

Umweltforschungsplan
des Bundesministers für Umwelt,
Naturschutz und Reaktorsicherheit

Forschungsprojekt 299 35 330

**Untersuchung von Batterieverwertungsverfahren und
-anlagen hinsichtlich ökologischer und ökonomischer
Relevanz unter besonderer Berücksichtigung des
Cadmiumproblems**

o. Prof. Dr. O. Rentz
Dipl.-Ing. Bernd Engels
Dr. Frank Schultmann

Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung
Universität Karlsruhe (TH)
Hertzstraße 16

Institutsleiter
o. Prof. Dr. Otto Rentz

IM AUFTRAG
DES UMWELTBUNDESAMTES

Juli 2001

Die diesem Bericht zugrundeliegenden Arbeiten wurden durch das Umweltbundesamt aus Mitteln des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt liegt allein bei den Autoren.

Vorwort

Gemäß der im Oktober 1998 vollständig in Kraft getretenen und im Juli 2001 novellierten Batterieverordnung sind verbrauchte Batterien zurückzugeben und getrennt vom sonstigen Hausmüll gemäß den Vorgaben des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes zu verwerten bzw. schadlos zu beseitigen. Insbesondere für die über 1 Mrd. Gerätebatterien, die jedes Jahr in Deutschland in Verkehr gebracht werden, haben sich dazu in den letzten Jahren neue Strukturen zur Rücknahme, Sortierung und Verwertung herausgebildet. Im vorliegenden Forschungsvorhaben wird eine umfassende Analyse der Batterierücknahme und -verwertung für Deutschland vorgenommen, um den Stand der bisherigen Entwicklung aufzuzeichnen, Entwicklungstrends zu beleuchten, Defizite herauszuarbeiten und Verbesserungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Neben den Gerätebatterien wird der Bereich der Bleistarterbatterien, in dem seit langem aus wirtschaftlichen Motiven heraus verbrauchte Batterien zurückgenommen und verwertet werden, analysiert und bewertet. Aufgrund der aktuellen Diskussion eines Verbotes von Cadmium in Batterien wird diesem Schwermetall ein eigener Schwerpunkt im Rahmen des vorliegenden Berichtes eingeräumt

Wir bedanken uns beim Umweltbundesamt für die finanzielle Förderung aus Mitteln des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und fachliche Unterstützung der Forschungsarbeiten. Dabei gilt unser Dank insbesondere Frau Anja Behnke, Frau Christiane Böttcher-Tiedemann sowie Herrn Werner Koch (FG III 2.4) für die gute Zusammenarbeit, die konstruktiven Anregungen und die Unterstützung der Forschungsarbeiten.

Die vielfältigen Informationen dieses Berichtes konnten nur durch eine intensive Zusammenarbeit mit Industrie und Politik zusammengestellt werden. Hierbei danken wir allen Personen, die unsere Projektarbeiten unterstützt haben. Insbesondere zahlreiche Vertreter von Verbänden, Sammelssystemen, Sortier- und Verwertungsanlagen, Batterieherstellern sowie Forschungseinrichtungen fanden sich bereit, uns mit wichtigen Informationen zu versorgen, Betriebsbesichtigungen zu ermöglichen sowie die Inhalte und Ergebnisse des Forschungsvorhabens konstruktiv zu diskutieren.

Nicht zuletzt danken wir den Mitarbeitern am Deutsch-Französischen Institut für Umweltforschung, Herrn Moritz Zumkeller und Herrn Magnus Fröhling, die einen erheblichen Anteil am Zustandekommen des vorliegenden Endberichtes haben.

Karlsruhe, im Juli 2001

Otto Rentz
Bernd Engels
Frank Schultmann

Berichts - Kennblatt

Berichtsnummer 1. UBA-FB	2.	3.
4. Titel des Berichts Untersuchung von Batterieverwertungsverfahren und -anlagen hinsichtlich ökologischer und ökonomischer Relevanz unter besonderer Berücksichtigung des Cadmiumproblems		
5. Autor(en), Name(n), Vorname(n) Rentz, Otto; Engels, Bernd; Schultmann, Frank		8. Abschlussdatum Juli 2001
6. Durchführende Institution (Name, Anschrift) Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung (DFIU) Universität Karlsruhe (TH) Hertzstraße 16 76187 Karlsruhe		9. Veröffentlichungsdatum
		10. UFOPLAN-Nr. 299 35 330
		11. Seitenzahl 297
7. Fördernde Institution (Name, Anschrift) Umweltbundesamt Bismarckplatz 1, 14193 Berlin		12. Literaturangaben 345
		13. Tabellen und Diagramme 94
15. Zusätzliche Angaben		14. Abbildungen 63
16. Kurzfassung Im Forschungsvorhaben wird eine praxisnahe Analyse der Strukturen und Verfahren zur Rücknahme und Verwertung verbrauchter Batterien vorgenommen. Ziel ist es, einen Beitrag zu einer ökologisch und ökonomisch optimierten Batterieentsorgung zu leisten. Die sich aus der Marktentwicklung und rechtlichen Vorgaben ergebenden Rahmenbedingungen werden analysiert und daraus resultierende organisatorische, logistische und technischen Strukturen der Batterieverwertung behandelt. In Deutschland betriebene Sammelsysteme und Anlagen zur Sortierung von Batteriegemischen sowie Verfahren zur Verwertung von Batterien werden vorgestellt. 19 Verwertungsanlagen werden techno-ökonomisch untersucht und auf Basis einer strukturierten Bewertungsmethodik vergleichend gegenübergestellt. Cadmium und seine Nutzung in Batterien bilden einen eigenen Schwerpunkt im Forschungsvorhaben. Die möglichen Auswirkungen eines Verbotes von Cadmium und Instrumente zu diesem „Phase-Out“ werden erörtert. Weiterhin werden die Rücknahmestrukturen und Verwertungsprozesse für Bleibatterien analysiert und eine Abschätzung der Recyclingquote für Starterbatterien durchgeführt. Mit Hilfe der Ergebnisse des Vorhabens werden abschließend die wesentlichen Anforderungen an einen nationalen Berichtsentwurf über den Stand der Rücknahme und Verwertung verbrauchter Batterien diskutiert.		
17. Schlagwörter Batterien, Recycling, Rücknahme, Sammelsysteme, Verwertung, Sortierung, Batterieverordnung, Cadmium, Starterbatterien, Bewertung, Vergleichsverfahren		
18. Preis	19.	20.

Report No. 1. UBA-FB	2.	3.
4. Report Title Investigation into battery-recycling-processes and -plants with regard to their environmental and economic significance with particular consideration of cadmium		
5. Author(s), Family Name(s), First Name(s) Rentz, Otto; Engels, Bernd; Schultmann, Frank		8. Report Date July 2001
6. Performing Organisation (Name, Address) French-German Institute for Environmental Research University of Karlsruhe Hertzstraße 16 D-76187 Karlsruhe		9. Publication Date
		10. UFOPLAN-Ref.No. 299 35 330
		11. No. of Pages 297
7. Sponsoring Agency (Name, Address) Umweltbundesamt Bismarckplatz 1, D-14193 Berlin, Germany		12. No. of References 345
		13. No. of Tables, Diagrams 94
15. Supplementary Notes		14. No. of Figures 63
16. Abstract Within the research project a practical analysis of the structures and processes for taking back and utilising spent batteries is carried out. The intention is to contribute to a environmentally and economically optimised battery disposal. The market and the legal framework and the consequential organisational, logistic and technical structures are discussed. Collection systems operated in Germany, facilities for sorting battery mixes and processes to utilise batteries are presented. 19 utilisation facilities are techno-economic investigated in detail and compared based on a structured assessment method. Special attention is paid to Cadmium and its use in batteries in the research project. The possible consequences of a ban on Cadmium and instruments to this "phase-out" are discussed. Furthermore the structures of taking back and recycling processes for lead acid batteries are analysed and an estimation for the recycling quota is undertaken. Using the results of the research project, finally the essentials demands which should be met through a national draft report on the state of taking back and utilising of spent batteries are discussed.		
17. Keywords batteries, recycling, take back, collection systems, sorting, battery ordinance, cadmium, starter batteries, assessment, process comparison		
18. Price	19.	20.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Analyse des Batteriemarktes	4
2.1	Bestandaufnahme des derzeitigen Batteriemarktes	4
2.1.1	Entwicklung des Marktes für Primär- und Sekundärbatterien.....	5
2.1.2	Technologien und Anwendungsgebiete von Sekundärbatterien.....	13
2.1.3	Hersteller von Sekundärbatterien.....	16
2.2	Zukünftige Marktentwicklung	17
2.2.1	Technologische Entwicklung.....	18
2.2.2	Rechtliche Rahmenbedingungen und Marktverhalten	19
3	Rechtliche Rahmenbedingungen zur Batterieverwertung	23
3.1	Europäische Rahmenbedingungen	23
3.1.1	Richtlinie 91/157/EWG.....	25
3.1.2	Richtlinie 93/86/EWG.....	26
3.1.3	Richtlinie 98/101/EG	26
3.1.4	Der geplante Ersatz der Richtlinie 91/157/EWG durch eine neue Richtlinie.....	27
3.2	Gesetzliche Rahmenbedingungen in Deutschland.....	29
3.2.1	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG)	29
3.2.2	Batterieverordnung von 1998 (BattV)	31
3.2.3	Erste Verordnung zur Änderung der Batterieverordnung	33
4	Praktische Umsetzung der Rücknahme- und Verwertungspflicht für Batterien in Deutschland	35
4.1	Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien (GRS)	35
4.2	Vfw-REBAT – Batterierücknahmesystem.....	40
4.3	Robert Bosch GmbH	41
4.4	Hersteller mit eigenem Rücknahmesystem.....	42
4.5	Zusammenstellung der Berichtsdaten für das Jahr 2000	43
5	Sortierung von Batteriegemischen	45
5.1	In Deutschland betriebene Sortieranlagen	49
5.1.1	Sortieranlage der GMA, Wiefels.....	51
5.1.2	Sortieranlage der Trienekens AG, Grevenbroich	52
5.1.3	Sortieranlage der Uni-cyc, Bremerhaven.....	54
5.1.4	Sortieranlage der REDUX, Dietzenbach	56

5.1.5	Sortieranlage der Rethmann Kreislaufwirtschaft GmbH & Co. KG, Betzweiler-Wäldle	57
5.1.6	Recyclingzentrum Willershausen	57
5.2	Weitere Verfahren/Entwicklungen zur Batteriesortierung	58
6	Verfahren/Unternehmen zur Verwertung verbrauchter Batterien	59
6.1	Grundsätzliches zur Verwertung verbrauchter Batterien	59
6.2	Verfahren/Unternehmen zur Verwertung von zinkhaltigen Batterien.....	65
6.2.1	MIM Hüttenwerke Duisburg GmbH, Imperial-Smelting-Prozess (ISP)	66
6.2.2	B.U.S AG, Wälzrohr	69
6.2.3	Batrec Industrie AG, Batrec-(Sumitomo-) Prozess	74
6.2.4	VALDI, Elektrolichtbogenofen	79
6.2.5	DK Recycling und Roheisen GmbH, DK-Prozess	83
6.2.6	Elektrolichtbogenofen (EAF).....	86
6.2.7	Weitere Verfahren	96
6.3	Verfahren/Unternehmen zur Verwertung von Batteriegemischen	102
6.3.1	CITRON SA, Oxyreducer-Prozess	102
6.3.2	Weitere Verfahren	110
6.4	Verfahren/Unternehmen zur Verwertung von Nickel/Cadmium-Akkumulatoren	111
6.4.1	ACCUREC GmbH / RVD-Verfahren	111
6.4.2	S.N.A.M, Cadmiumdestillation.....	119
6.4.3	SAFT AB, SAFT Recycling Prozess	121
6.4.4	Inmetco, Drehherd-Direktreduktionsverfahren	124
6.5	Verfahren/Unternehmen zur Verwertung von NiMH-Akkumulatoren	129
6.5.1	NIREC Recycling GmbH.....	129
6.5.2	ACCUREC GmbH / RVD-Verfahren	131
6.5.3	Weitere Verfahren	131
6.6	Verfahren/Unternehmen zur Verwertung von quecksilberhaltigen Batterien.....	132
6.6.1	GMR, VTR-Verfahren	133
6.6.2	NQR, VTR-Verfahren	135
6.6.3	Trienekens AG, MRT-Verfahren	136
6.6.4	Weitere Unternehmen und Verfahren	137

6.7 Verfahren/Unternehmen zur Verwertung von lithiumhaltigen Batterien.....	138
6.7.1 Tieftemperaturzerlegung, ToxCo Inc.....	138
6.7.2 Weitere Verfahren	139
6.8 Schadloose Beseitigung nicht verwertbarer Batterien	140
6.9 Bewertung bestehender und möglicher Verwertungswege für Batterien.....	141
6.9.1 Bewertungsmethode zum Technik- und Anlagenvergleich.....	142
6.9.2 Vergleichende Bewertung der Verwertungsprozesse.....	148
6.9.3 Vergleich der Batterieverwertung mit der Deponierung	162
6.9.4 Schlussfolgerungen aus der Bewertung.....	165
7 Cadmiumproblematik	167
7.1 Generelle Informationen zu Cadmium.....	168
7.1.1 Vorkommen.....	168
7.1.2 Umweltrelevanz.....	168
7.1.3 Cadmiumstoffflüsse in Deutschland	172
7.2 Cadmiummarkt	174
7.2.1 Entwicklung der Produktion von Cadmium	174
7.2.2 Entwicklung der Cadmiumpreise.....	175
7.2.3 Verwendung von Cadmium	177
7.3 Cadmiumbilanzierung für Batterien.....	181
7.3.1 Datengrundlage	181
7.3.2 Bilanzierung von Cadmium in Batterien	182
7.3.3 Prognose der zukünftigen Entwicklung.....	186
7.4 Umweltgerechte Senken für Cadmium im Wirtschaftskreislauf.....	187
7.5 Instrumente zur Steuerung der Cadmiumstoffflüsse.....	189
7.5.1 Grundsätzliches	190
7.5.2 Konkrete Maßnahmen.....	191
7.6 Mögliche Konsequenzen eines generellen Verbots von Cadmium in Batterien.....	201
7.6.1 Konsequenzen für Produkte	201
7.6.2 Konsequenzen für die bestehenden bzw. sich in der Entwicklung befindlichen Rücknahmesysteme	203
7.6.3 Konsequenzen für Verwerter	204
7.6.4 Konsequenzen für die Zinkindustrie.....	206

8	Analyse des Starterbatteriebereichs	209
8.1	Produktion und Gebrauch von Blei.....	209
8.2	Produktions- bzw. Verwertungsprozesse.....	213
8.2.1	Moderne Verfahren zur Bleierzeugung aus primären Rohstoffen	215
8.2.2	Verfahren der Bleierzeugung aus Sekundärmaterialien	219
8.3	Rücknahme von Bleibatterien	226
8.3.1	Einsatz von Bleibatterien	226
8.3.2	Rechtlicher Rahmen der Rücknahme von Starterbatterien.....	228
8.3.3	Struktur der Rücknahme und Entsorgung von Starterbatterien	228
8.4	Abschätzung der Recyclingquote für Bleistarterbatterien.....	232
8.4.1	Vorgehensweise und Datengrundlage	232
8.4.2	Abschätzung des Angebots an Bleiakumulatoren in Deutschland.....	234
8.4.3	Bedarfsabschätzung für Blei als Einsatzstoff der Akkumulatorenproduktion.....	237
8.4.4	Nachfrage nach Starterbatterien.....	237
8.4.5	Anfall verbrauchter Starterbatterien	242
8.4.6	Einsatz von Altbatterien zur Bleigewinnung.....	245
8.4.7	Ergebnis der Abschätzung: Recyclingquote für Bleistarterbatterien in Deutschland.....	246
9	Vorschlag für einen nationalen Berichtsentwurf zur Batterieverbrennung	248
9.1	Anforderungen an den nationalen Berichtsentwurf.....	248
9.2	Schwierigkeiten und Informationsdefizite	251
10	Zusammenfassung und Ausblick	252
11	Literaturverzeichnis	258

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Einteilung der Batterien	5
Abbildung 2-2:	Aufteilung der Umsatz- und Mengenanteile (weltweit) zwischen Primär- und Sekundärbatterien (ohne Starter- und Industriebatterien) für 1997.	6
Abbildung 2-3:	Veränderung der Marktanteile bei Primärbatterien nach Bauart.....	7
Abbildung 2-4:	Prozentuale Änderung des Primärbatterieaufkommens nach Bauart (1995 = 100 %)	8
Abbildung 2-5:	Entwicklung des weltweiten Absatzes und Marktanteils der betrachteten Sekundärbatterien	13
Abbildung 2-6:	Übersicht der Umsatzanteile, differenziert nach Bauart und Hersteller (Gesamtumsatz wiederaufladbarer Gerätebatterien 1999 = 100%)	17
Abbildung 2-7:	Prognose des Umsatz- und des Marktanteils	22
Abbildung 3-1:	Europäische Rahmenbedingungen zum Umgang mit Abfällen	24
Abbildung 3-2:	Symbolik zur Kennzeichnung schadstoffhaltiger Batterien	32
Abbildung 4-1:	Aufgabenbereiche der GRS	37
Abbildung 5-1:	Standorte in Deutschland betriebener Sortieranlagen	50
Abbildung 5-2:	Verfahrensschema der Sortierung bei der GMA, Wiefels.....	51
Abbildung 5-3:	Fließschema der SORBAREC Anlage.....	55
Abbildung 6-1:	Erwartete Entwicklung des Quecksilbergehaltes in Batterien	65
Abbildung 6-2:	Schematische Darstellung einer ISP-Anlage	67
Abbildung 6-3:	Schematische Darstellung einer Wälzanlage.....	70
Abbildung 6-4:	Darstellung der Wälzanlage mit SDHL-Verfahren in Freiberg	71
Abbildung 6-5:	Schematische Darstellung des Batrec-(Sumitomo-) Prozesses	75
Abbildung 6-6:	Prinzipieller Verfahrensablauf bei VALDI.....	79
Abbildung 6-7:	Schematische Darstellung der Ferromanganherstellung im EAF	81
Abbildung 6-8:	Schematische Darstellung des Hüttenwerks der DK Recycling und Roheisen GmbH.....	83
Abbildung 6-9:	Schematischer Aufbau eines Elektrostahlwerks	87
Abbildung 6-10:	Schema eines Lichtbogenofens.....	88
Abbildung 6-11:	Auswirkungen des Batterieeinsatzes auf den Mangengehalt des Stahls.....	93

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 6-12: Kupfer-, Nickel- und Zinngehalte im Stahl bei Batterieeinsatz	94
Abbildung 6-13: Veränderung der Abgaszusammensetzung des EAFs bei Batterieeinsatz	95
Abbildung 6-14: Dioxinwerte im EAF-Abgas bei Batterieeinsatz	96
Abbildung 6-15: Schematische Darstellung des Revatech-Prozesses	97
Abbildung 6-16: Grundfließbild Batterierecyclinganlage der ABRG	100
Abbildung 6-17: Grundfließbild Dörschelofenanlage der ABRG	101
Abbildung 6-18: Schematische Darstellung des Oxyreducer-Prozesses	104
Abbildung 6-19: Recyclingprodukte bei kampagnenweiser Beschickung	107
Abbildung 6-20: Betriebsablauf bei der Verwertung von Gerätebatterien bei der ACCUREC	113
Abbildung 6-21: Betriebsablauf bei der Verwertung von Großakkumulatoren bei der ACCUREC	115
Abbildung 6-22: Schematische Darstellung der RVD-Anlage	116
Abbildung 6-23: Druck- und Temperaturverlauf während des RVD-Prozesses	117
Abbildung 6-24: Verfahrensablauf bei S.N.A.M.	119
Abbildung 6-25: Gesamtstruktur der Industrieakkumulatorenproduktion bei SAFT AB in Oskarshamn	121
Abbildung 6-26: Übersicht über den SAFT Recycling Prozess.....	122
Abbildung 6-27: Schema eines Drehherdofens	125
Abbildung 6-28: Inmetco-Reduktionsprozess.....	126
Abbildung 6-29: Schematischer Ablauf der Gerätebatterieverwertung im Inmetco-Prozess	127
Abbildung 6-30: Schematischer Ablauf der Verwertung von Industrieakkumulatoren im Inmetco-Prozess	128
Abbildung 6-31: Ablauf der NIREC-Mischungsherstellung	130
Abbildung 6-32: Fließbild einer VTR-Anlage	134
Abbildung 6-33: Materialfließbild bei der Aufbereitung quecksilberhaltiger Abfälle	136
Abbildung 6-34: Schematische Darstellung einer MRT-Anlage	137
Abbildung 6-35: Ablaufschema der Methode zur Bewertung der Verwertungswege von Batterien.....	144
Abbildung 7-1: Cadmiumstoffflüsse in Deutschland 1994.....	173
Abbildung 7-2: Entwicklung der Cadmiumpreise 1960 – 2000	176
Abbildung 7-3: Einsatzgebiete für Cadmium (weltweit)	177
Abbildung 7-4: Einsatz für Ni/Cd-Gerätebatterien 1999 (gerundet, Gew.-%).....	178
Abbildung 7-5: In der EU in Verkehr gebrachte Ni/Cd-Industriebatterien [t/a].....	183

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 7-6:	In der EU verwertete Ni/Cd-Industriebatterien [t/a].....	184
Abbildung 7-7:	Entwicklung der Nickelpreise 1960 – 2000	205
Abbildung 8-1:	Standorte von Anlagen zur Bleierzeugung in Deutschland.....	211
Abbildung 8-2:	Schematische Darstellung einer QSL-Anlage	217
Abbildung 8-3:	Schematische Darstellung einer Sirosmelt-Anlage	218
Abbildung 8-4:	Verwertungswege für Blei-Säure-Batterien.....	219
Abbildung 8-5:	Schematische Darstellung einer Schachtofenanlage zur Altbatterieverwertung	221
Abbildung 8-6:	Schematische Darstellung der KTO-Anlage der MRU	223
Abbildung 8-7:	Schematische Darstellung der KTO-Anlage der Harz- Metall GmbH.....	225
Abbildung 8-8:	Regionale Entsorgungsstruktur Pape	230

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Verbleib von Gerätebatterien in Deutschland	11
Tabelle 2-2:	Maximal erreichbare Energiedichten je Batterietyp	14
Tabelle 3-1:	Übersicht über die Änderung des Geltungsbereiches und der Grenzwerte durch Richtlinie 98/101/EWG	27
Tabelle 3-2:	Grenzwerte für sonstige Batterien (§ 2 BattV)	31
Tabelle 4-1:	Durch Nutzer der GRS 1999 und 2000 in Verkehr gebrachte Batterien.....	39
Tabelle 4-2:	Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse der Sammelsysteme (2000)	44
Tabelle 5-1:	Standorte und Betreiber von Batteriesortieranlagen.....	49
Tabelle 6-1:	Vor- und Nachteile beim Vergleich pyro- mit hydrometallurgischen Verfahren.....	61
Tabelle 6-2:	Übersicht zu den untersuchten Verwertungsprozessen	62
Tabelle 6-3:	Verbrauchs- und Produktionsdaten der MHD	66
Tabelle 6-4:	Nebenprodukte und Reststoffe MHD	69
Tabelle 6-5:	Verbesserungen des Wälzprozesses durch Pelletieren und SDHL-Verfahren.....	73
Tabelle 6-6:	Gegenüberstellung genehmigter und gemessener Werte für das SDHL-Verfahren	73
Tabelle 6-7:	Abgaswerte des Batrec- (Sumitomo-) Prozesses	77
Tabelle 6-8:	Abwasserwerte des Batrec-(Sumitomo-) Prozesses	77
Tabelle 6-9:	Massenbilanz des Batrec AG (1999)	78
Tabelle 6-10:	Produkte, Zusammensetzung und Verbleib der Produkt bei VALDI.....	81
Tabelle 6-11:	Abgaswerte des VALDI-Prozesses bei Batterieeinsatz (Konzentrationen)	82
Tabelle 6-12:	Abgaswerte des VALDI-Prozesses bei Batterieeinsatz (Massenströme)	82
Tabelle 6-13:	Erzeugnisse des DK-Verfahrens	85
Tabelle 6-14:	Möglichkeiten zur Absenkung der Gehalte von Begleit- und Spurenelementen.....	89
Tabelle 6-15:	Europäische Schrottsortenliste.....	90
Tabelle 6-16:	Input/Output-Bilanz für ein Elektrostahlwerk.....	91
Tabelle 6-17:	Verbleib von Batteriebestandteilen beim Einsatz im EAF.....	92
Tabelle 6-18:	Analyse ausgewählter Produkte des Batterierecyclings bei CITRON AG	108
Tabelle 6-19:	Emissionen des Oxyreducer-Prozesses in Luft und Wasser	109
Tabelle 6-20:	Emissionen des Oxyreducer-Prozesses in die Luft.....	109

Tabellenverzeichnis

Tabelle 6-21:	Emissionen des Oxyreducer-Prozesses ins Wasser (Messung 11/2000)	110
Tabelle 6-22:	Verdampfungstemperatur für Hg, Cd und Zn in Abhängigkeit des Druckes	117
Tabelle 6-23:	Typische Analyse des RVD-Abgases	118
Tabelle 6-24:	Immissionsmessergebnisse ACCUREC	118
Tabelle 6-25:	Bewertungskriterien für die untersuchten Verwertungswege.....	149
Tabelle 6-26:	Legende zum Kriterium Vermeidung von Schadstoffeinträgen in die Umwelt.....	150
Tabelle 6-27:	Legende zum Kriterium Grad der Verwertung	151
Tabelle 6-28:	Legende zum Kriterium Wirtschaftlichkeit	152
Tabelle 6-29:	Legende zum Kriterium Anforderungen an die Batteriefractionen.....	152
Tabelle 6-30:	Legende zum Kriterium Transportaufwand.....	153
Tabelle 6-31:	Legende zum Kriterium Betriebserfahrung	153
Tabelle 6-32:	Legende zum Kriterium Kapazität	153
Tabelle 6-33:	Legende zum Kriterium Transparenz/Öffentlichkeitsarbeit	154
Tabelle 6-34:	Gegenüberstellung der Verfahren zur Verwertung zinkhaltiger Batterien.....	157
Tabelle 6-35:	Gegenüberstellung der Verfahren zur Verwertung von Nickel/Cadmium-Akkumulatoren.....	159
Tabelle 6-36:	Gegenüberstellung der Verfahren zur Verwertung von NiMH-Akkumulatoren.....	160
Tabelle 6-37:	Gegenüberstellung der Verfahren zur Verwertung von quecksilberhaltigen Batterien	161
Tabelle 6-38:	Gegenüberstellung der Verfahren zur Verwertung von lithiumhaltigen Batterien.....	162
Tabelle 7-1:	Anthropogene Cadmumeinträge in die Umwelt	169
Tabelle 7-2:	Eigenschaften und Vorkommen von Cadmium.....	170
Tabelle 7-3:	Typische Nutzungsdauer cadmiumhaltiger Produkte.....	171
Tabelle 7-4:	Cadmiumproduktion in den Jahren 1990-2000 (in t)	174
Tabelle 7-5:	Cadmium-Absatz in Deutschland nach Produkten (in t).....	177
Tabelle 7-6:	Verbrauch an Cadmium für PVC-Stabilisatoren in Deutschland.....	180
Tabelle 7-7:	Beispiele für Substitutionsmöglichkeiten.....	181
Tabelle 7-8:	Primärzinkqualitäten (alle Angaben in Gew.-%).....	189
Tabelle 7-9:	Sekundärzinkqualitäten (alle Angaben in Gew.-%)	189
Tabelle 7-10:	Zinkerzeugung und -recycling in Deutschland.....	207

