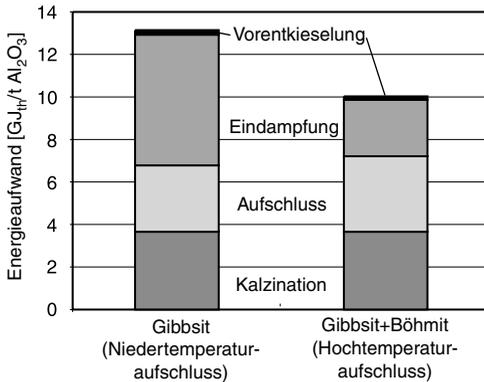


Abb. 5.5. Vergleich des Wärmebedarfs für Nieder- und Hochtemperaturaufschluss

Auf Grund der unterschiedlichen Eigenschaften der Aluminiumminerale müssen je nach Zusammensetzung des Bauxits (Gibbsit, Böhmit und Diaspor) unterschiedliche Aufschlussparameter (Laugenkonzentration und die Temperatur) eingestellt werden. Hierdurch wird der Energieaufwand und Energieverlust im Autoklaven beeinflusst. Bei einer Umstellung von Niedertemperaturaufschluss zur Laugung des Gibbsits auf Hochtemperaturaufschluss zur Laugung von Gibbsit und Böhmit sinkt zwar die Laugenmenge, gleichzeitig steigt jedoch die Aufschlusstemperatur. Trotz des Anstiegs des Energieaufwands und der Energieverluste im Aufschlussprozess lohnt sich unter den angenommenen Prozessbedingungen der Aufschluss von Böhmit, da unter Betrachtung des gesamten Energieaufwands im Tonerdeverfahren der Einfluss der Laugenmenge den Einfluss der höheren Aufschlusstemperatur übertrifft.

6 Energieeinsatz bei der primären Aluminiumverhüttung

Primäraluminium wird großtechnisch ausschließlich durch die Reduktion von Aluminiumoxid in der Schmelzflusselektrolyse erzeugt. Abb. 6.1 zeigt die Anteile führender Staaten an der Weltproduktion. Analog zur Bauxit- und Tonerdege-

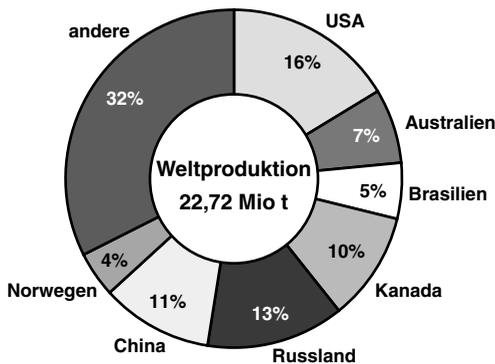


Abb. 6.1. Führende Staaten der Primäraluminiumherstellung 1998 [40]

winnung verteilt sich auch der Großteil der Primäraluminiumherstellung auf wenige Länder. Hier erzeugen nur 7 Staaten 2/3 des jährlichen Metallausstoßes. Neben großen Tonerdeproduzenten wie Australien, USA und China finden sich darunter auch Kanada und Norwegen, die bei der Tonerdeherstellung nur eine untergeordnete oder keine Rolle spielen. Wichtigster Standortfaktor für eine Primäraluminiumhütte ist die ausreichende Verfügbarkeit preiswerter Elektrizität, da Stromkosten den weitaus größten Anteil an den Gesamtkosten für die Aluminiumelektrolyse haben. Auf Grund niedriger Stromerzeugungskosten von Wasserkraftwerken an besonderen Standorten wie z. B. Norwegen und Kanada sind diese Länder bevorzugte Standorte der Primäraluminiumindustrie.

6.1 Prozesskette der primären Verhüttung

Ein allgemeines Modell zur Abbildung einer Aluminiumhütte umfasst neben der Elektrolysezelle die vor- und nachgelagerten Prozessschritte der Anodenherstellung und der Abgasreinigung, wobei das Modul Anodenherstellung bei Hütten mit Söderbergöfen keinen Brennprozess enthält. Abb. 6.2 veranschaulicht die all-gemeingültige Prozesskette einer Aluminiumhütte mit den relevanten ein- und austretenden Stoff- und Energieströmen. Die energetischen Analysen konzentrie-

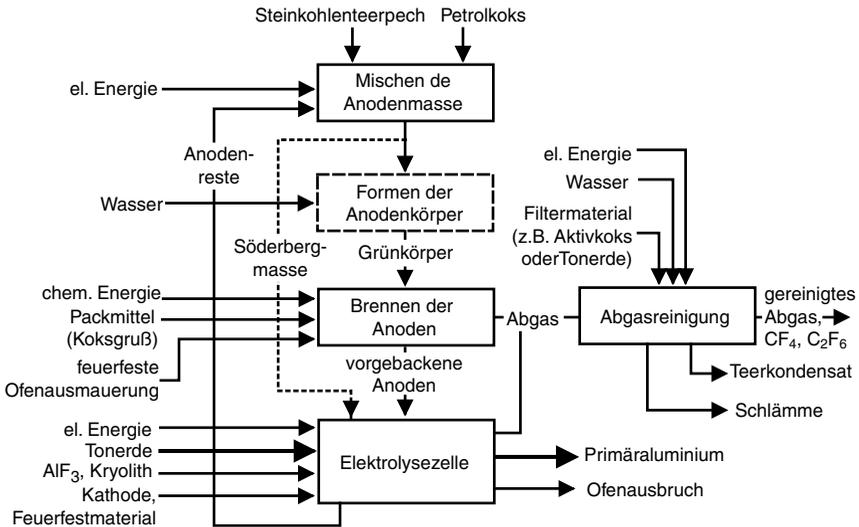


Abb. 6.2. Relevante Module, Stoff- und Energieströme der Aluminiumhütte

ren sich auf die Energieeinsätze der Elektrolyse und der Anodenherstellung sowie deren Bereitstellung. Innerbetriebliche Transportprozesse, die Bereitstellung diverser Hilfsstoffe und Nebenprozesse wie z. B. die Abgasreinigung werden aufgrund der vergleichsweise geringen Relevanz vernachlässigt.

6.2 Elektrolysetechnik

Zur primären Aluminiumerzeugung wird Al_2O_3 in einem Fluoridelektrolyten gelöst und bei einer Stromstärke bis 320 kA und einer Spannung von ca. 4,5 V kathodisch abgeschieden. Flüssiges Aluminium sammelt sich am Boden der Zelle

und kann dort abgesaugt werden.

Die eingesetzten Elektrolysezellen unterscheiden sich hinsichtlich der Art der Anoden sowie in der Art der Tonerdechargierung. Bei den Anoden werden zwischen Söderberg-Anoden und vorgebrannten Anoden unterschieden. Söderberg-Anoden bestehen aus einer vorgemischten Anodenmasse aus (Steinkohlen-)Teerpech und kalziniertem (Petrol-)Koks, die kontinuierlich während des Elektrolysebetriebs durch die Ofenhitze zu fester Anodenkohle verbackt. Bei der Stromzuführung werden horizontal (HSS = Horizontal Stud Söderberg) oder vertikal (VSS = Vertikal Stud Söderberg) in die Anodenmasse ragende Strombolzen unterschieden.

Qualitative Anforderungen und unzureichende Kapselung der Zellen führten zur Entwicklung der vorgebrannten Anoden. Diese werden in einem vorgelagerten Prozessschritt aus Pech, Petrolkoks und Anodenresten hergestellt. Die Mischung wird geformt und in gas- oder ölbeheizten Ringkammeröfen gebrannt. In die Oberseite dieser Anodenblöcke werden anschließend Stromzuführungsbolzen eingelassen. So vorbereitete Anoden werden in das Elektrolysebad eingehängt und an die Stromzuführung angeschlossen. Zellen mit solchen Anoden werden als PB-Zellen bezeichnet (PB = Pre Baked).

Hinsichtlich der Art der Tonerdezugabe lassen sich drei PB-Techniken unterscheiden. Bei der ältesten Methode wird die Kruste aus erstarrtem Elektrolyt und Tonerde seitlich mit Brechhämmern oder -rädern aufgebrochen und eine größere Menge Tonerde in das Elektrolysebad nachchargiert. So werden die sogenannten Side Worked-PB-Zellen (SWPB), wie auch HSS- und VSS-Zellen mit Tonerde versorgt. Auf Grund der auftretenden Verstaubung sowie unzureichender Möglichkeit der Dosierung und Automatisierung wurden die PB-Zellen weiterentwickelt. In CWPB-Zellen (Center Worked Pre Baked) wird die Kruste in der Mitte zwischen zwei Anodenreihen durch einen Stahlbalken durchbrochen und die Tonerde dort nachchargiert. Dieser Zellentyp wurde schließlich zu den sogenannten PFPB-Zellen (Point Feeder Pre Baked) weiterentwickelt, bei denen mehrere Dosierstößel den Brechbalken der CWPB-Zelle ersetzen. Die Tonerdezufuhr erfolgt öfter, in kleineren Mengen und wird durch kontinuierliche Überwachung der Zellenspannung gesteuert. So wird eine wesentlich konstantere Al_2O_3 -Konzentration im Elektrolyten erreicht, wodurch die Zahl der Anodeneffekte¹ sinkt, Emissionen insbesondere von Fluorkohlenstoff vermindert werden und die Stromausbeute gesteigert wird.

Die Anteile der verschiedenen Elektrolysesysteme an der weltweit installierten Kapazität zeigt Abb. 6.3 [49]. Danach wird in fast der Hälfte der Primäraluminiumhütten moderne PFPB-Technik eingesetzt, und knapp ein Drittel der Kapazität wird durch Söderbergöfen gedeckt.

¹ Beim Anodeneffekt bewirkt eine zu geringe Al_2O_3 -Konzentration einen starken Anstieg der Anodenüberspannung, eine Verringerung der Stromausbeute und die Bildung von CF_4 und C_2F_6 .

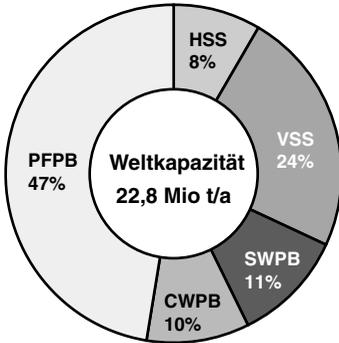


Abb. 6.3. Anteile verschiedener Zelltypen an der 1998 weltweit installierten Kapazität

6.3 Elektrizitätsbedarf der Elektrolyse

Die elektrische Energie bei der elektrochemischen Verhüttung von Tonerde wird benötigt, um die folgenden Verbräuche und Verluste zu decken:

- Energie zur Zersetzung des Aluminiumoxids
- Energie zur Aufwärmung und zum Schmelzen der Einsatzstoffe
- Energie zum Ausgleich der Wärmeverluste der Zelle
- Energie zum Ausgleich der elektrischen Verluste der Zelle.

6.3.1 Theoretischer Energiebedarf

Die Abscheidung von Aluminium unterliegt dem Faradayschen Gesetz, nach dem die abgeschiedene Stoffmasse proportional zur elektrischen Ladung Q_{spez} ist, die den Elektrolyten durchgeflossen hat. Damit berechnet sich der spezifische Energiebedarf E_{spez} zur Abscheidung von 1 kg Aluminium zu

$$E_{spez} = \frac{Q_{spez} \cdot U}{\eta} = 2,9801 \cdot \frac{U}{\eta} \cdot \frac{\text{kAh}}{\text{kg Al}} \quad (6.1)$$

Es wird deutlich, dass sich der spezifische Energiebedarf der Elektrolyse senken lässt, indem die Zellspannung U gesenkt und/oder die Stromausbeute η erhöht wird. Die einzigen heute kontinuierlich messbaren Daten der Elektrolyse sind die Zellspannung und die Stromstärke der Ofenreihe [46]. Über die erzeugte Metallmenge kann auf die Stromausbeute geschlossen werden. Im Folgenden werden die Einflussparameter auf Stromausbeute und Zellspannung diskutiert.

6.3.2 Stromausbeute

Die Stromausbeute ist definiert als der Quotient von theoretisch zu tatsächlich benötigter Ladungsmenge bzw. als Quotient von tatsächlich zu theoretisch abgeschiedener Aluminiummasse. Sie liegt bei heutigen Elektrolysezellen zwischen 0,88 und 0,96. Eine Stromausbeute von 98% wird derzeit als technisch maximal erreichbar angenommen [67]. Die Größe der Stromausbeute wird von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Dazu zählen die Temperatur, die Stromdichte, der Elektrodenabstand, die Zusammensetzung des Elektrolyten und das Zeldesign [20]. Hauptursache für die Ausbeuteverluste ist die Reoxidation des im Elektrolyten gelösten Aluminiums durch das an der Anode gebildete CO_2 . Um eine hohe Stromausbeute in der Elektrolyse zu erzielen, ist es zum einen wichtig, ein möglichst unbewegtes, flaches Metallbad in der Zelle zu halten, das die Rücklösung von Aluminiummetall im Elektrolyten erschwert. Dies wird durch eine optimierte Konstruktion der Stromschienen und Kompensation der Magnetfelder erreicht. So konnte die Bewegung des Metallbads von 10-15 cm/s in 1948 auf 4-6 cm/s in 1998 gesenkt werden. Durch einen erhöhten Gehalt an AlF_3 im Elektrolyten wurde außerdem die Löslichkeit von Aluminium im Elektrolyten gesenkt und so ebenfalls die Rückoxidation erschwert [46].

Neben der Reoxidation des Aluminiums mit CO_2 können Reaktionen mit anderen im Elektrolyten oder der Schmelze gelösten Verunreinigungen zu Verlusten der Stromausbeute führen. Am bedeutendsten ist dabei Phosphor, der als P_2O_5 mit der Tonerde in die Elektrolysezelle gelangt. Bei einem Phosphorgehalt von 400 ppm ist mit Verlusten der Stromausbeute von bis zu 3% zu rechnen. Andere Verunreinigungen, die ebenfalls zu verringerten Stromausbeuten beitragen, sind Vanadium, Eisen und Titan. Die theoretischen Verluste der Stromausbeute betragen hier 0,65%, 0,30% und 0,75% pro 100 ppm im Elektrolyten. Diese Elemente reichern sich nicht wie Phosphor im Elektrolyten an, sondern ihr Anteil bleibt bei einem Gehalt von 1-7 ppm relativ konstant. Wasser kann ebenfalls zu Verlusten der Stromausbeute führen. Die Zugabe von Tonerde mit einem Wassergehalt von 0,1% führt zu einem Verlust der Stromausbeute von 0,18% [1, 19].

6.3.3 Zellspannung

Die Zellspannung U setzt sich zusammen aus [55]

$$U = E_0 + U_{AR} + U_{AC} + U_C + I \cdot \left(R_A + \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{l}{A_B} + R_C + R_{ex} \right). \quad (6.2)$$

Die einzelnen Spannungen bzw. Widerstände sind in Tabelle 6.1 mit den jeweils durchschnittlichen Spannungsabfällen angegeben. Durch die Elektrochemische Zersetzungsspannung E_0 wird die Energie bestimmt, die der Elektrolyse zwingend in Form von elektrischer Energie zugeführt werden muss. Weitere benötigte Energien, beispielsweise zur Aufheizung der Eingangsstoffe oder der Deckung der

Wärmeverluste, können der Elektrolysezelle theoretisch auch auf anderem Weg zugeführt werden. E_0 ist nur abhängig von der Temperatur und der Konzentration des Al_2O_3 im Elektrolyten und beträgt etwa 1,2 V.

Tabelle 6.1. Zusammensetzung der Zellspannung

		Durchschnittlicher Spannungsabfall
E_0	Elektrochemische Zersetzungsspannung	1,20 V
U_{AR}	Anodische Überspannung (reaktionsabhängig)	0,50 V
U_{AC}	Anodische Überspannung (konzentrationsabhängig)	0,02 V
U_C	Kathodische Überspannung	0,08 V
R_A	Ohmscher Widerstand der Anode	0,25 V
$R_{Bad} = \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{l}{A_B}$ ^a	Ohmscher Widerstand des Bads	1,85 V
R_C	Ohmscher Widerstand der Kathode	0,50 V
R_{ex}	Externe Widerstände	0,25 V
Gesamt		4,65 V

^a I = Stromstärke; κ = elektrische Leitfähigkeit des Bads; l = Interpolarabstand; A_B = effektive Fläche des Bads

Die anodische Überspannung U_A setzt sich zusammen aus der reaktionsabhängigen Überspannung U_{AR} und der konzentrationsabhängigen Überspannung U_{AC} . Sie steigt mit zunehmender anodischer Stromdichte ab etwa 0,5 A/cm² relativ schnell an und beträgt bei den heute betriebenen Anlagen mit einer Stromdichte von 0,8 A/cm² immer mehr als 0,4 Volt. Aus diesem Grund wurde der Verringerung der anodischen Stromdichte zur Minimierung des Energieaufwands besondere Beachtung geschenkt. Die anodische Stromdichte lässt sich verringern, indem die aktive Anodenfläche vergrößert wird. Die Verringerung der anodischen Stromdichte von 1,2-1,3 A/cm² in 1948 auf 0,8-0,85 A/cm² in 1998 führte zu einer Senkung der anodischen Überspannung um 0,35-0,4 Volt [20, 45].

Die Kathodenüberspannung U_C trägt weniger zum Gesamtwiderstand bei, sie beläuft sich auf etwa 0,05 bis 0,2 V [46]. Ein großes molares Verhältnis NaF/AlF₃ im Elektrolyten sowie eine geringe kathodische Stromdichte führen auch hier zu einer Verringerung der kathodischen Überspannung. Durch die Vergrößerung der aktiven Kathodenfläche kann die Gesamtzellspannung allerdings nur wenig verringert werden [55].

Der ohmsche Widerstand des Bads R_{Bad} erlaubt die größten Verringerungen der Zellspannung bei gleichbleibender Stromstärke [20]. Er sinkt mit steigender Leitfähigkeit κ und aktiver Fläche A_B des Bads, nimmt dagegen mit zunehmendem Interpolarabstand l zwischen Anode und Kathode zu. Die Leitfähigkeit des Bads wird bestimmt durch seine chemische Zusammensetzung und die Temperatur.

Neben dem Hauptbestandteil Kryolith, Na_3AlF_6 , setzen sich heutige Elektrolyte aus zusätzlichem AlF_3 , CaF_2 , MgF_2 und in einigen Anlagen LiF zusammen. Während AlF_3 und LiF (als Li_2CO_3) zugesetzt werden (müssen), reichern sich CaF_2 und MgF_2 durch Eintrag über die Tonerde im Bad an. Die elektrische Leitfähigkeit kann beispielsweise aus der Zusammensetzung des Bads nach Choudhuri berechnet werden [22].

$$\kappa = \exp(2,015 - 0,0207 \cdot \xi_{\text{Al}_2\text{O}_3} - 0,005 \cdot \xi_{\text{CaF}_2} - 0,0166 \cdot \xi_{\text{MgF}_2} + 0,0178 \cdot \xi_{\text{LiF}} + 0,434 \cdot R - \frac{2068,4}{T}) \quad (6.3)$$

κ = Elektrische Leitfähigkeit des Elektrolyten in $\text{W}^{-1}\text{cm}^{-1}$

R = Massenverhältnis NaF/AlF_3 im Elektrolyten

T = absolute Temperatur in K

ξ_j = Massenanteil im Elektrolyten

Es besteht keine Klarheit über die Wirtschaftlichkeit des Zusatzes von Lithium, der sich ab einer ohne den Zusatz erreichten Stromausbeute von 95% nicht mehr rechtfertigen lässt [31]. Der Widerstand des Bads wird außerdem beeinflusst durch den Interpolarabstand zwischen Anode und Kathode. Dieser beträgt bei modernen Zellen $3,5 \pm 2$ cm (10-14% AlF_3) [55]. Die Verringerung des Interpolarabstands von 6 cm auf 3,5 cm senkt den Spannungsabfall im Elektrolyten um etwa 0,7 Volt.

Der elektrische Widerstand der Kathode R_C ist abhängig vom Kathodenmaterial und der Anordnung der kathodischen Stromschienen. Die als vorgefertigte Blöcke verwendeten Materialien lassen sich unterscheiden nach der Art der Herstellung. Sie besitzen je nach Material unterschiedliche elektrische Leitfähigkeiten zwischen $8\text{-}50 \text{ W}^{-1}\text{mm}^{-1}$. Der Widerstand innerhalb der Kathode kann außer durch die Wahl des Kathodenmaterials verringert werden, indem die Querschnitte der Kathodenstromschienen vergrößert werden. Für eine Vergrößerung von 50% werden Verringerungen des Spannungsabfalls von 0,04-0,08 V angegeben. Der Spannungsabfall in der Kathode kann sich auf 0,4-0,6 V belaufen, allerdings ist es möglich, ihn durch eine geeignete Wahl des Materials und optimierter Verbindungstechnik zwischen Kathode und Stromschiene auf 0,25 V zu senken [20, 55].

Ebenso trägt der Anodeneffekt zur Erhöhung der durchschnittlichen Zellspannung bei. Bei einer je nach Zellen- und Prozesssteuerungstechnik schwankenden Häufigkeit von einem bis zwanzig Anodeneffekten pro Woche lässt sich aus der durchschnittlichen Stromstärke, Häufigkeit und Dauer der Anodeneffekte ein Betrag von 20 bis 150 mV zur Zellspannung errechnen. Durch die Point Feeder-Technologie und die rechnergesteuerte Überwachung der Zellspannung kann der Tonerdegehalt im Elektrolyt sehr konstant gehalten werden. Als Folge treten Anodeneffekte sehr viel seltener auf, und die vollständige Vermeidung dieser Prozessstörung wird in naher Zukunft für technisch erreichbar gehalten [20].

Die Wärmeverluste einer Zelle spielen bei allen Änderungen des spezifischen Energiebedarfs eine bedeutende Rolle. Sinken Spannung oder Stromdichte, muss

die Isolierung der Zelle entsprechend umgestaltet werden, um den geänderten Wärmeverlusten gerecht zu werden. Hier gilt das gleiche wie bei der Betrachtung des Anodeneffekts. Mit Einführung der Point Feeder wurde es möglich, den Wärmehaushalt einer Zelle relativ konstant zu halten, was mit den SWPB- und CWPB-Zellen nicht möglich war.

Eine Senkung des spezifischen Strombedarfs erfordert die Lösung eines vielschichtigen Optimierungsproblems auf der Grundlage der gleichzeitigen Senkung der Zellspannung und Erhöhung der Stromausbeute. So wird z. B. durch eine Verringerung des Polabstands zwar einerseits die Zellspannung reduziert, andererseits verschlechtert sich wegen der verstärkten Rückreaktion des Aluminiums aber die Stromausbeute. Eine weitere typische Optimierungsaufgabe stellt die Auslegung der kathodischen Stromzuführung dar. Bei einem zu groß gewählten Durchmesser der Stromzuführung ist der Wärmetransport durch Wärmeleitung aus dem Zellboden zu groß, während bei einem zu geringen Durchmesser die Verluste durch ohmsche Widerstände zunehmen.

Die beim Betrieb aufgrund der Spannungsverluste entstehende Wärme muss an die Umgebung abgeführt werden, da nur so das thermische Gleichgewicht der Zelle aufrecht erhalten werden kann. Durch eine bessere Isolierung der Elektrolysezelle lässt sich keine Energieeinsparung realisieren, da sie zu einer Überhitzung der Zelle führt. Somit ist die zu optimierende Größe bei der wärmetechnischen Auslegung die Wärmeabgabe der Zelle, damit nicht die Gefahr besteht, dass die Zelle einfriert oder sich überhitzt.

