

Forschungszentrum Jülich



Grundlegende Entwicklungstendenzen im weltweiten Stoffstrom des Primäraluminiums

Hans-Günter Schwarz



Umwelt
Environment



Forschungszentrum Jülich GmbH
Programmgruppe Systemforschung und
Technologische Entwicklung

Grundlegende Entwicklungstendenzen im weltweiten Stoffstrom des Primäraluminiums

Hans-Günter Schwarz

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Umwelt/Environment

Band 24

ISSN 1433-5530 ISBN 3-89336-264-9

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Schwarz, Hans-Günter:

Grundlegende Entwicklungstendenzen im weltweiten Stoffstrom des Primäraluminiums /
Hans-Günter Schwarz. Forschungszentrum Jülich GmbH, Programmgruppe
Systemforschung und Technologische Entwicklung. - Jülich : Forschungszentrum,
Zentralbibliothek, 2000

(Schriften des Forschungszentrums Jülich. Reihe Umwelt ; Band 24)
ISBN 3-89336-264-9

Herausgeber Forschungszentrum Jülich GmbH
und Vertrieb: ZENTRALBIBLIOTHEK
 D-52425 Jülich
 Telefon (0 24 61) 61-53 68 · Telefax (0 24 61) 61-61 03
 e-mail: zb-publication@fz-juelich.de
 Internet: <http://www.fz-juelich.de/zb>

Umschlaggestaltung: Grafische Betriebe, Forschungszentrum Jülich GmbH

Druck: Grafische Betriebe, Forschungszentrum Jülich GmbH

Copyright: Forschungszentrum Jülich 2000

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Umwelt/Environment Band 24

ISSN 1433-5530

ISBN 3-89336-264-9

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie oder in einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen des Sonderforschungsbereichs (SFB) 525 „Ressourcenorientierte Gesamtbetrachtung von Stoffströmen metallischer Rohstoffe“ in Teilprojekt 9 "Systemanalyse" entstanden. Das langfristige Ziel des Sonderforschungsbereichs besteht darin, Handlungsoptionen für eine ressourcenschonende Bereitstellung und Verarbeitung metallischer Rohstoffe im Spannungsfeld technischer Entwicklungen sowie ökonomischer, ökologischer und gesellschaftlicher Zielsetzungen aufzuzeigen.

Modelle der Prozeßprogrammierung bieten sich als Werkzeuge für integrierte Analysen von Stoffströmen an. Dies läßt ihnen auch im Rahmen des SFB 525 eine zentrale Stellung zukommen. Das Modell der globalen Aluminiumwirtschaft (GlobAl) erlaubt die gleichzeitige Untersuchung der technischen, geographischen, ökologischen und ökonomischen Dimension des Stoffstroms des Primäraluminiums. Es simuliert einen Wettbewerbsmarkt für die Primäraluminiumwirtschaft und versteht den Stoffstrom des Primäraluminiums als ökonomisch determiniert. Durch Szenariorechnungen auf Basis von GlobAl werden in der vorliegenden Arbeit Entwicklungstendenzen im weltweiten Stoffstrom des Primäraluminiums isoliert. Damit wird gleichzeitig die Leistungsfähigkeit und Flexibilität von Modellen der Prozeßprogrammierung zur Stoffstromanalyse demonstriert.

Vielen Dank all meinen Kollegen im SFB 525 für die anregenden Diskussionen und für die Lieferung vielfältiger Daten, die für das Gelingen der Modellierung unerläßlich waren. Besonderer Dank gilt Herrn Hake, Dr. Kuckshinrichs, Dr. Zapp und Frau Krüger, Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung (STE), Forschungszentrum Jülich, sowie Herrn Briem, Lehrstuhl für Reaktorsicherheit und -technik, RWTH Aachen, die meine Arbeit hilfreich unterstützt haben.

Erlangen im Mai 2000

Hans-Günter Schwarz

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis.....	VI
Abbildungsverzeichnis.....	X
I. Einleitung.....	1
II. Methodische Aspekte.....	2
1. Stoffstrom des Primäraluminiums als Erklärungsgegenstand.....	2
2. GlobAl als Analyseinstrument.....	4
3. Szenarien als Analysemethode.....	5
4. Grenzen in der Aussagefähigkeit.....	6
III. GlobAl.....	7
1. Einordnung von GlobAl.....	7
2. Formalstruktur, Modellparameter und Modelloutput.....	9
2.1 Allgemeine Formalstruktur.....	10
2.2 Modellparameter.....	11
2.2.1 Kostenparameter.....	11
2.2.2 Kapazitätsgrenzen, exogene Nachfragegrößen und Transformationskoeffizienten.....	12
2.2.3 Reine Bilanzierungsparameter.....	13
2.3 Modelloutput.....	13
3. Abbildung der Produktionsprozesse.....	14
3.1 Produktionsprozeß, Prozeßstufe und Prozeßvariante.....	14
3.2 Techniken und Investitionsstrategien.....	16
3.3 Techniken und Qualität des zu transformierenden Gutes.....	16
3.4 Regionalisierung.....	18
4. Mathematischer Algorithmus.....	19
4.1 Güter, Prozesse und Regionen im Überblick.....	19
4.2 Zielfunktion.....	22
4.3 Nebenbedingungen.....	22
4.3.1 Kapazitätsgrenzen.....	22
4.3.2 Ausgleich von Angebot und Nachfrage.....	26
4.4 Nichtnegativitätsbedingungen.....	28
4.5 Preissetzung.....	28

IV. Wichtige Modellparameter.....	30
1. Szenarienaufbau und Modellparameter.....	30
2. Exogene Nachfragegrößen.....	32
2.1 Nachfrage nach Primäraluminium.....	32
2.2 Nichtmetallurgische Nachfrage nach Bauxit und Tonerde.....	34
3. Kapazitätsgrenzen.....	35
3.1 Bergbau.....	35
3.1.1 Ausgangskapazitäten.....	35
3.1.2 Zubaufaktor für den Bergbau.....	38
3.2 Tonerdefabrikation.....	39
3.2.1 Ausgangskapazitäten.....	39
3.2.2 Zubaufaktor für Brownfield Expansion.....	40
3.2.3 Bounds für Neuanlagen.....	42
3.3 Primäraluminiumverhüttung.....	43
3.3.1 Ausgangskapazitäten.....	43
3.3.2 Zubaufaktor für Brownfield Expansion.....	44
3.3.3 Bounds für Neuanlagen.....	45
4. Leistungsparameter, Input-Preise und Betriebskosten.....	46
4.1 Leistungsparameter.....	46
4.1.1 Bergbau.....	46
4.1.2 Tonerdefabrikation.....	49
4.1.3 Primäraluminiumverhüttung.....	54
4.2 Input-Preise.....	57
4.3 Betriebskosten.....	60
5. Kapitalkosten.....	61
5.1 Kapitalkosten nach Investitionsstrategie.....	61
5.2 Risikozuschläge.....	64
6. Transportkosten.....	64
6.1 Transportprozesse und zugehörige Kostenparameter im Überblick.....	64
6.2 Gewichtete Transportentfernungen.....	67
6.3 Transporttarife.....	70
7. Einfuhrzölle.....	71
8. Energieaufwendungen.....	72
8.1 Endenergiebedarf.....	74
8.2 Energieaufwendungen wichtiger Vorketten.....	75
8.2.1 Bereitstellung elektrischer Energie.....	75
8.2.2 Brennstoffbereitstellung zur Erzeugung thermischer Energie.....	80
8.2.3 Herstellung von Natronlauge und Anoden.....	82
9. Emissionen klimarelevanter Gase.....	82
9.1 Kohlendioxid.....	82
9.2 Perfluorierte Kohlenwasserstoffe.....	84

V.	Szenarioergebnisse.....	87
1.	Basisszenario.....	87
1.1	Produktion und Außenhandel.....	87
1.1.1	Primäraluminium.....	87
1.1.2	Tonerde.....	90
1.1.3	Bauxit.....	93
1.1.4	Nur allmähliche Verschiebungen in der Produktionsgeographie.....	97
1.2	Technikmix und Investitionsstrategien.....	98
1.3	Energiebedarf.....	102
1.3.1	Endenergie.....	102
1.3.2	Primärenergie.....	104
1.4	Emissionen.....	111
1.4.1	Kohlendioxid.....	111
1.4.2	Perfluorierte Kohlenwasserstoffe.....	115
2.	Szenarien niedriger und hoher Nachfrage nach Primäraluminium.....	117
VI.	Resümee.....	124
	Literaturverzeichnis.....	XI

Tabellenverzeichnis

Tab. III,1	Gütertypen, Produktionsprozesse und Regionen.....	20
Tab. III,2	Transformationsmatrix.....	21
Tab. IV,1	Wichtige Modellparameter und Grundlagen ihrer Schätzung.....	31
Tab. IV,2	Nachfrage nach Primäraluminium 1980, 1995 und 2010 (Zahlen zum Basisszenario).....	33
Tab. IV,3	Lagerstätten und Bauxittypen.....	36
Tab. IV,4	Kapazität zur Produktion der einzelnen Bauxittypen in den Regionen 1995.....	37
Tab. IV,5	Kapazität zur Produktion von Bauxit 1995 und erwarteter Zubau 1995-2005.....	38
Tab. IV,6	Kapazität zur Produktion von Tonerde nach Techniken in den Regionen 1995.....	40
Tab. IV,7	Kapazitätserweiterung bestehender Anlagen zur Tonerdefabrikation im Bau bzw. geplant.....	41
Tab. IV,8	Kapazität neuer Anlagen zur Tonerdefabrikation im Bau bzw. geplant.....	42
Tab. IV,9	Kapazität zur Produktion von Primäraluminium nach Techniken in den Regionen 1995.....	43
Tab. IV,10	Kapazitätserweiterung bestehender Anlagen zur Produktion von Primäraluminium im Bau bzw. geplant.....	44
Tab. IV,11	Kapazität neuer Anlagen zur Produktion von Primäraluminium im Bau bzw. geplant.....	45
Tab. IV,12	Reserven, Erz- und Deckgebirgsmächtigkeit sowie Lagerstättenausprägung einzelner Lagerstätten.....	48
Tab. IV,13	Leistungsparameter des Bauxitbergbaus 1995 – Weltdurchschnitt und Spanne in den Regionen.....	48
Tab. IV,14	Leistungsparameter der Herstellung von Tonerde 1995 bei bestehenden Anlagen - Weltdurchschnitt und Spanne in den Regionen.....	52
Tab. IV,15	Leistungsparameter der Herstellung von Tonerde bei Up-Grading, Brownfield Expansion und Neuanlagen im Jahr 2010.....	54
Tab. IV,16	Leistungsparameter der Herstellung von Primäraluminium bei bestehenden Anlagen im Jahr 1995 - Weltdurchschnitt und Spanne in den Regionen.....	56
Tab. IV,17	Leistungsparameter der Herstellung von Primäraluminium bei Up-Grading, Brownfield Expansion, Neuanlagen und Zukunftstechnologien im Jahr 2010.....	57
Tab. IV,18	Preise wichtiger Inputs der Primäraluminiumkette im Jahr 1995.....	58
Tab. IV,19	Regionen und Stromtarife bei der Elektrolyse.....	59
Tab. IV,20	Betriebskosten je Tonne Output für Bergbau, Tonerdegewinnung und Primäraluminiumproduktion 1995 im Weltdurchschnitt.....	61
Tab. IV,21	Investitionskosten nach dem IBRD für die Produktion von Primäraluminium im Jahr 1980.....	62
Tab. IV,22	Investitionskosten für eine Tonne Kapazität Tonerde bei Up-Grading, Brownfield und Greenfield Expansion im Jahr 1995 nach Pawlek.....	63

Tab. IV,23	Investitionskosten für eine Tonne Kapazität Primäraluminium bei Up-Grading, Brownfield und Greenfield Expansion im Jahr 1997 nach Peters.....	64
Tab. IV,24	Transportprozesse im Überblick.....	65
Tab. IV,25	Interregionaler vorgeschalteter Transport: Bauxitmine – Hafen.....	68
Tab. IV,26	Regionaler Transport: Bauxitmine – Tonerdewerk.....	68
Tab. IV,27	Transportentfernungen über See.....	69
Tab. IV,28	Interregionaler nachgeschalteter Transport: Hafen – Tonerdewerk.....	70
Tab. IV,29	Transporttarife nach Transportmitteln.....	71
Tab. IV,30	Allgemeine regionale Zollltarife je Tonne Bauxit, Tonerde und Primäraluminium im Jahr 1995/96.....	72
Tab. IV,31	Einsatzverhältnis an Energieträgern bei der Erstellung der thermischen Energie für Aufschluß und Kalzination in den Regionen 1995.....	74
Tab. IV,32	Energiebedarf für Transportprozesse im Weltdurchschnitt.....	75
Tab. IV,33	Erfasste Länder beim Regionalmix.....	76
Tab. IV,34	Regionales Einsatzverhältnis an Energieträgern bei der Stromproduktion 1995 und 2010.....	78
Tab. IV,35	Vertragliches Einsatzverhältnis an Energieträgern bei der Stromproduktion für die Erzeugung von Primäraluminium 1995.....	79
Tab. IV,36	Vertragliches Einsatzverhältnis an Energieträgern bei der Stromproduktion bei geplanten Primäraluminiumhütten.....	79
Tab. IV,37	Bereitstellungsnutzungsgrad von Strom aus unterschiedlichen Energieträgern 1995 und 2010.....	81
Tab. IV,38	Bereitstellungsnutzungsgrad der Brennstoffbereitstellung.....	82
Tab. IV,39	Unterer Heizwert und CO ₂ -Emissionsfaktoren der fossilen Brennstoffe....	83
Tab. IV,40	CO ₂ -Emissionsfaktoren bei der Erstellung thermischer Energie.....	83
Tab. IV,41	CO ₂ -Emissionsfaktoren bei der Strombereitstellung aus fossilen Brennstoffen 1995 und 2010.....	84
Tab. IV,42	Spezifische Emissionen an perfluorierten Kohlenwasserstoffen in Abhängigkeit von der Technik.....	86
Tab. V,1	Produktion von Primäraluminium und Produktionsanteile 1980, 1995 und 2010 (Zahlen nach Basisszenario).....	88
Tab. V,2	Kapazitätsausbau zur Herstellung von Primäraluminium nach Regionen mit unterschiedlichen Stromtarifen von 1995 bis 2010 (Zahlen nach Basisszenario).....	89
Tab. V,3	Außenhandel von Primäraluminium 1980, 1995 und 2010 (Zahlen nach Basisszenario).....	90
Tab. V,4	Produktion von Tonerde und Produktionsanteile 1980, 1995 und 2010 (Zahlen nach Basisszenario).....	91
Tab. V,5	Außenhandel von Tonerde 1980, 1994 und 2010 (Zahlen nach Basisszenario).....	92
Tab. V,6	Produktion von Bauxit und Produktionsanteile 1980, 1995 und 2010 (Zahlen nach Basisszenario).....	94
Tab. V,7	Außenhandel von Bauxit 1980, 1994 und 2010 (Zahlen nach Basisszenario).....	95
Tab. V,8	Anteil der Regionen an den gesamten Nettoexporten bzw. -importen von Bauxit 1980, 1995 und 2010 (Zahlen nach Basisszenario).....	96

Tab. V,9	Anteil der gesamten regionalen Nettoexporte an der Weltproduktion 1980, 1994/5 und 2010 (Zahlen nach Basisszenario).....	96
Tab. V,10	Anteil der inländischen Weiterverarbeitung gemessen an der Produktion von Regionen mit Bauxitexporten 1980, 1994 und 2010 (Zahlen nach Basisszenario).....	97
Tab. V,11	Genutzte Kapazität zur Produktion von Primäraluminium und Tonerde nach Techniken in den Regionen 2010 (Zahlen nach Basisszenario).....	99
Tab. V,12	Kapazität zur Produktion von Primäraluminium und Tonerde nach Investitionsstrategien in den Regionen 2010 (Zahlen nach Basisszenario).....	100
Tab. V,13	Kapazität zur Produktion von Bauxit nach Investitionsstrategien in den Regionen 2010 (Zahlen nach Basisszenario).....	101
Tab. V,14	Weltweite absolute und spezifische Endenergieaufwendungen zur Herstellung von Primäraluminium 1995 und 2010 (Zahlen nach Basisszenario).....	103
Tab. V,15	Weltweiter Aufwand an Primärenergie im Stoffstrom des Primäraluminiums 1995 und 2010 (Zahlen nach Basisszenario) – absolut und spezifisch je Tonne Primäraluminium.....	104
Tab. V,16	Beiträge der einzelnen Kategorien am Rückgang des weltweit spezifischen Primärenergieaufwandes bei der Elektrolyse (Zahlen nach Basisszenario).....	106
Tab. V,17	Spezifischer Primärenergieaufwand für die Elektrolyse in den Regionen 1995 bzw. 1994 - ein Vergleich mit der BGR-Studie.....	107
Tab. V,18	Absoluter und spezifischer Primärenergieaufwand bei der Elektrolyse in den Regionen 1995 und 2010 (Zahlen nach Basisszenario).....	109
Tab. V,19	Beiträge der einzelnen Regionen an der Verringerung des weltweiten spezifischen Primärenergieaufwandes für die Elektrolyse.....	110
Tab. V,20	Weltweite Kohlendioxidemissionen im Stoffstrom des Primäraluminiums 1995 und 2010 (Zahlen nach Basisszenario) – absolut und spezifisch je Tonne Primäraluminium.....	111
Tab. V,21	Beiträge der einzelnen Kategorien am Rückgang der energiebedingten weltweit spezifischen Kohlendioxidemissionen bei der Elektrolyse (Zahlen nach Basisszenario).....	113
Tab. V,22	Spezifische energiebedingte Kohlendioxidemissionen bei der Elektrolyse in den Regionen 1995 bzw. 1996 - ein Vergleich mit GEMIS.....	114
Tab. V,23	Absolute und spezifische energiebedingte Kohlendioxidemissionen bei der Elektrolyse in den Regionen 1995 und 2010 (Zahlen nach Basisszenario).....	116
Tab. V,24	Beiträge der einzelnen Regionen an der Verringerung der weltweiten spezifischen Kohlendioxidemissionen aus der Elektrolyse (Zahlen nach Basisszenario).....	115
Tab. V,25	Weltweite Emissionen an perfluorierten Kohlenwasserstoffen im Stoffstrom des Primäraluminiums 1995 und 2010 (Zahlen nach Basisszenario) - absolut und spezifisch je Tonne Primäraluminium.....	117
Tab. V,26	Produktion von Primäraluminium 2010 - Projektion entsprechend der Szenarien niedriger und hoher Nachfrage.....	118
Tab. V,27	Kapazitätsausbau zur Produktion von Primäraluminium nach Regionen mit unterschiedlichen Stromtarifen von 1995 bis 2010 - Projektion entsprechend der Szenarien niedriger und hoher Nachfrage.....	119

Tab. V,28	Produktion von Tonerde 2010 - Projektion entsprechend der Szenarien niedriger und hoher Nachfrage.....	120
Tab. V,29	Produktion von Bauxit 2010 - Projektion entsprechend der Szenarien niedriger und hoher Nachfrage.....	121
Tab. V,30	Produktion von Tonerde 2010 in Regionen mit bzw. ohne signifikanter eigener Bauxitproduktion - Projektion entsprechend der Szenarien niedriger und hoher Nachfrage.....	122
Tab. V,31	Weltweiter Primärenergieaufwand und weltweite Emissionen klima- relevanter Gase im Stoffstrom des Primäraluminiums 2010 – Projektion entsprechend der Szenarien niedriger und hoher Nachfrage.....	123

Abbildungsverzeichnis

Abb. II,1	Stoffstrom des Primäraluminiums als Teil des gesamten Aluminiumstoffstroms.....	3
Abb. III,1	Wesentliche Modellparameter, mathematischer Algorithmus und Modelloutput.....	9
Abb. III,2	Vereinfachtes Strukturbild von GlobAl.....	17
Abb. III,3	Bauxittypen.....	18
Abb. III,4	Regionalisierung in GlobAl.....	19
Abb. III,5	Marktgleichgewicht für Primäraluminium (stark vereinfacht).....	29
Abb. IV,1	Einsatzbereiche von Bauxit und Tonerde.....	34
Abb. IV,2	Schematische Prozeßkette des Bergbaus.....	47
Abb. IV,3	Schematische Prozeßkette des Bayer-Verfahrens.....	50
Abb. IV,4	Koeffizientenmatrix der gesamten Transportkosten einer Stufe	66
Abb. IV,5	Energiebilanzierung in GlobAl.....	73

I. Einleitung

Der Stoffstrom des Primäraluminiums beginnt mit der Gewinnung des Rohstoffs Bauxit im Bergbau und endet mit der Produktion des Primäraluminiums in der Elektrolyse. Zum Stoffstrom gehören neben den Produktionsprozessen sämtliche Transportprozesse. Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Identifizierung und Isolierung von grundlegenden Entwicklungstendenzen im weltweiten Stoffstrom des Primäraluminiums. Folgende Fragestellungen stehen im Mittelpunkt des Interesses:

- Welche Produktionsgeographie ist für den Stoffstrom des Primäraluminiums zu erwarten?
- Wie werden sich die Handelsströme verändern?
- Welche Techniken werden sich auf den berücksichtigten Produktionsstufen durchsetzen?
- Werden Altanlagen, modernisierte und erweiterte Altanlagen oder Neuanlagen in Zukunft die Produktion bestreiten?
- Wie werden sich die absoluten und spezifischen Endenergie- und Primärenergieaufwendungen global und in den Regionen entwickeln?
- Mit wieviel Emissionen an Kohlendioxid und perfluorierten Kohlenwasserstoffen ist zu rechnen?

Diese Fragestellungen werden durch Szenariorechnungen auf Basis des Modells der globalen Aluminiumwirtschaft (GlobAl) beantwortet. GlobAl wird aus bestehenden Modellansätzen entwickelt. Es simuliert einen Wettbewerbsmarkt und versteht den Stoffstrom des Primäraluminiums als ökonomisch determiniert. Es erlaubt eine integrierte Analyse der technischen, geographischen, ökologischen und ökonomischen Dimension des Stoffstroms. Zukunftshorizont der Szenariorechnungen ist das Jahr 2010. Variiert wird der Parameter "weltweite Nachfrage nach Primäraluminium". Dieser ist für die Rechnungen besonders kritisch, da sich zum einen die zukünftige Nachfrage nach Primäraluminium aufgrund ihrer großen Abhängigkeit von der weltwirtschaftlichen Entwicklung nur schwer vorhersagen läßt und da zum anderen dieser Parameter erhebliche Auswirkungen auf die Modellergebnisse hat. Zentral für alle Szenariorechnungen ist die Annahme fortschreitender Globalisierung und weltweiter Liberalisierung. Diese schlägt sich nicht zuletzt in der Projektion wesentlicher Modellparameter nieder. Die isolierten Entwicklungstendenzen spiegeln die zukünftige Entwicklung entsprechend um so besser wider, wie sich die Annahme einer fortschreitenden Globalisierung und Liberalisierung in der Zukunft bestätigt.

II. Methodische Aspekte

1. Stoffstrom des Primäraluminiums als Erklärungsgegenstand

Dem Stoffstrom des Primäraluminiums liegt ein *technischer Transformationsprozeß* zugrunde. Bauxit in der Lagerstätte wird durch die Bergbautätigkeit zu transportierbarem Bauxit. Das Bauxit wird mit Hilfe des Bayer-Verfahrens zu Tonerde (Aluminiumoxid) verarbeitet. Das Bayer-Verfahren besteht aus den Schritten Aufschluß und Kalzination. Beim Aufschluß wird mit Hilfe von Natronlauge und thermischer Energie zunächst Aluminiumhydroxid gewonnen. Dieses wird bei der Kalzination durch Abtrennung von Wasser in Aluminiumoxid überführt. Die Tonerde wird bei der Elektrolyse schließlich zu Primäraluminium verarbeitet. Dazu sind große Mengen an elektrischer Energie erforderlich. Der Stoffstrom des Primäraluminiums ist ein Ausschnitt aus dem gesamten Aluminiumstoffstrom, bei dem zusätzlich die Weiterverarbeitung des Primäraluminiums, seine Wiederverwertung durch Recycling bzw. gegebenenfalls die Entsorgung betrachtet werden muß (Abb. II,1).

Bergbautätigkeit, Tonerdefabrikation, Aluminiumhütten und Nachfrage nach Primäraluminium fallen häufig räumlich auseinander. Dies begründet die *geographische Dimension* des Stoffstroms des Primäraluminiums. Transportprozesse verbinden die Orte der technischen Transformation. Die Bauxitgewinnung konzentrierte sich Mitte der neunziger Jahre auf die Regionen Australien, Mittel- und Südamerika sowie Afrika. Bei der Tonerdeherstellung spielten, neben Australien sowie Mittel- und Südamerika, Nordamerika und Westeuropa eine große Rolle. Die Primäraluminiumherstellung wurde von Nordamerika und Westeuropa dominiert. Bei der Nachfrage nach Primäraluminium waren, neben Nordamerika und Westeuropa, die asiatischen Länder bedeutend.

Produktion und Transport der Produkte der Primäraluminiumkette führen zu Umweltbeeinträchtigungen. Diese spiegeln die *ökologische Dimension* des Stoffstroms des Primäraluminiums wider. Bei der Tonerdegewinnung fallen große Mengen an Rotschlamm an. Zudem entstehen über die gesamte Kette in großem Umfang gasförmige Emissionen. Neben den eher regional wirkenden Schwefeldioxyden (SO_2) und Stickstoffoxyden (NO_x) sind dies insbesondere die klimarelevanten Kohlendioxyde (CO_2) und perfluorierten Kohlenwasserstoffe (CF_4 , C_2F_6). Große Mengen an Kohlendioxid entstehen in der Regel durch die Energiebereitstellung für die Elektrolyse, allerdings in Abhängigkeit vom Energiemix für die Stromerstellung. Bei der Elektrolyse wird durch den Anodenabbbrand Kohlendioxid erzeugt. Die perfluorierten Kohlenwasserstoffe sind Ergebnis der Anodeneffekte.

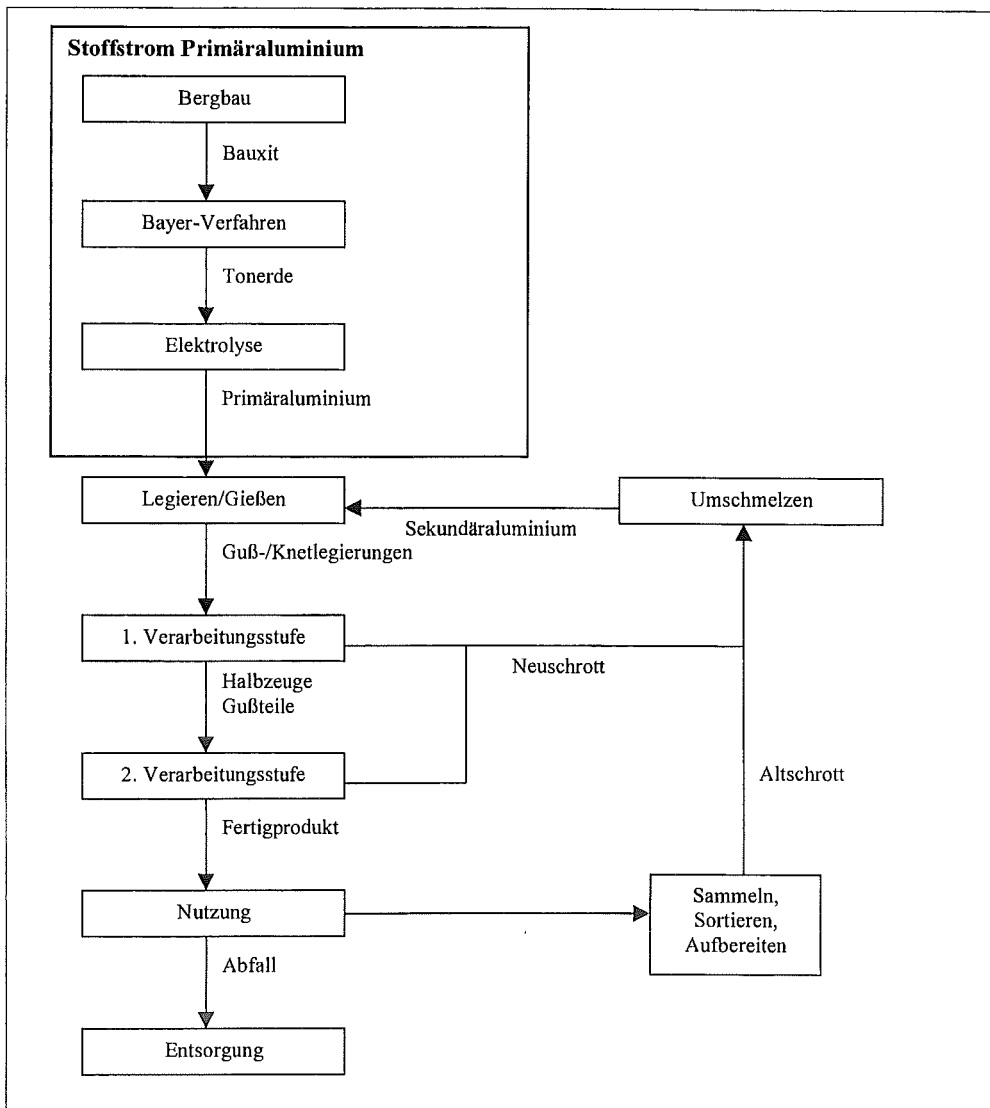


Abb. II,1 Stoffstrom des Primäraluminiums als Teil des gesamten Aluminiumstoffstroms

Der Stoffstrom des Primäraluminiums hat neben der technischen, der geographischen und der ökologischen eine *ökonomische Dimension*. So werden Primäraluminium und seine Vorprodukte auf Märkten gehandelt. Unternehmen, aber auch Regionen und Techniken stehen im Wettbewerb. Mit der Produktion sind Arbeitsplätze, Wertschöpfung und damit Konsummöglichkeiten verbunden.

2. GlobAI als Analyseinstrument

GlobAI dient als Instrument zur Analyse des Stoffstroms des Primäraluminiums. Es ist EDV-gestützt, nutzt die Technik der linearen Programmierung und rechnet für ein Stützjahr. Der implementierte Algorithmus zur Minimierung der Kosten des Gesamtsystems bei gegebener Nachfrage nach Primäraluminium simuliert ein langfristiges Marktgleichgewicht bei vollkommener Konkurrenz. Der Stoffstrom des Primäraluminiums wird als *ökonomisch determiniert* verstanden. Menschliche Bedürfnisse und Marktprozesse sind sowohl für die Größe, als auch für die technische Gestaltung und ökologische Wirkungen des Stoffstroms des Primäraluminiums verantwortlich. So ist die Nachfrage nach Primäraluminium Auslöser für den Stoffstrom. Verschiedene Techniken und Regionen konkurrieren um die Befriedigung der Nachfrage nach Primäraluminium und dessen Vorprodukten. Der Marktprozeß entscheidet, welche Techniken und Regionen zum Zug kommen. Er ist damit gleichzeitig für den Energiebedarf und das Ausmaß der Emissionen bestimmend.

GlobAI bildet den Stoffstrom des Primäraluminiums vereinfacht ab: Der technische Transformationsprozeß wird auf den drei Prozeßstufen Bergbau, Herstellung von Tonerde und Produktion von Primäraluminium erfaßt. Die chemische und mineralogische Heterogenität der Bauxite wird durch verschiedene Bauxittypen abgebildet. Auf den einzelnen Stufen werden bestehende technische Optionen zu einigen wenigen Techniken zusammengefaßt. Bei der Gewinnung von Tonerde werden sechs Techniken unterschieden. So wird beim Aufschluß nach Nieder- und Hochtemperaturautoklav sowie Rohrreaktor differenziert, die mit Drehrohr oder Wirbelschicht für die Kalzination kombiniert werden können. Bei der Produktion von Primäraluminium werden vier Techniken ausgewiesen, eine Söderberg-Technik und drei Techniken mit vorgebrannten Anoden (CWPB, SWPB, PFPB). Vier Investitionsstrategien werden unterschieden, in denen die Techniken zum Einsatz kommen: Altanlagen, Up-Grading, Brownfield und Greenfield Expansion. Es werden drei Stufen von Transportprozessen erfaßt: Mine - Tonerdewerk, Tonerdewerk - Hütte, Hütte - Endnachfrage (Weiterverarbeitung). Als Transportmittel werden Förderband, LKW, Bahn, Binnenschiff und Hochseeschiff unterschieden. 15 Weltregionen werden betrachtet, die als Standorte für die Produktionsprozesse der drei Prozeßstufen fungieren. Es werden nur klimarelevante Gase berücksichtigt. Für diese wird keine Wirkungsabschätzung vorgenommen, sondern nur eine Sachbilanz erstellt. Eher regional wirkende Gase oder feste und flüssige Emissionen werden nicht erfaßt. Es werden nur direkte regionale Einkommens- und Arbeitsplatzeffekte abgebildet. Einkommen und Beschäftigung, die in nachgelagerten und vorgelagerten Sektoren (z. B. Chemische Industrie, Energiewirtschaft) entstehen, werden nicht berücksichtigt.

Im Ergebnis liefert GlobAl für ein festgelegtes Stützjahr eine simultane Erklärung der regionalen Verteilung der Investitionen und der Produktion, des Ausmaßes und der Richtung des Handels, der Höhe der Output-Preise, der direkten regionalen Beschäftigung, der Energieaufwendungen und der Emission von klimarelevanten Gasen auf den einzelnen Produktionsstufen der Primäraluminiumkette. Diese Größen sind als eine Funktion von Kosten, Kapazitätsgrenzen und Nachfrage abgebildet.

3. Szenarien als Analysemethode

Die Methodik zur Analyse des Stoffstroms des Primäraluminiums liefert die Szenariotechnik. Ein Szenario ist nach Gausemeier et al. (1996) die Beschreibung einer möglichen Situation in der Zukunft, die auf einem komplexen Netz von Einflußfaktoren beruht. Es enthält zudem die Darstellung einer Entwicklung, die aus der Gegenwart zu dieser Situation geführt hat.

Ein Szenario hat nach dieser Definition vier konstituierende Elemente: Multiplizität, Komplexität, Situationsbeschreibung und Situationsentwicklung. Grundlegend für die Szenariotechnik ist die Idee der multiplen Zukunft (Multiplizität). Je weiter in die Zukunft geblickt wird, desto mehr Möglichkeiten zukünftiger Entwicklungen ergeben sich. Der interessierende Zeitpunkt in der Zukunft ist der Zukunftshorizont. Im vorliegenden Fall ist dies das Jahr 2010. Der Kegel der Möglichkeiten zukünftiger Entwicklungen ist bei diesem relativ kurzem Zeithorizont noch vergleichsweise eng. Alle möglichen zukünftigen Situationen auf diesem Zukunftshorizont bilden den Zukunftsraum. Ein Szenario beschreibt genau eine mögliche zukünftige Situation in diesem Zukunftsraum. Ihr Eintreten kann nicht sicher vorausgesagt werden. Durch die Entwicklung unterschiedlicher Szenarien kann aber eine Bandbreite zu erwartender Entwicklungen abgebildet werden.

Ein Szenario ist ein komplexes Zukunftsbild (Komplexität). Es basiert auf den Entwicklungsmöglichkeiten vieler, miteinander vernetzter Zukunftsmöglichkeiten. Die komplexe Vernetzung wesentlicher Systemelemente kann durch mathematische Modelle, wie im Fall des Stoffstroms des Primäraluminiums durch GlobAl, nachgezeichnet werden. Dabei ist zwischen den Zukunftsmöglichkeiten der exogenen Modellgrößen (Modellparameter) und denen der endogenen Modellgrößen (Modelloutput) zu unterscheiden. Die Zukunftsmöglichkeiten der endogenen Modellgrößen ergeben sich aus dem Modellauf in Abhängigkeit von Modellparametern und Modellstruktur. Die Zukunftsmöglichkeiten wichtiger exogener Modellgrößen spiegeln sich in unterschiedlichem Szenarioaufbau wider. Das Ausmaß der weltweiten

Nachfrage nach Primäraluminium ist ein solcher kritischer Parameter. Im Basisszenario wird von einer moderaten Zunahme der weltweiten Nachfrage nach Primäraluminium ausgegangen. In alternativen Szenariorechnungen wird eine niedrigere bzw. eine höhere Zuwachsrates unterstellt. Die verbleibenden Modellparameter werden als szenariounabhängig verstanden. Ihre Projektion basiert auf zwei grundlegenden Annahmen: Fortschreitende Globalisierung und weltweite Liberalisierung. Es werden so bei Up-Grading, Brownfield und Greenfield Expansion für das Stützjahr 2010 jeweils weltweit gleiche Leistungsparameter unterstellt. Demnach erreicht beispielsweise eine neue Aluminiumhütte, unabhängig davon, ob sie in Kanada, Afrika oder der Früheren Sowjetunion errichtet wird, den gleichen technischen Standard. Durch weltweiten Protektionismus, durch Planwirtschaft und Autarkiestreben wäre der dafür notwendige Wissenstransfer unterbunden. Bei den handelbaren Gütern wird von einer fortschreitenden Angleichung der regionalen Preise ausgegangen. Globalisierung und Liberalisierung drängen in eine solche Richtung.

4. Grenzen der Aussagefähigkeit

Die gerechneten Szenarien bilden eine plausible Bandbreite möglicher zukünftiger Situationen ab. Die aus ihnen isolierten Entwicklungstendenzen sind unter drei Voraussetzungen gute Approximationen an die Wirklichkeit:

- (1) Die Modellstruktur ist angemessen.
- (2) Die Datengrundlage zum Basisjahr bzw. Basiszeitraum ist zuverlässig.
- (3) Die grundlegenden Annahmen zur Schätzung der Modellparameter für das Stützjahr auf Grundlage der Daten des Basisjahres bzw. Basiszeitraums (fortschreitende Globalisierung und Liberalisierung) erweisen sich als zutreffend.

Gerade letzteres kann naturgemäß nicht garantiert werden. Kriege oder ähnliches können Autarkiebestrebungen und Protektionismus fördern. Wird hiervon abgesehen, spricht einiges für die Validität der isolierten Tendenzen (und damit für Modellstruktur und Dateninput). Die ermittelten zukünftigen Tendenzen werden durch bisherige Entwicklungen insbesondere mit Blick auf die Produktionsgeographie bestätigt. Dies ist um so bemerkenswerter, als daß GlobAl bewußt auf eine enge Führung in diese Richtung (z. B. via Kapazitätsgrenzen) verzichtet.

III. GlobAl

1. Einordnung von GlobAl

GlobAl wurde ausgehend von den Ansätzen von Brown et al. (1983), Nichols et al. (1992) und Manne et al. (1994) entwickelt, wobei die Arbeiten von Nichols et al. und Manne et al. eng an das Modell von Brown et al. angelehnt sind. Theoretische Vorarbeiten leistete Landwehr (1997a, 1997b, 1998). Es läßt sich in mehrerer Hinsicht systematisieren. So ist es ein:

(1) *Modell der linearen Programmierung.* Die lineare Programmierung ist eine Klasse von Optimierungsaufgaben, bei denen das Maximum oder das Minimum einer linearen Zielfunktion endlich vieler Strukturvariablen bei endlich vielen Nebenbedingungen (Restriktionen) unter der Annahme von nichtnegativen Strukturvariablen (Nichtnegativitätsbedingung) ermittelt wird. Die Restriktionen sind Gleichungen oder Ungleichungen der Strukturvariablen. Bei GlobAl werden die Gesamtkosten im Stoffstrom des Primäraluminiums minimiert. Als Restriktionen fungieren Kapazitätsgrenzen und der Ausgleich von Angebot und Nachfrage. Die Nachfrage nach Primäraluminium wird als gegeben angenommen und ist in ihrer Höhe unabhängig vom Preis.

(2) *Modell der Prozeßprogrammierung.* Prozeßprogrammierung hat sich als Begriff für eine Modellklasse etabliert, bei der eine Abfolge von mehreren Produktionsprozessen unter Nebenbedingungen nach einem festgelegten Kriterium optimiert wird (Labys, 1989). Eine konkrete mathematische Formulierung ist mit der Prozeßprogrammierung nicht verbunden, allerdings erfolgt sie in der Regel, wie auch bei GlobAl, über die lineare Programmierung.

(3) *Statisches Ein-Perioden-Modell.* Bei GlobAl beziehen sich alle Modellparameter wie auch die Variablen Produktions- und Transportmengen auf das Jahr 2010. Die Berechnungen richten sich einzig auf diesen zukünftigen Zeitpunkt. Das Basisjahr 1995 beeinflusst nur indirekt das Modellergebnis. So erfolgt die Schätzung der Modellparameter für das Jahr 2010 ausgehend vom Basisjahr oder von einer Vergangenheitsentwicklung. Beispielsweise entsprechen die im Modell für das Jahr 2010 implementierten Kapazitätsgrenzen für Altanlagen und bestehende Minen den vorhandenen Kapazitäten des Jahres 1995. Ihre Leistungsparameter im Jahr 2010 werden ausgehend von ihren Werten im Jahr 1995 geschätzt.

(4) *Modell eines Wettbewerbsmarktes.* Der angelegte Algorithmus kann zunächst so aufgefaßt werden, daß ein zentraler Planer Produktion und Investition in dem Sinne einrichtet, daß die Kosten in der internationalen Aluminiumwirtschaft minimiert werden. Entscheidend ist jedoch, daß die Annahme einer strikt dezentralisierten Produktionswirtschaft das gleiche Er-

gebnis herbeiführt: Maximieren die Produzenten von Bauxit, Tonerde und Aluminium dezentral ihre Profite, nehmen also den Marktpreis als gegeben hin (Preisnehmer) und passen ihre Produktionsmengen entsprechend ihrer Kostenstruktur an (Mengenanpasser), dann werden gleichzeitig die privaten Kosten der Produzenten minimiert. Das heißt nichts anderes, als daß der angelegte mathematische Algorithmus einen Wettbewerbsmarkt simuliert (vgl. Takayama et al., 1971).

Mit Blick auf den Erklärungsgegenstand (die Primäraluminiumkette) und diese grundsätzliche Einordnung stimmen das Modell von Brown et al. (1983) und GlobAl überein. In der konkreten Ausgestaltung ergeben sich allerdings erhebliche Unterschiede:

- Das Brown-Modell erlaubt Untersuchungen zur zukünftigen Produktionsgeographie. GlobAl ermöglicht darüberhinaus die Analyse ökologischer Fragestellungen.
- Die Anzahl der Regionen ist in GlobAl verringert. Der regionale Zuschnitt ist an die veränderten Produktionsstrukturen der internationalen Aluminiumwirtschaft angepaßt.
- Das Brown-Modell differenziert nur rudimentär nach Techniken; GlobAl hingegen bildet den Wettbewerb von Standorten und Techniken integriert ab.
- Das Brown-Modell unterscheidet nach alter und neuer Kapazität und differenziert nach Investitionskosten, die nur im zweiten Fall anfallen. Die Investitionskosten sind dabei je nach Ausmaß der Kapazitätserweiterung unterschiedlich. GlobAl differenziert nach Altanlagen, Up-Grading, Brownfield- und Greenfield-Expansion und zwar mit Blick auf Investitionskosten und Leistungsparameter der Anlagen.
- Das Brown-Modell bindet Produktionsanlagen fest an einen Bauxittyp. GlobAl hingegen läßt zu, daß je nach Technik in einer Anlage unterschiedliche Bauxittypen verarbeitet werden können. Der daraus resultierende Faktorbedarf ist abgebildet.

GlobAl ist im Gegensatz zum Brown-Modell ein umfassendes Instrument zur Stoffstromanalyse und erlaubt eine integrierte Analyse der technischen, geographischen, ökologischen und ökonomischen Dimension des Stoffstroms. Die konsequente Differenzierung nach Investitionsstrategien und Techniken erweist sich einmal aufgrund der großen Unterschiede in den Investitionskosten und Leistungsparametern bei den jeweiligen Alternativen als inhaltlich notwendig. Andererseits trägt sie zur Stabilität der Modellergebnisse bei. Die zukünftige Produktion eines Gutes einer Region setzt sich aus der Summe der Produktion von Altanlagen, aufgerüsteten und u. U. erweiterten Altanlagen sowie Neuanlagen differenziert nach Techniken zusammen. Verringert sich nun beispielsweise die weltweite Nachfrage nach Primäralu-

minium, dann scheiden nur die teuersten Produktionsalternativen einer Region aus. Der schlagartige Verlust sämtlicher Produktion in einer Region ist kaum zu erwarten. Die der linearen Programmierung immanenten jeweils sprunghaften Veränderungen der Optimallösung (sog. Flip-Flop-Effekte) können dadurch zwar nicht verhindert, ihre Auswirkungen auf die Struktur der Produktionsgeographie aber abgemildert werden.

2. Formalstruktur, Modellparameter und Modelloutput

Die Modellparameter entsprechen den ins Modell einfließenden Daten. Der Modelloutput spiegelt die Ergebnisse der Modellrechnungen wider. Dazwischen steht der mathematische Algorithmus, der die Modellparameter verarbeitet und den Modelloutput erzeugt (Abb. III,1). Der mathematische Algorithmus wird zunächst in seiner allgemeinen Formalstruktur dargestellt, um einen ersten Einblick in die Modellstruktur zu geben.

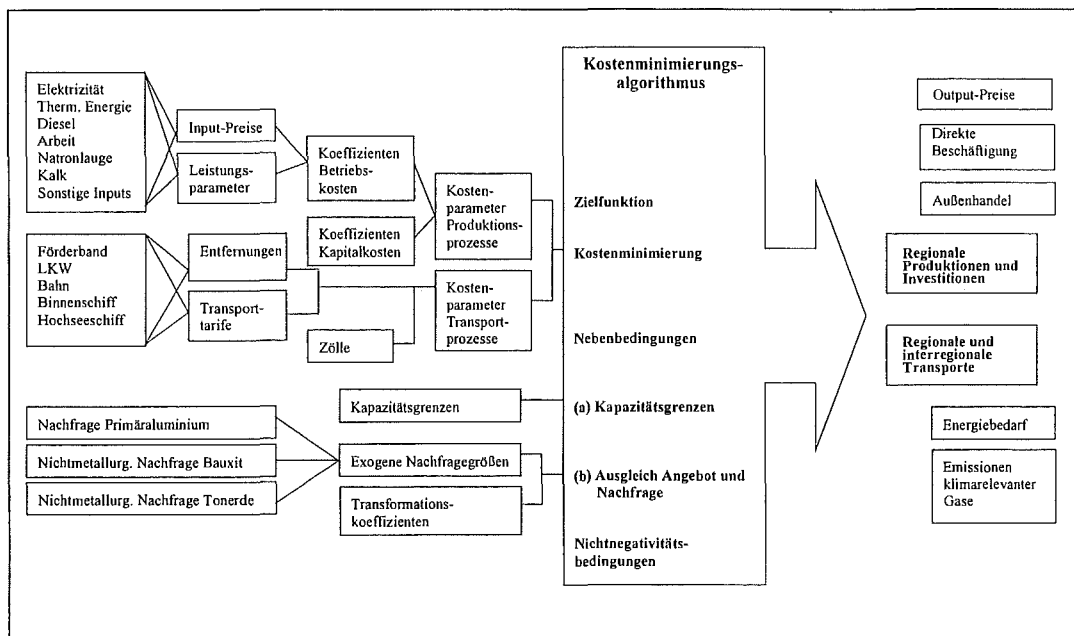


Abb. III,1 Wesentliche Modellparameter, mathematischer Algorithmus und Modelloutput

2.1 Allgemeine Formalstruktur

GlobAl ist als lineares Programmierungsmodell konzipiert. Das zugrundeliegende lineare Optimierungsproblem hat folgende allgemeine Formalstruktur (Zwehl, 1981, Opitz, 1997):

Maximiere (oder minimiere) die Zielfunktion

$$Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

unter Beachtung der Nebenbedingungen

$$a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n \begin{cases} \leq \\ \geq \end{cases} b_i \quad \text{für } i = 1, 2, \dots, m$$

und den Nichtnegativitätsbedingungen

$$x_j \geq 0 \quad \text{für } j = 1, 2, \dots, n.$$

Hierin sind die x_j Strukturvariable, deren Niveaus für die Aktivitäten j zu bestimmen sind. Wegen $x_j \geq 0$ sind die Niveaus nach unten beschränkt. c_j kennzeichnet den Zielbeitrag jeder Einheit der Aktivität j , b_i die Begrenzung der Art i und a_{ij} die Beanspruchung dieser Begrenzung durch jede Einheit der Aktivität j .