Tabellenverzeichnis

Tabelle 8-1:	Bleiproduktion/-verbrauch in Deutschland, der EG und weltweit in Mio. t.....	209
Tabelle 8-2:	Bleinutzung 1989, 1998 und 1999.....	210
Tabelle 8-3:	Daten zu Bleihütten und Recyclinganlagen in Deutschland.....	212
Tabelle 8-4:	BVT-Übersicht Bleierzeugung (1).....	214
Tabelle 8-5:	BVT-Übersicht Bleierzeugung (2).....	214
Tabelle 8-6:	BVT-Übersicht Bleierzeugung (3).....	215
Tabelle 8-7:	BVT-Übersicht Bleierzeugung (4).....	215
Tabelle 8-8:	Verbrauchs- und Produktionsdaten der QSL-Anlage.....	217
Tabelle 8-9:	Verbrauchs- und Produktionsdaten der Siros melt- Anlage	219
Tabelle 8-10:	Verbrauchs- und Produktionsdaten der Schachtofenanlage.....	222
Tabelle 8-11:	Nebenprodukte und Reststoffe der Schachtofenanlage.....	222
Tabelle 8-12:	Verbrauchs- und Produktionsdaten der MRU	224
Tabelle 8-13:	Verbrauchs- und Produktionszahlen der Harz-Metall GmbH	226
Tabelle 8-14:	Gewichtsanteile in Bleiakumulatoren.....	233
Tabelle 8-15:	Exportkoeffizienten für Bleiakumulatoren.....	235
Tabelle 8-16:	Produktionsmengen für Bleiakumulatoren (1999)	235
Tabelle 8-17:	Angebot von Bleiakumulatoren im Inland (Berechnung).....	236
Tabelle 8-18:	Gewichte von Bleibatterien.....	236
Tabelle 8-19:	Starterbatterien nach Einsatzgebiet (1999).....	237
Tabelle 8-20:	Bleibedarf der berechneten Produktion in Deutschland (1999)	237
Tabelle 8-21:	Bleibedarf zur Deckung des Batterieangebots (1999).....	237
Tabelle 8-22:	Fahrzeugproduktion in Deutschland.....	238
Tabelle 8-23:	Erstausrüstungsbedarf in Deutschland (korrigierte Fahrzeugproduktion, 1995-1999)	239
Tabelle 8-24:	Berechneter Bleibedarf für Erstausrüstung (1999).....	239
Tabelle 8-25:	Berechneter Bleibedarf für Erstausrüstung (Durchschnitt 1995 - 1999).....	240
Tabelle 8-26:	Bestand an Kraftfahrzeugen in der BRD (1995 - 1999).....	240
Tabelle 8-27:	Vorübergehend stillgelegte Fahrzeuge (1999)	240
Tabelle 8-28:	Berechneter Bleibedarf für Ersatzstarterbatterien (1999)	241
Tabelle 8-29:	Berechneter Bleibedarf für Ersatzstarterbatterien (Ø 1995 - 1999)	241
Tabelle 8-30:	Erforderliche Bleimenge zur Deckung des berechneten Starterbatteriebedarfs (1999).....	242

Tabellenverzeichnis

Tabelle 8-31:	Bleianfall durch ausgetauschte Starterbatterien (1999).....	243
Tabelle 8-32:	Löschungen aus dem Fahrzeugregister (1995 - 1999)	244
Tabelle 8-33:	Abschätzung des Altbatterieanfalls durch die Verwertung gelöschter Fahrzeuge (1999)	244
Tabelle 8-34:	Abschätzung des Bleiaufkommens durch die Verwertung gelöschter Fahrzeuge (1999)	245
Tabelle 8-35:	Bleiaufkommen aus Entsorgung und Nachrüstung (1999)	245
Tabelle 8-36:	Bleiaufkommen aus Entsorgung und Nachrüstung (Durchschnitt 1995 - 1999).....	245
Tabelle 8-37:	Angebot Bleiakkumulatoren (1999)	246
Tabelle 8-38:	Berechneter Starterbatteriebedarf für die Sekundärbleigewinnung (1999).....	246
Tabelle 8-39:	Ermittlung der Recyclingquote für Starterbatterien für das Jahr 1999	247

1 Einführung

Batterien sind als Lieferanten elektrischer Energie nicht mehr aus dem Alltag wegzudenken. Sie besitzen zahlreiche Anwendungsgebiete: Ob in traditionellen Anwendungsbereichen wie etwa in Kraftfahrzeugen als Starterbatterie, der Notstromversorgung oder in den relativ jungen Märkten der mobilen Unterhaltungs-, Kommunikations- und Informationstechnologie - Batterien sind ein wichtiger Bestandteil in vielen Situationen. Dem Nutzen, den Batterien während ihrer Gebrauchsphase hervorbringen, steht jedoch eine Reihe von Problemen nach ihrem Gebrauch gegenüber. Hierzu zählt insbesondere die schadlose Verwertung. Zentrale gesetzliche Grundlage hierfür bildet das 1996 in Kraft getretene Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz, welches erstmals den Herstellern und Vertreibern von Produkten die Verantwortung für diese auch nach der Gebrauchsphase auferlegt. Ein besonderes Augenmerk gilt dabei der umweltgerechten Verwertung und Beseitigung. Die Bundesregierung wird dazu ermächtigt, durch Rechtsverordnungen festzulegen, für welche Erzeugnisse in welcher Art und Weise die Produktverantwortung wahrzunehmen ist. Insbesondere kann sie Rücknahme- und Rückgabepflichten verordnen, die für die Hersteller und Vertreiber bestimmter Produkte bzw. die Besitzer der resultierenden Abfälle gelten. Beispiele für derartige Rechtsverordnungen sind neben der Batterieverordnung etwa die Altauto- oder die Verpackungsverordnung, in denen die Produktverantwortung im Einzelnen konkretisiert wird.

Hauptintention der Ende 1998 in Kraft getretenen Batterieverordnung ist die Verringerung des Eintrags von Schadstoffen in Abfälle durch die jährlich in einer Stückzahl von über eine Milliarde in Verkehr gebrachten Batterien. Während in Teilbereichen des Batteriemarktes, wie etwa für Bleistarterbatterien, bereits seit langem effiziente Rücknahme- und Verwertungswege etabliert sind, haben sich insbesondere für Gerätebatterien erst in den letzten Jahren Strukturen zur Rücknahme, Sortierung und Verwertung gebildet, deren Funktionsfähigkeit und Bewertung gegenüber möglichen alternativen Strukturen zu untersuchen ist.

In diesem Forschungsprojekt des Deutsch-Französischen Instituts für Umweltforschung wird daher im Auftrag des Umweltbundesamtes eine praxisnahe Analyse der Strukturen und Verfahren zur Rücknahme und Verwertung verbrauchter Batterien vorgenommen. Der vorliegende Bericht leistet einen Beitrag, Wege zu einer ökologisch und ökonomisch optimierten Batterieentsorgung aufzuzeigen.

Zunächst werden dazu die wesentlichen Rahmenbedingungen der Batterie-Verwertung erörtert. So wird in Kapitel 2 eine Analyse des Batterie-

marktes vorgenommen, in der zum einen der Ist-Zustand abgebildet wird und andererseits anhand aktueller Entwicklungen in den verschiedenen Teilbereichen des Batteriemarktes eine Prognose über die zu erwartenden Veränderungen in den nächsten Jahren erstellt wird.

Anschließend werden in Kapitel 3 die auf europäischer wie nationaler Ebene besonders relevanten rechtliche Rahmenbedingungen der Batterie-
verwertung aufgeführt und ihre zentralen Inhalte erläutert.

Die organisatorischen, logistischen und technischen Strukturen, die sich aufgrund der in den Kapiteln 2 und 3 vorgestellten Determinanten herausgebildet haben, werden in den folgenden Kapiteln behandelt.

Analog zur Reihenfolge der drei zentralen entsorgungslogistischen Schritte:

- Sammeln,
- Sortieren und
- Verwerten bzw. Beseitigen

werden zunächst in Kapitel 4 die zur praktischen Umsetzung der Rücknahme- und Verwertungspflicht aufgebauten Rücknahmesysteme erläutert. Nach den Rücknahmesystemen mit ihren Sammelstellen werden anschließend in Kapitel 5 die in Deutschland zur Sortierung der gesammelten Batteriegemische betriebenen Anlagen vorgestellt.

Im Anschluss wird in Kapitel 6 ausführlich auf die Verfahren und Anlagen zur Verwertung der unterschiedlichen chemischen Batteriesysteme eingegangen. Aufbauend auf den dabei gewonnenen Erkenntnissen wird eine Methodik zur Bewertung dieser Verfahren eingeführt. Zum Abschluss des Kapitels werden die vorgestellten Verfahren in einer Gegenüberstellung bewertet.

Zur Unterstützung des Meinungsbildungsprozesses zu dem auf europäischer Ebene diskutierten Verbot von Nickel-Cadmium-Batterien werden in Kapitel 7 die mit Cadmium verbundene Problematik erläutert, eine nationale Stoffbilanz für Cadmium erstellt und Instrumente zur Steuerung der durch Batterien induzierten Cadmiumstoffströme diskutiert.

Der in den vorhergehenden Kapiteln aufgrund seiner besonderen Struktur zunächst ausgesparte Starterbatteriebereich wird in Kapitel 8 behandelt. Hier erfolgt eine Analyse der Strukturen, die sich in Deutschland zur Rücknahme und Verwertung von Starterbatterien herausgebildet haben, sowie, um deren Effizienz beurteilen zu können, eine Abschätzung der Recyclingquote.

Einführung

In Kapitel 9 werden schließlich Kriterien und Anforderungen an einen nationalen Berichtsentwurf zur Batterieverwertung vorgestellt, mit dem der Stand der Rücknahme und Verwertung von Batterien in Deutschland sowohl auf nationaler als auch auf supranationaler Ebene regelmäßig dokumentiert werden kann.

Abschließend werden in Kapitel 10 zentrale Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf weitere Schritte vorgenommen.

2 Analyse des Batteriemarktes

Im vorliegenden Kapitel werden Umsatz und Marktvolumen des Batteriemarktes wiedergegeben. Da einige Batterietypen für die Untersuchung besondere Bedeutung besitzen, erfolgt im Abschnitt 2.1.1 zunächst eine Klassifizierung von Batterien und, darauf aufbauend, die Fokussierung des Betrachtungsgegenstandes. Anschließend werden Marktdaten zu den vorher spezifizierten Sekundärbatterien dargestellt. In Abschnitt 2.1.2 werden als Grundlage für die im Weiteren vorgestellte Marktprognose die Anwendungsgebiete von Sekundärbatterien sowie die hierfür nach heutigem Kenntnisstand geeigneten Technologien vorgestellt. Abgeschlossen wird die Bestandsaufnahme in Abschnitt 2.1.3 durch eine Übersicht über die Marktanteile nach Herstellern und über die wichtigsten Veränderungen, die sich in letzter Zeit auf diesem Gebiet ergeben haben.

Aufbauend auf den vorgestellten Marktdaten wird in Abschnitt 2.2.1 die technologische Entwicklung skizziert. Abschnitt 2.2.2 widmet sich abschließend dem erwarteten Marktverhalten, das durch Gesetzesänderungen bezüglich der Verwendung von Cadmium in Batterien wesentlich beeinflusst werden kann.

2.1 Bestandsaufnahme des derzeitigen Batteriemarktes

Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen an netzunabhängige Quellen elektrischer Energie existieren mehrere Hundert Arten und Bauformen von Batterien (vgl. z.B. [27], [141])¹, die wiederum durch mehrere Hundert Hersteller weltweit produziert werden. Eine grobe Klassifikation der Batteriearten ist der Abbildung 2-1 zu entnehmen. Die Bereiche mit dem gegenwärtig größten Veränderungspotenzial sind in dieser Darstellung schattiert hervorgehoben.

¹) In diesen Quellen finden sich auch Erläuterungen zu den Funktionsprinzipien der einzelnen Batterietypen, auf deren Darstellung hier verzichtet wird.

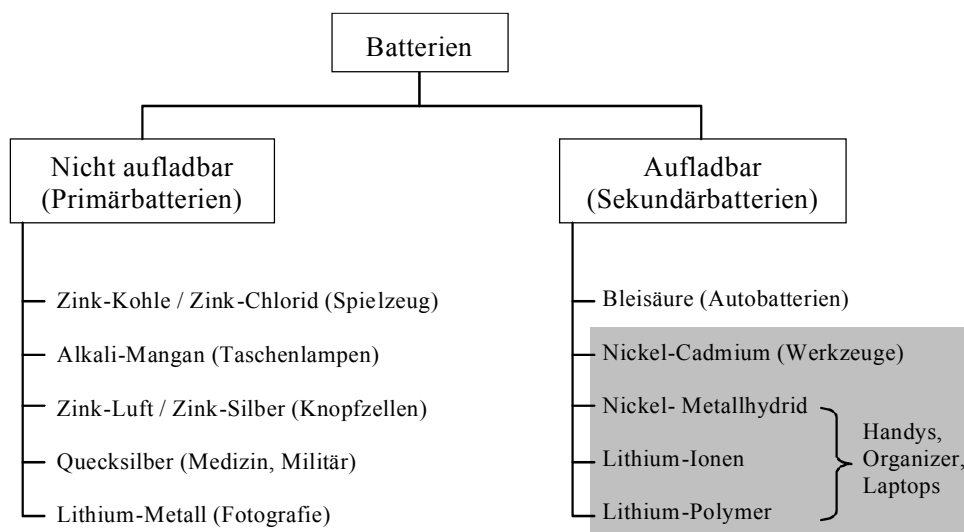


Abbildung 2-1: Einteilung der Batterien

Quelle: in Anlehnung an [37], [88]

2.1.1 Entwicklung des Marktes für Primär- und Sekundärbatterien

Batterien lassen sich in Abhängigkeit der Stromquelle in Primär- und Sekundärbatterien unterscheiden: Während Primärbatterien die elektrische Energie durch eine irreversible chemische Reaktion² selbst erzeugen und somit die originäre Stromquelle darstellen, müssen Sekundärbatterien vor dem (ersten) Gebrauch durch eine externe Stromquelle aufgeladen werden, dienen daher selbst nur als sekundärer Speicher [129]. Zur groben Abgrenzung der Sekundär- von den Primärbatterien wird häufig eine Faustregel herangezogen: Eine Batterie wird als Sekundärbatterie bezeichnet, wenn nach 300 Zyklen³ noch 80 % der ursprünglichen Kapazität erreicht werden [37]. Seit Beginn der Entwicklung von Sekundärbatterien ist dieser Teilmarkt kontinuierlich gewachsen. Trotz dieses Wachstums stellte 1997 weltweit die Stückzahl der in Umlauf gebrachten Sekundärbatterien lediglich einen geringen Anteil (6 %) des Gesamtmarktes dar, obwohl der Anteil des durch sie erzielten Umsatzes mit 29 % deutlich höher lag. (vgl. Abbildung 2-2). Diese Zahlen lassen auf den deutlichen Preisunterschied

²⁾ Irreversibel bedeutet hier, dass die Reaktion nicht durch Anlegen einer äußeren Spannung umgekehrt werden kann, wie dies bei Sekundärbatterien während des Aufladprozesses der Fall ist.

³⁾ Unter einem Zyklus wird ein Entlade- mit anschließendem Ladevorgang verstanden.

zwischen Primär- und Sekundärbatterien schließen. Technologische Weiterentwicklungen konzentrieren sich aufgrund des Marktpotenzials überwiegend auf den Bereich der Sekundärbatterien.

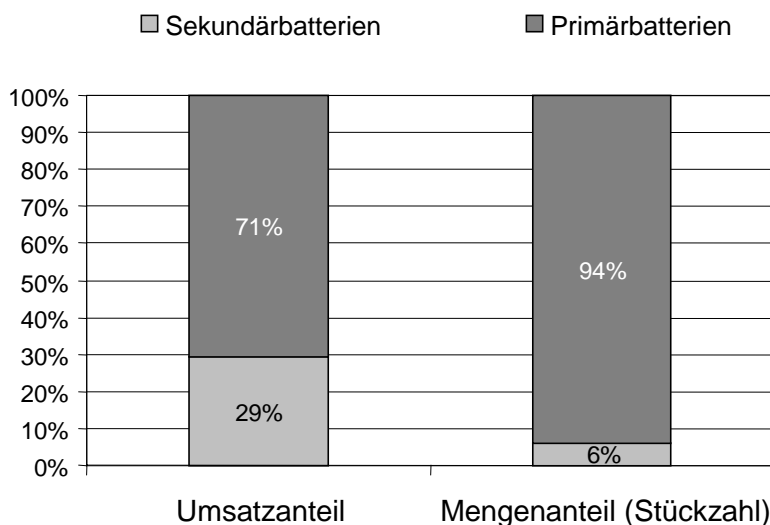


Abbildung 2-2: Aufteilung der Umsatz- und Mengenanteile (weltweit) zwischen Primär- und Sekundärbatterien (ohne Starter- und Industriebatterien) für 1997.

Quelle: [25]

Hauptgründe für die Dominanz der Primärbatterien hinsichtlich der Verkaufszahlen sind praktische Gesichtspunkte wie die sofortige Verfügbarkeit, die hohe Zuverlässigkeit und der weitgehende Wegfall der Selbstentladung im Vergleich zu Sekundärbatterien.

Obwohl im Sektor der Primärbatterien inzwischen eine große Typenvielfalt herrscht, teilen zwei chemische Systeme bzw. Bauformen ca. 85 % des gesamten Aufkommens unter sich auf: Die Zink/Kohle-Rundzellen und die Alkali/Mangan-Rundzellen, die lange Zeit ein ungefähr gleich hohes Aufkommen aufwiesen (vgl. Abbildung 2-3). Während die Zink/Kohle-Batterien die preiswertere Alternative darstellen, weisen die als Alkaline bezeichneten Alkali/Mangan-Batterien bessere Leistungskennwerte auf [32]. Beide Batterietypen kommen hauptsächlich in Spielzeugen und in portablen Musikgeräten zum Einsatz. Auf diesem Markt haben sich in den letzten Jahren keine entscheidenden Aufkommensänderungen ergeben, jedoch scheinen Alkali/Mangan-Batterien zunehmend Zink/Kohl-Batterien zu ersetzen (s. Abbildung 2-4).

Analyse des Batteriemarktes

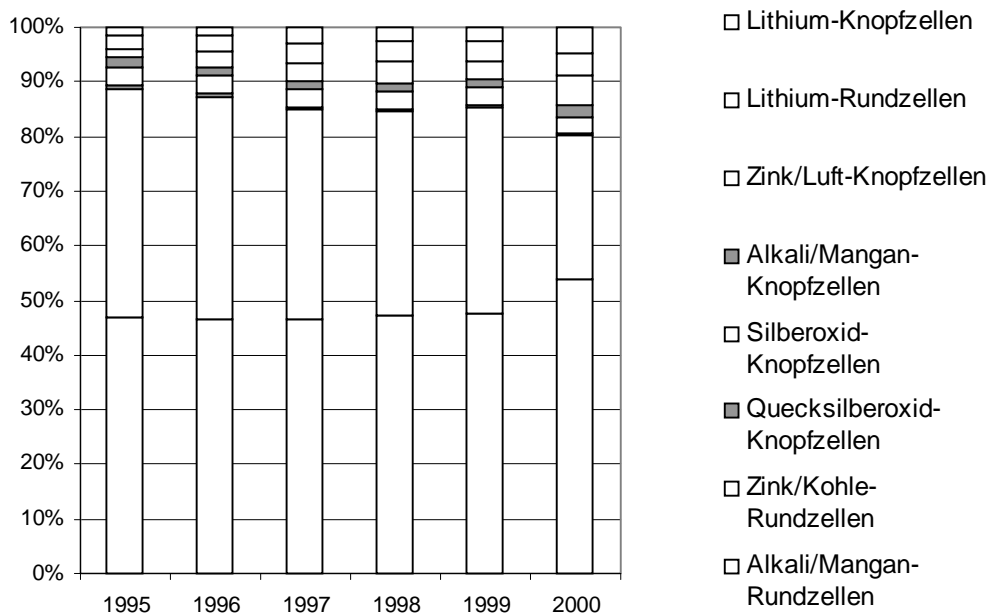


Abbildung 2-3: Veränderung der Marktanteile bei Primärbatterien nach Bauart

Quelle: Anzahl der in Deutschland in Verkehr gebrachten Batterien, [154]

Ein anderes Bild zeigt sich bei Primärbatterien, die einen Nischenmarkt bedienen und deshalb in der Mengenentwicklung eine hohe Korrelation zum Marktverhalten des Produktes aufweisen, für das sie konzipiert sind. Beispielsweise wurden zur Sicherstellung hoher, diskontinuierlicher Ströme Weiterentwicklungen an Lithium-Rundzellen realisiert, um die 1996 eingeführten APS-Fotokameras⁴ geeignet bestücken zu können [32]. Aus diesem Grund ist ein ausgeprägter prozentualer Anstieg der Verwendung von Lithium-Rundzellen ab 1996 zu beobachten, der seitdem allerdings wieder stagniert (vgl. Abbildung 2-4). Ebenfalls signifikante Steigerungen sind beim Absatz von Zink/Luft-Knopfzellen (z.B. Hörgeräte) und bei Silberoxid-Knopfzellen (z.B. Herzschrittmacher) zu beobachten. Haupteinsatzgebiet dieser Varianten ist die Medizintechnik.

⁴) APS = Advanced Photo System

Analyse des Batteriemarktes

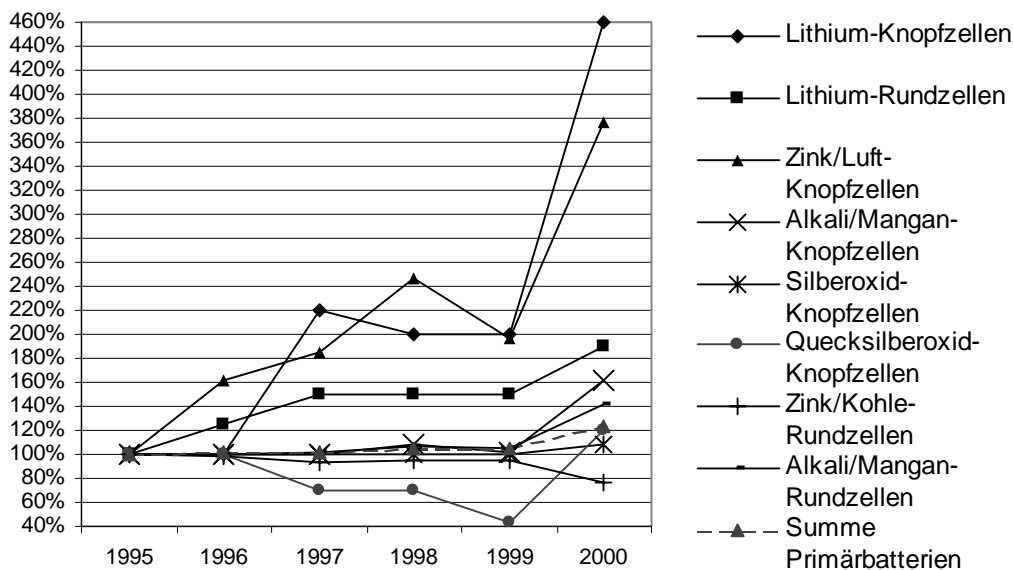


Abbildung 2-4: Prozentuale Änderung des Primärbatterieaufkommens nach Bauart (1995 = 100 %)

Quelle: [154]

Insgesamt kann festgestellt werden, dass sich das Gesamtaufkommen an Primärbatterien nur unwesentlich verändert. Gegenseitige Substitutionen haben ihre Ursache weitgehend in der Elimination von Problemstoffen, so dass das ökologische Gefährdungspotenzial mit der Zeit abnimmt. Der Schwerpunkt hinsichtlich des Schadstoffgehaltes und auch in Bezug auf die Marktdynamik liegt bei den Sekundärbatterien. Aus diesen Gründen findet im Folgenden eine Fokussierung auf **Sekundärbatterien** statt.

Einen Sonderfall hinsichtlich der Klassifikation in Primär- und Sekundärbatterien stellt die Alkali/Mangan-Batterie dar. Bei ihrer Markteinführung Anfang der 60.er Jahre war sie als Primärbatterie konzipiert, die sich durch eine höhere gravimetrische und volumetrische Energiedichte⁵ von der Zink/Kohle-Batterie abhob. Frühzeitig wurde festgestellt, dass sich auch diese Batterien wieder aufladen lassen. Die übliche Lebensdauer ist

⁵⁾ Die Energiedichte gibt an, wie viel Energie eine Batterie bezogen auf das von der Batterie eingenommene Volumen (volumetrische Energiedichte in [Wh/l]) bzw. auf das Batteriegewicht (gravimetrische Energiedichte in [Wh/kg]) abgibt.

jedoch auf ca. 25 Zyklen⁶ begrenzt [281], [304], [189]. Aufgrund ihrer geringen Selbstentladung und ihrer ökologischen Vorteile gegenüber anderen Akkumulatoren kann der Einsatz wiederaufladbarer Alkali/Mangan-Batterien in bestimmten Anwendungen (etwa selten genutzte Geräte) sinnvoll sein. Ihr Anteil am Markt für Sekundärbatterien ist derzeit jedoch zu vernachlässigen; auf die Einbeziehung dieses Batterietyps in die folgenden Betrachtungen wird daher verzichtet.

Weiterhin wurden Bleisäure-Batterien von der weiteren Untersuchung in diesem Kapitel ausgeschlossen. Nahezu das gesamte Aufkommen dieser Batterieart entfällt auf Starterbatterien für Fahrzeuge [37]. In diesem Bereich haben in den letzten Jahren keine einschneidenden Veränderungen stattgefunden. Ursächlich für diese fehlende Dynamik ist zum einen die vollständige Abhängigkeit von den Entwicklungen in der Automobilindustrie. Ihr Absatz hängt im Wesentlichen vom Ersatzteilgeschäft und den Absatzzahlen von Neuwagen ab. Zum anderen existieren für Bleisäure-Batterien bereits etablierte Recyclingsysteme, mit denen eine sehr hohe Recyclingquote erreicht wird [37], so dass Substitutionsbestrebungen aus ökologischen Motiven nicht bestehen. Allerdings besteht die Notwendigkeit zur Weiter- bzw. Neuentwicklung von Autobatterien aufgrund von zwei gravierenden Veränderungen: Zum einen ist, bedingt durch die Zunahme an elektrischen Verbrauchern im Auto wie z.B. Klimaanlage, Navigationssystem usw. mittelfristig eine Umstellung der Bordspannung auf 42 Volt zu erwarten, zum anderen werden leistungsstarke Akkumulatoren für den Antrieb von Elektro- und Hybrid-Autos⁷ benötigt. Diese Tendenzen geben Anstoß zur Neuentwicklung von Autobatterien, da das herkömmliche Bleisäure-Konzept das Anforderungsprofil - eine Kombination aus hoher Leistungsabgabe und -aufnahme, niedrigem Gewicht, Schnellladefähigkeit und hoher Lebensdauer - nicht erfüllen kann [199]. Dementsprechend werden Bleisäure-Batterien mittelfristig erheblich an Bedeutung verlieren. Auf den Bereich der Bleistarterbatterien und der Veränderungen, die dort mittel- bis langfristig erwartet werden, wird in Kapitel 8 eingegangen.