Theoretisch ist eine Nutzung der Abwärme insgesamt z. B. zu Heizzwecken möglich. Allerdings stellt sich neben dem beträchtlichen apparativen und damit finanziellen Aufwand das prinzipielle Problem der jahreszeitlich schwankenden Wärmenachfrage. In der Praxis wird daher die bei der Elektrolyse erzeugte Wärme durch Strahlung und Konvektion in die Fabrikhalle abgegeben.

6.3.4 Energiebedarf heutiger Elektrolysen

Die insgesamt fünf Zelltypen unterscheiden sich durch den spezifischen Stromverbrauch (Abb. 6.4). Die auftretenden Bandbreiten sind im jeweiligen Stand der eingesetzten Technik hinsichtlich Prozessüberwachung, Automatisierungsgrad, Optimierung der Stromzufuhr, Kompensation der Magnetfelder, Badzusammensetzung und Qualität der Anodenmaterialien begründet. Jedoch lassen kapazitätsgewichtete Mittelwerte die Tendenz erkennen, dass die Söderberg-Technik als ältestes Verfahren den höchsten und moderne PFPB-Zellen den geringsten spezifischen Stromverbrauch aufweisen. Dabei beinhaltet der Stromverbrauch der Söderbergzellen allerdings auch den Energieaufwand zum Brennen der Anodenmasse in der Elektrolysezelle, das bei den PB-Zellen in einem getrennten Prozessschritt erfolgt. Obwohl CWPB-Elektrolysen gegenüber SWPB-Zellen eine modernere Technologie repräsentieren, weisen diese im Mittel einen höheren Stromverbrauch auf. Dies ist damit zu erklären, dass viele ursprüngliche CWPB-

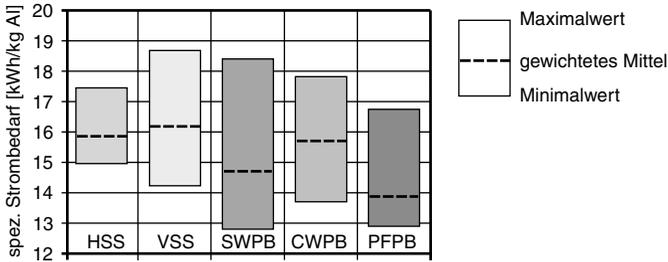


Abb. 6.4. Stromverbräuche verschiedener Elektrolysesysteme nach [49]

Öfen im Rahmen von Optimierungsmaßnahmen auf PF-Technik umgerüstet worden sind, während der entsprechende Umbau von SW-Elektrolysen deutlich aufwendiger ist und somit in diesem Fall prozessintern optimiert wird. Bei den nicht umgerüsteten CW-Zellen ist eine Optimierung z. B. auf Grund geringer Stromkosten wahrscheinlich in keinerlei Hinsicht wirtschaftlich.

Einen zusätzlichen relevanten Beitrag zur Energieversorgung des Elektrolyseprozesses liefert die Verbrennung der Kohlenstoffanoden. Abb. 6.5 zeigt analog zu Abb. 6.4 Bandbreiten und kapazitätsgewichtete Mittelwerte der Anodenverbräuche verschiedener Zelltypen. Wie beim Stromverbrauch können die Band-

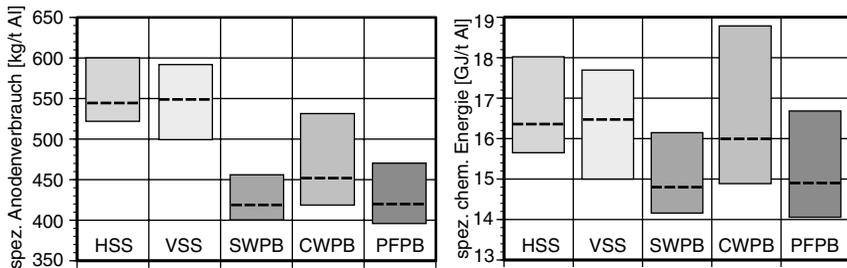


Abb. 6.5. Vergleich verschiedener Elektrolysen hinsichtlich des Anodenverbrauchs (nach [49]) bzw. des Einsatzes chemischer Energie

breiten mehr als 25% bezogen auf den jeweiligen Maximalwert betragen, und der Anodenbedarf nimmt tendenziell mit dem Modernisierungsgrad der Zellen zu. Davon ausgenommen ist wiederum die CWPB-Technik (s. o.). Neben dem stoffgebundenen Energieinhalt der Anoden sind bei PB-Zellen auch die Energieaufwendungen für das Brennen der Anoden zu berücksichtigen. Die Grundmasse für die Herstellung besteht zu 85% aus Petrolkoks und zu 15% aus Steinkohlenteerpech als Bindemittel. Dabei wird bis zu 30% des Petrolkoks durch aus der Elek-

trollyseanlage zurückgeführte und aufbereitete Anodenreste ersetzt. Die vorge-mischte Masse wird mit einem Rüttel- oder Vibrationsverdichter zu grünen Anodenblöcken geformt und anschließend unter Zusatz von ca. 45 kg Koksgruß/t Anode als Packmaterial in einen Ringkammerofen gesetzt und bei bis zu 1200°C gebrannt. Beim Brennen wird das Bindemittel pyrolysiert, und es bildet sich ein festes Gerüst aus Kohlenstoff, das die Kokspartikel zu einem festen und homogenen Block verbindet. Der Massenverlust bei der Pyrolyse beträgt etwa 7% der eingesetzten Masse und ist auf das Abspalten und das Verdampfen flüchtiger Komponenten zurückzuführen [20]. Unter Berücksichtigung des Energieinhalts von Brennstoff und Packmaterial für das Anodenbrennen kann dann sogar eine PFPB-Anlage einen größeren chemischen Energiebedarf aufweisen als eine Söderbergzelle (s. Abb. 6.5). Im Mittel ändert sich die beschriebene Technikabhängigkeit des Energiebedarfs aber nicht, insbesondere bei Betrachtung des gesamten Endenergieeinsatzes, der eindeutig von elektrischer Energie geprägt ist.

6.3.5 Zukünftige Entwicklungen

Der Entwicklung eines benetzbaren Kathodenmaterials wurde in den letzten Jahren große Beachtung geschenkt. Hierbei entfällt die Notwendigkeit, in der Zelle ein relativ hohes Metallbad, das eine unruhige, bewegte Oberfläche besitzt, aufrecht zu erhalten. Der Interpolarabstand kann verringert werden, da die Zelle mit einem dünnen Film an Aluminium arbeiten kann. Die Entwicklung solcher Zellen sollte die Zellspannung und damit einhergehend den spezifischen Energieverbrauch, bezogen auf moderne PFPB-Zellen, um 8-15% verringern. Von Comalco wurde im November 1998 erstmals eine drainierte Zelle mit benetzbarer Kathode vorgestellt. Die Energieaufwendungen einer solchen Zelle sollen bei 13,3 kWh/kg Al bei einer Stromdichte von 0,99 A/cm² bzw. bei 12,8 kWh/kg Al mit 0,97 A/cm² und einem Interpolarabstand von 20 mm liegen. Damit ist der Energieaufwand einer solchen Zelle noch nicht geringer als der einer modernen Zelle mit großer Stromdichte. Dies mag aber auch an der mit 92 kA geringen Größe und zur Deckung der Wärmebilanz recht hohen erforderlichen Stromdichte von bis zu 1,20 A/cm² der Zelle liegen [55, 67].

Ziel der Forschung bleibt weiterhin die Entwicklung von inerten Anoden. Damit wird auch die Entwicklung einer geschlossenen, bipolaren Zelle möglich. Mit den Vorteilen einer inerten Anoden geht allerdings auch der Nachteil der Erhöhung der reversiblen Zellspannung um etwa 1 V einher. Es bleibt die Hoffnung, dass dies durch Verringerung der ohmschen Widerstände und der Anodenüberspannungen wettgemacht werden kann [46].

7 Energieaufwendungen für die sekundäre Herstellung

Seit Beginn der Aluminiumherstellung hatte die Wiederverwertung von genutzten Aluminiumprodukten stets eine große Bedeutung. Zum einen lässt sich das Metall mit nur geringem Verlust wiedereinschmelzen, und zum anderen ist der Primärenergieaufwand des Schmelzprozesses in jedem Fall deutlich geringer als der der primären Verhüttung, so dass Aluminiumrecycling bei Verfügbarkeit qualitativ hochwertiger Schrotte sehr wirtschaftlich ist. Mit dem ökonomischen Nutzen gehen auch ökologische Vorteile einher, die sich aus Ressourcenschonung, Emissionsminderung und Abfallvermeidung ergeben.

Wie aus Abb. 7.1 hervorgeht dominieren auch in der Sekundäraluminiumwirtschaft wenige Staaten die weltweite Gesamtproduktion.

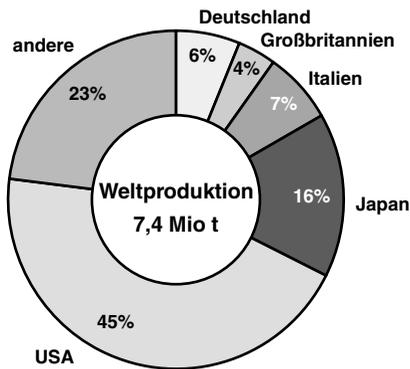


Abb. 7.1. Wichtige Staaten der Aluminiumschrottverwertung

Hier verteilen sich mehr als 3/4 der Verwertung weltweit auf nur fünf Länder. Dabei entfällt allein auf die USA fast die Hälfte der Recyclingaktivitäten. Allgemein repräsentieren die führenden Aluminiumverwerter gleichzeitig auch die Staaten mit der größten Aluminiumnutzung (vgl. Abb. 2.2), da im Gegensatz zur primären Herstellung bis zum Halbzeug beim Recycling große Transportentfernungen vermieden werden. Auf Grund der großen räumlichen Dispersion von

Aluminiumprodukten während der Nutzungsphase können sich bei der Schrotterfassung bereits auf lokaler Ebene hohe logistische Anforderungen ergeben.

7.1 Prozessketten der Sekundärproduktion

Wegen der Vielzahl unterschiedlicher Aluminiumanwendungen (s. Abb. 2.3) bzw. -produkte sind auch jeweils spezielle Recyclingverfahren entwickelt worden, so dass in der Sekundäraluminiumindustrie einerseits eine große Vielfalt von produktgruppenspezifischen Prozessketten besteht, für die andererseits dann noch technische Alternativen zur Verfügung stehen. Allgemein lässt sich jede Prozesskette des Recycling in die drei Ebenen der Erfassung, Aufbereitung und Verhüttung unterteilen (s. Abb. 7.2). Dabei werden die einzelnen Verfahren der verschie-



Abb. 7.2. Allgemeine Prozesskette bzw. Ebenen des Recyclings

denen Ebenen jeweils durch Transportprozesse verbunden. An der Schnittstelle zur Nutzungsphase werden durch die Erfassung, die technisch gesehen selbst einen Transportvorgang darstellt, genutzte Produkte der Verwertung zugeführt. Die Aufbereitung ist dann meist als mehrstufiger Prozess mit verschiedenen Verfahren ausgeführt, die auch wiederum oft räumlich getrennt sind und somit zusätzliche zwischengeschaltete Transporte erfordern. Produkt der Aufbereitung ist ein verhüttungsfähiges Material, das im letzten Recyclingschritt eingeschmolzen wird. Dabei lässt sich in der industriellen Praxis die sekundäre Verhüttung meist nicht von der Legierungsherstellung aus primärem Vorstoff trennen (vgl. Abb. 2.4), da hier häufig legierte sekundäre Vorstoffe zusammen mit unlegiertem Primärmetall geschmolzen werden, um die Ziellegierung einzustellen.

Im Folgenden werden die für das Aluminiumrecycling eingesetzten Techniken vorgestellt. Für Transporte innerhalb der Verwertung kommen fast ausschließlich LKW zum Einsatz, so dass hierzu auf Kapitel 4.5 verwiesen wird.

7.2 Aufbereitungsverfahren

Um aus den unterschiedlichen aluminiumhaltigen Gütern nach ihrer Nutzungsphase sekundäre Rohstoffe gewinnen zu können, müssen sie aufbereitet werden. Aufbereitung ist im Wesentlichen eine Konzentrierung des zu gewinnenden Stoffs, also in diesem Fall des Aluminiums. Die verschiedenen Aufbereitungsverfahren des Aluminiumrecyclings dienen dem Ziel, ein verhüttungsfähiges Material zu erhalten.

Abhängig von der Beschaffenheit des Produkts, welches verwertet werden soll,

kommen unterschiedliche Techniken zum Einsatz. So ist es für die Wahl der Aufbereitungstechnik zum Beispiel entscheidend, ob das Produkt aus vielen verschiedenen Materialien zusammengesetzt ist oder aus reinem Aluminium besteht. In der Aufbereitungstechnik gibt es zwei wesentliche Verfahrensschritte [28]:

- Zerkleinern
- Sortieren oder Klassieren

Das Zerkleinern wird in der Aufbereitung z .B. dann eingesetzt, wenn das zu rezyklierende Gut aus mehreren Materialien besteht und die verschiedenen Materialien voneinander getrennt werden sollen. Dazu stehen verschiedene Verfahren zur Auswahl. Die Bandbreite reicht allein beim Altauto-Recycling von der Demontage einzelner Bauteile von Hand bis zum Schredder, in dem die Restkarosse zerkleinert wird.

Das Sortieren oder Klassieren schließt sich häufig an einen Zerkleinerungsschritt an. Nur wenn ein aus reinem Aluminium bestehendes Produkt von anderen getrennt werden soll, kann das Sortieren der einzige Aufbereitungsschritt sein. Das Klassieren, das Trennen disperser Feststoffe nach Korngröße, ist von dem Sortieren, dem Trennen nach Stoffart, zu unterscheiden. Für beide Trennungsmethoden steht eine große Auswahl an Apparaten und Verfahren zur Verfügung. Verfahren wie die rein mechanische Siebklassierung, die Dichtentrennung oder elektromagnetische Sortierung werden in den verschiedenen Prozessketten des Aluminiumrecycling eingesetzt.

Neben den Prozessen, die sich eindeutig als Sortieren/Klassieren oder Zerkleinern identifizieren lassen, gibt es auch viele, die einer Schnittmenge zuzuordnen sind. Darunter fällt zum Beispiel die Pyrolyse, ein thermisches Verfahren, das durch Abschwelen von organischen Komponenten eine Metallfraktion erzeugt (s. Kapitel 7.2.7).

7.2.1 Schredder

Unter einem Schredder versteht man eine Rotormühle, die große Einheiten in Teile mit einem Durchmesser bzw. einer Kantenlänge von etwa 10 cm zerlegt. Das großformatige Aufgabegut wird durch Einzugsrollen vorverdichtet und in das eigentliche Schreddergehäuse geschoben. Dort werden zunächst von den rotierenden Hämmern kleinere Stücke über den Amboss abgeschert. Diese Stücke werden durch den Zusammenprall mit den Hämmern und dem Gehäuse weiter zerkleinert, bis sie durch das eingebaute Rost passen. Dem Schredder ist ein Trenn- bzw. Fraktionierungsprozess nachgeschaltet, der in der Regel mit einer Entstaubungsanlage beginnt. In ihr wird die Saugluft in Zyklonen oder einer Venturi-Waschanlage gereinigt. Die nachfolgenden Trennprozesse sind abhängig vom Aufgabegut und ergeben sich durch die Prozesskette, in die der Schredder eingebunden ist.

Das Aufgabegut kann rein metallisch oder aus verschiedenen Stoffen zusammengesetzt sein. Ist ein metallischer Stoff mit sprödem Material verbunden, findet im Schredder eine selektive Zerkleinerung statt. Das duktile Metall verformt sich

im Schredder, während das spröde Material zerkleinert wird.

7.2.2 Manuelle Demontage

In Demontageanlagen werden Produkte, die aus mehreren Bauteilen bestehen, von Hand in ihre Komponenten zerlegt. Dadurch ist es möglich, die Materialien und Bauteile zielgenau dem jeweils effizientesten Recyclingweg zuzuführen. Da nach der Demontage sortenreine Bauteile vorliegen, können diese meist ohne einen weiteren Aufbereitungsschritt direkt umgeschmolzen werden. Der hohe Schrottwert dieser großstückigen Teile macht die Demontage auch wirtschaftlich interessant. Bauteile, die noch funktionstüchtig sind, werden als Ersatzteile verkauft und somit der höchsten Stufe des Recyclings, der Wiederverwertung, zugeführt.

7.2.3 Schwimm-Sink-Anlage

Das Verfahren der Schwimm-Sink-Anlage beruht auf dem Prinzip der Trennung nach Dichte. Oft ist eine Schwimm-Sink-Anlage hinter eine Zerkleinerungsstufe (Schredder) und erste Trennstufen (Siebe und Magnetscheider) geschaltet und dient somit der Sortierung einer fein zerkleinerten Nichteisenfraktion. Das Aufgabegut wird zunächst gewaschen, um anhaftenden Staub von der Oberfläche abzureinigen und so die nachfolgende Schwertrübescheidung vor einer Belastung mit Feinkorn zu schützen. Danach gelangt die Fraktion in die erste Stufe der Schwimm-Sink-Anlage. Dort wird mit einer Trübe aus Magnetit und Wasser eine Dichte von $1,9 \text{ g/cm}^3$ eingestellt. Mit dieser Dichte fällt eine Gummi/Magnesium-Fraktion als Schwimmgut an, welche über einen nachgeschalteten Wirbelstromscheider weiter aufgetrennt wird. Die Trübe wird wieder aufbereitet und im Kreislauf gefahren. Die Verluste an Magnetit liegen bei etwa 2-2,5 kg pro Tonne Aufgabegut und treten hauptsächlich im Schlamm der Wasseraufbereitung auf. Die Anhaftungen des Schwerstoffs Magnetit an dem Material der Fraktion werden durch Abtropfen und Abbrausen des Materials zurück gewonnen. In der zweiten Dichtestufe wird eine Schwertrübe aus Ferrosilizium und Wasser mit einer Dichte von $3,0 \text{ g/cm}^3$ eingesetzt. Damit fallen als Schwimmgut eine Aluminium-Steine-Mischfraktion und als Sinkgut Buntmetalle wie Kupfer oder Zink an. Die Aluminium-Steine-Mischfraktion wird über einen Wirbelstromscheider in eine Aluminium- und eine Steine-Fraktion aufgetrennt, die Buntmetalle werden per Handsortierung getrennt. Die Verluste an Schwertrübe betragen in der zweiten Stufe etwa 2-2,5 kg pro Tonne Aufgabegut und werden durch Oxidation und Anhaftungen an der Produktfraktion, die sich nicht abbrausen lassen, hervorgerufen.

7.2.4 Wirbelstromscheider

Das Verfahren der elektromagnetischen Trennung, die Wirbelstromscheidung, er-

möglicht eine Trennung von Nichteisenmetallen wie Aluminium und Nichtmetallen wie Kunststoffen [24]. Häufig wird es angewendet, um eine zerkleinerte Fraktion, zum Beispiel das Produkt eines Schredders, aufzutrennen. Diese Fraktion sollte keine Eisenpartikel enthalten, da diese das Wirkprinzip der elektromagnetischen Trennung beeinträchtigen würden. Deshalb ist einer Wirbelstromscheidung immer eine Magnetscheidung vorzuschalten, welche eisenhaltige Partikel abtrennt. Das Aufgabematerial wird über eine Vibratorrinne auf ein umlaufendes Transportband aufgebracht, damit es als dünne Schicht über die Walze läuft. Im Innern der Walze dreht sich mit hoher Geschwindigkeit ein Polrad, welches mit Magneten besetzt ist. Durch das Magnetfeld werden in den elektrischen Leitern Wirbelströme erzeugt, welche nach der Lenz'schen Regel ihrerseits ein dem ursprünglichen Erregerfeld entgegengesetztes Magnetfeld produzieren. Die abstoßende Kraft bewirkt, dass Nichteisenmetalle fast radial aus der Gesamtfraktion herausgeschleudert werden, während Nichtleiter der normalen Wurfparabel folgen. Mit Hilfe eines einstellbaren Trennblechs werden die einzelnen Fraktionen separat aufgefangen. Wie weit die Flugbahn ist, hängt von Größe, Masse und Aluminiumanteil des Partikels ab. So werden reine Aluminiumteilchen weiter herausgeschleudert als Verbunde, die nur einen geringen Aluminiumanteil aufweisen. Dementsprechend können mit einem zweiten Blech insgesamt drei Fraktionen gewonnen werden (Nichtleiter, Vollaluminium und Aluminiumverbunde). Die optimale Trennschärfe eines Wirbelstromscheiders kann einerseits durch eine geeignete Aufstellung des Trennblechs und andererseits durch eine Beschränkung der Korngrößen erreicht werden. Ideal ist eine Korngrößenverteilung, deren untere Grenze ein Drittel der oberen beträgt. Auch die Form der abzutrennenden Partikel ist entscheidend, so sind zum Beispiel sehr kleine (< 2 mm) oder sehr langgestreckte Partikel (Draht) nicht sortierbar, da sich in ihnen kein ausreichender Wirbelstrom ausbilden kann.

7.2.5 Sieben

Das Verfahren des Siebens ist ein reiner Klassiervorgang, der Partikel nach ihrer Korngröße aufteilt. Das Aufgabegut wird mit einem Sieb in zwei Fraktionen getrennt. Werden mehrere Siebe hintereinandergeschaltet, lässt sich das Aufgabegut in entsprechend mehr Fraktionen aufteilen. Siebe werden eingesetzt, um Fraktionen zu erhalten, deren Korngröße für die nachfolgenden Verfahrensschritte geeignet ist. So ist es zum Beispiel sinnvoll, vor einem Wirbelstromscheider Partikel mit einer Größe unter 2 mm auszusieben, da sie mit dem elektromagnetischen Verfahren nicht aussortiert werden können. Der Klassiervorgang des Siebens kann mit einer Sortierung verbunden werden. Das ist dann möglich, wenn die Partikel aus unterschiedlichen Materialien verschiedene Korngrößen haben, wie zum Beispiel nach einer selektiven Mahlung. Die duktilen Stoffe sind verformt, aber unzerkleinert, während die spröden Materialien zerkleinert wurden, und sich somit gut über Siebe abtrennen lassen.

7.2.6 Handklauben

Die Sortierung von Hand wird häufig eingesetzt, wenn der Aufwand für eine automatische Sortierung zu aufwendig oder die Realisierung technisch noch nicht möglich ist. Beispiele hierfür sind das Handklauben von Leichtverpackungen mit Grünem Punkt oder das Sortieren von Buntmetallen nach Schwimm-Sink-Anlagen. Die Effektivität einer Handklaubung ist abhängig von der Größe und den Identifizierungsmöglichkeiten der zu sortierenden Stücke. Eine steigende Anzahl an Sortierern und ein geringer Durchsatz erhöhen die Trennschärfe.

7.2.7 Pyrolyse

Die Pyrolyse ist ein thermisches Verfahren, um beschichtete oder lackierte Metalle von den Kunststoffen oder Lacken und eventuell vorhandenen Füllgutresten (bei Verpackungen) zu trennen. Zunächst wird das Aufgabegut in einer Mühle oder einem Schredder zerkleinert, so dass die spezifische Oberfläche für den Schwelprozess der Pyrolyse ausreichend groß ist. Während der Pyrolyse wird das organische Material bei 500°C durch Schwelen, also unter Ausschluss eines Oxidationsmittels wie Luft, zersetzt und in Gase überführt [8]. Dabei fallen neben den Schwelgasen feste Pyrolyserückstände (Koks) an, die über Siebe abgetrennt werden. Die in Form des Gases und des Kokses freigesetzten organischen Stoffe werden energetisch genutzt, beispielsweise zum Beheizen des Pyrolyseprozesses. Die Pyrolyse liefert eine reine Metallfraktion, die häufig direkt umgeschmolzen werden kann. Der durch den Verfahrensschritt der Pyrolyse bedingte Metallverlust wird einerseits durch Abrieb bei den Mahlvorgängen und andererseits durch nicht erfassbares Metall hervorgerufen. Zum Beispiel ist auf Chipstüten aufgedampftes Aluminium so fein verteilt, dass es sich nach der Pyrolyse in den Rückständen wie Koks wiederfindet und nicht als Metall gewonnen werden kann.