Aktivitäten im Sinne der Begrifflichkeiten der linearen Programmierung sind in GlobAl sämtliche für den Stoffstrom des Primäraluminiums unterschiedenen Produktions- und Transportprozesse. Die *Zielfunktion* entspricht der Summe aller, den Aktivitäten zugeordneten Kosten. Sie wird minimiert. Als *Strukturvariablen* fungieren die Produktionsmengen aller Produktionsprozesse und die Transportmengen aller Transportprozesse. Sie kennzeichnen die Aktivitätsniveaus. Als *Zielbeitrag* gehen die Kostenkoeffizienten aller Aktivitäten ein. Als *Nebenbedingungen* werden Kapazitätsgrenzen und die Materialbilanzgleichungen berücksichtigt. Die Kapazitätsbeschränkung läßt für einen einzelnen oder der Summe aus einzelnen Produktionsprozessen nur eine bestimmte maximale Produktionsmenge zu. Die Materialbilanzgleichungen sichern den Ausgleich von Angebot und Nachfrage nach Inputs und Outputs auf allen Produktionsstufen für alle Regionen. Als *Begrenzungen* fungieren einmal die nichtmetallurgischen Nachfragen nach Bauxit und Tonerde und die Nachfrage nach Primäraluminium, die dem Modell exogen vorgegeben werden. Die Transformationskoeffizienten, die das Zusammenspiel von Inputs und Outputs für jeden Produktionsprozeß regeln, entsprechen der Größe "*Beanspruchung dieser Begrenzung*". Schließlich gilt in GlobAl für alle Produktions- und Transportmengen die *Nichtnegativitätsbedingung*.

Die Materialbilanzgleichungen und Transformationskoeffizienten weisen GlobAl als Modell der Prozeßprogrammierung aus. Der gleiche Zeitindex aller Variablen macht es zudem als statisches Modell kenntlich.

2.2 Modellparameter

Für GlobAl lassen sich drei wesentliche Gruppen von Modellparametern unterscheiden: Einmal Kostenparameter, die der Zielfunktion des linearen Modells zugeordnet sind. Zum zweiten Kapazitätsgrenzen und exogene Nachfragegrößen bzw. Transformationskoeffizienten, die jeweils bei der Formulierung der Nebenbedingungen eine Rolle spielen. Zum dritten reine Bilanzierungsparameter. Diese haben keinerlei Auswirkungen auf die Aktivitätsniveaus von Produktionen und Transporten, lassen aber, indem sie mit diesen verknüpft werden, Aussagen zu Energieaufwendungen oder Emissionen zu.

2.2.1 Kostenparameter

Im Modell werden die Kostenparameter der Transporte und die Kostenparameter der Techniken unterschieden. Als Kostenparameter der Transporte fungieren Entfernungen, Transporttarife und Zölle. Ins Modell gehen die Entfernungen ein, die jeweils mit den unterschiedlichen Transportmitteln zurückgelegt werden müssen, um den Standort der nächsten Produktionsstufe bzw. die Endnachfrage zu erreichen. Der Standort der nächsten Produktionsstufe bzw. die Endnachfrage kann innerhalb oder außerhalb der Region liegen. Als Transportmittel werden Förderband, LKW, Bahn, Binnenschiff und Hochseeschiff unterschieden. Den Transportmitteln sind Transporttarife zugeordnet. Aus den Entfernungen in Abhängigkeit vom Transportmittel und den zugehörigen Tarifen ergeben sich die gesamten Kosten der regionalen und interregionalen Transporte. Zudem können Importzölle anfallen, wenn Transporte Grenzen überschreiten.

Die Kosten der Produktionsprozesse zerfallen in Kapitalkosten und Betriebskosten. Kapitalkosten entstehen aus Investitionen. Die Investitionskosten wiederum sind die Kosten der Technikimplementation. Sie fallen nicht immer an. Neuanlagen verursachen, genauso wie die Aufrüstung oder Erweiterung von Altanlagen, aus Modellsicht Investitionskosten, Altanlagen nicht. Die (ehemaligen) Investitionskosten von Altanlagen der einzelnen Produktionsstufen der Primäraluminiumkette haben den Charakter von versunkenen Kosten: Aufgrund des hohen Grades an Faktorimmobilität und des nur geringen Spielraums der eingesetzten Maschinen und Anlagen für alternative Verwendungen sind die mit der getroffenen Investitionsent-

scheidung angefallenen Investitionskosten bei Altanlagen weitgehend irreversibel und werden daher im Modellrahmen für zukünftige Investitionsentscheidungen als nicht relevant betrachtet.

Die Berechnung der Kapitalkosten erfolgt mit der Barwertmethode. Mit ihrer Hilfe werden die Investitionskosten je Tonne Kapazität unter Berücksichtigung eines gegebenen Zinssatzes annuitätisch auf die wirtschaftliche Nutzungsdauer umgelegt. Für einige Regionen werden zudem Risikozuschläge verrechnet. Eine Mindestgröße von Anlagen oder Kostendegression bei größeren Anlagen wird nicht berücksichtigt. Dies ist schon deshalb nicht möglich, weil Produktionsprozesse und nicht Anlagen im Modell abgebildet sind. Anlagen einer Region sind unter Berücksichtigung von angewandeter Technik und Investitionsstrategie zu Produktionsprozessen zusammengefaßt.

Die Betriebskosten sind die laufenden Kosten eines Produktionsprozesses beispielsweise für Arbeit, Strom oder thermische Energie. Jedem dieser Inputs ist im Modell ein Leistungsparameter und ein Preis zugeordnet. Die Leistungsparameter beschreiben den mengenmäßigen Verbrauch an Inputs eines Prozesses in einer Region normiert auf eine Outputeinheit. Durch Multiplikation von Leistungsparametern und zugehörigen Preisen ergeben sich die Koeffizienten der Betriebskosten der Inputs. Diese sind auf eine Outputeinheit normierte Wertgrößen. Die Koeffizienten der Betriebskosten der einzelnen Inputs können schließlich zum Koeffizienten der gesamten Betriebskosten eines Produktionsprozesses zusammengefaßt werden.

2.2.2 Kapazitätsgrenzen, exogene Nachfragegrößen und Transformationskoeffizienten

Die zukünftige Produktion kann durch Altanlagen einer bestimmten Technik, durch aufgerüstete und u. U. erweiterte Altanlagen oder durch Neuanlagen erfolgen. Aus diesen Möglichkeiten ergeben sich drei Arten von Kapazitätsgrenzen. Die Produktion von Altanlagen einer bestimmten Technik und die Produktion der aufgerüsteten Altanlagen der gleichen ursprünglichen Technik werden durch eine gemeinsame Kapazitätsgrenze, und zwar der Ausgangskapazität der jeweiligen Altanlagen, beschränkt. Die Aufrüstung von Altanlagen ("Up-Grading") führt im Modell zu einer Verbesserung der Leistungsparameter, nicht aber zu einer Erweiterung der Kapazität. Die Erweiterung der Kapazität von Altanlagen im Sinne einer "Brown-field Expansion" wird eigens beschränkt. Sie ist abhängig von der Ausgangskapazität der Altanlagen. Die Kapazitätsgrenzen von Neuanlagen ("Greenfield Expansion") werden unter Berücksichtigung des bisherigen jährlichen Zubaus und von geplanten Projekten exogen gesetzt.

Im Modell wird zwischen exogener Nachfrage und abgeleiteter Nachfrage unterschieden. Exogen ist die Nachfrage nach dem Endprodukt Primäraluminium und die nichtmetallurgische Nachfrage nach Tonerde und Bauxit. Diese Größen werden explizit dem Modell vorgegeben. Die abgeleitete Nachfrage ist die Nachfrage nach Tonerde bzw. Bauxit, die durch die Produktion von Primäraluminium bzw. Tonerde induziert wird. Sie wird im Modell endogen unter Berücksichtigung der Transformationskoeffizienten abgeleitet. Die Transformationskoeffizienten regeln das Zusammenspiel von Input und Output an Transformationsprodukten auf den einzelnen Prozeßstufen.

2.2.3 Reine Bilanzierungsparameter

Zu den reinen Bilanzierungsparametern gehören unter anderem der vertragliche oder regionale Mix der Energieträger an der Stromproduktion, die Bereitstellungsnutzungsgrade von Strom aus den verschiedenen Energieträgern oder aber dessen CO₂-Emissionsfaktoren. Diese Parameter werden über den (spezifischen) Endenergiebedarf mit den Produktionsprozessen bzw. mit deren Produktionsmengen verknüpft. Sie ermöglichen die Bestimmung von Primärenergieaufwendungen bzw. Kohlendioxidemissionen im Stoffstrom des Primäraluminiums.

2.3 Modelloutput

Die regionalen Produktionen (und Investitionen) und die regionalen und interregionalen Transporte für ein vorgegebenes Stützjahr sind als Aktivitätsniveaus der Strukturvariablen das zentrale Ergebnis der Modellrechnung. Die regionalen Produktionen und Investitionen beziehen sich auf die drei Prozeßstufen Bergbau, Tonerdefabrikation und Primäraluminiumherstellung. Für jede dieser Prozeßstufen wird ermittelt, mit welchem der berücksichtigten Techniken in welchem Umfang im Stützjahr produziert wird. Gleichzeitig wird errechnet, in welchem Umfang bestehende Altanlagen, aufgerüstete und u. U. erweiterte Altanlagen oder Neuanlagen eingesetzt werden. Die regionalen und interregionalen Transporte entsprechen den Transporten der jeweiligen Transformationsprodukte zwischen den einzelnen Prozeßstufen und der Endnachfrage innerhalb einer und zwischen den Weltregionen: Bauxit von der Mine zur Tonerdefabrik, Aluminiumoxid von der Tonerdefabrik zur Hütte und Primäraluminium von der Hütte zum Endnachfrager. Die grenzüberschreitenden Transporte entsprechen dem Außenhandel der Regionen. Als weiterer Modelloutput ergeben sich die Output-Preise, die direkte Beschäftigung, der Energiebedarf und die Emissionen klimarelevanter Gase. Die Out-

put-Preise sind die Preise für die Transformationsprodukte Bauxit, Tonerde und Primäraluminium. Die direkte Beschäftigung ist die, die unmittelbar in Minen, Tonerdewerken und Hütten entsteht. Als Energiebedarf werden die Aufwendungen an Endenergie und Primärenergie bilanziert. Hinsichtlich der Emissionen klimarelevanter Gase werden der Ausstoß an Kohlendioxid und an perfluorierten Kohlenwasserstoffen abgeschätzt. Der Bilanzierungsraum ist genau festgelegt: Neben den Emissionen klimarelevanter Gase aus der Hauptkette werden die einiger wichtiger Nebenketten (z. B. Bereitstellung elektrischer Energie für die Elektrolyse) berücksichtigt.

3. Abbildung der Produktionsprozesse

3.1 Produktionsprozeß, Prozeßstufe und Prozeßvariante

In GlobAl wird der Stoffstrom des Primäraluminiums durch eine Vielzahl von Produktionsprozessen dargestellt. Ein Produktionsprozeß ist ein Verarbeitungsschritt, der zur Transformation der Produkte im Stoffstrom des Primäraluminiums führt. Die Produktionsprozesse sind den drei Prozeßstufen Bergbau, Gewinnung von Tonerde und Produktion von Primäraluminium zugeordnet. Die Produktionsprozesse auf einer Prozeßstufe werden als Prozeßvarianten bezeichnet. Sie zeichnen sich durch das gleiche Eingangs- und Ausgangsmaterial aus.

Der Produktionsprozeß spielt in GlobAl eine zentrale Rolle. Einerseits wird jedem Produktionsprozeß als Aktivitätsniveau eine Produktionsmenge zugeordnet. Andererseits zeichnet sich jeder Produktionsprozeß durch spezifische Leistungsparameter und spezifische Kapitalkosten aus. Bei gegebenen Preisen läßt sich jedem Produktionsprozeß eindeutig ein Gesamtkostenkoeffizient zuordnen. Der Produktionsprozeß bezieht sich bei der Primäraluminiumherstellung wie bei der Tonerdegewinnung stets auf eine bestimmte *Technik*, eine bestimmte *Investitionsstrategie*, eine bestimmte *Qualität des zu transformierenden Gutes* und eine bestimmte *Region*. Umgekehrt sind diese 4 Größen die Determinanten der Kostenparameter der Produktionsprozesse (Leistungsparameter, Input-Preise und Koeffizient der Kapitalkosten).

Technik. Die Technik entspricht der grundlegenden Auslegung einer Anlage. Bei der Tonerdegewinnung werden beim Aufschluß Nieder- und Hochtemperaturautoklav sowie der Rohrreaktor unterschieden, bei der Kalzination Drehrohr und Wirbelschicht. Durch die Kombinationsmöglichkeiten ergeben sich sechs Techniken. Bei der Produktion von Primäraluminium

wird eine Söderberg-Technik (HSS&VSS) und drei Techniken mit vorgebrannten Anoden berücksichtigt (CWPB, SWPB, PFPB)¹.

Investitionsstrategie. Als Investitionsstrategie von Techniken werden Altanlage, Up-Grading einer Altanlage, Brownfield oder Greenfield Expansion unterschieden. Up-Grading von Altanlagen bedeutet, daß die Leistungsparameter der implementierten Technik (z. B. Energieverbrauch) durch Austausch von Komponenten verbessert werden. Veraltete Techniken werden im Rahmen dieser Maßnahme in der Regel durch neue ersetzt. Der Zubau neuer Autoklaven, Rohrreaktoren oder Elektrolyseöfen zu bestehenden Anlagen wird als Brownfield Expansion bezeichnet. Sie ist mit einer Kapazitätserweiterung des bestehenden Standorts verbunden. Die Errichtung eines neuen Standortes wird Greenfield Expansion genannt. Hintergrund für die Berücksichtigung der Investitionsstrategien ist, daß eine Altanlage und eine Neuanlage trotz gleicher Technik keineswegs die gleichen Leistungsparameter haben. Normalerweise wird die Neuanlage der Altanlage überlegen sein. Umgekehrt verursachen die Neuanlage als auch Up-Grading und Brownfield Expansion Investitionskosten, während bei der Altanlage die (einstigen) Investitionskosten als versunkene Kosten aus Modellsicht nicht relevant sind.

Qualität des zu transformierenden Gutes. Bauxite unterscheiden sich stark in ihrer chemischen und mineralogischen Zusammensetzung. Sie sind im Gegensatz zu Tonerde und Primäraluminium ein heterogenes Gut. Bei der Gewinnung von Tonerde muß deshalb im Gegensatz zur Herstellung von Primäraluminium die Qualität des Eingangsmaterials berücksichtigt werden. Die chemische und mineralogische Zusammensetzung des Bauxits hat beim Aufschluß erhebliche Auswirkungen auf den Faktorbedarf.

Region. Auch die regionenspezifische Auslegung und Anwendung einer Technik hat Auswirkungen auf die Leistungsparameter einer Anlage. Beispielsweise entsprechen die Leistungsparameter einer Altanlage mit Söderberg-Technik in Norwegen keinesfalls denen einer solchen Anlage in der ehemaligen Sowjetunion. Hinzu kommt, daß die Input-Preise den Regionen zugeordnet sind.

Beim Bergbau wird auf eine Rückführung der Produktionsprozesse auf Techniken verzichtet. Die Leistungsparameter werden zu einem guten Teil durch die natürlichen Lagerungsbedingungen des Bauxits (wie die Überdeckung) determiniert. Differenziert wird beim Bergbau nach den Investitionsstrategien, der Qualität des zu transformierenden Gutes (des Bauxits) und den Regionen. Die Investitionsstrategien werden nur nach Produktionsprozessen gegeben-

¹ HSS: Horizontal Stud Söderberg, VSS: Vertical Stud Söderberg, CWPB: Center-Worked Pre-Baked, SWPB: Side-Worked Pre-Baked, PFPB: Point-Feeder Pre-Baked.

ner Kapazität und neuer Kapazität unterschieden. Für die Erweiterung der Kapazität werden Investitionskosten fällig.

3.2 Techniken und Investitionsstrategien

Für das Zusammenspiel von Techniken und Investitionsstrategien werden bestimmte Annahmen getroffen. Für die Produktion von Primäraluminium wird angenommen, daß Up-Grading, Brownfield und Greenfield Expansion stets mit PFPB erfolgen. Diese Technik hat sich bereits in den letzten Jahren gegenüber den anderen zunehmend durchgesetzt. Für die Tonerdefabrikation wird unterstellt, daß bei Up-Grading und Brownfield Expansion die in den Altanlagen realisierten Aufschlußtechniken beibehalten werden. Bei der Kalzination hingegen wird vom Einsatz von Wirbelschicht ausgegangen. Bei Neuanlagen wird Rohrreaktor in Kombination mit Wirbelschicht unterstellt.

Wichtig ist, daß beim Up-Grading nicht nur die neu eingesetzte Technik zur Prozeßdifferenzierung berücksichtigt werden muß, sondern auch die ersetzte. Der Grund ist, daß die Investitionskosten des Aufrüstens von Altanlagen auch von deren ursprünglicher Technik abhängen. Eine Söderberg-Altanlage ist in der Aufrüstung mit PFPB teurer als eine CWPB- oder SWPB-Altanlage. Die Produktion von Altanlagen und auferüsteten Anlagen wird gemeinsam durch eine Kapazitätsgrenze beschränkt. Entsprechend wird bei der Tonerdefabrikation verfahren.

Bei der Brownfield Expansion muß im Gegensatz zum Up-Grading nicht jeder in einer Altanlage realisierten Technik ein eigener Prozeß zur Seite gestellt werden. Die Kosten des Zubaus neuer Komponenten sind von der ursprünglichen Technik unabhängig. Die Produktion aus der Brownfield Expansion kann für sich begrenzt werden. Auch für den Neubau ist eine solche Differenzierung nicht notwendig.

3.3 Techniken und Qualität des zu transformierenden Gutes

Die chemische Zusammensetzung des Bauxits hat beim Aufschluß erhebliche Bedeutung für den Faktorbedarf. Der Aluminiumoxidgehalt des Bauxits ist entscheidend für die je Output-einheit Tonerde notwendige Menge an Bauxit. Zudem hat der Aluminiumoxidgehalt zusammen mit dem Anteil an reaktivem Siliziumoxid Auswirkungen auf den chemischen Verlust an Natronlauge. Gleiches gilt für die mineralogische Zusammensetzung des Bauxits. Diese beeinflusst die Wahl der Technik beim Aufschluß und damit indirekt den Faktorbedarf. Monohydratische Bauxite können wettbewerbsfähig sowohl mit Hochtemperaturaufkochen als

auch mit dem Rohrreaktor aufgeschlossen werden. Niedertemperaturautoklaven scheiden aufgrund der hohen Aluminiumoxidverluste aus. Trihydratische Bauxite hingegen können mit allen drei Techniken verarbeitet werden (Abb. III,2).

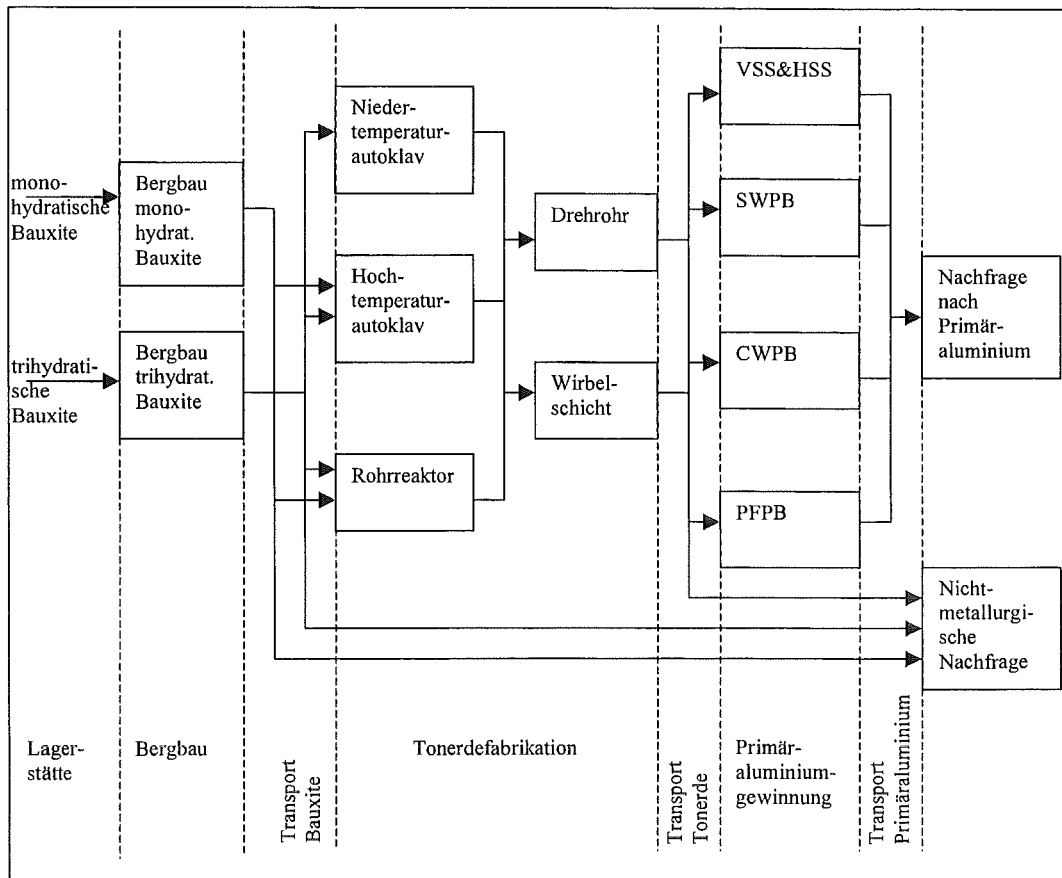


Abb. III,2 Vereinfachtes Strukturbild von GlobAl

Die Heterogenität des Bauxits wird in GlobAl berücksichtigt, indem drei Ausprägungen und 18 Bauxittypen unterschieden werden. Nach der mineralogischen Zusammensetzung wird zwischen monohydratischen und trihydratischen Bauxiten unterschieden, nach dem Aluminiumoxidgehalt zwischen hoch-, mittel- und geringwertigen Bauxiten und nach dem beim Aufschluß ausgelösten chemischen Verlust an Natronlauge zwischen erst-, zweit- und drittklassigen Bauxiten (Abb. III,3). Die Heterogenität der Bauxite erzwingt die weitere Differenzierung der Produktionsprozesse bei der Tonerdeverarbeitung. Einer Altanlage mit Niedertemperaturautoklaven und Drehrohr werden so neun Produktionsprozesse je Region entsprechend den

neun trihydratischen Bauxittypen zugewiesen. Einer Altanlage mit Hochtemperaturautoklaven und Drehrohr sind 18 Produktionsprozesse je Region zugeordnet. Mono- und trihydratische Bauxite können verarbeitet werden.

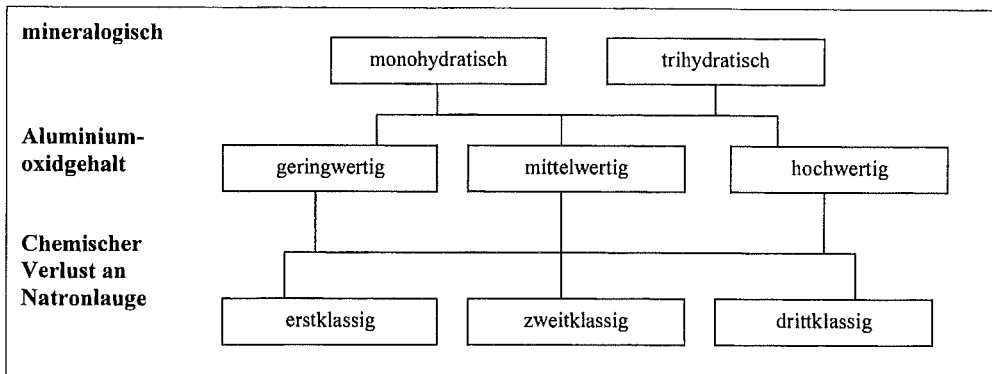


Abb. III,3 Bauxittypen

3.4 Regionalisierung

In Global sind 15 Regionen abgebildet. Staaten, die für sich genommen als Produktionsstandort eine große Bedeutung für den Stoffstrom des Primäraluminiums haben, werden dabei als eine Region behandelt. Dies ist für acht Staaten oder ehemalige Staaten der Fall: USA, Kanada, Brasilien, Deutschland, Frühere Sowjetunion, Indien, China und Australien. Die restlichen Staaten sind zu möglichst homogenen Regionen zusammengefasst: Rest von Lateinamerika, Rest der Europäischen Union, Rest von Westeuropa, Rest von Osteuropa, Afrika, Naher und Mittlerer Osten und Rest von Asien (Abb. III,4). Homogen wird im Sinne möglichst ähnlicher Niveaus an Technikstandards und Input-Preisen verstanden.

Die Produktionsprozesse und mit ihnen ein Großteil der Modellparameter sind stets auch den Regionen zugeordnet. Bei der Bestimmung der Modellparameter werden Regionen, die aus nur einem Land bestehen, und solche, die mehrere Länder umfassen, gleich behandelt. So werden die Leistungsparameter von Altanlagen einer bestimmten Technik in einer Region als kapazitätsgewichtete Durchschnitte der bestehenden Anlagen in einer Region errechnet. Die Input-Preise werden als verbrauchsgewichtete Durchschnitte der Anlagen einer Region gebildet. Beim Mix der Energieträger zur Stromgewinnung für die Elektrolyse werden Vertragsmix und Regionalmix unterschieden. Beim Vertragsmix wird der Mix aus den Vertragsbeziehungen Hütte und Energieversorger mit den jeweiligen Kapazitäten der Hütten in einer Region gewichtet. Entspricht eine Region einem Land, ist der Regionalmix gleich dem Landes-

mix. Bilden mehrere Länder eine Region, werden die jeweiligen Anteile der einzelnen Energieträger an der Stromproduktion über eine Gewichtung entsprechend der Stromproduktion der einzelnen Länder zusammengeführt. Damit ist auch in diesem Fall eine Gleichstellung aller Regionen erreicht.

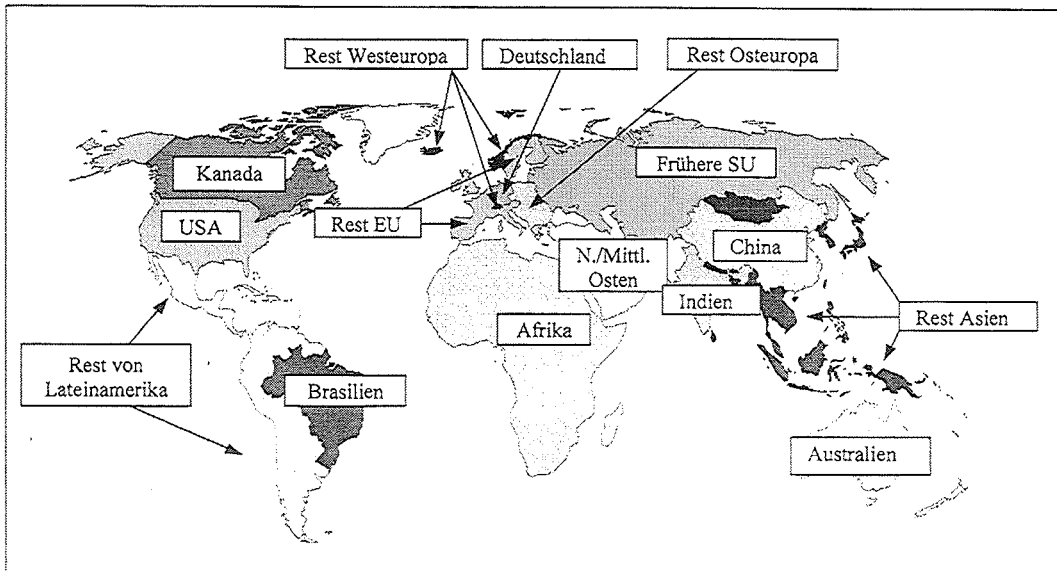


Abb. III,4 Regionalisierung in GlobAl

4. Mathematischer Algorithmus

4.1 Güter, Prozesse und Regionen im Überblick

In GlobAl werden insgesamt 38 Gütertypen I unterschieden: 18 Bauxittypen im Boden, 18 transportierbare Bauxite, Tonerde und Primäraluminium. Es werden 289 Produktionsprozesse je Region berücksichtigt: 36 im Bergbau, 243 bei der Verarbeitung von Tonerde und 10 bei der Produktion von Primäraluminium. Zudem wird nach 15 Weltregionen differenziert (im Überblick Tab. III,1). Dies führt zu $289 \times 15 = 4335$ Produktionsprozessen J. Die Transporte zwischen den Herkunftsregionen R und den Zielregionen R' spannen eine Matrix mit $15 \times 15 = 225$ Elementen auf. Kombiniert mit den 20 transportierbaren Gütern I^t ergeben sich $225 \times 20 = 4500$ Transportprozesse. Insgesamt ergeben sich damit $4335 + 4500 = 8835$ Prozesse.

Die Güter sind Eingangs- bzw. Umwandlungsprodukte der technischen Transformationsprozesse. Das Zusammenspiel von Gütern und Prozessen ist im Modell durch die Transforma-

Tab. III,1 Gütertypen, Produktionsprozesse und Regionen

1. Gütertypen (I: 38 Elemente)					
Bauxite in den Lagerstätten			Transportierbare Bauxite, Tonerde, Aluminium		
I ^{nt} : 18 Elemente			I ^t : 20 Elemente		
1. Produktionsprozesse je Region (J: 289 Elemente)					
a) Produktionsprozesse des Bergbaus je Region (B: 36 Elemente)					
Produktionsprozesse bestehender Kapazität			Produktionsprozesse neuer Kapazität		
B ^a : 18 Elemente			B ⁿ : 18 Elemente		
b) Produktionsprozesse der Tonerdeherstellung je Region (T: 243 Elemente)					
		Alt	Up-Grading	Brownfield	Neu
Niedertemp.-Autoklave	Drehrohr	T ^{aLR} : 9	T ^{uLR*} : 9	n. b.	n. b.
	Wirbelschicht	T ^{aLF} : 9	T ^{uLF*} : 9	T ^{bLF} : 9	n. b.
Hochtemp.-Autoklave	Drehrohr	T ^{aHR} : 18	T ^{uHR*} : 18	n. b.	n. b.
	Wirbelschicht	T ^{aHF} : 18	T ^{uHF*} : 18	T ^{bHF} : 18	n. b.
Rohrreaktor	Drehrohr	T ^{aTR} : 18	T ^{uTR*} : 18	n. b.	n. b.
	Wirbelschicht	T ^{aTF} : 18	T ^{uTF*} : 18	T ^{bTF} : 18	T ^{nTF} : 18
c) Produktionsprozesse der Produktion von Primäraluminium je Region (P: 10 Elemente)					
	alt	Up-Grading	Brownfield	Neu	
VSS&HSS	P ^{aV} : 1	P ^{uV*} : 1	n. b.	n. b.	
CWPB	P ^{aC} : 1	P ^{uC*} : 1	n. b.	n. b.	
SWPB	P ^{aS} : 1	P ^{uS*} : 1	n. b.	n. b.	
PFPB	P ^{aP} : 1	P ^{uP*} : 1	P ^{bP} : 1	P ^{nP} : 1	
3. Regionen (R: 15 Elemente)					
USA, Kanada, Brasilien, Rest von Lateinamerika, Deutschland, Rest der EU, Rest von Westeuropa, frühere Sowjetunion, Rest von Osteuropa, Afrika, Naher und Mittlerer Osten, Indien, China, Ostasien, Australien.					

4.2 Zielfunktion

Global ist als lineares Programmierungsmodell angelegt. Zielfunktion ist die Minimierung der Kosten des gesamten Systems der Primäraluminiumwirtschaft. Die Kosten des Gesamtsystems umfassen die Kosten sämtlicher Produktionsprozesse und die Transportkosten.

$$(1) \quad C = \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R (q_{rj} \cdot x_{rj}) + \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R (r_{rj} \cdot x_{rj}) + \sum_{i^t=1}^{I^t} \sum_{r=1}^R \sum_{r'=1}^{R'} (t_{i^t r r'} \cdot x t_{i^t r r'})$$

mit:

C = Gesamtkosten des Systems

x_{rj} = Produktion in metrischen Tonnen in der Region r mit dem Produktionsprozeß j

$x t_{i^t r r'}$ = Transporte in metrischen Tonnen an transportierbaren Gütern i^t zwischen der Herkunftsregion r und der Zielregion r'

q_{rj} = Betriebskosten der Produktion einer metrischen Tonne Output in der Region r mit dem Produktionsprozeß j

r_{rj} = Kapitalkosten für die Produktion einer metrischen Tonne Output in der Region r mit dem Produktionsprozeß j

$t_{i^t k}$ = Transportkosten für eine metrische Tonne an transportierbaren Gütern i^t zwischen der Herkunftsregion r und der Zielregion r'

4.3 Nebenbedingungen

4.3.1 Kapazitätsgrenzen

Als Nebenbedingungen fungieren zum einen die Kapazitätsbeschränkungen und zum anderen die Bedingungen des Ausgleichs von Angebot und Nachfrage. Im Modell sind Kapazitätsgrenzen für alle drei Prozeßstufen implementiert.

Bergbau. Für den Bergbau sind zwei Restriktionen zu formulieren. Die erste bezieht sich auf die Produktionsprozesse bereits installierter Kapazität. Der Output des Bergbaus eines bestimmten Produktionsprozesses (die mit einem Bauxittyp zusammenfällt) bei bestehender Kapazität b^a in einer Region r ist kleiner/gleich der zugehörigen Ausgangskapazität $Z0_{rb^a}$.

$$(2) \quad x_{rb^a} \leq Z0_{rb^a}; \quad \text{für alle } r \in R \text{ und } b^a \in B^a.$$

mit:

x_{rb^a} = Output in metrischen Tonnen des Bergbaus bei gegebener Kapazität des Produktionsprozesses b^a in der Region r .

$Z0_{rb^a}$ = Ausgangskapazität in metrischen Tonnen des Bergbaus des Produktionsprozesses b^a in der Region r .

Damit ist gesichert, daß die bereits existierenden Minen eines bestimmten Bauxittyps in den Regionen ohne Kapazitätserweiterungen, für die Investitionskosten anfallen würden, nicht mehr Bauxit fördern können als die bisherige Kapazität. Die zweite Nebenbedingung bezieht sich auf die Produktionsprozesse, bei denen neue Kapazität geschaffen wird und somit Investitionen notwendig sind. Der Output des Bergbaus eines Produktionsprozesses bei Kapazitätserweiterung b^n in der Region r ist stets kleiner/gleich dem Produkt aus (exogen gesetzten) Zubaufaktor z_b und der Ausgangskapazität $Z0_{rb^a}$.

$$(3) \quad x_{rb^n} \leq z_b \cdot Z0_{rb^a}; \quad \text{für alle } r \in R \text{ und } b^n \in B^n$$

mit:

x_{rb^n} = Output in metrischen Tonnen des Bergbaus bei Kapazitätserweiterung des Produktionsprozesses b^n in der Region r .

z_b = Zubaufaktor Bergbau

Tonerdegewinnung. Bei der Tonerdegewinnung werden drei grundsätzlich unterschiedliche Arten von Kapazitätsbeschränkungen berücksichtigt, nämlich für Altanlagen und aufgerüstete Altanlagen, für Brownfield Expansion und für Greenfield Expansion. (i) Ausgehend von einer gegebenen Technik in einer Region wird die Produktion von Altanlagen und aufgerüsteten Anlagen gemeinsam begrenzt. Beispielsweise wird für Niedertemperaturautoklaven mit Drehrohr die Summe der Produktion aus Altanlagen und aufgerüsteten Anlagen kleiner/gleich der Ausgangskapazität dieser Technik in einer Region gesetzt. Die unterschiedlichen Bauxittypen haben Einfluß auf den Faktorbedarf bei der Tonerdefabrikation und führen im Modell zu einer weiteren Untergliederung der Produktionsprozesse. Die Produktion aus Altanlagen mit Niedertemperaturautoklaven und Drehrohr und die Produktion des zugehörigem Up-Grading ist daher jeweils gleich der Summe der Produktionen der über die Bauxittypen mit der Technik verbundenen Produktionsprozessen T^{aLR} und T^{uLR*} .

$$(4) \quad \sum_{t^{aLR}=1}^{T^{aLR}} x_{rt^{aLR}} + \sum_{t^{uLR}=1}^{T^{uLR*}} x_{rt^{uLR*}} \leq Z0_{rt^{aLR}} ; \quad \text{für alle } r \in R$$

mit:

- $x_{rt^{aLR}}$ = Output in metrischen Tonnen Tonerde von Altanlagen mit Niedertemperaturautoklaven und Drehrohr t^{aLR} in der Region r.
- $x_{rt^{uLR*}}$ = Output in metrischen Tonnen Tonerde von aufgerüsteten Anlagen mit der ehemaligen Technik Niedertemperaturautoklaven und Drehrohr t^{uLR*} in der Region r.
- $Z0_{rt^{aLR}}$ = Ausgangskapazität in metrischen Tonnen Tonerde mit Niedertemperaturautoklaven und Drehrohr t^{aLR} in der Region r.

Da in einer Region entweder das Weiterbetreiben der Altanlage oder das Up-Grading günstiger ist, wird damit die Produktion der günstigeren Alternative entsprechend der Ausgangskapazität begrenzt. Damit ist gleichzeitig vereinfachend ausgeschlossen, daß es durch Up-Grading zu einer Kapazitätserweiterung kommen kann. Analog zur Vorgehensweise für Niedertemperaturautoklaven mit Drehrohr lassen sich für die anderen fünf Techniken der Tonerdegewinnung die Restriktionen für Altanlagen und Up-Grading entwickeln.

(ii) Die Brownfield Expansion wird von der Ausgangskapazität abhängig gemacht. Eine Brownfield Expansion ist mit Blick auf Niedertemperaturautoklaven nur in Kombination mit Wirbelschicht zu erwarten. Ihr Zubau wird daher von der Ausgangskapazität von Niedertemperaturautoklaven in Kombination mit Drehrohr und Wirbelschicht als abhängig verstanden.

$$(5) \quad \sum_{t^{bLF}=1}^{T^{bLF}} x_{rt^{bLF}} \leq z_{t^b} \cdot (Z0_{rt^{aLR}} + Z0_{rt^{aLF}}) ; \quad \text{für alle } r \in R$$

mit:

- $x_{rt^{bLF}}$ = Output in metrischen Tonnen Tonerde bei Brownfield Expansion mit Niedertemperaturautoklaven und Wirbelschicht t^{bLF} in der Region r.
- z_{t^b} = Zubaufaktor Tonerdeproduktion Brownfield Expansion

Analog wird bei Brownfield Expansion von Hochtemperaturautoklaven und Rohrreaktor Verfahren. (iii) Als Neubautechnik wird Rohrreaktor mit Wirbelschicht angenommen. Die

Bounds $BO_{r^{nTF}}$ werden exogen unter Berücksichtigung des bisherigen jährlichen Zubaus und von geplanten Projekten gesetzt.

$$(6) \quad \sum_{t^{nTF}=1}^{T^{nTF}} x_{r^{nTF}} \leq BO_{r^{nTF}} ; \quad \text{für alle } r \in R$$

mit:

$x_{r^{nTF}}$ = Output in metrischen Tonnen Tonerde bei Greenfield Expansion mit Rohrreaktor und Wirbelschicht t^{nTF} in der Region r .

$BO_{r^{nTF}}$ = Bound für den Zubau an Kapazität bei Greenfield Expansion von Rohrreaktor und Wirbelschicht t^{nTF} in der Region r .

Produktion von Primäraluminium. Für die Herstellung von Primäraluminium ergeben sich analog der Tonerdefabrikation die gleichen drei Arten an Kapazitätsrestriktionen. Da der Input Tonerde homogen ist, ist die mathematische Formulierung einfacher. (i) Die Summe des Outputs von Altanlagen, die die Söderberg-Technik p^{aV} verwenden, und von Up-Grading p^{uV*} in der Region r ist kleiner/gleich der Ausgangskapazität der Söderberg-Anlagen.

$$(7) \quad x_{rp^{aV}} + x_{rp^{uV*}} \leq ZO_{rp^{aV}} ; \quad \text{für alle } r \in R$$

mit:

$x_{rp^{aV}}$ = Output in metrischen Tonnen Primäraluminium von Altanlagen mit Söderberg-Technik p^{aV} in der Region r .

$x_{rp^{uV*}}$ = Output in metrischen Tonnen Primäraluminium von aufgerüsteten Anlagen mit ehemals Söderberg-Technik p^{uV*} in der Region r .

$ZO_{rp^{aV}}$ = Ausgangskapazität in metrischen Tonnen Primäraluminium der Söderberg-Technik p^{aV} in der Region r .

Mit Altanlagen und zugehörigem Up-Grading, die mit den drei Techniken mit vorgebrannten Anoden arbeiten, wird entsprechend verfahren. (ii) Die Brownfield Expansion erfolgt stets mit der PFPB-Technik. Sie wird als von der Ausgangskapazität abhängig verstanden.

$$(8) \quad x_{rp^{bp}} \leq z_{pb} \cdot (Z0_{rp^{av}} + Z0_{rp^{ac}} + Z0_{rp^{as}} + Z0_{rp^{ap}}); \quad \text{für alle } r \in R$$

mit:

z_{pb} = Zubaufaktor Primäraluminium Brownfield Expansion

$x_{rp^{bp}}$ = Output in metrischen Tonnen Primäraluminium bei Brownfield Expansion mit PFPB-Technik p^{bp} in der Region r .

$Z0_{rp^{ac}}, Z0_{rp^{as}}, Z0_{rp^{ap}}$
= Ausgangskapazität in metrischen Tonnen Primäraluminium der 3 Techniken mit vorgebrannten Anoden CWPB p^{ac} , SWPB p^{as} , PFPB p^{ap} in der Region r .

(iii) Auch der Neubau erfolgt nur mit der PFPB-Technik. Die Bounds $BO_{rp^{np}}$ werden wiederum exogen unter Berücksichtigung des bisherigen jährlichen Zubaus und von geplanten Projekten gesetzt.

$$(9) \quad x_{rp^{np}} \leq BO_{rp^{np}}; \quad \text{für alle } r \in R$$

mit:

$x_{rp^{np}}$ = Output in metrischen Tonnen Primäraluminium bei Greenfield Expansion mit PFPB-Technik p^{np} in der Region r .

$BO_{rp^{np}}$ = Bound für den Zubau an Kapazität bei Greenfield Expansion mit PFPB-Technik p^{np} in der Region r .

4.3.2 Ausgleich von Angebot und Nachfrage

Neben den Kapazitätsbeschränkungen ist der Ausgleich von Angebot und Nachfrage im Modell als Nebenbedingung zu formulieren. Dabei ist zwischen den transportierbaren und den nicht transportierbaren Gütern zu unterscheiden. Für die transportierbaren Güter i^t wird angenommen, daß die *Nettoproduktion* eines Gutes i^t in einer Region r bereinigt um die Nettoimporte in die Region größer/gleich der *exogenen* Nachfrage nach dem Gut i^t in der Region r ist.

$$(10) \quad \sum_{j=1}^J a_{i^t j} \cdot x_{ij} + \left(\sum_{r=1}^R x t_{i^t r} - \sum_{r=1}^R x t_{i^t r} \right) \geq d_{n^t} ; \quad \text{für alle } r \in R, i^t \in I^t$$

mit:

$a_{i^t j}$ = Transformationskoeffizient des i^t -ten Gutes und j -ten Prozesses

d_{n^t} = exogene Nachfrage nach dem Gut i^t in der Region r .

Die Nettoproduktion eines Gutes i^t entspricht der (gesamten) Produktion eines Gutes i^t plus der (stets mit einem negativen Vorzeichen versehenen) abgeleiteten Nachfrage nach Gut i^t , die sich implizit aus der Produktion und dem dadurch ausgelösten Inputbedarf ergibt². Die Berücksichtigung der Nettoimporte, also der Transporte eines Gutes i^t in eine Region r (Importe) minus der Transporte aus der Region heraus (Exporte), läßt zu, daß die jeweilige regionale Nachfrage auch durch andere Regionen befriedigt werden kann. Durch Gleichung (10) ist gesichert, daß die für die einzelnen Regionen jeweils exogen angenommene Nachfrage nach Primäraluminium, die exogen angenommene nichtmetallurgische Nachfrage nach Tonerde und Bauxit und die aus der Nachfrage nach Primäraluminium abgeleitete Nachfrage nach Tonerde und Bauxit stets befriedigt wird.

Für die (nicht transportierbaren) Bauxittypen im Boden I^m wird festgelegt, daß ihre ursprüngliche Ausstattung in der Region s_{n^m} in der Region r größer/gleich der Nachfrage nach ihnen ist. Die Nachfrage nach den Bauxiten im Boden ist eine abgeleitete Nachfrage³.

$$(11) \quad \sum_{j=1}^J a_{i^m j} \cdot x_{ij} \geq s_{n^m} ; \quad \text{für alle } r \in R, i^m \in I^m$$

mit:

s_{n^m} = ursprüngliche Ausstattung an Bauxit i^m in der Region r .

Diese Nebenbedingung sichert, daß nicht mehr Bauxit abgebaut werden kann, als als vorhanden angenommen wird.

² Der Transformationskoeffizient für Outputs ist positiv, die produzierte Menge daher stets mit einem positiven Vorzeichen versehen. Der Transformationskoeffizient für Inputs ist negativ. Die abgeleitete Nachfrage hat daher stets ein negatives Vorzeichen.

³ Die ursprüngliche Ausstattung wie die abgeleitete Nachfrage haben ein negatives Vorzeichen, so daß - nach Multiplikation mit (-1) - tatsächlich die Ausstattung größer/gleich der Nachfrage.

4.4 Nichtnegativitätsbedingungen

Die Nichtnegativitätsbedingungen schließen negative Produktions- und Transportmengen aus.

$$(12) \quad x_{ij} \geq 0; \quad xt_{i'r'} \geq 0 \quad \text{für alle } r \in R, r' \in R', j \in J, \\ i' \in I'$$

4.5 Preissetzung

Im Modell produziert (und investiert) die internationale Aluminiumindustrie so, daß die Gesamtkosten (1) unter Berücksichtigung der Kapazitätsbeschränkungen (2) bis (9), des Ausgleichs von Angebot und Nachfrage (10) und (11) und den Nichtnegativitätsbedingungen (12) minimiert werden.

Implizit werden bei vorliegendem Modellentwurf für die Transformationsgüter Grenzkostenpreise angesetzt. Der Preis p_{ri} eines jeden Gutes i in einer Region r entspricht dem ihm über die Materialbilanzgleichungen zugeordneten dualen Wert (Schattenpreis). Das bedeutet gleichzeitig, daß der Preis p_{ri} eines Gutes i in einer Region r Null ist, falls sich ein Überschußangebot ergibt.

$$(13) \quad p_{ri} = 0, \quad \text{falls} \quad s_{ri} + \sum a_{ij} \cdot x_{ij} + \left(\sum_{r'=1}^R xt_{i'r'r} - \sum_{r'=1}^R xt_{i'r'r'} \right) > d_{ri}; \\ \text{für alle } r \in R, i \in I$$

mit:

p_{ri} = Preis eines Gutes i in einer Region r

Abb. III,5 zeigt stark vereinfacht das Marktgleichgewicht in Global für das Gut Primäraluminium. S entspricht der aggregierten Angebots- bzw. Grenzkostenkurve über alle Produktionsprozesse. Die Marktnachfrage D ist exogen gegeben und vom Marktpreis unabhängig. Der Schnittpunkt aus S und D ergibt den Gleichgewichtsausgang x^* und den Gleichgewichtspreis p^* . Der Gleichgewichtspreis ist gleich den Grenzkosten des Grenzanbieters bzw. genauer des Grenzprozesses.