⁶) Für die Vergabe des Umweltzeichens der Jury Umweltzeichen wird von wiederaufladbaren Alkali/Mangan-Batterien gefordert, dass diese beim 25. Entladezyklus noch über mindestens 40 % ihrer ursprünglichen Kapazität verfügen [144].

⁷) Unter Hybrid-Fahrzeugen werden Automobile verstanden, die sowohl über einen Verbrennungsmotor als auch über einen Elektromotor verfügen.

Ausführlich werden dagegen hier die weiteren Sekundärbatterien betrachtet (vgl. Abbildung 2-1): Nickel/Cadmium (Ni/Cd), Nickelmetallhydrid (NiMH), Lithium-Ionen (Li-Ion) und Lithium-Polymer (Li-P). Diese Sekundärbatterien, die sich hauptsächlich durch ihre Leistungsmerkmale sowie ihren Entwicklungsstand unterscheiden, sind zum Großteil Bestandteil mobiler Endgeräte im Haushalts- und Bürobereich. Durch neue Entwicklungen hat sich dieses Marktsegment innerhalb der letzten fünf Jahre stark verändert, wovon auch die Batterieherstellung betroffen war. Da in diesem Segment noch erhebliche Wachstumspotenziale zu erwarten sind, wird im Folgenden nicht nur eine Bestandsaufnahme des Batteriemarktes, sondern auch eine Prognose für die zukünftige Entwicklung der genannten Sekundärbatterien wiedergegeben.

Eine detaillierte Übersicht über die Entwicklung des Aufkommens an Primär- und Sekundärbatterien ab 1994 gibt die Aufstellung des ZVEI⁸ über den Verbleib von Gerätebatterien in Deutschland, die in Tabelle 2-1 wiedergegeben ist. Die Übertragung dieser Zahlen auf den Weltmarkt ist allerdings nur sehr eingeschränkt möglich. Während in der Bundesrepublik Deutschland ca. 20 % der Menge auf Sekundärbatterien entfallen (vgl. Abbildung 2-2), sind es etwa in den USA lediglich 2 % [32]. Die in Tabelle 2-1 wiedergegebenen Zahlen sollten nur als Schätzwerte betrachtet werden, da im Vergleich zu den als genauer angesehenen Daten der Sammelsysteme (vgl. Tabelle 4-2) Differenzen auftreten.⁹ Zur Darstellung der Entwicklung des Batteriemarktes in den letzten Jahren können sie jedoch herangezogen werden.

⁸⁾ ZVEI: Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.

⁹⁾ So weisen etwa die Werte für Nickel/Cadmium-Akkumulatoren erhebliche Differenzen auf. Eine Ursache dafür kann darin liegen, dass die in Geräten importierten Batterien nicht berücksichtigt werden.

Tabelle 2-1: Verbleib von Gerätebatterien in Deutschland

	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
	Gew. (t)	Gew. (t)	Gew. (t)	Gew. (t)	Gew. (t)	Gew. (t)	Gew. (t)
Primär	22.587	23.518	23.341	23.038	23.665	24.459	25.337
<i>Rundzellen</i>	22.450	23.397	23.209	22.882	23.500	24.230	25.080
Alkali/Mangan	9.300	10.740	10.740	10.946	11.432	12.200	15.200
Zink/Kohle	13.000	12.457	12.219	11.636	11.768	11.730	9.500
Lithium	150	200	250	300	300	300	380
<i>Knopfzellen</i>	137	121	132	156	165	229	257
Quecksilberoxid	18	15	15	11	11	7	13
Silberoxid	45	45	45	45	45	54	48
Alkali/Mangan	23	23	23	23	25	31	37
Zink/Luft	21	18	29	33	44	45	67
Lithium	30	20	20	44	40	92	92
Sekundär	3.139	3.632	3.951	4.473	4.845	4.866	3.975
<i>Rundzellen</i>	3.044	3.540	3.878	4.415	4.791	4.807	3.908
NiCd	3.000	2.590	2.318	2.205	2.051	2.057	1.954
NiMH	44	950	1.560	2.210	2.740	2.750	1.954
<i>Knopfzellen</i>	95	92	73	58	54	59	66
NiCd	95	52	16	9	2	2	2
NiMH	-	40	57	49	52	56	59
Lithium	-	-	-	-	-	1	5
<i>Kleinbleiakkus</i>	100	100	100	100	100	100	100

Quelle: Schätzwerte Fachverband Batterien im ZVEI [154]

Nachdem in der technischen Entwicklung von Batterien zwischen 1960 und 1990 kaum Fortschritte zu beobachten waren, finden seit 1990 drastische Veränderungen statt [223]. Hauptursache sind die Entwicklungen auf dem Elektroniksektor: Innerhalb kürzester Zeit wurden Anwendungen, die die Verknüpfung von Mobilität und Informationsverarbeitung zum Ziel haben, technisch realisiert und vom Markt angenommen [197]. Aufgrund ihrer Konzeption erfordern diese Geräte - als Beispiele seien Mobiltelefone und Laptops genannt - eine unabhängig vom Stromnetz funktionierende, leistungsfähige, platz- und gewichtssparende sowie ausfallsichere Stromversorgung.

Diese Anforderungen, die mit der herkömmlichen Technik nicht zu erfüllen waren, stießen den Weiterentwicklungsprozess bei Batterien an. Bedingt durch die Spezifikationen der Anwendungen (hohe Leistungsaufnahme, täglicher Gebrauch), aber auch durch die Positionierung von Sekundärbatterien im oberen Preissegment und der damit verbundenen Aussicht auf ausgeprägte Gewinnmargen konzentrierten sich die Anstrengungen der Hersteller fast ausschließlich auf den Bereich der wiederaufladbaren Energiespeicher.

Begünstigt durch das hohe Marktpotenzial der neuen Anwendungen für Sekundärbatterien konnte die Einführung innovativer Technologien rasch vollzogen werden. So wurde neben der konventionellen Nickel-Cadmium-

(Ni/Cd) Batterie zuerst die Nickelmetallhydrid- (NiMH) und anschließend die Lithium-Ionen-Batterie vorgestellt. Beide Arten von Akkumulatoren haben sich inzwischen auf dem Batteriemarkt etabliert. So weist die herkömmliche und bis vor wenigen Jahren praktisch einzige Variante von Sekundärbatterien im Gerätebereich, die Ni/Cd-Batterie, inzwischen einen Marktanteil von nur noch 48 % weltweit auf; die andere Hälfte des Marktes ist aufgeteilt zwischen NiMH- (38 %) und Lithium-Ionen-Batterien (14 %) (vgl. Abbildung 2-5).

Der von den genannten prozentualen Angaben suggerierte Einbruch des Marktes für Ni/Cd- Batterien wird durch die Betrachtung der absoluten Verkaufszahlen relativiert. Demnach hat sich das mengenmäßige Aufkommen an Ni/Cd-Batterien, gemessen in verkauften Einheiten pro Jahr, kaum verändert. Vielmehr führte eine Expansion der Batterienachfrage zu einer Ausweitung des Marktes. Das zusätzliche Aufkommen wurde nahezu vollständig von den neu entwickelten Batterietypen abgedeckt. Diese Entwicklung unterstreicht das Zusammenwirken zwischen der Konzeption neuer Anwendungen, für die Akkumulatoren benötigt werden, und der davon ausgelösten Anpassung der Energiespeicher. Im Bereich mobiler Elektrogeräte wird europaweit mit einer anhaltenden Umsatzsteigerung von 6 - 8 % bis zum Jahr 2006 gerechnet [184]. Streng genommen kann der Batteriemarkt unterteilt werden in einen Teilmarkt, der hauptsächlich die Energieversorgung von Werkzeugen sowie tragbaren Musikgeräten und elektrischem Spielzeug beinhaltet, und in einen neu entstandenen Teilmarkt, der vorwiegend von der Entwicklung mobiler Kommunikations- und Informationstechnologie (z.B. Handys, Laptops) bestimmt wird. Diese beiden Segmente entwickeln sich unabhängig voneinander.

Analyse des Batteriemarktes

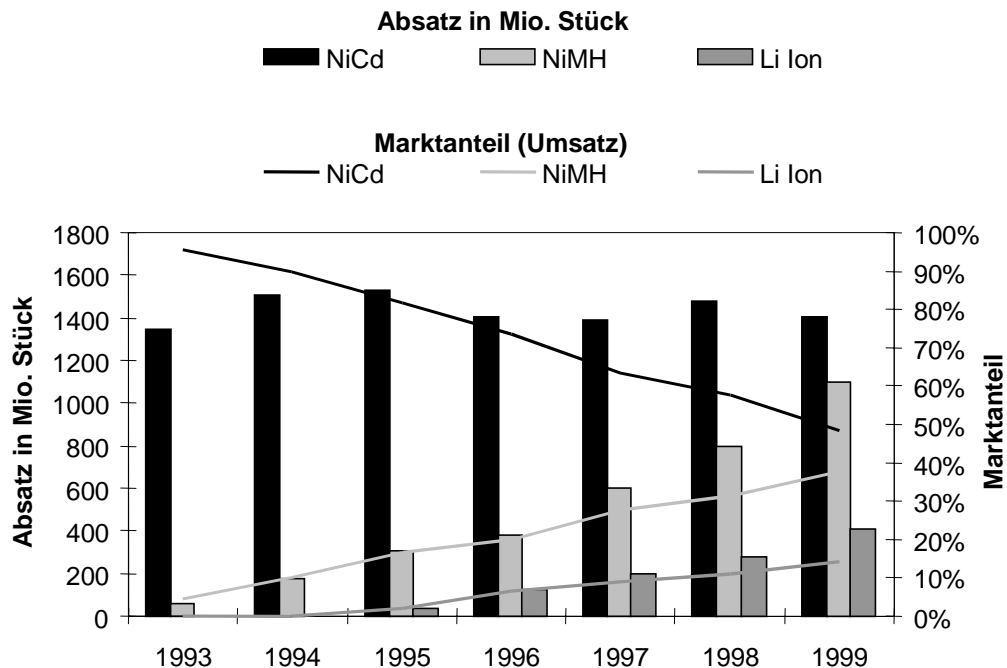


Abbildung 2-5: Entwicklung des weltweiten Absatzes und Marktanteils der betrachteten Sekundärbatterien

Quelle: [223]

2.1.2 Technologien und Anwendungsgebiete von Sekundärbatterien

Wie bereits in Abbildung 2-1 angedeutet wurde, lässt sich in den meisten Fällen eine Batterietechnologie einem dominanten Anwendungsgebiet zuordnen. So dominieren beispielsweise Ni/Cd-Batterien bislang den Bereich der schnurlosen Elektrowerkzeuge, der sogenannten Power-Tools (vgl. Kapitel 7). In diesem Anwendungsbereich werden hohe Stromstärken von z.T. über 40 A gefordert, die auch bei niedrigen Temperaturen benötigt werden. Ferner müssen Schnellladungen aufgrund des Einsatzgebietes möglich sein [195]. Weitere geforderte Eigenschaften sind die Vermeidung von Selbstentladung und die Unempfindlichkeit gegen Tiefentladung [204]. Außerdem wird aufgrund der Anwendungen mehr Wert auf den Preis und auf Robustheit gegen mechanische Beanspruchung als auf das Gewicht gelegt [210]. Aufgrund des hohen Marktpotenzials in diesem Segment - ca. 25 % aller Elektrowerkzeuge sind bereits Akku-Geräte [207] - wird jedoch intensiv an Alternativen zum Ni/Cd-Akkumulator geforscht, so dass eine Verschiebung der anwendbaren Technologie zu erwarten ist. Bereits heute sind nach Industrieangaben für bestimmte Elektrowerkzeuge Ni/Cd-Akkumulatoren durch NiMH-Akkus austauschbar, insbesondere für Geräte mit einer Spannung unter 9,6 V [52].

NiMH- und Lithium-Ionen-Batterien sind für den Einsatz in anderen mobilen Elektronikgeräten sehr gut geeignet. Da die benötigten Stromstärken hier deutlich niedriger als bei Power-Tool Anwendungen sind [195], ist der Ersatz der herkömmlichen Ni/Cd-Batterie hier vollständig möglich. Darüber hinaus ist die gravimetrische und auch die volumetrische Energiedichte der NiMH- und der Lithium-Ionen-Batterien deutlich höher als bei Ni/Cd-Batterien (vgl. Tabelle 2-2). Die dadurch ausgedrückte Relation von abgegebener Leistung zu Gewicht bzw. Volumen ist bei Lithium-Ionen-Batterien noch günstiger als beim NiMH-Typ, der häufig als Energiequelle für Mobiltelefone Anwendung findet. Grund dafür ist auch die Designfreiheit: NiMH-Batterien lassen sich nahezu beliebig konfektionieren, z.B. auch in einer prismatischen Form fertigen. Die Gestaltungsmöglichkeiten etwa für die Entwicklung von Mobiltelefonen wird dadurch nicht eingeschränkt [271].

Tabelle 2-2: Maximal erreichbare Energiedichten je Batterietyp

Energiedichte	Ni/Cd	NiMH	Lithium-Ionen	Lithium-Polymer
volumetrisch [Wh/l]	180	300	350	270
gravimetrisch [Wh/kg]	50	70	140	150

Quellen: [271], [270], [195], [197]¹⁰

Anwendungen, bei denen die Leistungskennwerte eine höhere Priorität haben als Designfragen werden mit Lithium-Ionen-Batterien bestückt. Daher ist diese Variante bei Laptops und Camcordern unverzichtbar. Die rationeller zu produzierende und damit kostengünstigere zylindrische Form wird bei der Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien gegenüber der prismatischen bevorzugt. Aber auch deren Marktpreis liegt deutlich über dem der NiMH-Ausführungen. Da jedoch zu den Lithium-Ionen-Batterien zurzeit keine preisgünstigen Alternativen mit zufriedenstellenden Leistungskennwerten existieren, finden keine Substitutionseffekte statt, so dass gegenwärtig Lithium-Ionen-Batterien bei den genannten Anwendungen nicht zu ersetzen sind.

Eine weitere Innovation, die sich jedoch noch nicht auf dem Markt durchsetzen konnte, stellt die Entwicklung von Lithium-Polymer-Batterien dar. Durch die Maßnahme, den Elektrolyt in einem Polymer-Gel zu bin-

¹⁰⁾ Die in den Quellen angegebenen Bandbreiten für gravimetrische und volumetrische Energiedichten decken ein breites Spektrum ab, so dass die aufgeführten Werte als Orientierungshilfe zu verstehen sind.

den, ist die Gefahr des Auslaufens bereits durch das Konstruktionsprinzip ausgeschlossen. Daher kann auf die Metallummantelung verzichtet werden, wodurch eine erhebliche Reduktion der Batteriedicke möglich wird [197]. Noch vor wenigen Jahren, als das hohe Wachstumspotenzial in der Mikroelektronik und in der Kommunikationstechnologie noch nicht vorhersehbar war, wurden Anwendungsmöglichkeiten für (Blei-)Batterien auf Gelbasis trotz der diesem Bauprinzip eigenen Charakteristika wie hohem Innenwiderstand und geringer Entladeströme im Bereich der Großbatterien (z.B. für Telekommunikationseinrichtungen, Notstromversorgung etc.) erwartet [330]. Inzwischen konzentrieren sich die Entwicklungen von neuen Batterien auf Gelbasis auf sogenannte Bluetooth™-Anwendungen und Smart Cards. Dabei ist Bluetooth™ ein Standard zur kabellosen Datenübertragung mit kurzer Reichweite (ca. 10 m) mit dem Ziel, die Vernetzung von Computerkomponenten, aber auch die Ermöglichung von Konferenzschaltungen bei Telefongesprächen zu vereinfachen [34], [86]. SmartCards sind mit Prozessoren bestückte Scheckkarten, die Informationen nicht wie bisher passiv zur Verfügung stellen, sondern aktiv (d.h. auf dem karteneigenen Prozessor) verarbeiten. Anwendungsgebiete sind z.B. die zur Authentifizierung des Benutzers erforderlichen Daten (PIN-Code). Durch den Verbleib der Daten auf der Karte wird ein Missbrauch (Auslesen der Daten durch Unbefugte) deutlich erschwert [171]. Die Datenverarbeitung auf der Karte erfordert jedoch wie die Bluetooth-Technologie eine mobile Stromversorgung, um alle Vorteile dieser Applikationen ausschöpfen zu können.

Für diese Anwendungen werden flächige, äußerst flache Batterien mit geringen Abmessungen benötigt, deren Leistungsabgabe geringer ist als bei Mobiltelefonen. Aktuelle Entwicklungen führen etwa zu Batterien, die in eine Scheckkarte eingebaut werden können [302]. Ziel der Forschung ist es, die Batteriedicke auf 1 mm zu reduzieren [345]. Dementsprechend ist zu beobachten, dass sich die Entwicklungen in diesem Gebiet auf eine weitere Verringerung der Batteriedicke sowie auf eine Erhöhung der Kapazität konzentrieren [229]. Untersuchungen zufolge sind Lithium-Polymer-Batterien unterhalb einer Dicke von 4 mm Lithium-Ionen-Batterien überlegen. Nach heutigem Stand der Technik ist eine Marktdurchdringung außerhalb der Bluetooth-Anwendungen nicht zu erwarten, da Lithium-Polymer-Batterien bei geringeren Leistungskennwerten deutlich teurer sind als Lithium-Ionen-Batterien gleicher Größe [210], [198]. Allerdings existieren bereits weitere Konzepte im Zusammenhang mit Bluetooth-Anwendungen: Eine Strategie ist beispielsweise der Einbau eines Bluetooth-Chips in ein Mobiltelefon-Akku, um eine integrierte Lösung für den Einsatz von drahtlosen Sprechgarnituren bereitzustellen [188]. Ob diese Variante zur Serienreife geführt wird, bleibt abzuwarten.

2.1.3 Hersteller von Sekundärbatterien

Obwohl das Wachstumspotenzial primär bei den Lithium-Ionen- und NiMH-Batterien gesehen wird, können auch Hersteller, die sich bisher ausschließlich auf die Produktion von Ni/Cd-Akkus spezialisiert haben, von dieser Expansion profitieren. Durch die schnelle Entwicklung neuer Technologien, die vor wenigen Jahren eingeleitet wurde und die sich weiter fortzusetzen scheint, ist es bisher keinem Hersteller gelungen, einen deutlichen Know-how-Vorsprung aufzubauen. Daher erscheint es auch für Hersteller, die bislang keine Erfahrung mit NiMH- oder Lithium-Ionen- bzw. Lithium-Polymer-Batterien haben, lohnenswert, in diese Technologie zu investieren und an der günstigen Marktentwicklung zu partizipieren. Die bereits vollzogene Erweiterung der Angebotspalette der Unternehmen ‚SAFT‘ und ‚Energizer‘ um NiMH-Akkus ist ein Anzeichen für derartige Bestrebungen [193]. Die Entstehung eines neuen Marktsegmentes mit dem Aufkommen von Lithium-Ionen- und Lithium-Polymer- Batterien hat auch dazu geführt, dass neue Wettbewerber Zugang zu dieser Branche gefunden haben. Da der Batteriemarkt seit langer Zeit eine oligopolistische Struktur aufweist, bleibt abzuwarten, ob die Branchenneulinge ihre gegenwärtig durch Technologievorsprung erarbeitete Marktposition halten können oder ob die etablierten Großunternehmen durch Ausweitung von Forschung und Entwicklung ihren Marktanteil dauerhaft sichern können.

Bei den Umsatzanteilen der Hersteller von Batterien (vgl. Abbildung 2-6) haben sich mit der Einführung neuer Technologien einige Änderungen ergeben. Zwar halten die beiden Branchenführer, Sanyo und Matsushita (u.a. Handelsnamen Panasonic [129]), immer noch zusammen 50 % des Gesamtumsatzes. Die andere Hälfte des Marktanteiles ist auf viele kleine Anbieter verteilt, so dass der drittgrößten Produzent Sony lediglich 9 % des Umsatzes auf sich vereinen kann. Zudem sind Sanyo und Matsushita die einzigen Wettbewerber in der Branche, die in allen drei Technologien am Markt vertreten sind. In den Märkten für NiMH- und Lithium-Ionen-Batterien sind jedoch spezialisierte Anbieter zu finden, die eine im Vergleich zum Anteil am Gesamtmarkt hohe Marktstellung behaupten können. So kommt im Bereich der Lithium-Ionen-Batterien Sony auf 18 % und A&T Batteries¹¹ auf 14 % Marktanteil. Als Hersteller von NiMH-Batterien konnte sich Toshiba bislang mit einem umsatzbezogenen Marktanteil von 17 % behaupten [223]. Seit Oktober 2000 konzentriert Toshiba

¹¹⁾ A & T Batteries ist eine Mehrheitsbeteiligung von Toshiba.

durch Abgabe seiner NiMH-Produktion an Sanyo seine Aktivitäten im Batteriegeschäft auf die Li-Ion-Technologie (A&T Batteries) [258]. Folglich wird auch der NiMH-Sektor inzwischen durch Sanyo (50 % Marktanteil) und Matsushita (35 %) dominiert [203].

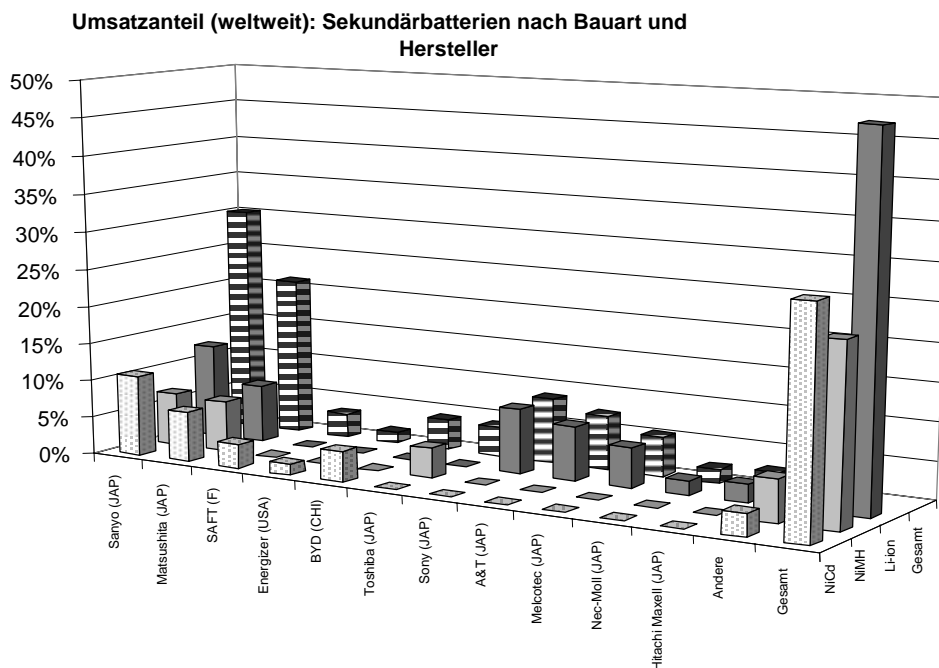


Abbildung 2-6: Übersicht der Umsatzanteile, differenziert nach Bauart und Hersteller (Gesamtumsatz wiederaufladbarer Gerätebatterien 1999 = 100 %)

Quelle: [223]

Werden die Marktanteile nach dem Herkunftsland der Hersteller zusammengefasst, so ist eine Dominanz Japans festzustellen. Abgesehen von Kleinanbietern mit einem Anteil von unter 1 % am Gesamtumsatz haben nur die Unternehmen BYD (China, 4 % Marktanteil) und SAFT (Frankreich, 3 %) ihren Unternehmenssitz außerhalb Japans. Allerdings entfallen im Sektor NiMH-Batterien 23 % des Umsatzes auf Kleinanbieter, deren unternehmensbezogener Anteil am Gesamtumsatz marginal ist [223].

2.2 Zukünftige Marktentwicklung

Die dargestellten Zahlen und Hintergründe zeigen, dass nennenswerte Dynamik hinsichtlich der Marktentwicklung im Wesentlichen im Bereich der neuen Technologien besteht. Das kräftige Wachstum der letzten Jahre scheint seinen Höhepunkt noch nicht erreicht zu haben, wenn man be-

denkt, dass auch die Entwicklung der technischen Anwendungen noch nicht abgeschlossen ist bzw. eine weitere Marktdurchdringung zu erwarten ist. Die stetig steigende Zahl der Mobiltelefon-Benutzer ist hierfür ebenso ein Indiz wie die hohen Investitionen der Telekommunikationskonzerne in die UMTS-Technik. Beispielsweise hat sich innerhalb des Jahres 2000 die Zahl der Mobilfunkkunden in Deutschland auf 48 Mio. verdoppelt. Damit existieren bundesweit erstmals mehr Mobilfunk- als Festnetzanschlüsse [190]. Indiz für das Anhalten des Marktwachstums sind die Prognosen von Nokia, dem Marktführer unter den Herstellern von Kommunikationsendgeräten. Die Ausweitung der Geschäftserwartungen auf ein Umsatzwachstum von 30 % für das Jahr 2001 stützt sich u.a. auf die optimistische Bewertung der neuen Technologien wie WAP-fähige Mobiltelefone [228]. Als Zulieferer der Hersteller von Kommunikationselektronik kann die Batteriebranche für sich in Anspruch nehmen, eine der wenigen Wirtschaftszweige zu sein, die aufgrund der rasanten Zunahme mobiler Anwendungen ein jährliches Wachstum im zweistelligen Prozentbereich verbuchen kann [206], [345]. Aus diesem Grund investieren die Marktführer in der Herstellung von Mobiltelefon-Akkus, Sanyo und Matsushita, zurzeit erhebliche Summen, um die Ausbringungsmenge von Lithium-Ionen-Akkus um 25 % (Sanyo) bzw. 100 % (Matsushita) zu steigern [203].

2.2.1 Technologische Entwicklung

Es ist zu erwarten, dass die Entwicklungsarbeit für neue Energiespeichertechnologien weiter intensiviert wird. Anlass dafür sind weiterführende Anforderungen zur mobilen Verfügbarkeit von elektrischem Strom, die heute noch nicht realisierbar sind. Ein Beispiel dazu ist das Elektroauto, dem gegenwärtig noch wegen mangelnder Reichweite bzw. hohem Gewicht der Akkumulatoren die breite Akzeptanz versagt wird, von dessen Weiterentwicklung zur Marktreife sich die Batterieindustrie jedoch erhebliche neue Marktpotenziale erhofft [208].¹² Auch für andere Fortbewegungsmittel wie z.B. elektrische Fahrräder, Golfcarts oder Rollstühle besteht ein Marktpotenzial, das erhebliche Investitionen in Forschung und Entwicklung rechtfertigt [191].

¹²⁾ Rein batteriebetriebene Fahrzeuge werden nach den derzeit vorliegenden Informationen jedoch vermutlich nur eine Marktnische besetzen können, da die Entwicklungsarbeiten der großer Automobilhersteller sich derzeit auf Brennstoffzellen- und/oder Hybridantriebe konzentrieren [249].