7.2.8 Pressen

Pressen werden eingesetzt, um dünnwandige und lose Teile in die Form chargierfähiger Pakete zu bringen. Es ist wesentlich günstiger, größere Stücke oder Pakete umzuschmelzen, da sie durch ihre geringere spezifische Oberfläche weniger Abbrand verursachen. Feinstückiges Material, das vor dem Schmelzen nicht mehr aufbereitet werden muss, wird deshalb durch Pressen verdichtet, um die spezifische Dichte zu erhöhen. Zum Pressen dünnwandiger Teile werden vorwiegend mobile Pressen verwendet, die hydraulisch arbeiten.

7.3 Schmelztechnologien

Für das Umschmelzen von Aluminiumschrotten stehen mehrere verschiedene

Ofentechnologien zur Verfügung, die sich unter anderem in der Art der Beheizung, der Ofenanordnung oder dem Betriebsablauf voneinander unterscheiden können. So werden die Öfen nach der Art der Beheizung in elektrisch und mit Brennstoffen beheizte Systeme unterschieden. Die durch Brennstoffe beheizten Öfen werden weiter in Drehtrommelöfen, Tiegelöfen und Herdöfen unterteilt. Jedes dieser Ofensysteme weist bestimmte charakteristische Eigenschaften auf, die eine Begrenzung der universellen Einsetzbarkeit zur Folge haben. So sind beispielsweise Drehtrommelöfen trotz eines relativ hohen Energiebedarfs gut geeignet, stark mit oxidischen Anteilen verschmutzte Schrotte zu verarbeiten. Bestimmte Herdöfen haben sich dagegen als besonders geeignet für organisch belastete Schrotte gezeigt.

Die verschiedenen für das Umschmelzen von Aluminiumschrotten zur Verfügung stehenden Ofentechnologien weisen bauartabhängig einen unterschiedlichen spezifischen Energiebedarf für das Schmelzen der Einsatzstoffe auf. Allerdings ist der spezifische Energiebedarf einer Ofenanlage nicht nur von der Bauart abhängig, sondern von vielen verschiedenen Einflüssen wie zum Beispiel:

- Ofentyp und Ofenaufbau
- Art der Beheizung
- Art, Stückgröße und Verunreinigungsgrad der eingesetzten Schrotte
- Art und Menge der Zusatzstoffe
- Chargierzyklen und Betriebsablauf
- Sonstige standortabhängige Faktoren

Eine Aufschlüsselung des Einflusses auf den spezifischen Energiebedarf ist in aller Regel nicht möglich. Um dennoch einen energetischen Vergleich der verschiedenen Ofentechnologien zu ermöglichen, können einfache Wirkungsgraddefinitionen angewendet werden. Bei der hier genutzten Definition des Ofenwirkungsgrads wird die zur Erwärmung des entnommenen Aluminiums benötigte Wärme auf den durchschnittlichen spezifischen Energiebedarf eines Ofens bezogen.

Dabei entsprechen die innerhalb des SFB erfassten Energieverbräuche über einen langen Zeitraum gemittelten Werte für die diversen Ofensysteme. Darin sind die Einflüsse der Betriebsweise und des eingesetzten Schrottgemischs bereits enthalten. Somit können die genutzten Werte der spezifischen Energieverbräuche als charakteristisch für die betrachtete Ofentechnik und das jeweils typische Einsatzspektrum angesehen werden. Dennoch treten in Einzelfällen Unterschiede bei der Angabe eines spezifischen Energieverbrauchs von bis zu 50% auf.

Bei den Berechnungen der Wirkungsgrade der verschiedenen Ofentypen wird mit einer notwendigen Enthalpieerhöhung von 1200 kJ/kg Aluminium für das Erhitzen und Schmelzen gerechnet. Dies entspricht einer Zugabe der festen Aluminiumschrotte bei Umgebungstemperatur und einer Entnahme des Flüssigmetalls bei 750°C [59].

Mit Hilfe dieser Methodik wurden für die unterschiedlichen Anlagentechniken typische Ofenwirkungsgrade ermittelt, die in Abb. 7.3 wiedergegeben sind. Auf Grund der oben angegebenen Ungenauigkeiten bei der Bestimmung des spezifischen Energiebedarfs ist die Angabe des Ofenwirkungsgrads jedoch mit Unge-

naugigkeiten von bis zu 10 Prozentpunkten behaftet.

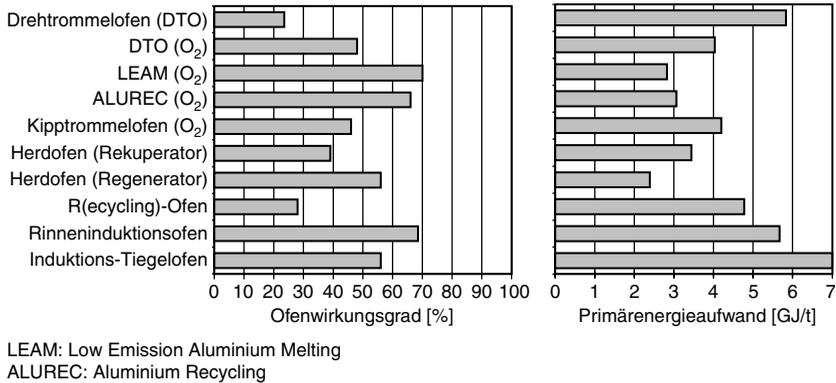


Abb. 7.3. Wirkungsgrad und Primärenergiebedarf verschiedener Ofentypen ($g_i=0,35$, $g_{Br}=0,9$)

Aus dieser Zusammenstellung geht bezüglich des Brennstoffbedarfs eindeutig der Vorteil der neuartigen und optimiert betriebenen Anlagen gegenüber den einfacheren Anlagen hervor. So konnte bei der Weiterentwicklung der Trommelofentechnik der spezifische Brennstoffbedarf und somit der Ofenwirkungsgrad um den Faktor 3 verbessert werden. Allerdings war diese Verbesserung nur durch den Einsatz einer Brennertechnologie möglich, die den Sauerstoff für die Verbrennung direkt in reiner Form zur Verfügung stellt.

Beim Vergleich der elektrisch beheizten Induktionsofensysteme mit den brennstoffbefeuerten luftbetriebenen Systemen erkennt man eine Verdopplung des Ofenwirkungsgrads. Bemerkenswert ist, dass bei Einsatz optimierter Brennersysteme trotz der stets anfallenden Rauchgasverluste die gleichen energetischen Ofenwirkungsgrade wie bei induktiv beheizten Öfen zu erreichen sind. Allerdings müssen zusätzlich zu den hier betrachteten Brennstoffaufwendungen auch die Aufwendungen für die Bereitstellung des Sauerstoffs bzw. der elektrischen Energie berücksichtigt werden.

Aus diesen Gründen muss für einen abschließenden Vergleich und die Bewertung der verschiedenen Ofensysteme ein primärenergetisch gewichteter Aufwand berechnet werden. Die primärenergetischen Aufwendungen für brennstoffbeheizte Systeme liegen nach Abb. 7.3 auf der Grundlage von Bereitstellungsnutzungsgraden in Deutschland meist zwischen 2500 und 4500 MJ pro Tonne Aluminium. Lediglich für einen Drehtrommelofen ohne optimierte Prozesstechnik liegt der primärenergetische Aufwand wegen des sehr hohen Endenergiebedarfs höher. Auf Grund des Energiebedarfs für die Sauerstoffherstellung schwächt sich der energetische Vorteil von Drehtrommelöfen mit Erdgas-Sauerstoff-Brenner ab. Diese Systeme weisen gegenüber dem nicht optimierten Drehtrommelöfen dennoch

einen um den Faktor 1,5 bis 2 verringerten Primärenergiebedarf auf. Der Vorteil einer optimalen Nutzung der in den Rauchgasen enthaltenen Wärme wird auch am Beispiel des Zweikammerherdofens mit regenerativer Verbrennungsluftvorwärmung deutlich, der den absolut niedrigsten Primärenergiebedarf aufweist. Der primärenergetische Aufwand für die elektrisch beheizten Induktionsöfen liegt fast doppelt so hoch wie der Mittelwert der brennstoffbeheizten Öfen.

7.4 Recycling ausgewählter Al-Anwendungen

Im Folgenden werden für wichtige Aluminiumprodukte die Prozessketten der Verwertung dargestellt. Nach Abb. 2.3 hat der Bereich Verkehr mit 40% bei weitem den größten Anteil an der Aluminiumnutzung, danach folgt der Bausektor mit knapp 20%. Daneben wird hier die Rückgewinnung der Aluminiumfraktion in Verpackungen analysiert, die sich grundlegend von den anderen Recyclingverfahren unterscheidet.

7.4.1 Verkehrssektor

Da allein auf Straßenfahrzeuge etwa 94% des Aluminiumeinsatzes im Bereich Verkehr entfallen [33], konzentrieren sich die nachstehenden Betrachtungen auf die Gewinnung von Aluminium aus Automobilen. Der Fahrzeugbestand hat sich von 1960 bis 1995 fast verzehnfacht und somit auch die Zahl der jährlich zu wertenden Fahrzeuge, die heute bei ca. 2 Mio liegt. Trotz des vergleichsweise geringen Aluminiumanteils in Automobilen von 3,5-5 Massen-% beträgt das Aluminiuminventar in den gegenwärtig zugelassenen Fahrzeugen insgesamt etwa 1 Mio t. Da Eisen mit einem Massenanteil von ca. 63% die in Kraftfahrzeugen verarbeiteten Materialien dominiert, zielt das Recyclingkonzept in erster Linie auf die Rückgewinnung von Eisenmetallen [68]. Allerdings wird dem Aluminiumrecycling in Zusammenhang mit der Autoverwertung eine wachsende Bedeutung zukommen, da sich schon jetzt ein Trend zu einem verstärkten Aluminiumeinsatz im Automobil abzeichnet. Das Ziel ist, die Masse des Fahrzeugs zu reduzieren und dadurch einen geringeren Kraftstoffverbrauch in der Nutzungsphase zu ermöglichen. So weist zum Beispiel der aluminiumintensive Audi A8 ein um 200 kg niedrigeres Trockengewicht auf als vergleichbare Fahrzeuge der herkömmlichen Bauweise. Dadurch wird ein um 1 l/100 km niedrigerer Benzinverbrauch erreicht [27]. Aber auch in konventionellen Fahrzeugen wird Aluminium eingesetzt. Davon werden 50% im Bereich des Antriebs verwendet, beispielsweise im Kolben, Zylinderkopf, Motorblock, Ansaugrohr oder Kupplungs- und Getriebegehäuse. Weitere 30% finden als Scheibenbremssattel oder Hauptbremszylinder ihren Einsatz im Fahrwerk. Die übrigen 20% sind in Form von Felgen, Zierleisten oder Kühler verarbeitet. Neuere Entwicklungen, wie zum Beispiel das Space-Frame-Konzept des A8, führen zu einem Einsatz von Aluminium im Karosseriebau.

Das Recyclingkonzept für Altfahrzeuge wird in der Altfahrzeugverordnung, die am 01.04.1998 in Kraft getreten ist, festgelegt. Diese freiwillige Selbstverpflichtung der Automobilindustrie umfasst insbesondere den Auf- und Ausbau eines flächendeckenden Rücknahme- und Verwertungssystems für Altfahrzeuge und -teile [9]. Das Verwertungssystem ist zweistufig, zunächst werden die Fahrzeuge trockengelegt und teildemontiert, anschließend erfolgt eine Zerkleinerung der Restkarosserien in einem Schredder, um eine Trennung der verarbeiteten Stoffe zu ermöglichen. Je nach Demontagetiefe wird zwischen einer teildemontierten und einer volldemontierten Restkarosserie unterschieden, so dass sich zwei verschiedene Recyclingwege ergeben. Ein dritter Weg existiert für die Bauteile aus Aluminium, die während der Demontage ausgebaut werden und keiner weiteren Aufbereitung bedürfen. Die Verwertungswege sind in Abb. 7.4 dargestellt.

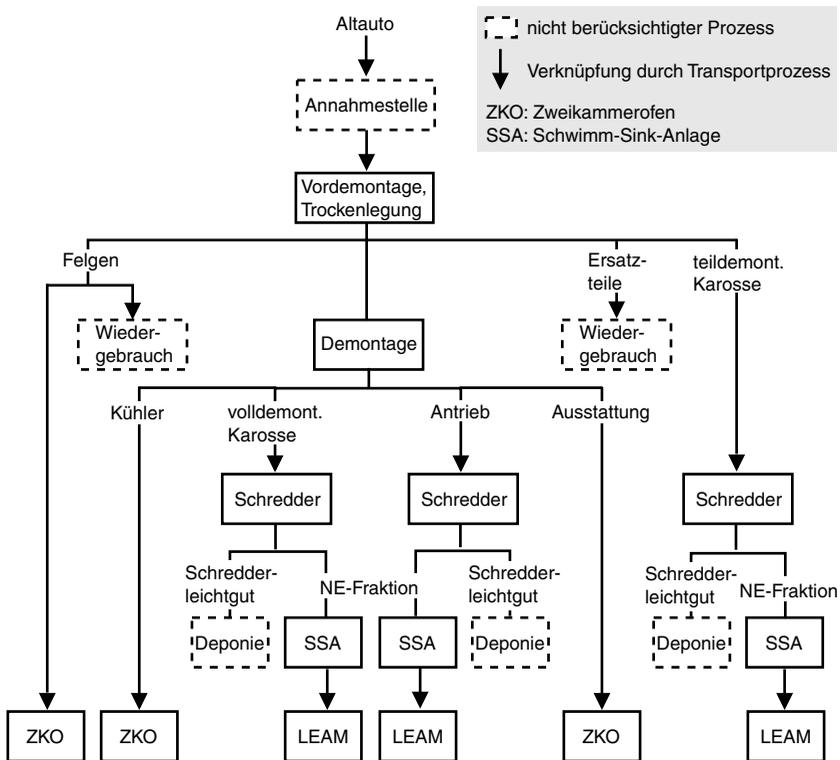


Abb. 7.4. Prozessketten der Altfahrzeugverwertung

Die Rücknahmesysteme werden für eine Automarke von dem jeweiligen Au-

tomobilhersteller betrieben. Die Aufgabe der Annahmestellen ist es, die Altautos vom Letztfahrzeughalter zu übernehmen, für den Transport bereitzustellen und einem Verwertungsbetrieb zuzuführen. In den Annahmestellen werden die Altautos gesammelt und gelagert, bis sie zu den Verwertungsbetrieben gebracht werden. Es findet keine Behandlung der Autos statt. Der Transport zu den Verwertungsbetrieben wird mit LKW durchgeführt. Da die Altautos noch nicht verdichtet sind, wird die Menge der Altautos, die transportiert werden kann, durch das Volumen beschränkt.

Die Verwertungsbetriebe entnehmen den angelieferten Altautos zunächst sämtliche Betriebsflüssigkeiten wie Motoröl, Bremsflüssigkeit oder Kühlerflüssigkeit. Nach der Trockenlegung folgt die Vordemontage und die Entnahme von Ersatzteilen. Die Vordemontage umfasst insbesondere das Demontieren von Aluminiumfelgen, welche zu 100% von Altautos abgebaut werden. Sie werden entweder als Ersatzteile weiterverwendet oder als wertvoller Schrott an Schmelzhütten weiterverkauft. Aber auch der Ausbau von Batterien, die zu 90% recycelt werden, Katalysatoren oder Reifen, fällt unter die Vordemontage. Durchschnittlich werden 147 kg Bauteile pro Tonne Altauto entnommen, die als Ersatzteile in der Nutzungsphase und somit außerhalb der Bilanzgrenzen verbleiben.

Nach der Vordemontage schließt sich für 60% der Altautos die Demontage an, welche ebenfalls von den Verwertungsbetrieben durchgeführt wird. Bevor die Autos den Verwertungsbetrieb verlassen, werden sie durch Pressen zusammengedrückt. Da dieses wie die Vordemontage für alle Altautos gilt, wird der Energieaufwand des Pressens der Vordemontage aufgeschlagen, auch wenn für einen Teil der Autos erst die Demontage erfolgt. Der Energiebedarf der Vordemontage umfasst den Strombedarf von Geräten wie z. B. der Ansaugvorrichtung zur Trockenlegung. Die Arbeiten von Hand werden nicht berücksichtigt.

Die Demontage umfasst die Entnahme des Kernschrotts, d. h. des Motorblocks mit Antriebsstrang. Die Aluminiumkühler werden aus 80% und die Aluminiumausstattung wie Zierleisten aus 30% der Autos abgebaut, beide Bauteile wiegen je 3 kg. Da diese Demontage manuell erfolgt, wird sie energetisch nicht bewertet. Für das Ausreißen des Antriebs wird ein gesondertes Gerät benötigt, dessen Energiebedarf dem Kernschrott angerechnet wird.

Nach der Demontage werden der Antrieb und die volldemontierte Restkarosserie geschreddert. Auch die teildemontierte Restkarosserie, also das Altauto, das nur trockengelegt wird und in dem der Antrieb noch enthalten ist, wird im Schredder zerkleinert. Alle drei Recyclingwege gleichen sich in der Reihenfolge der Aufbereitungsschritte, unterscheiden sich aber hinsichtlich des Energiebedarfs und Aluminiumverlusts. Da die Restautos vor dem Verlassen des Verwertungsbetriebs verdichtet werden, sind die LKW auf der Fahrt zum Schredderbetrieb mit 100% ausgelastet.

Der Antrieb und die Restkarosserien werden geschreddert, um die unterschiedlichen Materialien aufzuschließen und eine anschließende Sortierung zu ermöglichen. Der Zerkleinerung im Schredder schließt sich eine Sichtung an, die mittels eines Gebläses die Leichtfraktion mit nichtmetallischen Komponenten von den

Metallen trennt. Über eine Siebtrommel werden feine, inerte Stoffe wie Sand und Glas abgeschieden. Der Magnetscheider trennt Eisenmetalle ab. Es bleibt eine Schwerfraktion zurück, die neben Nichteisenmetallen auch Gummi, Holz und Ähnliches enthält. Das Hauptprodukt einer Schredderanlage ist die Eisenfraktion, die zum Beispiel in Stahlwerken als Kühlschrott eingesetzt wird. Die Schwerfraktion als Nebenprodukt bedarf einer weiteren Sortierung in einer Schwimm-Sink-Anlage, um die Nichteisenmetalle zu gewinnen. Die Schredderleichtgutfraktion enthält Kunststoffe und Fasern, die im Auto enthalten sind und kann derzeit nicht verwertet werden sondern wird deponiert. Der Anteil der Leichtgutfraktion fällt beim Schreddern von Antrieben wesentlich geringer aus als beim Zerkleinern von Restkarossen. Der Energiebedarf des Schredders ist abhängig von der Tiefe der vorangegangenen Demontage. So müssen zum Zerkleinern der volldemontierten Restkarosse bis zu $5 \text{ kWh}_{\text{el}}$ weniger aufgewendet werden, als zum Zerkleinern einer Karosse, der vorher Motor, Reifen und Polster entnommen werden [33]. Da aber nicht für alle drei Wege genaue Daten vorliegen, wird mit einem gemittelten Energiebedarf des Schredders und der zugehörigen Luftaufbereitung gerechnet. Die zur Abtrennung der Leichtgutfraktion benötigte Energie wird den Produktfraktionen aufgeschlagen. Aufgrund dieser Allokation und der unterschiedlichen Produktanteile ergeben sich letztendlich auch unterschiedliche Energieeinsätze der Schredder.

Die Schwergutfraktion des Schredders wird in einer Schwimm-Sink-Anlage, die sich üblicherweise auf dem gleichen Gelände befindet, weiter aufbereitet. Dazu erfolgt zunächst in einem Trommelsieb eine Klassierung in drei Fraktionen der Partikelgrößen $< 16 \text{ mm}$, $16 - 80 \text{ mm}$ und $> 80 \text{ mm}$. Die Fraktionen $< 16 \text{ mm}$ und $> 80 \text{ mm}$ werden von Hand sortiert. Die erste wird nach Asien verschifft, da sich das Handklauben solch kleiner Teile in Deutschland nicht wirtschaftlich durchführen lässt. Somit verlässt diese Fraktion den Bilanzraum Deutschland. Wegen der weitergehenden Aufbereitung wird sie aber als Nebenprodukt der Schwimm-Sink-Anlage gewertet. Die Fraktion $> 80 \text{ mm}$ wird in Deutschland handsortiert und dementsprechend auch mitbilanziert. Da das Handklauben aber energetisch nicht bewertet werden kann, wird die gewonnene Aluminiumfraktion der Schwimm-Sink-Anlage zugerechnet. Aus der Hauptfraktion mit dem Korngrößenspektrum $16 - 80 \text{ mm}$ werden mit einem Überbandmagneten die letzten Anteile an Eisenmetallen abgezogen, bevor sie in die eigentliche Schwimm-Sink-Anlage gelangt. Dort werden vier Produktfraktionen gewonnen: Magnesium, Aluminium, eine Steine/Kabel-Fraktion und Buntmetalle. Die beiden letztgenannten Fraktionen werden nach Asien transportiert und dort handverlesen. Entsprechend den unterschiedlichen Zusammensetzungen der zerkleinerten Bauteile oder Karossen, ergibt sich auch bei der Schwimm-Sink-Anlage ein unterschiedlicher Energiebedarf.

Die Aluminiumfraktion, die mit der Schwimm-Sink-Anlage gewonnen wird, bedarf keiner weiteren Aufbereitung und kann direkt umgeschmolzen werden. Das umzuschmelzende Aluminium liegt sehr feinstückig vor, da es mit dem Schredder zerkleinert wurde. Auf Grund des hohen Anteils oxidischer Anhaftun-

gen, die für einen Herdkammerofen sehr ungünstig sind, wird der LEAM-Prozess als Umschmelzschritt bilanziert.

Zusammenfassend sind in Abb. 7.5 für die verschiedenen Recyclingwege von Aluminiumanwendungen im Kfz-Sektor Primärenergieaufwendungen, Recyclingquoten sowie die Anteile an der gesamten Verwertung dargestellt.

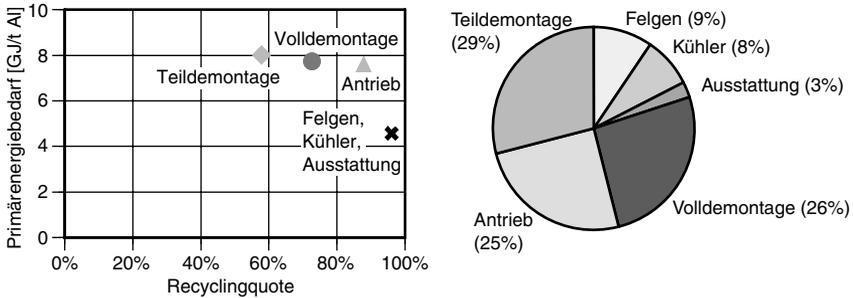


Abb. 7.5. Primärenergiebedarf, Recyclingquoten und Anteile verschiedener Wege des Automobilrecyclings

Für sortenrein gewonnene Aluminiumbauteile wie Felgen entstehen lediglich Recyclingverluste von 6% beim Schmelzvorgang, während bei weniger sorgfältiger Aufbereitung (Teildemontage) Gesamtverluste von 42% resultieren. Außerdem beträgt der Primärenergiebedarf der Verwertung von Felgen, Kühlern und Ausstattung nur fast die Hälfte der anderen Wege. Dies liegt weniger an zusätzlichen Aufbereitungsschritten als an der energieintensiveren Ofentechnik für verunreinigte bzw. kleinstückige Schrotte. Durchschnittlich erfordert die Rückgewinnung von Aluminium aus Automobilen bei einer Quote von 77% 7,2 GJ Primärenergie je Tonne.