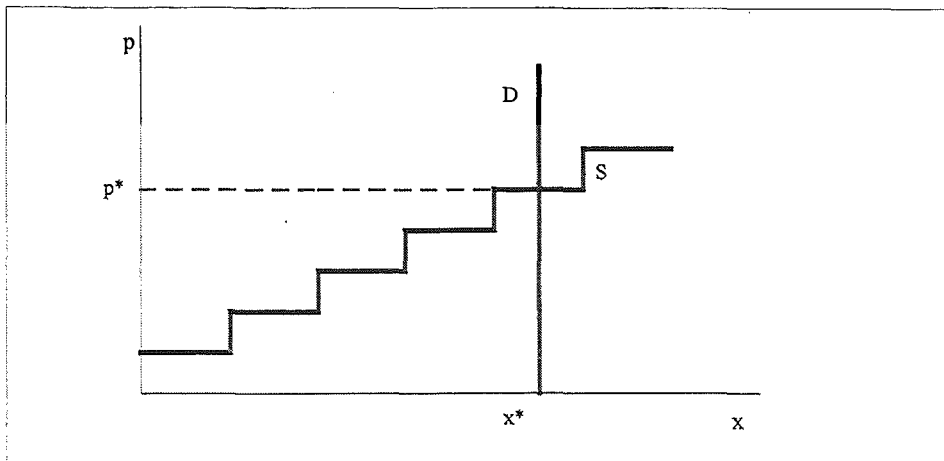


Abb. III,5 Marktgleichgewicht für Primäraluminium (stark vereinfacht)

IV. Wichtige Modellparameter

1. Szenarienaufbau und Modellparameter

Die Modellparameter werden aus Daten unterschiedlichster Quellen gewonnen (Tab. IV,1). Abhängig vom Szenario sind die Annahmen zur zukünftigen weltweiten Nachfrage nach Primäraluminium. Im Basisszenario wird von einer moderaten Entwicklung der Nachfrage nach Primäraluminium ausgegangen. Zudem wird der Fall einer niedrigen und einer hohen Zuwachsrates der Nachfrage nach Primäraluminium gerechnet.

Die Projektion der szenariounabhängigen Parameter geschieht vor dem Hintergrund der Annahme fortschreitender Globalisierung, zunehmender Aktivitäten multinationaler Unternehmen und weltweiter Liberalisierung. Dies äußert sich in folgenden Annahmen:

- Bei Up-Grading, Brownfield und Greenfield Expansion können 2010 weltweit gleiche Leistungsparameter realisiert werden.
- Die Preise handelbarer Güter gleichen sich bis 2010 in der Tendenz an.
- Die Löhne in den rückständigen Ländern steigen relativ zu denen in den führenden Ländern an.
- Das volkswirtschaftliche Wachstum der rückständigen Länder wird insgesamt als höher eingeschätzt. Dies ist ein Grund für deren höhere Zuwachsraten bei der Nachfrage nach Primäraluminium.
- Die Zollltarife gehen bis 2010 weiter zurück.

Tab. IV,1 Wichtige Modellparameter und Grundlagen ihrer Schätzung

Parameter	Grundlage der Schätzung
Nachfrage - Primäraluminium - Nichtmetallurgische Nachfrage Bauxit/Tonerde	Daten nach Kuckshinrichs (1998). Zuwachsrates und regionale Verteilung entsprechend Primäraluminium.
Kapazitätsgrenzen - Ausgangskapazität - Zubaufaktor Brownfield Expansion - Zubau Greenfield Expansion	Definiert für das Jahr 1995 auf Basis der Daten von CRU (1996), BGR (1997), Pawlek (1998a), Metallstatistik (v. Jg.). Entsprechend der Kapazitätserweiterungen bestehender Anlagen im Bau bzw. geplant nach Pawlek (1998a, b, c, d). Entsprechend Neuanlagen im Bau bzw. geplant nach Pawlek (1998a, b, c, d), MITSUI (1999) und Festgröße.
Betriebskosten - Leistungsparameter Altanlagen - Leistungsparameter Up-Grading, Brownfield und Greenfield Expansion - Input-Preise	Ausgangspunkt Daten für 1995 nach CRU (1996), BGR (1997), Pawlek (1998a); Annahme, daß sich der Rückstand der Leistungsparameter hin zur besten Anlage des jeweiligen Verfahrens bis 2010 um 50 Prozent verringert. Daten aus verschiedenen Studien (z. B. Solymár, 1998, VAW-ATG, 1998) und eigene Schätzungen auf Basis CRU (1996). Ausgangspunkt Preise für 1995 aus CRU (1996) und IEA (1997); Annahme, daß sich regionale Preise bis 2010 in Richtung Durchschnittspreis angleichen.
Kapitalkosten - Kapitalkosten nach Einsatzarten - Risikozuschläge	Datengrundlage liefern u. a. IBRD (1983), Pawlek (1998 a, c, d) und Peters (1998). Differenzierung in Regionen ohne Risikozuschlag (westliche Industrieländer) und mit Risikozuschlag (sonstige Länder) von 20 Prozent.
Transportkosten - Gewichtete Transportentfernungen - Transporttarife	Entsprechend den Daten für 1995, die aus Zahlen von Brown et al. (1983) und IBH (1999) entwickelt wurden. Ausgangspunkt Tarife für 1995 nach Brown et al. (1983) und US-Bureau of Mines (1995); Annahme, daß Tarife bis 2010 um 10 Prozent zurückgehen.
Zölle	Ausgangspunkt Zolltarife für 1995 nach UNCTAD (1996) und BFAI (1998); Annahme, daß Tarife bis 2010 um 20 Prozent sinken.
Energiebedarf - Endenergiebedarf in den Prozessen - Einsatzverhältnis der Erstellung der thermischen Energie für Bayer-Prozeß - Endenergiebedarf der Transportprozesse - Einsatzverhältnis der Energieträger zur Stromgewinnung - Bereitstellungsnutzungsgrad der Energieträger zur Stromproduktion - Energiemix bei der Herstellung von Natronlauge und Anoden	Siehe Leistungsparameter. Einsatzverhältnisse in den Regionen für 1995 nach CRU (1996) werden für 2010 beibehalten. Daten nach IBH (1999) für 1995; spezifische Endenergieverbräuche werden für 2010 beibehalten. Daten für 1995 und 2010 nach Briem et al. (1999). Daten für 1995 und 2010 nach Briem et al. (1999). Daten nach IME (1999).
Emissionen - CO ₂ -Emissionsfaktoren für thermische Energie - CO ₂ -Emissionsfaktoren für elektrische Energie - Emissionsfaktoren für perfluorierte Kohlenwasserstoffe	Daten nach BUWAL (1996). Daten für 1995 und 2010 nach Briem et al. (1999). Daten nach Schwarz et al. (1996).

2. Exogene Nachfragegrößen

2.1 Nachfrage nach Primäraluminium

Die Nachfrage nach Primäraluminium ist ein wesentlicher Modellparameter. Dabei ist nicht nur die Entwicklung der gesamten Nachfrage bis 2010 vorzugeben, sondern auch die Entwicklung der regionalen Anteile. Projektionen für die zukünftige Nachfrage nach Primäraluminium weltweit und in den Regionen liefern beispielsweise Nichols et al. (1992), Weltbank (1994) und Kuckshinrichs (1998).

Die Weltbank (1994) prognostiziert für die weltweite Nachfrage nach Primäraluminium von 1992 bis 2005 ein durchschnittliches jährliches Wachstum von 2,3%, nach einem Wachstum von 2,1% in den Jahren 1980 bis 1991. Regional wird davon ausgegangen, daß sich die Nachfrageanteile von 1992 bis 2005 zuungunsten der industrialisierten Länder verschieben. Zwei Gründe sind hierfür entscheidend: Zum einen wird die regionale Nachfrage nach Primäraluminium als abhängig vom jeweiligen volkswirtschaftlichen Wachstum verstanden. Dieses wird für die weniger entwickelten Länder höher angesetzt. Zum anderen wird davon ausgegangen, daß die Aluminiumintensität, sie ist das Verhältnis von Aluminiumkonsum zu Gesamtoutput, im Entwicklungsprozeß zunächst zunimmt, dann stagniert und schließlich abnimmt. Entsprechend nimmt die Nachfrage nach Primäraluminium in bezug auf das regionale Wachstum erst überproportional, dann proportional und schließlich unterproportional zu. Grund ist der zunächst wachsende Industrieanteil am Gesamtoutput und der dann folgende Trend zur Dienstleistungsgesellschaft, der die Materialintensität sinken läßt.

Kuckshinrichs (1998) geht für den Zeitraum 1995 bis 2010 von einem durchschnittlichen jährlichen Wachstum der weltweiten Nachfrage nach Primäraluminium um 1,9% aus. Dies entspricht dem Wachstum der Nachfrage im Zeitraum 1980 bis 1995. Seine Projektion beruht auf der Weltbank-Studie, die fortgeschrieben und für einige Regionen aufgrund der aktuellen Krisen und Entwicklungen angepaßt wurde (Tab. IV,2). Danach werden insbesondere Indien, China und Afrika wachsende Anteile an der weltweiten Nachfrage erreichen. Aufgrund der hartnäckigen Krisen in den südostasiatischen Tigerstaaten und Japan wird die Region Rest von Asien nur mehr geringe Anteilsgewinne verbuchen können. Für Osteuropa wird eine weitere Stabilisierung der Ökonomien und eine deutlich wachsende Nachfrage nach Primäraluminium erwartet. In abgeschwächtem Maße gilt dies auch für die Frühere Sowjetunion. Die Nachfrage der westlichen Industriestaaten (USA, Kanada, Deutschland, Rest der EU und Australien) wächst mit Ausnahme des Rests von Westeuropa aufgrund des geringeren volkswirt-

schaftlichen Wachstums und der zunehmenden Dematerialisierung weniger stark als die weltweite Nachfrage.

Projektionen für die Entwicklung der weltweiten Nachfrage nach Primäraluminium sind aufgrund der großen Abhängigkeit von der weltwirtschaftlichen Entwicklung schwierig. Zudem haben Veränderungen im Substitutionswettbewerb mit anderen Werkstoffen und die Recyclingquoten Einfluß. Daher wird neben dem Basisszenario, das auf der Projektion von Kuckshinrichs (1998) beruht, ein Szenario niedriger Nachfrage nach Primäraluminium und ein Szenario hoher Nachfrage gerechnet. Ersteres geht bis 2010 von einem weltweiten Nachfragezuwachs von 1,4% jährlich aus, letzteres unterstellt einen Zuwachs von 2,4%. Die regionalen Anteile entsprechen jeweils dem des Basisszenarios.

Tab. IV,2 Nachfrage nach Primäraluminium 1980, 1995 und 2010 (Zahlen zum Basisszenario)

Regionen	Nachfrage nach Primäraluminium (in Mio. t)			Durchschnittliches jährliches Wachstum (in %)	
	1980	1995	2010	1980-95	1995-2010
USA	4,5	5,1	6,3	0,8	1,5
Kanada	0,3	0,6	0,7	4,8	1,0
Brasilien	0,3	0,5	0,6	3,8	1,5
Rest v. Lateinamerika	0,3	0,4	0,6	1,1	2,5
Deutschland	1,3	1,5	1,8	1,1	1,0
Rest der EU	2,4	3,4	4,2	2,2	1,5
Rest von Westeuropa	0,4	0,4	0,6	0,3	2,0
Frühere Sowjetunion	1,9	0,5	0,7	-8,0	2,0
Rest von Osteuropa	0,6	0,3	0,5	-5,2	3,0
Afrika	0,2	0,3	0,4	2,4	3,5
Vord./Mittl. Osten	0,2	0,5	0,7	7,1	2,5
Indien	0,2	0,6	1,0	6,1	3,5
China	0,6	1,9	3,1	8,5	3,5
Rest von Asien	2,0	4,1	5,5	5,0	2,0
Australien	0,2	0,4	0,5	3,1	1,5
Welt	15,3	20,2	26,7	1,9	1,9

(Kuckshinrichs, 1998)

2.2 Nichtmetallurgische Nachfrage nach Bauxit und Tonerde

Die metallurgische Nachfrage nach Bauxit und Tonerde ist in GlobAl endogenisiert. Sie leitet sich aus der vorgegebenen Nachfrage nach Primäraluminium ab. Die nichtmetallurgische Nachfrage nach Bauxit und Tonerde hingegen ist ein exogener Modellparameter.

Werden Bauxit und Tonerde nicht als Rohstoff zur Metallgewinnung eingesetzt, dann finden sie in der Feuerfest-, Schleifmittel-, Chemie- und Zementindustrie Verwendung (Abb. IV,1). Im Jahr 1996 wurden 96% des geförderten Bauxits metallurgisch, d. h. zur Herstellung von Tonerde, genutzt. Von der produzierten Tonerde wiederum wurden 90% zur Produktion von Primäraluminium verwendet (vgl. King, 1998a). Die jeweiligen Anteile der nichtmetallurgischen Verwendung von Bauxit und Tonerde werden von 1995 bis 2010 konstant gehalten. Es wird unterstellt, daß die Nachfrage nach Primäraluminium und die nichtmetallurgische Nachfrage nach Bauxit und Tonerde jeweils in gleichem Ausmaß expandieren. Die regionale Verteilung der nichtmetallurgischen Nachfragen wird der nach Primäraluminium gleichgesetzt.

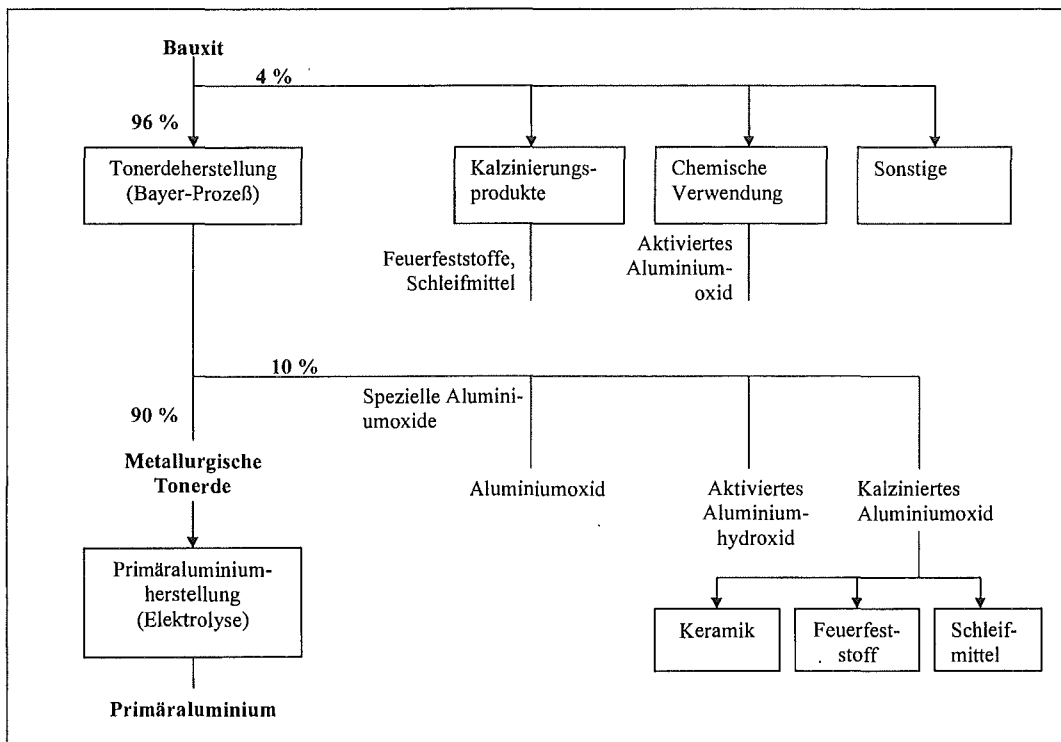


Abb. IV,1 Einsatzbereiche von Bauxit und Tonerde
(in Anlehnung an BGR, 1997, King, 1998a)

3. Kapazitätsgrenzen

Die Kapazitätsgrenzen für die Produktionen in den Regionen gehen als Nebenbedingung in den mathematischen Algorithmus ein. Die konkrete Ausgestaltung der Kapazitätsbeschränkungen unterscheidet sich je nach Produktionsstufe und Investitionsstrategie. Für den Bergbau sind in diesem Zusammenhang die Ausgangskapazitäten und der exogene Zubaufaktor zu bestimmen. Für die Tonerdefabrikation und die Gewinnung von Primäraluminium sind jeweils die Ausgangskapazitäten, der exogene Zubaufaktor für die Brownfield Expansion und die Bounds für die Neuanlagen festzulegen.

3.1 Bergbau

Die Ausgangskapazitäten beziehen sich für alle Produktionsstufen auf das Basisjahr 1995. Die Ausgangskapazitäten für den Bergbau bestimmen das maximale Produktionspotential für einen gegebenen Bauxittyp in einer Region, das im Stützjahr 2010 verfügbar ist, ohne daß Investitionen vorgenommen werden müssen. Der exogene Zubaufaktor gibt die maximale Erweiterung der Produktion eines Bauxittyps in einer Region ausgehend von dessen Ausgangskapazität an, die über zusätzliche Investitionen bis zum Stützjahr realisiert werden kann.

3.1.1 Ausgangskapazitäten

Der Bergbau in den einzelnen Regionen wird nach den Bauxittypen differenziert. Die 18 Bauxittypen systematisieren die wichtigsten mineralogischen und chemischen Unterschiede der Bauxite mit Blick auf den Faktorbedarf in der Tonerdefabrikation. Nach der mineralogischen Zusammensetzung wird zwischen mono- und trihydratischen Bauxiten unterschieden. Entsprechend dem Aluminiumoxidgehalt werden die Bauxite in hoch-, mittel-, und geringwertige Bauxite eingeteilt. Bei hochwertigen Bauxiten können aus kleiner/gleich 2,3 metrischen Tonnen Bauxit eine metrische Tonne Aluminiumoxid gewonnen werden. Bei mittelwertigen Bauxiten liegt der Wert zwischen 2,3 und 3,0 und bei geringwertigen bei größer 3,0. Nach dem chemischen Verlust an Natronlauge beim Aufschluß wird nach erst-, zweit- und drittklassigen Bauxiten differenziert. Der chemische Verlust hängt vom Verhältnis des Gehalts an reaktivem Siliziumoxid zum Gehalt an Aluminiumoxid und (zu einem kleinen Anteil) vom eingesetzten Verfahren ab. Erstklassig ist der Bauxit, wenn der errechnete chemische Verlust an Natronlauge bei Niedrigtemperaturautoklaven kleiner/gleich 49,5 Kilogramm Natronlauge je Tonne Aluminiumoxid ist. Zweitklassig ist der Bauxit bei Werten zwischen 49,5

und 82,5, drittklassig bei Werten größer 82,5 Kilogramm Natronlauge je Tonne Aluminiumoxid.

Um die Ausgangskapazitäten abzuschätzen, werden zunächst die Bauxite in den Lagerstätten der einzelnen Regionen den einzelnen Bauxittypen zugeordnet (Tab. IV,3). Dann werden die Lagerstätten und Kapazitäten gleicher Bauxittypen für jede Region zusammengefaßt. Bei Minen, die sowohl mono- wie trihydratische Bauxite fördern (z. B. Boké, Weipa, Gove), wird die Kapazität je zur Hälfte als mono- bzw. trihydratisch klassifiziert. Tab. IV,4 zeigt die Kapazität zur Produktion der einzelnen Bauxittypen in den Regionen in 1995.

Die dominierenden Bauxitproduzenten waren Australien, Mittel- und Südamerika sowie Afrika. In Australien werden zu einem guten Teil geringwertige, erstklassige, trihydratische Bauxite abgebaut. In Mittel- und Südamerika werden trihydratische, zumeist mittel- bis geringwertige Bauxite gewonnen, meist mit geringem bis mittlerem zugeordneten chemischen Verlust beim Aufschluß. In Afrika werden qualitativ besonders anspruchsvolle Bauxite gefördert. Es dominieren hochwertige, erstklassige, tri- bzw. monohydratische Bauxite.

Tab. IV,3 Lagerstätten und Bauxittypen

Land	Bauxitlagerstätte	Al ₂ O ₃ -gehalt	Chem. Verlust Natronlauge bei Aufschluß	Mineralogische Zuordnung
Australien	Weipa	Hochwertig	Zweitklassig	Mixed
	Gove	Mittelwertig	Zweitklassig	Mixed
	Del Park, Jarrahdale, Willowdale	Geringwertig	Erstklassig	Trihydratisch
Guinea	Boké, Sangaredi, Bidi-Koum	Hochwertig	Erstklassig	Mixed
	Fria	Mittelwertig	Erstklassig	Trihydratisch
Brasilien	Trombetas	Mittelwertig	Zweitklassig	Trihydratisch
	Pocos de Caldas	Mittelwertig	Zweitklassig	Trihydratisch
	Ouro Preto	Geringwertig	Erstklassig	Trihydratisch
	Cataguazes	Geringwertig	Zweitklassig	Trihydratisch
Jamaika	Nain, Mocho	Geringwertig	Erstklassig	Trihydratisch
	S'illenburg, Kirkvine, Disc. Bay	Mittelwertig	Erstklassig	Trihydratisch
Guyana	Kwakwani	Hochwertig	Zweitklassig	Trihydratisch
Surinam	Onverdacht, Moengo	Mittelwertig	Zweitklassig	Trihydratisch
Venezuela	Los Pijiguaos	Mittelwertig	Erstklassig	Trihydratisch
Griechenland	Distomon, Parnassus	Hochwertig	Zweitklassig	Monohydratisch
Osteuropa		Mittelwertig	Zweitklassig	Trihydratisch
Indien	Chandgad, Panchapatmali	Geringwertig	Erstklassig	Trihydratisch
	Bihar, Madhya Pradesh	Mittelwertig	Zweitklassig	Trihydratisch
	Lohardga	Mittelwertig	Drittklassig	Trihydratisch
China	Guiyang, Henan, Showgan, Shanxi	Hochwertig	Drittklassig	Monohydratisch
	Guangxi	Mittelwertig	Drittklassig	Monohydratisch
Frühere Sowjetunion	Krasno-Oktyabrski, Rodninsk	Mittelwertig	Drittklassig	Monohydratisch
	Severovouralsk, Yuzhnouralski	Mittelwertig	Zweitklassig	Monohydratisch
Indonesien	Bintan	Mittelwertig	Drittklassig	Trihydratisch
Türkei	Milas, Seydisehr	Hochwertig	Drittklassig	Trihydratisch

(Eigene Zuordnung; Grundlage: Brown et al., 1983, BGR, 1997, CRU, 1996)

Tab. IV,4 Kapazität zur Produktion der einzelnen Bauxittypen in den Regionen 1995

Region	Bauxittyp			Kapazität (in Mio. tpy)
	Al ₂ O ₃ -gehalt	Chemischer Verlust Natron- lauge bei Auf- schluß	Mineralogische Zuordnung	
Brasilien	Mittelwertig Geringwertig Geringwertig	Zweitklassig Erstklassig Zweitklassig	Trihydratisch Trihydratisch Trihydratisch	10,0 0,3 0,8 (Gesamt: 11,1)
Rest von Latein- amerika	Hochwertig Mittelwertig Mittelwertig Geringwertig	Zweitklassig Zweitklassig Erstklassig Erstklassig	Trihydratisch Trihydratisch Trihydratisch Trihydratisch	2,5 4,5 12,0 7,3 (Gesamt: 26,3)
Rest der EU	Hochwertig	Zweitklassig	Monohydratisch	2,5
Rest von Osteu- ropa	Mittelwertig	Zweitklassig	Trihydratisch	7,3
Frühere Sowjet- union	Mittelwertig Mittelwertig	Zweitklassig Drittklassig	Monohydratisch Monohydratisch	4,1 3,9 (Gesamt: 8,0)
Afrika	Hochwertig Hochwertig Mittelwertig	Erstklassig Erstklassig Erstklassig	Monohydratisch Trihydratisch Trihydratisch	8,4 8,4 2,6 (Gesamt: 19,3)
Naher und Mitt- lerer Osten	Hochwertig	Drittklassig	Trihydratisch	0,8
Indien	Mittelwertig Mittelwertig Geringwertig	Zweitklassig Drittklassig Erstklassig	Trihydratisch Trihydratisch Trihydratisch	0,9 0,1 4,1 (Gesamt: 5,2)
China	Hochwertig Mittelwertig	Drittklassig Drittklassig	Monohydratisch Monohydratisch	5,3 1,2 (Gesamt: 6,5)
Rest von Asien	Mittelwertig	Drittklassig	Trihydratisch	2,2
Australien	Hochwertig Hochwertig Mittelwertig Mittelwertig Geringwertig	Zweitklassig Zweitklassig Zweitklassig Zweitklassig Erstklassig	Monohydratisch Trihydratisch Monohydratisch Trihydratisch Trihydratisch	4,3 4,3 2,8 2,8 32,9 (Gesamt: 47,1)

(Eigene Zuordnung und Berechnung auf Basis von Weltbank, 1994, Roullier, 1995, CRU, 1996, Metallstatistik)

3.1.2 Zubaufaktor für den Bergbau

Die Weltbank (1994) gibt in ihrer Studie Zahlen zur erwarteten Kapazitätsentwicklung in der Bauxitgewinnung auf Länderebene für den Zeitraum 1995 bis 2005 an. Basis sind geplante Projekte in den betreffenden Staaten. Erhebliche Zubauraten ergeben sich demnach für den Rest der Europäischen Union, den Nahen und Mittleren Osten und den Rest von Asien (Tab. IV,5). Um dem Modell einen genügend großen Freiheitsgrad zu lassen, wird für jede Region grundsätzlich eine Kapazitätserweiterung um 30% zugelassen. Bei Regionen, für die nach der Weltbankstudie eine Kapazitätserweiterung zu erwarten ist, wird zu dieser Festgröße die erwartete Zubaurate addiert. Der Zubaufaktor von 0,6 für Brasilien bedeutet dann, daß die vorhandene Kapazität zur Produktion der einzelnen Bauxittypen jeweils um maximal 60% ausgedehnt werden kann.

Tab. IV,5 Kapazität zur Produktion von Bauxit 1995 und erwarteter Zubau 1995-2005

Regionen	Kapazität 1995		Erwarteter Zubau 95-05		Zubau- faktor
	(Mio. tpy)	Ungenutzt (%)	(Mio. tpy)	(%)	
Brasilien	11,1	9	+2,9	+26	0,6
Rest v. Lateinamerika	27,4	19	+1,2	+4	0,3
Rest der EU	2,5	14	+3,0	+120	1,5
Frühere Sowjetunion	8,0	31	+0,0	+0	0,3
Rest von Osteuropa	7,3	421	+0,0	+0	0,3
Afrika	19,5	31	+2,6	+13	0,4
Naher/Mittlerer Osten	0,8	60	+0,3	+38	0,7
Indien	5,0	0	+1,5	+30	0,6
China	6,3	0	+1,2	+19	0,5
Rest von Asien	2,2	100	+0,6	+27	0,6
Australien	47,0	10	+6,0	+13	0,4
Gesamt	137,1	21	+19,3	+14,1	

(Weltbank, 1994)

3.2 Tonerdefabrikation

3.2.1 Ausgangskapazitäten

GlobAl differenziert mit Blick auf die Herstellung von Tonerde sechs Techniken: Nieder- bzw. Hochtemperaturaufkochen sowie Rohrreaktor jeweils in Kombination mit Drehrohr bzw. Wirbelschicht. Tab. IV,6 zeigt die Kapazität der unterschiedlichen Techniken in den Regionen für das Jahr 1995. Weltweit dominierte beim Aufschluß die Autoklaven-Technik. Nur knapp 2% der weltweiten Kapazitäten machte die Rohrreaktor-Technik aus. Nieder- und Hochtemperaturaufkochen hielten sich mit 49 bzw. 50% der weltweiten Kapazitäten in etwa die Waage. Die Wirbelschicht-Technik hat den Drehrohrföhrer bei der Kalzination weitgehend verdrängt. Nur noch 26% der weltweiten Kapazität fußten im Jahr 1995 auf dem Drehrohrföhrer. Regional fand sich die Kapazität zur Herstellung von Tonerde 1995 insbesondere in Australien und in Mittel- und Südamerika. Daneben spielten die USA, Westeuropa und die Frühere Sowjetunion eine Rolle. In Australien, in Mittel- und Südamerika wurden vorwiegend Niedertempaturaufkochen mit Wirbelschicht eingesetzt. Die heimischen Bauxite, die verarbeitet werden, sind ausnahmslos trihydratisch. Deshalb bot sich die energetisch günstigere Niedertempaturaufkochen-Technik an. In den USA und Westeuropa fanden sich zumeist Anlagen mit Hochtemperaturaufkochen und Wirbelschicht. Die Dominanz der Hochtemperaturaufkochen erklärt sich einmal historisch. So waren die genutzten, heimischen Bauxite zumeist monohydratisch. Zum anderen verleihen die Hochtemperaturaufkochen eine größere Flexibilität. Die zunehmende Abhängigkeit von Bauxitlieferungen aus dem Ausland ließ eine solche notwendig erscheinen. Die Rohrreaktor-Technik wird bisher einzig in Deutschland und Osteuropa (Ungarn) angewendet. Allerdings wird erwartet, daß die energetisch äußerst günstige Technik zukünftig verstärkt eingesetzt wird (vgl. Solymár, 1998).

Tab. IV,6 Kapazität zur Produktion von Tonerde nach Techniken in den Regionen 1995
(Mio. tpy)

Region	Niedertempera- turautoklav		Hochtempera- turautoklav		Rohrreaktor		Gesamt
	RK ¹	FB ²	RK ¹	FB ²	RK ¹	FB ²	
USA	0,6	-	1,1	3,6	-	-	5,3
Kanada	-	-	1,2	-	-	-	1,2
Brasilien	-	3,0	-	-	-	-	3,0
Rest v. Lateinam.	1,1	4,5	-	1,5	-	-	7,0
Deutschland	-	-	-	-	-	0,8	0,8
Rest der EU	-	-	0,6	4,0	-	-	4,6
Rest v. Westeuropa	-	-	-	-	-	-	-
Früh. Sowjetunion	2,7	-	-	1,3	-	-	4,0
Rest von Osteuropa	-	-	0,6	0,6	-	0,1	1,2
Afrika	0,7	-	-	-	-	-	0,7
Naher/Mittl. Osten	-	-	0,2	-	-	-	0,2
Indien	-	-	0,3	1,4	-	-	1,6
China	-	-	2,5	-	-	-	2,5
Rest von Asien	-	-	0,4	0,5	-	-	0,9
Australien	-	10,1	-	3,3	-	-	13,4
Gesamt Mio. tpy	5,1	17,5	6,8	16,1	0,0	0,9	46,4
(vH)	(11)	(38)	(15)	(35)	(0)	(2)	(100)

1) RK = Drehrohrföfen (Rotary Kiln); 2) FB = Wirbelschichtverfahren (Fluidized Bed)

(Eigene Berechnungen nach CRU, 1996, BGR, 1997, Pawlek, 1998a, Metallstatistik)

3.2.2 Zubaufaktor für Brownfield Expansion

GlobAl läßt zu, daß die bestehenden Anlagen zur Tonerdefabrikation erweitert werden. Der Zubaufaktor für Brownfield Expansion beschreibt den maximal möglichen Zubau bis zum Stützjahr ausgehend von der Ausgangskapazität der einzelnen Techniken in den Regionen. Die Bestimmung des Zubaufaktors erfolgt mit Blick auf die Kapazitätserweiterungen bestehender Anlagen, die aktuell durchgeführt werden, und solcher, die geplant sind (Tab. IV,7). Die Kapazitätserweiterung an sich erfordert 2, vielleicht 3 Jahre. Die gesamte Abwicklung eines Projekts von der ersten Planung bis zum Produktionsbeginn kann allerdings bis zu 10 Jahre in Anspruch nehmen. Zwar ist noch nicht alles, was bis 2010 zugebaut werden soll, heute projektiert, aber sicher ein guter Teil. Umgekehrt wird nicht alles, was projektiert ist, auch tatsächlich gebaut.

Eine Kapazitätserweiterung bestehender Anlagen erfolgte in der Zeit von 1996 bis 1998 einzig in Australien und Indien. Die Erweiterung um 0,79 Million Tonnen Kapazität in Australien macht 6% von dessen Ausgangskapazität aus. Die Ausweitung um 0,75 Millionen Tonnen in Indien entspricht einem mehr an Kapazität von 46%. Eine relativ zur Ausgangskapazität große Erweiterung der Kapazität ist besonders in Afrika mit 75% geplant. Wird die bisher tatsächlich realisierte Ausweitung und die geplante Ausweitung aufsummiert, dann kommt Indien auf 64% und Australien auf 25% Kapazitätszuwachs. Ein Zubaufaktor von 0,4 erscheint wegen des deutlich geringeren aktuellen und geplanten Zubaus in den anderen Regionen als ausreichend. Dem Modell wird damit ein genügend großer Freiheitsgrad zur Erweiterung der Altanlagen gegeben.

Tab. IV,7 Kapazitätserweiterung bestehender Anlagen zur Tonerdefabrikation im Bau bzw. geplant

Regionen	Erweiterung im Bau 1996-98		Geplante Erweiterung 1997/98	
	Mio. tpy	% Kapazität 1995	Mio. tpy	% Kapazität 1995
USA	-	-	-	-
Kanada	-	-	0,2	15
Brasilien	-	-	-	-
Rest v. Lateinamerika	-	-	1,6	22
Deutschland	-	-	-	-
Rest der EU	-	-	0,4	8
Rest von Westeuropa	-	-	-	-
Frühere Sowjetunion	-	-	0,3	7
Rest von Osteuropa	-	-	0,2	17
Afrika	-	-	0,5	75
Naher/Mittlerer Osten	-	-	-	-
Indien	0,8	46	0,3	18
China	-	-	-	-
Rest von Asien	-	-	-	-
Australien	0,8	6	2,5	19
Gesamt	1,5	3	5,9	13

(Eigene Berechnungen auf Basis von Pawlek, 1998a, c, d)

3.2.3 Bounds für Neuanlagen

Die Bounds für die Neuanlagen werden für die einzelnen Regionen aus der Summe dreier Größen entwickelt. Die eine Größe ist der realisierte Zubau in einer Region. Neue Tonerdefabriken werden von 1996 an im Rest der Europäischen Union (Griechenland), im Nahen und Mittleren Osten (Iran) und in Indien gebaut (Tab. IV,8). Die zweite Größe ist der geplante Bau neuer Anlagen. Geplant sind neue Werke insbesondere in Indien, China, Rest von Asien (Indonesien, Süd-Korea), Rest von Lateinamerika (Jamaika, Venezuela) und Australien. Die dritte Größe ist für alle Regionen gleich und soll dem Modell einen entsprechenden Freiheitsgrad geben. So wird zusätzlich der Zubau einer neuen Tonerdefabrik mit einer Kapazität von 0,7 Millionen Tonnen in allen Regionen zugelassen.

Tab. IV,8 Kapazität neuer Anlagen zur Tonerdefabrikation im Bau bzw. geplant (in Mio. tpy)

Regionen	Kapazität im Bau 1996-98	Geplante Kapazität 1997/98	Kapazitätsgrenze im Modell
USA	-	-	0,7
Kanada	-	-	0,7
Brasilien	-	0,2	0,9
Rest v. Lateinamerika	-	1,0	1,7
Deutschland	-	-	0,7
Rest der EU	0,8	-	1,50
Rest von Westeuropa	-	-	0,7
Frühere Sowjetunion	-	-	0,7
Rest von Osteuropa	-	-	0,7
Afrika	-	-	0,7
Naher/Mittlerer Osten	0,3	-	1,0
Indien	1,0	3,0	4,7
China	-	1,4	2,1
Rest von Asien	-	1,1	1,8
Australien	-	1,0	1,7
Gesamt	2,0	6,3	18,9

(Eigene Berechnungen auf Basis von Pawlek, 1998a, c, d)

3.3 Primäraluminiumverhüttung

3.3.1 Ausgangskapazitäten

Im Modell werden vier Techniken der Gewinnung von Primäraluminium unterschieden: VSS&HSS, CWPB, SWPB und PFPB. Tab. IV,9 weist die Kapazitäten der Techniken in den Regionen für das Jahr 1995 nach. Die Söderberg-Technik hatte einen Anteil von 32% an der weltweiten Kapazität, die Techniken mit den vorgebrannten Anoden 67%. Von diesen dominierte PFPB mit 40% Anteil an der weltweiten Kapazität. Regional standen die USA, die Frühere Sowjetunion, Kanada und Westeuropa im Vordergrund. In den USA, in Kanada und Westeuropa wurden 1995 vorwiegend Techniken mit vorgebrannten Anoden angewendet, in der Früheren Sowjetunion hingegen in erster Linie die energetisch ungünstigere Söderberg-Technik. Diese hatte auch in China größere Bedeutung. Bereits in der Vergangenheit hat das PFPB-Verfahren die anderen zunehmend verdrängt. Die seit Ende der achtziger Jahren erstellten Primäraluminiumhütten wenden unabhängig von der Region fast ausnahmslos die PFPB-Technik an. Auch Up-Grading und Brownfield Expansion erfolgen weitgehend mit PFPB.

Tab. IV,9 Kapazität zur Produktion von Primäraluminium nach Techniken in den Regionen 1995 (Mio. tpy)

Regionen	VSS&HSS	CWPB	SWPB	PFPB	Gesamt
USA	0,8	1,1	0,5	1,6	4,0
Kanada	0,7	-	0,2	1,4	2,3
Brasilien	0,4	-	-	0,8	1,2
Rest v. Lateinamerika	0,1	-	-	0,9	1,0
Deutschland	-	0,4	0,1	0,2	0,6
Rest der EU	0,3	0,1	0,6	0,8	1,8
Rest von Westeuropa	0,4	-	0,1	0,6	1,1
Frühere Sowjetunion	3,0	-	0,5	-	3,5
Rest von Osteuropa	0,1	-	0,4	-	0,5
Afrika	0,3	0,6	0,2	-	1,1
Naher/Mittlerer Osten	0,1	0,1	-	-	1,0
Indien	0,3	0,0	-	0,4	0,6
China	0,9	0,4	0,3	0,3	1,9
Rest von Asien	-	0,2	-	-	0,3
Australien	-	0,4	-	1,3	1,7
Gesamt Mio. tpy	7,3	3,4	2,7	9,1	22,4
(vH)	(32)	(15)	(12)	(40)	(100)

(Eigene Berechnungen nach CRU, 1996, BGR, 1997, Metallstatistik)

3.3.2 Zubaufaktor für Brownfield Expansion

Die Bestimmung des Zubaufaktors für Brownfield Expansion im Bereich Primäraluminiumherstellung erfolgt analog der Bestimmung für den Tonerdebereich. Im Blickpunkt stehen die Kapazitätserweiterungen bestehender Anlagen, die seit 1996 durchgeführt werden, und solcher, die in der Planungsphase sind (Tab. IV,10). Die Erweiterung bestehender Anlagen ist im Gegensatz zur Tonerdestufe in vielen Regionen im Gange. Relativ zur Ausgangskapazität erfolgt der Zubau insbesondere in Australien, im Nahen und Mittleren Osten (Iran, Bahrain, Vereinigte Arabische Emirate) und im Rest von Westeuropa (Island, Norwegen). Geplant ist eine große Kapazitätserweiterung in Indien mit einem Zuwachs von 48%. Ansonsten ist die Summe aus erfolgter und geplanter Erweiterung bezogen auf die Ausgangskapazität kleiner/gleich 30%, in der Regel sogar kleiner/gleich 20%. Daher erscheint ein Zubaufaktor von 0,2 dem Modell genügend Freiheitsgrad zu lassen.

Tab. IV,10 Kapazitätserweiterung bestehender Anlagen zur Produktion von Primäraluminium im Bau bzw. geplant

Regionen	Erweiterung im Bau 1996-97		Geplante Erweiterung 1997	
	Mio. tpy	% Kapazität 1995	Mio. tpy	% Kapazität 1995
USA	0,04	1	0,05	1
Kanada	-	0	-	0
Brasilien	-	0	0,03	3
Rest v. Lateinamerika	0,07	7	-	0
Deutschland	0,01	1	0,05	8
Rest der EU	0,00	0	-	0
Rest von Westeuropa	0,13	12	0,14	13
Frühere Sowjetunion	-	0	-	0
Rest von Osteuropa	-	0	-	0
Afrika	0,06	5	0,12	11
Naher/Mittlerer Osten	0,12	12	0,18	18
Indien	-	0	0,31	48
China	0,10	5	-	0
Rest von Asien	-	0	-	0
Australien	0,26	15	0,02	1
Gesamt	0,77	3	0,89	4

(Eigene Berechnungen auf Basis von Pawlek, 1998b)

3.3.3 Bounds für Neuanlagen

Analog der Vorgehensweise für die Tonerdestufe werden die Bounds für die Neuanlagen als Summe aus realisierter und geplanter Kapazitätserweiterung und einer Festgröße festgelegt. Im Nahen und Mittleren Osten (Iran), in Afrika (Nigeria) und im Rest von Westeuropa (Island) waren im Zeitraum 1996 bis 1997 neue Hütten im Bau (Tab. IV,11). Geplant sind neue Fabriken insbesondere in Kanada, in Australien, im Rest von Westeuropa (Island), im Nahen und Mittleren Osten (Kuwait, Oman), im Rest von Lateinamerika (Chile, Trinidad&Tobago), in Indien, Afrika (Mozambique) und in der Früheren Sowjetunion. Um dem Modell einen genügend großen Freiheitsgrad zu geben, wird für alle Regionen zusätzlich der Zubau einer neuen Primäraluminiumhütte mit einer Kapazität von 0,25 Millionen Tonnen zugelassen.

Tab. IV,11 Kapazität neuer Anlagen zur Produktion von Primäraluminium im Bau bzw. geplant (in Mio. tpy)

Regionen	Kapazität im Bau 1996-97	Geplante Kapazität 1997	Kapazitätsgrenze im Modell
USA	-	-	0,25
Kanada	-	0,50	0,75
Brasilien	-	-	0,25
Rest v. Lateinamerika	-	0,63	0,88
Deutschland	-	-	0,25
Rest der EU	-	-	0,25
Rest von Westeuropa	0,06	0,21	0,52
Frühere Sowjetunion	-	0,20	0,45
Rest von Osteuropa	-	-	0,25
Afrika	0,19	0,25	0,69
Naher/Mittlerer Osten	0,22	0,71	1,18
Indien	-	0,33	0,58
China	-	0,20	0,45
Rest von Asien	-	0,12	0,37
Australien	-	0,50	0,75
Gesamt	0,47	3,65	7,87

(Eigene Berechnungen auf Basis von Pawlek, 1998b, MITSUI, 1999)

4. Leistungsparameter, Input-Preise und Betriebskosten

Der Koeffizient der gesamten Betriebskosten eines Produktionsprozesses ist ein wesentlicher Parameter für die Zielfunktion des mathematischen Algorithmus. Er entspricht der Summe der Koeffizienten der Betriebskosten der einzelnen Inputs eines Produktionsprozesses. Diese wiederum zerfallen in die Leistungsparameter der Inputs und die zugehörigen Input-Preise.

4.1 Leistungsparameter

4.1.1 *Bergbau*

Bauxit wird in der Regel im Tagebau gewonnen. Der Bergbau zerfällt dabei in eine Reihe typischer Teilprozesse. Zunächst wird die Oberfläche beräumt, d. h. die Vegetation wird entfernt. Der Regelbetrieb des Tagebaus beginnt dann mit der Entfernung des Oberbodens und des Abraums. Die Gewinnung des Minerals geschieht in drei Arbeitsschritten: dem Lösen der Massen, dem Laden der gelösten Massen und dem Fördern der Massen zur Aufbereitung. In der Aufbereitung wird der Bauxit gebrochen und sortiert, die Tonfraktion wird in der Wäsche abgetrennt, die angereicherten Aluminiumoxide abgeschieden, und zumeist getrocknet. Der Betriebsphase schließt sich eine Auslaufphase an, in der die genutzten Flächen rekultiviert werden (Abb. IV,2).

Die Teilprozesse des Bergbaus von der Oberflächenberäumung bis zur Rekultivierung erfordern den Input von Faktoren. Im Modell werden mit Blick auf den Bergbau drei Faktoren explizit unterschieden: Diesel, Elektrizität und Arbeit. Die anderen für den Betrieb notwendigen Faktoren und Kosten (insbesondere Sprengstoff, Wasser, Steuern, Bauxitabgaben) werden in der Kategorie sonstige Betriebskosten zusammengefaßt. Die jeweiligen Faktorverbräuche hängen stark von der spezifischen Charakteristik der Lagerstätte ab. Dabei spielen Erz- und Deckgebirgsmächtigkeit sowie die Lagerstättenausprägung eine entscheidende Rolle (siehe Tab. IV,12). Daneben haben Art und Umfang der eingesetzten Maschinen Einfluß auf die Faktorverbräuche.

Daten zu den Leistungsparametern der betrachteten Inputs liegen nur für hochaggregierte Regionen vor, nicht aber für einzelne Minen. Um deren Kostensituation besser abschätzen zu können, werden deshalb die sonstigen Betriebskosten als Residualgröße verstanden. Sie werden errechnet, indem von den Preisen der Bauxite aus den jeweiligen Minen nach CRU (1996) die bekannten Kosten abgezogen werden. Die sonstigen Betriebskosten umfassen damit alle Kosten außer denen für Diesel, Elektrizität, Arbeit und Kapital.

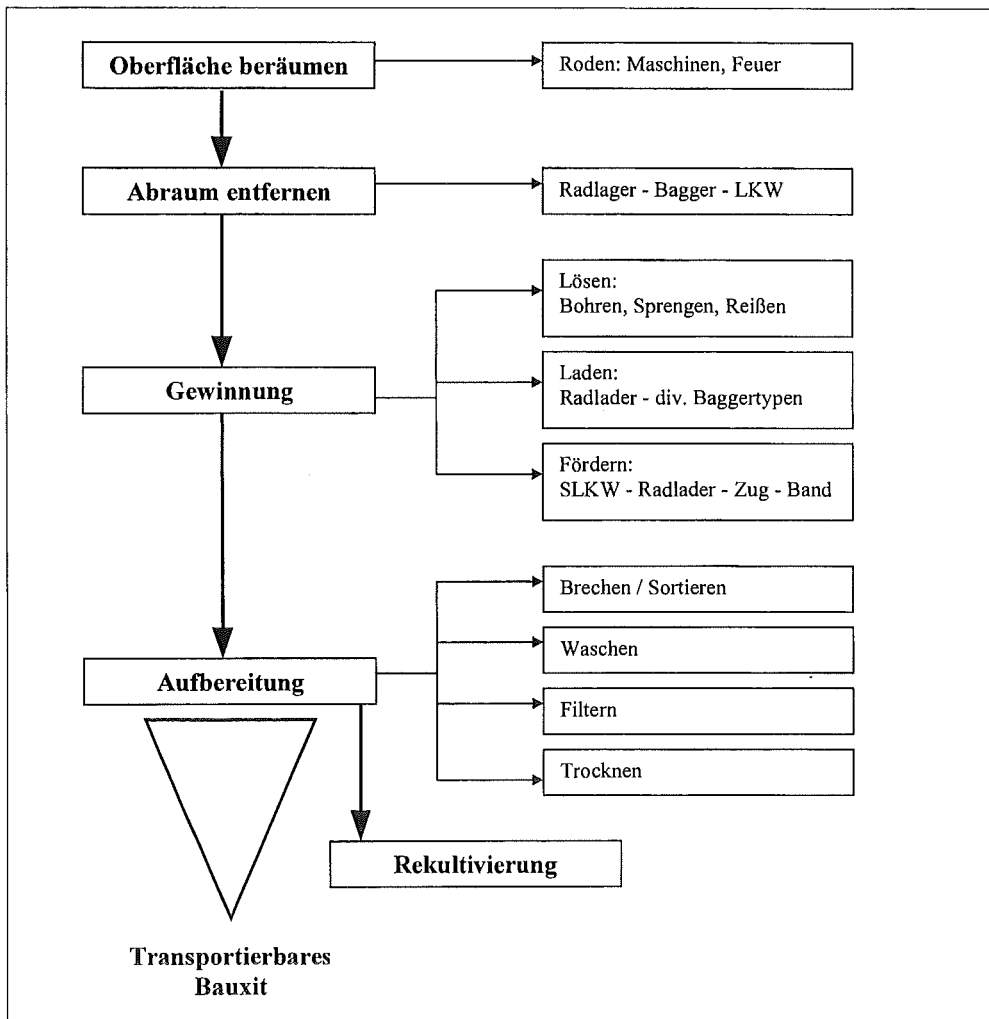


Abb. IV,2 Schematische Prozeßkette des Bergbaus

Nach den vorliegenden Zahlen werden 1995 weltdurchschnittlich 0,2 GJ Diesel, 6 kWh Strom und 0,8 Arbeitsstunden pro Tonne Bauxit aufgewendet. Die Unterschiede in den Regionen sind allerdings erheblich (Tab. IV,13). Für die Residualgröße sonstige Betriebskosten ergibt sich rechnerisch ein Weltdurchschnitt von 7 USD¹⁹⁹⁵ pro Tonne Bauxit. Die Spanne für die Produktion der einzelnen Bauxittypen in den Regionen liegt zwischen 0 bis 23 USD¹⁹⁹⁵ pro Tonne Bauxit. Es wird davon ausgegangen, daß es gelingt, die spezifischen Inputs beim Bergbau um knapp 1,5% pro Jahr zu senken. Im Jahr 2010 haben dann die Leistungsparameter nur mehr 80% ihres Wertes von 1995.