Neben der Entwicklung neuartiger Energiespeichersysteme wird auch intensiv an der Verbesserung der Eigenschaften der bereits etablierten Batteriesysteme gearbeitet. Dazu zählt etwa die Elimination des bei Ni/Cd-Akkus üblichen Memory-Effekts. Dieser Effekt bewirkt, dass Batterien, die häufig nach einer Teilentladung wieder aufgeladen werden, sich an die verringerte Kapazitätsbeanspruchung „erinnern“ und längerfristig einen Teil ihrer Leistungsfähigkeit verlieren. Bei Anwendungen wie schnurlosen Telefonen sind derartige Teilentladungen eher die Regel als die Ausnahme [201], [66]. Ferner werden die Batteriesysteme auf die angestrebten Einsatzgebiete hin optimiert. Beispielsweise ist bei einem NiMH-Akkumulator, der in einem Mobiltelefon Verwendung finden soll, die Kapazität und damit maximal mögliche Betriebsdauer des Gerätes eine der wichtigsten Optimierungsgrößen. Ist das vorgesehene Einsatzgerät für einen Akkumulator des gleichen chemischen Systems ein Elektrowerkzeug, stehen mehr die maximal zu erzielende Stromstärke und die Unempfindlichkeit gegenüber extremen Temperaturen im Vordergrund. Bei allen Batteriesystemen ist seit ihrer Einführung eine stetige Verbesserung ihrer Leistungsmerkmale und eine Differenzierung ihres Aufbaus in Abhängigkeit des Einsatzgebietes zu beobachten.

Substitutionen zwischen den Batteriesystemen in bestimmten Anwendungen erfolgen in der Regel dann, wenn entweder die alternativen Systeme preisgünstiger, leistungsfähiger oder sicherer sind oder bestimmte Nachteile des bislang eingesetzten Systems nicht aufweisen. Hierzu zählt auch die Umweltverträglichkeit der Batterieinhaltsstoffe¹³, die mittels gesetzter oder angedrohter rechtlicher Rahmenbedingungen (vgl. Kapitel 3) zur Entwicklung umweltfreundlicherer Alternativen beigetragen haben.

2.2.2 Rechtliche Rahmenbedingungen und Marktverhalten

Gemessen an der produzierten Stückzahl hat sich die Situation für das Marktsegment der Ni/Cd-Batterien in den letzten Jahren kaum verändert. Der Substitutionseffekt neuer Batteriesysteme macht sich erst langsam bemerkbar. Grund für die Bemühungen, Ni/Cd-Batterien langfristig zu ersetzen, ist allerdings nicht allein die Verbesserung der Leistungskennwerte von Alternativsystemen, sondern auch das von der EU geplante Cadmiumverbot in Batterien. Der Erlass einer EU-Richtlinie, die Batterien

¹³⁾ Im Mittelpunkt stehen hier bislang die Schwermetalle Quecksilber, Cadmium und Blei.

mit mehr als 0,002 Gew.-% Cadmium verbietet, ist in der Diskussion (vgl. Kapitel 3) [294]. Die heute angebotenen Ni/Cd-Gerätebatterien enthalten rund 15 Gew.-% Cadmium. Werden die Vorgaben dieser Richtlinie in nationales Recht umgesetzt, ist ein Ausweichen auf Substitute für Ni/Cd-Batterien notwendig. Dies führt dazu, dass Batteriehersteller wie z.B. SAFT beschlossen haben, in die Weiterentwicklung von Ni/Cd-Batterien nicht mehr zu investieren. Statt dessen will sich das Unternehmen z.B. um den Einstieg in das Power-Tool-Geschäft mit NiMH-Zellen bemühen [210], zumal die bisherige Marktentwicklung ein weiteres Anwachsen des Anteils an Akku-Geräten an der Zahl der abgesetzten Elektrowerkzeuge realistisch erscheinen lässt [343]. Ziel der Weiterentwicklung von NiMH-Zellen ist die technische Substitution von Ni/Cd-Batterien. Es werden verstärkt Forschungsaktivitäten unternommen, um die Kennwerte von NiMH-Batterien gezielt zu verbessern, so dass diese Technik eine Alternative zu Ni/Cd bietet. Beispielsweise wird an einer Kapazitätserweiterung ebenso geforscht wie an der Maximierung des Spitzenstromes.¹⁴ Auf diesen Gebieten sind bereits Erfolge zu verzeichnen, so dass die weitgehende Substitution von Ni/Cd-Batterien durch NiMH-Batterien möglich ist [198]. Schon heute fällt ein Kostenvergleich pro Energieeinheit (in DM/Wh) zwischen Ni/Cd- und NiMH-Akkus im Low-power-Bereich¹⁵ zugunsten der NiMH-Batterie aus. Aufgrund des hohen Forschungsaufwandes ist zu erwarten, dass bis zum Jahr 2008, in dem das Cadmiumverbot in Batterien nach dem Entwurf für die neue EU-Batterierichtlinie in Kraft treten soll, auch im High-power-Bereich der Kostenvergleich zugunsten der NiMH-Technologie ausfällt [65].

Die durch die geplante Gesetzgebung (vgl. Kapitel 3) forcierte Notwendigkeit, Technologien zum Ersatz von Ni/Cd-Batterien bereitzustellen, ist die Hauptursache für die gegenwärtige Marktsituation der Batteriehersteller: Die wesentlichen Marktpotenziale sind mit der Nutzung bzw. Entwicklung neuer Technologien verknüpft. Da - wie gezeigt - im Bereich der NiMH-, Lithium-Ionen- und der Lithium-Polymer-Batterien die Dominanz der beiden führenden Hersteller noch nicht so ausgeprägt ist, kann hier

¹⁴⁾ Gegenwärtig erreichbare Werte werden mit 3 Ah Kapazität und 40 A Spitzenstrom angegeben [198].

¹⁵⁾ Mit Low-power-Bereich sind hier Anwendungen gemeint, in denen - im Gegensatz zum High-power-Bereich - keine besonders hohen Stromstärken gefordert werden. Beispiele für Low-power-Anwendungen sind Laptops, Handys oder Camcorder; High-power-Anwendungen sind z.B. mobile Werkzeuge oder Staubsauger [65].

weiterhin mit Strukturveränderungen gerechnet werden. Durch das hohe Innovationspotenzial, kombiniert mit der Durchsetzbarkeit hoher Preise für leistungsstarke Akkumulatoren (der Teilmarkt für Lithium-Ionen-Batterien wies 1999 bei 14 % der Gesamtverkaufszahlen einen Umsatzanteil von 48 % auf [223]), ist der Anreiz zum Markteintritt für Branchen- neulinge hoch. Eine grundlegende Umstrukturierung hinsichtlich der dominanten Unternehmen ist zwar nicht zu erwarten, eine Spezialisierung neuer, hochtechnisierter Unternehmen auf Nischenbereiche und eine damit verbundene Marktsegmentierung erscheint jedoch möglich und wahrscheinlich. Obwohl sich bereits einige Unternehmungen aufgrund technischer Schwierigkeiten wieder aus der Lithium-Ionen-Batterieproduktion zurückgezogen haben, ist eine Verschärfung des Wettbewerbes durch die wachsende Anzahl an Konkurrenten zu erwarten [271].

Angesichts der aufgezeigten Aspekte wird mit einer deutlichen Veränderung der Marktanteile nach Technologien sowie des absoluten Aufkommens schon in den nächsten zwei Jahren gerechnet. Obwohl aufgrund unterschiedlicher Datenbasis die Prognosewerte verschiedener Quellen deutlich voneinander abweichen, ist der Trend aller Erhebungen gleich: Mittelfristig werden die Ni/Cd-Batterien nur noch eine untergeordnete Rolle am Sekundärbatterie-Markt spielen. Verdrängt werden sie vor allem von den Lithium-Ionen-Batterien, während sich der Marktanteil der NiMH-Akkus nicht entscheidend ändern wird. Vorausgesetzt wird bei allen Prognosen, dass die Anpassung der Leistungseigenschaften der Lithium-Ionen-Batterien an die bei den Ni/Cd-Batterien üblichen Kennwerte innerhalb kurzer Zeit vollzogen sein wird. Die Dynamik der bisherigen technischen Weiterentwicklung im Batteriesektor lässt darauf schließen, dass sich derzeitige technische Restriktionen zukünftig überwinden lassen.

In Abbildung 2-7 werden Prognosen des Umsatz- und Marktanteils von Sekundärbatterien wiedergegeben.

Analyse des Batteriemarktes

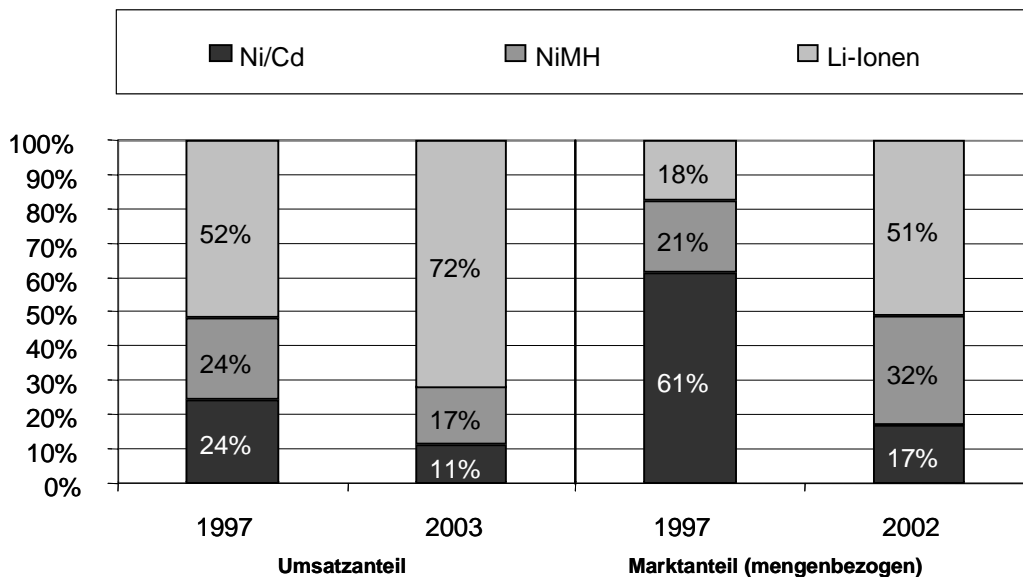


Abbildung 2-7: Prognose des Umsatz- und des Marktanteils

Quelle: [271], [66]

In den diesen Prognosen zugrundegelegten Studien wird eine Umsatzsteigerung um 17 % [271] und eine Steigerung der abgesetzten Mengen um 183 % [66] bis 2002 erwartet. Aus diesen Daten lässt sich schlussfolgern, dass mit einem Preisverfall von ca. 80 % pro Einheit bei Li-Ion- und bei NiMH-Batterien sowie mit einem Preisrückgang von knapp 20 % bei Ni/Cd-Batterien gerechnet wird.

Mittelfristig bleibt abzuwarten, inwieweit durch Brennstoffzellen die bisherigen Batteriesysteme in portablen Anwendungen ersetzt werden können. Neben ihrem möglichen Einsatz im Automobilbereich wird ihnen auch dort ein Potenzial zugestanden [196].¹⁶ Für verlässliche Prognosen ist jedoch die Entwicklung noch nicht weit genug fortgeschritten.

¹⁶⁾ So wurde etwa im Rahmen der Weltausstellung Expo2000 in Hannover ein mit Brennstoffzellen betriebenes Notebook vorgestellt.

3 Rechtliche Rahmenbedingungen zur Batterie- verwertung

In diesem Kapitel werden kurz die für die Rücknahme und Verwertung verbrauchter Batterien besonders relevanten europäischen und nationalen rechtlichen Rahmenbedingungen vorgestellt. Zunächst werden in Abschnitt 3.1 die wichtigsten EU-Richtlinien in chronologischer Reihenfolge vorgestellt sowie die wesentlichen Hintergründe und Konsequenzen der mit ihnen in Kraft tretenden Änderungen aufgezeigt. Darauf aufbauend wird in Abschnitt 3.2 auf die in Deutschland erlassenen Gesetze und Verordnungen eingegangen, die u.a. infolge der geforderten Umsetzung der EU-Richtlinien in nationales Recht verabschiedet worden sind. Besondere Aktualität weist die Erste Verordnung zur Änderung der Batterieverordnung auf, die vor kurzem (Juli 2001) in geltendes Recht umgesetzt wurde. Sie wird in Abschnitt 3.2.3 vorgestellt.

3.1 Europäische Rahmenbedingungen

Auf der Ebene der Europäischen Gemeinschaften gelten neben einigen grundsätzlichen Rahmenfestlegungen für den Umgang und die Behandlung von Abfällen für eine Reihe besonders bedeutender Abfallstoffströme speziell auf diese zugeschnittene Richtlinien. In Abbildung 3-1 ist dies in einer Übersicht dargestellt.

Rechtliche Rahmenbedingungen zur Batterieverwertung

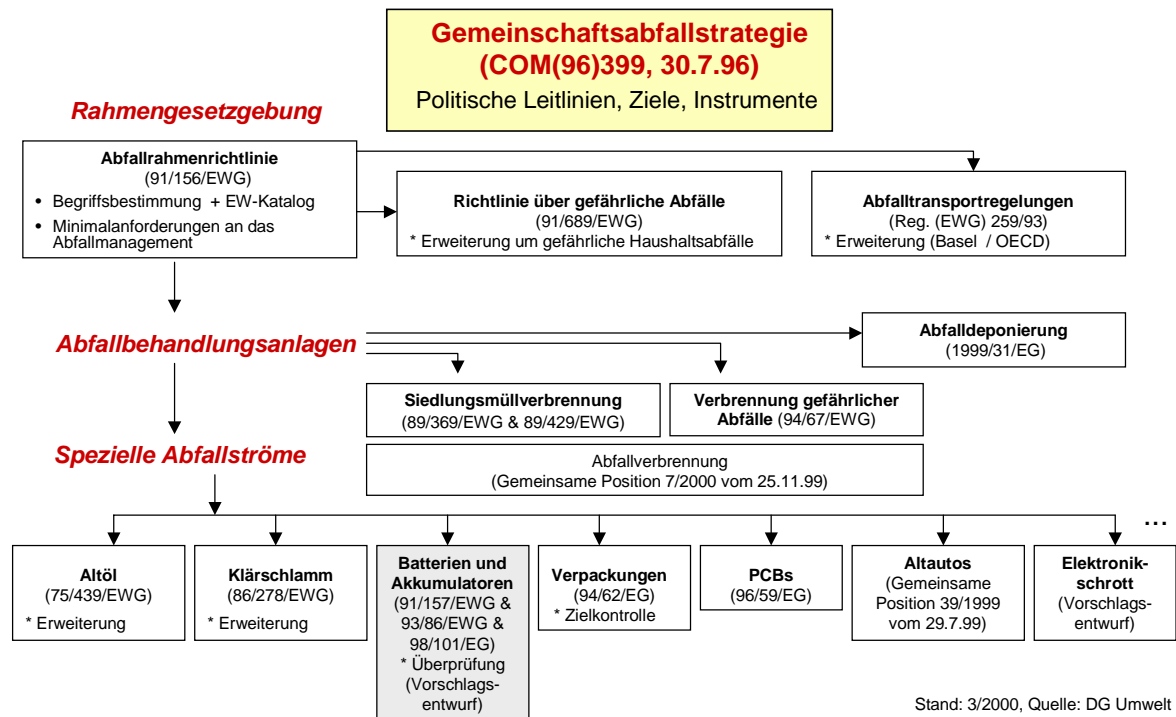


Abbildung 3-1: Europäische Rahmenbedingungen zum Umgang mit Abfällen

Quelle: [90]

Batterien und Akkumulatoren gehören demnach zu den als besonders (umwelt-)relevant erachteten Produkten, für die Regelungen sowohl bzgl. ihrer Produktion¹⁷ als auch bezogen auf den Umgang mit ihnen am Ende der Nutzungsdauer erlassen worden sind. Dabei wurden bislang als Handlungsform aus dem juristischen Instrumentarium¹⁸ der Europäischen Gemeinschaften im Wesentlichen Richtlinien eingesetzt. So ist es auch zu erklären, dass die Rücknahme und Verwertung verbrauchter Batterien in den einzelnen Mitgliedsstaaten sehr unterschiedlich ausgeprägt ist. In der Praxis zeichnet sich seit einiger Zeit die Tendenz ab, bei Formwahlfreiheit im Zweifel lieber eine Verordnung als eine Richtlinie zu erlassen, u.a.

¹⁷⁾ Hier sind insbesondere Vorgaben bzgl. des maximalen Quecksilbergehalts in Batterien gegeben worden.

¹⁸⁾ Als Handlungsformen der EG auf dem Gebiet der sekundären Rechtsetzung sind insbesondere Verordnungen, Richtlinien und Entscheidungen von Bedeutung. Sie unterscheiden sich im Wesentlichen durch den Spielraum, der den Mitgliedsstaaten zu ihrer Umsetzung gegeben ist.

aufgrund schlechter Erfahrungen mit überaus schleppender Umsetzung der Richtlinien durch Mitgliedstaaten mit bis zu 5 - 10 Jahren Verspätung.

Einzelne EU-Länder führten seit etwa 1980 nationale Regelungen bezüglich gefährlicher Substanzen wie Quecksilber, Cadmium und Blei ein. Es fiel jedoch auf, dass durch die verschiedenen Regelungen wie Verbote und Kennzeichnungspflichten Marktverzerrungen auftraten, die den Gemeinsamen Markt behinderten. Als Konsequenz darauf wurde die Richtlinie 91/157/EWG über gefährliche Stoffe enthaltende Batterien und Akkumulatoren erlassen [246], mit dem Ziel, die nationalen Gesetze zu harmonisieren. Diese Richtlinie wurde durch die Richtlinie 93/86/EWG zur Anpassung der Richtlinie 91/157/EWG an den technischen Fortschritt [247] ergänzt, indem genaue Kennzeichnungssysteme eingeführt wurden, die dem Verbraucher signalisieren, welche Batterien vom Hausmüll getrennt zu sammeln sind. Es folgte die Richtlinie 98/101/EG zur Anpassung der Richtlinie 91/157/EWG an den technischen Fortschritt [248], die eine Verschärfung der zulässigen Schadstoffgrenzwerte beinhaltet. Inzwischen ist der Entwurf für eine nachfolgende Richtlinie ausgearbeitet.

Die Richtlinien, die Batterien und ihre Entsorgung betreffen, orientieren sich an der Rahmenrichtlinie über Abfälle aus dem Jahr 1975 (Richtlinie 75/442/EWG) sowie ihrer Novellierung aus dem Jahr 1991 (Richtlinie 91/156/EWG) und der Entschließung 90/c122/02. In diesen Rahmenrichtlinien werden u.a. die Begriffe Abfall und Abfallbeseitigung definiert, die Mitgliedsstaaten zur Vermeidung, Verwertung und / oder Beseitigung von Abfällen verpflichtet sowie der Vorrang der Vermeidung vor der Verwertung und Beseitigung von Abfällen festgelegt.

Die einzelnen Richtlinien zu Batterien werden im Folgenden erläutert.

3.1.1 Richtlinie 91/157/EWG

Die Richtlinie 91/157/EWG über gefährliche Stoffe enthaltende Batterien und Akkumulatoren vom 18. März 1991 [246] erstreckt sich auf Batterien, die je Zelle mehr als 25 mg Quecksilber enthalten, ausgenommen Alkali-Mangan-Batterien, mehr als 0,025 Gew.-% Cadmium enthalten oder mehr als 0,4 Gew.-% Blei enthalten; sowie Alkali-Mangan-Batterien, die mehr als 0,025 Gew.-% Quecksilber enthalten (Anhang I der Richtlinie). Mit der Richtlinie wurde das in Verkehr bringen bestimmter Batterien verboten (§ 3, vgl. Tabelle 3-1). Weiterhin ist zu gewährleisten, dass Batterien und Akkumulatoren, die in Geräte eingebaut sind, am Ende ihrer Nutzungsdauer vom Verbraucher mühelos entfernt werden können (§ 5). Um die stoffliche Rückführung zu erleichtern, wird das gesonderte Einsammeln von Batterien und Akkumulatoren geboten (§ 4 Abs. 1). Darüber

hinaus besteht eine Kennzeichnungspflicht (§ 4 Abs. 2) und die Mitgliedstaaten können gegebenenfalls ein Pfandsystem organisieren (§ 7 Abs. 1). So sollen Rohstoffe gespart und Umweltschäden durch die enthaltenen gefährlichen Stoffe Quecksilber, Cadmium und Blei vermieden werden.

3.1.2 Richtlinie 93/86/EWG

Die Richtlinie 93/86/EWG [247] wurde zur Anpassung der Richtlinie 91/157/EWG [246] an den technischen Fortschritt am 4. Oktober 1993 erlassen. Sie definiert ein detailliertes Kennzeichnungssystem, welches gemäß § 4 Abs. 2 der Richtlinie 91/157/EWG eingerichtet werden muss. So wird festgehalten, welche Batterien ab wann gekennzeichnet werden müssen (§ 1 Abs. 1), wie die Kennzeichnung ausfällt (§ 2) und wer für die Kennzeichnung zuständig ist (§ 5). Daneben wird darauf hingewiesen, dass die Mitgliedstaaten die Öffentlichkeit über die Bedeutung der Kennzeichnung zu informieren haben. Die in der Richtlinie vorgesehenen Maßnahmen entsprechen den Vorschlägen des Ausschusses für die Anpassung der gemeinschaftlichen Abfallvorschriften an den wissenschaftlichen und technischen Fortschritt.

3.1.3 Richtlinie 98/101/EG

Eine weitere Richtlinie zur Anpassung der Richtlinie 91/157/EWG an den technischen Fortschritt ist die Richtlinie 98/101/EG vom 22. Dezember 1998 [248]. In der Begründung zur Erlassung dieser Richtlinie wird explizit auf den Artikel 10 der Richtlinie 91/157/EWG verwiesen. Dort heißt es, dass die Kommission bestimmte Inhalte der Richtlinie nach einem vorgeschriebenen Verfahren und nach einer bestimmten Zeit an den technischen Fortschritt anzupassen hat. Dementsprechend wurde zum einen der Geltungsbereich der Richtlinie ausgeweitet, indem der Quecksilbergrenzwert für Batterien und Akkumulatoren, der als Kriterium für die Anwendbarkeit dieser Richtlinie herangezogen wird, mit Wirkung zum 1. Januar 1999 verschärft wurde. Zusätzlich wird nach einer Übergangszeit, die spätestens am 1. Januar 2000 ausläuft, das in Verkehr bringen von Batterien und Akkumulatoren, deren Quecksilbergehalt über dem angegebenen Grenzwert liegt, verboten (s. Tabelle 3-1). Neben diesen Anpassungen wurden Batterien, die in Geräte eingebaut sind, ausdrücklich in die Richtlinie 98/101/EG mit aufgenommen, um ein Umgehen der Beschränkungen zu verhindern und um die Entsorgung dieser Batterien zu vereinfachen.

Tabelle 3-1: Übersicht über die Änderung des Geltungsbereiches und der Grenzwerte durch Richtlinie 98/101/EWG

Merkmal	Richtlinie 91/157/EWG	Richtlinie 98/101/EWG
Spezifizierung der Batterien und Akkumulatoren, die unter die jeweilige Richtlinie fallen, abhängig von dem Stichtag, an dem sie in Verkehr gebracht werden	<p><i>Stichtag: 18.9.92</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • > 25 mg Hg pro Zelle (Ausnahme: AlMn-Batterien) • > 0,025 Gew.-% Cd • > 0,4 Gew.-% Pb • > 0,025 Gew.-% Hg (nur AlMn-Batterien) 	<p><i>Stichtag 1.1.1999</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • > 0,0005 Gew.-% Hg <p><i>Stichtag 18.9.1992</i> s. Richtlinie 91/157/EWG</p>
Grenzwerte für Batterien, die ab dem Stichtag in Verkehr gebracht werden dürfen	<p><i>Stichtag: 1.1.1993</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • 0,05 Gew.-% Hg (bestimmte AlMn-Batterien) • 0,025 Gew.-% Hg (sonstige AlMn-Batterien) <p>Knopfzellen sind von diesen Beschränkungen ausgenommen</p>	<p><i>Stichtag: 1.1.2000</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • 0,0005 Gew.-% Hg (alle Batterien und Akkumulatoren) <p>Knopfzellen unter 2 Gew.-% Hg sind von dieser Beschränkung ausgenommen</p>

3.1.4 Der geplante Ersatz der Richtlinie 91/157/EWG durch eine neue Richtlinie

Ursache für die Bestrebung, nach den 1993 und 1998 erfolgten Ergänzungen zur Richtlinie 91/157/EWG bereits nach kurzer Zeit eine komplette Überarbeitung realisieren zu wollen, ist die fehlende gesetzliche Verankerung einer Rücknahmepflicht für Batterien.

Weiterhin werden folgende Gründe für den Erlass einer neuen Richtlinie genannt [65]:

- Die bestehende Batterie-Richtlinie(n) deckt nur einen Teil des Batteriemarktes ab, da sie nur Batterien betrifft, die bestimmte Mengen an Quecksilber, Cadmium und Blei beinhalten. Es hat sich herausgestellt, dass eine Regulierung allein auf diesem Gebiet keine effiziente Entsorgung zu gewährleisten vermag und zudem auf Seiten der Verbraucher Verwirrung stiftet und somit eine aktive Beteiligung dieser behindert.
- Aufgrund technologischen Fortschritts ist es heute möglich, Cadmium in den Batterien zu ersetzen. In Anbetracht der umweltgefährdenden Eigenschaften in Zusammenhang mit diesem Schwermetall, ist geplant, den Einsatz von Cadmium langsam auslaufen zu lassen (vgl. Kapitel 7).
- Die Sammel- und Recycling-Raten unterscheiden sich in den verschiedenen Mitgliedsländern erheblich. Um jedoch ein allgemein hohes Niveau des Umweltschutzes zu erreichen, sollen Minimalanforderungen an das Sammeln und Recycling von Batterien in Form von Quoten festgelegt werden.

Weiterer Ansatzpunkt ist das Funktionieren des Gemeinsamen Marktes: Unterschiedliche nationale Vorschriften im Umweltbereich können Handelshemmnisse oder Wettbewerbsverzerrungen verursachen. Eine Aufgabe der neuen Richtlinie ist es daher, weiter dafür zu sorgen, dass diese Unterschiede vermieden und die Vorschriften EU-weit angeglichen werden [65].

Ursprünglich stand die geplante Anpassung der EU-Vorschriften für Batterien und Akkumulatoren im Arbeitsplan der Europäischen Kommission bereits im März 2000 auf dem Programm. Durch den von den Inhalten der geplanten Richtlinie (s.o.) ausgelösten Konflikt zwischen ökologischer Notwendigkeit und der Vermeidung von möglichen Handelshemmnissen auch auf internationaler Ebene¹⁹ haben sich jedoch Verzögerungen ergeben. Hauptstreitpunkte waren in diesem Zusammenhang das beabsichtigte Verbot von Cadmium in Batterien und die gesetzliche Verpflichtung zur Rücknahme [38]. Die Regelung dieser beiden Punkte erscheint jedoch unvermeidbar, da zum einen erwiesen ist, dass Cadmium für den Menschen gesundheitsschädlich ist und sich, wird es unkontrolliert freigesetzt, in der Nahrungskette anreichert [295]. Zum anderen werden bei der heutigen Rechtslage in der EU lediglich zwölf Prozent der gebrauchten Batterien und Akkumulatoren getrennt vom übrigen Abfall gesammelt und umweltgerecht entsorgt [38].