7.4.2 Baubranche

Nach der Verkehrsbranche hat der Bausektor in Deutschland den höchsten Aluminiumbedarf. Zum größten Teil (>80%) wird es großformatig in Fenstern, Fassaden und Türen (46%), in Dachabdeckungen und Wänden (25%) sowie in tragenden Konstruktionen und Gerüsten (11%) eingesetzt [33]. Aluminium aus dem Bausektor lässt sich daher besonders gut rezyklieren, zumal es sich weiterhin sowohl durch hohe Sortenreinheit als auch durch niedrige Legierungen auszeichnet. Der Legierungsanteil für Aluminium aus dem Bausektor liegt bei 1,3% bis 1,4%, so dass die Schrotte ein sehr hohes Qualitätsniveau haben.

Die Fenster- und Fassaden-Hersteller in Deutschland haben innerhalb der Initiative "Aluminium und Umwelt im Fenster- und Fassadenbau", kurz A/U/F, einen geschlossenen Kreislauf für Aluminium aus dem Bausektor aufgebaut. Dazu

hat die Initiative mit etwa 1000 Metallbaubetrieben in ganz Deutschland sogenannte Öko-Vereinbarungen getroffen [13]. An die Metallbaubetriebe werden die Schrotte von den Firmen, die Häuser abreißen oder renovieren, verkauft. Mit der Öko-Vereinbarung verpflichten sie sich, ausgebaute Aluminium-Bauelemente sowie Profilabschnitte den Sammelstellen zur Verfügung zu stellen. Das bedeutet allerdings nur, dass die Metallbaubetriebe die Schrotte bevorzugt an die Sammelstellen verkaufen, die Vereinbarung ist nicht bindend. Wie in Abb. 7.6 dargestellt wird zwischen großen und kleinen Sanierungsobjekten unterschieden.

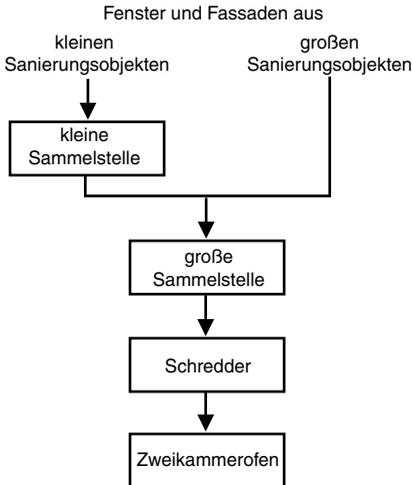


Abb. 7.6. Prozesskette des Verwertungssystems für Fenster und Fassaden

Die aus großen Sanierungsobjekten gewonnenen Aluminiumschrotte werden direkt zu einer großen Sammelstelle gebracht. Die Schrotte aus kleinen Objekten werden zunächst an einer kleinen Sammelstelle gelagert. Da dort nur eine Lagerung stattfindet, die Stoffe also keinerlei Veränderung erfahren, können die beiden Transportvorgänge, die in Abb. 7.6 als Pfeile symbolisiert sind, zusammengefasst werden.

Das Verwertungssystem der Initiative gilt ausschließlich der Gewinnung von Aluminium, so dass die Energien, die zum Transport anderer Stoffe wie Gummidichtung oder Glas benötigt werden, dem Transport des Aluminiums aufgeschlagen werden. Dadurch ist der Energieeinsatz bezogen auf die Aluminium-Fraktion für den Transport der Aluminium-Holz-Fenster z. B. höher als für die Aluminium-Fenster des gleichen Sanierungsobjekts, auch wenn die Entfernungen und die Transportmittel gleich sind. An der großen Sammelstelle werden die Gläser aus den Fensterrahmen entnommen. Da sie von Hand ausgeschlagen werden, wird der

Energieeinsatz nicht bewertet.

Alle von der A/U/F-Initiative erfassten Aluminium-Schrotte werden zentral in einer Anlage aufbereitet. Das Kernstück der Aufbereitung ist ein Schredder, mit dem vorsortiertes Material zerkleinert wird. Es werden ausschließlich Knetlegierungen verarbeitet. Der Zerkleinerung nachgeschaltet ist eine Sichtung, in der Folien und andere leichte Bestandteile von den metallischen Stücken abgetrennt werden. Anschließend wird eine Eisenfraktion über einen Magnetscheider gewonnen und über eine Siebtrommel wird eine zinkreiche Fraktion mit einer Korngröße < 20 mm aus der Aluminium-Fraktion entfernt. Zuletzt werden mit einem Wirbelstromscheider Verbunde und VA-Stahl als nicht ausgelenktes Material abgetrennt.

Nach der Aufbereitung mit einer Ausbeute von 87% liegt eine einheitliche Aluminium-Fraktion vor, so dass die verschiedenen Ausgangsprodukte nicht mehr unterschieden werden können. Die gewonnene Fraktion wird zu einer Sekundärhütte gebracht und dort umgeschmolzen. Da die Orte der Aufbereitungsanlage und der Hütte bekannt sind, kann die Entfernung und somit auch der benötigte Energieeinsatz genau bestimmt werden.

Die Aluminiumfraktion liegt sortenrein vor und enthält nur Knetlegierungen, sie kann trotz ihrer Feinstückigkeit in einem Herdofen umgeschmolzen werden. Aus dem im Zweikammerofen mit Regenerator eingeschmolzenen Aluminium werden Pressbolzen hergestellt, die von den an der A/U/F-Initiative beteiligten Firmen zu neuen Strangprofilen verarbeitet werden. Für diesen Teilstrom des Aluminiumrecyclings wird also ein sogenanntes closed-loop-recycling betrieben. Insgesamt wird somit eine hohe Quote von 82% erreicht, bei einem geringen Gesamtprimärenergieaufwand von etwa 7 GJ/t Al, der sich endenergetisch fast gleichmäßig auf Diesel, Erdgas und Strom verteilt. Bei diesem System hat also der Transport auf Grund vergleichsweise großer Entfernungen zwischen Sammlung und zentraler Aufbereitung prozentual zwar einen vergleichsweise hohen Anteil am Energiebedarf, durch die resultierende Sortenreinheit des Vorstoffs wird aber ein energiesparendes Umschmelzen ermöglicht.

7.4.3 Verpackungen

Im Verpackungsbereich findet Aluminium vielfältige Anwendungen, so z. B. zu 50% in Form von dünnen Folien, die in einen Verbund eingebunden sind, wie z. B. im Getränkekarton. Aber auch für Kapseln und Schraubverschlüsse (25%), Nahrungsmitteldosen (15%) sowie Aerosoldosen und Tuben (10%) wird Aluminium eingesetzt. Ein besonderes Merkmal von Verpackungen ist die extrem kurze Lebenszeit von nur einigen Monaten. Die Lebensdauer von Aluminium-Bauteilen im Automobil- oder Bausektor wird mit 10 Jahren bzw. 30 Jahren angesetzt und ist somit bedeutend länger.

In Deutschland wird das Verpackungsrecycling in der Verpackungsverordnung von 1991 und in ihrer novellierten Fassung von 1998 gesetzlich vorgeschrie-

ben. Um die Auflagen der Verpackungsverordnung zu erfüllen, gründeten zahlreiche Unternehmen aus der Handels-, Konsumgüter- und Verpackungsindustrie das Duale System Deutschland (DSD). Das Duale System Deutschland organisiert die Sammlung und Sortierung gebrauchter Verkaufsverpackungen sowie deren Zuführung zur Verwertung. Die Erfassung von Aluminium in Leichtverpackungen (LVP) erfolgt grundsätzlich über die gelben Tonnen oder Säcke. Für spezielle Anwendungen des Metalls, wie Schraubverschlüsse von Pfandflaschen und Menüschalen als Einwegverpackungen für Fertig- oder Kantinengerichte, existieren innerhalb des Dualen System Deutschlands getrennte, sortenreine Recyclingwege.

7.4.3.1 Menüschalen

Menüschalen aus Aluminium werden als Einwegverpackungen für Essen genutzt. Sie werden von Großküchen eingesetzt, um darin Einzelmahlzeiten oder Mehrportionensessen anzubieten. Die Verteilung der Mahlzeiten erfolgt beispielsweise über Menübringdienste, Kantinen oder Flugzeugcatering.

Ergänzend zum DSD betreibt das Werk Ohle der Alcan Deutschland GmbH ein Recycling-System zur Rückführung von Aluminium-Menüschalen. Im Jahr 1998 wurden mit diesem System 1.400 Tonnen Aluminium-Verpackungen recycelt [33]. Die nicht dem Recyclingweg von Alcan zugeführten Schalen werden über den gelben Sack oder die gelbe Tonne erfasst. Die Transportvorgänge innerhalb der Recyclingkette der Menüschalen werden abgeschätzt.

Das Ohler System ist in erster Linie ausgerichtet auf Hersteller von Warm- und Tiefkühlmenüs und deren Kunden sowie Flugzeug-Catering, Krankenhäuser, Wohlfahrtsverbände, Kantinen und Großveranstaltungen. Durch eine direkte Erfassung und sortengerechte Sammlung wird eine Vermischung mit anderen Materialien ausgeschlossen, so dass eine Nachsortierung nicht nötig ist.

Für Groß- und Kleinkunden gestalten sich die Recyclingwege jeweils unterschiedlich. Die Prozesskette ist in Abb. 7.7 dargestellt.

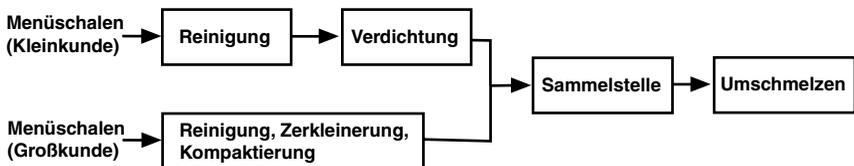


Abb. 7.7. Prozesskette der Verwertung von Aluminium-Menüschalen

Bei Kleinkunden, also zum Beispiel bei Senioren, die "Essen auf Rädern" erhalten, kann der erste Aufbereitungsschritt, die Reinigung der Schalen, erfolgen, indem die Schalen unter kaltem Wasser abgespült werden. Größere Kunden, wie Kantinen oder Krankenhausküchen, reinigen die Schalen in einer Spülmaschine,

während für Großveranstaltungen kombinierte Reinigungs-, Zerkleinerungs- und Kompaktiergeräte zur Verfügung stehen. Die von den Einzelabnehmern von Hand gespülten Schalen werden vom Bringdienst wieder eingesammelt, in der Großküche verdichtet und weitergegeben.

Zur Bilanzierung der Recyclingkette für Aluminium-Menüschalen wird der Weg über eine Kantine betrachtet. Nach der Reinigung werden die Menüschalen verdichtet, um einen kostengünstigen Transport zur nächsten Sammelstelle zu ermöglichen. Die so aufbereiteten Schalen werden zu Ballen gepresst und gelagert. Die Firma Alcan holt die Ballen durch eigene LKW oder mit Subunternehmen ab und führt sie dem Recycling zu. Die Ballen werden zunächst zu einem der zehn über ganz Deutschland verteilten Sammelpunkte gebracht und von dort nach kurzer Zwischenlagerung einer Schmelzhütte übergeben. Die beiden dazu notwendigen Transportvorgänge werden jeweils abgeschätzt. Für die Entfernung Großküche - Sammelstelle werden 100 km angenommen, für den Weg Sammelstelle - Umschmelzbetrieb werden 150 km geschätzt. Die Sammelstellen übergeben die Schalen an Umschmelzwerke, welche sie direkt einschmelzen. Dazu verwenden die meisten Hütten Drehtrommelöfen. Der gesamte Aluminiumverlust von 11% wird ausschließlich durch den Abbrand während des Schmelzens hervorgerufen, da durch Reinigung und Verdichtung der Schalen keine messbaren Verluste auftreten. Kumuliert werden etwa 510 MJ Diesel, 5570 MJ Erdgas und 440 kWh Elektrizität für die Rückgewinnung einer Tonne Aluminium benötigt.

7.4.3.2 Schraubverschlüsse

In Deutschland werden jährlich 25.000 Tonnen Aluminium zu Schraubverschlüssen von Pfandflaschen verarbeitet (Stand 1996) [33]. Etwa 90% aller Verbraucher schrauben nach Entleeren des Inhalts die Deckel wieder auf die Flaschen und übergeben sie so der Verwertung. Die Aluminiumverschlüsse enthalten eine Kunststoffdichtung, die ebenfalls verwertet wird. Dazu werden die beiden Fraktionen in einer Aufbereitungsanlage getrennt. Das Aluminium wird in einigen Fällen in einem geschlossenen Kreislauf rezykliert. Im Werk Göttingen der Alcan Deutschland GmbH werden zum Beispiel aus Schraubverschlüssen hergestelltes Aluminium zu Blechen und Bändern verarbeitet, aus denen dann wieder Schraubverschlüsse hergestellt werden [18].

Im Folgenden wird der Weg der Schraubverschlüsse vom Abschrauben von der Pfandflasche bis zum flüssigen Sekundäraluminium nach der Prozesskette in Abb. 7.8 betrachtet. Die Bilanzierung wird am Beispiel einer Aufbereitungsanlage in Harzgerode durchgeführt. In dieser Anlage werden jährlich 3.500 Tonnen Aluminium verarbeitet. Die leeren Pfandflaschen werden zu Abfüllanlagen gebracht, wo sie gereinigt und wiederbefüllt werden. Dort werden die Schraubverschlüsse abgeschraubt und gelagert, bis sie von Silowagen abgeholt und zur Aufbereitungsanlage gebracht werden.

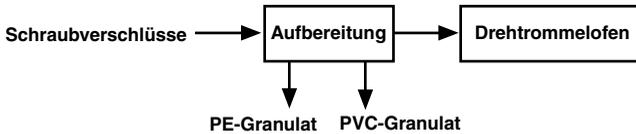


Abb. 7.8. Prozesskette der Rezyklierung von Schraubverschlüssen

In der Aufbereitungsanlage werden zunächst die Kunststoffverschlüsse von den Aluminiumverschlüssen getrennt. Dies geschieht über eine einstufige Dichtentrennstufe, die mit Wasser betrieben wird. Die leichteren Kunststoffverschlüsse werden oben abgezogen und anschließend mit einer Mühle zu PE-Granulat verarbeitet. Die Aluminiumverschlüsse werden als Sinkgut aus der Dichtesortierstufe ausgetragen, auf einem Sieb entwässert und in eine Kühlschnecke aufgegeben. Diese Förderschnecke wird im Gegenstrom zu den Verschlüssen mit flüssigem Stickstoff beaufschlagt. Durch die Kühlung der Verschlüsse auf etwa -145°C versprödet die Dichtungseinlage aus PVC, während das Aluminium unbeeinflusst bleibt. Hierdurch lässt sich in der nachgeschalteten Hammermühle nach dem Prinzip der selektiven Mahlung der Kunststoff aus den Deckeln abschlagen. Über eine anschließende Siebklassierung wird die Kunststofffraktion vom Aluminium getrennt. Da der Bedarf an flüssigem Stickstoff mit 1 t/t Al-Fraktion relativ hoch ist, wird seine Bereitstellung mitbilanziert. Dazu wird angenommen, dass der Stickstoff von der nächstgelegenen Produktionsstätte in Würzburg bezogen wird. Die aufbereitete Aluminiumfraktion wird pneumatisch zum Umschmelzwerk befördert, so dass kein gesonderter Transportvorgang zu betrachten ist. Der dafür benötigte Energieeinsatz wird schon in der Bilanzierung der Aufbereitung berücksichtigt. Da der Aluminiumverlust der Aufbereitung nicht bekannt ist, wird der Ofenverlust von 11% als Gesamtverlust angesetzt. Die feinstückige Aluminium-Fraktion wird in einem Drehtrommelofen umgeschmolzen. Die spezifischen Endenergieeinsätze über die Prozesskette betragen insgesamt 720 MJ/Diesel/t Al, 5846 MJ Erdgas/t Al und 833 kWh Elektrizität/t Al.

7.4.3.3 Leichtverpackungen

Als Leichtverpackungen (LVP) werden im Folgenden die Verpackungen bezeichnet, die mit dem "grünen Punkt" ausgezeichnet sind und über das Sammelsystem des DSD, also über eine gelbe Tonne oder einen gelben Sack, erfasst werden. Unter den Materialien, die über diesen Weg rezykliert werden, stellt Aluminium mit 3,6 Massen-% die kleinste Fraktion dar. Kunststoffe bilden mit 42% die größte Fraktion, dann folgen Verbunde (31%) und Weißblech (23%) [8]. Entsprechend der unterschiedlichen Zusammensetzungen der aluminiumhaltigen Verpackungen existieren mehrere Aufbereitungsverfahren, die parallel betrieben werden (siehe Abb. 7.9).

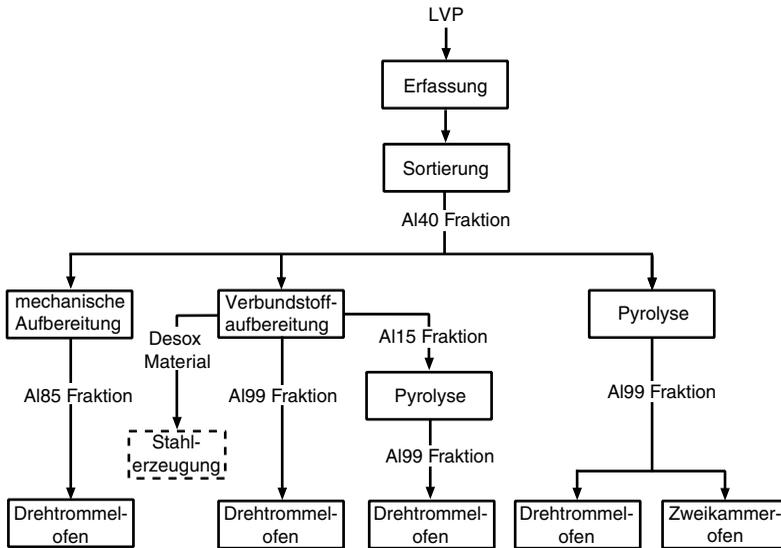


Abb. 7.9. Prozessketten des Recycling von Aluminium in Leichtverpackungen (LVP)

Die Verbraucher sammeln LVP in der gelben Tonne, bis sie von den Müllpressfahrzeugen, die maximal 2,77 t laden können, abgeholt werden. Da die LKW im "stop and go" Modus fahren und nur gering ausgelastet sind, ergibt sich trotz der kurzen zurückzulegenden Distanz ein relativ hoher Energiebedarf von etwa 160 MJ Diesel/t LVP.

Von der Sammelstelle werden die Verpackungen zu einer Sortieranlage gebracht. Da es sich für die relativ kurze Strecke nicht lohnt, die Hin- und Rückfahrt zu organisieren, muss die Rückfahrt ohne Ladung mitbetrachtet werden. Die Verpackungen sind nicht verdichtet, also ist der LKW auch auf der Hinfahrt nicht voll ausgelastet.

Der Inhalt der gelben Säcke besteht aus einer Vielzahl von Verpackungen, die aus den unterschiedlichsten Materialien zusammengesetzt sind. Das Spektrum reicht von Getränkkartons, die aus Kunststoff, Papier und Aluminium bestehen, über Joghurtbecher aus Kunststoff aber mit Aluminiumdeckel bis zu Getränkedosen, die aus reinem Aluminium bestehen. Um die verschiedenen Materialien stoffgerecht zu recyceln, werden sie in der Sortieranlage in sortenreine Fraktionen getrennt und zu Ballen gepresst. Dazu werden in Deutschland rund 300 Sortieranlagen mit unterschiedlichen Techniken betrieben. Die Bandbreite reicht von Anlagen, die neben einfachen Geräten wie Rüttel- oder Trommelsieben und Sortierbändern in erster Linie Handsortierung betreiben, bis zu vollautomatischen Anlagen, welche die gebrauchten Verpackungen mit Infrarotsystemen,

Farbkameras und computergesteuerter Pneumatik trennen.

In einer halbautomatischen Sortieranlage wird der Verpackungsstrom mit Sieben in größere und kleinere Teile getrennt. Die Fraktion der größeren Teile wird handsortiert, die andere wird zunächst durch einen Magnetscheider von den Weißblechdosensorten befreit. Ein großformatiges Gebläse (Windsichter) trennt Folienkunststoffe ab. Anschließend werden von Hand Verbunde und Kunststoffe aussortiert. Als letzter Schritt wird aus der verbleibenden Fraktion über einen Wirbelstromscheider Aluminium abgetrennt.

Getränkekartons werden nicht zu den Verbunden gezählt, sie bilden eine eigene Fraktion. Da sie einen hohen Anteil an Papier haben, werden sie dem Papierrecycling zugeführt. In großen Wasserbecken, sogenannten Pulpern, werden die Papierfasern von der Beschichtung gelöst. Die dünnen Kunststoff- und Aluminiumschichten werden in Zementwerken verwendet. Dabei dient der Kunststoff als Energieträger und das Aluminium als Bauxitersatz. Bauxit wird in der Zementherstellung als Bindemittel benötigt. Die Aufbereitung der Getränkekartons wird nicht weiter betrachtet, da das in den Kartons enthaltene Aluminium für den Aluminiumkreislauf verloren ist.

Die Transportvorgänge, die zur Beförderung der Aluminiumfraktion von der Sammelstelle zur Aufbereitung und anschließend von der Aufbereitung zum Umschmelzen nötig sind, werden mit den einzelnen Aufbereitungswegen mitbilanziert. Sie finden ausschließlich mit LKW statt, die zu 100% ausgelastet sind. Für die Pyrolysewege ergeben sich hohe Transportaufwendungen, da wegen der hohen Investitionskosten für Pyrolyseverfahren in Deutschland nur drei solcher Anlagen zu finden sind und die Entfernungen dementsprechend groß sind.

Der Aluminiumanteil der LVP Al40¹ Fraktion muss vor dem Umschmelzen erhöht werden. Dazu werden drei verschiedene Aufbereitungswege verfolgt, die mechanische Aufbereitung, die Verbundstoffaufbereitung und die Pyrolyse.

Die mechanische Aufbereitung hat ihren Namen, da sie ohne thermische Energie oder chemische Hilfsstoffe erfolgt. Das Aufgabegut, also die Fraktion LVP Al40 aus der Sortieranlage, wird zunächst mit einem Einwellenzerkleinerer auf Stücke kleiner als 50 mm zerkleinert. Anschließend folgt eine Sortierung der zerkleinerten Stücke, die der Sortieranlage des ersten Aufbereitungsschritts für die gesamten DSD-Vorstoffe ähnlich ist. Zunächst trennt ein Windsichter flugfähige Bestandteile wie Folien und Fasern ab. Die magnetischen Komponenten werden mit einem Überbandmagneten abgezogen, und im letzten Schritt wird mit einem Wirbelstromscheider Vollaluminium von aluminiumhaltigen Materialien getrennt. Da der Windsichter aluminiumbeschichtete Folien abzieht und Verpackungen mit einem geringen Aluminiumanteil vom Wirbelstromscheider nicht ausgelenkt werden, ist der Aluminiumverlust dieses Aufbereitungswegs relativ groß. Beide Fraktionen, das Sichterleichtgut und das nicht ausgelenkte Material, werden deponiert, so dass darin enthaltenes Aluminium verloren ist.