Tab. IV,12 Reserven, Erz- und Deckgebirgsmächtigkeit sowie Lagerstättenausprägung einzelner Lagerstätten

Bauxitlagerstätten	Reserven (in Mio. t)	Durchschnittl. Erzmächtigkeit (in m)	Durchschnittl. Deckschicht- mächtigkeit (in m)	Lagerstätten- ausprägung
Australien				
Weipa	230 sicher + wahrscheinlich	2,4	0,8	Flächenhaft
Gove	150	3,5	0,8	Flächenhaft
Afrika				
Boké	500	7	2	Flächenhaft
Brasilien				
Trombetas	780 sicher	6	8	Flächenhaft
Venezuela				
Los Pijiguaos	177 sicher + 500 wahrsch.	5	0,5	Flächenhaft
Guyana				
Linden/Berbice	500 sicher und wahrscheinlich	3 - 10	20 - 60	Flächenhaft
Jamaika				
Dry Harbour Mountain	110 sicher	8	0,3	Taschenartig

(BGR, 1997, IML, 1999)

Tab. IV,13 Leistungsparameter des Bauxitbergbaus 1995 - Weltdurchschnitt und Spanne in den Regionen (in Klammern)

Diesel (GJ / t) ^a	0,2 (0,14 - 0,21)
Elektrizität (MWh / t) ^a	0,006 (0,001 - 0,006)
Arbeitsinput (h / t) ^b	0,8 (0,1 - 5,0)
Sonstige Betriebskosten (USD ¹⁹⁹⁵ / t) ^c	7 (0 - 23)

(a: BGR, 1997, b: Eigene Berechnungen aus Roullier, 1995, Coulibaly, 1997, Australian Bureau of Statistics, 1998, Ministry of Mining (Jamaica), 1998, c: Rückrechnung aus den Bauxitpreisen der einzelnen Minen nach CRU, 1996 minus den bekannten Kosten)

4.1.2 Tonerdefabrikation

Der ganz überwiegende Teil der weltweit produzierten Tonerde (etwa 98%) wird mit dem Bayer-Verfahren gewonnen. Grob läßt sich das Bayer-Verfahren in den Aufschluß und in die Kalzination einteilen. Allerdings zerfällt der Aufschluß wiederum in eine ganze Reihe von Teilprozessschritten vom Mahlen des Bauxits bis hin zum Filtrieren des Aluminiumhydroxids (Abb. IV,3).

Die Tonerdefabrikation beginnt mit dem Mahlen des gelieferten Bauxits. Die Naßmahlung mit Natronlauge in Rohrmöhlen hat sich infolge einfacherer Apparaturen und eines geringeren Energiebedarfs gegenüber der Trockenmahlung durchgesetzt. Der Aufschluß im engeren Sinn erfolgt kontinuierlich in Autoklavenkaskaden oder im Rohrreaktor bei Temperaturen zwischen 120 und 300°C und Drücken zwischen 40 und 220 bar. Das Aluminiumoxid geht dabei als Natriumaluminat in Lösung. Beim Autoklav erfolgt der Aufschluß in einem Rührkessel, beim Rohrreaktor in einer Rohrschlinge. Der Niedertemperaturautoklav arbeitet mit Temperaturen zwischen 135 bis 150°C. Er ist energetisch günstiger als der Hochtemperaturautoklav, der mit Temperaturen von mehr als 200°C arbeitet. Allerdings lassen sich mit dem Niedertemperaturautoklav nur trihydratische Bauxite wirtschaftlich aufschließen, während der Hochtemperaturautoklav auch den Aufschluß monohydratischer Bauxite zuläßt. Diaspor erfordert so Aufschlußtemperaturen von fast 300°C. Durch den Zusatz von Kalk kann die technische Aufschlußtemperatur gesenkt werden. Auch mit dem Rohrreaktor können tri- und monohydratische Bauxite aufgeschlossen werden. Er bietet eine größere Reaktionsfläche und kann mit einer geringeren Laugenkonzentration arbeiten. Er ist die energetisch günstigste Technik und kommt mit vergleichsweise wenig Natronlauge aus.

Nach dem Aufschluß wird die die Autoklaven oder das Rohr verlassende hochgespannte Lauge - eine Suspension von Rotschlamm in Aluminatlauge - in Druckgefäßen in Stufen auf Atmosphärendruck entspannt. Mit einer Temperatur von etwa 100°C wird die Suspension dann dem Kläreindicker zugeführt, um den Rotschlamm abzutrennen. Da der Kläreindicker-Unterlauf noch etwa 25% Aluminatlauge enthält, wird er gewaschen und den Trommelfiltern zugeführt. Der abfiltrierte Rotschlamm wird in der Regel deponiert. Der Überlauf des Kläreindickers wird in Druckfiltern sorgfältig von allen Schwebstoffen befreit und anschließend auf 50°C gekühlt. Durch diese Abkühlung scheidet sich aus der übersättigten Lösung unter ständigem Rühren reines Aluminiumhydroxid aus. Da die Ausscheidung nur sehr langsam erfolgt, fördert man die Ausscheidung durch Zugabe von bereits ausgefälltem Aluminiumhydroxid, welches als Keim für die Kristallisation dient. Dabei beträgt die Menge an Impf-

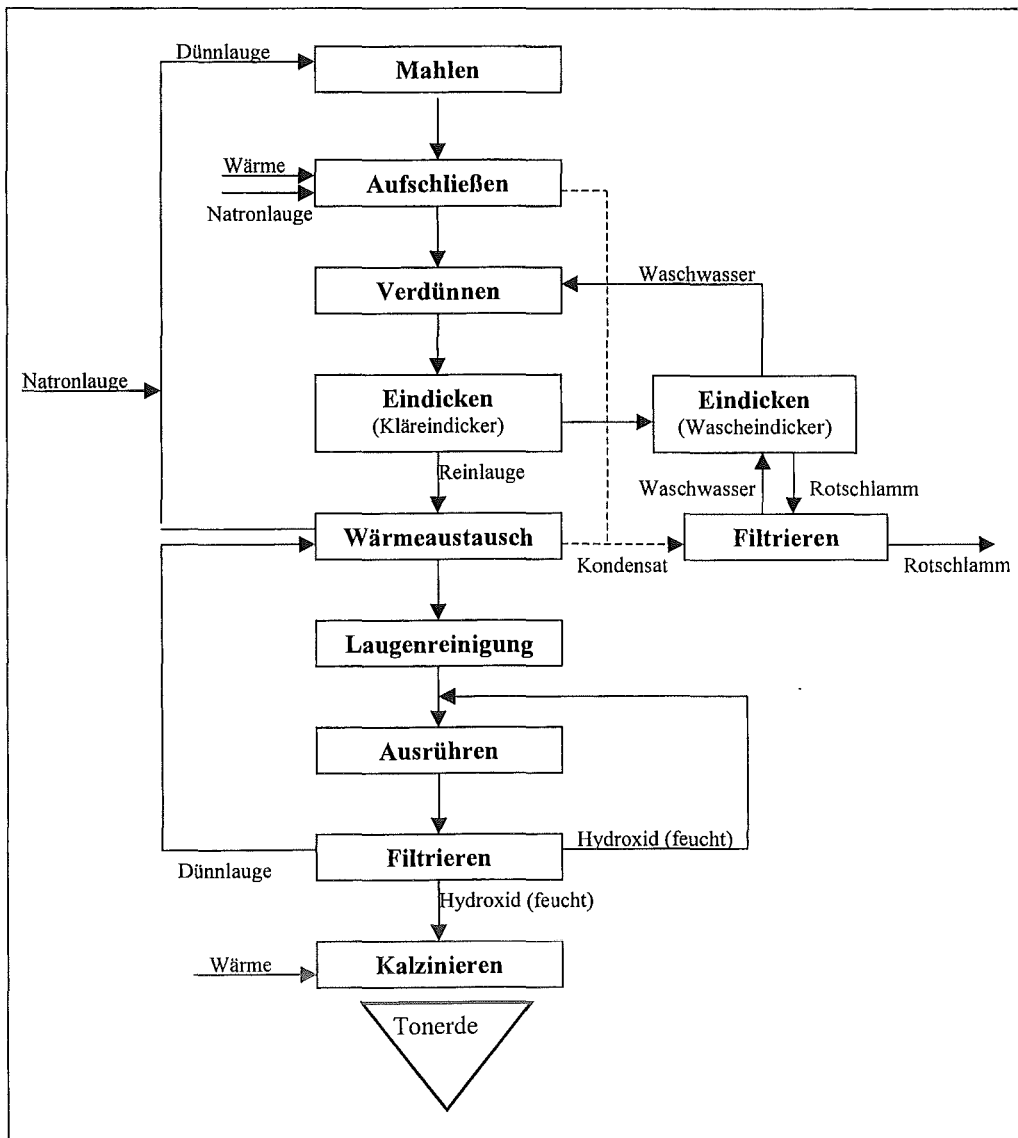


Abb. IV,3 Schematische Prozeßkette des Bayer-Verfahrens
(in Anlehnung an Paschen et al., 1988)

hydroxid das Zwei- bis Vierfache der auszurührenden Menge. Das ausgeschiedene Aluminiumhydroxid wird durch Vakuumfilter von der Lauge getrennt, wobei der größere Teil als Impfstoff wieder zurückgeführt wird.

Der Rest wird nach dem Waschen zu den Kalzinationsanlagen transportiert. Dort wird in Drehrohr- oder Wirbelschichtöfen das feuchte Aluminiumhydroxid auf Temperaturen bis 1250°C erhitzt, wobei durch Abspaltung von Wasser Aluminiumoxid erzeugt wird. Nachteile des Drehrohrofens sind die ungünstige Wärmewirtschaft und die Verunreinigung des Oxids durch Mauerwerksabrieb bei der Drehbewegung. Diese werden bei der Wirbelschichtkalzination umgangen, weshalb die Wirbelschichtöfen die Drehrohröfen zunehmend verdrängen (vgl. Paschen et al., 1988, BGR, 1997).

Aufschluß und Kalzination benötigen eine ganze Reihe verschiedener Inputs. Im Modell werden 6 Inputs explizit unterschieden: Bauxit, thermische Energie, Natronlauge, elektrische Energie, Kalk und Arbeit. Die sonstigen Inputs bzw. Kosten (z. B. für Rotschlammdeponierung) werden durch die sonstigen Betriebskosten erfaßt. Tab. IV,14 gibt einen Überblick über die Leistungsparameter der bestehenden Anlagen nach Techniken im Jahr 1995. Die oberen Werte zeigen wiederum den Weltdurchschnitt, die unteren in Klammern die Spanne in den Regionen. Insgesamt zeigt der Rohrreaktor mit Wirbelschicht bei allen Inputs vergleichsweise niedrige Werte, er ist insofern den anderen Techniken überlegen. Ansonsten zeigen sich für alle Techniken wechselseitig breite Überlappungsbereiche. Je nach Region kann eine Technik bessere oder schlechtere Werte aufweisen. Eine eigentlich überlegene Technik kann in einer Region so schlecht implementiert sein oder angewendet werden, daß sie gegenüber einer eigentlich unterlegenen Technik in einer anderen Region zurückfällt.

Nach den Kosten für Bauxit sind die Kosten für Energie im Weltdurchschnitt der zweitgrößte Kostenblock bei der Tonerdegewinnung. Thermische Energie wird insbesondere beim Aufschluß im engeren Sinn für das Erhitzen der Natronlauge benötigt und bei der Kalzination für das Heizen von Drehrohr- bzw. Wirbelschichtöfen. Der Rohrreaktor mit Wirbelschicht ist energetisch am günstigsten. Die bestehende Anlage in Stade benötigt etwa 8 GJ je Tonne Tonerde. Es wird jedoch damit gerechnet, daß in Zukunft weniger als 7 GJ je Tonne Tonerde mit dieser Technik erreichbar sind (vgl. Solymár, 1997). Im Weltdurchschnitt zeigt, wie erwartet, der Niedertemperaturautoklav mit Wirbelschicht bessere Werte als der Hochtemperaturautoklav mit Wirbelschicht und der Niedertemperaturautoklav mit Drehrohr bessere als der Hochtemperaturautoklav mit Drehrohr.

Tab. IV, 14 Leistungsparameter der Herstellung von Tonerde 1995 bei bestehenden Anlagen
- Weltdurchschnitt und Spanne in den Regionen (in Klammern)

	Niedertemperatur- Autoklav		Hochtemperatur- Autoklav		Rohrreaktor	
	RK ¹	FB ²	RK ¹	FB ²	RK ¹	FB ²
Bauxit (t/t)	Abhängig vom Al ₂ O ₃ -Gehalt des Bauxits (im Modell werden gering-, mittel- und hochwertige Bauxite unterschieden; zugehörige Koeffizientenwerte: 2,0, 2,6 und 3,2)					
Energie (GJ/t)	14,2 (11,5-16,9)	10,3 (8,0-11,1)	17,8 (9,3-23,8)	13,1 (10,4-19,2)	- -	8,0 (8,0)
Natronlauge (kg/t) - Chemischer Verlust	Abhängig vom Verhältnis des Gehalts an reaktivem SiO ₂ zum Gehalt an Al ₂ O ₃ des Bauxits und dem verwendeten Verfahren; (im Modell liegen je nach Bauxittyp und Verfahren die Koeffizienten zwi- schen 33 und 105)					
- Physikal. Verlust	41 (32-54)	33 (30-39)	30 (24-59)	33 (26-55)	- -	23 (23)
Elektrische Energie (MWh/t)	0,24 (0,21-0,28)	0,23 (0,11-0,48)	0,33 (0,22-0,46)	0,24 (0,15-0,37)	- -	0,26 (0,26)
Kalk (kg/t)	37 (0-60)	46 (28-50)	58 (21-80)	88 (44-365)	- -	54 (54)
Arbeitsinput (h/t)	3,1 (1,1-4,9)	1,3 (0,9-2,2)	5,5 (1,2-15,0)	2,0 (0,7-9,2)	- -	1,2 (1,2)
Sonstige Betriebs- kosten (USD ¹⁹⁹⁵ /t)	17 (16-21)	14 (12-20)	18 (12-29)	16 (10-21)	- -	10 (10)

1) RK = Drehrohröfen (Rotary Kiln); 2) FB = Wirbelschichtverfahren (Fluidized Bed)
(Eigene Berechnungen nach CRU, 1996, BGR, 1997, Pawlek, 1998a)

Die Kosten für Natronlauge sind im Weltdurchschnitt der drittgrößte Kostenblock bei der Tonerdegewinnung. Es wird zwischen dem chemischen Verlust an Natronlauge und dem physikalischen Verlust unterschieden. Der chemische Verlust entsteht durch die Reaktion der Natronlauge mit Bestandteilen des Bauxits beim Aufschluß. Bei Anlagen, die mit niedriger Temperatur arbeiten, ist der chemische Verlust eine Funktion des Anteils an reaktivem Siliziumoxids im Bauxit. Bei höheren Temperaturen entstehen größere chemische Verluste, da neben dem reaktiven Siliziumoxid auch andere Bestandteile des Bauxits (wie z. B. Titandioxid) mit der Natronlauge reagieren. Der physikalische Verlust an Natronlauge ist begründet im Verschütten von Natronlauge, in der Verwendung von ungeeignetem Kalk während des Aufschlusses und im unzureichenden Waschen des Rotschlammes. Im Gegensatz zum chemischen Verlust wird der physikalische Verlust als unabhängig vom Bauxittyp verstanden und als allein abhängig von der Implementation und Anwendung der Techniken in der Region gesehen.

Im Modell wird angenommen, daß die Altanlagen ihre Leistungsparameter auch ohne Up-Grading und ohne Investitionen bis zum Jahr 2010 verbessern. So wird unterstellt, daß die Altanlagen in einer Region ihren Rückstand in den Leistungsparametern gegenüber den effizientesten Altanlagen der gleichen Technik um 50% verringern können. Für die Altanlagen mit Hochtemperaturautoklav und Wirbelschicht im Rest von Lateinamerika, die im Jahr 1995 etwa 19,2 GJ thermische Energie je Tonne Tonerde aufwendeten, bedeutet dies, daß unterstellt wird, daß sie auch ohne Up-Grading im Jahr 2010 nur mehr 16,2 GJ benötigen. Sie haben ihren Rückstand gegenüber den besten Altanlagen des gleichen Typs, die 13,1 GJ benötigten, halbiert.

Im Modell wird angenommen, daß bei Up-Grading und Brownfield Expansion stets die Aufschlußtechnik der Altanlage beibehalten und bei der Kalzination Wirbelschicht eingesetzt wird. Bei Neuanlagen wird stets Rohrreaktor mit Wirbelschicht verwendet. Tab. IV,15 gibt einen Überblick über die Leistungsparameter der genannten Investitionsstrategien nach Techniken im Modell, die für das Jahr 2010 angenommen werden. Vereinfacht wird erstens davon ausgegangen, daß sich bei Up-Grading und Brownfield Expansion für die jeweiligen Techniken die gleichen Leistungsparameter ergeben. Zweitens wird unterstellt, daß die Leistungsparameter bei Up-Grading bzw. Brownfield Expansion und Greenfield Expansion für die jeweiligen Techniken über alle Regionen gleich sind. Damit ist angenommen, daß es (zunehmend) möglich ist, in unterschiedlichen Regionen mit gleichen Techniken und Ausrüstungen gleiche Ergebnisse zu erzielen. Zwei Gründe sind wesentlich für diese Annahme. Erstens ist durch die zunehmende Liberalisierung der Wettbewerb intensiver geworden, was ein gezieltes Kostenmanagement erzwingt. Es besteht also ein Druck beste Techniken bestmöglich einzusetzen. Erleichtert wird dies dadurch, daß viele Anlagen in unterschiedlichen Ländern zu einem der dominierenden multinationalen Unternehmen gehören. Der Wissenstransfer innerhalb des Konzerns macht ähnliche Leistungsparameter in unterschiedlichen Ländern wahrscheinlich. Zweitens deuten die vorliegenden Zahlen auf eine solche Entwicklung hin. Bei den Aluminiumhütten, für die die Datenlage besser ist, zeigt sich, daß alle Neuanlagen, die in etwa seit den neunziger Jahren gebaut worden sind, unabhängig von der Region ähnliche Leistungsparameter haben. Die haben allerdings mit PFPB nicht nur die gleiche Technik, sondern mit Pechiney auch den gleichen Lieferanten.

Tab. IV,15 Leistungsparameter der Herstellung von Tonerde bei Up-Grading, Brownfield Expansion und Neuanlagen im Jahr 2010

	Up-Grading und Brownfield Expansion			Neuanlagen
	Niedertemperaturautoklav mit Wirbelschicht	Hochtemperaturautoklav mit Wirbelschicht	Rohrreaktor mit Wirbelschicht	Rohrreaktor mit Wirbelschicht
Bauxit (t/t)	abhängig vom Al_2O_3 -Gehalt des Bauxits (im Modell werden gering-, mittel-, hochwertige Bauxite unterschieden; zugehörige Koeffizientenwerte: 2,0, 2,6 und 3,2)			
Energie (GJ/t)	7,8	9,5	7,2	6,9 ^a
Natronlauge (kg/t) - Chemischer Verlust	abhängig vom Verhältnis des Gehalts an reaktivem SiO_2 zum Gehalt an Al_2O_3 des Bauxits und dem verwendeten Verfahren (im Modell liegen je nach Bauxittyp und Verfahren die Koeffizienten zwischen 33 und 105)			
- Physikal. Verlust	23	23	23	20
Elektrische Energie (MWh/t)	0,26	0,26	0,26	0,23
Kalk (kg/t)	30	30	30	30
Arbeitsinput (h/t)	0,9	0,9	0,9	0,7
Sonstige Betriebskosten (USD ¹⁹⁹⁵ /t)	10	10	5	5

(a: Solymár, 1997, ansonsten: Eigene Schätzungen auf Basis CRU, 1996)

4.1.3 Primäraluminiumverhüttung

Bei der Primäraluminiumverhüttung wird das Aluminium aus dem Aluminiumoxid durch elektrolytische Zersetzung (Schmelzflußelektrolyse) gewonnen. Hierbei wird das wasserfreie Aluminiumoxid mit der rund zehnfachen Menge Kryolith unter Zusatz von Aluminiumfluorid und Calciumfluorid in einer mit Kohle ausgekleideten Eisenwanne (Minuspol) auf rund 950°C zum Schmelzen erhitzt. Als Pluspol dienen Kohleelektroden (Blockanoden oder Söderberganoden). Das geschmolzene Aluminium setzt sich am Boden der Wanne ab, wo es mit Hilfe von Vakuumentiegeln chargenweise abgesaugt wird. Der an der Anode gebildete Sauerstoff setzt sich mit der Kohle zu Kohlenmonoxid und -dioxid um, die oben aus der Zelle abgezogen werden.

Bei der Produktion von Primäraluminium wird nach der Art der verwendeten Anode zwischen Söderberg-Technik und Techniken mit vorgebrannten Anoden (Prebaked-Techniken) unterschieden. Bei der Söderberg-Technik brennen sich die Elektroden nach Einfüllen einer Elek-

trodenmasse in einen Stahlbehälter durch die Abstrahlung des Elektrolysebades selber. Bei Techniken mit vorgebrannten Anoden hingegen werden die Anoden außerhalb des Bades in Öfen gebacken. Alle seit 1975 neu installierten Pot-Lines nutzen die Prebaked-Techniken. Hauptvorteil der vorgebackenen Anoden ist es, daß sich durch die besseren Bedingungen beim Brand ein sehr homogenes Gefüge in den Anodenblöcken ergibt. Dadurch weisen die Anoden einen geringeren elektrischen Widerstand und einen geringeren spezifischen Abbrand als die Söderberganode auf. Hinzu kommt, daß der Zelltyp mit vorgebrannten Anoden die Möglichkeit einer weitgehenden Automatisierung durch Point-Feeder Technik erlaubt.

Nach der Art der Zuführung des Aluminiumoxids wird zwischen seitenbedienten Anlagen, mittenbedienten Anlagen und Anlagen mit Punktdosierern unterschieden. Bei seitenbedienten ('side-worked') Anlagen wird die verbrauchte Tonerde etwa alle 3 Stunden über die Seiten der Anlage ersetzt. Dazu wird die Kruste über dem Schmelzelektrolyten mit Brechhämmern oder -rädern aufgebrochen und die neue Tonerde in die Schmelze nachgegeben. Es werden dabei in einem Arbeitsgang bis zu mehreren 100 kg Tonerde zugegeben, wodurch der Gehalt an Tonerde kurzfristig bis zum Sättigungszustand ansteigen kann. Durch die Tatsache, daß die Konzentration von Aluminiumoxid nicht innerhalb des Optimums gehalten werden kann, ist der spezifische Strombedarf bei diesem Typ vergleichsweise hoch. Bei mittenbedienten ('center-worked') Anlagen wird die Kruste mit Hilfe eines innerhalb der Anlage angebrachten Brechbalkens zwischen den Anodenreihen aufgebrochen und neue Tonerde zugegeben. Durch die damit verbundene Automatisierung können die Bedienintervalle bis auf unter eine Stunde verkürzt werden. Bei Anlagen mit Punktdosierern ('Point-Feeder') wird ständig die Zellspannung gemessen und aus den Meßwerten auf die benötigte Menge an Aluminiumoxid geschlossen. Auf diese Weise kann zu jedem Zeitpunkt eine optimale Tonerdekonzentration eingehalten und so ein optimaler Betrieb der Anlage gewährleistet werden. Die Kruste wird mit einem Stößel durchbrochen und dabei automatisch neue Tonerde nachchargiert. Dieser Vorgang wiederholt sich im Abstand weniger Minuten, wobei jedesmal lediglich einige Kilogramm Tonerde eingebracht werden. Auch bei diesem Typ findet die Zugabe zwischen den Anodenreihen statt (vgl. BGR, 1997, Schleer et al., 1998).

Söderberg-Anlagen wenden weitgehend die Seitenzugabe an. Deshalb wird im Modell die Söderberg-Technik nicht weiter nach der Art der Zugabe der Tonerde differenziert. Die Techniken mit vorgebrannten Anoden hingegen werden nach der Art der Zuführung in SWPB, CWPB und PFPB unterschieden. Tab. IV,16 gibt einen Überblick über die Leistungsparameter der bestehenden Anlagen nach den Techniken im Jahr 1995. Explizit werden 5 Inputs betrachtet: Tonerde, Hauptstrom, Hilfsstrom, Arbeitsinput und Nettoanodenverbrauch. Die son-

stigen Betriebskosten beinhalten einmal die Kosten für die verbleibenden Inputs, wie Kryolith oder Aluminiumfluorid, zum anderen aber auch die Kosten für die Anoden. Die werden unter den sonstigen Betriebskosten subsummiert, da es die vorliegenden Daten nicht erlauben, die Kosten für die Anoden aus den sonstigen operativen Kosten herauszurechnen. So sind zwar die Mengenverbräuche bekannt, nicht aber die Preise. Dies liegt auch darin begründet, daß die Anoden häufig in der Aluminiumhütte selbst hergestellt und nicht auf Märkten gehandelt werden.

Die PFPB-Technik ist im Weltdurchschnitt die überlegene Technik. Sie hat bei allen Leistungsparametern die besten Werte. Up-Grading, Brownfield und Greenfield Expansion erfolgen weitgehend mit dieser Technik. Im Weltdurchschnitt werden bei PFPB an Hauptstrom, dies ist der Strom der direkt für die Elektrolyse eingesetzt wird, etwa 14 MWh je Tonne Primäraluminium aufgewendet. Neuanlagen kommen mit etwa 13,5 MWh je Tonne Primäraluminium aus. In Zukunft scheinen Werte von etwa 13,0 MWh je Tonne Primäraluminium erreichbar (vgl. VAW-ATG, 1998). Der Arbeitsinput liegt bei PFPB weltdurchschnittlich bei etwa 9, die modernsten Anlagen erreichen 6 Arbeitsstunden je Tonne Primäraluminium. Der Nettoanodenverbrauch liegt bei PFPB im Weltdurchschnitt bei 0,42 Tonnen je Tonne Primäraluminium. Gerade die Söderberg-Technik fällt hier mit einem Verbrauch von 0,54 Tonnen je Tonne Primäraluminium deutlich ab.

Tab. IV,16 Leistungsparameter der Herstellung von Primäraluminium bei bestehenden Anlagen im Jahr 1995 - Weltdurchschnitt und Spanne in den Regionen (in Klammern)

	VSS&HSS	CWPB	SWPB	PFPB
Tonerde (t/t)	2,00	1,95	1,95	1,95
Hauptstrom ^a (MWh/t)	16,1 (13,9 - 17,0)	15,0 (13,9 - 16,8)	14,1 (13,6 - 21,0)	14,0 (13,5 - 14,6)
Hilfsstrom ^a (MWh/t)	0,5 (0,3 - 0,8)	0,5 (0,4 - 0,8)	0,5 (0,4 - 0,9)	0,4 (0,3 - 0,5)
Arbeitsinput (h/t) ^a	24 (10 - 47)	11 (7 - 45)	15 (7 - 48)	9 (6 - 39)
Nettoanodenverbrauch (t/t) ^b	0,54 (0,51 - 0,56)	0,47 (0,43 - 0,53)	0,43 (0,41 - 0,45)	0,42 (0,41 - 0,44)
Sonstige Betriebskosten ^a (USD ¹⁹⁹⁵ /t)	520 (450 - 630)	440 (370 - 570)	440 (390 - 750)	430 (330 - 610)

(a: CRU, 1996, b: IME, 1999 nach Pawlek, 1998b)

Analog der Vorgehensweise bei der Tonerdeherstellung wird für Altanlagen angenommen, daß sie ohne Up-Grading und ohne Investitionen ihre Leistungsparameter bis zum Jahr 2010 verbessern können und den Rückstand zu den besten Anlagen gleicher Technik verringern. Tab. IV,17 gibt einen Überblick über die zu erwartenden Leistungsparameter bei Up-Grading, Brownfield und Greenfield Expansion im Jahr 2010. Zusätzlich sind Leistungsparameter für in der Entwicklung befindliche Techniken dargestellt. Inerte Anode und Titanboridkathode gelten als besonders aussichtsreich, im allgemeinen wird jedoch davon ausgegangen, daß sie bis zum Jahr 2010 nicht zum Einsatz kommen (vgl. z. B. Pawlek, 1995, 1997 und Aluminum Association / U.S. Department of Energy, 1998). Mit Stromverbräuchen von 13,5 MWh je Tonne Primäraluminium wird unterstellt, daß mit PFPB aufgerüstete und erweiterte Anlagen im Jahr 2010 Werte erreichen werden, die 1995 Neuanlagen hatten. Durch die weitgehende Automation wird für aufgerüstete und erweiterte Anlagen von einem Arbeitsinput von 7, für Neuanlagen von 5 Arbeitsstunden je Tonne Primäraluminium ausgegangen. Die Nettoanodenverbräuche liegen im Bereich um 0,41 Tonnen je Tonne Primäraluminium.

Tab. IV,17 Leistungsparameter der Herstellung von Primäraluminium bei Up-Grading, Brownfield Expansion, Neuanlagen und Zukunftstechnologien im Jahr 2010

	PFPB Up-Grading & Brownfield Expansion	PFPB Neuanlage	Inerte Anode	Titanborid- Kathode
Tonerde (t/t)	1,95	1,95	1,95	1,95
Hauptstrom (MWh/t)	13,5 ^a	13,0 ^b	12,0 ^c	11,8 ^d
Hilfsstrom (MWh/t)	0,3	0,3	0,3	0,3
Arbeitsinput (h/t)	7	5	k. A.	k. A.
Nettoanodenverbrauch (t/t)	0,416 ^a	0,41	0,00 ^c	0,421 ^d
Sonstige Betriebskosten (USD ¹⁹⁹⁵ /t)	350	300	k. A.	k. A.

(a: VAW-ATG, 1998, b: Peters, 1998, c: Kvande, 1998, d: IME, 1999, ansonsten: Eigene Schätzung auf Basis CRU, 1996)

4.2 Input-Preise

Die Input-Preise variierten 1995 stark in den Regionen und hatten damit erheblichen Einfluß auf die Kostenstruktur und die Kostensituation einer Region. Tab. IV,18 gibt einen Überblick über die weltdurchschnittlichen Preise wichtiger Inputfaktoren der Primäraluminiumkette und der Spanne in den Regionen im Jahr 1995. Die weltdurchschnittlichen und die regionalen Preise entsprechen den verbrauchsgewichteten Durchschnitten der Anlagen weltweit bzw. einer Region. Die Arbeit ist ein wesentlicher Inputfaktor bei allen drei Produktionsstufen. Ihr

Preis lag im Weltdurchschnitt 1995 bei etwa 8 USD¹⁹⁹⁵ je Arbeitsstunde. Mit 1 USD¹⁹⁹⁵ je Arbeitsstunde war der Lohnsatz in Indien und China am niedrigsten. In Deutschland kostete eine Stunde Arbeit etwa 28 mal soviel.

Tab. IV,18 Preise wichtiger Inputs der Primäraluminiumkette im Jahr 1995 - Weltdurchschnitt und Spanne in den Regionen (in Klammern)

Arbeit ^a (USD ¹⁹⁹⁵ / h)	8 (1 - 28)
Elektrische Energie (für Elektrolyse) ^a (USD ¹⁹⁹⁵ / MWh)	21 (10 - 47)
Gas ^a (USD ¹⁹⁹⁵ / GJ)	2,3 (0,3 - 3,6)
Öl ^a (USD ¹⁹⁹⁵ / GJ)	2,9 (2,0 - 5,0)
Kohle ^a (USD ¹⁹⁹⁵ / GJ)	1,2 (1,1 - 1,7)
Diesel ^b (USD ¹⁹⁹⁵ / GJ)	11 (2 - 23)
Natronlauge ^a (USD ¹⁹⁹⁵ / t)	240 (203 - 343)
Kalk ^a (USD ¹⁹⁹⁵ / t)	61 (45 - 148)

(Eigene Berechnungen nach a: CRU, 1996, b: IEA, 1998)

Der Preis der elektrischen Energie ist insbesondere bei der Elektrolyse ein wesentlicher Standortfaktor. Im Weltdurchschnitt zahlten die Hütten 1995 etwa 21 USD¹⁹⁹⁵ je MWh. In Kanada war der Strom mit 10 USD¹⁹⁹⁵ je MWh am günstigsten, im Rest von Osteuropa mit 47 USD¹⁹⁹⁵ je MWh am teuersten. Der Stromtarif steht im engen Zusammenhang mit dem (vertraglich) genutzten Energieträger zur Stromgewinnung. Je höher der (vertragliche) Anteil der Wasserkraft an der Strombereitstellung für die Elektrolyse, desto geringer ist in der Regel der Stromtarif in einer Region. In den zwei Regionen mit den günstigsten Stromtarifen (Kanada, Rest von Asien) wurde 1995 der Strom so zu 100% aus Wasserkraft gewonnen. In den Regionen Rest von Westeuropa, Frühere Sowjetunion, Rest von Lateinamerika und Naher und Mittlerer Osten, die ebenfalls vergleichsweise niedrige Stromtarife für die Elektrolyse hatten, wurden zwischen 50 und 100% des Stroms für die Hütten aus Wasserkraft erzeugt. In den Regionen Deutschland, Indien und China, die hohe Stromtarife aufwiesen, wurde der Strom in erster Linie aus Kohle gewonnen (Tab. IV,19).

Tab. IV,19 Regionen und Stromtarife bei der Elektrolyse

< 15 USD ¹⁹⁹⁵ je MWh	Kanada, Rest von Asien
15 - 20 USD ¹⁹⁹⁵ je MWh	Rest von Lateinamerika, Rest von Westeuropa, Frühere Sowjetunion, Afrika, Naher und Mittlerer Osten, Australien
20 - 25 USD ¹⁹⁹⁵ je MWh	USA, Brasilien, Rest der Europäischen Union
> 25 USD ¹⁹⁹⁵ je MWh	Deutschland, Rest von Osteuropa, Indien, China

(in Anlehnung an CRU, 1996)

Gas, Öl und Kohle sind die Energieträger zur Gewinnung thermischer Energie für Aufschluß und Kalzination. Sowohl ihre regionalen Anteile wie ihre Preise waren 1995 in den Regionen stark unterschiedlich. In Deutschland, dem Rest der Europäischen Union, in China und Afrika waren 1995 die Tonerdefabriken insgesamt mit hohen Energiepreisen konfrontiert, in Kanada, dem Rest von Lateinamerika und der Früheren Sowjetunion hingegen waren die Preise niedrig.

Auch für die anderen Inputs der Kette des Primäraluminiums wie Diesel, Kalk oder Natronlauge lassen sich für 1995 große Unterschiede in den regionalen Preisen feststellen. Für das Stützjahr 2010 wird mit Blick auf die Input-Preise von folgenden Annahmen ausgegangen:

- Die Lohnsätze der rückständigen Länder nehmen relativ zu denen der führenden Länder zu. Der Rückstand der Lohnsätze zwischen dem Land, mit dem höchsten Lohnsatz, und denen, mit niedrigeren, wird jeweils um 5% geringer. Dies bedeutet für die Länder mit den niedrigsten Lohnsätzen, Indien und China, immerhin, daß sich deren Lohnsätze in den 15 Jahren von 1995 bis 2010 mehr als verdoppeln.
- Die Preise der handelbaren Güter gleichen sich in Richtung der Durchschnittspreise an. Die Abstände der Input-Preise für Natronlauge und Kalk in den einzelnen Regionen zum weltweiten Durchschnittspreis gehen um jeweils 50% zurück, die für Gas, Öl, Kohle und Diesel um jeweils 30%.
- Die Unterschiede in den Preisen für Strom, der nur sehr eingeschränkt zwischen den Regionen handelbar ist, bleiben weitgehend erhalten. Die Abstände zum Durchschnittspreis verringern sich nur um jeweils 10%. Damit wird der Wettbewerbsvorteil von billigem Strom, der für einige Regionen besteht (insbesondere Kanada und Rest von Asien), in die Zukunft fortgeschrieben. Dies scheint mit Blick auf die Elektrolyse nicht ganz unbegründet. Der Anteil der Wasserkraft am vertraglichen Mix der Energieträger zur Stromproduktion für Altanlagen dürfte sich in den Regionen kaum ändern. Hinzu kommt, daß die geplanten Neubauten an Hütten in der Regel in den Regionen einen ähnlichen vertragli-

chen Mix an Energieträgern zur Stromproduktion aufweisen wie die Altanlagen (siehe hierzu 8.2.1).

4.3 Betriebskosten

Leistungsparameter und Input-Preise bestimmen gemeinsam die spezifischen Betriebskosten. Entsprechend den regionalen Unterschieden in Leistungsparametern und Input-Preisen weichen die spezifischen Betriebskosten in den Regionen stark voneinander ab. Im Weltdurchschnitt lagen 1995 die totalen Betriebskosten je Tonne Output beim Bergbau bei 15 USD¹⁹⁹⁵, bei der Tonerdegewinnung bei 150 USD¹⁹⁹⁵ und bei der Primäraluminiumproduktion bei 1350 USD¹⁹⁹⁵ (Tab. IV,20). Arbeit ist der entscheidende Kostenfaktor für den Bergbau. Sie war 1995 für mehr als 40% der gesamten Betriebskosten verantwortlich. Die Bauxitkosten sind der wesentliche Kostenfaktor für die Tonerdeherstellung. Ihr Anteil an den totalen Betriebskosten lag 1995 bei mehr als einem Drittel. Die thermische Energie verursachte weitere 20% der gesamten Betriebskosten. Für die Unterschiede in den Kosten für Bauxit sind nicht zuletzt die Transportkosten entscheidend. Im Rest von Lateinamerika lagen die Kosten für Bauxit je Tonne Tonerde bei etwa 40 USD¹⁹⁹⁵, in Westeuropa hingegen (mit Ausnahme von Griechenland) bei etwa 80 USD¹⁹⁹⁵. Etwa die Hälfte dieser Differenz erklärte sich allein über die höheren Transportkosten, die in Westeuropa spezifisch bei 15 bis 20 USD¹⁹⁹⁵ lagen, während sie im Rest von Lateinamerika kaum Bedeutung hatten. Die spezifischen Transportkosten sind dabei um so höher, je weiter die Transportwege und je geringer der Gehalt an Aluminiumoxid des Bauxits. Daraus erklärt sich zum einen, daß die Tonerdeproduktion zunehmend zu den Minen verlagert wird, und zum anderen, daß nur Bauxite mit hohem Gehalt an Aluminiumoxid interregional verschickt werden.

Die Kosten der Elektrizität sind nach den Kosten für Tonerde der zweitwichtigste Kostenblock der Primäraluminiumproduktion. Sie machten 1995 im weltweiten Durchschnitt etwa ein Viertel der gesamten Betriebskosten aus (Tab. IV,20). Während bei Tonerde aber die Preise in den einzelnen Regionen nur wenig voneinander abweichen, sich so keine signifikanten regionalen Wettbewerbsvor- oder -nachteile ergeben, sind die Stromtarife in den einzelnen Regionen stark unterschiedlich. Dies ist wenig überraschend, ist doch Strom im Gegensatz zu Tonerde ein nur eingeschränkt handelbares Gut.

Tab. IV,20 Betriebskosten je Tonne Output für Bergbau, Tonerdegewinnung und Primäraluminiumproduktion 1995 im Weltdurchschnitt (in %)

	Bergbau	Tonerdegewinnung	Primäraluminiumproduktion
Wichtigstes Eingangsmaterial	-	34	33
Arbeit	43	13	10
Elektrische Energie	-	3	24
Andere Energie	11	22	-
Natronlauge	-	13	-
Kalk	-	3	-
Sonstige Betriebskosten	46	12	33
Totale Betriebskosten	15 USD¹⁹⁹⁵	150 USD¹⁹⁹⁵	1350 USD¹⁹⁹⁵

(Eigene Berechnungen auf Basis von CRU, 1996, BGR, 1997, Pawlek, 1998a, b, c, d, und anderen)

Die weltdurchschnittlichen Betriebskosten verändern sich bis 2010 entsprechend den Annahmen zu Leistungsparametern, Input-Preisen, Transporttarifen aber auch zu Zöllen und der weltweiten Nachfrage nach Primäraluminium. Sie sind insofern Modelloutput. Trotz leichter Verschiebungen bleibt die Gewichtung der einzelnen Kostenfaktoren auf den einzelnen Prozessstufen bei den gerechneten Szenarien allerdings weitgehend gleich der im Jahr 1995.

5. Kapitalkosten

Der Parameter der Kapitalkosten eines Produktionsprozesses ist abhängig vom Parameter der Kapitalkosten nach Investitionsstrategie und vom regionenspezifischen Risikozuschlag.

5.1 Kapitalkosten nach Investitionsstrategie

Die Berechnung der Parameter der Kapitalkosten nach Investitionsstrategie erfolgt mit der Barwertmethode. Mit ihrer Hilfe werden die bekannten Investitionskosten je Tonne Kapazität unter Berücksichtigung eines Zinssatzes von 5% annuitätisch auf die wirtschaftliche Nutzungsdauer umgelegt. Als wirtschaftliche Nutzungsdauer werden einheitlich 20 Jahre angenommen (vgl. hierzu auch Haas, 1990).

Beim Bergbau wird zwischen alter und neuer Kapazität unterschieden. Der alten Kapazität sind keine Investitionskosten zugeordnet ('sunk costs'). Der Aufbau neuer Kapazität hingegen ruft Investitionskosten hervor. Die IBRD hat für 1980 errechnet, daß je Tonne Kapazität Primäraluminium im Bergbau Investitionen zwischen 400 und 500 USD¹⁹⁸⁰ notwendig waren

(Tab. IV,21). Je Tonne Kapazität Bauxit ergeben sich damit etwa 80 bis 100 USD¹⁹⁸⁰. Nach den Zahlen von Roullier (1995) fielen in den neunziger Jahren je nach Mine Investitionskosten zwischen 50 und 100 USD¹⁹⁹⁵ je Tonne Kapazität Bauxit an. Im Modell werden für das Jahr 2010 einheitlich 80 USD¹⁹⁹⁵ je Tonne Kapazität unterstellt. Dies führt zu Kapitalkosten im Bergbau von etwa 6 USD¹⁹⁹⁵ je Tonne Output.

Tab. IV,21 Investitionskosten nach dem IBRD für die Produktion von Primäraluminium im Jahr 1980 (USD¹⁹⁸⁰ je Tonne Metallkapazität)

	Industrielländer		Entwicklungsländer	
	(USD)	(%)	(USD)	(%)
Bauxitgewinnung	400-500	6	450-500	6
Tonerdefabrikation	1600-2500	30	2000-3100	31
Primäraluminiumproduktion	3900-4800	64	4700-5800	63
Gesamtkosten	5900-7750	100	7150-9400	100

(IBRD, 1983, zitiert nach International Iron and Steel Institute, 1993)

Bei der Tonerdegewinnung wird zwischen Altanlagen, Up-Grading, Brownfield und Greenfield Expansion unterschieden. In Anlehnung an Daten für einzelne Anlagen nach Pawlek (1998a, c, d) ergaben sich für das Up-Grading im Jahr 1995 Investitionskosten von 200 bis 300 USD¹⁹⁹⁵ je Tonne Kapazität Tonerde (Tab. IV,22). Im Modell wird vereinfacht angenommen, daß im Jahr 2010 das Up-Grading von Anlagen mit Drehrohr 300 USD¹⁹⁹⁵ je Tonne Kapazität ausmacht, das von Anlagen mit Wirbelschicht 200 USD¹⁹⁹⁵. Bei Anlagen mit Wirbelschicht ist bei der Kalzination kein Technikwechsel notwendig, das Up-Grading daher weniger aufwendig. Die genannten Investitionskosten führen zu Kapitalkosten für das Up-Grading von 24 bzw. 16 USD¹⁹⁹⁵ je Tonne Output. Die Brownfield Expansion ruft nach Datenlage Investitionskosten von etwa 450 USD¹⁹⁹⁵ je Tonne Kapazität hervor und damit Kapitalkosten von etwa 35 USD¹⁹⁹⁵ je Tonne Output. Eine Differenzierung nach den einzelnen Techniken war aufgrund der Datenlage nicht möglich. Im Modell ist unterstellt, daß Neuanlagen mit Rohrreaktor und Wirbelschicht ausgerüstet werden. Für Neuanlagen, die allerdings keine Rohrreaktor-Technik nutzten, ergaben sich nach Pawlek (1998a, c, d) in den neunziger Jahren Investitionskosten von 800 bis 1100 USD¹⁹⁹⁵ je Tonne Kapazität. Ausgehend von den Zahlen der IBRD waren dies 1980 zwischen 800 und 1500 USD¹⁹⁸⁰ gewesen. Solymár (1998) hält für die Rohrreaktor-Technik in Zukunft Investitionskosten von 745 USD¹⁹⁹⁸ für erreichbar. Allerdings sind in diesem Wert die Infrastrukturkosten nicht enthalten. Im Modell werden

für das Jahr 2010 daher 900 USD¹⁹⁹⁵ je Tonne Kapazität unterstellt. Diese rufen Kapitalkosten von 70 USD¹⁹⁹⁵ je Tonne Output hervor. Ein Vergleich mit den gesamten Betriebskosten, die im Weltdurchschnitt im Jahr 1995 bei etwa 150 USD¹⁹⁹⁵ je Tonne Output lagen, zeigt die große Bedeutung der Kapitalkosten von Neuanlagen bei der Gewinnung von Tonerde.

Tab. IV,22 Investitionskosten für eine Tonne Kapazität Tonerde bei Up-Grading, Brownfield und Greenfield Expansion im Jahr 1995 nach Pawlek (USD¹⁹⁹⁵ je Tonne Kapazität)

Up-Grading	Brownfield Expansion	Greenfield Expansion
200 - 300	Ca. 450	800 - 1100

(Pawlek, 1998a, c, d)

Auch bei der Verhüttung wird zwischen Altanlagen, Up-Grading, Brownfield und Greenfield Expansion differenziert. Nach Peters (1998) ergaben sich für das Up-Grading mit PFPB im Jahr 1997 Investitionskosten von 500 bis 1500 USD¹⁹⁹⁷ je Tonne Kapazität (Tab. IV,23). Für Söderberg-Anlagen, für die ein Up-Grading mit PFPB aufwendiger ist, werden in Anlehnung an diese Zahlen für das Jahr 2010 Investitionskosten von 1500 USD¹⁹⁹⁵ je Tonne Kapazität angenommen. Anlagen mit Prebaked-Techniken können billiger aufgerüstet werden. Hier werden im Modell Kosten von 750 USD¹⁹⁹⁵ je Tonne Kapazität unterstellt. Dies entspricht Kapitalkosten von 120 bzw. 60 USD¹⁹⁹⁵ je Tonne Primäraluminium. Brownfield Expansion mit PFPB kostete nach Peters (1998) im Jahr 1997 etwa 2000 USD¹⁹⁹⁷ je Tonne Kapazität. Im Modell wird der Brownfield Expansion entsprechend Kapitalkosten von 160 USD¹⁹⁹⁵ je Tonne Output zugeordnet. Für Neuanlagen mit PFPB wurden im Jahr 1997 etwa 3500 bis 6000 USD¹⁹⁹⁷ je Tonne Kapazität veranschlagt. Werden Investitionskosten von 5000 USD¹⁹⁹⁵ je Tonne Kapazität für das Jahr 2010 angenommen, schlagen Kapitalkosten von 400 USD¹⁹⁹⁵ je Tonne Output zu Buche. Bei im Weltdurchschnitt gesamten Betriebskosten von 1350 USD¹⁹⁹⁵ je Tonne Output im Jahr 1995 schlagen die Kapitalkosten für Neuanlagen zur Herstellung von Primäraluminium relativ gesehen weniger stark zu Buche als im Tonerdebereich.