Zusammengefasst beinhaltet die „neue“ Batterie-Richtlinie voraussichtlich folgendes [65]:

- Ausdehnung der Richtlinie auf den kompletten Batteriemarkt.
- Weitere Einschränkungen bezüglich der eingesetzten Materialien - insbesondere Cadmium - unter Einsatz von Substituten. Jedoch Rücksichtnahme auf die Industrie durch lange (bis 2008) andauernde Auslaufzeiten.
- Maßnahmen für ein effizientes Einsammeln, Recyceln und Verwerten von Batterien. Im Gespräch sind Rücklaufquoten von 75 % für Gerätebatterien und 95 % für Industrie- und Starterbatterien. Daneben soll eine Recycling-Quote von mindestens 55 % für alle Batterien und Ak-

¹⁹⁾ Insbesondere die Regierungen Amerikas, Kanadas sowie Australiens sehen das vorgesehene Verbot von cadmiumhaltigen Batterien als unverhältnismäßig an und betrachten es als ungerechtfertigtes Handelshemmnis [38].

kumulatoren erreicht werden [73]. Als „deadline“ für diese Ziele ist das Jahr 2004 anvisiert.

- Alle Batterien und Akkumulatoren sowie Geräte, die solche enthalten, müssen mit dem durchgestrichenen Mülleimer auf Rädern und den darin enthaltenen gefährlichen Substanzen markiert sein.
- Um obige Ziele zu erreichen, ist es den Mitgliedstaaten erlaubt, Steuerungsinstrumente zu benutzen. So dürfen neue umweltschonende Produkte durch steuerliche Anreize gefördert werden und das Sammeln und Recyceln von Batterien subventioniert werden. Es bleiben gleichwohl der Gemeinsame Markt und dessen Regeln zu berücksichtigen.
- Um die Fortschritte auf diesem Gebiet überwachen zu können, obliegt es den Mitgliedstaaten, die entsprechenden Daten zu sammeln und in standardisierter Form an die Kommission weiterzuleiten. Geplant sind Beobachtungszeiträume von drei Jahren.
- Die Mitgliedstaaten werden verpflichtet, die Verbraucher umfangreich über die Umweltgefahren im Hausmüll entsorgter Batterien, bestehende Sammelsysteme, die Bedeutung der Kennzeichnung auf Batterien und Akkumulatoren und den Ausbau von in Geräten eingebauten Batterien zu informieren.

Die Umsetzung der Richtlinien in nationales Recht erfolgt in den einzelnen Ländern der Europäischen Union verhältnismäßig uneinheitlich. Während in Deutschland die Batterieverordnung (s.u.) von Anfang an ein Einsammeln aller Batterien vorsah, wurde dies in Frankreich erst nach einer Phase vorgeschrieben, in der nur verbrauchte schadstoffhaltige Batterien entsprechend behandelt werden mussten. In Dänemark hingegen besteht bei Blei- und Nickel/Cadmium-Batterien eine teils freiwillige (Blei), teils gesetzliche (Nickel/Cadmium) Regelung der Rücknahme, die u.a. durch die Auferlegung einer Entsorgungsgebühr bzw. einer Art Erfolgsprämie für die Sammelunternehmen forciert wird [230]. In Großbritannien wird derzeit noch nach der effizientesten Lösung des mit verbrauchten Batterien verbundenen Umweltproblems gesucht (vgl. etwa [72]).

3.2 Gesetzliche Rahmenbedingungen in Deutschland

3.2.1 Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG)

Das KrW-/AbfG stellt die Umsetzung der Richtlinie 91/156 dar [112] und konvertiert somit die Empfehlungen dieser Richtlinie sowie die Grundsätze zur Abfallbehandlung, die in der Richtlinie 75/442 festgelegt wurden

[245], in national bindendes Recht. Als Grundlage für nachfolgende, auf spezielle Abfallarten anzuwendende Gesetze wird in KrW-/AbfG eine Hierarchisierung der Behandlung von Abfällen festgeschrieben (§ 4 Abs. 1 KrW-/AbfG): Vorrangig ist die Vermeidung von Abfällen anzustreben. Ist dies nicht möglich, so sind anfallende Abfälle einer stofflichen oder energetischen Verwertung zuzuführen, d.h. zur Erzeugung von Sekundärrohstoffen oder zur Gewinnung von Energie zu verwenden (§ 6 KrW-/AbfG).

Ein weiterer Kernpunkt des KrW-/AbfG ist das Zugrundelegen des Kreislaufwirtschaftsgedankens. Es werden nicht nur Vorschriften erlassen, die sich mit der Verwendung und Verwertung von Abfällen befassen, sondern auch die Hersteller dazu angehalten, bereits in der Produktentstehungsphase eine Minimierung der Abfallmengen zu verfolgen. Während der Kreislaufwirtschaftsgedanke in § 4 niedergelegt ist, wird die Produktverantwortung im dritten Teil des KrW-/AbfG (§§ 22 - 25 KrW-/AbfG) geregelt. Demnach sind Hersteller u.a. verpflichtet, Abfallvermeidungsmaßnahmen bereits in der Produktentwicklung zu ergreifen. Um diese sehr allgemein formulierten Forderungen durchsetzen zu können, besteht lt. § 24 Abs. 1 KrW-/AbfG die Möglichkeit, Hersteller zur Rücknahme ihrer Erzeugnisse zu verpflichten und die Einhaltung definierter Entsorgungswege durch entsprechende Maßnahmen, z.B. die Einführung eines Pfandsystems, zu forcieren.

Da das KrW-/AbfG die Behandlung von Abfällen im Allgemeinen regelt, wird auf einzelne Produkte oder Schadstoffe nicht gesondert eingegangen. Um sicherzustellen, dass der Grundgedanke des KrW-/AbfG auch in allen relevanten Bereichen angewendet wird, behält sich der Gesetzgeber ausdrücklich den Erlass ergänzender Rechtsverordnungen vor (§ 24 Abs. 1). Mit Hilfe dieser Rechtsverordnungen, die einzelne Erzeugnis- oder Stoffkategorien zum Gegenstand haben, ist eine differenzierte Regelung der entsorgungsrelevanten Besonderheiten sowohl nach Produkt als auch nach dem aktuellen Stand der Technik möglich.

3.2.2 Batterieverordnung von 1998 (BattV)

Eine dieser Rechtsverordnungen zur Ergänzung des KrW-/AbfG ist die Batterieverordnung, die sich ausdrücklich auf das KrW-/AbfG bezieht [314]. Ergänzend zu der Umsetzung des Kreislaufwirtschaftsgedankens im Batteriesektor hat die Verordnung zum Ziel, Batterien, die bestimmte Schadstoffe enthalten, generell zu verbieten und die Herstellung von mehrfach verwendbaren Batterien zu fördern (§ 1 BattV).

Batterien werden in dieser Rechtsverordnung in drei Klassen eingeteilt (§ 2):

- **Schadstoffhaltige Batterien:** In diese Kategorie fallen Batterien, die mehr als einen bestimmten Grenzwert an Quecksilber, Cadmium oder Blei enthalten (s. Tabelle 3-2).
- **Starterbatterien:** Für diese Akkumulatoren, die „üblicherweise in Kraftfahrzeugen zum Starten, Zünden und Beleuchten eingesetzt werden“ existieren bereits seit langem etablierte Rückgabe- und Verwertungssysteme (vgl. Kapitel 8). Daher sind sie von den Regelungen dieser Rechtsverordnung weitgehend ausgenommen.
- **Sonstige Batterien:** alle Batterien, die die oben genannten Kriterien nicht erfüllen.

Tabelle 3-2: Grenzwerte für sonstige Batterien (§ 2 BattV)

Quecksilber		Cadmium	Blei
Al/Mn-Batterien	sonstige		
< 0,025 Gew.-%	< 25 mg	< 0,025 Gew.-%	< 0,4 Gew.-%

Die Handhabung der verbrauchten Batterien wird detailliert geregelt, um zu verhindern, dass die genannten Stoffe durch ungeeignete Deponierung oder Verbrennung in die Umwelt gelangen und dort ihre gesundheitsgefährdende Wirkung entfalten können. Neben dem hohen Gefährdungspotenzial, das von Quecksilber, Cadmium und Blei ausgeht, gibt vor allen Dingen die sogenannte Mülltonnengängigkeit der Batterien Anlass zur Reglementierung des Abfallaufkommens bei Batterien: Aufgrund ihrer geringen Größe ist es ohne gesetzliche Intervention unvermeidlich, dass ein nicht zu vernachlässigender Teil der Altbatterien über den Hausmüll entsorgt wird und damit der Müllverbrennung oder direkt der Deponie zugeführt wird. Auf diesem Weg würden dann die Problemstoffe in die Umwelt und in die Nahrungskette gelangen können. Um den Verbraucher davon abzuhalten, Altbatterien über den Hausmüll zu entsorgen, wird eine entsprechende Kennzeichnung von schadstoffhaltigen Batterien vorge-

schrieben (§ 11). Das für die Kennzeichnung zu verwendende Symbol ist im Anhang der Rechtsverordnung abgebildet und wird in der Abbildung 3-2 wiedergegeben.

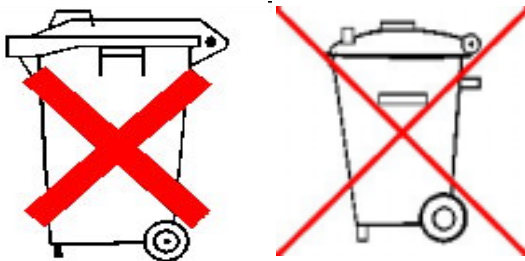


Abbildung 3-2: Symbolik zur Kennzeichnung schadstoffhaltiger Batterien

Quelle: [314]

Um dem Verbraucher die Rückgabe von schadstoffhaltigen Batterien zu ermöglichen, werden die Hersteller zur Einführung eines gemeinsamen, einheitlichen Rücknahmesystems verpflichtet (§ 4 Abs. 2). Darüber hinaus müssen auch die Vertreiber von Batterien Altprodukte unentgeltlich zurücknehmen und dem Rücknahmesystem zuführen (§ 5). Der Erfolg des Rücknahmesystems wird durch regelmäßige Berichte an die zuständige Landesbehörde, zu denen die Betreiber des Rücknahmesystems verpflichtet sind (§ 10), kontrolliert. Auf diese Weise wird dem Grundgedanken der Herstellerverpflichtung, wie sie im KrW-/AbfG verankert ist, Rechnung getragen.

Ausgenommen von der Verpflichtung zum Beitritt zum gemeinsamen Rücknahmesystem (GRS) sind lediglich Hersteller, die nachweisen können, dass sie ein zum GRS adäquates eigenes Rücknahmesystem eingerichtet haben (§ 4 Abs. 3). Diese Option ist vor allem für Hersteller sinnvoll, die einen Spezialmarkt mit wenigen Großkunden bearbeiten, so dass eine hersteller- und sortenreine Rücknahme einfach zu gewährleisten ist. Zusätzlich zu der auch für herstellereigene Rücknahmesysteme geltenden Berichtspflicht (§ 10 Abs. 1 Satz 2) ist die Errichtung eines solchen Systems bei den zuständigen Behörden zu melden (§ 10 Abs. 2).

Die Durchführung der in der Batterieverordnung festgelegten Pflichten der Hersteller durch Dritte ist ausdrücklich gestattet, allerdings haben die mit der Ausführung dieser Tätigkeiten Beauftragten nach § 16 gewisse Kriterien zu erfüllen, die in § 16 Abs. 1 Satz 2 und 3 KrW-/AbfG festgelegt sind. Demnach sind die Hersteller auch in diesem Fall für die Erfüllung der gesetzlichen Pflichten verantwortlich; außerdem müssen die beauftragten Dritten über die erforderliche Zuverlässigkeit verfügen.

3.2.3 Erste Verordnung zur Änderung der Batterieverordnung

Bedingt durch die Aktualisierung der Richtlinie 91/157/EWG durch die Richtlinie 98/101/EWG [248] ist eine korrespondierende Anpassung der Batterieverordnung notwendig geworden. Kernpunkt der Änderungen ist eine strengere Definition des Grenzwertes für Quecksilber zur Klassifizierung von schadstoffhaltigen Batterien. Damit soll der Forderung, die Gesetzgebung in regelmäßigen Abständen an den Stand der Technik anzupassen, nachgekommen werden. Die konsolidierte Fassung der Batterieverordnung, die vom 1. September 2001 an gilt, wurde am 2.7.2001 im Bundesgesetzblatt veröffentlicht [152]; auf sie beziehen sich die folgenden Anmerkungen.

Abweichend von der bisherigen Fassung der Batterieverordnung ist das in Verkehr bringen von Batterien, die mehr als 0,0005 Gew.-% (5 ppm) Quecksilber enthalten, verboten (§ 13 Abs. 1). Eine Ausnahme wird lediglich für Knopfzellen, sofern diese höchstens zwei Gew.-% Quecksilber enthalten, eingeräumt. Zink/Quecksilberoxid-Knopfzellen, die zwischen 21 - 44 Gew.-% Quecksilber enthalten, sind somit verboten. Diese Änderung bedeutet eine deutliche Verschärfung der bisherigen Regelung, bei der lediglich das in Verkehr bringen von Alkali-Mangan-Batterien mit einem Quecksilbergehalt von mehr als 0,025 Gew.-% (in Ausnahmefällen von mehr als 0,05 Gew.-%) verboten war. (§ 13 der BattV i.d.F. von 1998) Mit dieser Modifikation werden die europäischen Vorgaben zur Definition von schadstoffhaltigen Batterien übernommen [40].

Neben der deutlichen Absenkung des zulässigen Quecksilbergehaltes bezieht sich die Änderung der Batterieverordnung auf die Verschärfung der Berichtspflicht zur Ermittlung der Wirksamkeit der Batterierücknahme (§ 10). Wurde bisher vom gemeinsamen Rücknahmesystem der Hersteller, von Herstellern mit eigenem Rücknahmesystem sowie von den Vertreibern von Starterbatterien und sonstigen Batterien gemäß § 8 lediglich eine jährliche Berichterstattung verlangt, ist nun von jeder dieser Gruppen eine nachprüfbare Dokumentation zu erstellen.

Der Inhalt der Dokumentation ist im Vergleich zum vorher geforderten Bericht unverändert geblieben; aufzunehmende Daten sind weiterhin (§ 10 Abs. 1 Satz 1):

1. die Masse der in Verkehr gebrachten Batterien,
2. die Masse der zurückgenommenen Batterien,
3. die Ergebnisse der Verwertung und Beseitigung sowie die
4. für die Sortierung, Verwertung und Beseitigung gezahlten Preise.

Ferner haben die zur Anfertigung einer Dokumentation Verpflichteten die Unterlagen drei Jahre lang aufzubewahren.

Um eine Durchsetzung der Dokumentationspflicht erreichen zu können, wurde die Missachtung der Pflicht zur zeitlich und inhaltlich korrekten Vorlage als Ordnungswidrigkeitstatbestand neu in die Batterieverordnung aufgenommen (§ 16 Satz 1 Nr. 7). Damit besteht die Möglichkeit, im Falle der Nichteinhaltung der sich aus § 10 ergebenden Vorschriften Bußgelder zu verhängen. Damit soll zum einen die zentrale Bedeutung der Dokumentationspflicht als Kontrollinstrument der Verantwortung von Herstellern und Vertreibern zur Entsorgung von Batterien deutlich gemacht werden, zum anderen wird eine Vereinheitlichung der Vollzugsregelungen im Vergleich zu Regelungen für andere Produktgruppen (z.B. Verpackungsverordnung) erreicht [40].

Notwendig wurde die detaillierte Regelung der Dokumentationspflicht durch die Besonderheit der in der Batterieverordnung geregelten Rücknahme, auf die die Nachweisverordnung [316] nicht anwendbar ist [40]. Um Eindeutigkeit hinsichtlich der Anwendbarkeit von Batterieverordnung bzw. Nachweisverordnung zu erreichen, wird in § 10 der zusätzliche Absatz 3 mit aufgenommen, in dem der Beginn und das Ende der Rücknahme genau definiert wird [40].

Im Ergebnis soll die Änderung der Batterieverordnung bewirken, dass die Menge der unsachgemäß über den Hausmüll entsorgten Batterien, die zurzeit auf bis zu 70 % des Gesamtaufkommens geschätzt wird [41], deutlich verringert wird. Denn zusätzlich zu der toxischen Wirkung, die die Batterieinhaltsstoffe auf die Umwelt ausüben, bereitet das Vorkommen dieser Materialien im Hausmüll Schwierigkeiten bei der Abfallaufbereitung durch mechanisch-biologische Verfahren [41]. Die geänderte Batterieverordnung bildet daher die Grundlage für die Vermeidung von Verunreinigungen in aufbereitbaren Abfallstoffen und für die Sicherstellung der fachgerechten Behandlung von Problemstoffen aus Altbatterien.

4 Praktische Umsetzung der Rücknahme- und Verwertungspflicht für Batterien in Deutschland

Die Batterieverordnung schreibt für die Hersteller der Batterien die Einrichtung eines gemeinsamen Rücknahmesystems zur Gewährleistung der Rücknahme und der Organisation der Entsorgungsleistungen oder die Beteiligung an einem solchen vor (§ 4 Abs. 2 BattV, vgl. Abschnitt 3.2.2). Alternativ können Hersteller eigene Systeme einrichten, sofern diese nach einer Frist von zwei Jahren von ihrer Gründung an gerechnet mindestens die gleiche Rücklaufquote wie das gemeinsame System erreichen (§ 4 Abs. 3 BattV). Im Folgenden werden das in Deutschland bestehende Gemeinsame Rücknahmesystem Batterien, das Vfw-REBAT-Batterierücknahmesystem der Vfw AG und die Aktivitäten der Robert Bosch GmbH sowie weiterer Unternehmen beschrieben. Mit diesen Rücknahmesystemen kommen fast alle auf dem deutschen Markt vertretenen Unternehmen den Verpflichtungen der BattV nach. Gleichwohl wird angenommen, dass es in Deutschland und Europa immer noch Trittbrettfahrer, d.h. Unternehmen, die weder an einem gemeinsamen Rücknahmesystem beteiligt sind noch selber Anstrengungen zur Rücknahme und Verwertung ihrer Batterien unternehmen, gibt. Diese sind nach Angaben der Industrie jedoch nicht die Erzeuger oder Importeure sogenannter single cells, also Batterien, die einzeln in den Handel gelangen, sondern Importeure von Geräten mit fest eingebauten Batterien. Hier dürften durch entsprechende Regelungen zur Elektroschrottverwertung und evtl. verstärkte Zollkontrollen Lücken geschlossen werden können [153].

4.1 Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien (GRS)

Das Gemeinsame Rücknahmesystem Batterien (GRS) ist eine im Mai 1998 gegründete und im gleichen Jahr von der Hansestadt Hamburg anerkannte Stiftung, mit der die hersteller-, importeur- und händlerübergreifende Rücknahme und Verwertung verbrauchter Batterien realisiert werden soll. Stifter sind die Batteriehersteller Duracell, Panasonic, Philips, Ralston, Saft, Sanyo, Sony und Varta sowie der Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI) [103]. Als Vorläufer der Stiftung kann die Arbeitsgemeinschaft Batterien (ArgeBat) im ZVEI angesehen werden, die zur Umsetzung der freiwilligen Selbstverpflichtung vom 09.09.1988 gegründet wurde. Diese wurde jedoch nur von 30 Unterneh-

Praktische Umsetzung der Rücknahme- und Verwertungspflicht für Batterien in Deutschland

men getragen, so dass auch aus diesem Kreis die Forderung nach rechtlichen Vorgaben zur Eliminierung der großen Zahl an Trittbrettfahrern erhoben wurde [130], [89].²⁰

Als Stiftung arbeitet die GRS nicht gewinnorientiert. Sie übernimmt für die ihr angeschlossenen Unternehmen (April 2001: über 400) die Verantwortung für die Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen nach § 4 Abs. 2 BattV. Sie organisiert die Einsammlung, Sortierung, Verwertung bzw. schadlose Beseitigung verbrauchter Batterien und dokumentiert die Ergebnisse gegenüber den zuständigen Behörden. Die Rücknahme- und Verwertungslogistik wird auf einzelne Lose verteilt, die für die Dauer von jeweils drei Jahren ausgeschrieben werden.²¹

Die Lose, die z.T. nach Bundesländern vergeben wurden, umfassen

- Sammlung und Transport vom Handel,
- Sammlung und Transport von den öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger (ÖRE),
- Sortierung der Batteriegemische,
- Transport nach Sortierung,
- Beseitigung sowie
- Verwertung.

Die Aufgabenbereiche der GRS im Rahmen der Rücknahmelogistik für verbrauchte Batterien sind in Abbildung 4-1 schematisch dargestellt.

²⁰⁾ Zu weiteren Gründen, die zum Scheitern der Selbstverpflichtung führten, vgl. [282].

²¹⁾ Die BattV schreibt für das gemeinsame Rücknahmesystem die Vergabe der einzelnen Entsorgungsleistungen im Wettbewerb durch Ausschreibung für maximal drei Jahre vor (§ 4 Abs. 2 (5) BattV). Diese kurze Zeitspanne ist besonders für diejenigen Anbieter betriebswirtschaftlich riskant, deren Anlagen ausschließlich im Rahmen der Entsorgungslogistik verbrauchter Batterien eingesetzt werden können, wie etwa automatische Sortieranlagen, da sich die entsprechenden Investitionen innerhalb dieser Frist amortisieren müssten.

Praktische Umsetzung der Rücknahme- und Verwertungspflicht für Batterien in Deutschland

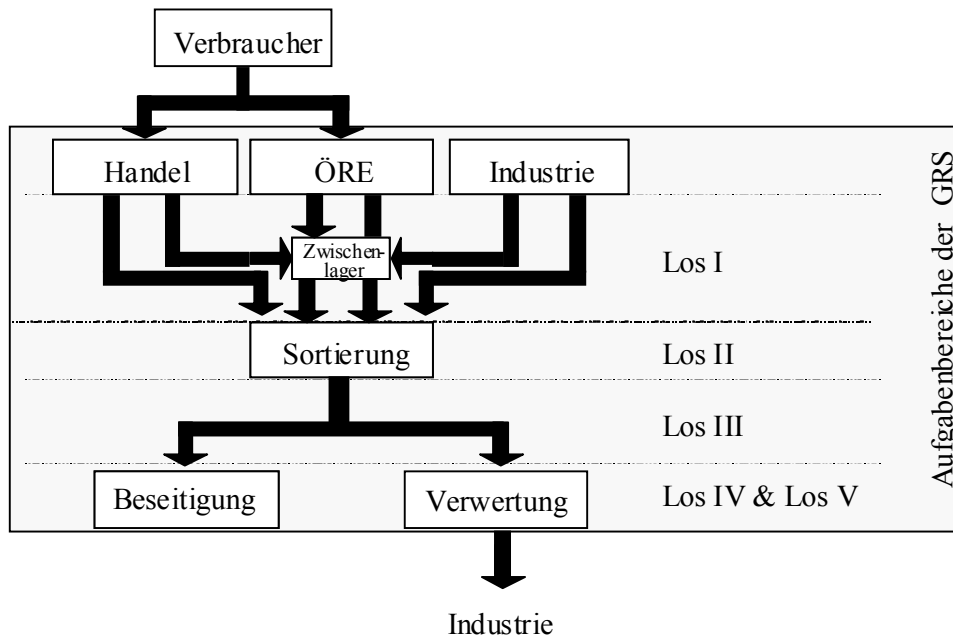


Abbildung 4-1: Aufgabenbereiche der GRS

In der Regel erhalten innerhalb der einzelnen Losgruppen mehrere Unternehmen einen Zuschlag; so etwa bei der Sortierung und der Verwertung, wo mehrere Verfahren bzw. Unternehmen²² zum Zuge kommen. Mit der Berücksichtigung mehrerer Unternehmen und Standorte kann zum einen eine Monopolbildung in den einzelnen Bereichen vermieden werden. Zum anderen sind durch mehrere, dezentrale Sortieranlagen und Senken für die einzelnen Batteriefractionen Einsparungen in Hinsicht auf die zurückzulegenden Transportentfernungen und damit auf die Kosten möglich. Die erste Ausschreibung wurde derart gestaltet, dass für rund 20.000 t Batteriegemisch ausreichende Transport-, Sortier- und Verwertungs- bzw. Beseitigungskapazitäten garantiert sind. Die zweite Ausschreibung der Lose für den Zeitraum ab Oktober 2001 erfolgt gestaffelt [105], d.h. die einzelnen Lose wurden nicht zeitgleich ausgeschrieben, sondern derart, dass etwa Sammel- und Transportdienstleistungen erst vergeben wurden, nachdem die Sortier- und Verwertungsstandorte festgelegt waren, da so exaktere Kalkulationen ermöglicht wurden. Finanziert werden die entsorgungslogistischen Leistungen aus Beiträgen der Hersteller und Importeure.

²²⁾ Die zur Verwertung eingesetzten Verfahren werden in Kapitel 6 beschrieben.

Praktische Umsetzung der Rücknahme- und Verwertungspflicht für Batterien in Deutschland

teure, die die Leistungen der GRS für die von ihnen in Deutschland in Verkehr gebrachten Batterien in Anspruch nehmen. Der Beitrag ist abhängig von Masse und Typus der Batterien; für eine typische Alkali/Mangan-Rundzelle mit einem Gewicht von weniger als 50 g, wie sie etwa in mobilen Musikabspielgeräten benutzt wird, werden beispielsweise 1,76 Pfennige gefordert [106]. Insgesamt wurden 1999 rund 16 Mio. DM von der GRS für die Rücknahme und Verwertung verbrauchter Batterien ausgegeben, wobei mit einem Drittel das Sammeln und der Transport den größten Ausgabenanteil hatten, gefolgt von Sortierung, Verwertung bzw. Beseitigung [107]. Um unter Umständen sensible Daten der Unternehmen etwa bzgl. der Umsätze oder Marktanteile zu schützen, erfolgt die Meldung der in Verkehr gebrachten Batterien und die Zahlung der Beiträge nicht unmittelbar an die GRS sondern über einen Treuhänder. Insgesamt wurden 1999 durch die Nutzer der Stiftung rund 25.000 Tonnen Batterien in Verkehr gebracht (2000: rund 29.300), wobei mit über 85 % die Primärbatterien - hier insbesondere Alkali/Mangan- und Zink/Kohle-Batterien - den größten Anteil besaßen.²³ Tabelle 4-1 fasst die in Verkehr gebrachten Mengen für 1999 und 2000 zusammen. Für 1999 wurden zusätzlich die den Mengen entsprechenden Stückzahlen sowie die Gewichtsanteile der einzelnen Batteriesysteme und -typen angegeben.

²³) Die GRS veröffentlicht mittlerweile ihre Erfolgskontrollberichte auch über das Internet (vgl. <http://www.grs-batterien.de>).