¹ Al40: 40% Massenanteil von Aluminium

Die in Ballenform angelieferte Aluminiumfraktion der Sortieranlage wird für die Aufbereitung mit dem Pyrolyse-Verfahren zunächst in einem Schredder zerkleinert. In dem anschließenden Schwelprozess wird das Aluminium von organischen Anhaftungen befreit, deren Energieinhalt genutzt wird. Nach der Pyrolyse schließen sich eine Mühle und ein Sieb an, um die festen Pyrolyserückstände vom Metall zu entfernen. Aluminiumverlust entsteht durch Abrieb in den Mühlen. Außerdem kann sehr dünn aufgedampft Aluminium, z. B. auf Chipstüten, nicht erfasst werden, da es zu fein verteilt ist und mit den Schwelgasen ausgetragen wird. Die durch das Pyrolyse-Verfahren gewonnene Aluminiumfraktion wird jeweils zur Hälfte in einem Drehtrommelofen und in einem Zweikammerofen umgeschmolzen.

Für die Verbundstoffaufbereitung wird das Material zunächst mit einem Einwellenzerkleinerer vorzerkleinert. Ähnlich der mechanischen Aufbereitung schließt sich auch hier ein Sichter an, der flugfähige Bestandteile abzieht. Das Schwergut, also das Aluminium und das mit ihm verbundene Material wie Kunststoff und Papier wird in einem Beschleuniger, einer sogenannten Turbomühle, aufgeschlossen. Bei 1000 Umdrehungen pro Minute wird das Material verwirbelt. Dadurch findet an Mahlplatten sowie autogen eine Verkuglung des metallischen Anteils statt, so dass sich die Verbunde lösen. Nach einer Klassierung in unterschiedliche Kornklassen wird durch eine Dichtentrennung auf Luftherden ein reines Aluminium-Produkt erzeugt. Ein Teil dieser Fraktion wird als Desoxidationsmittel in der Stahlherstellung eingesetzt, der andere Teil wird im Drehtrommelofen umgeschmolzen. Der Weg des Desoxidationsmittels wird nicht bilanziert, weil das Aluminium für den Kreislauf verloren ist. Die über den Windsichter aussortierten Verbunde werden der Pyrolyse übergeben, um das in ihnen enthaltene Aluminium zu gewinnen. Für diese Fraktion ergibt sich durch die zwei Aufbereitungsschritte, die sie durchläuft, ein recht hoher Energiebedarf.

Auf der EXPO 2000 wurde zum ersten Mal die vollautomatische Sortieranlage *Sortec 3.0* großtechnisch zur Verwertung von LVP-Abfällen eingesetzt. Die den Stand der Technik repräsentierende Anlage kann unterteilt werden in eine trockenmechanische Vorsortierungsstufe, eine nasse Aufbereitungsstufe und eine Kunststoffverwertungseinheit. Die Produkte der ersten Stufe sind Blech, Getränkekartons und PET und werden für die Weiterverarbeitung verdichtet.

Die Leichtfraktion der LVP wird im nassen Teil der Anlage aufbereitet. Dabei wird durch eine Kombination aus nasser Auflösung mit nachfolgender Zerkleinerung Verbundstoffmaterial isoliert. Aluminium wird durch Wirbelstromscheidung abgetrennt. Ein weiteres Produkt der Nassaufbereitung ist Papierfaser. Das Aluminiumprodukt mit einem Metallgehalt von 85% wird mit einer Ausbeute von 94% gewonnen und anschließend durch Pyrolyse weiter aufbereitet (s. Abb. 7.10) [23].

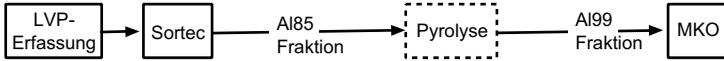


Abb. 7.10. Prozesskette der Gewinnung von LVP-Aluminium durch vollautomatische Sortierung

7.4.3.4 Vergleich der Recyclingwege für Verpackungen

Für den energetischen Vergleich der im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Systeme zur Rückgewinnung von Aluminium aus Verpackungen ist die Recyclingquote neben dem spezifischen Energiebedarf der Prozesskette der wichtigste Parameter. Der Aluminiumverlust gibt an, wieviel Primärmetall zugesetzt werden muss, um das Inventar konstant zu halten. Daher sind hohe Verluste gleichbedeutend mit einem großen Anteil Primäraluminium, der wiederum zu einem hohen Energieaufwand der gesamten Aluminiumproduktion führt. Abb. 7.11 zeigt für die behandelten Systeme den Primärenergieaufwand über der technischen Recyclingquote. Die speziellen Sammel- und Aufbereitungsverfahren für Verschlusskappen und Menüschalen weisen die deutlich beste Verwertungseffizienz auf, da praktisch ausschließlich beim Umschmelzen Verluste entstehen. Dabei ist die Sortenreinheit der Produkte entscheidend, die außerdem zu einer hohen Qualität des Sekundäraluminiums führt, die auch ein closed-loop-recycling ermöglicht.

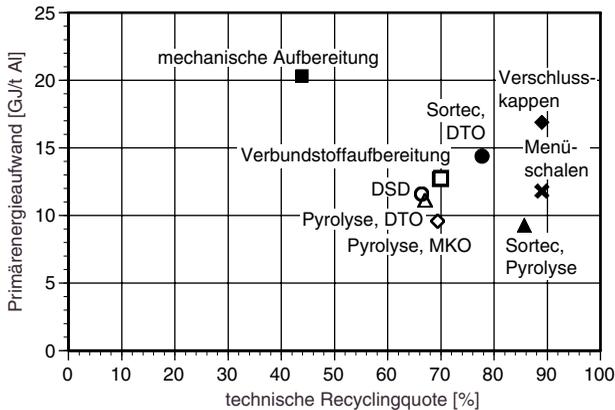


Abb. 7.11. Primärenergiebedarf und technische Recyclingquote verschiedener Recyclingwege für Aluminium in Verpackungen

Dagegen müssen innerhalb des DSD verschiedene Stoffe aufbereitet werden, bei denen z. T. die Rückgewinnung von Aluminium technisch gar nicht möglich ist. Somit beträgt die technische Recyclingquote hier insgesamt 66%, während bei

den produktreinen Verwertungswegen jeweils 89% erreicht werden. Dabei ist der Primärenergiebedarf für das Recycling der Menüschalen etwa gleich dem für das DSD System, während für die Verwertung der Verschlusskappen fast 50% mehr Energie benötigt werden. Innerhalb des DSD weisen die verschiedenen Recyclingwege sehr unterschiedliche Quoten bzw. Energieeinsätze auf. Die Prozesskette der mechanischen Aufbereitung erfordert mit mehr als 20 GJ/ t den weitaus größten Energieeinsatz bei gleichzeitig geringster Verwertungsquote von nur 44% und erweist sich somit als sehr unvorteilhafte Technologie. Die beste Recyclingquote innerhalb des DSD erreicht mit 70% der Weg der Verbundstoffaufbereitung. Deutlich höhere Ausbeuten können noch durch den Einsatz der vollautomatischen Sortierung (Sortec) erzielt werden. Der denkbare Weg des direkten Umschmelzens der Aluminiumfraktion aus der Sortec-Anlage erfordert 14 GJ/ t Primärenergie und liegt damit um ein Viertel über dem DSD-Mittelwert, erreicht aber eine Verwertungsquote von fast 78%. Das bei weitem beste Ergebnis wird durch eine der Sortec-Anlage nachgeschaltete Pyrolyse erzielt, deren Output im energiesparenden Mehrkammerofen umgeschmolzen werden kann. Somit werden bei einem Primärenergieeinsatz von weniger als 10 GJ/ t etwa 86% Aluminium zurück gewonnen.

Insgesamt zeigen also Recyclingsysteme für spezielle Produkte neben hoher Metallqualität die höchsten Ausbeuten und stellen daher optimale Lösungen dar. Auf Grund der sehr großen Zahl verschiedener Aluminiumanwendungen im Verpackungssektor kann ein derartiges produktspezifisches Recycling in den meisten Fällen allerdings nicht umgesetzt werden. Insbesondere bei der Rücknahme stellen sich hier kaum lösbar logistische Probleme bzw. sind unverhältnismäßig hohe Aufwendungen zu erwarten. Mit neuen Technologien wie vollautomatischer Sortierung sind aber auch mit dem DSD sehr hohe Recyclingquoten realisierbar, die fast an die der produktspezifischen Verfahren heranreichen.

8 Optimierungspotenziale für den Energieeinsatz

8.1 Möglichkeiten der Energieeinsparung

Aus den Ergebnissen der Kapitel 4 bis 7 können grundsätzlich drei Optionen zur Reduzierung des Energieaufwands der Aluminiumherstellung abgeleitet werden. Zunächst kann durch technische Verbesserungen der Prozesse zur Metallproduktion der Energiebedarf gesenkt werden. Dabei ist zu erwarten, dass die Tonerdeherstellung und die primäre Verhüttung auf Grund der bei weitem größten Anteile am Gesamtenergiebedarf der Primäraluminiumproduktion auch die größten Energieeinsparpotenziale bieten. In Abb. 8.1 ist dazu beispielhaft die Entwicklung des spezifischen Strombedarfs von PFPB-Elektrolysen in Abhängigkeit vom Jahr der Inbetriebnahme bzw. der letzten für den Strombedarf charakteristischen Modernisierung dargestellt. Die Betrachtung ist auf Elektrolysen an europäischen Standorten beschränkt. [49]

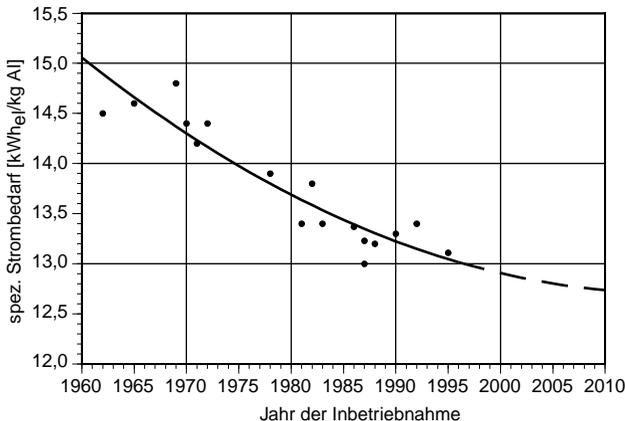


Abb. 8.1. Zeitliche Entwicklung des spezifischen Strombedarfs von PFPB-Elektrolysen

Seit ihrer Einführung in den frühen 60er Jahren konnte der spezifische Strombedarf der PFPB-Systeme um rund 15% reduziert werden. Die starke Abnahme zwischen 1960 bis 1990 wird sich jedoch nicht vergleichbar in den nächsten Jahren fortsetzen lassen, da die Potenziale für energetische Optimierungen in diesem System schon weitgehend erschlossen sind.

Neben Optimierungen in der Prozesskette der Metallherstellung können Veränderungen im Bereich der Energiebereitstellung großen Einfluss auf den Primärenergieaufwand zur Folge haben. Dies trifft insbesondere auf die Energieversorgung von Prozessen mit großem Elektrizitätsbedarf wie die Schmelzflusselektrolyse. Einerseits weisen verschiedene Energieträger sehr große Unterschiede bei der Umwandlungseffizienz des jeweiligen Kraftwerks auf. Andererseits sind auch hier zeitliche Entwicklungen zu berücksichtigen.

Technische Weiterentwicklungen und Optimierungen in der Kraftwerkstechnik haben dazu geführt, dass der Primärenergieaufwand der Strombereitstellung seit 1960 drastisch reduziert werden konnte. Abb. 8.2 zeigt für einige fossil befeuerte Kraftwerke sowie für Leichtwasserreaktoren und ein exemplarisches Wasserkraftwerk die zeitliche Entwicklung des Primärenergiebedarfs der Strombereitstellung sowie den korrespondierenden Kraftwerkswirkungsgrad.

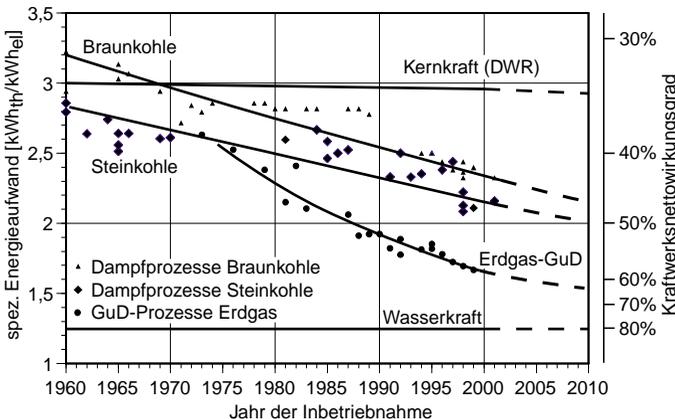


Abb. 8.2. Entwicklung des Primärenergiebedarfs und des Kraftwerkswirkungsgrads verschiedener Kraftwerkssysteme

Betrachtet werden deutsche Stein- und Braunkohleblöcke sowie im Fall der Erdgas-GuD-Prozesse weltweit errichtete Kraftwerke [6]. Für die Stromerzeugung aus Wasserkraft wird ein Wirkungsgrad von 80% angesetzt, zeitliche Entwicklungen werden hier nicht betrachtet, da die eingesetzten Turbinen bereits als weitgehend optimiert gelten. Die nukleare Stromerzeugung wird durch die Effizienzen typischer Druckwasserreaktoren (DWR) beschrieben. Durch Optimierungen

gen einzelner Komponenten konnten bei diesem Kraftwerkskonzept im betrachteten Zeitraum nur geringfügige Steigerungen der Wirkungsgrade in der Größenordnung eines Prozentpunkts auf heute 33,5% realisiert werden. Zwar existieren Konzepte zur z. T. deutlichen Steigerung der Effizienzen z. B. durch den Einsatz gasgekühlter Hochtemperaturreaktoren [30]. Da über die Verfügbarkeit derartiger Systeme heute noch keine gesicherten Aussagen gemacht werden können, bleiben sie in der Abbildung unberücksichtigt.

Aus Abb. 8.2 geht hervor, dass der spezifische Energieaufwand der Stromerzeugung aus Braunkohle bis heute um knapp 30% gegenüber 1960 gesenkt werden konnte. Im gleichen Zeitraum konnte der Energiebedarf der Steinkohleblöcke um ein Viertel reduziert werden. Die deutlichste Steigerung der Effizienz zeigt die Stromerzeugung mittels Erdgas-GuD-Prozessen, die erst ab der Mitte der 70er Jahre wirtschaftliche Bedeutung erlangt haben. In dem vergleichsweise kurzen Zeitraum von 25 Jahren wurde aber der spezifische Energieaufwand um gut 36% reduziert. Sowohl bei den reinen Dampfprozessen zur Kohleverstromung als auch bei den Erdgas-GuD-Anlagen werden auch zukünftig weitere Effizienzsteigerungen erwartet. Allerdings wird die Geschwindigkeit der Veränderungen deutlich abnehmen.

Die dritte wesentliche Option zur Energieeinsparung bei der Aluminiumherstellung bieten erhöhte Recyclinganteile an der Gesamtproduktion. Wie bereits in Kapitel 7.4 angedeutet bietet der Sekundäraluminiumbereich noch Möglichkeiten, durch den Einsatz moderner Techniken bzw. alternativer Strategien die Ausbeuten zu erhöhen und somit den Energiebedarf der gesamten Aluminiumproduktion auf Grund gesteigerter Recyclinganteile zu senken. Allerdings ist auch zu erwarten, dass mit zusätzlichen Anstrengungen zur Steigerung der Recyclingquoten auch die Energieaufwendungen deutlich zunehmen, so dass bei Überschreitung einer optimalen Quote der Energieeinsatz den der Primäraluminiumherstellung übersteigt. In diesem Fall ist die Rückgewinnung dann aus energetischer Sicht nicht sinnvoll. Abb. 8.3 veranschaulicht diesen Zusammenhang. In einem stationären System, d. h. unter der Voraussetzung eines konstanten Aluminiumbedarfs entspricht die Recyclingquote gerade genau dem Recyclinganteil der Gesamtproduktion. Mit steigendem Recyclinganteil sinkt der durch primäre Aluminiumherstellung induzierte Energieaufwand linear, während der durch die Schmelzöfen hervorgerufene Energieeinsatz steigt. Beim Energiebedarf für Erfassungs- und Aufbereitungsprozesse ist dagegen für zunehmende Rückgewinnungsquoten ein exponentieller Anstieg zu erwarten, da der technische Aufwand zur Rezyklierung hier überproportional wächst. Bemühungen zu einer möglichst vollständigen Erfassung der Sekundärrohstoffe erfordert z. B. die Gewinnung breit gestreuter, kleinster Partikel und stellt somit sehr hohe Anforderungen sowohl an die Logistik als auch an die Aufbereitungstechnik. Außerdem sind sehr große Massenströme mit sehr geringen Aluminiumgehalten zu verarbeiten, die ebenfalls auf das Zielprodukt bezogen hohe Energieeinsätze verursachen. Gleiches gilt für Bestrebungen, Aluminiumverluste bei der Aufbereitung bzw. beim Einschmelzen durch entsprechende Behandlung der aluminiumhaltigen Reststoffströme zu reduzieren.

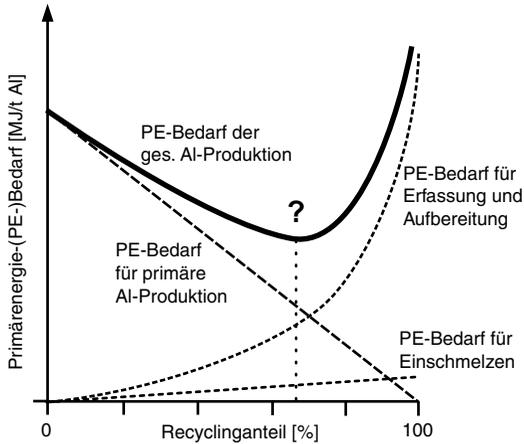


Abb. 8.3. Qualitative Darstellung des Primärenergiebedarfs der gesamten Al-Herstellung in Abhängigkeit vom Recyclinganteil

Im Folgenden werden die sich ergebenden Energieeinsparpotenziale zunächst für Optimierungen der Prozesstechnik bei der Primäraluminiumherstellung dargestellt, dann für Effizienzsteigerungen in der Kraftwerkstechnik und schließlich für erhöhte Recyclinganteile.

8.2 Prozesstechnikverbesserungen bei der Primäraluminiumherstellung

Um die gesamten Endenergieeinsparpotenziale der primären Aluminiumgewinnung zu ermitteln, müssen grundsätzlich zum einen sämtliche Teilprozesse von der Bauxitgewinnung bis zur Elektrolyse einschließlich aller Transporte und vorgelagerten Produktionsstufen berücksichtigt werden. Zum anderen müssen die verschiedenen eingesetzten Endenergieträger in Primärenergieäquivalente umgerechnet werden, damit die einzelnen Anteile am Gesamtenergiebedarf quantifiziert werden können. Daraus ergeben sich eine Reihe von variablen Einflussgrößen, deren Zahl deutlich begrenzt werden muss, um aussagekräftige und nachvollziehbare Ergebnisse zu erhalten.

Die Analysen in Kapitel 4 haben gezeigt, dass der Bauxitbergbau im Hinblick auf den Primärenergieaufwand bei der Aluminiumwirtschaft von vernachlässigbarer Bedeutung ist. Wegen der z. T. großen Entfernungen zwischen Bauxitlagerstätten, Tonerdewerken und Primäraluminiumhütten sind zwar vordergründig Verbesserungen durch integrierte Standorte zu erwarten, da sämtliche Transporte von Bauxit und Tonerde wegfallen würden. Dagegen werden aber die Metall-

transporte zum Verbraucher deutlich zunehmen. Eine genaue Berechnung der erzielbaren Einsparungen erfordert einen unverhältnismäßig großen Aufwand. Denn die alleinige theoretische Betrachtung eines Wegfalls sämtlicher Bauxittransporte, für die detaillierte Informationen bezüglich Entfernungen und eingesetzter Transportmittel vorliegen [61], liefert lediglich eine Einsparung von 1,7 GJ/t Al, was etwa 1,3% des momentanen Gesamtenergiebedarfs der Primäraluminiumherstellung entspricht. Folglich können im Rahmen der Reduzierung des Energieeinsatzes bei der Aluminiumgewinnung auch Transportprozesse unberücksichtigt bleiben.

Die zu untersuchenden Prozesse werden also auf das Tonerdewerk mit Natronlaugeherstellung und die Primäraluminiumhütte mit Anodenproduktion beschränkt.

8.2.1 Energiebereitstellungsnutzungsgrade

Die Umrechnung der Endenergieeinsätze in Primärenergieäquivalente erfordert die Berücksichtigung der energetischen Aufwendungen für die Energiebereitstellung. Bei der Bestimmung des Bereitstellungsnutzungsgrads g wird methodisch zwischen Brennstoffen und elektrischer Energie unterschieden. Auf Grund der großen Unterschiede, die verschiedene Kraftwerke in unterschiedlichen Staaten bezüglich der Umwandlungseffizienz aufweisen, wird die Strombereitstellung landesspezifisch berücksichtigt. Im Falle der energetisch dominierenden Elektrolysen wird darüber hinaus der vertragsmäßige Strommix zu Grunde gelegt, da für die meisten Aluminiumhütten der Versorger aus Literaturangaben [49] ermittelt werden kann. Für die Brennstoffbereitstellung lassen sich keine vergleichbar großen Unterschiede für verschiedene Länder feststellen. Daher werden hier für Deutschland ermittelte Bereitstellungsnutzungsgrade nach Tabelle 8.1 herangezogen.

Tabelle 8.1. Bereitstellungsnutzungsgrade ausgewählter Brennstoffe in Deutschland [14]

Braunkohle	Steinkohle	Erdgas	leichtes Heizöl	schweres Heizöl	Benzin	Diesel
0,97	0,96	0,90	0,90	0,91	0,85	0,88

Zur Bilanzierung der Elektrizitätsversorgung für die Tonerdeherstellung einschließlich der Natronlaugeproduktion kann aus den Anteilen der wichtigsten Herstellerländer (s. Abb. 5.2) und den Bereitstellungsnutzungsgraden für elektrische Energie in diesen Staaten nach Tabelle 8.2 ein mittlerer Wert von $g_{el} = 0,38$ berechnet werden.

Tabelle 8.2. g_{el} in für die Tonerdeherstellung wichtigen Ländern [5]

Brasilien	USA	Australien	Russland	China
0,72	0,34	0,35	0,28	0,28

Für den Großteil der Primärhüttenstandorte, d. h. für eine Kapazität von über 15 Mio t/a ist der Stromversorgungsmix bekannt [49] und in Tabelle 8.3 zusammengefasst. Entsprechende Bereitstellungsnutzungsgrade für elektrische Energie aus verschiedenen Primärenergieträgern sind ebenfalls in Tabelle 8.3 angegeben. Der Wert für g_{el} aus Erdgas bzw. Öl ist eine Schätzung, die sich darauf stützt, dass sich der Großteil der mit Strom aus gasgefeuerten Kraftwerken Hütten an Standorten in Dubai und Bahrain befinden. Da die Inbetriebnahme hier nur wenige Jahre zurück liegt kann als Kraftwerkstyp moderne und hocheffiziente GuD-Technik mit elektrischen Wirkungsgraden von über 50% angenommen werden.