Tab. IV,23 Investitionskosten für eine Tonne Kapazität Primäraluminium bei Up-Grading, Brownfield und Greenfield Expansion im Jahr 1997 nach Peters (USD¹⁹⁹⁷ je Tonne Kapazität)

Up-Grading	Brownfield Expansion	Greenfield Expansion
500 - 1500	Ca. 2000	3500 - 6000

(Peters, 1998)

5.2 Risikozuschläge

Für Regionen, in denen Unsicherheit hinsichtlich der Möglichkeit gewerblicher Betätigung, der Eigentumsverhältnisse, der Einhaltung von wirtschaftlichen Verträgen bis hin zur Frage der eigenen persönlichen Sicherheit herrscht, wird bei Investitionen eine Risikoprämie verlangt (vgl. Tuchtfeldt, 1982, Schwarz, 1997). Daher müssen bei den Kapitalkosten für bestimmte Regionen zusätzlich Risikozuschläge berücksichtigt werden. Aufgrund der stabilen politischen und ökonomischen Verhältnisse ist für die westlichen Länder kein Risikozuschlag erforderlich. Für alle anderen Regionen wird einheitlich ein Risikozuschlag von 20% unterstellt.

6. Transportkosten

6.1 Transportprozesse und zugehörige Kostenparameter im Überblick

GlobAl bildet drei Stufen von Transportprozessen ab: Erstens den Transport von Bauxit von der Mine zum Tonerdewerk, zweitens den Transport von Tonerde vom Tonerdewerk zur Hütte und drittens den Transport von Primäraluminium von der Hütte zur Endnachfrage. Dabei können, je nachdem, ob die regionalen Grenzen überschritten werden oder nicht, interregionale und regionale Transporte unterschieden werden. Als Transportmittel werden LKW, Bahn, Förderband, Binnenschiff und Hochseeschiff berücksichtigt. Besonders detailliert werden die Transporte von der Mine zum Tonerdewerk und von dort aus weiter zur Hütte betrachtet. Für die dritte Stufe von Transportprozessen werden nur die interregionalen Seetransporte abgebildet (Tab. IV,24). Dafür sind drei Gründe ausschlaggebend: Erstens sind die Massenflüsse auf den ersten beiden Stufen von Transportprozessen sehr groß. Zweitens sind auf den ersten beiden Stufen die relativen Transportkosten, d. h. die Transportkosten im Vergleich zum Wert der Fracht, besonders hoch. Drittens ist die Datenlage zu den ersten beiden Stufen von Transportprozessen besser. Die Zahl an Minen, Tonerdewerken und Hütten sind im Vergleich zur Zahl der Weiterverarbeiter von Primäraluminium geringer.

Tab. IV,24 Transportprozesse im Überblick

Stufen	Regionale Transporte		Interregionale Transporte	
	Prozesse	Transportmittel	Prozesse	Transportmittel
1) Mine - Tonerdewerk	Mine - Tonerdewerk	LKW, Bahn, Förderband, Binnenschiff, Hochseeschiff	Mine - Hafen	LKW, Bahn, Förderband, Binnenschiff
			Hafen - Hafen	Hochseeschiff
			Hafen - Tonerdewerk	LKW, Bahn, Förderband, Binnenschiff
2) Tonerdewerk - Hütte	Tonerdewerk - Hütte	LKW, Bahn, Förderband, Binnenschiff, Hochseeschiff	Tonerdewerk - Hafen	LKW, Bahn, Förderband, Binnenschiff
			Hafen - Hafen	Hochseeschiff
			Hafen - Hütte	LKW, Bahn, Förderband, Binnenschiff
3) Hütte - Endnachfrage	n. b.	n. b.	Hafen - Hafen	Hochseeschiff

Im Modell wird für jede der drei Stufen von Transportprozessen eine Koeffizientenmatrix der gesamten Transportkosten aufgebaut, die alle Regionen miteinander verbindet. Jedes Element dieser Matrix beschreibt die gesamten Transportkosten je Outputeinheit von jeder Herkunftsregion zu jeder beliebigen Zielregion. Auf der Hauptdiagonalen finden sich die Werte für die regionalen Transporte, bei denen Herkunfts- und Zielregion eins sind. Zur Bestimmung der Koeffizientenmatrix der gesamten Transportkosten einer Stufe werden die Transporte in vorgeschaltete, zentrale und nachgeschaltete Transporte eingeteilt. Vorgeschaltet sind bei der ersten Stufe die Transporte von der Mine zum Hafen in der Herkunftsregion. Zentral sind die Transporte (mit dem Hochseeschiff) zwischen den Regionen. Nachgeschaltet sind die Transporte vom Hafen zur Tonerdefabrik in der Zielregion. Regionale Transporte werden stets als vorgeschaltet verstanden. Für vorgeschaltete, zentrale und nachgeschaltete Transporte lassen sich Koeffizientenmatrizen der Transportkosten nach Transportmitteln entwickeln. Die Summe dieser Matrizen ergibt dann die Koeffizientenmatrix der gesamten Transportkosten einer Stufe (Abb. IV,4).

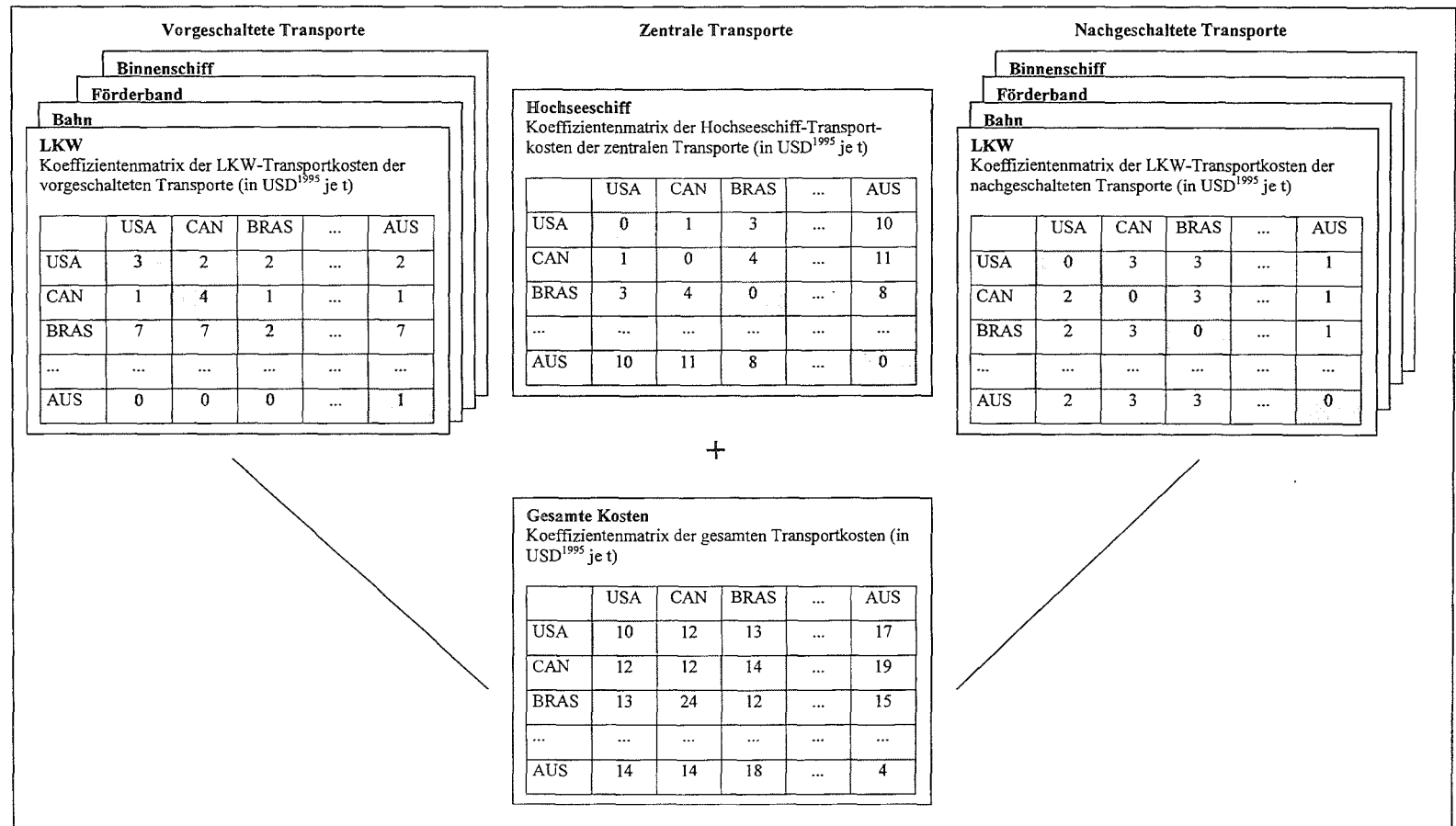


Abb. IV,4 Koeffizientenmatrix der gesamten Transportkosten einer Stufe als Summe der Koeffizientenmatrizen der Transportkosten je Transportmittel von vorgeschalteten, zentralen und nachgeschalteten Transporten

Jedes Element der Matrix der Transportkosten nach Transportmitteln gibt die durchschnittlichen Kosten für den Transport der Transformationsgüter mit dem betreffenden Transportmittel wieder. Die Koeffizienten errechnen sich aus der Multiplikation von gewichteten Transportentfernungen und Transporttarifen. Bei den vorgeschalteten Transporten sind die Werte zeilenweise gleich, da der Transport zum Hafen jeweils gleich teuer ist, egal in welche Region das Transformationsgut verschickt werden soll. Ausnahmen sind die Werte auf der Hauptdiagonalen, die die Kosten der regionalen Transporte widerspiegeln. Bei den zentralen Transporten ist der Koeffizient der Transportkosten eines Transports von einer Region in eine andere gleich dem bei umgekehrter Lieferichtung. Es ist also unerheblich für die spezifischen Kosten des interregionalen Seetransportes, ob von Kanada in die USA oder von den USA nach Kanada geliefert wird. Die Werte auf der Hauptdiagonalen sind Null, da die regionalen Transporte als vorgeschaltet betrachtet werden. Bei den nachgeschalteten Transporten sind die Koeffizienten spaltenweise gleich. Unabhängig von woher die Fracht am Hafen angelandet wird, sind die Transportkosten vom Hafen zum Tonerdewerk innerhalb einer Region gleich. Ausnahmen sind wiederum die Koeffizienten auf der Hauptdiagonalen, die alle gleich Null sind.

6.2 Gewichtete Transportentfernungen

Gewichtete Transportentfernung mal Transporttarif ergibt den Koeffizient der Transportkosten nach Transportmitteln. Die Parameterwerte der gewichteten Transportentfernungen werden im folgenden für die erste Stufe der Transportprozesse entwickelt. Für die zweite und dritte Stufe ergeben sich die Werte analog. Bei den vorgeschalteten Transporten wird die gewichtete Transportentfernung errechnet, indem die Entfernung, die mit einem Transportmittel zurückgelegt wird, mit dem Verhältnis der transportierten Menge zur exportierten bzw. innerhalb einer Region verwendeten Menge des betreffenden Gutes gewichtet wird. In Brasilien werden beispielsweise 2% des exportierten Bauxits 30 km mit dem LKW befördert (Tab. IV,25). Die gewichtete Entfernung für den interregionalen vorgeschalteten Transport mit dem LKW ist dann $0,02 \times 30 \text{ km} = 0,6 \text{ km}$. Bei den regionalen Transporten werden 18% der regional verarbeiteten Bauxite 217 km mit dem LKW transportiert (Tab. IV,26). Die gewichtete Entfernung ist entsprechend $0,18 \times 217 \text{ km} = 39 \text{ km}$. Die Matrix der zentralen Transporte zeigt Tab. IV,27. Die Transportentfernungen über See werden mit 1 gewichtet, da alle exportierten Mengen im Modell über See transportiert werden. Die Entfernungen für die nachgeschalteten Transporte sind in Tab. IV, 28 dargestellt. Die Gewichtung bezieht sich auf den Anteil der transportierten Güter an der angelandeten Menge. Falls keine Anlandungen erfol-

gen, werden die Entfernungen zu den Tonerdewerken entsprechend deren Produktionsanteilen gewichtet.

Tab. IV,25 Interregionaler vorgeschalteter Transport: Bauxitmine - Hafen

Region	LKW		Bahn		Förderband		Binnen-schiff		Hochsee-schiff	
	km	(%)	km	(%)	km	(%)	km	(%)	km	(%)
Brasilien	30	(2)	28	(77)	25	(23)	-	-	-	-
Rest v. Lateinam.	20	(26)	105	(74)	-	-	-	-	-	-
Rest der EU	32	(100)	-	-	-	-	-	-	-	-
Rest v. Osteuropa	-	-	48	(100)	-	-	-	-	-	-
Früh. Sowjetunion	-	-	2250	(100)	-	-	-	-	-	-
Afrika	-	-	131	(100)	-	-	-	-	-	-
Vord./Mittl. Osten	20	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Indien	-	-	205	(100)	-	-	-	-	-	-
China	-	-	644	(100)	-	-	-	-	-	-
Rest von Asien	-	-	-	-	-	-	129	(100)	-	-
Australien	-	-	19	(74)	14	(26)	-	-	-	-

(Brown et al., 1983, IBH, 1999)

Tab. IV,26 Regionaler Transport: Bauxitmine - Tonerdewerk

Region	LKW		Bahn		Förderband		Binnen-schiff		Hochsee-schiff	
	km	(%)	km	(%)	km	(%)	km	(%)	km	(%)
Brasilien	217	(18)	159	(45)	25	(24)	750	(56)	672	(56)
Rest v. Lateinam.	-	-	52	(11)	16	(77)	650	(11)	100	(23)
Rest der EU	32	(100)	-	-	-	-	-	-	-	-
Rest v. Osteuropa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Früh. Sowjetunion	-	-	674	(100)	-	-	-	-	-	-
Afrika	-	-	100	(100)	-	-	-	-	-	-
Vord./Mittl. Osten	30	(100)	-	-	-	-	-	-	-	-
Indien	93	(51)	245	(71)	12	(49)	50	(11)	800	(3)
China	17	(81)	293	(19)	-	-	-	-	-	-
Rest von Asien	5	(100)	-	-	-	-	-	-	-	-
Australien	-	-	25	(35)	23	(65)	-	-	-	-

(Brown et al., 1983, IBH, 1999)

Tab. IV,27 Transportentfernungen über See (in 1000 Seemeilen)

	USA	CAN	BRAS	R-LAM	DEU	R-EU	R-WE	F-SU	O-EUR	AFR	V/M-O	IND	CHIN	R-AS	AUS
USA	0	3	5	5	5	5	5	7	7	7	9	11	7	7	7
CAN	3	0	7	7	5	5	5	7	7	7	9	11	7	7	7
BRAS	5	7	0	3	7	7	7	9	9	5	9	9	11	11	11
R-LAM	5	7	3	0	7	7	7	9	9	5	9	9	11	11	11
DEU	5	5	7	7	0	3	3	5	3	5	7	9	11	11	11
R-EU	5	5	7	7	3	0	3	5	3	5	7	9	11	11	11
R-WE	5	5	7	7	3	3	0	5	3	5	7	9	11	11	11
F-SU	7	7	9	9	5	5	5	0	3	7	7	9	7	11	11
O-EUR	7	7	9	9	3	3	3	3	0	5	7	9	11	11	11
AFR	7	7	5	5	5	5	5	7	5	0	5	5	9	9	9
V/M-O	9	9	9	9	7	7	7	7	7	5	0	3	7	5	5
IND	11	11	9	9	9	9	9	9	9	5	3	0	7	5	5
CHIN	7	7	11	11	11	11	11	7	11	9	7	7	0	5	5
R-AS	7	7	11	11	11	11	11	11	11	9	5	5	5	0	5
AUS	7	7	11	11	11	11	11	11	11	9	5	5	5	5	0

Tab. IV,28 Interregionaler nachgeschalteter Transport: Hafen - Tonerdewerk

Region	LKW		Bahn		Förderband		Binnen-schiff		Hochsee-schiff	
	km	(%)	km	(%)	km	(%)	km	(%)	km	(%)
USA	-	-	71	(100)	-	-	-	-	-	-
Kanada	-	-	-	-	-	-	100	(100)	-	-
Brasilien	11	(100)	-	-	-	-	-	-	-	-
Rest v. Lateinam.	25	(82)	380	(18)	-	-	-	-	-	-
Deutschland	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rest der EU	33	(75)	23	(36)	-	-	-	-	-	-
Rest v. Osteuropa										
Früh. Sowjetunion	-	-	1880	(75)	-	-	350	(25)	-	-
Afrika	-	-	100	(100)	-	-	-	-	-	-
Vord./Mittl. Osten	230	(100)	-	-	-	-	-	-	-	-
Indien	100	(25)	633	(75)	-	-	-	-	-	-
China	550	(9)	570	(91)	-	-	-	-	-	-
Rest von Asien	-	-	15	(100)	-	-	-	-	-	-
Australien	-	-	60	(50)	25	(50)	-	-	-	-

(IBH, 1999)

6.3 Transporttarife

Tab. IV,29 oben zeigt die Transporttarife für 1983, die im Modell von Brown et al. (1983) weltweit angenommen wurden. Tab. IV,29 unten stellt die Transporttarife für 1995 nach dem US-Bureau of Mines (1995) für die USA dar. Die Tarife unterscheiden sich nominal kaum voneinander. Für das Jahr 2010 wird unterstellt, daß die Transporttarife um 10% sinken. Problematisch ist, daß die Transporttarife regional nicht differenziert werden konnten. Tatsächlich weichen in den einzelnen Regionen die Werte durchaus auffällig von denen der USA ab. Nach dem US-Bureau of Mines (1995) liegen beispielsweise im Jahr 1995 in Australien die Tarife für LKW, Bahn und Binnenschiff nur bei durchschnittlich 80% der Zahlen für die USA, in Brasilien hingegen bei 253%.

Tab. IV,29 Transporttarife nach Transportmitteln

	LKW	Bahn	Förderband	Binnenschiff	Hochsee- schiff
<u>Weltweit:</u> Brown et al. (in USD ¹⁹⁸³ /mt/km)	0,25	0,03	0,018	0,006	0,0005
<u>Für die USA:</u> US-Bureau of Mines (in USD ¹⁹⁹⁵ /mt/km)	0,05 - 0,75	0,0269 - 0,0271	k. A.	0,001 - 0,014	k. A.

(Brown et al., 1983, US-Bureau of Mines, 1995)

7. Einfuhrzölle

Bei der Einfuhr von Bauxit, Tonerde und Primäraluminium fallen in vielen Regionen Importzölle an. In die USA ist beispielsweise die Einfuhr von Bauxit und Tonerde frei. Für Primäraluminium wird aktuell allgemein ein Zollsatz von 2,6% erhoben, allerdings gibt es mit einer Reihe von Staaten Sonderabkommen. So wird die Einfuhr aus Kanada und dem karibischen Raum nicht mit Zöllen belastet (vgl. BFAI, 1998). Die Europäische Union erhebt zur Zeit auf Bauxit keine Zölle. Auf Tonerde wird allgemein ein Satz von 4 bis 5,5% verrechnet, auf Primäraluminium von 6%. Die Einfuhr aus den EFTA-Staaten (Norwegen, Island) und den AKP-Staaten ist frei (vgl. UNCTAD, 1996). Die höchsten Zollsätze hat Indien. Auf Bauxit werden 10%, auf Primäraluminium 25% Zoll und Sonderzoll erhoben (vgl. BFAI, 1998).

Tab. IV,30 gibt die allgemeinen Zolltarife der Regionen im Jahr 1995/96 wieder. Die Tarife sind in USD¹⁹⁹⁵ je Tonne eingeführten Gutes ausgedrückt, wobei Preise von 20 USD¹⁹⁹⁵ für eine Tonne Bauxit, 200 USD¹⁹⁹⁵ für eine Tonne Tonerde und 1600 USD¹⁹⁹⁵ für eine Tonne Primäraluminium unterstellt sind. Im Basisszenario wird davon ausgegangen, daß bis 2010 die Zolltarife um 20% zurückgehen. Im Modell können aufgrund des Regionenzuschnitts nicht alle Handelsabkommen erfaßt werden. Berücksichtigung finden aber die Zollunionen von USA und Kanada und von EU und EFTA-Staaten (Deutschland, Rest der EU, Rest von Westeuropa). Bei Austausch zwischen diesen Regionen werden im Modell keine Zölle verrechnet.

Tab. IV,30 Allgemeine regionale Zollltarife je Tonne Bauxit, Tonerde und Primäraluminium im Jahr 1995/96 (in USD¹⁹⁹⁵)

	Bauxit	Tonerde	Primäraluminium
USA	0	0	40
Kanada	0	0	0
Brasilien	1	10	140
Rest v. Lateinamerika	1	10	140
Deutschland	0	8	100
Rest der EU	0	8	100
Rest von Westeuropa	0	0	0
Frühere Sowjetunion	1	10	160
Rest von Osteuropa	1	10	80
Afrika	1	10	0
Vord./Mittl. Osten	1	10	80
Indien	2	50	400
China	1	36	140
Rest von Asien	1	0	0
Australien	0	0	0

(in Anlehnung an UNCTAD, 1996, BFAI, 1998)

8. Energieaufwendungen

Im Global-Modell werden zwei Energiegrößen bilanziert und zwar der Bedarf an Endenergie und der Aufwand an Primärenergie. Der Bedarf an Endenergie entspricht den Aufwendungen an Diesel, Heizöl, Erdgas, Kohle und Elektrizität entlang des Transformationsprozesses vom Bauxit in der Lagerstätte bis hin zum Primäraluminium im Verfügungsbereich des Endnachfragers. Der spezifische Endenergiebedarf ist eine Kenngröße für die Energieeffizienz in der Aluminiumindustrie. Die gewählten Techniken, ihre Implementation und Anwendung bestimmen seine Höhe. Der Aufwand an Primärenergie entspricht der Gesamtheit der primärenergetisch bewerteten Energieaufwendungen, die in Zusammenhang mit der Herstellung des Primäraluminiums stehen (Abb. IV,5). Mit der Elektrizitätsbereitstellung, der Brennstoffbereitstellung zur Erzeugung thermischer Energie, der Natronlauge- und Anodenproduktion werden die primärenergetisch wichtigsten Vorketten erfaßt. Die Vorketten anderer stofflicher Inputs (z. B. die Herstellung von Kalk oder Aluminiumfluorid) haben in diesem Zusammenhang kaum Bedeutung (vgl. Schreiber et al., 1999) und werden nicht berücksichtigt.

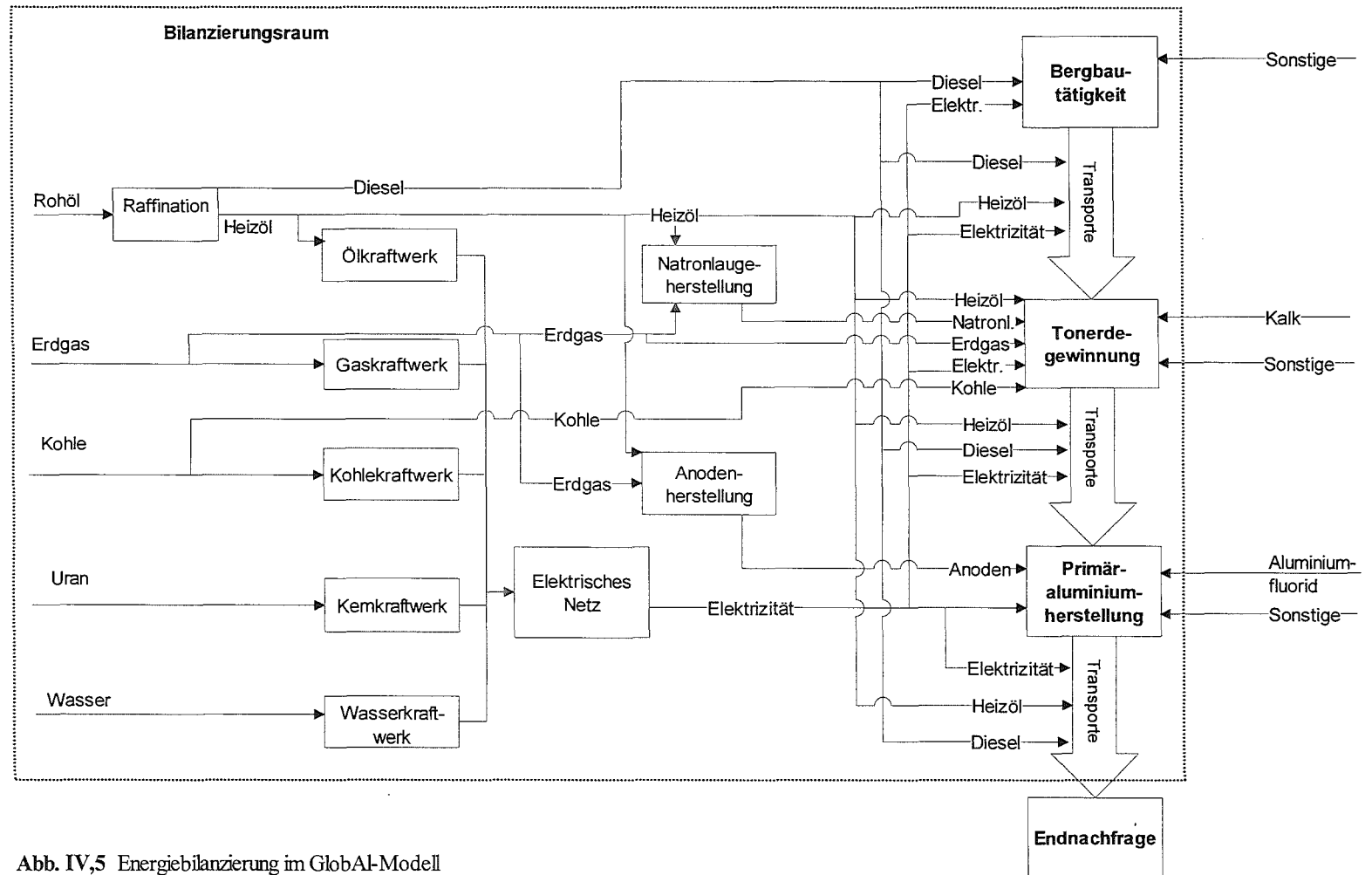


Abb. IV,5 Energiebilanzierung im GlobAI-Modell

8.1 Endenergiebedarf

Die spezifischen Aufwendungen an Endenergie der Produktionsstufen Bergbau, Gewinnung von Tonerde und Herstellung von Primäraluminium wurden bereits bei der Darstellung der Leistungsparameter ausgewiesen. In den Bergbau gehen Diesel und Elektrizität ein. Der Diesel wird insbesondere als Treibstoff für das schwere Gerät (z. B. SLKW, Bagger, Scraper) verwendet. Der Strom treibt u. a. die Förderbänder an. In der Produktion von Tonerde wird neben Elektrizität Heizöl, Kohle und Erdgas verwendet. Die fossilen Energieträger werden in erster Linie zum Erhitzen der Natronlauge für den Aufschluß und zur Deckung des Wärmebedarfs der Kalzinierungsöfen eingesetzt. Ihr Einsatzverhältnis ist regional unterschiedlich. In den USA und Kanada wurde 1995 beispielsweise nur Gas genutzt, in Afrika nur Öl und in Indien vorzugsweise Kohle (Tab. IV,31). Im Modell wird dieser Mix unverändert für das Jahr 2010 übernommen. Zur Herstellung von Primäraluminium werden große Mengen an elektrischer Energie benötigt.

Tab. IV,31 Einsatzverhältnis an Energieträgern bei der Erstellung der thermischen Energie für Aufschluß und Kalzination in den Regionen 1995

Regionen	Gas	Öl	Kohle
USA	1,00	0,00	0,00
Kanada	1,00	0,00	0,00
Brasilien	0,00	0,65	0,35
Rest von Lateinamerika	0,20	0,80	0,00
Deutschland	1,00	0,00	0,00
Rest der EU	0,05	0,95	0,00
Rest von Westeuropa ¹	(1,00)	(0,00)	(0,00)
Frühere Sowjetunion	0,40	0,35	0,25
Rest von Osteuropa ²	0,40	0,40	0,20
Afrika	0,00	1,00	0,00
Naher und Mittlerer Osten ²	0,40	0,40	0,20
Indien	0,00	0,30	0,70
China	0,00	0,70	0,30
Rest von Asien ²	0,40	0,40	0,20
Australien	0,60	0,10	0,30
Welt	0,40	0,40	0,20

1) Die genannten Daten werden für Neubauten angenommen.

2) Hierzu lagen keine Angaben vor. Daher werden die Weltdurchschnitte angenommen.

(Eigene Berechnungen auf Basis von CRU, 1996)

Der Endenergiebedarf für die Transportprozesse und die Art des Endenergeträgers hängt vom Transportmittel ab (Tab. IV,32). Im Weltdurchschnitt brauchte 1995 ein LKW fast 0,9 MJ je metrischer Tonne je Kilometer Transportleistung an Diesel. Die Bahn nutzt sowohl Strom wie Diesel. Im Weltdurchschnitt dominierte die Diesel getriebene Bahn mit etwa 60% Anteil. Das Förderband wird mit Strom, Binnenschiff und Hochseeschiff mit Heizöl betrieben. Das Hochseeschiff hat energetisch besonders günstige Werte. Im Modell werden die Werte für den Endenergiebedarf der einzelnen Transportmittel von 1995 für das Jahr 2010 unverändert übernommen.

Tab. IV,32 Energiebedarf für Transportprozesse im Weltdurchschnitt (in MJ/mt/km)

LKW (Diesel)	Bahn (elektrisch)	Bahn (Diesel)	Förderband (elektrisch)	Binnenschiff (Heizöl)	Hochseeschiff (Heizöl)
0,854	0,09 (oder: 0,025 kWh/mt/km)	0,299	0,061 (oder: 0,017 kWh/mt/km)	0,213	0,053

(IBH, 1999)

8.2 Energieaufwendungen wichtiger Vorketten

8.2.1 Bereitstellung elektrischer Energie

Bei der elektrischen Energie fallen Endenergie und Primärenergie in Abhängigkeit vom Mix der Energieträger zur Stromproduktion und von den Bereitstellungsnutzungsgraden der Energieträger auseinander.

Die Zuordnung der Stromgewinnung zu den Primärenergieträgern kann entweder über den regionalen Mix der Energieträger oder über den Vertragsmix erfolgen. Der regionale Mix der Energieträger basiert auf den in einer Region durchschnittlichen Anteilen der Energieträger an der Stromherstellung. Regionen, die aus nur einem Land bestehen, und solche, denen mehrere Länder zugeordnet sind, sind diesbezüglich gleichgestellt. Der Strommix einer Region wird über die Anteile der betrachteten Staaten an der Gesamtstromproduktion der Region bestimmt. In einigen Regionen werden nicht alle zu einer Region gehörigen Länder berücksichtigt. Mit Ausnahme der Region Rest von Osteuropa sind die bezüglich der regionalen Stromproduktion wesentlichen Länder mit einem Anteil von mindestens 90% erfasst. In der Region Rest von Osteuropa sind aufgrund der schlechten Datenlage nur etwas mehr als 60% der regionalen Stromproduktion berücksichtigt (Tab. IV,33). Der Vertragsmix spiegelt den Mix der Energieträger wider, der sich bei Strombezug entsprechend den Verträgen der jeweiligen Pro-

duktionsstufe mit Energieversorgern bzw. bei Eigenerzeugung des Stroms aus dem genutzten Kraftwerkspark ergibt. Findet sich in einer Region mehr als eine Hütte, erfolgt die Gewichtung über die Produktionskapazitäten der jeweiligen Hütten. Beim regionalen Mix erfolgt eine eher statistische Zuordnung der Produktionsstufe zum Kraftwerkspark. Der vertragliche Mix erlaubt hingegen eine eher ursächliche Zuordnung. Je größer der Strombedarf beispielsweise der Hütte, desto mehr Elektrizität muß von dem vertraglich verbundenen Kraftwerkspark zur Verfügung gestellt werden. Damit ist der ausgelöste Mehrbedarf an Primärenergie (und Emissionen) ursächlich mit der zusätzlichen Stromnachfrage der Hütte verknüpft.

Tab. IV,33 Erfaßte Länder beim Regionalmix

USA 1. USA	Rest von Westeuropa 21. Island
Kanada 2. Kanada	22. Norwegen 23. Schweiz
Brasilien 3. Brasilien	Frühere Sowjetunion 24. Frühere Sowjetunion
Rest von Lateinamerika 4. Argentinien 5. Mexiko 6. Venezuela	Rest von Osteuropa 25. Polen 26. Tschechische Republik 27. Ungarn
Deutschland 7. Deutschland	Afrika 28. Afrika
Rest der Europäischen Union 8. Belgien 9. Dänemark 10. Finnland 11. Frankreich 12. Griechenland 13. Großbritannien 14. Irland 15. Italien 16. Niederlande 17. Österreich 18. Portugal 19. Schweden 20. Spanien	Naher und Mittlerer Osten 29. Saudi-Arabien 30. Türkei Indien 31. Indien China 32. China Rest von Asien 33. Südkorea 34. Japan Australien 35. Australien

(Briem et al., 1999)

Der regionale Mix wird für die Produktionsstufen Bergbau und Herstellung von Tonerde sowie für die Transportprozesse und die Erstellung der stofflichen Vorprodukte Natronlauge und Anoden genutzt, weil keine Daten zum Vertragsmix vorliegen. Für die Berechnung des

Aufwandes an Primärenergie der Elektrolyse wird sowohl der regionale als auch der vertragliche Mix zugrunde gelegt.

Der regionale Mix der Energieträger zur Stromgewinnung war im Jahr 1995 in den Regionen äußerst unterschiedlich (Tab. IV,34). Während in Kanada, Brasilien oder dem Rest von Westeuropa die Wasserkraft dominierte, spielten in anderen Regionen die fossilen Energieträger die gewichtigere Rolle. In den USA, in Deutschland, Indien und China wurde insbesondere Kohle zur Stromherstellung verwendet. Bis zum Jahr 2010 werden keine signifikanten Änderungen im regionalen Mix der Energieträger in den Regionen erwartet (Tab. IV,34). In den entwickelten Regionen USA, Kanada, Deutschland und Rest der Europäischen Union wird von leichten Anteilsgewinnen von Gas in erster Linie zu Lasten der Kernenergie ausgegangen. In China und dem Rest von Asien hingegen nimmt der Anteil der Kernenergie an der Elektrizitätsgewinnung nach den vorliegenden Zahlen leicht zu. Deutlichere Anteilsgewinne von Strom aus Wasserkraft werden für den Rest von Lateinamerika und Afrika erwartet. Kohle nimmt in seiner Bedeutung als Energieträger für die Gewinnung von Elektrizität praktisch in allen Regionen ab.

Der vertragliche Mix für die Elektrolyse weicht zum Teil erheblich vom regionalen ab. So hat die Wasserkraft im Vertragsmix in (fast) allen Regionen eine größere Bedeutung. In Kanada, Brasilien, dem Rest von Lateinamerika und dem Rest von Asien wird nach den Vertragsbeziehungen sogar einzig Wasserkraft zur Herstellung des Stroms für die Elektrolyse verwendet. Auch in Osteuropa, im Nahen und Mittleren Osten spielt die Wasserkraft eine entscheidende Rolle im Vertragsmix. Kohle ist im Vertragsmix für die Elektrolyse weiterhin dominant in den USA, in Deutschland, Afrika, Indien, China und Australien (Tab. IV,35).

Für das Stützjahr 2010 wird davon ausgegangen, daß der Vertragsmix der Altanlagen einschließlich Erweiterungen in den Regionen beibehalten wird. Diese Annahme ist für Regionen wie z. B. Indien, in denen Hüttenbetreiber in der Regel eigene Kraftwerke betreiben, weniger problematisch als für Regionen wie z. B. Deutschland, in denen die Hütten ihren Strom, vertraglich möglicherweise nur kurz- bis mittelfristig an einen Energieversorger gebunden, über das Netz beziehen. Mit Blick auf die Neuanlagen wird auf die Studie von King (1998b) zurückgegriffen. Danach dominiert bei geplanten Neuanlagen zur Herstellung von Primäraluminium nach dem Vertragsmix die Wasserkraft in Kanada, im Rest von Lateinamerika und im Rest von Westeuropa. Eine Elektrizitätsversorgung der neuen Hütten basierend auf Gas ist für Afrika, für den Nahen und Mittleren Osten und für den Rest von Asien zu erwarten. Strom aus Kohle ist für Indien und Australien geplant (Tab. IV,36).

Tab. IV,34 Regionales Einsatzverhältnis an Energieträgern bei der Stromproduktion 1995 und 2010

Regionen	Regenerativ		Nuklear		Gas		Öl		Kohle	
	1995	2010	1995	2010	1995	2010	1995	2010	1995	2010
USA	0,12	0,10	0,20	0,15	0,15	0,27	0,02	0,02	0,51	0,48
Kanada	0,61	0,59	0,18	0,17	0,04	0,07	0,02	0,02	0,15	0,16
Brasilien	0,95	0,96	0,01	0,01	0,00	0,00	0,03	0,02	0,02	0,01
Rest v. Lateinamerika	0,30	0,43	0,06	0,07	0,25	0,18	0,33	0,25	0,06	0,06
Deutschland	0,06	0,07	0,29	0,25	0,08	0,12	0,02	0,01	0,55	0,54
Rest der EU	0,17	0,16	0,37	0,33	0,11	0,24	0,12	0,10	0,23	0,16
Rest v. Westeuropa	0,86	0,87	0,13	0,10	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
Frühere Sowjetunion	0,21	0,21	0,12	0,12	0,40	0,40	0,09	0,09	0,18	0,18
Rest von Osteuropa	0,02	0,02	0,12	0,12	0,02	0,03	0,03	0,04	0,80	0,78
Afrika	0,15	0,20	0,03	0,07	0,14	0,13	0,17	0,12	0,51	0,48
Naher/Mittlerer Osten	0,05	0,06	0,00	0,00	0,44	0,49	0,46	0,40	0,06	0,06
Indien	0,20	0,23	0,02	0,01	0,06	0,04	0,03	0,03	0,69	0,68
China	0,19	0,20	0,01	0,05	0,00	0,05	0,06	0,03	0,73	0,68
Rest von Asien	0,10	0,11	0,30	0,38	0,18	0,17	0,23	0,15	0,19	0,20
Australien	0,11	0,07	0,00	0,00	0,10	0,12	0,02	0,01	0,77	0,79
(Welt ^a)	(0,29)	(0,29)	(0,13)	(0,12)	(0,16)	(0,20)	(0,08)	(0,07)	(0,34)	(0,33)

a) gewichtet zu regionalen Stromaufwendungen für die Elektrolyse 1995

(Briem et al., 1999)

Tab. IV,35 Vertragliches Einsatzverhältnis an Energieträgern bei der Stromproduktion für die Erzeugung von Primäraluminium 1995

Regionen	Rege- nerativ	Nuklear	Gas	Öl	Kohle
USA	0,44	0,00	0,02	0,00	0,54
Kanada	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Brasilien	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Rest von Lateinamerika	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Deutschland	0,08	0,28	0,01	0,01	0,62
Rest der EU	0,29	0,27	0,16	0,06	0,22
Rest von Westeuropa	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Frühere Sowjetunion	0,80	0,02	0,00	0,00	0,18
Rest von Osteuropa	0,53	0,02	0,00	0,00	0,45
Afrika	0,29	0,00	0,11	0,02	0,58
Naher und Mittlerer Osten	0,50	0,00	0,50	0,00	0,00
Indien	0,20	0,00	0,01	0,01	0,78
China	0,18	0,00	0,00	0,15	0,67
Rest von Asien	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Australien	0,23	0,00	0,00	0,00	0,77
(Welt ^a)	0,60	0,03	0,04	0,01	0,31

a) gewichtet zu regionalen Stromaufwendungen für die Elektrolyse 1995 und zum Regionalmix 1995

(Briem et al., 1999)

Tab. IV,36 Vertragliches Einsatzverhältnis an Energieträgern bei der Stromproduktion für geplante Primäraluminiumhütten

Regionen	Rege- nerativ	Nuklear	Gas	Öl	Kohle
Kanada	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Rest von Lateinamerika	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Rest von Westeuropa	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Afrika	0,43	0,00	0,57	0,00	0,00
Naher und Mittlerer Osten	0,00	0,00	0,83	0,17	0,00
Indien	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
Rest von Asien	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00
Australien	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00

(Pawlek, 1998b, King, 1998b)

Der Bereitstellungsnutzungsgrad von Energieträgern zur Stromproduktion charakterisiert ähnlich einem Wirkungsgrad das Verhältnis von zur Verfügung gestellter Energie (z.B. Brennstoffe, Elektrizität) und dem hierzu notwendigen kumulierten Primärenergieaufwand. Er berücksichtigt damit die Wirkungsgrade der Kraftwerke, die Größe der Netzverluste sowie die Energieaufwendungen für die Gewinnung und Bereitstellung von Energieträgern. Für Strom aus Wasserkraftwerken werden für 1995 und 2010 in Abhängigkeit von den regionalen Netzverlusten Bereitstellungsnutzungsgrade von 80 bzw. 79% angenommen. Der Bereitstellungsnutzungsgrad von Strom aus Kernkraft wird je nach regionalen Netzverlusten mit 33 bzw. 32% veranschlagt. Die Bereitstellungsnutzungsgrade von Strom aus fossilen Brennstoffen lagen 1995 in den Regionen deutlich auseinander (Tab. IV,37). Der Bereitstellungsnutzungsgrad von Strom aus Gas war für Deutschland oder Kanada um etwa ein Drittel höher als der für die Frühere Sowjetunion oder den Rest von Osteuropa. Auch bei Strom aus Kohle war der Bereitstellungsnutzungsgrad für die Frühere Sowjetunion und den Rest von Osteuropa vergleichsweise niedrig. China und Indien hatten gleichfalls niedrige Werte.

Bis 2010 wird zum Teil eine deutliche Verbesserung der Bereitstellungsnutzungsgrade von Strom aus fossilen Brennstoffen erwartet (Tab. IV,37). Dies gilt insbesondere dann, wenn Kraftwerkskapazität des entsprechenden Energieträgers zugebaut und dafür neue Technik eingesetzt wird. Folglich ergeben sich in den USA, in Kanada, Deutschland und dem Rest der Europäischen Union in erster Linie Verbesserungen bei der Stromerzeugung mit Gaskraftwerken. Zudem rücken die rückständigen Regionen mit Blick auf die Bereitstellungsnutzungsgrade von Strom aus fossilen Energieträgern aufgrund des insgesamt stärkeren Zubaus näher an die der entwickelten Regionen heran.

8.2.2 Brennstoffbereitstellung zur Erzeugung thermischer Energie

Zur Brennstoffbereitstellung wird Energie benötigt. Dies wird mit dem Bereitstellungsnutzungsgrad für die Brennstoffbereitstellung ausgedrückt. Der Bereitstellungsgrad ist definiert als Verhältnis des Heizwertes des Stoffes am Einsatzort und dem Kumulierten Energieaufwand für die Bereitstellung des Brennstoffes, der sich aus dem Primärenergiegehalt des Stoffes sowie den Anlagen zur Bereitstellung zusammensetzt. Ins Modell gehen hierfür regional einheitlich die Werte des FfE (1993) ein (Tab. IV,38).

Tab. IV,37 Bereitstellungsnutzungsgrad von Strom aus unterschiedlichen Energieträgern 1995 und 2010

Regionen	Regenerativ		Nuklear		Gas		Öl		Kohle	
	1995	2010	1995	2010	1995	2010	1995	2010	1995	2010
USA	0,80	0,80	0,32	0,32	0,27	0,41	0,41	0,41	0,33	0,36
Kanada	0,80	0,80	0,33	0,33	0,33	0,43	0,37	0,41	0,31	0,35
Brasilien	0,79	0,79	0,32	0,32	0,22	0,30	0,29	0,35	0,24	0,28
Rest v. Lateinamerika	0,79	0,79	0,32	0,32	0,25	0,34	0,32	0,38	0,33	0,38
Deutschland	0,80	0,80	0,33	0,33	0,31	0,41	0,28	0,28	0,30	0,34
Rest der EU	0,80	0,80	0,33	0,33	0,32	0,44	0,35	0,40	0,31	0,31
Rest v. Westeuropa	0,80	0,80	0,33	0,33	0,40	0,47	0,42	0,42	0,33	0,36
Frühere Sowjetunion	0,79	0,79	0,32	0,32	0,22	0,30	0,23	0,31	0,24	0,28
Rest von Osteuropa	0,79	0,79	0,32	0,32	0,23	0,35	0,24	0,34	0,25	0,30
Afrika	0,80	0,80	0,32	0,32	0,22	0,34	0,36	0,40	0,33	0,37
Naher/Mittlerer Osten	0,80	0,80	0,00	0,00	0,28	0,40	0,30	0,39	0,36	0,39
Indien	0,79	0,79	0,32	0,32	0,30	0,38	0,34	0,41	0,24	0,33
China	0,80	0,80	0,32	0,32	0,22	0,47	0,25	0,34	0,24	0,35
Rest von Asien	0,80	0,80	0,33	0,33	0,33	0,40	0,38	0,38	0,33	0,37
Australien	0,80	0,80	0,00	0,00	0,32	0,41	0,31	0,37	0,33	0,37
(Welt ^a)	(0,80)	(0,80)	(0,32)	(0,32)	(0,25)	(0,35)	(0,30)	(0,37)	(0,29)	(0,39)

a) gewichtet zu regionalen Stromaufwendungen für die Elektrolyse 1995 und zum Regionalmix 1995
(Briem et al., 1999)

Tab. IV,38 Bereitstellungsnutzungsgrad der Brennstoffbereitstellung

Kohle	Gas	Öl	Diesel
0,98	0,90	0,90	0,88

(FfE, 1993)

8.2.3 Herstellung von Natronlauge und Anoden

Bei der Herstellung von Tonerde wird 50%ige Natronlauge verwendet. Zu ihrer Produktion werden im Weltdurchschnitt 1,14 GJ thermische Energie und 0,62 MWh elektrische Energie je Tonne aufgewendet (vgl. Bergner, 1994). Im Modell wird in Anlehnung an Schätzungen des IME (1999) davon ausgegangen, daß für die Produktion von Natronlauge weltweit die thermische Energie jeweils zu 50% aus Öl und zu 50% aus Gas gewonnen wird.

Die Anoden werden bei der Elektrolyse eingesetzt. Beim Söderberg-Verfahren erfolgt das Brennen im Bad. Bei den Prebaked-Technologien hingegen müssen die Anoden in einem Ofen vorgebrannt werden. Dafür werden im Weltdurchschnitt etwa 3,16 GJ thermische Energie und 0,16 MWh elektrische Energie je Tonne aufgewendet (IME, 1999, in Anlehnung an Pawlek, 1998a). Im Modell wird als Mix zur Erzeugung der thermischen Energie für die Anodenherstellung im Jahr 2010 weltweit 80% Öl und 20% Gas angenommen.

9. Emissionen klimarelevanter Gase

9.1 Kohlendioxid

Emissionen von Kohlendioxid entstehen im Stoffstrom des Primäraluminiums in erster Linie energiebedingt durch den Einsatz fossiler Brennstoffe. Zudem wird Kohlendioxid unmittelbar bei der Verhüttung freigesetzt: Der während der Elektrolyse an der Anode gebildete Sauerstoff setzt sich mit dem Kohlenstoff der Anode zu Kohlendioxid (und Kohlenmonoxid) um. Diese Kohlendioxidemissionen werden im folgenden als prozeßbedingt bezeichnet, obwohl die ihnen zugrunde liegende exotherme Reaktion auf den Wärmehaushalt und Energiebedarf der Elektrolysezelle erheblichen Einfluß hat und sie damit strenggenommen auch anteilig als energiebedingt verstanden werden können.