Praktische Umsetzung der Rücknahme- und Verwertungspflicht für Batterien in
Deutschland

Tabelle 4-1: Durch Nutzer der GRS 1999 und 2000 in Verkehr gebrachte Batterien

Typ		Anzahl (1999)	Gew.-Anteil [%] (1999)	Gewicht [t] (1999)	Gewicht [t] (2000)	
Primär- batterien	Zn/C	282.128.699	36,789	9.206	9.118	
	Al/Mn	416.038.664	48,578	12.156	15.083	
	Zn/Luft	145.751	0,120	30	32	
	Lithium	14.603.571	1,055	264	351	
	Knopfzellen*	HgO	2.548.740	0,028	7	7
		AgO	24.795.357	0,216	54	51
		Al/Mn	12.684.407	0,124	31	34
		Zn/Luft	31.798.514	0,180	45	44
		Lithium	26.962.610	0,368	92	90
Zwischensumme (Primärbatterien)		811.706.313	87,458	21.885	24.810	
Sekundär- batterien	Lithium-Ion	4.403.297	1,291	323	426	
	NiMH*	16.829.602	2,685	672	1.689	
	Al/Mn	165.458	0,028	7	19	
	Pb	345.348	1,159	290	482	
	Ni/Cd*	49.209.719	7,353	1.840	1.840	
	Knopfzellen*	Lithium-Ion	199.794	0,002	0,51	4,7
		NiMH	59.519	0,018	4,49	9,9
		Ni/Cd	622.967	0,006	1,54	3,9
	Zwischensumme (Sekundärbatterien)		71.835.704	12,542	3.139	4.475
Gesamtsumme		883.542.017	100	25.024	29.284	

* inkl. aus Knopfzellen aufgebauter Batterien

Quelle: [101], [102]

Zurückgenommen wurden 1999 gut 8.300 t Batteriegemisch [101] (2000: 9.300 t [102]). Bei den zurückgenommenen Mengen war von Quartal zu Quartal eine Steigerung zu beobachten [107]; darin spiegelt sich vermutlich der Abschluss der Aufbauphase des Gemeinsamen Rücknahmesystems und seine Etablierung sowie der u.a. durch Werbemaßnahmen geförderte, erhöhte Bekanntheitsgrad des Systems und der Möglichkeiten zur Batterierückgabe bei den Konsumenten wieder. Trotz gestiegener zurückgenommener Mengen sank die auf die im gleichen Jahr in Verkehr gebrachte Menge bezogene Rücknahmequote leicht, da die Menge der durch Vertragspartner der GRS verkauften Batterien stärker stieg, als die Menge der zurückgenommenen Batterien.

Neben der Rücknahme der in Sammelstellen im Handel oder bei den öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern gesammelten Batterien bietet die GRS seit September 2000 auch gewerblichen Endverbrauchern die kostenlose Rücknahme dort anfallender Batterien an, da sie dort ein großes Potenzial zur Steigerung der Rücklaufquoten sieht [108].

4.2 Vfw-REBAT – Batterierücknahmesystem

Die Vfw AG²⁴ bietet sich seit dem vollständigen Inkrafttreten der Batterieverordnung am 01.10.1998 mit ihrem Vfw-REBAT genannten Batterierücknahmesystem als Beauftragter Dritter entsprechend § 16 BattV (in der novellierten BattV § 15) an. Sie bietet für einzelne Hersteller, Importeure und Händler, die formal eigene Rücknahmesysteme nach § 4 Abs. 3 BattV betreiben, die Rücknahme-, Sortierungs- und Verwertungs- bzw. Entsorgungsdienstleistungen für verbrauchte Batterien an. Das Spektrum der Dienstleistung deckt sich damit mit dem der GRS, als dessen Wettbewerber Vfw-REBAT auftritt [322]. Außer im Batteriebereich betreibt das Unternehmen Logistik- und Rücknahmesysteme im Gesundheits-, Elektro- und Einzelhandelsbereich. Rund 60 (Stand: Mai 2000) Unternehmen bedienen sich der Vfw-REBAT, um den Verpflichtungen der BattV nachzukommen. Die Kunden stammen u.a. aus den Bereichen Agrar- und Signallampenbatterien. Um die Rücknahme der verbrauchten Batterien ihrer Vertragspartner zu gewährleisten, hat Vfw-REBAT rund 15.000 Sammelstellen im Handel eingerichtet und hat ferner 26 öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger unter Vertrag. Die Struktur des Vfw-REBAT-Batterierücknahmesystems entspricht weitgehend der in Abbildung 4-1 für das GRS wiedergegebenen; ein wesentlicher Unterschied besteht jedoch darin, dass die Vfw AG bei der Vergabe der einzelnen zu erbringenden Dienstleistungen nicht wie die GRS durch die BattV an ein Ausschreibungsverfahren und eine maximale Vertragsdauer von drei Jahren gebunden ist. Ferner verfolgt Vfw-REBAT im Gegensatz zur GRS eine Gewinnerzielungsabsicht. Im Jahr 1999 wurden durch die Vfw-REBAT-Kunden rund 3.000 Tonnen Batterien in Verkehr gebracht (2000: 2.193 t, [319]). Im gleichen Zeitraum wurden etwa 1.500 Tonnen Batteriegemisch zurückgenommen [320], (2000: 1.911 t, [319]). Ihren Kunden stellt die Vfw AG je Tonne Batteriegemisch 1.140 DM (Stand September 1999) in Rechnung. Analog zur GRS erfolgt auch hier die Meldung der produzierten Mengen zum Schutz von Firmengeheimnissen über einen Treuhänder [87].

Vfw-REBAT nimmt ebenso wie die GRS an ihren Sammelstellen alle (Geräte-) Batterien unabhängig von ihrer Art, Marke und Herkunft zurück [186]. Da das Verhältnis von Sammelstellenanzahl zu in Verkehr gebracht-

²⁴) Das Unternehmen wurde 1991 von mittelständischen Entsorgungsunternehmen gegründet und firmierte seit Juli 1999 als „Vfw Vereinigung für Wertstoffrecycling AG“. Im April 2000 wurde der Name auf Vfw AG verkürzt [321].

ter Menge für Vfw-REBAT höher als für die GRS ist, ist anzunehmen, dass durch Vfw-REBAT mehr Batterien zurückgenommen werden, die von Vertragspartnern der GRS in Verkehr gebracht wurden als umgekehrt. Dadurch wird für Vfw-REBAT das Erreichen hoher Recyclingquoten²⁵ erleichtert (insbesondere durch angeschlossene ÖRE), wobei jedoch durch die „systemfremden“ Batterien zusätzliche Logistik-, Sortier- und Verwertungs- bzw. Entsorgungskosten verursacht werden. Nach bisherigen Erkenntnissen besteht jedoch weder auf Seiten der GRS noch auf Seiten der Vfw-REBAT ein Interesse daran, erst aufwendig zu untersuchen, ob die zurückgenommenen Batterien von eigenen Nutzern kommen und falls nicht, Rechnungen für die erbrachten Dienstleistungen auszutauschen. Die BattV sowie ihre im Oktober 2000 vom Bundeskabinett beschlossene Novellierung geben prinzipiell dem Gemeinsamen Rücknahmesystem dazu die Möglichkeit (§ 4 Abs. 2), ein Zwang besteht jedoch nicht.

4.3 Robert Bosch GmbH

Die Robert Bosch GmbH trägt für 17 Hersteller²⁶ und Vertrieber von Elektrowerkzeugen (Power Tools) als beauftragter Dritter nach § 16 BattV die Verantwortung für die Rücknahme der in den Elektrowerkzeugen eingesetzten Akkumulatoren. Bei den Akkumulatoren (Batteriepacks) handelt es sich derzeit zum weitaus überwiegenden Teil um Ni/Cd-Batterien, wobei einige Hersteller inzwischen auch Nickelmetallhydrid-Batterien anbieten [251].

Die Rücknahme erfolgt in rund 7.800 Sammelstellen bundesweit, die schwerpunktmäßig im Elektrowerkzeug-Fachhandel angesiedelt sind. Die Batterien werden im Recyclingzentrum Elektrowerkzeuge Willershausen der Robert Bosch GmbH nach chemischem System und Hersteller sortiert [251], [250].

Eine Beurteilung der Effizienz der Rücknahme von in Elektrowerkzeugen eingesetzten Akkumulatoren ist für das Jahr 1999 nicht möglich. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Robert Bosch GmbH keinen zusammenfassenden Erfolgskontrollbericht für ihre Auftraggeber erstellt, son-

²⁵⁾ Unter Recyclingquote wird an dieser Stelle das Verhältnis aus der Masse der in einem Jahr zurückgenommenen Batterien zu der Masse der im selben Jahr durch Mitglieder/Kunden des Rücknahmesystems in Verkehr gebrachten Batterien verstanden.

²⁶⁾ Die führenden Markenhersteller von Elektrowerkzeugen bedienen sich der Robert Bosch GmbH als beauftragten Dritten [202].

dem jeder Hersteller von Elektrowerkzeugen einen eigenen Bericht erstellt bzw. erstellen müsste [45]. Ferner werden diejenigen Akkumulatoren nicht durch das Recyclingzentrum erfasst, die im Rahmen von Reparaturen bei den einzelnen Herstellern ausgetauscht werden müssen oder die in Sammelboxen der beiden anderen Rücknahmesysteme gegeben werden, so dass derzeit kein vollständiges Bild für den Bereich der Elektrowerkzeugakkumulatoren gezeichnet werden kann. Nach dem bisherigen Erkenntnisstand werden durch die Robert Bosch GmbH ausschließlich Batteriepacks sortiert und einer Verwertung zugeführt. Da jedoch ein Teil der verbrauchten Akkumulatoren aus Elektrowerkzeugen von Unternehmen, die die Robert Bosch GmbH als Vertragspartner haben, in den Sammelboxen der GRS und von Vfw-REBAT zurückgegeben wird, werden in diesem Bereich aufgrund der ungleichen Lastenverteilung in der Zukunft Abgrenzungsprobleme erwartet. Für das Jahr 2000 hat die Robert Bosch GmbH erstmalig einen Gesamtbericht erstellt. Demnach sind im Jahr 2000 durch die angeschlossenen Unternehmen rund 1.500 t Batterien in Verkehr gebracht worden; den Hauptanteil machen dabei mit rund 1.300 t Ni/Cd-Akkumulatoren aus. Zurückgenommen wurden im gleichen Jahr rund 47 t Batteriegemisch, davon rund 37 t Ni/Cd-Akkumulatoren [250]. Dies entspricht einer Rücknahmequote für Ni/Cd-Akkumulatoren von rund 3 %.

4.4 Hersteller mit eigenem Rücknahmesystem

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden drei Unternehmen in der Bundesrepublik ermittelt, die für ihre gesamte Batterieproduktion oder bestimmte Teile davon eigene Rücknahmesysteme nach § 4 Abs. 3 BattV ohne die Beauftragung Dritter betreiben [74].²⁷ In der Regel handelt es sich dabei um Batterien, die nur an einen oder wenige Abnehmer geliefert werden. Als ein Beispiel hierfür kann die Sonnenschein Lithium GmbH angesehen werden. Die von dem Unternehmen produzierten Lithium-Batterien gehen ausschließlich an Großkunden, etwa an Hersteller von elektronischen Heizkostenverteiltern (EHKV) oder von Steuerungsanlagen [169]. Die Rücknahme dieser Geräte wird i.d.R. von den Großkunden selber - etwa bei der Installation neuer Geräte oder erforderlichen Wartungs-

²⁷⁾ Es erscheint wahrscheinlich, dass die tatsächliche Zahl der Unternehmen höher liegt. Dies kann etwa aus der Differenz der Daten zu den in Verkehr gebrachten Mengen zwischen den Erfolgskontrollberichten und den Statistiken des ZVEI geschlossen werden. Einschränkend muss jedoch bemerkt werden, dass die Erfolgskontrollberichte nicht unbedingt vollständig und zeitnah weitergeleitet wurden.

Praktische Umsetzung der Rücknahme- und Verwertungspflicht für Batterien in Deutschland

arbeiten - vorgenommen. Die EHKV werden zurückgenommen und von einem Entsorgungsunternehmen in einer automatischen Anlage zerlegt [67]. Die zurückkommenden Lithium-Batterien werden dann zusammen mit Produktionsschrotten einer Sonderabfallverbrennungsanlage zugeführt.

Ferner können für im militärischen Bereich eingesetzte Batterien eigene Rücknahmesysteme mit großer Erfolgswahrscheinlichkeit betrieben werden. Daten über den Verbrauch bzw. die Rückgabe von Batterien werden hier jedoch sensibel behandelt, so dass keine konkreten Daten wiedergegeben werden können.

4.5 Zusammenstellung der Berichtsdaten für das Jahr 2000

Die für das Jahr 2000 vorliegenden Daten der GRS, Vfw-REBAT und von Bosch aus den Erfolgskontrollberichten gemäß der Batterieverordnung werden in Tabelle 4-2 zusammengefasst. Aufgrund der unterschiedlichen Aufteilungen der Batteriesysteme in den Berichten der Systeme ist eine Aggregation notwendig. So wird beispielsweise nicht zwischen primären und sekundären Knopfzellen unterschieden, obwohl etwa die GRS diese in ihren Berichten nach chemische Systemen untergliedert ausweist (vgl. Tabelle 4-1).

Praktische Umsetzung der Rücknahme- und Verwertungspflicht für Batterien in
Deutschland

Tabelle 4-2: Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse der Sammelsysteme (2000)

	in Verkehr gebracht	zurückge- nommen	Quote
	[t]	[t]	[%]
<i>Primäre Batterien</i>			
Zink/Kohle	9.952,0	3.404,6	34,2
Alkali/Mangan	16.137,4	4.870,6	30,2
Zink/Luft	277,1	251,0	90,6
Lithium primär	441,1	225,1	51,0
<i>Sekundäre Batterien</i>			
Lithium sekundär	430,8	36,0	8,4
Nickelmetallhydrid	1.833,5	17,2	0,9
Blei	519,0	403,3	77,7
Nickel/Cadmium	3.214,5	1.000,9	31,1
Knopfzellen	252,9	87,0	34,4
Summe	33.058,4	10.295,8	31,1

Quelle: Erfolgskontrollberichte von GRS, Vfw-REBAT und Bosch für das Jahr 2000

Insgesamt ergibt sich demnach für alle Sammel- und Batteriesysteme eine Recyclingquote von 31,1 %.²⁸

²⁸⁾ In dieser Quote ist nicht berücksichtigt, dass die verschiedenen Batteriesysteme unterschiedliche Nutzungsdauern besitzen und vielfach erst nach längeren Zeiträumen zurückgegeben oder weggeworfen werden.

5 Sortierung von Batteriegemischen

Im Rahmen der Verwertungslogistik für verbrauchte Batterien kommt der Sortierung eine besondere Bedeutung zu, da in der Regel die Verfahren, in denen verbrauchte Batterien verwertet werden können, auf möglichst sortenreine Einsatzmaterialien, d.h. auf nach dem zugrundeliegenden chemischen System sortierte Altbatterien, angewiesen sind.²⁹

Die Notwendigkeit ergibt sich im Wesentlichen aus zwei Gründen:

- In bestimmten Verfahren führt ein zu hoher Anteil an Batterien mit unerwünschten chemischen Systemen in der aussortierten Fraktion zu einer Verunreinigung der Produkte, so dass deren Absatz auf dem Markt in Frage gestellt ist. So kann etwa im RVD-Verfahren (vgl. 6.4.1) durch zinkhaltige Batterien in der zur Verwertung angenommenen Ni/Cd-Fraktion das abdestillierte Cadmium derart mit Zink verunreinigt werden, dass vor einer weiteren Verwendung eine Raffinationsstufe zwischengeschaltet werden müsste. Da dies nicht wirtschaftlich darstellbar ist und für das Cadmium in verunreinigter Form am Markt keine Abnehmer vorhanden sind, kommt es zur Deponierung dieses Produktes.
- Insbesondere bei der Reststoffintegration in Prozesse, die nicht primär zur Verwertung von Altbatterien konzipiert sind, könnten bei unzureichender Sortierung Überschreitungen prozesstechnischer aber auch genehmigungsbehördlicher Restriktionen auftreten. Daher ist es erforderlich, definierte Reinheitsgrade der eingesetzten Fraktionen zu garantieren. Dieses gilt beispielsweise für den Imperial-Smelting Prozess und das Wälzverfahren (vgl. Abschnitte 6.2.1 und 6.2.2). Bei diesen Verfahren würden bei Einsatz quecksilberhaltiger Batterien u.U. nicht genehmigungsfähige Umweltbelastungen auftreten, so dass eine sorgfältige Trennung der quecksilberfreien von den quecksilberhaltigen Batterien vor der Verwertung durchgeführt wird.

In der Regel werden in den Genehmigungsaufgaben auch Maximalgehalte für in der jeweiligen Anlage besonders relevante Substanzen fest-

²⁹⁾ Ausnahmen stellen hier der von Citron SA in Frankreich betriebene Oxyreducer-Prozess (vgl. Abschnitt 6.3.1) und das in der Genehmigungsphase befindliche Verfahren der Asamer-Becker Recycling GmbH in Österreich (vgl. 6.2.7) dar. Jedoch erscheint auch bei diesen Verfahren ein kampagnenweiser Einsatz (vor-) sortierter Batterien vorteilhaft, da so hochwertigere Recyclingprodukte erzeugt werden können.

geschrieben und das Vorsorgeprinzip verfolgt, so dass zum Beispiel der Einsatz von Batterien, die einen höheren Quecksilbergehalt (Gew.-% Hg \gg 5 ppm) haben, nicht statthaft sein kann, obwohl auf Seiten der Emissionen keine Verschlechterungen nachgewiesen werden. Ähnliches gilt für die Verwertung zinkhaltiger Batterien im Elektrolichtbogenofen (Abschnitt 6.2.6). Auch ist zu beachten, dass für das Einsatzmaterial der Anlagen geltende Grenzwerte grundsätzlich nicht durch eine Vermischung verschiedener Einsatzstoffe eingehalten werden dürfen, sondern jeder für sich die Anforderungen erfüllen muss.

Für die Zukunft wird eine zunehmende ökonomische Vorteilhaftigkeit der Sortierung von Batteriegemischen erwartet, da bei hoher Qualität der sortierten Fraktionen kostengünstigere Verwertungsprozesse eingesetzt werden können, als sie für Batteriegemische bzw. schlecht sortierte Fraktionen erforderlich wären. So wird angenommen, dass reine Fraktionen quecksilberfreier Zink-Batterien³⁰ etwa in Wälzrohren verarbeitet werden können und nicht in gegenüber Quecksilber unempfindlichen aber teureren Prozessen wie etwa dem Batrec-/ Sumitomo-Verfahren verwertet werden müssen [98] (vgl. Kapitel 6).³¹

Voraussetzungen und grundlegende Techniken zur Batteriesortierung

Der naheliegende Weg, das Entstehen von Gemischen verbrauchter Batterien von vornherein durch getrennte Rücknahme nach chemischen System und damit die Notwendigkeit der Sortierung zu vermeiden, hat sich für Gerätebatterien als nicht gangbar erwiesen. Die Erfahrungen der Arbeitsgemeinschaft Batterien im Rahmen der Umsetzung der freiwilligen Selbstverpflichtung von 1988 mit der Rücknahme verbrauchter Batterien zeigten, dass der Verbraucher überwiegend seine verbrauchten Batterien nicht klassifizierte.³² Problematisch ist insbesondere, dass Gerätebatterien ver-

³⁰⁾ Mit Zinkbatterien sind hier Alkali/Mangan-, Zink/Kohle- und Zink/Luft-Batterien gemeint.

³¹⁾ Die höheren Kosten der Verwertung bei gegenüber Verunreinigungen unempfindlicheren Verfahren sind insbesondere auf die dort erforderlichen hohen Investitionen in Emissionsschutzmaßnahmen und deren Betriebskosten, insbesondere bei der aufwendigeren Reinigung der Prozessgase, zurückzuführen (vgl. Kapitel 6).

³²⁾ Im Rahmen der Selbstverpflichtung sollte eine Unterscheidung in schadstoffhaltige und nicht schadstoffhaltige Batterien durch den Verbraucher vorgenommen werden. Die schadstoffhaltigen Batterien wurden dazu von den Herstellern mit dem Recyclingsymbol gekennzeichnet.

gleichsweise kleine Produkte sind und daher große, deutliche Hinweise auf das chemische System und die seit 1998 bestehende Rückgabepflichtung kaum untergebracht werden können, zumal aufgrund der vielfältigen Konkurrenzprodukte ein Großteil der Fläche von Werbeaufdrucken beansprucht wird. Zudem ist nach Angaben der GRS sowohl eine getrennte Erfassung als auch der getrennte Abtransport jedes elektrochemischen Systems an der Anfallstelle des Endverbrauchers ökologisch und wirtschaftlich nicht sinnvoll [88].

Da zu Beginn der Rücknahmeaktivitäten für verbrauchte Batterien die gesammelten Mengen gering waren und keine Technik für eine weitgehend automatische Sortierung zur Verfügung stand, erfolgte die Sortierung überwiegend manuell. Lediglich ein Teil der Sortierung, etwa die Abtrennung von kleinen Verunreinigungen und Knopfzellen aus dem Batteriegemisch, wurde bereits mit Hilfe von Rüttelsieben und anderen mechanischen Hilfsmitteln vorgenommen.

Auch bei Einsatz automatischer Sortieranlagen muss vor der Chargierung des Batteriegemisches in die Sortiermaschine eine manuelle Sortierstufe vorgeschaltet werden, um nicht automatisch aussortierbare Fremd- bzw. Störstoffe, die den Anlagenbetrieb empfindlich stören könnten, aus der Mischung zu entfernen [262]. Beispiele für derartige Stoffe sind etwa Thermometer, Industrie- und Starterbatterien, Akku-Zahnbürsten und Batteriepacks, um nur einige zu nennen. Z.T. werden auch im militärischen Bereich eingesetzte Batterien manuell aussortiert [286]. Generell stellt die Erzeugung eines weitgehend von Verunreinigungen befreiten Batteriegemisches und die erforderliche Vereinzelung der Batterien vor dem Passieren der jeweils eingesetzten Sensoren und Messstrecken ein bedeutendes Problemfeld bei der Entwicklung und dem Betrieb von Batteriesortieranlagen dar.

Prinzipiell können zur Sortierung von Batteriegemischen zahlreiche Eigenschaften herangezogen werden. Insbesondere die räumlichen Maße der Batterien und ihre Geometrien werden zunächst zur Trennung herangezogen. Die Abtrennung von Knopfzellen und feinen Verunreinigungen aus Batteriegemischen erfolgt beispielsweise in allen Anlagen vollständig durch Siebung. Ferner können Batterien mit Stahlblechkapselung durch Magnete recht einfach von Batterien mit anderer Ummantelung (Papier, Kunststoff) getrennt werden. Rollfähige Batterien (Rundzellen) können etwa durch Drehteller von prismatischen und weiteren Bauformen getrennt werden. Zur maschinellen Identifikation des chemischen Systems sind jedoch geometrische Eigenschaften und die Magnettrennung allein nicht ausreichend. Daher wurden verschiedene Verfahren entwickelt, die weite-

re Informationen zur sicheren Bestimmung des Batterietyps ermitteln sollten.

Die Einführung von verbindlichen Farbcodes könnte einen Beitrag zur einfacheren Sortierung leisten. Wenngleich aufgrund der geschilderten Erfahrungen und der genannten Nachteile in Deutschland sicher nicht erneut versucht werden wird, durch den Verbraucher eine Trennung nach chemischen Systemen durchführen zu lassen, könnte zumindest die manuelle Sortierung bzw. die Qualitätskontrolle bei automatischen Sortieranlagen erheblich erleichtert werden. In Japan schreibt etwa die Regierung für alle im Inland verkauften wiederaufladbaren Batterien von der Battery Association of Japan entwickelte Streifen definierter Größe und Farbe auf den Batterien und ihren Verpackungen vor [113], [335]. Angaben über den Erfolg dieses Systems liegen noch nicht vor, so dass eine Bewertung erst zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführt werden kann.

Von Baumann und Muth wurde ein Aufbringen von nur unter UV-Licht lesbaren Barcodes auf Batterien vorgeschlagen, das in einer mit einem entsprechenden Lesegerät ausgestatteten Sortieranlage eine genaue Zuordnung der Batterie zu einem chemischen System und darüber hinaus auch zu einem Hersteller bzw. einer Produktlinie ermöglichen würde [27]. Eine derartige Vorgehensweise hat sich jedoch nicht durchsetzen können; vermutlich da ihr Erfolg ein Mitwirken aller Batteriehersteller voraussetzt und dies nicht gewährleistet schien. Der mit einem solchen Konzept erzielbare Vorteil, genau auf die jeweilige Batterie und ihre Bestandteile abgestimmte Verwertungsverfahren einsetzen zu können, bietet aktuell keinen ausreichenden ökonomischen Anreiz zur Einführung dieser Technik. Durchgesetzt hat sich dagegen eine andere Art der UV-Markierung: Von den großen Gerätebatterieherstellern (vgl. Kapitel 2) werden die in Europa in Verkehr gebrachten quecksilberfreien Batterien mit einer nur unter UV-Licht sichtbaren Beschichtung versehen, die mittels UV-Detektoren in einer Reihe von Sortieranlagen erfolgreich zur Abtrennung von den quecksilberhaltigen Batterien genutzt wird.

Ferner wurde eine automatische Bilderkennung zur Identifizierung der Batteriesysteme untersucht. Dazu wurden zeitgleich drei Aufnahmen der zu sortierenden Batterie erstellt und mit vorher hinterlegten Muster abgeglichen [260]. Nach derzeitigem Erkenntnisstand wird dieses Verfahren jedoch in keiner Anlage, die über Versuchsanlagenmaßstab hinausgeht, eingesetzt. Batterien liegen im gesammelten Batteriegemisch zum Teil beschädigt und korrodiert vor, wodurch eine optische Zuordnung extrem erschwert wird [88.] Daher erscheint die automatische Bilderkennung nur als Ergänzung zu anderen Sortiertechnologien sinnvoll. Beispielsweise ist für die Sorbat-Sortieranlage in Rotterdam ein Bilderkennungssystem vor-

gesehen, mit dem anhand typischer äußerer Merkmale³³ für einige Marken auch solche (älteren) Batterien als quecksilberfrei erkannt werden, die über keine UV-Markierung verfügen [332].

Ebenfalls mit Bilderkennung, aber auf Basis von Röntgenaufnahmen, arbeitet der SORBAREC-Sensor (siehe auch Abschnitt 5.1.3) [233]. Im Vergleich zur Aufnahme des Batterieäußeren bieten die Durchleuchtungsaufnahmen den Vorteil, dass weniger Vergleichsmuster hinterlegt werden müssen, da häufig gleich aufgebaute Batterien von den Herstellern unter verschiedenen Markennamen und mit unterschiedlichen Aufdrucken vertrieben werden.

Weitere Entwicklung wie verbesserte Bilderkennungs-, Beschriftungslese-, Kodelese- und auch Radiowellenerkennungsverfahren erscheinen auf lange Sicht nicht ausgeschlossen (vgl. z.B. [335]).

5.1 In Deutschland betriebene Sortieranlagen

In Abbildung 5-1 sind die Standorte der derzeit in Deutschland betriebenen Sortieranlagen für Batteriegemische dargestellt; Tabelle 5-1 ordnet die Standorte den verschiedenen Betreibern zu.

Tabelle 5-1: Standorte und Betreiber von Batteriesortieranlagen

Standort	Unternehmen	eingesetzte Technik
Betzweiler-Wäldle	Rethmann Kreislaufwirtschaft GmbH & Co. KG	Handsartierung
Grevenbroich	Trienekens AG	automatische Sortieranlage
Wiefels	Gesellschaft für Materialkreislauf und Abfallwirtschaft mbH & Co KG (GMA)	automatische Sortieranlage
Dietzenbach	REDUX GmbH	teilautomatisierte Sortierung
Bremerhaven	Uni-cyc GmbH (DASA + Bremer Sonderabfallberatungsgesellschaft)	automatische Sortieranlage
Willershausen	Robert Bosch GmbH Recyclingzentrum Elektrowerkzeuge	Handsartierung (nur Akkupacks aus Elektrowerkzeugen)

³³⁾ Einige quecksilberfreie Batterien des Herstellers Varta haben etwa einen umlaufenden Aufdruck „0% Hg, 0% Cd“, der von einem Bilderkennungssystem identifiziert werden kann [332].