Tabelle 8.3. Anteile und g_{el} für verschiedene Primärenergieträger der Stromversorgung von Primäraluminiumhütten weltweit

	Wasserkraft	Kohle	Gas	Kernenergie	Öl
Anteile	56%	30%	7%	6%	1%
g_{el}	0,8 [5]	0,32 [26]	0,5	0,33 [5]	0,5

8.2.2 Energieeinsparpotenziale

Aus den Ergebnissen der teilprozessspezifischen Untersuchungen in den Kapiteln 5 und 6 und den im vorangegangenen Abschnitt 8.2.1 ermittelten Energiebereitstellungsnutzungsgraden sind unter den zu Beginn des Kapitels 8.2 getroffenen Randbedingungen auf der einen Seite der gesamte Primärenergieaufwand berechnet worden, der gegenwärtig im weltweiten Mittel zur Herstellung 1 t Primäraluminium benötigt wird. Dem wird auf der anderen Seite der spezifische Gesamtenergiebedarf für jeweils technisch modernste Verfahren in den einzelnen Prozessstufen gegenübergestellt und so das Energieeinsparpotenzial der globalen Primäraluminiumproduktion durch technischen Fortschritt in der Metallprozesskette aufgezeigt. Dazu zeigt Abb. 8.4 auch die prozentualen Anteile der Teilprozesse am Gesamtenergiebedarf und die jeweilige prozentuale Einsparung der technisch optimierten Verfahren bezogen auf den gegenwärtigen Gesamtenergieeinsatz.

Erwartungsgemäß liefert die theoretische Umrüstung der Aluminiumelektrolysen auf modernste PFPB-Technik mit einem spezifischen Strombedarf von 13 MWh/t Al mit 7,2% bezogen auf den Ausgangszustand das größte Einsparpotenzial. Diese Modernisierung der Hütten bewirkt auch einen geringeren Anodenverbrauch bzw. Bedarf an chemischer Energie, der allerdings nur eine Reduktion um 1,1% hervorruft. Die zweitgrößte Verringerung des Energieeinsatzes um 5,4% wird durch die Umstellung des Aufschlussverfahrens auf das innovative Rohrreaktorkonzept erreicht. Trotz des im Istzustand geringen Anteils von 5% am Gesamtenergiebedarf weist die Natronlaugeproduktion gegenüber den weitaus energieintensiveren Beiträgen der Anoden oder der Kalzination mit 4,2% ein sehr großes Einsparpotenzial auf. Beim Stromverbrauch der Tonerdewerke, der den

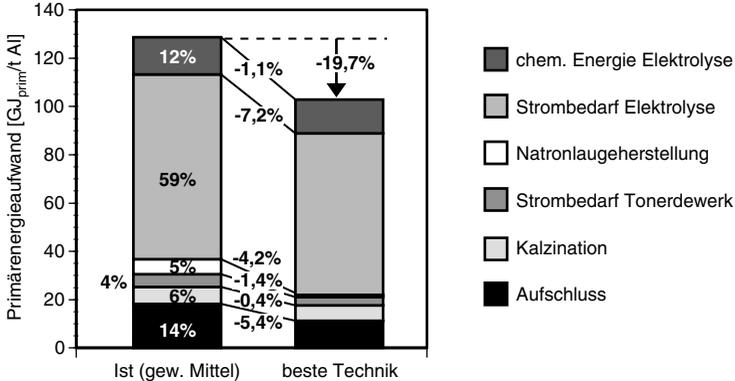


Abb. 8.4. Primärenergetische Einsparpotenziale der Primäraluminiumherstellung

geringsten Anteil am Gesamtenergiebedarf ausmacht, sind kaum noch Verbesserungen zu erwarten. Auch die Kalzination zur Tonerdegewinnung ist bereits weitgehend optimiert, d. h. die Zahl fortschrittlicher Wirbelschichtanlagen übertrifft die der Drehrohröfen, so dass die technisch mögliche Verringerung hier nur 1,4% beträgt.

Insgesamt ist durch die technisch optimale Gestaltung der Prozessschritte Tonerdeherstellung und primäre Aluminiumverhüttung eine Verringerung des gesamten Primärenergiebedarfs um fast ein Fünftel möglich. Dabei können die Prozesse im Rahmen der Tonerdeherstellung mit insgesamt 11,5% gegenüber dem Istzustand einen größeren Reduktionsbeitrag leisten als die Verhüttungsprozesse, obwohl diese mit mehr als 70% den deutlich höheren Anteil am gegenwärtigen Gesamtenergieaufwand aufweisen.

Die Energiebereitstellung ist bei dieser Berechnung der Energieeinsparpotenziale gegenüber dem Referenzzustand unverändert angesetzt worden. Die Berücksichtigung der Energieversorgung dient dabei allein dem Zweck, Energieformen unterschiedlicher thermodynamischer Qualitäten vergleichbar zu machen.

Allerdings sind gerade durch Verbesserungen der Kraftwerkswirkungsgrade und durch Energieträgersubstitutionen große Reduktionen beim Primärenergiebedarf möglich. Die sich daraus ergebenden Einsparungen sind im folgenden Abschnitt quantifiziert.

8.3 Optimierung der Energiebereitstellung

Um die möglichen Energieeinsparungen durch eine verbesserte Energiebereitstellung aufzuzeigen, wird ein Szenario mit verschiedenen Varianten der Stromversorgung von Aluminiumhütten weltweit berechnet. Dabei bleiben also sowohl

thermische Energien bzw. deren Bereitstellung als auch sonstige Stromverbräuche in der Primäraluminiumprozesskette unberücksichtigt. Der Bereitstellungsnutzungsgrad für thermische Energie oder Brennstoffe ist mit durchschnittlich 90% vergleichsweise hoch, so dass theoretische Verbesserungen hier nur einen geringen Einfluss auf die Senkung des Primärenergieeinsatzes ausüben. Abgesehen davon sind bei der Gewinnung fossiler Energieträger zukünftig eher erhöhte Aufwendungen auf Grund erschwelter Förderbedingungen zu erwarten. Dagegen bieten Stromerzeugungssysteme durch Installation moderner Anlagen oder Energieträgersubstitution bedeutende Einsparpotenziale (s. Abschnitt 8.1). Wie aus den Untersuchungen in den Kapiteln 4, 5 und 6 hervorgeht wird der Strombedarf in der Prozesskette der Primäraluminiumproduktion eindeutig von der Elektrolyse dominiert, so dass die Analyse für diesen Prozessschritt allein ausreicht, um die Möglichkeiten der Energieeinsparung durch eine geänderte Energiebereitstellung aussagekräftig zu beurteilen.

In den nachfolgenden Szenarien werden also die Kraftwerkswirkungsgrade bzw. der Strommix zur Versorgung der Elektrolysen mit einem weltweit durchschnittlichen spezifischen Strombedarf von $14,8 \text{ MWh}_{el}/\text{t Al}$ variiert.

Für den Referenzfall folgt aus den bereits in Tabelle 8.3 angegebenen Anteilen und Bereitstellungsnutzungsgraden der bestehenden Stromversorgung ein spezifischer Primärenergiebedarf der Aluminiumhütten weltweit von $105 \text{ GJ}/\text{t Al}$.

Im ersten Szenario wird von einem gleichbleibendem Energiemix ausgegangen. Die Kraftwerke sollen jeweils der heute besten verfügbaren Technik entsprechen und Wirkungsgrade nach Tabelle 8.4 aufweisen. Eine solche Umgestaltung der Stromversorgung ermöglicht eine Primärenergieeinsparung von 14,9% im Vergleich zum Referenzfall.

Tabelle 8.4. Kraftwerkswirkungsgrade der Stromversorgung mit bester verfügbarer Technik

	Wasserkraft	Kohle	Gas	Kernenergie	Öl
η_{el}	0,82	0,44	0,58	0,33	0,58

Im zweiten Szenario bleibt der Anteil der Wasserkraft an der Stromerzeugung für die Aluminiumelektrolyse mit 56% konstant, die übrige Stromversorgung erfolgt durch GuD-Anlagen mit zukünftiger Technik, da sich diese im Vergleich zu den anderen fossilen bzw. den nuklearen Kraftwerken wegen des besten elektrischen Wirkungsgrads durch den geringsten Primärenergieaufwand auszeichnen. Dadurch ergeben sich Einsparungen an Primärenergie um 27,2% im Vergleich zum Referenzfall.

Um den Fall des theoretisch geringsten Primärenergieaufwands zu simulieren, wird im dritten Szenario von einer 100%igen Stromversorgung der Aluminiumhütten durch Wasserkraftwerke mit optimaler Technik ausgegangen. Die Primärenergieeinsparung beläuft sich hier auf 38,4% im Vergleich zum Referenzfall.

In Abb. 8.5 sind die zuvor erläuterten Ergebnisse zusammenfassend dargestellt.

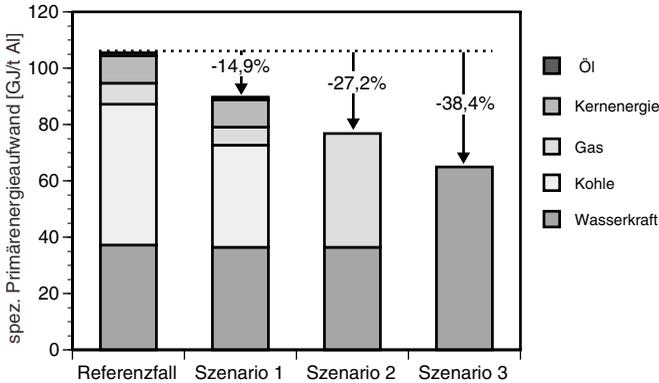


Abb. 8.5. Spezifischer Primärenergiebedarf der Aluminiumelektrolyse für verschiedene Szenarien der Stromversorgung

8.4 Recyclingquoten

Im Folgenden wird beispielhaft für den Bereich Leichtverpackungen (LVP) ein Szenario zur Erhöhung der Recyclingquote berechnet, um das Optimum hinsichtlich des Energieaufwands zu ermitteln. Der Verpackungssektor zeichnet sich im Vergleich zu den Bereichen Bau und Verkehr durch besonders kleinformige Aluminiumteile aus, die dazu meist in Form von Verbunden vorliegen und nur einen sehr geringen Anteil am gesamten LVP-Stoffstrom ausmachen. Somit werden hier die im Abschnitt 8.1 diskutierten Kriterien genau erfüllt.

In Ergänzung zu den Betrachtungen in Kapitel 7.4.3 werden neben den Endenergieeinsätzen in Form von Brennstoffen und Elektrizität auch energetische Inputs durch Abbrand und organische Anhaftungen beim Umschmelzen bzw. bei Pyrolyseprozessen berücksichtigt (vgl. Kapitel 3.5). Außerdem wird die Betrachtung zunächst von der technischen auf die ressourcenorientierte Recyclingquote erweitert und schließlich auch um die Primärmetallproduktion ergänzt, um die in Abb. 8.3 gezeigten Abhängigkeiten berechnen zu können.

8.4.1 Erfassung sämtlicher Energieeinträge

Wie in Kapitel 3.5 gezeigt beinhaltet eine vollständige energetische Bilanzierung des Aluminiumrecyclings neben der primärenergetischen Bewertung eingesetzter Endenergien auch die Berücksichtigung von Abbränden in Schmelzöfen und die exothermen Reaktionen organischer Bestandteile in den Aluminiumfraktionen.

Für die Aluminiumoxidation in brennstoffbeheizten Öfen beträgt der Heizwert des Aluminiums 31,05 MJ/kg, die Oxidationsverluste betragen je nach Ofentyp 5

bis 15%, so dass hierdurch wesentliche Beiträge zur Energieversorgung geleistet werden.

Organische Anhaftungen an Aluminiumschrotten werden zum einen während des Schmelzvorgangs oxidiert und zum anderen beim Pyrolyseverfahren in Schwelgase umgesetzt, die ihrerseits wieder zur Beheizung des Prozesses verwendet werden. Die Berechnung der Organikgehalte bzw. der resultierenden Heizwerte der einzelnen Aluminiumfraktionen stützt sich auf Probenanalysen von DSD-Abfall. Die entsprechenden Zahlenwerte sind in Tabelle 8.5 wiedergegeben.

Tabelle 8.5. Zusammensetzung verschiedener Aluminiumfraktionen und Heizwerte [36]

	Anteile	Al-Gehalt		Heizwert [MJ/kg]
Vollaluminium	32,2%	95%	Kunststoffolie	25,6
Al-Verbunde	48,5%	15%	Papier	9,8
davon Kartonverbunde	19,2%	5%		
Rest Folienverbunde	29,3%	22%		
Fehlausträge	19,3%	0%		

Der Organikgehalt des Einsatzmaterials der Pyrolysen schwankt je nach angegangenem Aufbereitungsschritt zwischen 15% und 85% (s. Abb. 7.9 und Abb. 7.10). Bei einem Gehalt von 40% Organik wird ein autothermer Betrieb gewährleistet, d. h. der Energieinhalt der Schwelgase entspricht gerade dem Wärmebedarf des Pyrolyseprozesses. Daraus folgt aber, dass sich der Vorteil der Bereitstellung einer hoch angereicherten Aluminiumfraktion durch die vollautomatische Sortierung in Hinblick auf den Energiebedarf als nachteilig erweist, da für die nachgeschaltete Pyrolyse zusätzlicher Brennstoffeinsatz in Form von fossilen Energieträgern erforderlich ist. In der industriellen Praxis wird aus diesem Grund ein Einsatzgemisch für den Pyrolyseprozess mit 40% Organik eingestellt, so dass eine autotherme Fahrweise sichergestellt ist. Für die Bilanzierung der modellhaften Monochargen im DSD-Recyclingsystem unter Berücksichtigung des autothermen Pyrolysebetriebs müssen also die verschiedenen Stoffstromzusammensetzungen geeignet bewertet werden. Im Falle eines geringeren organischen Inhalts als bei autothermen Bedingungen (wie z. B. bei der Sortec-Aluminiumfraktion) wird die entsprechende Differenz als zusätzlicher Energiebedarf hinzuaddiert. Bei höherem Organikgehalt, wie ihn z. B. die Al15-Fraktion nach der Verbundstoffaufbereitung aufweist, wird die jeweilige Differenz subtrahiert und somit gutgeschrieben.

Aus den voranstehenden Überlegungen ergeben sich vier Fallstudien für den Vergleich der DSD-Recyclingsysteme für Aluminium in Verpackungen in Abhängigkeit von der angewendeten energetischen Bilanzierungsmethode:

- a) Primärenergieaufwand durch den Einsatz fossiler Brennstoffe und Elektrizität in den Prozessen
- b) Primärenergiebedarf einschließlich der Reaktionswärme der Aluminium-

oxidation

c) Primärenergiebedarf einschließlich Abbrand und Verbrennung organischer Bestandteile

d) Primärenergiebedarf einschließlich Abbrand und Verbrennung organischer Bestandteile bei autothermem Pyrolysebetrieb

In Abb. 8.6 sind die Ergebnisse dieser vier Fallstudien zusammengefasst.

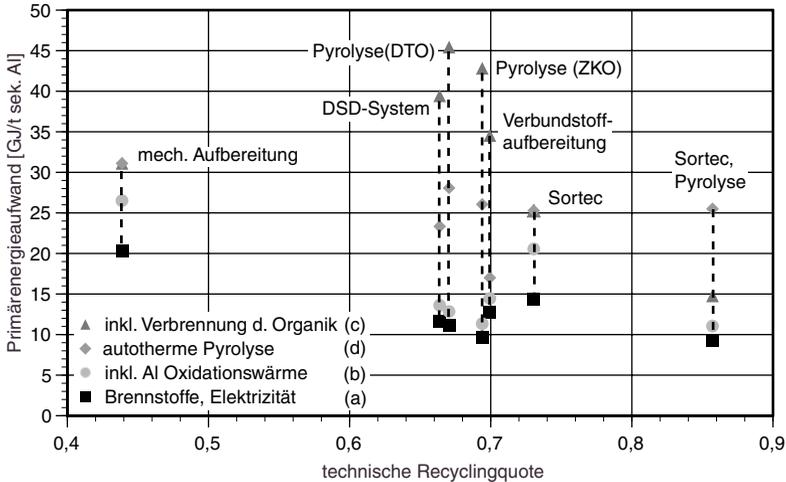


Abb. 8.6. Technische Recyclingquote verschiedener Recyclingwege und deren Primärenergiebedarf in Abhängigkeit von der energetischen Bewertung

Unter Berücksichtigung des exothermen Aluminiumabbrands (Fall b) zusätzlich zum Einsatz von Brennstoffen und Elektrizität, der bereits in Kapitel 7.4.3.4 behandelt worden ist (vgl. Abb. 7.11), steigt der Energiebedarf deutlich um 6 GJ/t für die Wege der mechanischen Aufbereitung und der vollautomatischen Sortierung (Sortec). Hier entstehen beim Einschmelzen der Al85-Fraktion Oxidationsverluste von 15%, während von der Al99-Fraktion, die in allen übrigen Prozessketten erzeugt wird, lediglich 5% im Schmelzofen oxidieren.

Die Anrechnung des gesamten Organikanteils (Fall c) führt bei den Prozessketten des DSD, die einen Pyrolyseschritt mit 60% Organikanteil in der Aufgabe enthalten, zu einer Vervielfachung des Energieeinsatzes. Die mechanische Aufbereitung und die Sortec-Anlage erzeugen eine Fraktion mit 15% organischen Bestandteilen, die entweder beim Schmelzvorgang verbrennen oder in der Pyrolyse umgesetzt werden und den Gesamtenergieeinsatz lediglich um 5 GJ/t erhöhen.

Wird die industrielle Praxis der Mischung verschiedener Einsatzstoffe für einen autothermen Pyrolysebetrieb zu Grunde gelegt und somit ein Organikgehalt von 40% angesetzt (Fall d), reduziert sich der Energieaufwand bei den meisten

Pfaden wieder erheblich. Dies gilt insbesondere für die Verbundstoffaufbereitung, da hier der Organikanteil der in der Pyrolyse eingesetzten Fraktion sogar 85% beträgt. Dagegen steigt der Energieeinsatz für den Sortec-Prozess mit nachgeschalteter Pyrolyse, da in diesem Fall die Organikmenge der Aufgabe die Anforderungen an den autothermen Betrieb nicht erfüllt und daher zusätzliche Energie benötigt wird. Die Berechnung zeigt einen fast gleichen Gesamtenergiebedarf für beide Sortec-Varianten sowohl ohne als auch mit nachfolgender Pyrolyse, wobei letztere wegen der deutlich besseren Recyclingquote zu bevorzugen ist.

Bei Berücksichtigung sämtlicher Energieeinträge, d. h. sowohl externe Einsätze von elektrischer und Brennstoffenergie als auch stoffgebundener Energieinhalt wie Organik verdoppelt sich der Energiebedarf für das DSD-Recyclingsystem insgesamt auf 23,3 GJ/t im Vergleich zur alleinigen Bilanzierung von Endenergien. Beim Sortec/Pyrolyse-Pfad wird sogar eine Verdreifachung bewirkt, so dass mit 25,5 GJ/t der Energieaufwand für das bestehende System leicht übertroffen wird. Angesichts des deutlich höheren Gesamtenergiebedarfs für die Primäraluminiumherstellung ist der Übergang zur neuen Technologie der vollautomatischen Sortierung mit dem Effekt der Erhöhung der Recyclingquote aus energetischer Sicht aber in jedem Fall empfehlenswert.

8.4.2 Ressourcenorientierte Betrachtung

Zur Bestimmung sämtlicher Metallverluste beim Recycling ist neben der Aufbereitung auch die Erfassung zu berücksichtigen. Von den Leichtverpackungen in Deutschland werden vom Verbraucher 89% der Verwertung durch das DSD zugeführt [8]. Damit beträgt auch der Aluminiumverlust allein in der ersten Stufe des DSD-Recyclings 11%. Allerdings ist davon auszugehen, dass dieser Anteil praktisch vollständig in den Hausmüll gelangt und auf diesem Weg entsorgt wird. Dabei wird zur Zeit etwa 1/3 vor der Deponierung verbrannt. Während das Aluminium im direkt, d. h. ohne vorherige Verbrennung, deponierten Hausmüll für die Verwertung verloren ist, wird die Schlacke aus der Müllverbrennungsanlage (MVA) zu 2/3 aufbereitet und u. a. eine NE-Fraktion gewonnen. Aus dieser wird wiederum durch Schwimm-Sink-Trennung eine verhüttungsfähige Aluminiumfraktion bereitgestellt. Abb. 8.7 zeigt die entsprechende Prozesskette dieses Wegs des Aluminiumrecyclings.



Abb. 8.7. Prozessketten des Al-Recyclings aus dem Restmüll

Durch diese Erweiterung der Systemgrenzen werden Aussagen zur ressourcenorientierten Recyclingquote und die Berechnung von Szenarioschritten zur Erhöhung der Quote in allen Stufen des Recyclings möglich. Allen nachfolgenden

Rechnungen liegt dabei modellhaft die losgelöste Betrachtung des Stoffstroms von Aluminium aus Leichtverpackungen zu Grunde. Dessen Anteil am gesamten Aluminium im Restmüll ist sehr gering. Eine wichtige Annahme bilden gleiche Aufbereitungsquoten für Aluminium aus den verschiedenen Anwendungen.

8.4.3 Szenario zur Steigerung der Recyclingquote

Ausgehend vom Ist-Zustand, der aus den Untersuchungen für das DSD-System in Kapitel 7.4.3.3 und die Hausmüllverwertung im vorangegangenen Abschnitt folgt, wird in folgender Weise für technische Varianten bzw. Erweiterungen des Recyclingsystems für Aluminium in Leichtverpackungen mit dem Ziel gesteigerter Rückgewinnungsquoten der Einfluss auf den Energiebedarf berechnet. Zunächst werden die bereits in Abschnitt 8.4.1 hinsichtlich technischer Recyclingquote diskutierten Prozessketten mit vollautomatischer Sortierung mit oder ohne nachgeschalteter Pyrolyse bezüglich der ressourcenorientierten Recyclingquote bilanziert. Damit ist das technische Potenzial der Aufbereitung der vom DSD erfassten LVP-Fraktion weitestgehend erschöpft. Die Aluminiumverluste liegen hierbei fast vollständig in oxidischer Form vor, und selbst die technisch bislang nicht nachgewiesene theoretische Möglichkeit der erneuten elektrolytischen Gewinnung von Aluminium aus dem Oxidrückstand wird in jedem Fall deutlich energieintensiver sein als die primäre Erzeugung aus hochreinem Al_2O_3 [3]. Folglich konzentrieren sich weiterführende Anstrengungen zur Erhöhung der zurückgewonnenen Aluminiummenge auf den Weg der Restmüllverwertung. Hierbei wird in einem ersten Schritt der Effekt durch eine vollständige Aufbereitung der MVA-Schlacke untersucht.

Die genauere Analyse des Schlackeaufbereitungsprozesses deutet wegen der sehr niedrigen Metallausbringung auf erhebliche Möglichkeiten zur Prozessoptimierung. Ziel der Schlackenaufbereitung ist die Entfernung metallischer Inhaltsstoffe zur Einhaltung von Qualitätskriterien für die Weiterverwendung des Schlackenprodukts z. B. im Straßenbau. Da die Schlacke vorrangig Eisenmetalle enthält, ist die Anlage auch für deren Entfernung ausgelegt. Die NE-Fraktion bestehend aus Aluminium, Kupfer und Zink stellt lediglich ein Nebenprodukt dar. Eine Aluminiumfraktion wird durch Schwimm-Sink-Trennung gewonnen und im Drehtrommelofen eingeschmolzen. Um die NE-Metallausbeute des MVA-Pfads zu erhöhen, erscheint es sinnvoll, zusätzliche Wirbelstromscheider in der Schlackenaufbereitung zu installieren. Da diese für enge Korngrößenbereiche die besten Betriebsergebnisse liefern, erzeugt eine entsprechende Vorschaltung von Sieben Fraktionen homogener Stückgrößen. Abb. 8.8 zeigt die Prozesskette der MVA-Schlackenaufbereitung und die ergänzenden Module (grau unterlegt) für eine verbesserte NE-Ausbeute.