Für die fossilen Brennstoffe werden jeweils einheitliche gleiche untere Heizwerte und CO₂-Emissionsfaktoren angenommen (Tab. IV,39). Beide Größen sind Voraussetzung für die Berechnung der CO₂-Emissionsfaktoren bei der Erstellung thermischer Energie bzw. der Strombereitstellung.

Tab. IV,39 Untere Heizwerte und CO₂-Emissionsfaktoren der fossilen Brennstoffe

Brennstoffe	Unterer Heizwert (MJ / kg)	CO ₂ -Emissionsfaktoren [kg (CO ₂) / kg (fuel)]
Gas	42,3	2,13
Öl	40,5	3,08
Kohle	30,0	2,83

(Briem et al., 1999)

Die CO₂-Emissionsfaktoren bei der Erstellung thermischer Energie fallen aufgrund der unterschiedlichen Heizwerte, CO₂-Emissionsfaktoren der Brennstoffe und Wirkungsgrade der Energieerzeuger auseinander. Die Emissionen von Kohlendioxid je GJ Endenergie sind für Kohle am höchsten und für Gas am niedrigsten (Tab. IV,40).

Tab. IV,40 CO₂-Emissionsfaktoren bei der Erstellung thermischer Energie (t CO₂/GJ)

Kohle	Öl	Diesel	Gas
0,095	0,092	0,078	0,066

(BUWAL, 1996)

Bei der Elektrizitätsbereitstellung hängen die Kohlendioxidemissionen vom Endenergiebedarf, dem Mix der Energieträger zur Stromherstellung, den zugehörigen CO₂-Emissionsfaktoren und den Verteilungsverlusten ab. Bei der Kernenergie und der Wasserkraft, die den ganz überwiegenden Teil der regenerativen Energien ausmacht, wird kein Kohlendioxid gebildet. Die CO₂-Emissionsfaktoren von Strom aus fossilen Brennstoffen hängen ihrerseits wiederum von den Emissionsfaktoren der Brennstoffe, von deren unteren Heizwerten und den Wirkungsgraden der Kraftwerke ab.

Die Wirkungsgrade von fossilbefeuerten Kraftwerken lagen 1995 analog den Bereitstellungsnutzungsgraden von Strom aus fossilen Brennstoffen in den Regionen deutlich auseinander. Analog sind auch die CO₂-Faktoren der Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen 1995 in den Regionen stark unterschiedlich (Tab. IV,41). Sie gehen bis zum Jahr 2010 aufgrund der verbesserten Wirkungsgrade der Kraftwerke zurück. Insbesondere die rückständigen Regionen können ihre hohen CO₂-Faktoren reduzieren (Tab. IV,41).

Tab. IV,41 CO₂-Emissionsfaktoren bei der Strombereitstellung aus fossilen Brennstoffen 1995 und 2010 (t CO₂/MWh)

Regionen	Gas		Öl		Kohle	
	1995	2010	1995	2010	1995	2010
USA	0,61	0,40	0,60	0,60	1,00	0,90
Kanada	0,49	0,38	0,66	0,60	1,05	0,92
Brasilien	0,73	0,54	0,85	0,71	1,36	1,15
Rest v. Lateinamerika	0,66	0,48	0,77	0,65	0,97	0,86
Deutschland	0,52	0,40	0,89	0,89	1,10	0,97
Rest der EU	0,50	0,37	0,70	0,62	1,03	1,03
Rest v. Westeuropa	0,40	0,35	0,59	0,59	0,97	0,90
Frühere Sowjetunion	0,73	0,53	1,06	0,81	1,36	1,14
Rest von Osteuropa	0,71	0,46	1,01	0,72	1,32	1,10
Afrika	0,72	0,48	0,68	0,61	0,97	0,87
Naher/Mittlerer Osten	0,58	0,40	0,82	0,64	0,91	0,83
Indien	0,55	0,43	0,71	0,60	1,34	1,00
China	0,72	0,34	0,97	0,72	1,36	0,92
Rest von Asien	0,49	0,40	0,65	0,65	0,99	0,88
Australien	0,50	0,39	0,80	0,67	0,99	0,88
(Welt ^a)	(0,65)	(0,47)	(0,83)	(0,68)	(1,13)	(0,94)

a) gewichtet zu regionalen Stromaufwendungen für die Elektrolyse 1995 und zum Regionalmix 1995 (Briem et al., 1999)

Beim Anodenabbrand entsteht neben Kohlendioxid auch Kohlenmonoxid. Es wird vereinfacht davon ausgegangen, daß das gebildete Kohlenmonoxid in der Folge vollständig in der Atmosphäre zu Kohlendioxid umgesetzt wird. Dann lassen sich die Emissionen an Kohlendioxid stöchiometrisch aus dem Verlust an Kohlenstoff (Nettoanodenverbrauch) errechnen.

9.2 Perfluorierte Kohlenwasserstoffe

Im Produktionsprozeß des Primäraluminiums werden neben Kohlendioxid insbesondere perfluorierte Kohlenwasserstoffe (CF₄, C₂F₆) als klimarelevante Gase emittiert. Die perfluorierten Kohlenwasserstoffe entstehen bei der Elektrolyse während sogenannter Anodeneffekte. Obwohl im Gegensatz zu Kohlendioxid nur vergleichsweise kleine Mengen entstehen, haben diese aufgrund ihres großen Treibhauspotentials Bedeutung. In Anlehnung an Schwarz et al. (1996) wird CF₄ ein Global Warming Potential von 6500, C₂F₆ von 9200 Kilogramm CO₂-Äquivalent je emittiertes Kilogramm zugeschrieben.

Bei normal verlaufender Elektrolyse kommt es nicht zur Verbindung von Kohlenstoff mit Fluor und damit zur Bildung perfluorierter Kohlenwasserstoffe, da die Fluoridschmelze nur Flußmittel ist und an sich weder an der Kathoden- noch an der Anodenreaktion teilnimmt. Es bilden sich zwar durch Badverdampfung ständig fluorhaltige Abgase aus gasförmigem Fluorwasserstoff und aus staubförmigen Fluorsalzen, organische Fluoride bilden sich jedoch nicht. Diese entstehen erst beim Anodeneffekt, der allerdings in Intervallen von mehreren Stunden bis zu mehreren Tagen am Ofen regelmäßig eintritt.

Zum Anodeneffekt kommt es bei der Elektrolyse, wenn der Oxid-Gehalt im Elektrolyten unter eine Minimalkonzentration von ca. 1,5% absinkt. An sich sollte die Nachdosierung von Tonerde im Maße ihres Verbrauches erfolgen. Doch ist dieses nicht einfach, da das Oxid wegen der Gefahr der Schlammbildung nicht überdosiert werden darf.

Der Anodeneffekt ist durch einen starken Spannungsanstieg gekennzeichnet. Die Gasblasen unter den Anodenblöcken werden immer größer und der eingetauchte Teil der Anodenblöcke wird schließlich nicht mehr vom Bad benetzt, sondern von einer isolierenden Gasschicht umhüllt. Dadurch erhöht sich der elektrische Widerstand an der Schnittstelle Anode/Bad, was wegen der Konstanz der Stromstärke einen sprunghaften Spannungsanstieg verursacht. Die hohe Spannung in Verbindung mit vielen kleinen, die isolierende Gashülle durchschlagenden Lichtbögen und Funken zwischen Anodenboden und Bad reicht aus, um aus dem Elektrolyten Fluor freizusetzen, das mit dem Kohlenstoff der Anodenblöcke zu den perfluorierten Kohlenwasserstoffen reagiert.

Der Anodeneffekt hält an, solange das Anodengas als stabiler Film unter dem Anodentisch bleibt. Für seine Beendigung stellt die Nachdosierung und Nachverteilung der Tonerde im Elektrolyten den ersten Schritt dar. Zur Fortsetzung der Elektrolyse muß zudem die Gasschicht entfernt werden. Das geschieht bei modernen Öfen durch Hub-, Senk- und Schrägbewegung des Anodentisches. Die Dauer eines Anodeneffektes beträgt in der Regel 2 bis 4 Minuten (vgl. Schwarz et al., 1996).

Lange Zeit war der Anodeneffekt das Hauptsignal für die Neubeschickung der Zelle. Heute wird er allerdings überwiegend als Störfaktor betrachtet, da er mit verminderter Stromausbeute, mit Temperaturanstieg des Bades und mit Produktionsunterbrechung verbunden ist. Nur in seltenen Fällen ist der Anodeneffekt auch heute willkommen, da man mit ihm in der Lage ist, den aus Überdosierung entstandenen Bodenschlamm aufzulösen, die Anodenoberfläche zu glätten oder den Kohlenschaum im Bad (heruntergefallener Kohlenstaub von den Anoden) zu verbrennen.

Die deutliche Reduzierung der Anodeneffekte wurde mit der computergesteuerten Punktdosierung möglich. Ein Überschreiten sowohl der oberen Oxidgrenze mit der Gefahr der Verschlammung als auch der unteren Oxidgrenze mit dem Auftreten des Anodeneffekts kann weitgehend vermieden werden. Moderne PFPB-Anlagen in Deutschland kommen nach Schwarz et al. (1996) auf etwa 0,25 Anodeneffekte je Ofentag. Spezifisch sind damit etwa 0,000137 Tonnen CF_4 und 0,000014 Tonnen C_2F_6 je Tonne Primäraluminium verbunden. Die älteren Techniken, die mit einer Charge größere Mengen an Aluminiumoxid zuführen, überschreiten die obere und untere Grenze der Oxidkonzentration deutlich häufiger. Sie kommen auf über 0,8 Anodeneffekte je Anodentag. Die spezifischen Emissionen an perfluorierten Kohlenwasserstoffen sind entsprechend größer (Tab. IV,42).

Die spezifischen Emissionszahlen für die Techniken, die Schwarz et al. (1996) für Deutschland erhoben haben, werden auch auf die anderen Regionen angewendet, da entsprechende Daten fehlen. Dies ist eine nicht unproblematische Vereinfachung, hängt die Zahl der Anodeneffekte doch stark von der Bedienung ab.

Tab. IV,42 Spezifische Emissionen an perfluorierten Kohlenwasserstoffen in Abhängigkeit von der Technik (t/t Metall)

	VSS&HSS	CWPB	SWPB	PFPB	Inerte Anode	Titanborid-Kathode
CF_4	0,00055 ^a	0,00047	0,00055	0,000137	0	0,000137
C_2F_6	0,000055 ^a	0,000047	0,000055	0,000014	0	0,000014

a) Für VSS&HSS wurden vereinfacht die gleichen spezifischen Emissionen unterstellt wie für SWPB.

(Schwarz et al., 1996)

V. Szenarioergebnisse

Die Szenariorechnungen liefern ein detailliertes Bild über die zukünftigen Entwicklungen im globalen Stoffstrom des Primäraluminiums. Im Blickpunkt stehen die zukünftige Produktionsgeographie und der Außenhandel, die Veränderungen im Technikmix, der zukünftige Energiebedarf und die zu erwartenden Emissionen an klimarelevanten Gasen.

1. Basisszenario

1.1 Produktion und Außenhandel

1.1.1 Primäraluminium

Die weltweite Produktion von Primäraluminium expandiert nach den Modellrechnungen im Zeitraum 1995 bis 2010 um jährlich 2,1%, nach 1,3% im Zeitraum 1980 bis 1995. Dies ist zunächst überraschend, ist doch der Nachfragezuwachs im Zeitraum 1995 bis 2010 im Basisszenario mit 1,9% jährlich gleich dem Nachfragezuwachs des Zeitraums 1980 bis 1995 gesetzt worden. Die Unterschiede in den Nachfrage- und Produktionszuwächsen erklären sich durch die Lagerhaltung. 1980 war die Nachfrage deutlich geringer als die Produktion, es kam zu Lageraufbau. 1995 war die Nachfrage hingegen größer als die Produktion, Lagerbestände wurden abgebaut. Die Nachfrage wuchs daher von 1980 bis 1995 von einem niedrigeren Niveau aus schneller als die Produktion. Analog ist die Erklärung für den Zeitraum 1995 bis 2010. In GlobAl ergibt sich stets ein Gleichklang von Produktion und Nachfrage im Stützjahr. Da die Produktion im Referenzjahr 1995 geringer als die Nachfrage war, wächst sie von 1995 bis 2010 entsprechend schneller.

Regional setzt sich nach den Modellrechnungen der Trend der Verlagerung der Gewinnung von Primäraluminium hin zu Regionen mit billiger Energie, zumeist aus Wasserkraft, fort. Nordamerika gewinnt Produktionsanteile insbesondere aufgrund der weiterhin starken Expansion der Produktion in Kanada. Auch Westeuropa kann zulegen. Grund sind die hohen Wachstumsraten im Rest von Westeuropa (insbesondere Island, Norwegen) bei gleichzeitigen leichten Anteilsverlusten von Deutschland und dem Rest der Europäischen Union. Mittel- und Südamerika hält weitgehend seine Marktposition, wobei Brasilien nach Jahren starker Expansion nur noch verhalten zulegt. Der Rest von Osteuropa zeigt nur geringes Wachstum. Afrika erreicht ausgehend von einem geringen Niveau hohe Zuwachsraten und baut seinen Welt-

Tab. V,1 Produktion von Primäraluminium und Produktionsanteile 1980, 1995 und 2010 (Zahlen nach Basisszenario)

	Produktion			Durchschnittliche jährliche Wachstumsrate		Produktionsanteil		
	1980 (Mio. tpy)	1995 (Mio. tpy)	2010 (Mio. tpy)	1980-95 (%)	1995-2010 (%)	1980 (%)	1995 (%)	2010 (%)
Nordamerika	5,8	5,6	8,3	-0,2	2,6	35,8	28,4	30,7
USA	4,7	3,4	4,8	-2,1	2,3	29,0	17,3	17,7
Kanada	1,1	2,2	3,5	4,7	3,1	6,8	11,2	13,0
Mittel-/Südamerika	0,8	2,0	2,7	6,3	2,1	4,9	10,2	10,1
Brasilien	0,3	1,2	1,5	9,7	1,3	1,9	6,1	5,4
Rest v. Lateinamerika	0,5	0,8	1,3	3,2	3,2	3,1	4,1	4,8
Westeuropa	3,7	3,2	4,7	-1,0	2,5	22,8	16,2	17,3
Deutschland	0,8	0,6	0,7	-1,9	1,4	4,9	3,0	2,8
Rest der EU	2,1	1,6	2,1	-1,8	1,9	13,0	8,1	7,9
Rest v. Westeuropa	0,8	1,0	1,8	1,5	3,9	4,9	5,1	6,6
Osteuropa	3,0	3,4	3,8	0,8	0,7	18,5	17,3	14,0
Früh. Sowjetunion	2,4	3,1	3,5	1,7	0,8	14,8	15,7	13,0
Rest v. Osteuropa	0,6	0,3	0,3	-4,5	-0,3	3,7	1,5	1,1
Afrika	0,4	0,6	1,3	2,7	5,1	2,5	3,0	4,7
Asien	2,0	3,3	4,2	3,4	1,6	12,3	16,8	15,6
Naher/Mittlerer Osten	0,2	0,9	1,2	10,5	1,7	1,2	4,6	4,3
Indien	0,2	0,5	1,0	6,3	4,4	1,2	2,5	3,6
China	0,4	1,7	1,4	10,1	-1,1	2,5	8,6	5,3
Rest von Asien	1,2	0,2	0,7	-11,3	8,2	7,4	1,0	2,4
Australien	0,5	1,6	2,1	8,1	1,7	3,1	8,1	7,6
Welt	16,2	19,7	27,0	1,3	2,1	100,0	100,0	100,0

(Metallstatistik und Modellrechnungen)

marktanteil aus. Die Produktion von Primäraluminium in Asien und Australien wächst nur leicht (Tab. V,1).

Der Preis für Elektrizität und ihre Verfügbarkeit sind entscheidende Standortfaktoren mit Blick auf die Gewinnung von Primäraluminium. In bevorzugten Regionen, wie Kanada oder dem Rest von Asien, liegen die Strompreise um den Faktor 2 bis 3 unter denen von Regionen wie Deutschland oder dem Rest der Europäischen Union. Die Existenz von Altanlagen ist in den benachteiligten Regionen zwar in der Regel nicht gefährdet, die spezifischen Vollkosten von Neuanlagen in bevorzugten Regionen liegen zumeist über deren spezifischen Betriebskosten, allerdings erfolgen der Bau von Neuanlagen und die Kapazitätserweiterungen bestehender Anlagen in erster Linie in Regionen mit niedrigen Stromtarifen, so daß sich allmählich eine Verschiebung zugunsten dieser Regionen ergibt. So erreichen die Regionen mit ausgesprochen niedrigen Stromtarifen bei der Elektrolyse ($< 15 \text{ USD}^{1995}$) nach den Modellrechnungen von 1995 bis 2010 einen Kapazitätsausbau von über 60%, die mit niedrigen ($15 - 20 \text{ USD}^{1995}$) und mittleren ($20 - 25 \text{ USD}^{1995}$) kommen auf etwa 20%. Die Regionen mit hohen Stromtarifen ($> 25 \text{ USD}^{1995}$) weiten ihre Kapazität hingegen nur um gut 10% aus. Ohne Importzölle wäre die Kapazitätsausweitung der Regionen mit hohen Stromtarifen noch deutlich geringer (Tab. IV,19 und V,2).

Tab. V,2 Kapazitätsausbau zur Herstellung von Primäraluminium nach Regionen mit unterschiedlichen Stromtarifen von 1995 bis 2010 (Zahlen nach Basisszenario) (in % der Ausgangskapazität)

Regionen mit Stromtarifen	Basisszenario	Im Vergleich: Fall ohne Importzölle
$< 15 \text{ USD}^{1995}$ je MWh	63,5	63,5
$15 - 20 \text{ USD}^{1995}$ je MWh	18,7	29,9
$20 - 25 \text{ USD}^{1995}$ je MWh	20,0	20,0
$> 25 \text{ USD}^{1995}$ je MWh	12,2	3,5

(Modellrechnungen)

Die wachsenden Produktionsanteile von Regionen mit billiger Energie setzen sich in wachsenden Exportüberschüssen fort. Kanada, Brasilien, der Rest von Lateinamerika, der Rest von Westeuropa, die Frühere Sowjetunion und Afrika erreichen nach den Modellrechnungen steigende Überschüsse. Die mit Blick auf die Stromtarife eher benachteiligten Regionen wie die USA, Deutschland, der Rest der Europäischen Union, der Rest von Osteuropa oder auch der Rest von Asien führen fortgesetzt mehr Primäraluminium ein, als sie ausführen (Tab. V,3).

Der wachsende Anteil der gesamten regionalen Nettoexporte an der Weltproduktion zeigt, daß die Nachfrage und die Produktion von Primäraluminium zunehmend auseinanderfällt (Tab. V,9).

Tab. V,3 Außenhandel von Primäraluminium 1980, 1995 und 2010 (Zahlen nach Basisszenario) (Mio. tpy)

Regionen	1980		1995		2010	
	Produktion	Nettohandel	Produktion	Nettohandel	Produktion	Nettohandel
Nordamerika	5,8	1,0	5,6	0,0	8,3	1,3
USA	4,7	0,2	3,4	-1,7	4,8	-1,5
Kanada	1,1	0,8	2,2	1,6	3,5	2,8
Mittel-/Südamerika	0,8	0,2	2,0	1,1	2,7	1,6
Brasilien	0,3	0,0	1,2	0,7	1,5	0,8
Rest v. Lateinam.	0,5	0,2	0,8	0,4	1,3	0,7
Westeuropa	3,7	-0,4	3,2	-2,1	4,7	-1,8
Deutschland	0,8	-0,5	0,6	-0,9	0,7	-1,0
Rest der EU	2,1	-0,3	1,6	-1,8	2,1	-2,1
Rest v. Westeuropa	0,8	0,4	1,0	0,6	1,8	1,2
Osteuropa	3,0	0,5	3,4	2,6	3,8	2,6
Früh. Sowjetunion	2,4	0,6	3,1	2,6	3,5	2,8
Rest v. Osteuropa	0,6	0,0	0,3	0,0	0,3	-0,2
Afrika	0,4	0,2	0,6	0,3	1,3	0,8
Asien	2,0	-0,9	3,3	-3,7	4,2	-6,0
Naher/Mittl. Osten	0,2	0,0	0,9	0,5	1,2	0,5
Indien	0,2	0,0	0,5	-0,1	1,0	0,0
China	0,4	-0,2	1,7	-0,2	1,4	-1,7
Rest von Asien	1,2	-0,8	0,2	-3,9	0,7	-4,8
Australien	0,5	0,3	1,6	1,2	2,1	1,6
Welt	16,2	(0,9^a)	19,7	(-0,5^a)	27,0	(0,0)

a) statistischer Fehler

(Metallstatistik und Modellrechnungen)

1.1.2 Tonerde

Bei Tonerde setzt sich aufgrund der großen Bedeutung der Transportkosten für Bauxit der Trend der Verlagerung der Produktion hin zu den Bergbauregionen fort. Nordamerika und Westeuropa verlieren als Regionen ohne nennenswerte Bauxitproduktion weiterhin Marktanteile. Mittel- und Südamerika, Australien und Asien gewinnen hingegen deutlich hinzu. Auch Afrika dehnt die Tonerdeproduktion aus und kehrt den negativen Trend der Jahre 1980 bis

Tab. V,4 Produktion von Tonerde und Produktionsanteile 1980, 1995 und 2010 (Zahlen nach Basisszenario)

	Produktion			Durchschnittliche jährliche Wachstumsrate		Produktionsanteil		
	1980 (Mio. tpy)	1995 (Mio. tpy)	2010 (Mio. tpy)	1980-95 (%)	1995-2010 (%)	1980 (%)	1995 (%)	2010 (%)
Nordamerika	8,2	5,6	5,9	-2,5	0,3	23,4	13,0	9,9
USA	7,0	4,5	4,2	-2,9	-0,5	20,0	10,5	7,1
Kanada	1,2	1,1	1,7	-0,6	2,7	3,4	2,6	2,8
Mittel-/Südamerika	4,6	8,5	12,7	4,2	2,7	13,1	19,8	21,7
Brasilien	0,5	2,1	3,0	10,0	2,4	1,4	4,9	5,1
Rest v. Lateinamerika	4,1	6,4	9,8	3,0	2,8	11,7	14,9	16,6
Westeuropa	4,6	5,3	5,0	0,9	-0,3	13,1	12,3	8,6
Deutschland	1,7	1,0	1,1	-3,5	0,4	4,9	2,3	1,8
Rest der EU	2,9	4,3	4,0	2,7	-0,5	8,3	10,0	6,8
Rest v. Westeuropa	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Osteuropa	6,0	5,2	7,0	-0,9	2,0	17,1	12,1	11,9
Früh. Sowjetunion	3,3	4,5	6,3	2,1	2,3	9,4	10,5	10,8
Rest v. Osteuropa	2,7	0,7	0,7	-8,6	-0,4	7,7	1,6	1,1
Afrika	0,7	0,6	0,9	-1,0	3,0	2,0	1,4	1,6
Asien	3,7	4,7	8,5	1,6	4,0	10,6	10,9	14,4
Naher/Mittlerer Osten	0,1	0,2	0,4	4,7	4,4	0,3	0,5	0,6
Indien	0,5	1,7	2,1	8,5	1,4	1,4	4,0	3,6
China	0,8	2,1	3,5	6,6	3,5	2,3	4,9	5,9
Rest von Asien	2,3	0,7	2,5	-7,6	8,8	6,6	1,6	4,2
Australien	7,2	13,1	18,8	4,1	2,4	20,6	30,5	32,0
Welt	35,0	43,0	58,8	1,4	2,1	100,0	100,0	100,0

(Metallstatistik und Modellrechnungen)

1995 um. Die Frühere Sowjetunion erreicht einen weiterhin wachsenden Produktionsanteil. Die Produktion im Rest von Osteuropa bleibt rückläufig (Tab. V,4).

Die Bevorzugung von Regionen mit eigener Bauxitproduktion verdeutlichen die folgenden Zahlen: Regionen, die zu über 50 Prozent Bauxite aus anderen Regionen verarbeiten (USA, Kanada, Deutschland, Rest der Europäischen Union, Rest von Westeuropa) und sich damit hohen spezifischen Transportkosten gegenüber sehen, können nach den Modellrechnungen ihre Produktion von 1995 bis 2010 nicht ausdehnen, von 1980 bis 1995 war sie sogar um 14,8% geschrumpft. Regionen mit einem niedrigeren Importanteil bzw. Exportüberschüssen bei Bauxit hingegen erhöhen ihre Produktion um 49,3%, nach einer Zunahme um 44,6% von 1980 bis 1995.

Tab. V,5 Außenhandel von Tonerde 1980, 1994 und 2010 (Zahlen nach Basisszenario) (Mio. tpy)

Regionen	1980		1994		2010	
	Produktion	Nettohandel	Produktion	Nettohandel	Produktion	Nettohandel
Nordamerika	8,0	-4,4	6,0	-5,2	5,9	-11,9
USA	6,8	-3,5	4,9	-2,0	4,2	-6,5
Kanada	1,2	-0,9	1,2	-3,3	1,7	-5,4
Mittel-/Südamerika	4,7	3,0	8,2	4,2	12,7	7,1
Brasilien	0,5	-0,1	1,9	-0,4	3,0	0,0
Rest v. Lateinam.	4,2	3,1	6,3	4,6	9,8	7,1
Westeuropa	4,5	-3,7	5,2	-1,7	5,0	-5,5
Deutschland	1,7	-0,1	0,9	-0,1	1,1	-0,8
Rest der EU	2,8	-1,8	4,2	0,4	4,0	-1,1
Rest v. Westeuropa	0,0	-1,8	0,0	-2,0	0,0	-3,6
Osteuropa	5,8	-0,2	4,6	0,0	7,0	-0,8
Früh. Sowjetunion	3,3	-1,2	4,0	0,0	6,3	-0,8
Rest v. Osteuropa	2,6	1,0	0,6	-0,1	0,7	0,0
Afrika	0,7	0,1	0,6	-0,2	0,9	-1,6
Asien	3,7	-0,3	4,1	-3,1	8,5	-2,0
Naher/Mittl. Osten	0,1	0,1	0,2	-1,0	0,4	-2,0
Indien	0,5	0,1	1,5	0,5	2,1	0,0
China	0,8	0,0	1,8	-1,9	3,5	0,0
Rest von Asien	2,3	-0,5	0,7	-0,7	2,5	0,0
Australien	7,2	6,7	12,8	10,1	18,8	14,7
Welt	34,6	(1,2^a)	41,6	(4,1^a)	58,8	0,0

a) statistischer Fehler

(Metallstatistik; World Metal Statistics und Modellrechnungen)

Der interregionale Handel von Tonerde ist eine Reaktion auf die regionalen Produktionen und Nachfragen. Die Entwicklung der regionalen Produktion von Tonerde erklärt sich aus der regionenspezifischen Kostensituation. Die regionale Nachfrage nach Tonerde leitet sich aus der Entwicklung der Zahlen der Herstellung von Primäraluminium in der Region ab. Der Trend zunehmender Importüberschüsse bei Tonerde setzt sich nach den Modellrechnungen für Kanada, Deutschland und den Rest von Westeuropa fort. Der Rest der Europäischen Union und die USA zeigen, nach einer Verbesserung der Außenhandelsposition insbesondere aufgrund stark rückläufiger Nachfrage bis 1994, in der Zukunft wieder wachsende Importüberschüsse aufgrund der anziehenden Nachfrage nach Tonerde. Als Nettoexporteur spielt, wie bisher, neben Australien nur der Rest von Lateinamerika eine Rolle. Afrika wird, trotz reicher Bauxitvorkommen, zum Nettoimporteur von Tonerde. Der Grund ist, daß es wegen der guten Wettbewerbsposition im Primäraluminiumbereich zu Kapazitätserweiterungen bei den Hütten kommt. Die Kapazitätserweiterungen der bestehenden Anlagen zur Tonerdeherstellung reichen nicht aus, um die damit verbundene Zusatznachfrage nach Tonerde zu decken. Als Standort von Neuanlagen ist Afrika nicht zuletzt aufgrund der hohen Kosten des hier für das Bayer-Verfahren eingesetzten Energieträgers Öl wiederum zu wenig attraktiv (Tab. V,5).

1.1.3 Bauxit

Für Bauxit ergibt sich nach den Modellrechnungen eine Zunahme der weltweiten Produktion um 2,3% jährlich für den Zeitraum 1995 bis 2010, nach 1,3% jährlich im Zeitraum 1980 bis 1995. Australiens Bauxitbergbau legt aufgrund der hervorragenden Kostensituation weiterhin stark zu. Australien gewinnt zu Lasten fast aller anderer Regionen Marktanteile. Die Kostenvorteile liegen in der politischen Stabilität (kein Risikozuschlag für Investitionen), den günstigen bergbaulichen Voraussetzungen (flächenhafte Lagerstättenausprägung bei geringem Überdeckungsgrad), die eine weitgehende Mechanisierung zulassen, und der verkehrsgünstigen Lage der Minen zumeist nahe dem Meer begründet. Indien und China dehnen nach stürmischen Zuwächsen im Zeitraum 1980 bis 1995 ihre Bauxitproduktion nur mehr verhalten aus und müssen leichte Marktanteilsverluste hinnehmen. Die Produktion von Bauxit in der Früheren Sowjetunion erholt sich merklich, die im Rest von Osteuropa geht aufgrund der ungünstigen Kostenstruktur weiterhin stark zurück. Mittel- und Südamerika bleibt weiterhin ein starker Weltmarktproduzent, der Weltmarktanteil ist allerdings leicht rückläufig (Tab. V,6).

Nordamerika, Westeuropa, Osteuropa und der Rest von Asien weisen starke Importüberschüsse für Bauxit aus. Die Importüberschüsse gehen für viele dieser Regionen allerdings zurück. Grund ist die zunehmende Weiterverarbeitung des Bauxits in den Bergbauregionen, so daß im

Tab. V,6 Produktion von Bauxit und Produktionsanteile 1980, 1995 und 2010 (Zahlen nach Basisszenario)

	Produktion			Durchschnittliche jährliche Wachstumsrate		Produktionsanteil		
	1980 (Mio. tpy)	1995 (Mio. tpy)	2010 (Mio. tpy)	1980-95 (%)	1995-2010 (%)	1980 (%)	1995 (%)	2010 (%)
Nordamerika	1,6	0,0	0,0	-100,0	0,0	1,7	0,0	0,0
USA	1,6	0,0	0,0	-100,0	0,0	1,7	0,0	0,0
Kanada	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Mittel-/Südamerika	25,1	32,2	42,3	1,7	1,8	27,1	28,5	26,6
Brasilien	4,2	10,2	11,8	6,1	1,0	4,5	9,0	7,4
Rest v. Lateinamerika	20,9	22	30,6	0,3	2,2	22,6	19,5	19,2
Westeuropa	5,2	2,2	2,5	-5,6	0,9	5,6	1,9	1,6
Deutschland	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Rest der EU	5,2	2,2	2,5	-5,6	0,9	5,6	1,9	1,6
Rest v. Westeuropa	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Osteuropa	13,2	7,5	10,7	-3,7	2,4	14,3	6,6	6,7
Früh. Sowjetunion	6,4	6,1	10,4	-0,3	3,6	6,9	5,4	6,5
Rest v. Osteuropa	6,8	1,4	0,3	-10,0	-9,2	7,3	1,2	0,2
Afrika	14,3	14,9	20,4	0,3	2,1	15,4	13,2	12,8
Asien	6,0	13,4	17,1	5,5	1,7	6,5	11,9	10,8
Naher/Mittlerer Osten	0,4	0,6	0,8	2,7	1,9	0,4	0,5	0,5
Indien	1,7	5,2	6,6	7,7	1,6	1,8	4,6	4,1
China	1,7	6,5	7,6	9,4	1,0	1,8	5,8	4,8
Rest von Asien	2,2	1,1	2,2	-4,5	4,7	2,4	1,0	1,4
Australien	27,2	42,7	65,9	3,1	2,9	29,4	37,8	41,5
Welt	92,6	112,9	159,1	1,3	2,3	100,0	100,0	100,0

(Metallstatistik und Modellrechnungen)

wachsendem Maße statt Bauxit das verarbeitete Produkt Tonerde interregional gehandelt wird. Die interregionalen Nettoexporte von Bauxit werden zunehmend von Afrika bestritten, dem der Aufbau einer eigenen umfassenden Produktion von Tonerde nicht gelingt. Weiterhin spielt Australien eine große Rolle, die Bedeutung von Lateinamerika als Nettoexporteur von Bauxit geht hingegen zurück (Tab. V,7 und V,8). Insgesamt sinkt der Anteil der gesamten regionalen Nettoexporte an der Weltproduktion stark (Tab. V,9), während umgekehrt der Anteil der inländischen Weiterverarbeitung von Bauxiten in den betroffenen Regionen mit Ausnahme Afrikas und des Rest von Lateinamerikas, deren rückläufiger Anteil sich aber weder im Szenario niedriger noch im Szenario hoher Nachfrage bestätigt, zunimmt (Tab. V,10). Beides spiegelt den Trend der Verlagerung der Fabrikation von Tonerde hin zu den Bergbauaktivitäten wider.

Tab. V,7 Außenhandel von Bauxit 1980, 1994 und 2010 (Zahlen nach Basisszenario) (Mio. tpy)

Regionen	1980		1994		2010	
	Produktion	Nettohandel	Produktion	Nettohandel	Produktion	Nettohandel
Nordamerika	1,6	-17,7	0,0	-13,8	0,0	-12,8
USA	1,6	-14,2	0,0	-10,9	0,0	-9,5
Kanada	0,0	-3,5	0,0	-2,9	0,0	-3,3
Mittel-/Südamerika	25,1	13,2	30,9	10,0	42,3	5,5
Brasilien	4,2	2,7	8,7	4,4	11,8	3,2
Rest v. Lateinam.	20,9	10,6	22,2	5,5	30,6	2,3
Westeuropa	5,2	-6,7	2,3	-9,7	2,5	-8,0
Deutschland	0,0	-4,3	0,0	-2,2	0,0	-2,4
Rest der EU	5,2	-2,4	2,3	-7,4	2,5	-5,6
Rest v. Westeuropa	0	0,0	0	0,0	0,0	0,0
Osteuropa	13,2	-4,5	7,3	-6,5	10,7	-6,3
Früh. Sowjetunion	6,4	-3,5	6,1	-5,6	10,4	-4,9
Rest v. Osteuropa	6,8	-1,0	1,2	-0,9	0,3	-1,3
Afrika	14,3	10,2	15,5	11,6	20,4	17,1
Asien	6,0	-3,6	13,4	-0,6	17,1	-3,3
Naher/Mittl. Osten	0,4	0,0	0,6	-0,1	0,8	0,0
Indien	1,7	0,0	4,8	0,1	6,6	0,0
China	1,7	0,5	6,5	0,3	7,6	0,0
Rest von Asien	2,2	-4,1	1,5	-0,8	2,2	-3,3
Australien	27,2	5,8	42,2	4,9	65,9	7,7
Welt	92,6	(-3,3^a)	111,6	(-4,2^a)	159,1	0,0

a) statistischer Fehler

(Metallstatistik; World Metal Statistics und Modellrechnungen)

Tab. V,8 Anteil der Regionen an den gesamten Nettoexporten bzw. Nettoimporten von Bauxit 1980, 1994 und 2010 (Zahlen nach Basisszenario) (%)

Regionen	Nettoexporte			Nettoimporte		
	1980	1994	2010	1980	1994	2010
USA	-	-	-	43,0	35,2	31,2
Kanada	-	-	-	10,6	9,5	10,9
Brasilien	8,9	16,5	10,4	-	-	-
Rest v. Lateinamerika	35,4	20,7	7,6	-	-	-
Deutschland	-	-	-	12,9	7,3	7,8
Rest der EU	-	-	-	7,3	23,8	18,4
Rest von Westeuropa	-	-	-	-	-	-
Frühere Sowjetunion	-	-	-	10,6	18,2	16,3
Osteuropa	-	-	-	3,1	2,9	4,4
Afrika	34,3	43,2	56,5	-	-	-
Vord./Mittl. Osten	-	-	-	-	-	-
Indien	0,1	0,4	-	-	-	-
China	1,8	1,0	-	-	-	-
Rest von Asien	-	-	-	12,5	2,7	11,0
Australien	19,5	18,2	25,5	-	-	-
Welt (in Mio. tpy)	29,8	26,8	30,3	33,1	30,3	30,3

(Metallstatistik; World Metal Statistics und Modellrechnungen)

Tab. V,9 Anteil der gesamten regionalen Nettoexporte an der Weltproduktion 1980, 1994/95 und 2010 (Zahlen nach Basisszenario) (%)

	1980	1994/95	2010
Bauxit	32,2	24,0	19,1
Tonerde	31,8	37,7	37,1
Primäraluminium	16,3	40,2	41,9

(Metallstatistik; World Metal Statistics und Modellrechnungen)

Tab. V,10 Anteil der inländischen Weiterverarbeitung gemessen an der Produktion von Regionen mit Bauxitexporten 1980, 1994 und 2010 (Zahlen nach Basisszenario) (%)

	1980	1994	2010
Brasilien	36,5	49,1	87,1
Rest v. Lateinamerika	49,5	75,0	73,1
Afrika	28,5	25,5	16,2
Vord./Mittl. Osten	97,7	100,0	100,0
Indien	97,4	98,0	100,0
China	68,9	95,8	100,0
Australien	78,7	88,2	88,3

(Metallstatistik; World Metal Statistics und Modellrechnungen)

1.1.4 Nur allmähliche Verschiebungen in der Produktionsgeographie

Für die Projektionsperiode 1995 bis 2010 ergeben sich nach den Modellrechnungen (siehe Tab. V,1, V,4 und V,6) nur allmähliche Verschiebungen in der Produktionsgeographie. Grund ist die gute Wettbewerbsposition alter Kapazität. Durch Up-Grading können alte Anlagen fast die gleichen Leistungsparameter erreichen wie neue Anlagen bei allerdings weitaus niedrigeren Investitionskosten. Dadurch ist Up-Grading zumeist eine ökonomische Alternative auch wenn die Preissituation einer Region z. B. aufgrund hoher Löhne oder Energiekosten nachteilig ist. Veränderungen in der Produktionsgeographie ergeben sich daher weniger aufgrund der Verdrängung alter Kapazität in benachteiligten Regionen. Vielmehr ist es die zusätzliche Nachfrage, die durch die bestehende Kapazität nicht befriedigt werden kann, die zum Aufbau neuer Kapazität in bevorzugten Regionen und damit zu sukzessiven Produktionsverlagerungen führt.

Die Veränderungen in der Produktionsgeographie sind in der Periode 1980 bis 1995 etwas größer gewesen als die, die sich für den Projektionszeitraum ergeben. Zwei Gründe sind hierfür in erster Linie entscheidend: Zum einen setzten im Zeitraum 1980 bis 1995 eine ganze Reihe von Ländern eine Transformation ihrer Volkswirtschaften in Richtung Marktwirtschaft in Gang und bemühten sich um eine stärkere Weltmarktintegration. Kapazität zur Produktion von Produkten der Kette des Primäraluminiums erwies sich in einigen dieser Regionen wie im Rest von Osteuropa aber auch zum Teil in der Früheren Sowjetunion als nicht weltmarktfähig und mußte geschlossen werden. Zum anderen fallen in Global erwartete und tatsächliche Nachfrageentwicklung stets zusammen. Kapazitätserweiterungen bestehender Anlagen oder Neubauten ergeben sich nur, wenn die Vollkosten gedeckt sind. Tatsächlich wurde die Nachfrage nach Primäraluminium in den achtziger und Anfang der neunziger Jahre von den Akteu-

ren aber eher überschätzt. Dadurch wurde zuviel neue Kapazität aufgebaut. Die drängte dann alte Kapazität in benachteiligten Regionen aus dem Markt ohne allerdings jemals eine Deckung der Vollkosten erreichen zu müssen.

Insgesamt gibt GlobAl einen Mittelwert der zu erwartenden Veränderungen in der Produktionsgeographie an. Ist die von den Akteuren erwartete Entwicklung der Nachfrage wie in der Periode 1980 bis 1995 höher als die tatsächliche, dann unterschätzt das Modell die Veränderungen. Ist die erwartete Entwicklung aber niedriger als die tatsächliche, dann werden die Veränderungen überschätzt. Profitable Kapazitätserweiterungen bestehender Anlagen und der Bau von Neuanlagen in bevorzugten Regionen werden nicht im möglichen Maß vorgenommen. Alte eigentlich nicht mehr konkurrenzfähige Kapazität in benachteiligten Regionen hingegen bleibt bestehen.

1.2 Technikmix und Investitionsstrategien

In GlobAl ist gleichzeitig der Wettbewerb von Regionen, von Techniken und von Investitionsstrategien abgebildet. Der Wettbewerbsprozeß zwischen den Regionen schlägt sich in veränderten Produktionszahlen und Marktanteilen nieder. Der Wettbewerb von Techniken ist im veränderten Technikmix zur Produktion von Primäraluminium und Tonerde abzulesen. Wurden 1995 noch mehr als 30% des Primäraluminiums mit Söderberg-Anlagen produziert, sind nach den Modellrechnungen 2010 diese Anlagen komplett entweder mit PFPB nachgerüstet oder geschlossen. Auch CWPB und SWPB-Anlagen verlieren an Bedeutung. Über 90% der Produktion wird 2010 mit PFPB-Technik bestritten (Tab. V,11). In der Tonerdeproduktion dominiert weiterhin die Autoklaven-Technik. Mit dem Rohrreaktor werden 2010 etwas mehr als 5% der Produktion bestritten, nach 2% im Jahr 1995 (Tab. V,11). Im relativ geringen Kapazitätswachstum beim Rohrreaktor spiegelt sich die geringe Bedeutung von Neuanlagen bei der Gewinnung von Tonerde wider, die annahmegemäß die Rohrreaktor-Technik nutzen. Nach den Modellrechnungen wird aufgrund der energetischen Vorteile und damit Kostenvorteile nur noch Wirbelschicht für die Kalzination verwendet, der Drehrohrofen verschwindet demnach.

Der Wettbewerb zwischen den Investitionsstrategien, also zwischen Altanlagen, aufgerüsteten Altanlagen, Kapazitätserweiterungen bestehender Anlagen und Neubauten, ist aus deren veränderter Bedeutung bei der Produktion abzulesen. Nach den Modellrechnungen werden für die Herstellung von Primäraluminium 2010 zu einem guten Teil Altanlagen oder aufgerüstete Altanlagen genutzt (Tab. V,12). Nur ein geringer Teil der Altanlagen wird stillgelegt bzw.

Tab. V,11 Genutzte Kapazität zur Produktion von Primäraluminium und Tonerde nach Techniken in den Regionen 2010 (Mio. tpy) (Zahlen nach Basisszenario)

Regionen	Primäraluminium					Tonerde			
	VSS&HSS	CWPB	SWPB	PFPB	Gesamt	Niedertem- peraturauto- klav	Hochtempe- raturauto- klav	Rohrreaktor	Gesamt
Nordamerika	0,0	0,0	0,6	7,7	8,3	0,6	5,3	0,0	5,9
USA	0,0	0,0	0,5	4,3	4,8	0,6	3,6	0,0	4,2
Kanada	0,0	0,0	0,2	3,3	3,5	0,0	1,7	0,0	1,7
Mittel-/Südamerika	0,0	0,0	0,0	2,7	2,7	10,8	2,0	0,0	12,7
Brasilien	0,0	0,0	0,0	1,5	1,5	3,0	0,0	0,0	3,0
Rest v. Lateinam.	0,0	0,0	0,0	1,3	1,3	7,8	2,0	0,0	9,8
Westeuropa	0,0	0,1	0,0	4,5	4,7	0,0	4,0	1,1	5,0
Deutschland	0,0	0,0	0,0	0,7	0,7	0,0	0,0	1,1	1,1
Rest der EU	0,0	0,1	0,0	2,0	2,1	0,0	4,0	0,0	4,0
Rest v. Westeuropa	0,0	0,0	0,0	1,8	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0
Osteuropa	0,0	0,0	0,3	3,5	3,8	3,8	2,4	0,8	7,0
Früh. Sowjetunion	0,0	0,0	0,0	3,5	3,5	3,8	1,8	0,7	6,3
Rest v. Osteuropa	0,0	0,0	0,3	0,0	0,3	0,0	0,6	0,1	0,7
Afrika	0,0	0,6	0,0	0,7	1,3	0,9	0,0	0,0	0,9
Asien	0,0	0,2	0,0	4,0	4,2	0,0	7,2	1,3	8,5
Naher/Mittl. Osten	0,0	0,0	0,0	1,2	1,2	0,0	0,3	0,1	0,4
Indien	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	2,1	0,0	2,1
China	0,0	0,0	0,0	1,4	1,4	0,0	3,5	0,0	3,5
Rest von Asien	0,0	0,2	0,0	0,4	0,7	0,0	1,3	1,2	2,5
Australien	0,0	0,0	0,0	2,1	2,1	14,1	4,6	0,0	18,8
Welt	0,0	1,0	0,9	25,1	27,0	30,3	25,4	3,2	58,8
(vH)	(0,0)	(3,6)	(3,3)	(93,1)	(100)	(51,5)	(43,1)	(5,4)	(100)

(Modellrechnungen)

Tab. V,12 Kapazität zur Produktion von Primäraluminium und Tonerde nach Investitionsstrategien in den Regionen 2010 (Mio. tpy) (Zahlen nach Basisszenario)

Regionen	Primäraluminium					Tonerde				
	Ungenutzte Kapazität	Genutzte Kapazität Altanlagen	Kapazität aus Brownfield Expansion	Kapazität aus Greenfield Expansion	Gesamt	Ungenutzte Kapazität	Genutzte Kapazität Altanlagen	Kapazität aus Brownfield Expansion	Kapazität aus Greenfield Expansion	Gesamt
Nordamerika	0,0	6,3	1,3	0,8	8,3	1,1	5,4	0,5	0,0	6,9
USA	0,0	4,0	0,8	0,0	4,8	1,1	4,2	0,0	0,0	5,3
Kanada	0,0	2,3	0,5	0,8	3,5	0,0	1,2	0,5	0,0	1,7
Mittel-/Südamerika	0,0	2,2	0,4	0,1	2,7	0,0	10,0	2,8	0,0	12,7
Brasilien	0,0	1,2	0,2	0,0	1,5	0,0	3,0	0,0	0,0	3,0
Rest v. Lateinam.	0,0	1,0	0,2	0,1	1,3	0,0	7,0	2,7	0,0	9,8
Westeuropa	0,0	3,5	0,7	0,5	4,7	0,6	4,7	0,3	0,0	5,6
Deutschland	0,0	0,6	0,1	0,0	0,7	0,0	0,8	0,3	0,0	1,1
Rest der EU	0,0	1,8	0,4	0,0	2,1	0,6	4,0	0,0	0,0	4,6
Rest v. Westeuropa	0,0	1,1	0,2	0,5	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Osteuropa	0,2	3,8	0,0	0,0	4,0	0,6	4,7	1,6	0,7	7,5
Früh. Sowjetunion	0,0	3,5	0,0	0,0	3,5	0,0	4,0	1,6	0,7	6,3
Rest v. Osteuropa	0,2	0,3	0,0	0,0	0,5	0,6	0,7	0,0	0,0	1,2
Afrika	0,0	1,1	0,2	0,0	1,3	0,0	0,7	0,3	0,0	0,9
Asien	0,5	3,3	0,4	0,5	4,7	0,0	5,3	1,9	1,3	8,5
Naher/Mittl. Osten	0,0	1,0	0,2	0,0	1,2	0,0	0,2	0,1	0,1	0,4
Indien	0,0	0,6	0,1	0,2	1,0	0,0	1,6	0,5	0,0	2,1
China	0,5	1,4	0,0	0,0	1,9	0,0	2,5	1,0	0,0	3,5
Rest von Asien	0,0	0,3	0,1	0,4	0,7	0,0	0,9	0,4	1,2	2,5
Australien	0,0	1,7	0,3	0,0	2,1	0,0	13,4	5,4	0,0	18,8
Welt (vH)	0,7 (2,4)	21,8 (78,8)	3,3 (12,0)	1,9 (6,8)	27,6 (100,0)	2,2 (3,6)	44,1 (72,3)	12,7 (20,8)	2,0 (3,2)	61,0 (100)

(Modellrechnungen)

nicht mehr genutzt. Die offensichtlich gute Wettbewerbsposition der Altanlagen läßt starke Verschiebungen mit Blick auf die regionalen Produktionen nicht zu und stabilisiert in dieser Hinsicht das Modellergebnis. Die Tatsache, daß gleichzeitig der Kapazitätswachstum aus Brownfield Expansion den aus Greenfield Expansion übersteigt, erklärt weiterhin die nur allmählichen regionalen Verschiebungen. Ganz ähnlich ist die Situation bei der Fabrikation von Tonerde (Tab. V,12). Allerdings ist hier der Kapazitätsaufbau aus Neuanlagen noch deutlich geringer. Beim Bauxitbergbau wurde in Global nur zwischen alter und neuer Kapazität unterschieden. Auch hier zeigen sich die Wettbewerbsvorteile bestehender Kapazität. Nur etwa 7% der alten Kapazität wird stillgelegt bzw. nicht genutzt. Entsprechend wird zusätzliche Kapazität hauptsächlich für Zusatznachfrage geschaffen (Tab. V,13).