Sortierung von Batteriegemischen

Bei der nachfolgenden Beschreibung der in den einzelnen Unternehmen eingesetzten Techniken muss beachtet werden, dass ein Großteil der Verfahren derzeit kontinuierlich weiterentwickelt und optimiert wird und zahlreiche vergleichsweise kleine Veränderungen an den Anlagen oder am Ablauf der Sortierung erheblich zur Verbesserung der Sortierergebnisse beitragen können. Eine kontinuierliche Anpassung der Anlagen ist auch deshalb erforderlich, weil ständig neue Bauformen und Batteriesysteme auf den Markt und damit - mit einiger Verzögerung - in die Sortieranlagen gelangen, die u.U. den zur Identifizierung des Batterietyps eingesetzten Sensoren „bekannt gemacht“ werden müssen.



Abbildung 5-1: Standorte in Deutschland betriebener Sortieranlagen

Generell gilt, dass in allen Anlagen zumindest ein Teil der Sortierung händisch vorgenommen wird und dabei die Schulung und Erfahrung der Sortierkräfte einen bedeutenden Einfluss auf die erzielbaren Sortierqualitäten hat.

5.1.1 Sortieranlage der GMA, Wiefels

Die Gesellschaft für Materialkreislauf und Abfallwirtschaft mbH & Co KG (GMA) hat als erstes Unternehmen in Deutschland in Wiefels eine automatische Sortieranlage errichtet und betreibt diese seit 1997 [262]. Am gleichen Standort wird durch das Unternehmen auch ein Zwischenlager für besonders überwachungsbedürftige Abfälle betrieben [109]. Die Batteriesortieranlage besitzt eine Kapazität von 1 t Batteriegemisch/h entsprechend ca. 1.600 t/a bei Einschichtbetrieb. Insgesamt wurden zur Errichtung der Anlage einschließlich sämtlicher Nebenanlagen (Lager, Umschlagsplatz, etc.) rund 2,5 Mio. DM investiert [263]. Das Verfahrensschema und der räumliche Aufbau der Sortieranlage sind in Abbildung 5-2 dargestellt.

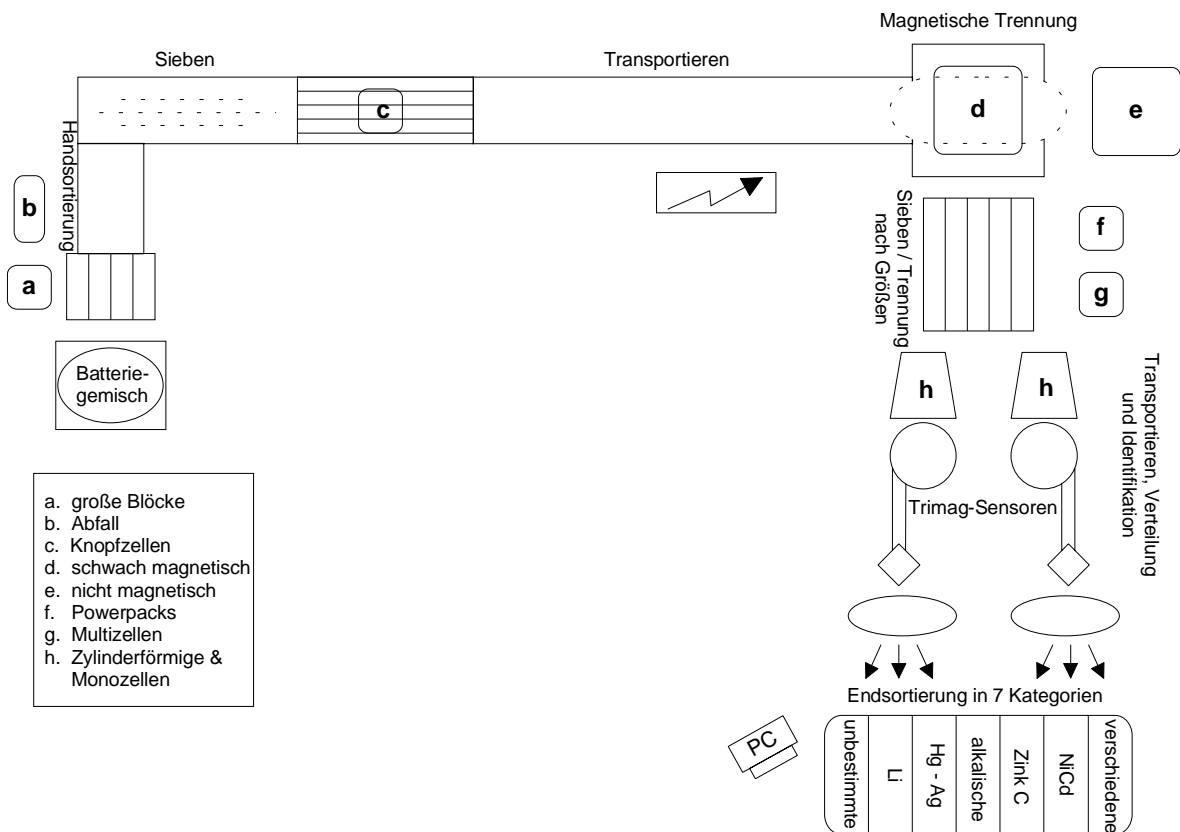


Abbildung 5-2: Verfahrensschema der Sortierung bei der GMA, Wiefels

Im Aufgabebereich werden die Transport- bzw. Lagerbehälter des Batteriegemisches auf ein Förderband entleert. Hier erfolgt die der automatischen Sortierung vorgeschaltete manuelle Entfernung von Fremdstoffen, Starter- bzw. Industriebatterien und Batteriepacks. In einer Stangensiebstrecke wird die Knopfzellenfraktion entfernt, ehe im Anschluss eine Trennung in schwach und nicht magnetische Batterien vorgenommen wird. Die nichtmagnetischen Zellen werden dabei getrennt nach Mono- und Multizellen abgeschieden. Die Multizellen (magnetische wie nicht-magnetische) werden händisch nach ihrem chemischen System sortiert. Die in der Sortieranlage verbliebene Fraktion der magnetischen Monozellen werden vereinzelt, gewogen, nach Gewicht und Größe sortiert und anschließend an einem Sortierkopf, d.h. einem von insgesamt sieben am Standort installierten Sensoren der Firma Euro Bat Tri (siehe auch nächster Abschnitt), vorbeigeführt. Durch die Sensoren wird eine Art magnetischer Fingerabdruck genommen, der durch Abgleich mit einer Datenbank die Identifizierung der chemischen Systeme Lithium, Nickel/Cadmium, Zink/Kohle, Quecksilber, Alkali/Mangan erlaubt. Nickel/Cadmium- und Nickelmetallhydrid-Batterien können nicht unterschieden werden und bilden eine gemeinsame Fraktion, die händisch weiter sortiert wird [109], [263], [97]. Die sortierten Fraktionen etwa die Nickel/Cadmium-Fraktion werden z.T. ein weiteres Mal durch die Sortieranlage geschickt, da mit einem Durchlauf alleine die erforderlichen Reinheitsgrade³⁴ nicht erreichbar sind. Eine Sortierreihe ist inzwischen im Testbetrieb mit einem UV-Detektor versehen, der die Aussortierung der durch Aufbringen einer entsprechenden Markierung als quecksilberfrei identifizierbaren Batterien ermöglicht. Während die GMA bei der ersten Ausschreibung der GRS, dem Hauptabnehmer der Sortierdienstleistung in Deutschland, keinen Zuschlag erhielt und ihr Batteriegemische nur im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsauftrages überlassen wurden, ist sie in der zweiten Ausschreibung (ab 01.10.2001) berücksichtigt [264].

5.1.2 Sortieranlage der Trienekens AG, Grevenbroich

Die Trienekens AG betreibt am Standort Grevenbroich seit Mai 2000 die derzeit jüngste automatische Sortieranlage Europas [286]. Die Anlage er-

³⁴⁾ Die Ausschreibung der GRS erfordert etwa für die Nickel/Cadmium- und Nickelmetallhydrid-Fraktionen eine 99 % Reinheit. Geringere Sortiergüten würden die Verwertungsprozesse stören; etwa durch prozesstechnische Schwierigkeiten oder durch Einschränkungen der erreichbaren Verwertungsproduktqualitäten.

setzt die am gleichen Standort seit 1991 durchgeführte Handsortierung [78], mit der rund 2.300 t Batteriegemisch pro Jahr sortiert werden konnten; die neue Sortierkapazität beträgt bis zu 5.000 t/a [324], [326]. Bei der Erstellung der Anlage, in die rund eine Mio. DM investiert wurde [327], konnte auf Teile der in Rotterdam 1997 in Betrieb genommenen und zwischenzeitlich kapazitätsmäßig zurückgebauten Anlage der Afvalverwerking Rijnmond (AVR) zurückgegriffen werden.³⁵ Die Anlage setzt zur Identifizierung der Batterien Sensoren der französischen Firma Euro Bat Tri³⁶ ein, in denen bei Durchgang der zu bestimmenden Batterie durch den Sensor ein elektromagnetisches Signal³⁷ erzeugt wird, das in Kombination mit gleichfalls ermittelten Daten über Länge, Größe und Gewicht der Batterie einen für jede Batterie charakteristischen „Fingerabdruck“ bildet, der durch Abgleich mit einer im Rechner hinterlegten Datenbank die exakte Bestimmung des chemischen Systems der Batterie ermöglicht. Eine Besonderheit der Anlage ist u.a. das Wägsystem, mit dem das Gewicht der Batterien bestimmt werden kann, ohne dass dazu ihr Fluss durch die Anlage gestoppt werden muss. Sofern Batterien nicht erkannt wurden bzw. Fehlsortierungen auftreten, können den „Fingerabdrücken“ der nicht erkannten Batterien manuell die chemischen Systeme zugeordnet und die entsprechenden Informationen in der Datenbank ergänzt werden, so dass dann nachfolgende gleichartige Batterien automatisch die richtige Zuordnung erfahren. Bevor die Rundzellen zu den Sensoren gelangen, werden zunächst große Batterien durch Siebung abgetrennt. Dabei werden etwa große Akkupacks sowie Signallampen- und Weidezaunbatterien entfernt. In einer manuellen Sortierstufe werden dann kleinere Akkupacks, prismaische Batterien, Spezialbatterien (etwa aus dem militärischen Bereich) und Störstoffe aussortiert, ehe in einer Stangensiebstrecke Knopfzellen aus dem Batteriegemisch entfernt werden. Diese werden durch ein feineres

³⁵) Mit der Anlage in Rotterdam sollten nach Auskunft eines Vertreters des Betriebes zum einen die damals in den Niederlanden eingelagerte große Menge Batteriegemisch sortiert werden und zum anderen (u.a. mit Unterstützung der EPBA) gezeigt werden, dass mit automatischen Anlagen auch große Sortierkapazitäten bereitgestellt werden können. Für den dauerhaften Betrieb war die Anlage überdimensioniert, so dass Teile in anderen Anlagen eingesetzt werden konnten [146].

³⁶) Die Firma Euro Bat Tri, St. Quentin Fallavier, Frankreich, ist ein Joint Venture der Titalyse S.A. und S.N.A.M. (siehe auch Abschnitt 6.4.2) [336].

³⁷) Im Sensor wird durch Induktionsspulen in den Batterien ein magnetische Feld induziert, wodurch in Detektorspulen eine Spannungsänderung verursacht wird. Diese wird zusammen mit den Gewicht der Batterien zur Identifikation herangezogen [333].

Sieb von Verunreinigungen befreit und weiter mechanisch durch eine Vibrations-sortierrinne und ein Trommelsieb klassiert. Dabei wird eine nach Angaben des Betreibers ausreichende Trennung der Knopfzellen nach ihrem chemischen System wie Lithium, Quecksilber oder Silberoxid erreicht [326].³⁸

Das verbleibende Batteriegemisch wird durch Siebe in zwei Fraktionen geteilt, da größere Batterien die folgenden Messstrecken und Sensoren nicht mit der gleichen hohen Geschwindigkeit passieren können und daher zwei Sortierbahnen eingerichtet wurden. Nachdem über einen Drehteller alle nicht rollfähigen Bauformen abgetrennt sind, wird die verbleibende Fraktion (Rundzellen mit Stahlblechkapselung) mit den o.a. Messstrecken und Sensoren (u.a. ein UV-Lichtdetektor) nach chemischen System sortiert. Dabei werden bis zu elf Fraktionen automatisch erkannt und getrennt: Nickel/Cadmium, Nickelmetallhydrid, Lithium-Primär, Lithium-Ionen, Quecksilber, Alkali/Mangan (mit und ohne UV-Markierung), Zink/Kohle (mit und ohne UV-Markierung) sowie Blei-Trockenbatterien und Knopfzellen [286], [326].

5.1.3 Sortieranlage der Uni-cyc, Bremerhaven

Die Firma Uni-cyc betreibt am Standort Bremerhaven eine automatische Sortieranlage, die als bislang einzige Anlage weltweit Röntgendurchleuchtung zur Sortierung einsetzt. Zunächst werden, wie bei den anderen Sortieranlagen, Fehlwürfe (Hausmüll, Elektronikschrott etc.) sowie große Batterien (Batteriepacks, Kleinbleizellen, Sofortbildkameras etc.) manuell aus dem angelieferten Gemisch entfernt. Mittels einer mechanischen Klassierung werden anschließend aus dem verbleibendem Gemisch sechs Fraktionen gebildet (vgl. Abbildung 2-5).

³⁸⁾ Nähere Angaben über die mechanische Sortierung der Knopfzellen nach ihrem chemischen System wurden zum Schutz des damit verbundenen Wettbewerbsvorteils durch das Unternehmen nicht gegeben.

Sortierung von Batteriemischungen

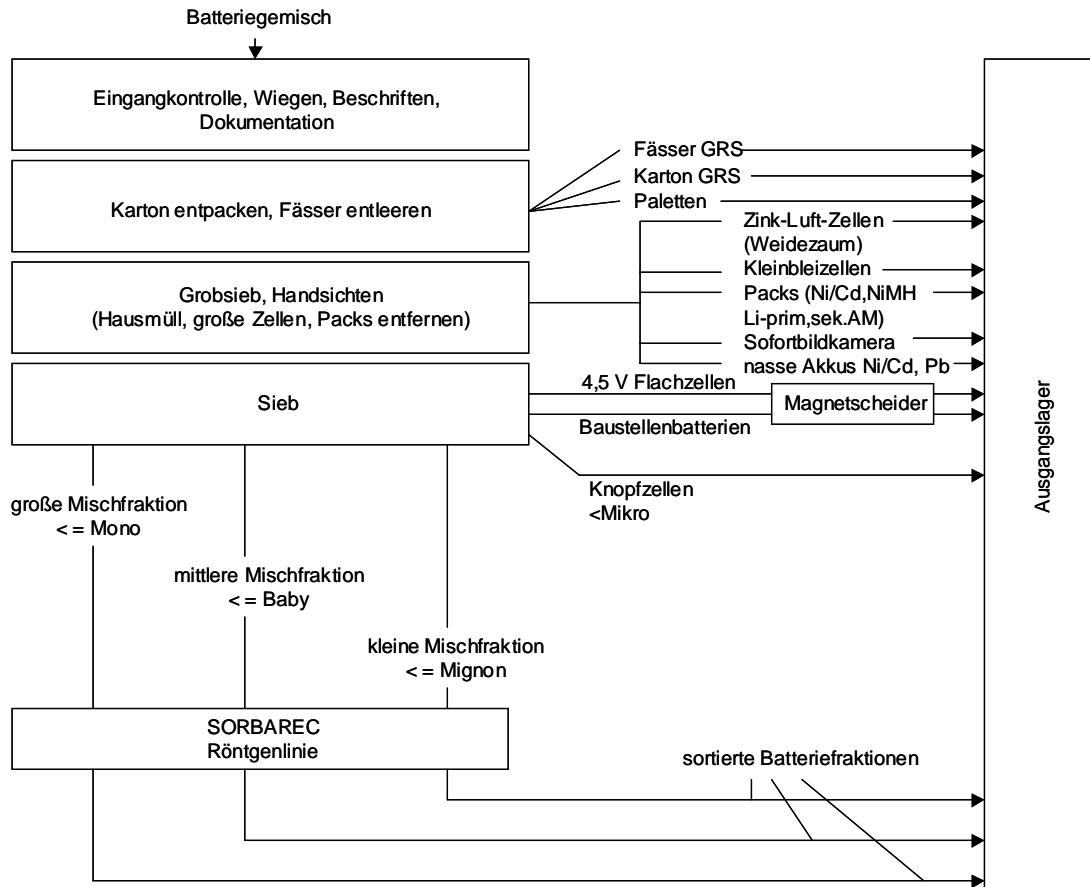


Abbildung 5-3: Fließschema der SORBAREC Anlage

Quelle: in Anlehnung an [300]

Drei der sechs Fraktion (große Mischfraktion [kleiner gleich Mono], mittlere Mischfraktion [kleiner gleich Baby] und kleine Mischfraktion [kleiner gleich Mignon]), die rund 90 % der eingesetzten Masse ausmachen, werden in der Röntgen-SORBAREC-Sortieranlage automatisch sortiert. Dazu werden die Batterien vereinzelt und der Röntgendurchleuchtungs- sowie UV-Sensorik zugeführt. Eine Videokamera nimmt die Durchleuchtungsbilder auf, die in Graustufen-Histogramme zerlegt werden. Dabei wird insbesondere ausgenutzt, dass durch schwere Elemente mit hoher Ordnungszahl wie Cadmium, Blei und Quecksilber Röntgenlicht stärker adsorbiert wird als durch Elemente mit geringerer Ordnungszahl. Durch Abgleich dieser Histogramme mit in einer Datenbank hinterlegten Vergleichsmustern können die Zellen sehr schnell und sicher identifiziert werden. Unmittelbar hinter der Durchleuchtungsstrecke, in der 10 Zellen je Sekunde identifiziert werden können, werden die Batterien durch Druckluftstöße in vier Fraktionen getrennt. Da die Anzahl der zu sortierenden chemischen Systeme größer als vier ist, stellt eine der sortierten Fraktionen eine Mischfraktion dar, die in einem erneuten Durchlauf weiter

aufgetrennt wird. Die Auswahl, welche chemischen Systeme zunächst die Mischfraktion bilden, hängt vom eingesetzten Material ab. Ziel bei der Auswahl ist, einen möglichst großen Anteil bereits nach einem Durchlauf eindeutig sortiert zu haben. Insgesamt werden in der Anlage der Uni-cyc die folgenden Fraktionen sortiert: Nickel/Cadmium, Nickelmetallhydrid, Lithium-Primär, Lithium-Ionen, Quecksilber-Rundzellen, Alkali/Mangan (mit und ohne UV-Markierung), Zink/Kohle (mit und ohne UV-Markierung) sowie Blei-Trockenbatterien, Zink/Luft-Zellen und Knopfzellen. In der Sortieranlage können zusammen mit den Rundzellen auch eine Reihe von prismatischen Formaten automatisch sortiert werden. Die Kapazität der Anlage wird mit 1 t/h angegeben, wobei eine Reinheit der automatisch sortierten Fraktionen von über 99,75 Gew.-% erreicht wird. Zur Qualitätssicherung und zum -nachweis wird derzeit der Einsatz von Bildanalysen (Digitalbilder der Oberfläche der sortierten Fraktionen in ihren Big Bags) untersucht. Damit könnte ein kostengünstiger und zuverlässiger Ersatz für die bislang üblichen Stichproben geschaffen werden [233], [232], [300]. In der ersten Ausschreibungsperiode der GRS bestand nur eine Forschungs- und Entwicklungspartnerschaft zwischen dem Rücknahmesystem und dem Sortierunternehmen. Für die zweite Ausschreibungsperiode (drei Jahre ab dem 01.10.2001) erhielt das Unternehmen einen von insgesamt drei Zuschlägen im Bereich der Sortierung von Batterien [150].

5.1.4 Sortieranlage der REDUX, Dietzenbach

Die REDUX Gesellschaft zur Batteriesortierung und Abfallberatung GmbH betreibt am Standort Dietzenbach eine Batteriesortieranlage, die zum Zeitpunkt eines Betriebsbesuches (Mai 2000) fast ausschließlich manuell arbeitete. Sie befindet sich auf dem gleichen Gelände wie die NIREC Recycling GmbH, die dort eine Verwertungsanlage für nickelhaltige Abfälle betreibt (vgl. Abschnitt 6.5.1) Eine Umstellung der händischen Sortierung auf einen teilautomatischen Betrieb ist geplant und entsprechende Entwicklungsarbeiten für Sensoren zur automatischen Identifizierung der chemischen Batteriesysteme werden zusammen mit der Frankfurter Firma L.S.I. Industrieelektronik durchgeführt [235]. Derzeit (Januar 2001) ist es möglich, magnetische Rundzellen der Bauformen Mignon (AA) und Micro (AAA) sowie der Zwischengrößen automatisch zu sortieren, wobei die Fraktionen Nickelmetallhydrid, Nickel/Cadmium, Lithium sowie Alkali/Mangan und Zink/Kohle (UV-markiert und nicht markiert) identifiziert werden können. Dazu wurden zweistufige elektrodynamische Sensoren entwickelt, die bisher für die oben genannten Geometrien eingesetzt wer-

den. Die Sortiergeschwindigkeit erreicht bei einer Transportbandgeschwindigkeit von 1 m/s bis zu 6 Zellen/s [35], [165].

5.1.5 Sortieranlage der Rethmann Kreislaufwirtschaft GmbH & Co. KG, Betzweiler-Wälde

Über die Batteriesortieranlage von Rethmann in Betzweiler-Wälde wurden durch das Unternehmen keinerlei Informationen zur Verfügung gestellt, ebenso wie über die zum gleichen Konzern gehörende Nordische Quecksilber-Rückgewinnungsgesellschaft mbH in Lübeck (vgl. Abschnitt 6.6.2). Da weiterhin keine Veröffentlichungen vorliegen, die Auskunft über die Aktivitäten zur Batteriesortierung in Betzweiler-Wälde geben, kann hier nur das von verschiedenen Seiten mündlich Zugetragene wiedergegeben werden. Demnach werden die Batteriegemische weitgehend manuell sortiert. Es wird eine Abtrennung magnetischer Rundzellen durchgeführt, die anschließend zu einer automatisch arbeitenden Batteriesortieranlage eines anderen Unternehmens zur weiteren Sortierung weitergeleitet werden. Dies ist insbesondere erforderlich, um die Abtrennung der UV-markierten, quecksilberfreien Rundzellen zu erreichen. Da keine automatische Sortieranlage im Unternehmen vorhanden ist, sortiert Rethmann in der zweiten Ausschreibungsperiode nicht mehr für die GRS.³⁹

5.1.6 Recyclingzentrum Willershausen

Im Recyclingzentrum Willershausen werden die im Elektrogeräte-Fachhandel eingesammelten Akkumulatoren (vgl. Abschnitt 4.3) manuell nach chemischen System und Hersteller sortiert. Neben den einzeln zurückgegebenen Akkus werden am Standort auch Elektrowerkzeuge demontiert und die dabei anfallenden Akkus mit in die Sortierung einbezogen. Bislang handelte es sich bei den zurückkommenden Akkumulatoren fast ausschließlich um Ni/Cd-Akkus; ein geringer Teil beruht auf dem chemischen System Nickel/Metallhydrid [45].

³⁹⁾ Bereits in der ersten Ausschreibung wurde eine (teil-)automatische Sortierung von den Unternehmen gefordert.

5.2 Weitere Verfahren/Entwicklungen zur Batteriesortierung

Neben den beschriebenen Anlagen und den dort eingesetzten Verfahren besteht eine Reihe weiterer Möglichkeiten zur Sortierung von Batterien. Zumindest in Deutschland werden jedoch nach bisherigem Kenntnisstand außer den in Abschnitt 5.1 dargestellten Verfahren keine weiteren Entwicklungsarbeiten durchgeführt. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass diejenigen Anlagenbetreiber, die bereits über eine automatische Sortiereinrichtung verfügen, kaum für Ersatz- oder Austauschinvestitionen zu bewegen sind, sofern die vorhandene Anlagenstruktur die geforderten Sortierergebnisse liefern kann. Für neue Anbieter ist die eher kurze Ausschreibungsdauer von maximal drei Jahren, an die die GRS als Hauptlieferant zu sortierender Batteriegemische durch die BattV gebunden ist, nachteilig. Die Investition in eine neue Anlage müsste sich betriebswirtschaftlich innerhalb dieser kurzen Zeit amortisieren, wodurch jedoch die spezifischen Sortierkosten auf ein hohes Niveau steigen würden, dessen Durchsetzbarkeit am Markt fragwürdig wäre. Daher ist die Markteintrittsbarriere für neue Anbieter der Sortierdienstleistung als hoch zu bewerten. Die zweite Ausschreibung der GRS für das Sortieren ab Oktober 2001, in der keine neuen Anbieter⁴⁰ einen Zuschlag erhielten, zeigt dies [150].

⁴⁰⁾ Mit „neue Anbieter“ sind hier Unternehmen gemeint, die in der ersten Ausschreibungsperiode weder einen Zuschlag erhielten noch im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten mit der GRS kooperierten.

6 Verfahren/Unternehmen zur Verwertung verbrauchter Batterien

In diesem Kapitel werden Verfahren und Unternehmen zur Verwertung verbrauchter Batterien vorgestellt und bewertet. Aufbauend auf grundsätzlichen Vorbemerkungen zur Verwertung verbrauchter Batterien werden für die verschiedenen chemischen Batteriesysteme insgesamt 19 derzeit national und international betriebene Verwertungsanlagen eingehend untersucht und techno-ökonomisch bewertet.

Den Abschluss des Kapitels bildet die Vorstellung einer strukturierten Methodik zur Bewertung der vorgestellten Verfahren, die derzeit aufgrund der eingeschränkten Datenlage jedoch noch nicht vollständig anwendbar ist. Unter Berücksichtigung des derzeit vorliegenden Informationsstandes wird daher in Abschnitt 6.9.2 eine vergleichende Gegenüberstellung der zuvor untersuchten Verfahren vorgenommen, wobei sowohl anlagen- wie prozessbezogene Kriterien als Vergleichsmaßstab herangezogen werden.

6.1 Grundsätzliches zur Verwertung verbrauchter Batterien

Mit der Verwertung verbrauchter Batterien sind im Wesentlichen zwei Hauptziele verbunden. Auf der einen Seite steht das Ziel, Schadstoffeinträge in die Umwelt zu vermeiden und insbesondere den Eintrag von Schwermetallen, die in fast allen Batterien Einsatz finden, in Luft, Boden und Wasser zu verringern. Andererseits kann die Wiedergewinnung von metallischen oder anderen Bestandteilen, etwa Kunststoffe, auch wirtschaftlich von Interesse sein. Bestes Beispiel hierfür ist das Recycling von Bleistarterbatterien (vgl. Abschnitt 8.2.2), das bereits seit Jahrzehnten aus wirtschaftlichen Motiven betrieben wird.⁴¹ Bei den Gerätebatterien steht jedoch in der Regel das Ziel der Vermeidung von Schadstoffeinträgen in die Umwelt im Vordergrund, was etwa bei der 1988 getroffenen freiwilligen Vereinbarung zwischen dem Zentralverband der Elektronik- und Elektroindustrie e.V. (ZVEI), der Hauptgemeinschaft des Deutschen Einzelhandels (HDE) und dem Bundesumweltministerium erkennbar wird

⁴¹⁾ In Deutschland hat Blei aus sekundären Vorstoffen wie insbesondere verbrauchten Starterbatterien traditionell einen hohen Anteil an der Gesamtproduktion. So wird etwa für das Jahr 1996 der Anteil des Sekundärbleis mit 54 % angegeben [301].