Für eine weitere Erhöhung der rückgewonnenen Aluminiummenge bzw. der ressourcenorientierten Recyclingquote müsste die LVP-Fraktion vom Restmüll getrennt und somit also der gesamte Hausmüll aufbereitet werden. Auf Grund der

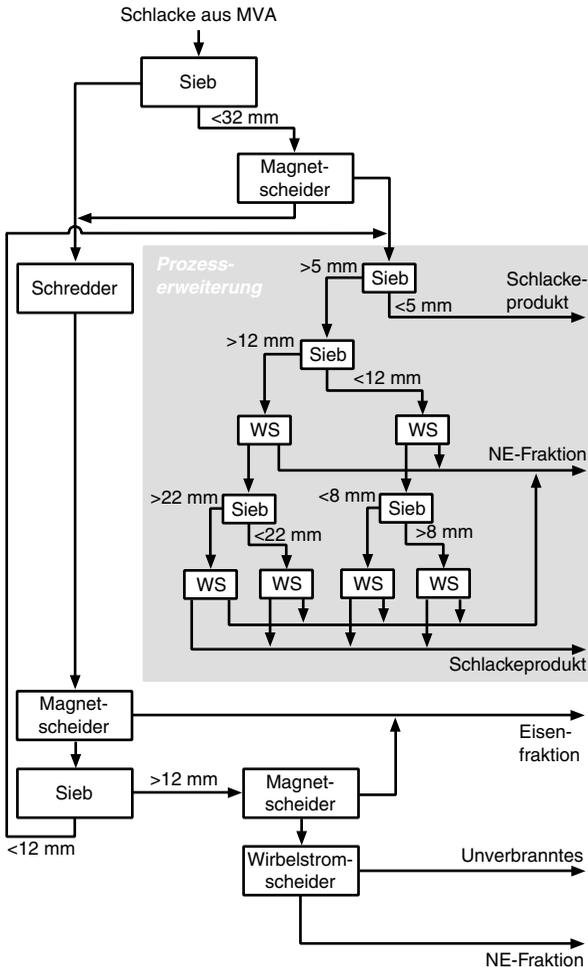


Abb. 8.8. Prozesskette der MVA-Schlackenaufbereitung mit zusätzlichen Schritten zur NE-Metall-Gewinnung

sehr großen Menge an Restmüll im Vergleich zur DSD-Fraktion erscheint diese Option wenig sinnvoll und wird daher auch nicht weiter verfolgt. Stattdessen wird als nächster Szenarioschritt die vollständige Verbrennung des Restmülls und damit auch der darin enthaltenen LVP-Fraktion angenommen. Dabei wird der Energieinhalt des Mülls in der Weise berücksichtigt, dass Masse und Heizwert des LVP-Anteils im Hausmüll der Gewinnung der NE-Fraktion zugewiesen und zum

Energiebedarf nach Kapitel 8.4.1 hinzuaddiert wird. Der durchschnittliche Heizwert der LVP-Fraktion beträgt auf Grund großer Anteile von Wasser (20%) und inerter oxidischer Materialien lediglich 17 MJ/kg. Energie liefern allein Kunststoffe (40%) und Papier (2%).

Eine weitere theoretische Möglichkeit, die Erfassungsquote für LVP über 89% zu erhöhen stellt ein verbessertes Verbraucherverhalten dar, d. h. eine bessere Trennung des Abfalls in den Haushalten. Für diesen Fall sollen die vollständig erfassten Leichtverpackungen durch vollautomatische Sortierung, Pyrolyse und Mehrkammerofen verarbeitet werden.

Die Ergebnisse dieser Szenarioschritte sind in Abb. 8.9 dargestellt, indem für jeden Fall die ressourcenorientierte Recyclingquote und der Primärenergiebedarf in Abhängigkeit von der energetischen Bilanzierungsmethodik angegeben sind. Die Betrachtung der Recyclingeffizienz zeigt zunächst, dass die ressourcenorientierte Quote mittels Ersetzen des DSD-Aufbereitungssystems durch die Kombination aus vollautomatischer Sortierung und Pyrolyse von 59% auf 76,3% erhöht werden kann. Die Aufbereitung der MVA-Schlacke zu 100% anstatt zu nur 2/3 steigert die Rückgewinnungsquote nur um 0,7 Prozentpunkte. Aber die optimierte Schlackenaufbereitung verbessert die gesamte Recyclingeffizienz auf 79%. Eine weitere deutliche Erhöhung um 5,5 Prozentpunkte wird durch vollständige Verbrennung des Hausmülls und somit der darin enthaltenen, nicht durch das DSD erfassten LVP-Fraktion und Gewinnung des Verpackungsaluminiums durch optimale Schlackenaufbereitung erreicht. Der hypothetische Fall vollständiger LVP-Erfassung durch das DSD resultiert in einer ressourcenorientierten Recyclingquote von 85,7%, die natürlich der technischen Quote des Sortec/Pyrolysesystems entspricht (vgl. Abschnitt 8.4.1).

Bei alleiniger Berücksichtigung der Energieeinträge durch Brennstoffe und Elektrizität unterscheiden sich die verschiedenen Szenarioschritte kaum bezüglich des Primärenergiebedarfs. Auch die zusätzliche Bilanzierung stoffgebundener Energieinhalte und die Berechnung autothermer Pyrolysen zeigt einen fast konstanten Energieaufwand. Danach ist es aus energetischer Sicht also sinnvoll, den gesamten Teil der Leichtverpackungen, die nicht über das DSD erfasst werden, zusammen mit dem Hausmüll zu verbrennen und das Aluminium aus der MVA-Schlacke zurück zu gewinnen. Letztendlich wird damit eine gesamte Recyclingquote von 84,6% erreicht, die fast so hoch ist wie die technisch erreichbare.

Um aber die Müllverbrennung analog zu den anderen Aufbereitungsstufen zu bilanzieren, müssen auch hier stoffgebundene Energieinhalte berücksichtigt werden. Dadurch verdoppelt sich der Energiebedarf der Sekundäraluminiumherstellung grundsätzlich auf etwa 46 GJ/t. Trotz des geringen Anteils des aus der MVA-Schlacke gewonnenen Aluminiums ist der Einfluss der Müllverbrennung auf die Energiebilanz enorm. Der NE-Gehalt in Leichtverpackungen beträgt zwar nur 5%, aber diesem Teil wird der gesamte Energieinhalt der Fraktion zugewiesen. Aus dem gleichen Grund erhöht sich der Energieaufwand für die Rückgewinnung durch vollständige Restmüllverbrennung nochmal um 100% auf 88 GJ/t. Unter

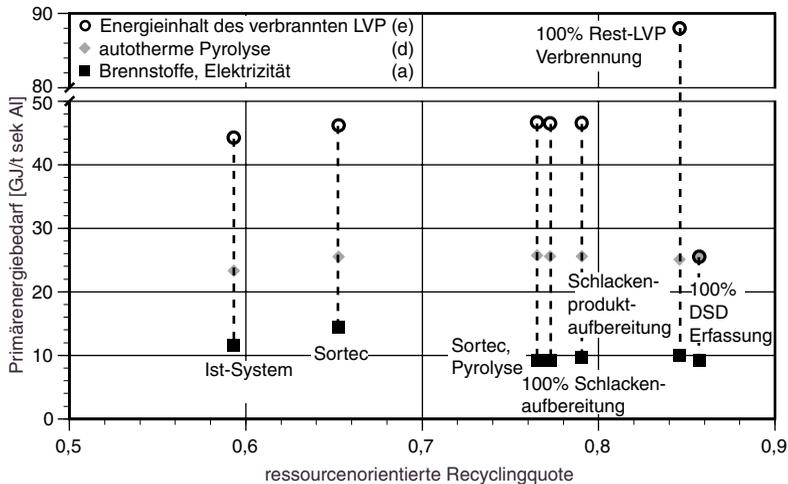


Abb. 8.9. Ressourcenorientierte Recyclingquote der Recyclingketten des Szenarios und deren Primärenergiebedarf in Abhängigkeit von der energetischen Bewertung

diesen Voraussetzungen erscheint diese Methode der Steigerung der Recyclingquote aus energieorientierter Sicht fraglich.

An dieser Stelle ist aus zwei Gründen eine erneute Systemerweiterung von der Sekundärproduktion bzw. Recyclingquoten allein hin zur Betrachtung der gesamten Aluminiumproduktion bzw. Recyclinganteilen erforderlich. Zum einen kann nur der Vergleich mit der primären Herstellung zur Identifikation der energetisch optimalen Recyclingquote führen (vgl. Abb. 8.3) und zum anderen ist bei den bisherigen Berechnungen die Nutzung der Müllverbrennungswärme zur Produktion von Strom bzw. Fern- oder Prozesswärme nicht berücksichtigt worden. Diese Kuppelproduktion kann im Gesamtsystem der Aluminiumherstellung gutgeschrieben werden.

8.4.4 Systemerweiterung zur gesamten Aluminiumproduktion

Für die abschließende Beurteilung von Bemühungen zur Erhöhung der Recyclingquote aus energetischer Sicht wird im Folgenden also ein geschlossenes Aluminiumsystem wie zu Beginn des Kapitels 8.4 erläutert im Bilanzraum Deutschland zu Grunde gelegt. Dabei setzt sich das Primärmetall aus heimischer Produktion und Importen aus verschiedenen Ländern entsprechend der Handelsstruktur im Jahr 1997 zusammen [56]. Die Bilanzierung der Strombereitstellung der Primäraluminiumhütten fußt auf einem Vertragsmix, der sich insofern vom Landesverbundmix unterscheidet, als dass in jedem Fall der vertragmäßige Stromversorger und dessen Grundlastmix herangezogen wird [10].

Um eine Allokation durch Erweiterung der Systemgrenzen zu vermeiden, wird für die energetische Gutschrift bei der Müllverbrennung angenommen, dass die Abwärme ausschließlich in Strom umgewandelt wird. Dieser wird dann wiederum in deutschen Hütten zur Produktion von Primäraluminium genutzt, das die Metallverluste beim Recycling substituiert. Der elektrische Nettowirkungsgrad deutscher MVA, die nur Strom erzeugen, liegt im Schnitt bei 15% [70]. Daraus folgt also ein erheblich größerer Primärenergiebedarf für die Primärmetallherstellung im Vergleich zur vertragsmäßigen Strombereitstellung aus überwiegend Braunkohle- und Kernkraftwerken mit mehr als doppelt so hohen Umwandlungseffizienzen. Zwar wird Müll in Ökobilanzen häufig als regenerativer Brennstoff betrachtet und der Wirkungsgrad von MVA daher zu 100% angesetzt, den Rohstoff für die Herstellung von Kunststoffen, die den weitaus größten Energieeintrag liefern, bilden aber Erdölprodukte, also fossile Energieträger. Aus diesem Grund muss die Effizienz der MVA analog zu fossil befeuerten Kraftwerken ermittelt werden.

Abb. 8.10 zeigt die unter diesen Rahmenbedingungen und für verschiedene

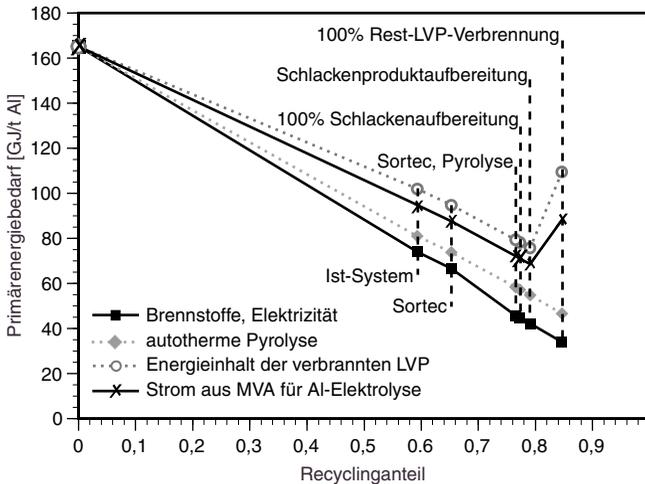


Abb. 8.10. Primärenergiebedarf der Aluminiumherstellung in Abhängigkeit vom Recyclinganteil und von der energetischen Bewertung

Methoden der Energiebilanzierung berechneten Verläufe des Primärenergiebedarfs der Aluminiumherstellung in Abhängigkeit vom Recyclinganteil, der hier genau der ressourcenorientierten Recyclingquote entspricht. Die ausschließliche Bilanzierung von Brennstoffen und elektrischer Energie führt bis zur höchsten Recyclingquote im letzten Szenarioschritt zu einem stetig sinkendem Energieauf-

wand. Gleiches gilt auch für die zusätzliche Berücksichtigung von stoffgebundenen Energieinhalten und autothermen Betrieb der Pyrolyse im DSD-Recyclingsystem. Unter Berücksichtigung des stoffgebundenen Energieinhalts der LVP-Fraktion bei der MVA-Bilanzierung steigt der Primärenergiebedarf bei Überschreiten eines Recyclinganteils von 79%. Das gilt auch bei Erteilung einer Energiegut-schrift für die Stromerzeugung aus Müllverbrennung, die sich in der Reduzierung des Energieeinsatzes von 74,2 auf 67,1 GJ/t auswirkt. Das Minimum deutet darauf hin, dass hinsichtlich des Primärenergieaufwands an dieser Stelle die optimale Recyclingquote erreicht ist. Mit der Erhöhung der Recyclingquote bzw. des -anteils von 59%, die heute vom DSD erreicht werden, auf 79% kann der Primärenergiebedarf der Gesamtproduktion von Aluminium um fast 28% gesenkt werden.

9 Multikriterielle Optimierungsansätze

9.1 Allgemeine Überlegungen

Die ganzheitliche Betrachtung von Prozessen, Systemen oder Produkten erfordert die Einbeziehung mehrerer unterschiedlicher Dimensionen bzw. Kriterien. Im Kapitel 8.4.4 ist am Beispiel der Aluminiumherstellung ein Kompromiss zwischen dem Primärenergiebedarf als eine Kenngröße der Ressourceninanspruchnahme und dem Recyclinganteil als Maß für Technischeffizienz quantifiziert. Diese Optimierung ist in Abb. 9.1 a) allgemein für Ressourcen (R) und Technik (η als Effizienz) dargestellt. Eine zusätzliche Dimension wird durch die Berücksichti-

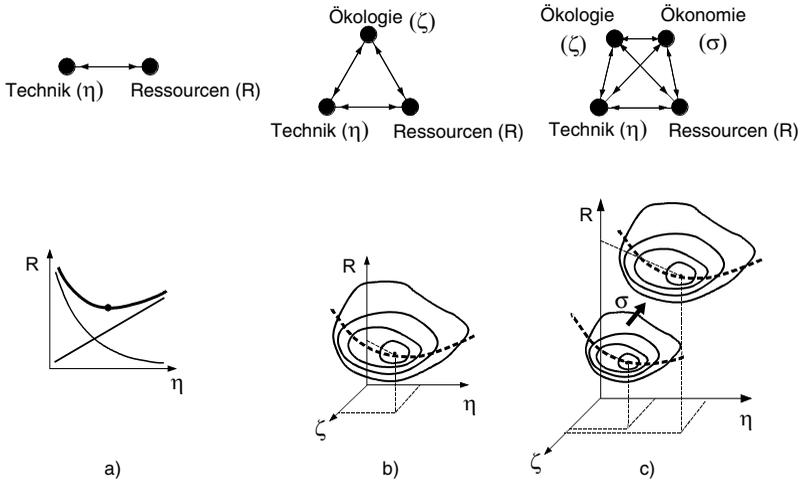


Abb. 9.1. Allgemeiner Weg zu multikriteriellen Optimierungen

gung ökologischer Effekte, die in erster Linie durch Emissionen gekennzeichnet werden, geschaffen. In Abb. 9.1 b) wird die Erweiterung um die Zielgröße Ökologie durch einen zusätzlichen Parameter ζ veranschaulicht. Nach wie vor werden technische Fragestellungen jedoch letztendlich meist durch ökonomische Kri-

terien entschieden. Die Ökonomie ist in Abb. 9.1 c) als vierte Dimension (σ) abgebildet. Neben den verschiedenen Dimensionen der ganzheitlichen Betrachtung selbst können auch innerhalb dieser vier Kategorien z. T. zahlreiche Zielgrößen unterschieden werden. So können im Bereich der Ressourceninanspruchnahme ebenso diverse Rohstoffe betrachtet werden wie auf der Seite der Ökologie verschiedene Emissionen. Auch lassen sich aus ökonomischer Sicht z. B. Kosten getrennt für Investitionen, Betrieb, Entsorgung, Steuern, externe Effekte usw. ermitteln. Diese Überlegungen zeigen den extrem hohen Anspruch einer ganzheitlichen Betrachtung, die ein höchst komplexes Problem bildet und praktisch kaum realisierbar ist. Daher ist es sinnvoll, wichtige Kenngrößen auszuwählen, an denen jeweils Optimierungen vorzunehmen sind. Die Gewichtung bzw. Bewertung verschiedener Kenngrößen erlaubt dann erst die Ermittlung des Gesamtoptimums.

9.2 Recyclingszenario für CO₂-Emissionen

Für die Aluminiumherstellung wird im Rahmen einer mehrdimensionalen Betrachtung im Folgenden der Einfluss erhöhter Recyclinganteile auf den Gesamtausstoß von Treibhausgasen untersucht, die seit einigen Jahren im Mittelpunkt allgemeiner Umweltdiskussionen stehen. Insbesondere werden klimawirksame Gase in Form von CO₂ durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe bei Energiebereitstellung und -nutzung freigesetzt. Damit besteht hier also ein unmittelbarer Zusammenhang zum übergeordneten Thema dieser Arbeit.

Die Systemgrenzen und Szenarioschritte für das Produkt Aluminium in Leichtverpackungen entsprechen den Randbedingungen im Kapitel 8.4, so dass die Ergebnisse aussagekräftig verglichen werden können. Während bei der Sekundäraluminiumherstellung ausschließlich CO₂ und zu geringen Teilen CH₄ als klimawirksame Emissionen aus Energiebereitstellung und -nutzung auftreten, trägt bei der Primärproduktion auch der Ausstoß von CF₄ und C₂F₆, die durch Anodeneffekte bei der Elektrolyse entstehen, immerhin zu etwa einem Viertel zur Treibhausgasemission bei. Die nicht energie- sondern prozessbedingten Fluorverbindungen treten zwar nur in sehr geringen Massenströmen auf, erlangen aber auf Grund des extrem hohen Erwärmungspotenzials (GWP) eine wichtige Bedeutung (s. Tabelle 9.1).

Tabelle 9.1. Treibhauspotenzial verschiedener Gase für einen Zeithorizont von 100 Jahren bezogen auf CO₂ [25]

CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CF ₄	C ₂ F ₆
1	21	310	6300	12500

Für die Primäraluminiumversorgung in Deutschland sind spezifische Treibhausgasemissionen von insgesamt 13,5 t CO₂-Äquivalente/t Al ermittelt worden,

die sich nach Abb. 9.2 auf verschiedene Prozessstufen verteilen. [56]

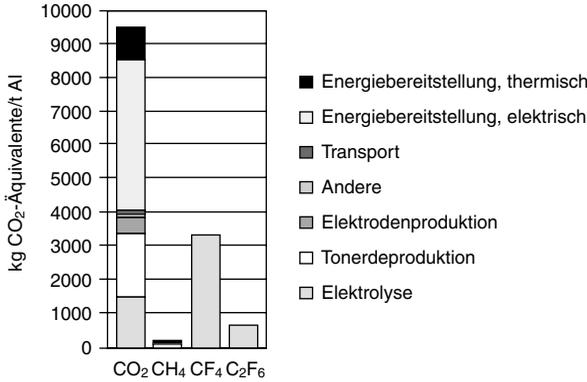


Abb. 9.2. Spezifische CO₂-Äquivalente der Primäraluminiumherstellung

Abb. 9.3 zeigt als Ergebnis der Szenariorechnung die Abhängigkeit der CO₂-äquivalenten Emissionen vom Recyclinganteil und von der Methode der Energiebilanzierung.

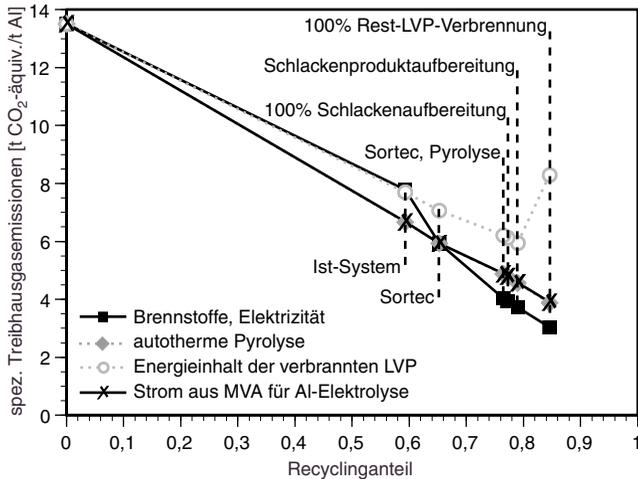


Abb. 9.3. Spezifische CO₂-äquivalente Emissionen der Aluminiumherstellung in Abhängigkeit von dem Recyclinganteil und der Methodik der energetischen Bewertung

Auf Grund des nichtlinearen Zusammenhangs zwischen dem Organikgehalt des Pyrolyseeinsatzes und den CO₂-Emissionen des Prozesses verläuft die Kurve bei Berücksichtigung autothermer Betriebsbedingungen für das aktuelle DSD-System unterhalb der Linie für den Fall der Bilanzierung unter Vernachlässigung dieser Fahrweise und für die fortschrittlichen Recyclingsysteme oberhalb. Die Bilanzierung der Müllverbrennung ohne energetische Gutschrift führt zu einem erhöhten CO₂-Ausstoß und einem Minimum bei einem Recyclinganteil von 79%. Die Verrechnung des durch LVP-Verbrennung erzeugten Stroms mit dem Energiebedarf der deutschen Primäraluminiumhütten bzw. die entsprechende Substitution von CO₂-Emissionen durch die vertragsmäßige Strombereitstellung für die Elektrolysen lässt die Gesamtemissionen wieder auf das Niveau für die Bilanzierung autothermer Pyrolyse ohne Berücksichtigung der Müllverbrennung zurückfallen. Die beiden Linien sind in dem Diagramm kaum voneinander zu unterscheiden. Mit der vorrangigen Zielsetzung einer Reduzierung klimawirksamer Emissionen durch die Aluminiumherstellung empfiehlt sich also die Erhöhung der Recyclingquote auf den technisch theoretisch erreichbaren Maximalwert von 84,6%. Die Auswirkungen einer Steigerung darüber hinaus können zwar wegen gegenwärtig fehlender technischer Möglichkeiten nicht quantifiziert werden, müssen sich aber wie in Abschnitt 8.4.3 diskutiert in jedem Fall in einem Anstieg der Gesamtemissionen zeigen. Für eine um gegenüber dem heutigen DSD-System um 25,3 Prozentpunkte erhöhte ressourcenorientierte Recyclingquote können die spezifischen CO₂-äquivalenten Emissionen im Gesamtsystem um 41,5% gesenkt werden. Die Reduktion bis zur primärenergetisch optimalen Quote von 79% (s. Kapitel 8.4.4) beträgt 31,4%.

9.3 Ökonomische Gesichtspunkte

Im Abschnitt 9.1 ist die besondere Bedeutung der ökonomischen Dimension für Optimierungsprobleme angesprochen worden. Allerdings stehen einer genauen und aussagekräftigen Kostenanalyse von technischen Prozessen bzw. Produktionssystemen z. T. erhebliche Schwierigkeiten entgegen.