Tab. V,13 Kapazität zur Produktion von Bauxit nach Investitionsstrategien in den Regionen 2010 (Zahlen nach Basisszenario) (Mio. tpy)

Regionen	Ungenutzte Kapazität	Alte genutzte Kapazität	Neue Kapazität	Gesamt
Nordamerika	0,0	0,0	0,0	0,0
USA	0,0	0,0	0,0	0,0
Kanada	0,0	0,0	0,0	0,0
Mittel-/Südamerika	1,5	35,9	6,5	43,9
Brasilien	0,0	11,1	0,7	11,8
Rest v. Lateinam.	1,5	24,8	5,8	32,1
Westeuropa	0,0	2,5	0,0	2,5
Deutschland	0,0	0,0	0,0	0,0
Rest der EU	0,0	2,5	0,0	2,5
Rest v. Westeuropa	0,0	0,0	0,0	0,0
Osteuropa	7,0	8,3	2,4	17,7
Früh. Sowjetunion	0,0	8,0	2,4	10,4
Rest v. Osteuropa	7,0	0,3	0,0	7,3
Afrika	0,0	19,4	1,0	20,4
Asien	0,0	14,6	2,5	17,1
Naher/Mittl. Osten	0,0	0,8	0,0	0,8
Indien	0,0	5,1	1,5	6,6
China	0,0	6,5	1,1	7,6
Rest von Asien	0,0	2,2	0,0	2,2
Australien	0,0	47,1	18,8	65,9
Welt (vH)	8,5 (5,1)	127,8 (76,3)	31,3 (18,7)	167,6 (100,0)

(Modellrechnungen)

1.3 Energiebedarf

1.3.1 Endenergie

Die Gewinnung von Primäraluminium expandiert nach den Modellrechnungen im Zeitraum 1995 bis 2010 um 37% von 19,7 Millionen metrischen Tonnen auf 27,0 Millionen. Im Jahr 1995 wurden einschließlich der Vorketten Herstellung von Natronlauge und Anoden etwa 320 Millionen MWh an Strom zur Produktion von Primäraluminium aufgewendet. An der geschätzten weltweiten Produktion von Elektrizität im Jahr 1995 von 13.263 Millionen MWh (BMWL, 1998) sind dies immerhin 2,4%. Für den ganz überwiegenden Teil des Strombedarfs, nämlich 95%, war allein die Elektrolyse verantwortlich. Nach den Modellrechnungen steigt der Strombedarf bis 2010 unterproportional zur Produktionsausweitung um 23% auf etwa 393 Millionen MWh an (Tab. V,14). Der spezifische Strombedarf sinkt demnach insbesondere aufgrund der weitgehenden Verdrängung der alten Techniken zur Elektrolyse durch die PFPB-Technik von 16,2 MWh je Tonne Primäraluminium im Jahr 1995 auf 14,5 MWh im Jahr 2010 (Tab. V,14). Einzig bei dem Backen der Anoden nimmt der spezifische Bedarf an Strom zu. Grund ist der Technikwechsel weg von der Söderberg-Technik, bei dem das vorherige Brennen der Anoden entfällt, hin zu den Prebaked-Techniken.

Bei Gas nimmt der Aufwand zur Gewinnung von Primäraluminium bis 2010 zu, wenngleich stark unterproportional. Der spezifische Bedarf nimmt insgesamt ab. Einzig bei der Herstellung der Anoden wird wiederum spezifisch mehr Energie aufgewendet. Bei Öl und Kohle ergeben sich sogar absolut rückläufige Werte. Grund sind die stark rückläufigen spezifischen Aufwendungen bei der Gewinnung von Tonerde. Bei Diesel ergibt sich eine unterproportionale Zunahme des Bedarfs. Allerdings wird die Entwicklung beim Dieselbedarf stark von den Transportprozessen beeinflusst, für die vereinfachend 1995 der gleiche spezifische Aufwand unterstellt wurde, der sich für 2010 errechnet. Dies erklärt auch die proportionale Zunahme des Dieselbedarfs zur Produktion bei den Transporten.

Die Reduzierung der spezifischen Endenergieaufwendungen läßt sich als Trend lange in die Vergangenheit zurückverfolgen. 1995 wurden an Strom zur Elektrolyse (einschließlich Hilfsstrom) etwa 15,5 MWh je Tonne Primäraluminium benötigt, 2010 sind es nach den Modellrechnungen 13,9 MWh. Im Vergleich waren 1890 noch circa 40 MWh und in den dreißiger Jahren 20 MWh je Tonne Primäraluminium aufgewendet worden (vgl. Krüger, 1997).

Tab. V,14 Weltweite absolute und spezifische Endenergieaufwendungen zur Herstellung von Primäraluminium 1995 und 2010 (Zahlen nach Basisszenario)

	Elektrizität			Gas			Öl			Kohle			Diesel		
Absolut	1995 (Mio. MWh)	2010 (Mio. MWh)	Veränderung (%)	1995 (Mio. GJ)	2010 (Mio. GJ)	Veränderung (%)	1995 (Mio. GJ)	2010 (Mio. GJ)	Veränderung (%)	1995 (Mio. GJ)	2010 (Mio. GJ)	Veränderung (%)	1995 (Mio. GJ)	2010 (Mio. GJ)	Veränderung (%)
Prozesse	316,3	387,5	22,5	234,2	239,2	2,1	233,6	203,3	-13,0	125,1	110,6	-11,6	22,6	24,1	6,9
Bergbau	0,4	0,5	17,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	22,6	24,1	6,9
Tonerde	11,2	13,0	16,2	234,2	239,2	2,1	233,6	203,3	-13,0	125,1	110,6	-11,6	0,0	0,0	0,0
Primäraluminium	304,7	374,0	22,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Transporte	0,2	0,3	36,9	0,0	0,0	0,0	31,3	42,8	36,9	0,0	0,0	0,0	6,3	8,7	36,9
Stoffl. Vorketten	3,4	4,7	37,3	5,9	9,8	65,5	16,8	31,2	86,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Natronlaugeprod.	2,5	2,9	15,1	2,3	2,6	15,1	2,3	2,6	15,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Anodenproduktion	0,9	1,8	97,1	3,6	7,2	97,1	14,5	28,6	97,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Gesamt	319,9	392,5	22,7	240,1	249,0	3,7	281,7	277,4	-1,5	125,1	110,6	-11,6	28,9	32,8	13,5
Spezifisch	1995 (MWh/t)	2010 (MWh/t)	Veränderung (%)	1995 (GJ/t)	2010 (GJ/t)	Veränderung (%)	1995 (GJ/t)	2010 (GJ/t)	Veränderung (%)	1995 (GJ/t)	2010 (GJ/t)	Veränderung (%)	1995 (GJ/t)	2010 (GJ/t)	Veränderung (%)
Prozesse	16,0	14,3	-10,5	10,7	8,0	-25,4	10,7	6,8	-36,4	5,7	3,7	-35,4	1,0	0,8	-21,9
Bergbau	<0,1	<0,1	-14,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,8	-21,9
Tonerde	0,5	0,4	-15,1	10,7	8,0	-25,4	10,7	6,8	-36,4	5,7	3,7	-35,4	0,0	0,0	0,0
Primäraluminium	15,5	13,9	-10,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Transporte	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,3	0,0
Stoffl. Vorketten	0,2	0,2	0,0	0,3	0,3	20,3	0,8	1,0	35,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Natronlaugeprod.	0,1	0,1	-15,9	0,1	0,1	-15,9	0,1	0,1	-15,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Anodenproduktion	<0,1	0,1	42,9	0,2	0,2	43,0	0,7	0,9	43,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Gesamt	16,2	14,5	-10,4	11,0	8,3	-24,3	13,0	9,4	-27,8	5,7	3,7	-35,4	1,3	1,1	-16,5

(Modellrechnungen)

1.3.2 Primärenergie

Der weltweite Aufwand an Primärenergie wurde für 1995 auf circa 343 Exajoule geschätzt (BMWI, 1998). Der Stoffstrom des Primäraluminiums hatte daran in etwa einen Anteil von einem Prozent. Der weltweite Aufwand an Primärenergie für den Stoffstrom des Primäraluminiums nimmt nach den Berechnungen für das Basisszenario bis 2010 leicht zu. Beim Vertragsmix für die Elektrolyse ergibt sich eine Zunahme um circa 6% von 3.265 Millionen GJ im Jahr 1995 auf 3.471 Millionen GJ im Jahr 2010. Wird der Regionalmix zugrunde gelegt, dann ist der Zuwachs mit einem Prozent von 4.047 Millionen GJ im Jahr 1995 auf 4.088 Millionen GJ im Jahr 2010 geringer. Die niedrigeren Werte beim Vertragsmix erklären sich über die höheren Anteile der Wasserkraft, die den höchsten Bereitstellungsnutzungsgrad für die Bereitstellung elektrischer Energie besitzt. Der spezifische Aufwand an Primärenergie je Tonne Primäraluminium ist stark rückläufig. Waren 1995 noch etwas mehr als 160 GJ notwendig, werden es 2010 beim Vertragsmix nach den Modellrechnungen nur mehr knapp 125 GJ sein. Beim Regionalmix gehen die Werte von etwa 200 GJ je Tonne Primäraluminium auf knapp 150 GJ zurück (Tab. V,15).

Tab. V,15 Weltweiter Aufwand an Primärenergie im Stoffstrom des Primäraluminiums 1995 und 2010 (Zahlen nach Basisszenario) - absolut und spezifisch je Tonne Primäraluminium

	Absoluter Aufwand an Primärenergie			Spezifischer Aufwand an Primärenergie		
	1995 (Mio. GJ)	2010 (Mio. GJ)	Veränderung (%)	1995 (GJ/t)	2010 (GJ/t)	Veränderung (%)
Prozesse	3143,7^a (3926,4^b)	3323,7^a (3940,7^b)	5,7^a (0,4^b)	155,6^a (195,3^b)	120,4^a (143,3^b)	-22,6^a (-26,6^b)
Bergbau	30,2	31,9	5,4	1,3	1,0	-23,0
Tonerde	748,3	719,5	-3,8	34,2	24,0	-29,8
Primäraluminium	2365,2 ^a (3147,9 ^b)	2572,3 ^a (3189,3 ^b)	8,8 ^a (1,3 ^b)	120,1 ^a (159,8 ^b)	95,4 ^a (118,3 ^b)	-20,6 ^a (-26,0 ^b)
Transporte	44,1	60,5	36,9	2,0	2,0	0,0
Stoffliche Vorketten	76,9	86,3	12,3	3,6	3,1	-13,3
Natronlauge	47,6	31,1	-34,6	2,2	1,0	-52,2
Anoden	29,3	55,2	88,5	1,4	2,0	47,9
Gesamt	3264,7^a (4047,4^b)	3470,6^a (4087,5^b)	6,3^a (1,0^b)	161,1^a (200,9^b)	125,5^a (148,4^b)	-22,1^a (-26,1^b)

a) Auf Basis des vertraglichen Mixes der Energieträger zur Elektrizitätsgewinnung in der Elektrolyse

b) Auf Basis des regionalen Mixes der Energieträger zur Elektrizitätsgewinnung in der Elektrolyse (Modellrechnungen)

Größter Posten beim spezifischen Aufwand an Primärenergie ist die Energiebereitstellung für die Elektrolyse. Sie vereint beim Vertragsmix etwa 75%, beim Regionalmix fast 80% der gesamten Aufwendungen an Primärenergie im Stoffstrom des Primäraluminiums auf sich. Zweitgrößter Posten ist die Energiebereitstellung für die Tonerdefabrikation. Ihr Konsum an Primärenergie macht, je nach Energieträgermix für die Stromgewinnung für die Elektrolyse, zwischen gut 20 und gut 25% des gesamten Konsums aus. Die Energieaufwendungen für den Bergbau wie für die stofflichen Vorketten haben nur sehr geringe Bedeutung.

Der Rückgang des spezifischen Bedarfs an Primärenergie der Elektrolyse erklärt zu etwa 70% bzw. zu fast 80% den Rückgang der gesamten Aufwendungen. Für die Höhe des weltweit spezifischen Bedarfs an Primärenergie der Elektrolyse sind vier Größen gemeinsam verantwortlich: Der spezifische Endenergiebedarf, die Produktionsgeographie, der Mix der Energieträger zur Stromerzeugung und der Bereitstellungsnutzungsgrad von Strom aus fossilen Energieträgern. Eine Isolierung ihres jeweiligen Einflusses auf die Veränderung des Ergebnisses ist mit zwei Methoden möglich: Bei der ersten Methode wird ausgehend von den Werten im Jahr 1995, bei der zweiten Methode ausgehend von den Werten für 2010 jeweils nur eine Einflußgröße variiert. Die Summe der einzelnen Veränderung wird bei beiden Methoden auf 100% normiert und der Anteil der einzelnen Einflußgrößen daran isoliert. Da im ersten Fall die Gewichtung der unveränderten Größen zu den Werten von 1995 und im zweiten Fall zu den Werten von 2010 erfolgt, weichen die Ergebnisse der beiden Methoden voneinander ab.

Es zeigt sich jedoch unabhängig von der Zurechnungsmethode und unabhängig vom gewählten Mix der Energieträger, daß der Rückgang des spezifischen Aufwandes an Primärenergie weitgehend im höheren Bereitstellungsnutzungsgrad von Strom aus fossilen Energieträgern begründet liegt. Etwa die Hälfte des Rückgangs läßt sich darüber erklären. Die Reduktion des spezifischen Endenergiebedarfs bei der Elektrolyse ist für mehr als ein Drittel des Rückgangs verantwortlich. Der Anteil der veränderten Produktionsgeographie an dem geringeren spezifischen Primärenergieaufwand liegt zwischen knapp 5 und fast 15%. Dabei ist dieser Aufwand bei Gewichtung über die Ausgangswerte höher. Die Verlagerung in Regionen mit billiger Wasserkraft schlägt stärker zu Buche, da die Unterschiede in den Bereitstellungsnutzungsgraden von Strom aus Wasserkraft und fossilen Energieträgern 1995 größer waren als 2010. Zum anderen ist die Bedeutung der anderen Produktionsgeographie im Fall des Vertragsmixes größer. Die Korrelation von bevorzugter Region und Wasserkraftanteil ist viel deutlicher. Die Veränderung im Energiemix hat insgesamt nur wenig Bedeutung und führt zum Teil sogar zu höheren spezifischen Primärenergieaufwendungen. In den Industrieländern wird im Regionalmix ein Teil der Kernenergie in erster Linie durch Gas ersetzt. Bei Gewichtung zu Werten

von 1995 ergibt sich daher global ein negativer Wert, da für 1995 die Bereitstellungsnutzungsgrade von Strom aus Gas kleiner waren als die von Strom aus Kernkraft. Bei Gewichtung zu Werten von 2010 ergibt sich hingegen ein positiver Effekt, da für 2010 von höheren Bereitstellungsnutzungsgraden von Strom aus Gas ausgegangen wird. Hierin spiegeln sich die technischen Entwicklungen in der Kraftwerkstechnik wider, die heute den Einsatz hocheffizienter Gaskraftwerke in der Grundlastversorgung wirtschaftlich ermöglichen, während in früheren Jahren Gaskraftwerke bevorzugt als hochdynamische Spitzenlastkraftwerke mit vergleichsweise niedrigen Wirkungsgraden eingesetzt wurden. In die gleiche Richtung wirkt, daß der Produktionsanteil vom Rest von Lateinamerika und von Afrika 2010 deutlich höher ist als 1995. Dadurch bekommt die für diese Regionen erwartete Verschiebung hin zu Wasserkraft bei Gewichtung zu den Werten von 2010 größeres Gewicht. Beim Vertragsmix führt die anteilige Verschiebung bei neuen Hütten in Indien und dem Rest von Asien weg von Wasserkraft hin zu fossilen Energieträgern zu größeren Primärenergieaufwendungen (Tab. V,16).

Tab. V,16 Beiträge der einzelnen Kategorien am Rückgang des weltweit spezifischen Primärenergieaufwandes bei der Elektrolyse (Zahlen zum Basisszenario)

<u>Rückgang bedingt durch:</u>	Regionalmix		Vertragsmix	
	Gewichtung zu Werten von 1995 (%)	Gewichtung zu Werten von 2010 (%)	Gewichtung zu Werten von 1995 (%)	Gewichtung zu Werten von 2010 (%)
- Rückgang spezifischer Endenergiebedarf	38	36	41	46
- Andere Produktionsgeographie	11	5	14	7
- Anderen Energiemix	-1	3	-2	-4
- Höheren Wirkungsgrad fossil- befeuerter Kraftwerke	52	55	47	52

(Modellrechnungen)

Die spezifischen Aufwendungen an Primärenergie zur Elektrolyse waren 1995 in den Regionen deutlich unterschiedlich. Wesentlich für die spezifischen Aufwendungen an Primärenergie und damit für die Unterschiede in den Regionen sind der Bedarf an Endenergie und der Bereitstellungsnutzungsgrad der gesamten Stromversorgung, der sich aus dem jeweiligen Mix der Energieträger und ihren Bereitstellungsnutzungsgraden ergibt. Bei Regionen, wie China, Indien oder Deutschland, deren Stromversorgung vorwiegend auf fossilen Energieträgern und deren niedrigeren Bereitstellungsnutzungsgraden beruhte, war der Bereitstellungsnutzungs-

grad der gesamten Stromversorgung vergleichsweise niedrig, die Aufwendungen an Primärenergie für die Elektrolyse umgekehrt entsprechend hoch (Tab. V,17).

Tab. V,17 Spezifischer Primärenergieaufwand für die Elektrolyse in den Regionen 1995 bzw. 1994 - ein Vergleich mit der BGR-Studie

Regionen	Primärenergie			Endenergie		Bereitstellungsnutzungsgrad gesamte Strombereitstellung		
	Modell-Rechnung für 1995		BGR für 1994	Modell-rechn. für 1995	BGR für 1994	Modell-rechnung für 1995		BGR für 1994
	Ver-trags-mix	Regio-nalmix				Ver-trags-mix	Regio-nalmix	
	GJ/t	GJ/t	GJ/t	MWh/t	MWh/t			
USA	127,0	163,4	136,3	15,4	15,1	0,44	0,34	0,40
Kanada	65,9	103,5	80,0	14,6	14,4	0,80	0,51	0,65
Brasilien	68,1	75,1	64,9	14,9	15,3	0,79	0,72	0,85
Rest v. Lateinamerika	69,5	153,7	(90,9 ^a)	15,3	(16,4 ^a)	0,79	0,36	(0,65 ^a)
Deutschland	173,7	175,0	142,0	15,4	14,2	0,32	0,32	0,36
Rest der EU	125,6	142,0	(107,2 ^b)	14,3	(13,4 ^b)	0,41	0,36	(0,45 ^b)
Rest von Westeuropa	68,1	81,3	(69,4 ^c)	15,1	(14,9 ^c)	0,80	0,67	(0,85 ^c)
Frühere Sowjetunion	118,8	233,3	(135,6 ^d)	18,1	(17,0 ^d)	0,55	0,28	(0,40 ^d)
Rest von Osteuropa	139,8	212,4	k. A.	15,2	k. A.	0,39	0,26	k. A.
Afrika	139,1	152,1	k. A.	14,6	k. A.	0,38	0,35	k. A.
Vord./Mittl. Osten	131,4	180,3	k. A.	15,2	k. A.	0,42	0,30	k. A.
Indien	194,4	190,0	127,7	15,3	16,0	0,28	0,29	0,45
China	195,9	195,0	127,2	15,1	15,9	0,28	0,28	0,45
Rest von Asien	67,1	148,7	k. A.	14,9	k. A.	0,80	0,36	k. A.
Australien	139,1	150,8	127,8	14,7	14,2	0,38	0,35	0,40
Welt	120,1	159,8	(116,4)	15,5	(15,2)	0,46	0,35	(0,47)

a) Venezuela; b) Frankreich; c) Norwegen; d) Rußland;
(BGR, 1997 und Modellrechnungen)

Vergleichbare Untersuchung kommen mit Blick auf den spezifischen Primärenergieaufwand der Elektrolyse zum Teil zu auffällig anderen Werten. Diese erklären sich im wesentlichen aus den anderen Annahmen zu den Bereitstellungsnutzungsgraden der Strombereitstellung. Für Regionen, die durch nur ein Land repräsentiert werden, können die ermittelten Zahlen

zum Regionalmix beispielsweise mit den Ergebnissen der ebenfalls relativ breit angelegten BGR-Studie (1997) verglichen werden. Die BGR-Studie errechnet die spezifischen Aufwendungen an Primärenergie zur Elektrolyse auf Länderebene und nutzt den Ländermix der Energieträger zur Stromgewinnung zu seiner Berechnung. Für die genannten Regionen weist die BGR-Studie im Vergleich zu den Modellrechnungen zum Regionalmix grundsätzlich geringere Werte aus (Tab. V,17). Dies liegt zum einen darin begründet, daß für Strom aus Wasserkraft bei der BGR-Studie weltweit ein Bereitstellungsnutzungsgrad von einheitlich 85% angenommen wird, während Briem et al. (1999), deren Zahlen Global zugrunde liegen, 80 bzw. 79% unterstellen. Zum anderen geht die BGR-Studie weltweit vereinfacht für Strom aus thermischen Kraftwerken (fossile und nukleare) von einem Bereitstellungsnutzungsgrad von 36% aus. Gerade für Länder wie Indien und China erscheint ein solcher Wert aus Sicht der Zahlen von Briem et al. (1999), die die Bereitstellungsnutzungsgrade der Strombereitstellung nach Energieträgern und Regionen differenziert erfassen, aber als zu hoch.

Die USA, die Frühere Sowjetunion, China und Australien hatten in dieser Reihenfolge 1995 beim Vertragsmix die größten Anteile an den weltweiten absoluten Aufwendungen an Primärenergie für die Elektrolyse. Beim Regionalmix liegt die Frühere Sowjetunion vor den USA, China und Australien. Die absoluten Aufwendungen nehmen nach den Modellrechnungen zum Basisszenario beim Vertragsmix von 1995 bis 2010 um etwa 9%, beim Regionalmix um etwa 1% zu. Die USA wird in Zukunft den größten Anteil bei Vertrags- und Regionalmix haben. Die Frühere Sowjetunion bleibt in beiden Fällen zweitgrößter Verbraucher an Primärenergie zur Elektrolyse. Ihre Aufwendungen gehen trotz wachsender Produktion an Primäraluminium absolut zurück. Dies liegt insbesondere in der erheblichen Verringerung der spezifischen Aufwendungen an Endenergie begründet. Zudem verbessert sich der Bereitstellungsnutzungsgrad der gesamten Stromversorgung (Tab. V,18).

Die spezifischen Aufwendungen an Primärenergie zur Elektrolyse gehen in fast allen Regionen zurück. Ausnahme ist beim Vertragsmix die Region Rest von Asien. Im Rest von Asien wurde 1995 beim Vertragsmix nur Wasserkraft genutzt. Die Verwendung von Gas zur Stromversorgung von Neuanlagen wirkt in Richtung eines geringeren Bereitstellungsnutzungsgrades der gesamten Stromversorgung und damit in Richtung wachsender spezifischer Aufwendungen an Primärenergie (Tab. V,18).

Auch wenn in fast allen Regionen die spezifischen Primärenergieaufwendungen bei der Elektrolyse sinken, haben nicht alle Regionen gleichen Anteil an der Verringerung des weltweiten Energieaufwandes. Um die Wirkung der Reduktion des spezifischen Aufwands in einer

Tab. V,18 Absoluter und spezifischer Primärenergieaufwand bei der Elektrolyse in den Regionen 1995 und 2010 (Zahlen nach Basisszenario)

Regionen	Absoluter Aufwand an Primärenergie				Spezifischer Aufwand an Primärenergie				Spezifischer Bedarf an Endenergie		Bereitstellungsnutzungsgrad gesamte Stromerzeugung			
	Vertragsmix		Regionalmix		Vertragsmix		Regionalmix		1995	2010	Vertragsmix		Regionalmix	
	1995 Mio. GJ	2010 Mio. GJ	1995 Mio. GJ	2010 Mio. GJ	1995 GJ/t	2010 GJ/t	1995 GJ/t	2010 GJ/t			1995 %	2010 %	1995 %	2010 %
USA	431,7	503,9	555,6	620,3	127,0	105,5	163,4	129,9	15,4	14,0	0,44	0,48	0,34	0,39
Kanada	144,9	215,5	227,7	326,2	65,9	61,6	103,5	93,2	14,6	13,6	0,80	0,80	0,51	0,53
Brasilien	81,7	92,4	90,1	97,4	68,1	63,7	75,1	67,1	14,9	14,0	0,79	0,79	0,72	0,75
Rest v. Lateinamerika	55,6	82,8	123,0	139,4	69,5	64,5	153,7	108,7	15,3	14,2	0,79	0,79	0,36	0,47
Deutschland	104,2	106,1	105,0	104,5	173,7	142,6	175,0	140,5	15,4	13,8	0,32	0,35	0,32	0,35
Rest der EU	200,9	256,6	227,2	271,6	125,6	120,1	142,0	127,2	14,3	13,8	0,41	0,41	0,36	0,39
Rest v. Westeuropa	68,1	109,9	81,3	128,2	68,1	61,7	81,3	72,0	15,1	13,7	0,80	0,80	0,67	0,68
Früh. Sowjetunion	368,2	296,2	723,4	502,5	118,8	84,6	233,3	143,6	18,1	13,8	0,55	0,59	0,28	0,35
Rest v. Osteuropa	42,0	33,9	63,7	49,1	139,8	117,7	212,4	170,4	15,2	14,5	0,39	0,44	0,26	0,31
Afrika	83,5	145,8	91,2	155,2	139,1	115,8	152,1	123,2	14,6	14,0	0,38	0,44	0,35	0,41
Naher/Mittlerer Osten	118,3	108,8	162,3	143,2	131,4	94,4	180,3	124,3	15,2	14,0	0,42	0,54	0,3	0,41
Indien	97,2	132,1	95,0	124,6	194,4	137,6	190,0	129,8	15,3	13,8	0,28	0,36	0,29	0,38
China	333,0	182,4	331,4	177,9	195,9	127,2	195,0	124,0	15,1	13,8	0,28	0,39	0,28	0,40
Rest von Asien	13,4	62,8	29,7	86,0	67,1	95,7	148,7	131,2	14,9	13,8	0,80	0,52	0,36	0,38
Australien	222,5	243,3	241,2	263,1	139,1	118,5	150,8	128,2	14,7	13,9	0,38	0,42	0,35	0,39
Welt	2365,2	2572,4	3147,9	3189,4	120,1	95,4	159,8	118,3	15,5	13,9	0,46	0,52	0,35	0,42

(Modellrechnungen)

Region auf den weltweiten Energiebedarf isolieren zu können, müssen zunächst deren spezifische Aufwendungen für 1995 und 2010 mit den jeweiligen Produktionsanteilen gewichtet werden. Die sich in den Regionen ergebenden Veränderungen der gewichteten spezifischen Aufwendungen werden schließlich auf die gesamte Veränderung des weltweiten spezifischen Primärenergieaufwands normiert.

Beim Vertragsmix wird weit über die Hälfte der Reduktion des weltweiten spezifischen Primärenergieaufwandes bei der Elektrolyse alleine durch die Senkung des spezifischen Primärenergiebedarfs in den Regionen China, Frühere Sowjetunion und USA bedingt. Auch beim Regionalmix sind diese drei Regionen für weit über die Hälfte der Einsparung verantwortlich. Der relativ große Produzent Frühere Sowjetunion wird an der Reduktion des gesamten spezifischen Primärenergieaufwandes mit über einem Drittel den größten Anteil haben (Tab. V,19).

Tab. V,19 Beiträge der einzelnen Regionen an der Verringerung des weltweiten spezifischen Primärenergieaufwandes für die Elektrolyse

Regionen	Vertragsmix		Regionalmix	
	Gewichtung zu Produktionsanteilen von		Gewichtung zu Produktionsanteilen von	
	1995 (%)	2010 (%)	1995 (%)	2010 (%)
USA	16	19	15	16
Kanada	2	3	3	4
Brasilien	1	1	1	1
Rest v. Lateinamerika	0	1	5	6
Deutschland	4	4	3	3
Rest der EU	1	2	3	3
Rest von Westeuropa	1	2	1	2
Frühere Sowjetunion	23	22	36	32
Rest von Osteuropa	2	1	2	1
Afrika	3	5	2	4
Vorderer/Mittlerer Osten	7	8	6	7
Indien	6	10	4	6
China	26	18	15	10
Rest von Asien	-1	-3	0	1
Australien	7	8	5	5

(Modellrechnungen)

1.4 Emissionen

1.4.1 Kohlendioxid

Die weltweiten energiebedingten Kohlendioxidemissionen wurden für 1995 auf circa 23.125 Millionen Tonnen geschätzt (BMWl, 1998). Etwa 1% dieser Emissionen wurde durch den Stoffstrom des Primäraluminiums verursacht. Beim Vertragsmix nehmen nach den Berechnungen zum Basisszenario die Kohlendioxidemissionen im Stoffstrom des Primäraluminiums von 1995 bis 2010 trotz des unterstellten Wachstums der Produktion von Primäraluminium um 37% nur leicht von etwa 217 auf 222 Millionen Tonnen zu. Beim Regionalmix ergibt sich sogar ein leichter Rückgang von 267 auf 261 Millionen Tonnen. Die spezifischen Emissionen je Tonne Primäraluminium gehen beim Vertragsmix von etwa 10,7 Tonnen auf 8,0 Tonnen zurück, beim Regionalmix von 13,2 Tonnen auf 9,5 Tonnen. Die höheren Werte beim Regionalmix erklären sich über die geringeren Anteile der Kohlendioxid-freien Wasserkraft an der Stromgewinnung (Tab. V,20).

Tab. V,20 Weltweite Kohlendioxidemissionen im Stoffstrom des Primäraluminiums 1995 und 2010 (Zahlen nach Basisszenario) - absolut und spezifisch je Tonne Primäraluminium

	Absolute Emissionen an Kohlendioxid			Spezifische Emissionen an Kohlendioxid		
	1995 (Mio. t)	2010 (Mio. t)	Veränderung (%)	1995 (t/t)	2010 (t/t)	Veränderung (%)
Prozesse	211,8^a (261,4^b)	215,8^a (254,7^b)	1,9^a (-2,6^b)	10,5^a (13,0^b)	7,8^a (9,2^b)	-25,4^a (-28,8^b)
Bergbau	2,0	2,1	4,8	0,1	0,1	-23,5
Tonerde	54,3	51,5	-5,2	2,5	1,7	-30,7
Primäraluminium - energiebedingt	121,8 ^a (171,4 ^b)	120,7 ^a (159,6 ^b)	-0,9 ^a (-6,9 ^b)	6,2 ^a (8,7 ^b)	4,5 ^a (5,9 ^b)	-27,6 ^a (-32,0 ^b)
- prozeßbedingt	33,7	41,5	23,3	1,7	1,5	-10,0
Transporte	0,5	0,7	36,9	0,0	0,0	0,0
Stoffliche Vorketten	5,0	5,8	14,9	0,2	0,2	-10,8
Natronlauge	2,9	1,9	-35,3	0,1	0,1	-52,7
Anoden	2,1	3,9	86,0	0,1	0,1	47,0
Gesamt	217,3^a (267,0^b)	222,3^a (261,2^b)	2,3^a (-2,2^b)	10,7^a (13,2^b)	8,0^a (9,5^b)	-25,1^a (-28,4^b)

a) Auf Basis des vertraglichen Mixes der Energieträger zur Elektrizitätsgewinnung in der Elektrolyse

b) Auf Basis des regionalen Mixes der Energieträger zur Elektrizitätsgewinnung in der Elektrolyse

(Modellrechnungen)

Den größten Anteil an den insgesamt durch den Stoffstrom des Primäraluminiums ursächlich hervorgerufenen Kohlendioxidemissionen bildet die Strombereitstellung für die Elektrolyse mit 58% beim Vertragsmix bzw. 66% beim Regionalmix. Den nächstgrößten Beitrag mit 23% bzw. 19% leistet die Bereitstellung und Nutzung der fossilen Energieträger für die Tonerdeproduktion. Die prozeßbedingten Emissionen aus der Elektrolyse folgen mit einem Anteil von 16% bzw. 13%. Die energiebedingten Emissionen des Bergbaus sowie der stofflichen Vorketten haben nur sehr geringe Bedeutung.

Der Rückgang der spezifischen Kohlendioxidemissionen wird zu fast 65% (Vertragsmix) bzw. zu über 75% (Regionalmix) durch die geringeren spezifischen energiebedingten Emissionen bei der Elektrolyse erklärt. Für die Höhe der energiebedingten Emissionen an Kohlendioxid bei der Elektrolyse sind vier Größen verantwortlich: Der spezifische Endenergiebedarf, die Produktionsgeographie, der Energiemix und die CO₂-Faktoren der fossilbefeuerten Kraftwerke. Entscheidend ist, daß unabhängig von der Zurechnungsmethode und unabhängig vom gewählten Mix der Energieträger der Rückgang der spezifischen energiebedingten Emissionen aus der Elektrolyse weitgehend im höheren Wirkungsgrad der fossilbefeuerten Kraftwerke begründet liegt. Über die Hälfte des Rückgangs läßt sich darüber erklären. Der Rückgang des spezifischen Strombedarfs bei der Elektrolyse ist für knapp ein Drittel des Rückgangs bei den Kohlendioxidemissionen verantwortlich. Der Anteil der veränderten Produktionsgeographie an den geringeren spezifischen Emissionen liegt zwischen 11% und 22%. Am höchsten ist der Rückgang beim Vertragsmix und Gewichtung zu Ausgangswerten. Einerseits ist beim Vertragsmix die Korrelation hoher Anteil Kohlendioxid-freier Wasserkraft und bevorzugte Region deutlicher. Andererseits ordnet die Gewichtung zu Ausgangswerten den fossilbefeuerten Kraftwerken höhere CO₂-Emissionsfaktoren zu, wodurch sich die Verlagerung in Regionen mit hohem Wasserkraftanteil stärker in einer Reduktion der Emissionen niederschlägt. Die Veränderung im Energiemix hat nur wenig Auswirkungen. Sie führt beim Regionalmix zu einer leichten Abnahme der Emissionen, beim Vertragsmix zu einer leichten Zunahme. Beim Regionalmix wird die Verschiebung in den Industrieländern von Kohlendioxid-freier Kernenergie hin zu Gas überkompensiert durch die für praktisch alle Regionen erwarteten Anteilsverluste der mit Blick auf Emissionen an Kohlendioxid sehr ungünstigen Kohle. Zudem schlägt die Verschiebung hin zu Wasser in Afrika und dem Rest von Lateinamerika sowie die Verschiebung hin zur Kernenergie in Indien und China zu Buche. Beim Vertragsmix ist die Verschiebung weg von Wasserkraft hin zu fossilen Energieträgern zur Stromversorgung neuer Hütten in Indien und im Rest von Asien für die zunehmenden Emissionen verantwortlich (Tab. V,21).

Tab. V,21 Beiträge der einzelnen Kategorien am Rückgang der energiebedingten weltweit spezifischen Kohlendioxidemissionen bei der Elektrolyse (Zahlen zum Basisszenario)

<u>Rückgang bedingt durch:</u>	Regionalmix		Vertragsmix	
	Gewichtung zu Werten von 1995 (%)	Gewichtung zu Werten von 2010 (%)	Gewichtung zu Werten von 1995 (%)	Gewichtung zu Werten von 2010 (%)
- Rückgang spezifischer Endenergiebedarf	30	28	29	31
- Andere Produktionsgeographie	16	11	22	15
- Anderen Energiemix	3	5	-3	-7
- Höheren Wirkungsgrad fossiler Kraftwerke	52	56	53	61

(Modellrechnungen)

Die spezifischen Kohlendioxidemissionen bei der Elektrolyse waren in den Regionen 1995 je nach Mix der Energieträger zur Stromgewinnung sehr unterschiedlich. Beim Vertragsmix hatten die Regionen Kanada, Brasilien, Rest von Lateinamerika, Rest von Westeuropa und Rest von Asien mit ihrer ausschließlichen Gewinnung von Strom aus Wasserkraft keine Emissionen an Kohlendioxid. Am höchsten waren die spezifischen Emissionen an Kohlendioxid beim Vertragsmix für die Regionen China und Indien mit ihren hohen Anteilen von Kohle an der Herstellung der Elektrizität bei gleichzeitig niedrigen Wirkungsgraden dieser Kraftwerke. Beim Regionalmix werden diese beiden Regionen vom Rest von Osteuropa übertroffen (Tab. V,22).

Die Modellergebnisse zu den spezifischen Kohlendioxidemissionen bei der Elektrolyse aus dem Regionalmix können für einige Regionen mit den Zahlen des Öko-Institutes (1997) verglichen werden. Für Deutschland und Australien sind die Werte beider Untersuchungen ähnlich. Für die Frühere Sowjetunion weist das Öko-Institut deutlich höhere Werte aus. Grund sind die im Vergleich zu den Daten von Briem et al. (1999) höheren CO₂-Emissionsfaktoren für die fossilbefeuerten Kraftwerke bei vergleichbarem Regionalmix. Die höheren Werte des Öko-Institutes für Brasilien sind mit Blick auf den dort (wohl unstrittig) dominanten Anteil der Wasserkraft an der Stromgewinnung hingegen nicht nachvollziehbar (Tab. V,22).

Tab. V,22 Spezifische energiebedingte Kohlendioxidemissionen bei der Elektrolyse in den Regionen 1995 bzw. 1996 - ein Vergleich mit GEMIS

Regionen	Modellrechnung für 1995		GEMIS für 1996 ^a
	Vertragsmix (t/t)	Regionalmix (t/t)	
USA	8,5	9,5	k. A.
Kanada	0,0	2,8	k. A.
Brasilien	0,0	0,7	5,4
Rest v. Lateinamerika	0,0	7,3	k. A.
Deutschland	10,7	10,3	10,4
Rest der EU	4,6	5,4	k. A.
Rest von Westeuropa	0,0	0,1	1,4
Frühere Sowjetunion	4,4	11,6	16,3
Rest von Osteuropa	9,0	16,7	k. A.
Afrika	9,6	10,3	k. A.
Vord./Mittl. Osten	4,4	10,3	k. A.
Indien	16,2	15,0	k. A.
China	15,9	15,9	k. A.
Rest von Asien	0,0	6,3	k. A.
Australien	11,2	12,1	13,0
Welt	6,2	8,7	k. A.
a) GEMIS-Zahlen für die gesamte Kette minus den weltdurchschnittlichen Emissionen an Kohlendioxid von 4,5 Tonnen je Tonne, die nicht aus der Elektrolyse kommen. (Öko-Institut, 1997 und Modellrechnungen)			

An den absoluten weltweiten Kohlendioxidemissionen bei der Elektrolyse hatten 1995 beim Vertragsmix die USA, China, Australien und die Frühere Sowjetunion die größten Anteile. Nach den Rechnungen zum Basisszenario wird bis 2010 bei insgesamt leichten Rückgang an Emissionen die USA den größten Anteil halten, gefolgt von Australien, China und Indien. Beim Regionalmix lag 1995 die Frühere Sowjetunion vor den USA, China und Australien. Bis 2010 wird die USA auch beim Regionalmix größter Emittent an Kohlendioxid bei der Elektrolyse werden vor der Früheren Sowjetunion, Australien und China.

Die spezifischen Emissionen an Kohlendioxid aus der Elektrolyse sind für fast alle Regionen rückläufig. Beim Vertragsmix nehmen einzig im Rest von Asien die spezifischen Emissionen zu, da für neue Hütten Gas als Energieträger für die Stromversorgung genutzt wird. Beim Regionalmix führt der wachsende Anteil an Gas im Rest von Westeuropa zu wachsenden spezifischen Emissionen. Die spezifischen Emissionen im Rest von Westeuropa bleiben aufgrund des weiterhin dominanten Anteils an Wasserkraft allerdings sehr niedrig (Tab. V,23).

Obwohl nach den Modellrechnungen fast alle Regionen ihre spezifischen Emissionen verringern werden, wird ihr Beitrag an der Reduktion der weltweiten spezifischen Emissionen aus der Elektrolyse unterschiedlich sein. Beim Vertragsmix wie beim Regionalmix werden danach, allerdings in unterschiedlicher Reihenfolge, die Regionen China, USA und Frühere Sowjetunion den größten Anteil haben. Diese drei Regionen sind jeweils für weit über die Hälfte der Reduktion verantwortlich (Tab. V,24).

Tab. V,24 Beiträge der einzelnen Regionen an der Verringerung der energiebedingten weltweit spezifischen Kohlendioxidemissionen aus der Elektrolyse (Zahlen nach Basisszenario)

Regionen	Vertragsmix		Regionalmix	
	Gewichtung zu Produktionsanteilen von		Gewichtung zu Produktionsanteilen von	
	1995 (%)	2010 (%)	1995 (%)	2010 (%)
USA	18,5	22,4	12,8	14,6
Kanada	0,0	0,0	1,4	1,7
Brasilien	0,0	0,0	0,8	0,8
Rest v. Lateinamerika	0,0	0,0	4,8	6,2
Deutschland	4,6	4,9	2,6	2,6
Rest der EU	0,7	0,8	3,0	3,2
Rest von Westeuropa	0,0	0,0	-0,1	-0,2
Frühere Sowjetunion	16,7	16,3	29,1	26,6
Rest von Osteuropa	1,9	1,6	2,2	1,7
Afrika	3,3	6,0	3,1	5,2
Vord./Mittl. Osten	4,7	5,2	6,0	6,2
Indien	8,0	13,3	5,2	8,0
China	34,0	24,7	23,3	15,9
Rest von Asien	-2,1	-5,8	0,6	1,7
Australien	9,7	10,7	5,4	5,6

(Modellrechnungen)

1.4.2 Perfluorierte Kohlenwasserstoffe

Nach den Modellrechnungen wurden im Jahr 1995 durch die Anodeneffekte bei der Elektrolyse etwa 7200 Tonnen CF_4 und etwa 700 Tonnen C_2F_6 frei. In CO_2 -Äquivalenten waren dies etwa 53 Millionen Tonnen. Ein Vergleich mit den im Jahr 1995 über die gesamte Kette der Gewinnung von Primäraluminium emittierten 260 (Regionalmix) bzw. 215 Millionen Tonnen (Vertragsmix) an Kohlendioxid zeigt die große ökologische Relevanz der Emissionen an perfluorierten Kohlenwasserstoffen.

Tab. V,23 Absolute und spezifische energiebedingte Kohlendioxidemissionen bei der Elektrolyse in den Regionen 1995 und 2010 (Zahlen nach Basisszenario)

Regionen	Absolute Emissionen an Kohlendioxid						Spezifische Emissionen an Kohlendioxid					
	Vertragsmix			Regionalmix			Vertragsmix			Regionalmix		
	1995 Mio. t	2010 Mio. t	Verän- derung %	1995 Mio. t	2010 Mio. t	Verän- derung %	1995 t/t	2010 t/t	Verän- derung %	1995 t/t	2010 t/t	Verän- derung %
USA	28,9	32,9	14,0	32,2	36,3	12,6	8,5	6,9	-18,8	9,5	7,6	-19,8
Kanada	0,0	0,0	0,0	6,1	8,6	41,4	0,0	0,0	0,0	2,8	2,5	-11,0
Brasilien	0,0	0,0	0,0	0,8	0,5	-36,1	0,0	0,0	0,0	0,7	0,4	-47,2
Rest v. Lateinamerika	0,0	0,0	0,0	5,9	5,6	-5,1	0,0	0,0	0,0	7,3	4,3	-40,8
Deutschland	6,4	6,3	-2,2	6,2	6,0	-2,5	10,7	8,5	-21,1	10,3	8,1	-21,4
Rest der EU	7,4	9,6	29,8	8,6	9,5	10,5	4,6	4,5	-2,7	5,4	4,5	-17,3
Rest v. Westeuropa	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	225,8	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	83,0
Früh. Sowjetunion	13,7	10,0	-27,5	35,8	24,1	-32,8	4,4	2,8	-35,8	11,6	6,9	-40,4
Rest v. Osteuropa	2,7	2,1	-23,6	5,0	3,8	-24,7	9,0	7,2	-20,4	16,7	13,1	-21,6
Afrika	5,8	10,0	74,7	6,2	9,8	58,4	9,6	8,0	-16,8	10,3	7,8	-24,6
Naher/Mittlerer Osten	3,9	3,3	-17,5	9,3	8,1	-13,1	4,4	2,8	-35,5	10,3	7,0	-32,1
Indien	8,1	11,0	35,9	7,5	9,5	26,1	16,2	11,4	-29,2	15,0	9,9	-34,3
China	27,0	14,3	-46,9	27,1	13,0	-51,8	15,9	10,0	-37,1	15,9	9,1	-42,9
Rest von Asien	0,0	2,0	∞	1,3	3,1	144,2	0,0	3,0	∞	6,3	4,7	-25,6
Australien	17,9	19,3	7,8	19,4	21,4	10,6	11,2	9,4	-15,9	12,1	10,4	-13,8
Welt	121,8	120,7	-0,9	171,4	159,5	-6,9	6,2	4,5	-27,6	8,7	5,9	-32,0

(Modellrechnungen)

Im Basisszenario ergibt sich bis 2010 trotz starker Zunahme der Produktion von Primäraluminium ein ausgeprägter absoluter Rückgang der Emissionen an perfluorierten Kohlenwasserstoffen um mehr als 39%. Die spezifischen Emissionen je Tonne Primäraluminium gehen um fast 56% zurück. Grund ist die Verdrängung der Söderberg-Anlagen durch moderne PFPB-Technik, die spezifisch eine deutlich geringere Zahl an Anodeneffekten aufweist (Tab. V,25)

Tab. V,25 Weltweite Emissionen an perfluorierten Kohlenwasserstoffen im Stoffstrom des Primäraluminiums 1995 und 2010 (Zahlen nach Basisszenario) - absolut und spezifisch je Tonne Primäraluminium

	1995				2010			
	Emissionen		CO ₂ -Äquivalente ^a		Emissionen		CO ₂ -Äquivalente	
	Absolut (Mio. t)	Spezi- fisch (t/t)	Absolut (Mio. t)	Spezi- fisch (t/t)	Absolut (Mio. t)	Spezi- fisch (t/t)	Absolut (Mio. t)	Spezi- fisch (t/t)
CF ₄	0,0072	0,00037	46,9	2,38	0,00438	0,00016	28,5	1,06
C ₂ F ₆	0,0007	0,00004	6,6	0,34	0,00044	0,00002	4,0	0,15
Gesamt			53,3	2,72			32,5	1,21

a) Unterstellte CO₂-Äquivalenzfaktoren: CF₄: 6500, C₂F₆: 9200 kg CO₂ je emittiertes kg.
(Modellrechnungen)

2. Szenarien niedriger und hoher Nachfrage

Die Entwicklung der weltweiten Nachfrage nach Primäraluminium ist nur schwer zu prognostizieren. Mit der Annahme einer niedrigen und einer hohen Zuwachsrates der weltweiten Nachfrage nach Primäraluminium von 1,4 bzw. 2,4% pro Jahr werden alternative Entwicklungen dieses wichtigen Parameters zugelassen. Die Höhe der zukünftigen Nachfrage hat große Auswirkungen auf die Modellergebnisse. Dies ist in der Struktur des Modells durch den Ausgleich von Produktion und Nachfrage angelegt.