Grundsätzlich werden Kostendaten von Unternehmen aus Konkurrenzgründen nur selten veröffentlicht oder auch vertraulich weitergegeben. Somit stützen sich viele Angaben auf Schätzungen und sind daher wenig belastbar. Weiterhin handelt es sich bei ökonomischen Daten um sehr dynamische Größen. So schwankte z. B. der Preis für Aluminium an der Londoner Börse in den letzten fünf Jahren zwischen 1200 und 2000 US\$ [34]. Damit sind Bilanzierungsergebnisse zeitlich nicht stabil und ggf. nur sehr eingeschränkt gültig. Großen Einfluss auf Kosten haben auch gesetzliche bzw. staatliche Regelungen, Steuern, Zölle, Subventionen, etc. Dadurch wird die Vergleichbarkeit ökonomischer Daten oft zusätzlich erschwert. Auch das DSD ist kein marktwirtschaftliches System, da es auf Grund der gesetzlich vorgeschriebenen Verwertung von Verpackungen entstanden ist. Ein weiteres Problem stellen verdeckte Kosten dar, die nicht erfasst werden kön-

nen. Im Falle des DSD verursacht z. B. die getrennte Sammlung und insbesondere die Säuberung von gebrauchten Verpackungen zusätzliche Kosten beim Verbraucher. Daher erscheint es insgesamt praktisch unmöglich, ein Szenario der Kostenentwicklung für Aluminium in Leichtverpackungen in Abhängigkeit von der Recyclingquote analog zu den Analysen hinsichtlich Primärenergiebedarf und Treibhausgasemissionen zu berechnen. Die erforderlichen Arbeiten würden weit über den Rahmen dieser Arbeit hinausgehen. Darüber hinaus führt eine von der Europäischen Kommission in Auftrag gegebene Studie zu dem Ergebnis, dass beim vom DSD durchgeführten Aluminiumrecycling den Erlösen für die Aluminiumfraktion von 80 DM/t Gesamtkosten von 1625 DM/t gegenüberstehen. Somit stellt sich diese Form der Wiederverwertung im Vergleich zur Primärmetallproduktion höchst unwirtschaftlich dar [62].

10 Zusammenfassung und Ausblick

Der Energieeinsatz stellt für die Aluminiumindustrie einen bedeutenden Indikator für die Beurteilung von Nachhaltigkeit dar. Neben dem Ressourcengebrauch von Energierohstoffen gehen mit Energieaufwendungen auch in großem Maße ökologische Wirkungen z. B. durch energiebedingte Emissionen sowie ökonomische Effekte durch Energiekosten einher.

In der vorliegenden Arbeit sind Möglichkeiten der verbesserten Energienutzung bei der Aluminiumherstellung untersucht worden. Dazu sind verschiedene Methoden der energetischen Bewertung angewendet worden.

Ausgehend von einer Grobgliederung der Hauptprozesskette sind für die Prozessschritte Bauxitgewinnung und Transport, Tonerdeherstellung, primäre Verhüttung sowie Sekundäraluminiumproduktion Teilprozessketten analysiert worden. Ziel dieser Untersuchungen war zum einen die Ermittlung von Einflussgrößen auf den Energiebedarf und von technikabhängigen Bandbreiten des Energieeinsatzes. Zum anderen sollten energetisch relevante Prozessschritte in der Hauptprozesskette sowie in den Nebenprozessketten identifiziert werden. Es hat sich gezeigt, dass die Bauxitförderung und sämtliche Transporte bezüglich des Gesamtenergiebedarfs der Primärproduktion von untergeordneter Bedeutung sind. Dagegen müssen Nebenprozesse wie die Bereitstellung von Natronlauge für das Bayer-Verfahren im Tonerdewerk und von Anoden für die Schmelzflusselektrolyse in jedem Fall in Energiebilanzen berücksichtigt werden. Dabei stellen gerade die Kohlenstoffanoden, deren stoffgebundener Energieinhalt in Ökobilanzen oft nicht erfasst wird, selbst Energieträger da, die einen wichtigen Beitrag zur Energieversorgung der Elektrolyse liefert.

Aufbauend auf den prozessschrittspezifischen Analysen sind Szenariorechnungen zu Energieeinsparpotenzialen durchgeführt worden. Auf Grund der energetischen Relevanz haben sich dabei die Berechnungen auf die Primärproduktion unter Vernachlässigung der Bauxitproduktion und sämtlicher Transporte, auf die Stromversorgung der Elektrolyse stellvertretend für die Energiebereitstellung sowie auf das Recycling am Beispiel von Aluminium in Leichtverpackungen konzentriert.

Die Szenariorechnungen haben ergeben, dass durch den Einsatz der jeweils besten verfügbaren Prozesstechnik zur Primäraluminiumgewinnung der spezifische Primärenergiebedarf um fast 20% gesenkt werden kann. Die größten Anteile am Reduktionspotenzial haben dabei die Elektrolyse, der Aufschluss des Bauxits und die Natronlaugeherstellung. Dagegen bieten die Anoden für die Elektrolyse, der

Strombedarf des Tonerdewerks und die Kalzination des Aluminiumhydroxids aus dem Aufschluss mit jeweils weniger als 1,5% bezogen auf den Gesamtenergiebedarf kaum Möglichkeiten der Energieeinsparung.

Auf Grund der großen Unterschiede bei den Effizienzen verschiedener Kraftwerkstypen zur Verstromung unterschiedlicher Energieträger kann die Variation der Bereitstellung von Elektrizität für die Aluminiumelektrolyse theoretisch zu deutlich größeren Einsparungen führen. So würde die alleinige Versorgung von Aluminiumhütten mit Strom aus Wasserkraft den Primärenergiebedarf um mehr als 38% senken. Bei gleichbleibendem Strommix bleibt das Einsparpotenzial durch Einsatz jeweils bester verfügbarer Techniken auf 15% beschränkt und bewegt sich damit im Rahmen der durch optimierte Elektrolýsetechnik erreichbaren Verminderungen.

Im Bereich der Sekundäraluminiumherstellung ist ein Szenario zur Erhöhung der Recyclingquote bzw. des Recyclinganteils an der Gesamtproduktion berechnet worden. In Abhängigkeit von der zu Grunde gelegten energetischen Bewertung konnten hinsichtlich des Primärenergieaufwands der Gesamtproduktion verschiedene Optima der Verwertungsquote ermittelt werden. Bei alleiniger Bilanzierung des Einsatzes von Elektrizität und fossilen Brennstoffen lohnt sich die Erhöhung der Recyclingquote aus energetischer Sicht auf bis zu 85%. Dagegen resultiert die Berücksichtigung von stoffgebundenem Energieinhalt, der z. B. durch organische Bestandteile eingetragen wird, in einer optimalen Quote von 79%. Aber selbst in diesem Fall ergibt sich gegenüber dem Ist-Zustand mit einer Recyclingquote von 59% eine Senkung des Primärenergieaufwands der Gesamtproduktion von 28%.

Eine Erweiterung der Betrachtungen um die ökologische Dimension ist bezüglich klimarelevanter Gasemissionen auch am Beispiel der optimalen Recyclingquote von Aluminium in Leichtverpackungen erfolgt, da hier hinsichtlich des Energiebedarfs die größten Einsparpotenziale bestehen. Unter den gleichen Randbedingungen führt dabei die Erhöhung der Verwertungsquote auf 85% praktisch in jedem Fall der energetischen Bewertung zu einer deutlichen Senkung von CO₂-äquivalenten Emissionen.

Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen erfassen die gegenwärtige Situation und auch die Möglichkeiten der Energienutzung über sämtliche Prozessstufen der primären und sekundären Aluminiumherstellung mit angemessener Genauigkeit und Methodik. Damit ist auch eine Basis für aufbauende bzw. ergänzende Betrachtungen zu übergeordneten und auch zukünftigen Fragestellungen zur Nachhaltigkeit in der Aluminiumindustrie geschaffen.

Die Vorgehensweise der vorliegenden Analysen eignet sich zur analogen Betrachtung weiterer ressourcenspezifischer Indikatoren wie Verbräuche verschiedener Rohstoffe und unterschiedliche Emissionen bzw. Abfälle. Fraglich ist, ob in gleicher Weise auch für (sozio)ökonomische Indikatoren aussagefähige Daten erhoben werden können. In jedem Fall erfordert eine gesamte Beurteilung der Nachhaltigkeit des Metalls Aluminium die Gewichtung und Bewertung sämtlicher Indikatoren.

Im Bereich des energetisch optimalen Recyclings ist der Schwerpunkt auf den Verpackungssektor gelegt worden, da beim Recycling für die Anwendungen in den anderen wichtigen Branchen Bau und Verkehr bereits nahezu die technisch mögliche Quote erreicht ist. Daher wären analog detaillierte Szenariorechnungen mit dem übergeordneten Ziel die optimale Recyclingquote für das gesamte Aluminiumsystem zu ermitteln im Rahmen dieser Arbeit mit unverhältnismäßig großem Aufwand verbunden.

In den vorliegenden Untersuchungen ist die Legierungsqualität von Sekundärrohstoffen unberücksichtigt geblieben, da die Anteile von rezykliertem Metall zur Zeit relativ gering sind und somit Sekundäraluminium in jedem Fall Primäraluminium substituiert. Zukünftig können allerdings zunehmende Rücklaufmengen von genutztem Aluminium aus langlebigen Produkten legierungsspezifische Betrachtungen erforderlich machen.

11 Literatur

- 1 Albers H, Wrigge H Ch (1997) The effect of reduced emissions on aluminium electrolysis process. Travaux de ICSOBA, Vol. 24, 8th International Congress of ICSOBA, Mailand, S 485-492
- 2 Aluminium Oxid Stade GmbH (1997) Firmenbroschüre
- 3 Becker E (1993) Reststoffe des Aluminium-Recyclings - Chancen der Aufarbeitung und Weiterverwertung. Dissertation, RWTH Aachen
- 4 Bielfeldt K, Kämpf F, Winkhaus G (1976) Der Wärmeverbrauch zur Erzeugung von Aluminiumoxid. Erzmetall Vol. 29 No. 3, S 120-125
- 5 Briem S (2001) Entwicklung eines Energiemodells für Analysen von Energiebereitstellungsstrukturen. Dissertation, RWTH Aachen
- 6 Briem S, Alkan Z, Dienhart M, Quinkertz R (1998) Zusammenstellung charakteristischer Prozeßdaten und -schemata fossiler und nuklearer Stromerzeugungssysteme. Interner Bericht IB 98-5. Lehrstuhl für Reaktorsicherheit und -technik, RWTH-Aachen
- 7 Briem S, Alkan Z, Dienhart M, Quinkertz R (1998) Zusammenstellung spezifischer kumulierter Energieaufwendungen zur Bereitstellung von Rohmaterialien. Interner Bericht 98-11, Lehrstuhl für Reaktorsicherheit und -technik, RWTH Aachen
- 8 Der Grüne Punkt - Duales System Deutschland AG (1998) Verpackungsrecycling: Techniken, Trends, Tendenzen. 2. Auflage, Köln
- 9 Deutscher Bundestag, 13. Wahlperiode (1996) Zustimmungsbefürwortende Verordnung über die Entsorgung von Alautos und die Anpassung straßenverkehrsrechtlicher Vorschriften. Drucksache 13/5998
- 10 Dienhart M, Alkan Z, Briem S, Kugeler K, Kugeler O, Quinkertz R (2001) Influence of Different Energy Models on Overall Balancing of Primary Aluminum Smelting. Light Metals 2001, ed. by J. L. Anjier, TMS, Warrendale, USA, S 399-404
- 11 Dienhart M, von Fürstenberg R, Alkan Z, Briem S, Quinkertz R (2000) Treibhausgasemissionen der Wasserkraftnutzung. Interner Bericht 00-2, Lehrstuhl für Reaktorsicherheit und -technik, RWTH Aachen
- 12 Duales System Deutschland AG. Homepage: <http://www.gruener-punkt.de/de/index.php3?choice1=lizenznehmer&choice2=kosten>. Stand 01.05.2001
- 13 Fensterverbände Frankfurt. Homepage: <http://www.window.de>. Stand 01.03.2001
- 14 Forschungsstelle für Energiewirtschaft FfE (1993) Die Bereitstellung von elektrischer Energie in Deutschland, München
- 15 Frischknecht R (1996) Ökoinventare von Energiesystemen. Bundesamt für Energiesysteme, Bern
- 16 Gausemaier J (1996) Szenario-Management: Planen und Führen mit Szenarien. 2. Bearb. Aufl., München
- 17 Gerke M (1999) Ofenmodell. Interner Bericht, IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling, RWTH Aachen
- 18 Gesamtverband der deutschen Aluminiumindustrie e.V. (1996) Recyclingkreislauf bei Flaschenverschlüssen. Aluminium Vol. 72, No. 1
- 19 Grjotheim K, Matiasovsky K (1983) Impurities in the aluminum electrolyte, Aluminium Vol. 59, No. 9, S 687-693

- 20 Grjotheim K, Welch B J (1988) Aluminium Smelter Technology. 2. Auflage, Aluminium-Verlag, Düsseldorf
- 21 Hauff V (1987) Unsere gemeinsame Zukunft: Der Brundtlandt-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung. Greven
- 22 Haupin W (1991) The Influence of Additives on Hall Heroult Bath Properties. JOM Vol.43 No. 11, S 28-34
- 23 Hoberg H, Langen M (2000) Modern Recycling of PMD-Packaging Material in the Fully Industrial Plant Sortec 3.0. Proceedings of the XXI International Mineral Processing Congress, ed. by Massacci P, Rome, Italy
- 24 HTP - Ingenieure für Umweltverfahrenstechnik (1994) Planungsgrundlagen zur mechanischen Sortierung von Verpackungsmaterialien, Aachen
- 25 Intergovernmental Panel of Climate Change (1996) Climate Change 1995. The Science of Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, Großbritannien
- 26 International Energy Agency (1998) World Energy Outlook. IEA/OECD, Paris
- 27 Kammer C (1995) Aluminium-Taschenbuch. Band 1: Grundlagen und Werkstoffe. 15. Auflage. Aluminium-Zentrale Düsseldorf. Aluminium-Verlag, Düsseldorf.
- 28 Kellerwessel H (1997) Aufbereitung disperser Feststoffe: Mineralischer Rohstoffe, Sekundärrohstoffe, Abfälle. Verlag Buchhandlung Schmetz am Dom, Aachen
- 29 Kugeler K, Alkan Z, Briem S, Dienhart M, Quinkertz R (1999) Arbeits- und Ergebnisbericht des Teilprojektes 7. In: SFB 525 Ressourcenorientierte Gesamtbetrachtung von Stoffströmen metallischer Rohstoffe - Entwicklung von Methoden und ihre Anwendung - Arbeits- und Ergebnisbericht 1997/1998/1999. RWTH-Aachen
- 30 Kugeler K, Kugeler M, Alkan Z, Briem S (1998) Erzeugung von Elektrischer Energie in Kernkraftwerken mit hohem Wirkungsgrad. Berichte des Forschungszentrum Jülich. Jül-3598, Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich
- 31 Kvande H (1994) Bath Chemistry and Aluminium Cell Performance - Facts, Fictions and Doubts. JOM Vol. 46 No. 11, S 22-28
- 32 Lang, Solymar (1981) Prospect of Bayer Plant Energy Conservation. Light Metals
- 33 Liebig D, Quinkertz R, Briem S, Dienhart M, Alkan Z (1999) Energetische Analysen zur Optimierung der Recyclingquote bei der Aluminiumherstellung. Interner Bericht IB 99-15. Lehrstuhl für Reaktorsicherheit und -technik, RWTH Aachen
- 34 London Metal Exchange (2001) Homepage: http://www.lme.co.uk/data_prices/home.html. Stand 01.05.2001
- 35 Martens P N, Koch H, Mistry M, Röhrlich M, Kugeler K, Alkan Z, Briem S, Dienhart M, Quinkertz R (1999) Energetische Analyse von Tagebauen mit Hilfe des kumulierten Energieaufwandes (KEA) am Beispiel Bauxit. Erzmetall 52 Nr. 6. GDMB Clausthal-Zellerfeld
- 36 Meier-Kortwig J (2001) Persönliche Mitteilung vom 23.01.2001 Lehrstuhl für Aufbereitung und Recycling fester Abfallstoffe, RWTH Aachen
- 37 Metallgesellschaft AG (1967) Metallstatistik 54. Frankfurt am Main
- 38 Metallgesellschaft AG (1978) Metallstatistik 65. Frankfurt am Main
- 39 Metallgesellschaft AG (1989) Metallstatistik 76. Frankfurt am Main
- 40 Metallgesellschaft AG (2000) Metallstatistik 87. Frankfurt am Main
- 41 Normenausschuß Grundlagen des Umweltschutzes (NAGUS) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (1997) Umweltmanagement. Produkt-Ökobilanz. Prinzipien und allgemeine Anforderungen. DIN EN ISO 14040. Beuth Verlag, Berlin
- 42 Normenausschuß Grundlagen des Umweltschutzes (NAGUS) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (1998) Umweltmanagement. Produkt-Ökobilanz. Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie Sachbilanz. DIN EN ISO 14041. Beuth Verlag, Berlin
- 43 Normenausschuß Grundlagen des Umweltschutzes (NAGUS) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2000) Umweltmanagement. Produkt-Ökobilanz. Wirkungsabschätzung. DIN EN ISO 14042. Beuth Verlag, Berlin
- 44 Normenausschuß Grundlagen des Umweltschutzes (NAGUS) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2000) Umweltmanagement. Produkt-Ökobilanz. Auswertung. DIN EN ISO 14043. Beuth Verlag, Berlin

-
- 45 Oye H A et al (1999) Aluminium: Approaching the New Millenium. JOM Vol. 51, No. 2, S 29-42
- 46 Oye H. A., Huglen R (1992) Managing Aluminium Reduction Technology: Extracting the Most from Hall Heroult. JOM, Vol. 42, No. 11, Seite 23-28
- 47 Pawlek R Aluminium Refineries of the World. Aluminium-Verlag Düsseldorf
- 48 Pawlek R (1996) Alusaf Hillside Smelter Projekt. Light Metal Age, Vol. 54, No. 8, S 8-21
- 49 Pawlek R (1998) Primary Aluminium Smelters and Producers of the World. Aluminium-Verlag, Düsseldorf
- 50 Postlethwaite D, Schul W, Stalmans M (1995) A Life Cycle Inventory for the Production of Sulphur and Caustic Soda in Europe. Tenside Surf. Det. 32, S 412-418
- 51 Pretz T, Meier-Kortwig J (1998) Aufbereitung von Müllschlacken unter besonderer Berücksichtigung der Metallrückgewinnung. Lehrstuhl für Aufbereitung und Recycling fester Abfälle, RWTH Aachen
- 52 PE Product Engineering GmbH (1998) Handbuch GaBi 3. Dettingen/Teck
- 53 Quinkertz R, Alkan Z, Briem S, Dienhart M (1998) Kumulierter Energieaufwand zur Herstellung von Betriebsmitteln für die Primäraluminiumerzeugung. Interner Bericht 98-10 Lehrstuhl für Reaktorsicherheit und -technik, RWTH Aachen
- 54 Quinkertz R, Dienhart M, Briem S, Alkan Z, Hammerschmidt J, Schlimbach J (1998) Analyse und Modellierung der Tonerdeproduktion nach dem Bayerverfahren. Interner Bericht IB 98-6. Lehrstuhl für Reaktorsicherheit und -technik, RWTH Aachen
- 55 Richards N E (1994) Strategies for Decreasing the Unit Energy and Environmental Impacts of Hall Heroult Cells, Light Metals, ed. Ulrich Mannweiler
- 56 Rombach G, Zapp P, Kuckshinrichs W, Friedrich B (2001) Technical Progress in the Aluminium Industry - A Scenario Approach. Light Metals 2001, ed. by J. L. Anjier, TMS, Warrendale, USA, S 1131-1137
- 57 Roullier J P (1990) Directories of the world aluminium industry. Vol. 4: Bauxite Deposits, Mining Operations and Producers of the World. Aluminium-Verlag GmbH, Düsseldorf
- 58 Schleer M, Briem S, Quinkertz R, Alkan Z, Schlimbach J (1998) Energetische und stoffliche Analyse von Elektrolysesystemen zur Verhüttung von Tonerde. Interner Bericht IB 98-4. Lehrstuhl für Reaktorsicherheit und -technik, RWTH Aachen
- 59 Schleer M, Quinkertz R, Briem S, Dienhart M, Alkan Z (1999) Technologien für das Umschmelzen von Aluminiumschrotten unter energetischen Gesichtspunkten. Interner Bericht IB 99-3. Lehrstuhl für Reaktorsicherheit und -technik, RWTH Aachen
- 60 Sonderforschungsbereich 525 „Ressourcenorientierte Gesamtbetrachtung von Stoffströmen metallischer Rohstoffe“. Homepage: http://sfb525.rwth-aachen.de/sfb/subpro/sub_pro2/entsorg/menuesteuerung.html. Stand 01.02.2001
- 61 Soderforschungsbereich SFB 525 (1999) Ressourcenorientierte Gesamtbetrachtung von Stoffströmen metallischer Rohstoffe - Entwicklung von Methoden und ihre Anwendung. Arbeits- und Ergebnisbericht 1997/1998/1999. RWTH Aachen
- 62 Taylor Nelson Sofres Consulting (2000) Cost-Efficiency of Packaging Recovery Systems - The Case of France, Germany, The Netherlands and The United Kingdom. Studie im Auftrag der Europäischen Kommission. Homepage: http://europa.eu.int/comm/enterprise/environment/reports_studies/studies/study00cost-eff_sofres_502038.pdf. Stand 01.05.2001
- 63 Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. 6th Edition. Electronic Release 2001
- 64 U.S. Geological Survey (2000) Mineral Commodity Summaries. URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/mcs2000.pdf>
- 65 Verein Deutscher Ingenieure (2000) Energiekennwerte. Definitionen-Begriffe-Methodik. VDI-Richtlinie 4661, Entwurf Oktober 2000. Beuth Verlag GmbH, Berlin
- 66 Verein Deutscher Ingenieure (1997) Kumulierter Energieaufwand. Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden. VDI-Richtlinie 4600. Beuth Verlag GmbH, Berlin
- 67 Welch B (1999) Aluminium Production Paths in the New Millenium. JOM, Vol. 51, No. 5, S 24-28
- 68 Wolf S (1997) Recycling of aluminium from obsolete cars - economical, technical and ecological aspects. 4th CETEM Aachen and 1st CETEM Workshop on Mineral Processing and Environmental Issues, Rio de Janeiro, Brasilien

- 69 Wolf S, Meier-Kortwig J, Hoberg H (1999) Modelling the material flow of recycling processes for aluminium alloys by means of technical recycling quotas. Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology, REWAS 99, ed. by Gaballah E, Hager J, Solozabl R. San Sebastian, Spain, pp. 1023
- 70 Wollny V, Weinem P, Dehoust G, Fritsche U (2000) Vergleich der rohstofflichen und energetischen Verwertung von Verpackungskunststoffen - Teil 1. Müll und Abfall 2000, 10, S 593-600

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Rainer Quinkertz
Geburtstag: 12.08.1971
Geburtsort: Geldern
Staatsangehörigkeit: deutsch

Schulbildung

1978 - 1982 St. Martini-Grundschule, Geldern
1982 - 1991 Friedrich-Spee-Gymnasium, Geldern

Wehrdienst

1991 - 1992 Instandhaltungseinheit in Braunschweig (Grundausbildung) bzw.
Coesfeld

Studium

1992 - 1997 Studium des Maschinenbaus an der Rheinisch-Westfälischen
Technischen Hochschule (RWTH) Aachen
Vertiefungsrichtung Verfahrenstechnik

Berufstätigkeit

1998 - 2001 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Reaktorsicherheit
und -technik (LRST) an der RWTH Aachen
seit 2001 Mitarbeiter der Siemens AG, Bereich Power Generation