Im Basisszenario lag die weltweite Nachfrage und die weltweite Produktion von Primäraluminium für das Stützjahr 2010 bei 27 Millionen Tonnen, im Szenario niedriger Nachfrage sind es 25 Millionen, im Szenario hoher Nachfrage 29 Millionen Tonnen (Tab. V,26). Die im Vergleich zum Basisszenario niedrigere Nachfrage nach Primäraluminium geht zu Lasten der Produktion von 8 der 15 Regionen. In der Früheren Sowjetunion, dem Rest von Osteuropa und in China werden vorhandene Kapazitäten weniger stark genutzt. In den USA und in

Deutschland fällt die Kapazitätserweiterung bestehender Anlagen geringer aus bzw. es wird ganz auf sie verzichtet. Im Rest von Lateinamerika, in Indien und im Rest von Asien wird auf eine Greenfield Expansion verzichtet bzw. sie fällt geringer aus. Von der im Vergleich zum Basisszenario höheren Nachfrage nach Primäraluminium profitieren 5 der 15 Regionen. Im Rest von Osteuropa und in China wird vorhandene Kapazität stärker genutzt. Im Rest von Lateinamerika, in Indien und in Australien wird hingegen verstärkt Kapazität über Neuanlagen geschaffen.

Tab. V,26 Produktion von Primäraluminium 2010 - Projektion entsprechend der Szenarien niedriger und hoher Nachfrage (Mio. tpy)

Regionen	1995 Referenz- jahr	2010				
		Basis- szenario	Niedrige Nachfrage		Hohe Nachfrage	
				Verände- rung gg. Basis- szenario		Verände- rung gg. Basis- Szenario
Nordamerika	5,6	8,3	7,9	-0,4	8,3	0,0
USA	3,4	4,8	4,4	-0,4	4,8	0,0
Kanada	2,2	3,5	3,5	0,0	3,5	0,0
Mittel-/Südamerika	2,0	2,7	2,7	-0,1	3,6	0,8
Brasilien	1,2	1,5	1,5	0,0	1,5	0,0
Rest v. Lateinam.	0,8	1,3	1,2	-0,1	2,1	0,8
Westeuropa	3,2	4,7	4,5	-0,1	4,7	0,0
Deutschland	0,6	0,7	0,6	-0,1	0,7	0,0
Rest der EU	1,6	2,1	2,1	0,0	2,1	0,0
Rest v. Westeuropa	1,0	1,8	1,8	0,0	1,8	0,0
Osteuropa	3,4	3,8	3,1	-0,7	3,9	0,1
Früh. Sowjetunion	3,1	3,5	3,1	-0,4	3,5	0,0
Rest v. Osteuropa	0,3	0,3	0,0	-0,3	0,4	0,1
Afrika	0,6	1,3	1,3	0,0	1,3	0,0
Asien	3,3	4,2	3,5	-0,7	4,6	0,4
Naher/Mittl. Osten	0,9	1,2	1,2	0,0	1,2	0,0
Indien	0,5	1,0	0,9	-0,1	1,0	0,1
China	1,7	1,4	1,2	-0,2	1,8	0,4
Rest von Asien	0,2	0,7	0,3	-0,4	0,6	0,0
Australien	1,6	2,1	2,1	0,0	2,8	0,8
Welt	19,7	27,0	25,0	-1,9	29,0	2,1

(Modellrechnungen)

Entscheidend ist allerdings, daß sich unabhängig von der Höhe der weltweiten Nachfrage nach Primäraluminium der Trend der Kapazitätsverlagerung in Regionen mit niedrigen Stromkosten bestätigt (Tab. V,27). Dabei profitieren nach den Modellergebnissen benachteiligte Regionen von größerer Nachfrage besonders. Vorhandene Kapazität wird stärker genutzt und bestehende Anlagen im Vergleich zu anderen Regionen relativ stärker erweitert. Hintergrund ist die Annahme eines unveränderten maximalen Zubaus, der auch bei höherer weltweiter Nachfrage nach Primäraluminium keine weitere Expansion der Produktion in bevorzugten Regionen (z. B. Kanada, Rest von Asien, Rest von Westeuropa) zuläßt.

Tab. V,27 Kapazitätsausbau zur Produktion von Primäraluminium nach Regionen mit unterschiedlichen Stromtarifen von 1995 bis 2010 - Projektion entsprechend der Szenarien niedriger und hoher Nachfrage (in % der Ausgangskapazität)

Regionen mit Stromtarifen	Basisszenario	Niedrige Nachfrage	Hohe Nachfrage
< 15 USD ¹⁹⁹⁵ je MWh	63,5	49,5	63,5
15 - 20 USD ¹⁹⁹⁵ je MWh	18,7	18,1	35,6
20 - 25 USD ¹⁹⁹⁵ je MWh	20,0	14,3	20,0
> 25 USD ¹⁹⁹⁵ je MWh	12,2	6,9	14,2

(Modellrechnungen)

Nach dem Basisszenario werden im Jahr 2010 etwa 59 Millionen Tonnen Tonerde produziert, im Szenario niedriger Nachfrage sind es etwa 55 Millionen Tonnen, im Szenario hoher Nachfrage etwa 63 Millionen (Tab. V,28). Die geringere Produktion im Szenario niedriger Nachfrage gegenüber dem Basisszenario geht zu Lasten von 7 Regionen. Im Rest von Osteuropa wird vorhandene Kapazität weniger stark genutzt. Im Rest von Asien fällt die Greenfield Expansion geringer aus. In Kanada, im Rest von Lateinamerika, in Indien, China und Australien ist die Kapazitätserweiterung bestehender Anlagen geringer. Die höhere Produktion im Szenario hoher Nachfrage wird von 8 Regionen bewerkstelligt. Im Rest der EU, im Rest von Osteuropa und in den USA werden vorhandene Altanlagen stärker genutzt. In den USA kommt es gleichzeitig zu einer Erweiterung bestehender Anlagen. In Brasilien, dem Rest von Lateinamerika und Indien fällt die Brownfield Expansion größer aus. In China wird Kapazität über Neuanlagen geschaffen. Im Nahen und Mittleren Osten fällt die Kapazitätserweiterung durch Greenfield Expansion größer aus.

Tab. V,28 Produktion von Tonerde 2010 - Projektion entsprechend der Szenarien niedriger und hoher Nachfrage (Mio. tpy)

Regionen	1995 Referenz- jahr	2010				
		Basis- szenario	Niedrige Nachfrage		Hohe Nachfrage	
				Verände- rung gg. Basis- szenario		Verände- rung gg. Basis- szenario
Nordamerika	5,6	5,9	5,5	-0,4	7,1	1,3
USA	4,5	4,2	4,2	0,0	5,5	1,3
Kanada	1,1	1,7	1,3	-0,4	1,7	0,0
Mittel-/Südamerika	8,5	12,7	12,2	-0,5	13,9	1,1
Brasilien	2,1	3,0	3,0	0,0	4,0	1,0
Rest v. Lateinam.	6,4	9,8	9,3	-0,5	9,8	0,1
Westeuropa	5,3	5,0	5,0	0,0	5,6	0,6
Deutschland	1	1,1	1,1	0,0	1,1	0,0
Rest der EU	4,3	4,0	4,0	0,0	4,6	0,6
Rest v. Westeuropa	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Osteuropa	5,2	7,0	6,4	-0,6	7,2	0,2
Früh. Sowjetunion	4,5	6,3	6,3	0,0	6,3	0,0
Rest v. Osteuropa	0,7	0,7	0,1	-0,6	0,8	0,2
Afrika	0,6	0,9	0,9	0,0	0,9	0,0
Asien	4,7	8,5	7,0	-1,4	9,7	1,2
Naher/Mittl. Osten	0,2	0,4	0,4	0,0	0,7	0,3
Indien	1,7	2,1	1,9	-0,1	2,3	0,2
China	2,1	3,5	3,0	-0,5	4,3	0,8
Rest von Asien	0,7	2,5	1,7	-0,8	2,5	0,0
Australien	13,1	18,8	17,5	-1,3	18,8	0,0
Welt	43	58,8	54,7	-4,2	63,2	4,4

(Modellrechnungen)

Bauxit wird nach dem Basisszenario im Jahr 2010 in einer Größenordnung von etwa 159 Millionen Tonnen gewonnen, im Szenario niedriger Nachfrage sind es 149 Millionen Tonnen, im Szenario hoher Nachfrage 169 Millionen Tonnen (Tab. V,29). Für die geringere Produktion im Szenario niedriger Nachfrage gegenüber dem Basisszenario sind 5 Regionen verantwortlich. In Indien, China, Australien und dem Rest von Lateinamerika wird weniger neue Kapazität geschaffen. Im Rest von Lateinamerika wird gleichzeitig vorhandene Kapazität weniger genutzt. Letzteres führt auch in Afrika zum Produktionsrückgang. Die größere weltweite Produktion von Bauxit im Szenario höherer Nachfrage wird durch die Produktionsausweitung von 6 Regionen erreicht. Im Rest der EU, im Nahen und Mittleren Osten, in Indien, China und dem Rest von Lateinamerika wird verstärkt neue Kapazität geschaffen. Im Rest

von Lateinamerika wird gleichzeitig alte Kapazität verstärkt genutzt. Der Produktionszuwachs im Rest von Osteuropa wird allein über die stärkere Nutzung vorhandener Kapazität bewerkstelligt.

Tab. V,29 Produktion von Bauxit 2010 - Projektion entsprechend der Szenarien niedriger und hoher Nachfrage (Mio. tpy)

Regionen	1995 Referenz- jahr	2010				
		Basis- szenario	Niedrige Nachfrage		Hohe Nachfrage	
				Verände- rung gg. Basis- Szenario		Verände- rung gg. Basis- szenario
Nordamerika	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
USA	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Kanada	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Mittel-/Südamerika	32,2	42,3	39,3	-3,1	45,2	2,9
Brasilien	10,2	11,8	11,8	0,0	11,8	0,0
Rest v. Lateinam.	22,0	30,6	27,5	-3,1	33,4	2,9
Westeuropa	2,2	2,5	2,5	0,0	6,3	3,8
Deutschland	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Rest der EU	2,2	2,5	2,5	0,0	6,3	3,8
Rest v. Westeuropa	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Osteuropa	7,5	10,7	10,7	0,0	11,3	0,5
Früh. Sowjetunion	6,1	10,4	10,4	0,0	10,4	0,0
Rest v. Osteuropa	1,4	0,3	0,3	0,0	0,9	0,5
Afrika	14,9	20,4	16,3	-4,1	20,4	0,0
Asien	13,4	17,1	15,6	-1,6	19,8	2,6
Naher/Mittl. Osten	0,6	0,8	0,8	0,0	1,4	0,6
Indien	5,2	6,6	6,1	-0,5	7,1	0,5
China	6,5	7,6	6,5	-1,1	9,1	1,5
Rest von Asien	1,1	2,2	2,2	0,0	2,2	0,0
Australien	42,7	65,9	64,6	-1,3	65,9	0,0
Welt	112,9	159,1	149,0	-10,1	168,9	9,8

(Modellrechnungen)

Trotz der leichten Produktionsverschiebungen bei Tonerde und Bauxit bestätigt sich der Trend einer zunehmenden Verlagerung der Produktion von Tonerde hin zu den Bauxitregionen. Im Basisszenario war die Produktion von Tonerde der Regionen, die zu über 50% Bauxit aus anderen Regionen verarbeiten, gegenüber dem Referenzjahr 1995 unverändert geblieben. Im Fall niedriger weltweiter Nachfrage nach Primäraluminium ergibt sich sogar eine leicht

rückläufige Produktion, im Fall hoher Nachfrage eine verhaltene Zunahme. Die Produktion von Tonerde in Regionen, die einen niedrigeren Importanteil bzw. Exportüberschüsse bei Bauxit haben, expandieren in jedem Fall deutlich stärker (Tab. V,30).

Tab. V,30 Produktion von Tonerde 2010 in Regionen ohne bzw. mit signifikanter eigener Bauxitproduktion - Projektion entsprechend der Szenarien niedriger und hoher Nachfrage (in Mio. tpy, in Klammern: Veränderung gegenüber Referenzjahr in %)

Regionen	1995	2010		
	Referenzjahr	Basisszenario	Niedrige Nachfrage	Hohe Nachfrage
- ohne signifikante Bauxitproduktion	10,9	10,9 (0,0)	10,5 (-3,3)	12,8 (17,3)
- mit signifikanter Bauxitproduktion	32,1	47,9 (49,3)	44,1 (37,4)	50,4 (57,1)

(Modellrechnungen)

Im Basisszenario war der weltweite Aufwand an Primärenergie im Stoffstrom des Primäraluminiums im Vergleich zum Referenzjahr 1995 leicht angewachsen. Im Szenario niedriger Nachfrage liegen die Werte etwas unterhalb der des Referenzjahres, im Szenario hoher Nachfrage etwas darüber. Entscheidend ist, daß sich bei allen drei Szenarien für das Jahr 2010 deutlich geringere spezifische Aufwendungen an Primärenergie als im Jahr 1995 einstellen. Beim Vertragsmix liegen die Werte nach etwa 160 GJ je Tonne Primäraluminium im Jahr 1995 bei etwa 125 GJ, beim Regionalmix nach 200 GJ bei knapp 150 GJ. Ähnlich ist die Situation bei den absoluten weltweiten Emissionen an Kohlendioxid. Beim Basisszenario liegen sie in etwa auf Höhe der Emissionen im Jahr 1995, beim Szenario niedriger Nachfrage etwas darunter, beim Szenario hoher Nachfrage etwas darüber. Die spezifischen Emissionen sind gegenüber dem Referenzjahr für alle Szenarien stark gesunken. Sie liegen beim Vertragsmix um 8 Tonnen je Tonne Primäraluminium, beim Regionalmix um 9 bis 10 Tonnen. Die absoluten weltweiten Emissionen an perfluorierten Kohlenwasserstoffen sind im Basisszenario stark rückläufig. Im Szenario niedriger Nachfrage ist der Rückgang noch etwas stärker, im Szenario hoher Nachfrage etwas geringer. Für die spezifischen Emissionen an perfluorierten Kohlenwasserstoffen ergeben sich für alle drei Szenarien etwa 1,2 Tonnen CO₂-Äquivalente je Tonne Primäraluminium (Tab. V,31).

Tab. V,31 Weltweiter Primärenergieaufwand und weltweite Emissionen klimarelevanter Gase im Stoffstrom des Primäraluminiums 2010 - Projektion entsprechend der Szenarien niedriger und hoher Nachfrage

	1995	2010		
	Referenzjahr	Basisszenario	Niedrige Nachfrage	Hohe Nachfrage
Aufwand an Primärenergie				
- weltweit (Mio. GJ)				
• Vertragsmix	3264,7	3470,6	3193,9	3739,9
• Regionalmix	4047,4	4087,5	3769,3	4395,7
- spezifisch (GJ/t)				
• Vertragsmix	161,1	125,5	124,3	125,7
• Regionalmix	200,9	148,4	147,3	148,3
Emissionen an CO₂				
- weltweit (Mio. GJ)				
• Vertragsmix	217,3	222,3	209,9	243,3
• Regionalmix	267,0	261,2	238,8	284,2
- spezifisch (GJ/t)				
• Vertragsmix	10,7	8,0	7,9	8,2
• Regionalmix	13,2	9,5	9,3	9,6
Emissionen an perfluorierten Kohlenwasserstoffen				
- weltweit (Mio. t CO ₂ -Äquivalente)	53,3	32,5	29,7	34,9
- spezifisch (t CO ₂ -Äquivalente/t)	2,72	1,21	1,19	1,20

(Modellrechnungen)

VI. Resümee

Die Szenariorechnungen für das Jahr 2010 auf Basis von GlobAl erlauben die Isolierung einer ganzen Reihe von grundlegenden Entwicklungstendenzen im Stoffstrom des Primäraluminiums. GlobAl selbst ist ökonomisch motiviert. Techniken, Investitionsstrategien und Regionen stehen danach im Wettbewerb. Veränderungen in der Produktionsgeographie oder im interregionalen Handel sind das Ergebnis von Marktprozessen. Zentral für die Szenariorechnungen ist die Annahme fortschreitender Globalisierung und Liberalisierung. Diese schlägt sich bei der Abschätzung wesentlicher Modellparameter nieder. Entsprechend spiegeln die isolierten Entwicklungstendenzen die zukünftige Entwicklung um so besser wider, wie sich die Annahme einer fortschreitenden Globalisierung und Liberalisierung in der Zukunft bestätigt.

(1) Nur allmähliche Verschiebungen in der Produktionsgeographie. Für den Stoffstrom des Primäraluminiums ergeben sich nur nach und nach Veränderungen in der Produktionsgeographie. Grund ist die gute Wettbewerbsposition alter Kapazität. Die ehemaligen Investitionskosten haben den Charakter von versunkenen Kosten und sind für zukünftige Produktions- und Investitionsentscheidungen der Altanlagenbetreiber nicht mehr relevant. Durch Up-Grading können alte Anlagen fast die gleichen Leistungsparameter erreichen wie neue Anlagen, bei allerdings weitaus niedrigeren Investitionskosten. Dadurch ist Up-Grading zumeist eine ökonomische Alternative, auch wenn die Preissituation einer Region z. B. aufgrund hoher Löhne oder Energiekosten nachteilig ist. Veränderungen in der Produktionsgeographie ergeben sich daher weniger aufgrund der Verdrängung alter Kapazität in benachteiligten Regionen. Vielmehr ist es die zusätzliche Nachfrage, die durch die bestehende Kapazität nicht befriedigt werden kann, die zum Aufbau neuer Kapazität in bevorzugten Regionen und damit zu allmählichen Produktionsverschiebungen führt.

(2) Verlagerung der Produktion von Tonerde in Bergbauregionen. Die Kosten für Bauxit sind bei der Produktion von Tonerde entscheidend. Sie machten 1995 im weltweiten Durchschnitt gut ein Drittel der gesamten Betriebskosten aus. Für die Unterschiede in den Kosten für Bauxit sind nicht zuletzt die Transportkosten entscheidend. Die spezifischen Transportkosten sind dabei um so höher, je weiter die Transportwege und je geringer der Gehalt an Aluminiumoxid des Bauxits. Daraus erklärt sich zum einen, daß nur Bauxite mit hohem Gehalt an Aluminiumoxid interregional verschickt werden. Zum anderen ist die große Bedeutung der Transportkosten für das Massengut Bauxit Ursache für die Verlagerung der Produktion von Tonerde in die Bergbauregionen. Insgesamt bleiben aber die Verlagerungstendenzen aufgrund der hohen Kapitalkosten bei der Gewinnung von Tonerde gering.

(3) *Verlagerung der Gewinnung von Primäraluminium in Regionen mit billigem Strom für die Elektrolyse.* Der Preis für Elektrizität und ihre Verfügbarkeit sind entscheidende Standortfaktoren mit Blick auf die Gewinnung von Primäraluminium. Die Kosten der Elektrizität sind nach den Kosten für Tonerde der zweitwichtigste Kostenblock. Sie machten 1995 im weltweiten Durchschnitt etwa ein Viertel der gesamten Betriebskosten aus. Während bei Tonerde aber die Preise in den einzelnen Regionen nur wenig voneinander abweichen, sich so keine signifikanten regionalen Wettbewerbsvor- oder -nachteile ergeben, sind die Stromtarife in den einzelnen Regionen stark unterschiedlich. Dies ist wenig überraschend, da Strom im Gegensatz zu Tonerde ein nur eingeschränkt handelbares Gut ist. Ist Stromgewinnung durch Wasserkraft möglich, ergibt sich ein natürlicher Wettbewerbsvorteil. Die Existenz von Altanlagen ist in den benachteiligten Regionen zwar in der Regel nicht gefährdet, die (spezifischen) Vollkosten von Neuanlagen in bevorzugten Regionen liegen zumeist über deren (spezifischen) Betriebskosten, allerdings erfolgen der Bau von Neuanlagen und die Kapazitätserweiterungen bestehender Anlagen in erster Linie in Regionen mit niedrigen Energiekosten, so daß sich allmählich eine Verschiebung zugunsten dieser Regionen ergibt.

(4) *Rückläufiger interregionaler Handel mit Bauxit bei wachsendem Handel mit den verarbeiteten Produkten.* Die Veränderungen in der Produktionsgeographie haben Auswirkungen auf den interregionalen Handel. Der Anteil der gesamten regionalen Nettoexporte an der Weltproduktion geht für Bauxit zurück, während er für Tonerde und Primäraluminium unverändert bleibt oder leicht zunimmt. Anstatt Bauxit werden zunehmend die weiterverarbeiteten Produkte Tonerde und Primäraluminium interregional gehandelt.

(5) *Veränderungen im Technologiemix bei der Produktion von Primäraluminium und Tonerde.* Im Jahr 1995 wurden noch mehr als 30% des Primäraluminiums mit Söderberg-Anlagen produziert. Diese sind energetisch ungünstiger als PFPB-Anlagen und verursachen dadurch relativ hohe Betriebskosten. Deshalb werden sie in nächster Zukunft entweder mit PFPB nachgerüstet oder geschlossen. Auch CWPB und SWPB-Anlagen verlieren gegenüber PFPB-Anlagen an Bedeutung. Bei der Produktion von Tonerde wird beim Aufschluß auch in nächster Zukunft die Autoklaven-Technik dominieren. Der Rohrreaktor, der 1995 etwa 2% der Produktion auf sich vereinte, kann nur in sehr geringem Ausmaß seinen Produktionsanteil vergrößern. Bei der Kalzination fußen 1995 noch etwa 26% der weltweiten Kapazität auf dem Drehrohrföfen. Aufgrund seines größeren Energiebedarfs und den damit verbundenen Kostennachteilen wird er in Zukunft vom Wirbelschichtföfen völlig verdrängt werden.

(6) *Gute Wettbewerbsposition der Altanlagen und Dominanz der Kapazitätserweiterung aus Brownfield Expansion gegenüber der aus Greenfield Expansion bei der Gewinnung von Primäraluminium und Tonerde.* Für die Herstellung von Primäraluminium werden in nächster Zukunft zu einem guten Teil Altanlagen oder aufgerüstete Altanlagen genutzt. Nur ein geringer Teil der Altanlagen wird stillgelegt bzw. nicht mehr genutzt. Die offensichtlich gute Wettbewerbsposition der Altanlagen erklärt sich aus den vergleichsweise geringen Aufwendungen für Up-Grading und den hohen Investitionskosten für Neuanlagen. Starke Verschiebungen mit Blick auf die regionalen Produktionen sind dadurch nicht möglich. Die Tatsache, daß gleichzeitig der Kapazitätszuwachs aus Brownfield Expansion den aus Greenfield Expansion übersteigt, erklärt weiterhin die nur allmählichen regionalen Verschiebungen. Ganz ähnlich ist die Situation bei der Fabrikation von Tonerde. Allerdings ist hier aufgrund der relativ höheren Kapitalkosten der Kapazitätsaufbau aus Neuanlagen noch deutlich geringer. Auch beim Bauxitbergbau zeigen sich Wettbewerbsvorteile bestehender Kapazität. Nur ein kleiner Teil der alten Kapazität wird stillgelegt bzw. nicht genutzt. Entsprechend wird auch hier zusätzliche Kapazität hauptsächlich für Zusatznachfrage geschaffen.

(7) *Sinkende spezifische Aufwendungen an End- und Primärenergie.* Für die spezifischen Aufwendungen an Endenergie ist allein die Effizienz der eingesetzten Techniken auf den Stufen der Hauptkette des Primäraluminiums verantwortlich. Für die Aufwendungen an Primärenergie spielen gleichzeitig die Vorketten und zwar insbesondere die Elektrizitätsbereitstellung für die Elektrolyse eine entscheidende Rolle.

Der Strombedarf im Stoffstrom des Primäraluminiums machte 1995 immerhin 2,4% der gesamten weltweiten Produktion an Elektrizität aus. Für den überwiegenden Teil des Strombedarfs, nämlich 95%, war allein die Elektrolyse verantwortlich. Der spezifische Strombedarf sinkt aufgrund der weitgehenden Verdrängung der alten Techniken zur Elektrolyse durch die PFPB-Technik deutlich. Auch für die anderen Endenergieträger sind spezifisch Einsparungen zu erwarten.

Am weltweiten Aufwand an Primärenergie hatte der Stoffstrom des Primäraluminiums 1995 einen Anteil von etwa 1%. Spezifisch geht der weltweite Aufwand an Primärenergie in nächster Zukunft ganz erheblich zurück. Deutlich über 70% der Einsparungen erklären sich aus den geringeren Aufwendungen für die Elektrolyse. Für diese sind allerdings erst an zweiter Stelle die Einsparungen an Endenergie durch die PFPB-Technik verantwortlich. In erster Linie erklären sich die geringeren Aufwendungen an Primärenergie für die Elektrolyse vielmehr über die höheren Bereitstellungsnutzungsgrade von Strom aus fossilen Energieträgern. An

dritter Stelle spielt die Verlagerung der Produktion von Primäraluminium in Regionen mit einem hohen Anteil an Strom aus Wasserkraft eine Rolle. Strom aus Wasserkraft hat im Vergleich zu den anderen Energieträgern den höchsten Bereitstellungsnutzungsgrad. Die Verlagerung selbst ist ökonomisch begründet. Es besteht eine enge (inverse) Korrelation zwischen den Anteilen an Strom aus Wasserkraft in den Regionen einerseits und den regionalen Stromtarifen für die Elektrolyse andererseits.

Die Verringerung des weltweiten spezifischen Primärenergieaufwands für die Elektrolyse wird hierbei regional zu weit über der Hälfte durch die Regionen China, Frühere Sowjetunion und USA getragen. Diese Regionen sind einerseits relativ große Primäraluminiumproduzenten und gewinnen andererseits einen erheblichen Teil ihres Stroms aus fossilen Energieträgern, für dessen Bereitstellung große technische Verbesserungen erwartet werden.

Die Entwicklung der absoluten Höhe der Aufwendungen an Primärenergie hängt von der Höhe der Zunahme der Nachfrage nach Primäraluminium ab. Liegt diese unter 1,5 bis 2,0% je Jahr, werden die Einsparungen an Primärenergie die zunehmende Produktion an Primäraluminium mindestens kompensieren, d. h. der absolute Aufwand wird stagnieren oder zurückgehen. Bei größerem Zuwachs an Nachfrage wird der absolute Primärenergiebedarf zunehmen, wenngleich stark unterproportional.

(8) Rückläufige spezifische Emissionen an Kohlendioxid und perfluorierten Kohlenwasserstoffen. Der Stoffstrom des Primäraluminiums verursachte 1995 etwa 1% der weltweiten energiebedingten Emissionen an Kohlendioxid. Die spezifischen Emissionen an Kohlendioxid aus dem Stoffstrom des Primäraluminiums gehen aus den gleichen Gründen wie der Primärenergiebedarf in der nächsten Zeit weiter zurück. Die Entwicklung der absoluten Höhe der Emissionen an Kohlendioxid hängt wiederum von der Entwicklung der Nachfrage nach Primäraluminium ab. Bei einem Zuwachs unter 1,5 bis 2,0% je Jahr werden sie stagnieren oder abnehmen, bei höherer Nachfrage stark unterproportional zunehmen. Die perfluorierten Kohlenwasserstoffe entstehen bei der Elektrolyse durch den Anodeneffekt. Die spezifischen Emissionen nehmen aufgrund der Verdrängung der Söderberg-Technik durch die PFPB-Technik sehr stark ab. Dieser Rückgang ist so groß, daß selbst bei einer hohen Zuwachsrate der Nachfrage nach Primäraluminium (bis unter 5% je Jahr) die absoluten Emissionen an perfluorierten Kohlenwasserstoffen zurückgehen.

Literatur

Aluminum Association / U.S. Department of Energy (1998): Inert Anode Roadmap. A Framework of Technology Development, Feb. 1998.

Australian Bureau of Statistics (1998): Australia in Brief, Summary of Operations by Industry, http://statistics.gov.au/websi...

Bergner, Dieter (1994): Entwicklungsstand der Alkali-Chlorid-Elektrolyse, Teil 2: Elektrochemische Größen, wirtschaftliche Folgen, in: *Chemie-Ingenieur Technik* 66 (1994), Nr. 8, S.1026-1033.

Briem, Sebastian et al. (1999): Primärenergiebedarf und spezifische CO₂-Emission der globalen Stromerzeugung 1995 und 2010 - Methodik und Ergebnisse des Energiemodells, Interner Bericht IB 99-12. Lehrstuhl für Reaktorsicherheit und -technik, RWTH Aachen, Aachen 1999.

British Geological Survey: *World Mineral Statistics*, London, verschiedene Jahrgänge.

Brown, Martin / Dammert, Alfredo / Meeraus, Alexander / Stoutjesdijk, Ardy (1983): World Wide Investment Analysis, The Case of Aluminium, World Bank Staff Working Papers, Number 603, 1983.

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (*BUWAL*) (1996): Ökoinventare für Verpackungen, Bd.1, Bern 1996.

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (*BGR*) (1997): Stoffmengenflüsse und Energiebedarf bei der Gewinnung ausgewählter mineralischer Rohstoffe, Teil Aluminium, Hannover 1997.

Bundesministerium für Wirtschaft (*BMWi*) (1998): Energiedaten 1997/98. Nationale und internationale Entwicklung, 1998.

Bundesstelle für Außenhandelsinformation (*BFAI*) (1998): Einfuhrabgaben für Waren der ZTPos. 2601, 2818, 7601 - Diverse Länder, Anfrage des Forschungszentrums Jülich im Januar 1998.

Coulibaly, Siafa (1995): Challenges Facing the Alumina/Bauxite Industry in Guinea, in: *Light Metals* 1995, S.11-15.

CRU (1996): Refinery and Smelter Cost Profiles, London 1996.

Cruz, A. R. (1988): Bayer Plant Site Selection, in: Bielfeldt, K. / Grjotheim, K. (Hg.): Bayer and Hall-Héroult Process - Selected Topics, Düsseldorf/Loeben 1988, S.26-29.

Dammert, A. / Palaniappan, S. (1985): Modelling Investment in the World Copper Sector, Austin, Texas 1985.

Fischer, Klaus P. / Olson, David L. / Richard, Victor (1987): Political Risk and the Trend of New Investment in the World Aluminium Industry, in: *Journal of Economic Development*, Vol. 12 (1987), S.117-136.

Forschungsstelle für Energiewirtschaft (*FfE*) (1993): Die Bereitstellung von elektrischer Energie in Deutschland 1993, München 1993.

Gausemeier, Jürgen / Fink, Alexander / Schlake, Oliver (1996): Szenario-Management: Planen und Führen mit Szenarien, 2., bearb. Aufl., München/Wien 1996.

Haas, Ulrike (1990): Standortperspektiven stromintensiver Produktionen in der Bundesrepublik Deutschland: mögliche Konsequenzen umweltschutzinduzierter Strompreise bei Aluminium und Chlor, Göttingen 1990.

Institut für Bergwerks- und Hüttenmaschinenkunde, Universität Aachen (IBH) (1999): Daten zu den Transportprozessen im Stoffstrom des Primäraluminiums, Datenlieferung im Rahmen des SFB 525, unveröffentlicht, Aachen 1999.

Institut für Metallhüttenwesen und Elektrometallurgie, Universität Aachen (IME) (1999): Daten zu den Produktionsprozessen im Stoffstrom des Primäraluminiums, Datenlieferung im Rahmen des SFB 525, unveröffentlicht, Aachen 1999.

International Energy Agency (IEA) (1998): Energy Prices and Taxes, Fourth Quarter 1997, Paris 1998.

International Iron and Steel Institute (1993): Aluminium - An Industry Profile, Brussels 1993.

Kämpf, F. W. (1988): Der Bauxitaufschluß im Bayer-Verfahren, in: Bielfeldt, K. / Grjotheim, K. (Hg.): Bayer and Hall-Héroult Process - Selected Topics, Düsseldorf/Loeben 1988, S.30-37.

Kendrick, D. / Meeraus, A. / Alatorre, J. (1984): The Planning of Investment Programs in the Steel Industry, Baltimore 1984.

King, James (1991): Aluminium to 1995. The Path to Profitability, London 1991.

King, James (1998a): Supply and Demand: The Outlook for Bauxite and Alumina in the Next Five Years, Paper for the Metal Bulletin's Bauxite & Alumina Seminar 98: Challenges and Change, Hotel Intercontinental Geneva, 15th - 17th March 1998.

King, James (1998b): Aluminium Demand, Supply and Capacity Requirements - a Global View, in: Proceedings of the International Conference on Aluminium, INCAL 1998, 11th - 13th February 1998, New Delhi, Vol.2, S.417-428.

Krüger, Joachim (1997): Unterlagen zur Vorlesung "Allgemeine Metallhüttenkunde", Institut für Metallhüttenwesen und Elektrometallurgie, Universität Aachen, 1997.

Kuckshinrichs, Wilhelm (1998): Projektion des globalen Aluminiumkonsums bis 2010 - Eine Abschätzung im Rahmen des SFB 525, Unveröffentlichtes Papier, Dez. 1998.

Kvande, H. (1998): Environmental Improvements in Aluminium Production, in: Proceedings of the ALUMINIUM 98 Conference, 23-24 September 1998, Essen, Germany.

Labys, Walter C. / Field, Frank R. / Clark, Joel (1985): Mineral Models, in: Vogely, William A. (Ed.): Economics of the Mineral Industries, New York 1985, S. 337-379.

Labys, Walter C. (1989): Spatial and Temporal Allocation Models of Mineral and Energy Markets, in: Labys, Walter C. / Takayama, Takashi / Uri, Noels D. (Eds.): Quantitative Methods for Market-Oriented Economic Analysis over Space and Time, Aldershot 1989, S.17-47.

Landwehr, Ulrich (1997a): Diagnosis and Prognosis of Long-Term Trends in the International Aluminium Economy: Methodological Issues, Interner Bericht FZJ STE-IB-3/97.

Landwehr, Ulrich (1997b): A Model of the International Aluminium Flow, Interner Bericht FZJ STE-IB-7/97.

Landwehr, Ulrich (1998): Economic Determinants of the International Aluminium Flow, Interner Bericht FZJ STE-IB-13/98.

Manne, Alan S. / Mathiesen, Lars (1994): The Impact of Unilateral OECD Carbon Taxes on the Location of Aluminium Smelting, in: *International Journal of Global Energy Issues*, Vol. 6 (1994), S.52-61.

Metallgesellschaft AG: *Metallstatistik*, Frankfurt/Main, verschiedene Jahrgänge.

Ministry of Mining and Energy (Jamaica) (1998): Mineral Industry Health and Safety Report for the Year 1997, Kingston 1998.

MITSUI (1999): Smelters - New Projects, <http://www.mitsui.co.jp/alm/statistics/new.htm>.

Nichols, Randall K. / Serth, Robert W. (1992): The Corporate Aluminum Model: A GAMS-Based Model for Optimal Long Range Planning and Investment Analysis by Aluminum Companies, in: *Light Metals 1992*, S.43-58.

Öko-Institut (1997): Gesamt-Emissions-Modell integrierter Systeme (GEMIS). Ein Computer-Instrument zur Umwelt- und Kostenanalyse von Energie, Transport- und Stoffsystemen, Darmstadt/Freiburg/Berlin 1997.

Opitz, Otto (1997): *Mathematik. Lehrbuch für Ökonomen*, 6., durchges. Aufl., München/Wien 1997.

Paschen, P. / Anzinger, A. (1988): Die Geschichte des Bayer-Verfahrens, in: Bielfeldt, K. / Grjotheim, K. (Hg.): *Bayer and Hall-Héroult Process - Selected Topics*, Düsseldorf/Loeben 1988, S.6-15.

Pawlek, R. (1995): Recent Developments of Inert Anodes for the Primary Aluminium Industry, Part I, in: *ALUMINIUM*, 71. Jg. 1995, H.2, S.202-206.

Pawlek, R. (1997): 1997 TMS Annual Meeting in Orlando: Review of the Aluminium Reduction Technology Sessions, Part II, in: *ALUMINIUM*, 73. Jg. 1997, H.10, S.721-723.

Pawlek, R. (1998a): *Alumina: Refineries and Producers of the World*, Düsseldorf 1998.

Pawlek, R. (1998b): *Primary Aluminium: Smelters and Producers of the World*, Düsseldorf 1998.

Pawlek, R. (1998c): Bauxite and Alumina Activities at the Turn of the Year 1997/98, Part I, in: *ALUMINIUM*, 74. Jg. 1998, H.3, S.168-171.

Pawlek, R. (1998d): Bauxite and Alumina Activities at the Turn of the Year 1997/98, Part II, in: *ALUMINIUM*, 74. Jg. 1998, H.4, S.256-260.

Peters, Horst (1998): Retrofits vs. Greenfield Smelters: What are the Options?, in: *Proceedings of the ALUMINIUM 98 Conference*, 23-24 September 1998, Essen, Germany, Paper 11.

Regnier, J. (1988): Bauxite - Its Technical and Economical History During the Last Hundred Years, in: Bielfeldt, K. / Grjotheim, K. (Hg.): *Bayer and Hall-Héroult Process - Selected Topics*, Düsseldorf/Loeben 1988, S.16-25.

Roullier, J. P. (1995): *Bauxite: Deposits, Mining Operations and Producers of the World*, Düsseldorf 1995.

Schleer, M. / Briem, S. / Quinkertz, R. / Alkan, Z. / Schlimbach, J. (1998): Energetische und stoffliche Analyse von Elektrolysesystemen zur Verhüttung von Tonerde, Interner Bericht der RWTH Aachen, Nr.: 98-4, Aachen 1998.

Schmidt, H. W. (1988): Neue Entwicklungen in der Aluminiumoxidkalzination, in: Bielfeldt, K. / Grjotheim, K. (Hg.): *Bayer and Hall-Héroult Process - Selected Topics*, Düsseldorf/Loeben 1988, S.47-52.

Schreiber, Andrea / Zapp, Petra (1999): Energieverbrauch und Emissionen bei der Produktion von Aluminium. Berechnungen mit Hilfe eines Computermodells, in: *Umwelt*, Bd. 29 (1999), Nr. 1/2, S.62-66.

Schwarz, Hans-Günter (1997): Umfassende Catch-up Theorie als Erklärungsansatz wirtschaftlicher Aufholprozesse, Frankfurt et al. 1997.

Schwarz, Winfried / Leisewitz, André (1996): Aktuelle und künftige Emissionen treibhauswirksamer fluorierter Verbindungen in Deutschland, Studie im Auftrag des Bundesumweltamtes, Frankfurt am Main 1996.

Solymár, Károly (1997): Alumina Refineries of the Next Decades, in: *Associazione Italiana di Metallurgia* (Hg.): *Travaux du comité international pour l'étude des bauxites, de l'alumine et de l'aluminium*, Vol. 24, Milan 1997.

Takayama, Takashi / Judge, George G. (1971): *Spatial and Temporal Price and Allocation Models*, Amsterdam/London 1971.

Takayama, Takashi / Hashimoto, Hideo (1989): A Comparative Study of Linear Complementarity Programming Models and Linear Programming Models in Multi-Region Investment Analysis: Aluminium and Bauxite, in: *Labys, Walter C. / Takayama, Takashi / Uri, Noels D.* (Eds.): *Quantitative Methods for Market-Oriented Economic Analysis over Space and Time*, Aldershot 1989, S.129-163.

Tuchtfeldt, Egon (1982): Ordnungspolitische Konzepte in der Dritten Welt, in: *Clapham, Ronald* (Hg.): *Marktwirtschaft draußen: Beispiele geglückter Übernahmen oder Ansätze in Ländern der Dritten Welt*, Stuttgart/New York 1982, S.3-38.

United Nations Conference on Trade and Development (*UNCTAD*) (1996): *Bauxite, Alumina and Aluminium and the Uruguay Round*, 1996.

U.S. Bureau of Mines (1995): *Economic Tools for the Minerals Industry*, 1995.

VAW ATG (1998): *Smelter Technology*, http://www.vaw-atg.de/smelter_technology.html.

World Aluminium Organisation (1998): *IPAI Statistical Report: Electrical Power Used in Primary Aluminium Production*. IPAI FORM ES.002, <http://www.world-aluminium.org/industry/es002.html>.

World Bank (1994): *Market Outlook for Major Energy Products, Metals, and Minerals*, Washington 1994.

Zwehl, Wolfgang von (1981): Lineare Programmierung, in: *Handwörterbuch der Wirtschaftswissenschaften (HdWW)*, Bd. VI, 1981, S. 360-369.

1. **Energiemodelle in der Bundesrepublik Deutschland. Stand der Entwicklung**
IKARUS-Workshop vom 24. bis 25. Januar 1996
herausgegeben von S. Molt, U. Fahl (1997), 292 Seiten
ISBN 3-89336-205-3
2. **Ausbau erneuerbarer Energiequellen in der Stromwirtschaft**
Ein Beitrag zum Klimaschutz
Workshop am 19. Februar 1997, veranstaltet von der Forschungszentrum Jülich GmbH und der Deutschen Physikalischen Gesellschaft
herausgegeben von J.-Fr. Hake, K. Schultze (1997), 138 Seiten
ISBN 3-89336-206-1
3. **Modellinstrumente für CO₂-Minderungsstrategien**
IKARUS-Workshop vom 14. bis 15. April 1997
herausgegeben von J.-Fr. Hake, P. Markewitz (1997), 284 Seiten
ISBN 3-89336-207-X
4. **IKARUS-Datenbank - Ein Informationssystem zur technischen, wirtschaftlichen und umweltrelevanten Bewertung von Energietechniken**
IKARUS. Instrumente für Klimagas-Reduktionsstrategien
Abschlußbericht Teilprojekt 2 „Datenbank“
H.-J. Laue, K.-H. Weber, J. W. Tepel (1997), 90 Seiten
ISBN 3-89336-214-2
5. **Politiksznarien für den Klimaschutz**
Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes
Band 1. Szenarien und Maßnahmen zur Minderung von CO₂-Emissionen in Deutschland bis zum Jahre 2005
herausgegeben von G. Stein, B. Strobel (1997), 410 Seiten
ISBN 3-89336-215-0
6. **Politiksznarien für den Klimaschutz**
Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes
Band 2. Emissionsminderungsmaßnahmen für Treibhausgase, ausgenommen energiebedingtes CO₂
herausgegeben von G. Stein, B. Strobel (1997), 110 Seiten
ISBN 3-89336-216-9

7. **Modelle für die Analyse energiebedingter Klimagasreduktionsstrategien**
IKARUS. Instrumente für Klimagas-Reduktionsstrategien
Abschlußbericht Teilprojekt 1 „Modelle“
P. Markewitz, R. Heckler, Ch. Holzapfel, W. Kuckshinrichs, D. Martinsen,
M. Walbeck, J.-Fr. Hake (1998), VI, 276 Seiten
ISBN 3-89336-220-7
8. **Politiksznarien für den Klimaschutz**
Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes
Band 3. Methodik-Leitfaden für die Wirkungsabschätzung von Maßnahmen zur Emissionsminderung
herausgegeben von G. Stein, B. Strobel (1998), VIII, 95 Seiten
ISBN 3-89336-222-3
9. **Horizonte 2000**
6. Wolfgang-Ostwald-Kolloquium der Kolloid-Gesellschaft
3. Nachwuchstage der Kolloid- und Grenzflächenforschung
Kurzfassungen der Vorträge und Poster
zusammengestellt von F.-H. Haegel, H. Lewandowski, B. Krah-Urban (1998),
150 Seiten
ISBN 3-89336-223-1
10. **Windenergieanlagen - Nutzung, Akzeptanz und Entsorgung**
von M. Kleemann, F. van Erp, R. Kehrbaum (1998), 59 Seiten
ISBN 3-89336-224-X
11. **Policy Scenarios for Climate Protection**
Study on Behalf of the Federal Environmental Agency
Volume 4. Methodological Guideline for Assessing the Impact of Measures for Emission Mitigation
edited by G. Stein, B. Strobel (1998), 103 pages
ISBN 3-89336-232-0
12. **Der Landschaftswasserhaushalt im Flußeinzugsgebiet der Elbe**
Verfahren, Datengrundlagen und Bilanzgrößen
Analyse von Wasserhaushalt, Verweilzeiten und Grundwassermilieu im
Flußeinzugsgebiet der Elbe (Deutscher Teil). Abschlußbericht Teil 1.
von R. Kunkel, F. Wendland (1998), 110 Seiten
ISBN 3-89336-233-9

13. **Das Nitratabbauvermögen im Grundwasser des Elbeeinzugsgebietes**
Analyse von Wasserhaushalt, Verweilzeiten und Grundwassermilieu im
Flußeinzugsgebiet der Elbe (Deutscher Teil). Abschlußbericht Teil 2.
von F. Wendland, R. Kunkel (1999), 166 Seiten
ISBN 3-89336-236-3
14. **Treibhausgasminderung in Deutschland zwischen nationalen Zielen und
internationalen Verpflichtungen**
IKARUS-Workshop am 27.05.1998, Wissenschaftszentrum Bonn-Bad
Godesberg. Proceedings
herausgegeben von E. Läge, P. Schaumann, U. Fahl (1999), ii, VI, 146 Seiten
ISBN 3-89336-237-1
15. **Satellitenbilddauswertung mit künstlichen Neuronalen Netzen zur
Umweltüberwachung**
Vergleichende Bewertung konventioneller und Neuronaler Netzwerkalgorithmen
und Entwicklung eines integrierten Verfahrens
von D. Klaus, M. J. Canty, A. Poth, M. Voß, I. Niemeyer und G. Stein (1999),
VI, 160 Seiten
ISBN 3-89336-242-8
16. **Volatile Organic Compounds in the Troposphere**
Proceedings of the Workshop on Volatile Organic Compounds in the
Troposphere held in Jülich (Germany) from 27 – 31 October 1997
edited by R. Koppmann, D. H. Ehhalt (1999), 208 pages
ISBN 3-89336-243-6
17. **CO₂-Reduktion und Beschäftigungseffekte im Wohnungssektor durch das
CO₂-Minderungsprogramm der KfW**
Eine modellgestützte Wirkungsanalyse
von M. Kleemann, W. Kuckshinrichs, R. Heckler (1999), 29 Seiten
ISBN 3-89336-244-4
18. **Symposium über die Nutzung der erneuerbaren Energiequellen Sonne und
Wind auf Fischereischiffen und in Aquakulturbetrieben**
Symposium und Podiumsdiskussion, Izmir, Türkei, 28.-30.05.1998.
Konferenzbericht
herausgegeben von A. Özdamar, H.-G. Groehn, K. Ülgen (1999), IX, 245 Seiten
ISBN 3-89336-247-9

19. **Das Weg-, Zeitverhalten des grundwasserbürtigen Abflusses im Elbeeinzugsgebiet**
Analyse von Wasserhaushalt, Verweilzeiten und Grundwassermilieu im Flußeinzugsgebiet der Elbe (Deutscher Teil). Abschlußbericht Teil 3.
von R. Kunkel, F. Wendland (1999), 122 Seiten
ISBN 3-89336-249-5
20. **Politiksznarien für den Klimaschutz**
Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes
Band 5. Szenarien und Maßnahmen zur Minderung von CO₂-Emissionen in Deutschland bis 2020
herausgegeben von G. Stein, B. Strobel (1999), XII, 201 Seiten
ISBN 3-89336-251-7
21. **Klimaschutz durch energetische Sanierung von Gebäuden. Band 1**
von J.-F. Hake, M. Kleemann, G. Kolb (1999), 216 Seiten
ISBN 3-89336-252-2
22. **Electroanalysis**
Abstracts of the 8th International Conference held from 11 to 15 June 2000 at the University of Bonn, Germany
edited by H. Emons, P. Ostapczuk (2000), ca. 300 Seiten
ISBN 3-89336-261-4
23. **Die Entwicklung des Wärmemarktes für den Gebäudesektor bis 2050**
von M. Kleemann, R. Heckler, G. Kolb, M. Hille (2000), ii, 94 Seiten
ISBN 3-89336-262-2
24. **Grundlegende Entwicklungstendenzen im weltweiten Stoffstrom des Primäraluminiums**
von H.-G. Schwarz (2000), XIV, 127 Seiten
ISBN 3-89336-264-9



Forschungszentrum Jülich



Band 24
ISBN 3-89336-264-9

Umwelt
Environment