[130]. In dieser Vereinbarung wurde explizit für umweltrelevante⁴² Batterien die Rücknahme und Verwertung zugesichert.

In Deutschland hat insbesondere die Batterieverordnung von 1998 (vgl. Abschnitt 3.2.2) [314] die Aktivitäten zur Verwertung von Batterien forciert und damit ein eher junges (im Gegensatz zum Recycling von Starter- und Industriebatterien) Marktsegment etabliert. In ihren abfallwirtschaftlichen Zielen wird das Hauptziel - die Verringerung des Eintrags von Schadstoffen in Abfälle durch Batterien - definiert und dazu als Teilziel die Rücknahme sowie ordnungsgemäße und schadlose Verwertung oder - an zweiter Stelle angeführt - gemeinwohlverträgliche Beseitigung nicht verwertbarer Batterien gefordert (vgl. Abschnitt 3.2.2 f.).

Die zur Verwertung in Frage kommenden Prozesse lassen sich verfahrenstechnisch grob in hydro- und pyrometallurgische Verfahren einteilen. Zum Teil werden auch hydro- und pyrometallurgische Schritte miteinander kombiniert. Ausschließlich mechanische Prozesse sind nur im Rahmen einer evtl. erforderlichen Einsatzstoffvorbereitung von Interesse. Unter der Pyrometallurgie werden dabei die Verfahren zusammengefasst, die hohe Temperaturen (200 - 3.000 °C) erfordern; unter Hydrometallurgie wird die Metallurgie der wässrigen Lösungen verstanden. Die Vor- und Nachteile, die häufig mit diesen Grundtypen der Metall(wieder)-gewinnung verbunden sind, werden in Tabelle 6-1 zusammengefasst.

⁴²⁾ Als umweltrelevant (kennzeichnungspflichtig im Sinne der Vereinbarung) wurden wartungsfreie verschlossene Klein-Akkumulatoren, gasdichte Nickel/Cadmium-Akkumulatoren, Starterbatterien, quecksilberhaltige Primärknopfzellen sowie Alkali/Mangan-Batterien mit mehr als 0,1 Gew.-% Hg definiert.

Tabelle 6-1: Vor- und Nachteile beim Vergleich pyro- mit hydrometallurgischen Verfahren

	Pyrometallurgie	Hydrometallurgie
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Reaktionsgeschwindigkeiten • gute Raum-Zeit-Ausbeuten • hohe Durchsätze • auch für komplexe Vorstoffe geeignet • weniger empfindlich bei Schwankungen der Rohstoffzusammensetzungen 	<ul style="list-style-type: none"> • sehr selektiv und trennscharf bei den chemischen Reaktionen • hohe Reinheit der Produkte • gut steuer- und optimierbar bei gleichmäßig zusammengesetzten Einsatzstoffen • i.d.R. keine Probleme mit der Reinhaltung der Luft
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • weniger selektiv und trennscharf bei chemischen Reaktionen • Wiederholung von Prozessstufen häufig erforderlich • Abgas- und Lärmprobleme 	<ul style="list-style-type: none"> • geringere Reaktionsgeschwindigkeiten • geringere Durchsätze • empfindlich gegen Schwankungen in der Rohstoffzusammensetzung • Deponie- und Abwasserprobleme • Einsatz z.T. gefährlicher Chemikalien

Quelle: in Anlehnung an [137]

Es ist jedoch zu beachten, dass die in Tabelle 6-1 angeführten Vor- und Nachteile nur einen groben Überblick geben können; zur Beurteilung einzelner Verfahren müssen diese im Detail untersucht werden.

Bedeutende Anlagen zum Batterierecycling im In- und Ausland sowie die dort betriebenen Verfahren, die in diesem Kapitel untersucht werden, sind in Tabelle 6-2 zusammengefasst.⁴³ Auf aktuelle Entwicklungen und (noch) nicht im industriellen Maßstab realisierte Verfahren wird jeweils am Ende der folgenden Abschnitte eingegangen, wobei jedoch auf die Darstellung bloßer Verfahrensideen, für die sich derzeit keine Umsetzungsmöglichkeiten im größeren Maßstab abzeichnen, verzichtet wird.

⁴³) Die Verfahren zur Verwertung von Bleibatterien sind in dieser Tabelle nicht mit berücksichtigt. Auf sie wird in Abschnitt 8.2.2 gesondert eingegangen.

Verfahren/Unternehmen zur Verwertung verbrauchter Batterien

Tabelle 6-2: Übersicht zu den untersuchten Verwertungsprozessen

Verfahren / vgl. Abschnitt	Betreiber	Standort (Land)	Verwertungskapazität für Batterien	einsetzbare Batteriesysteme*
Imperial-Smelting-Prozess / 6.2.1	MIM Hüttenwerke Duisburg GmbH, Duisburg	Duisburg (D)	> 3.500 t/a (10 t/d)	zinkhaltige Batterien (quecksilberfrei)
Wälzprozess / 6.2.2	B.U.S. AG, Duisburg	Freiberg (D) + weitere Standorte	mehrere Tausend t/a je Standort	zinkhaltige Batterien (quecksilberfrei)
Batrec-(Sumitomo-)Prozess / 6.2.3	Batrec Industrie AG, Wimmis (Schweiz)	Wimmis (CH)	3.500 t/a (Erweiterung auf 5.000 t/a geplant)	zinkhaltige Batterien
Elektrolichtbogenofen (Ferrolegierungsherstellung) / 6.2.4	VALDI, Feurs, Le Palais (Frankreich)	Feurs (F), Le Palais (F)	8.000 t/a (2001) 15.000 t/a (2002) (geplante Werte)	zinkhaltige Batterien
DK-(Hochofen-)Prozess (Gießereirohenerzeugung) / 6.2.5	DK Recycling und Roheisen GmbH, Duisburg	Duisburg (D)	mehrere Tausend t/a (noch nicht bestimmbar)	zinkhaltige Batterien (quecksilberfrei)
Elektrolichtbogenofen (Stahlerzeugung) / 6.2.6	Verschiedene in den Vereinigten Staaten, Großbritannien, Spanien und den Niederlanden	z.B.: Alblasterdam (NL), Sheerness (UK), Alabama (USA)	1 - 3 % des Einsatzmaterials entsprechend jeweils mehreren Tausend t/a	zinkhaltige Batterien (quecksilberfrei)
Erachem-Prozess / 6.2.7.1	Revatech S.A., Erachem Europe	Lüttich (B), Tertre (B)	3.000 - 4.000 t/a	zinkhaltige Batterien
DMA / 6.2.7.2	Chemtec, Österreich	Simmering (Au)	3.000 t/a	zinkhaltige Batterien, Li
Dörschelofen / 6.2.7.3	ABRG mbH, Arnoldstein, Österreich	Arnoldstein (Au)	Projektstadium	zinkhaltige Batterien
Oxyreducer-Verfahren 6.3.1	Citron S.A., Rogerville (Frankreich)	Rogerville (F)	23.000 t/a (genehmigt), sonst 130.000 t/a	grob sortierte Batteriemische
RVD-Verfahren / 6.4.1 und 6.5.2	ACCUREC Recycling GmbH, Mülheim a. d. Ruhr	Mülheim a. d. Ruhr (D)	2.500 t/a	Ni/Cd, NiMH
Destillation, Pyrolyse / 6.4.2	S.N.A.M. (Frankreich)	St. Quentin-Falla vier (F), Viviez (F)	4.000 t/a (Genehmigungsausweitung auf 8.000 t/a geplant)	Ni/Cd, NiMH
Destillation, Pyrolyse / 6.4.3	SAFT AB, Oskarshamn (Schweden)	Oskarshamn (S)	1.500 t/a (bei 100 % Industrieakkueinsatz)	Ni/Cd
Drehherdverfahren / 6.4.4	Inmetco, Ellwood City (USA)	Ellwood City (USA)	3.000 t/a	Ni/Cd, NiMH
NIREC-Verwertungs-Prozess / 6.5.1	NIREC Recycling GmbH, Dietzenbach	Dietzenbach (D)	> 1.000 t/a (Schätzwert)	NiMH
Vakuumthermisches Recycling / 6.6.1	GMR, Leipzig	Leipzig (D)	750 - 1.000 t/a	Knopfzellen, Hg-Batterien
Vakuumthermisches Recycling / 6.6.2	NQR, Lübeck	Lübeck (D)	k. A.	Knopfzellen, Hg-Batterien
MRT-Verfahren / 6.6.3	Trienekens AG, Grevenbroich	Grevenbroich (D)	k. A.	Knopfzellen, Hg-Batterien
ToxCo-Prozess / 6.7.1	ToxCo, Trail (Kanada)	Trail, (Ca)	3.500 t	Lithium-Batterien

* Teilweise werden von Unternehmen auch andere als die angeführten Batteriesysteme zur Verwertung angenommen. Die hier zugeordnete Fraktion ist diejenige, der die größte Bedeutung in Hinsicht auf die in Deutschland anfallenden Altbatterien zukommt bzw. zukommen kann.

Am Ende dieses Kapitels (Abschnitt 6.9) werden die im Folgenden detailliert beschriebenen Verfahren aus Tabelle 6-2 in einer Gegenüberstellung in zahlreichen Kriterien bewertet. Zum Teil wird bei den Verfahrensbeschreibungen bereits auf die Ergebnisse der Bewertung hingewiesen,

insbesondere dann, wenn die Bewertung in einer Kategorie, etwa in Hinsicht auf die ökologischen Auswirkungen, deutlich vom Durchschnittswert aller Verfahren für die jeweilige Batteriefraction abweicht.

Quecksilber in Alkali/Mangan-, Zink/Kohle- und Zink/Luft-Batterien

Ein wirtschaftliches Problem bei der Verwertung von Alkali/Mangan-, Zink/Kohle- und Zink/Luft-Batterien ist mit ihren Quecksilbergehalten verbunden. Dies liegt im Wesentlichen darin begründet, dass Quecksilber bereits bei geringen Temperaturen in die Gasphase übertritt und somit an die Abgasreinigungsanlagen besondere Anforderungen gestellt werden müssen. Als Stand der Technik, der einen ausreichenden Schutz der Umwelt vor Quecksilbereinträgen über die Gasphase bietet, sind Aktivkohlefilter etabliert (vgl. Abschnitt 6.6) die i.d.R. als Festbettfilter ausgeführt werden. In einer Reihe von Anlagen wird die Abscheidung von Quecksilber und weiteren Schadstoffen (z.B. Dioxine) durch das Eindüsen eines aktiven Materials als Adsorbens in den Abgasstrom vorgenommen, die in nachgeschalteten Filtern beladen abgeschieden werden.⁴⁴ Unter anderem durch die hohen Aufwendungen für Errichtung und laufenden Betrieb derartiger Abgasreinigungssysteme sind die Verwertungskosten dieser Anlagen z.T. erheblich höher als die Sonderabfalldeponiegebühren oder die Verwertungskosten bei Anlagen, die nur quecksilberfreies bzw. -armes (d.h. Hg-Gehalte im Bereich weniger ppm) Einsatzmaterial verarbeiten und daher einfachere Reinigungstechniken einsetzen können. Dies gilt etwa für zahlreiche der in Tabelle 6-2 angeführten Verwertungsoptionen in den Prozessen der Eisen- und Stahlindustrie sowie der NE-Metallerzeugung. Hier kann die Verwertung der genannten Batteriesysteme zu vergleichsweise niedrigen Kosten, die sich in der Größenordnung der Depo-niegebühren, z.T. sogar darunter bewegen, durchgeführt werden.

Bislang wurde aus ökonomischen Gründen ein Großteil der gesammelten und sortierten Batterien der genannten Fraktionen deponiert, wodurch die mit der Batterieverordnung (vgl. Kapitel 3) verfolgten Absichten des Gesetzgebers nicht voll erreicht werden. Noch ist der Hg-Gehalt der zurückkommenden Batterien zu hoch, um diese kostengünstigen Verfahren zuzuführen. Quecksilber wurde früher den Zinkanoden der Batterien zule-

⁴⁴) Der Reduktionsgrad für Quecksilber im Abgas (bei Müllverbrennungsanlagen) wird für Kohleeindüsen mit > 85 % bei Kosten von rund 2-3 US\$/t angegeben; für Festbettfilter mit > 99 % bei Kosten von rund 50 US\$/t [76].

giert, da es dort als Inhibitor wirkt und die Gasentwicklung in den Zellen und damit ihre Selbstentladung unterdrückt [131]. Seit 1985 wurden von den bedeutenden auf dem europäischen Markt vertretenen Herstellern Forschungs- und Entwicklungsarbeiten forciert, die zu einer erheblichen Verringerung der Hg-Gehalte und letztendlich zum völligen Verzicht führten. Seit 1994 sind die Batterien dieser Hersteller quecksilberfrei.⁴⁵ Nach Europa importierte Batterien weisen jedoch noch z.T. erheblich höhere Gehalte auf,⁴⁶ ebenso die aus früheren Jahren stammenden, aber erst jetzt von den Verbrauchern zurückgegebenen Batterien, so dass die vollständige Verwertung dieser Fraktionen noch nicht wirtschaftlich möglich ist. Nach Angaben der EPBA, die auf Untersuchungen von Altbatterien in den Niederlanden beruhen, liegt der Hg-Gehalt eines typischen Gemisches der Batterietypen derzeit noch bei rund 130 ppm [153]. Die wichtigen auf dem europäischen Markt vertretenen Hersteller markieren deshalb seit einigen Jahren ihre quecksilberfreien Batterien mit einem speziellen UV-Lack, der zu ihrer Identifizierung in automatischen Batteriesortieranlagen benutzt wird (vgl. Kapitel 5) und so zumindest die Verwertung von Teilfraktionen zu aus Industriesicht tragbaren Kosten erlaubt. Prägnant zusammengefasst gilt für Al/Mn-, Zn/C- und Zn/Luft-Batterien, dass zukünftig mit weiter sinkendem Quecksilbergehalt der Verwertungsanteil ansteigen wird [102]. In Abbildung 6-1 ist die von der GRS erwartete Entwicklung des Quecksilbergehaltes in den Batterien wiedergegeben.

⁴⁵) Quecksilberfrei heißt in diesem Zusammenhang, dass auf den Zusatz von Quecksilber verzichtet wird. In der Praxis bedeutet dies, dass quecksilberfreie Batterien garantiert einen Hg-Gehalt von weniger als 5 ppm aufweisen [153].

⁴⁶) Eine im Juli 2000 abgeschlossene Studie im Auftrag des Niederländischen Umweltministeriums über Cadmium, Quecksilber und Blei in aus Asien importierten Batterien belegt dies. So wurden in 17 von 118 analysierten Batterien Hg-Gehalte über 5 ppm gefunden, wodurch der seit 01.01.2000 in der Europäischen Union geltende Grenzwert (vgl. Abschnitt 3.1.3) z.T. erheblich überschritten wurde [178].

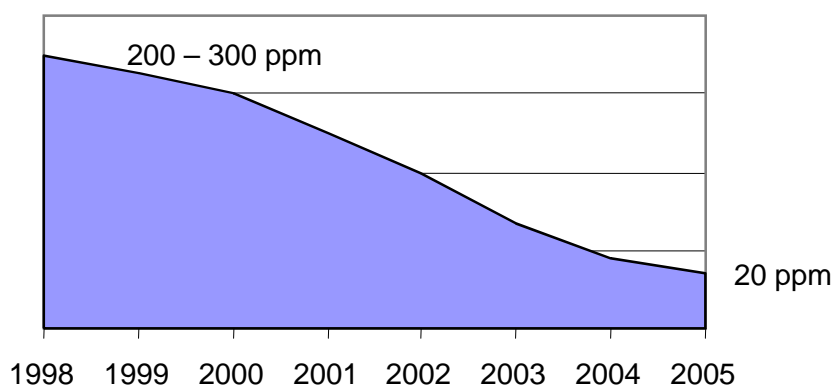


Abbildung 6-1: Erwartete Entwicklung des Quecksilbergehaltes in Batterien

Quelle: GRS 2000

Aufgrund der gezeigten Prognose geht das GRS davon aus, den Verwertungsanteil von 33 % im Jahr 2000 auf 70 % in 2005 steigern zu können [102].

6.2 Verfahren/Unternehmen zur Verwertung von zinkhaltigen Batterien

Die Batterien der chemischen Systeme Zink/Luft, Alkali/Mangan sowie Zink/Kohle weisen erhebliche Gehalte an Zink auf (vgl. Tabelle 6-17), so dass bei der Verwertung dieser Batterien neben der Vermeidung ihrer Deponierung die Wiedergewinnung des Zinks im Vordergrund steht. Die unter ökonomischen Gesichtspunkten besonders interessante Verwertung dieser Batteriesysteme in bestehenden Produktionsanlagen der Nichteisen(NE)-Metallindustrie (vgl. Abschnitte 6.2.1 und 6.2.2) und der Eisen- und Stahlindustrie (6.2.5 und 6.2.6) sowie ihrer Zulieferer (6.2.4) wird im Folgenden dargestellt. Daneben kommen spezialisierte Verfahren zum Einsatz, die auch Batterien mit höheren Quecksilbergehalten verwerten können, wie der bei der Batrec Industrie AG eingesetzte Batrec (Sumitomo-)Prozess (vgl. Abschnitt 6.2.3) oder der Oxyreducer der Citron S.A. (vgl. Abschnitt 6.3.1). Auch der bei VALDI zur Ferrolegierungsherstellung betriebene Elektrolichtbogenofen kann quecksilberhaltige Batterien verwerten (vgl. 6.2.4). Diese Verfahren sind jedoch im Vergleich zur Deponierung (vgl. Abschnitt 6.8) auf Sonderabfalldeponien ein Vielfaches teurer, so dass die in Deutschland bestehenden Sammelsysteme für diese Batterien aus wirtschaftlichen Motiven die Beseitigung weitgehend der Verwertung vorziehen.

6.2.1 MIM Hüttenwerke Duisburg GmbH, Imperial-Smelting-Prozess (ISP)

Der überwiegende Teil (> 80 %) der weltweiten Zinkerzeugung von 7,5 - 8 Mio. Tonnen jährlich erfolgt auf hydrometallurgischem Wege. Bei den pyrometallurgischen Verfahren, die sich insbesondere zur Verarbeitung von Produktionsreststoffen und anderen Sekundärmaterialien als vielseitig einsetzbar erweisen, kommt dem Imperial-Smelting-Prozess mit rund 12 % Anteil an der weltweiten Zinkproduktion besondere Bedeutung zu. In jüngerer Zeit wird der Einsatz zinkhaltiger verbrauchter Batterien im ISP großtechnisch erprobt und durchgeführt (vgl. [268], [269], [173]).

Die zum australischen Mount ISA Mining (MIM) Konzern gehörende Hüttenwerke Duisburg GmbH (MHD) betreibt am Firmensitz seit 1965 eine Imperial-Smelting Ofenanlage zur simultanen Gewinnung von Zink und Blei aus primären und -in den letzten Jahren verstärkt- sekundären Rohstoffen. Zur Gewinnung von ca. 100.000 t Zink/a und rund 35.000 t Blei/a werden etwa 250.000 t primäre und sekundäre Einsatzmaterialien verarbeitet (vgl. Tabelle 6-3). Wichtigstes Kuppelprodukt ist mit 125.000 t/a Schwefelsäure, die den aus dem Einsatz sulfidischer Konzentrate stammenden Schwefel bindet [238]. Typische Verbrauchs- und Produktionszahlen der MHD sind in Tabelle 6-3 zusammengefasst. Der wichtigste Energieeintrag in den Prozess erfolgt durch den Koks, der im Prozess jedoch noch weitere Aufgaben erfüllt, wie etwa die des Reduktionsmittels.

Tabelle 6-3: Verbrauchs- und Produktionsdaten der MHD

Input	[t/a]	Output	[t/a]
Primärmaterialien	125.000	Zink (verschiedene Qualitäten)	100.000
Sekundärmaterialien	125.000	Rohblei	35.000
Koks	100.000	Schwefelsäure	125.000
		IS-Ofenschlacke	70.000
		Cadmium-Zinkkarbonat	~ 120 (nass)*
		Zink-Cadmium-Legierung	~ 300*

Quelle: Unternehmensinformationen MHD 1998, [238], *MHD 2000 [173]

Abbildung 6-2 zeigt schematisch den Imperial-Smelting Ofen und die wichtigsten Nebenanlagen.

Verfahren/Unternehmen zur Verwertung verbrauchter Batterien

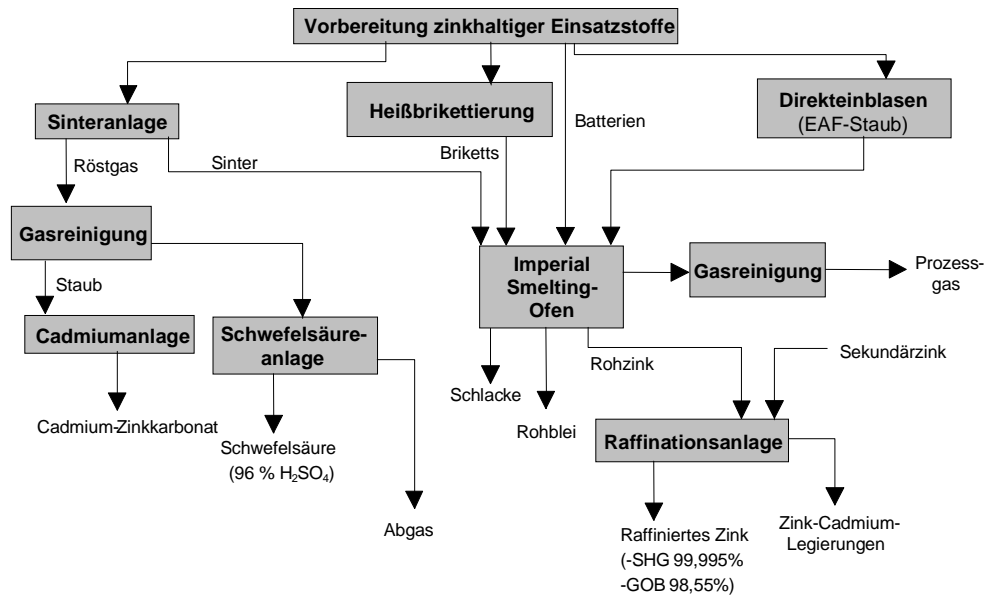


Abbildung 6-2: Schematische Darstellung einer ISP-Anlage

Quelle: [269]

Der prinzipielle Verfahrensablauf lässt sich in die folgenden Prozessschritte gliedern:

- Sinterröstung⁴⁷ der sulfidischen Erzkonzentrate⁴⁸ in einer Sinteranlage oder
- Heißbrikettierung oxidischer Vorstoffe (insbesondere Sekundärrohstoffe wie Zink-/Bleioxide aus dem Wälzprozess (vgl. Abschnitt 6.2.2), Zinkaschen sowie Stäube),
- Einsatz der Materialien im Imperial-Smelting-Prozess / Schmelzen,
- Thermische Zinkraffination,
- Gießen.

⁴⁷⁾ Unter Sintern wird in der Metallurgie allgemein die Agglomeration feinkörniger Einsatzmaterialien verstanden. Bei der Sinterröstung werden gleichzeitig sulfidische Bestandteile unter Abgabe von Energie oxidiert (geröstet).

⁴⁸⁾ Im ISP können sowohl Zink- und Bleikonzentrate als auch Zink-/Bleimischkonzentrate verarbeitet werden. Insbesondere für letztere bestanden vor der Entwicklung des ISP keine geeigneten Verarbeitungsmöglichkeiten.

Im Folgenden wird der Prozessschritt „Einsatz der Materialien im Imperial-Smelting-Prozess / Schmelzen“ und das Einbringen der verbrauchten Batterien beschrieben, da diese im Mittelpunkt des Berichtes stehen. Für eine detaillierte Darstellung der weiteren Schritte wird z.B. auf [238] verwiesen.

Die Chargierung des Imperial-Smelting Ofens mit den zinkhaltigen Einsatzmaterialien und dem vorgewärmten Reduktionsmittel (Koks) erfolgt über Chargierglocken am oberen Ende des Schachtofens. Der Einsatz von quecksilberfreien Alkali/Mangan-, Zink/Kohle- und Zink/Luft-Batterien erfordert keine besondere Vorbehandlung der Batterien. Lediglich bei großvolumigen Batterieumhüllungen, wie sie z.T. bei Weidezaunbatterien verwendet werden, können prozesstechnische Schwierigkeiten auftreten, so dass ein Aufbrechen und Abtrennen der Kunststoffgehäuse durchgeführt wird. Übliche Gerätebatterien werden jedoch prinzipiell genauso über die Chargierglocken in den IS-Ofen eingebracht, wie die Zinkträger Sinter und Heißbriketts. Bei der Chargierung unmittelbar zusammen mit heißen Einsatzmaterial erweichen die Batterien, so dass eine Trennschicht aus anderen sekundären Einsatzmaterialien eingesetzt wird [269]. Die festen Einsatzmaterialien sinken im Gegenstrom zu dem im unteren Ofenteil durch Düsen eingeblasenen Heißwind ab und die überwiegend oxidischen Einsatzstoffe werden durch Koks bzw. gebildetes Kohlenmonoxid reduziert. Zink und mit den Einsatzmaterialien eingetragenes Cadmium verlassen den Ofen mit der Gasphase und werden in einem Absorber (Bleisprühkondensator) durch einen Bleinebel gebunden. In den nachfolgenden Kühlrinnen wird ausgenutzt, dass die Löslichkeit von Zink in Blei temperaturabhängig ist. Durch Absenken der Temperatur bildet sich eine Blei- und eine Zinkphase. Das Zink wird zur weiteren Verarbeitung (Raffination) abgezogen, in deren Verlauf insbesondere eine Abtrennung des Cadmiums erfolgt. Das Blei wird im Kreislauf, d.h. erneut in den Absorber geführt. Das im ISP gewonnene Blei wird zusammen mit der Schlacke abgestochen und wird in einem Vorherd unter Ausnutzung der Dichteunterscheide von dieser getrennt. Im Anschluss wird es zur Raffination an Bleihütten verkauft.

Daten zu den Emissionen nach Abgas-/Abluftreinigung sowie zum Abwasseranfall können z.B. [238] entnommen werden. In Tabelle 6-4 wird eine Übersicht über die wichtigsten Nebenprodukte und Reststoffe der Produktionsprozesse gegeben.

Tabelle 6-4: Nebenprodukte und Reststoffe MHD

Prozesseinheit	Nebenprodukte / Reststoffe	Menge [t/a]	Verwendung/Behandlung
IS-Ofen	Rohblei	35.000	Verkaufsprodukt (Einsatz in der Bleiindustrie)
Schwefelsäureanlage	Schwefelsäure	125.000	Verkaufsprodukt
Sinteranlage (Gasreinigung)	Kalomel (Hg-Cl- Verbindung)	15	Entsorgung
	Nasser EGR ⁴⁹ -Schlamm	25	Entsorgung
Schlackebehandlungsanlage	IS-Ofenschlacke	70.000	Straßenbau
	Speise	85	Entsorgung
Cadmiumanlage	Thalliumsulfid	25	Entsorgung

Quelle: Unternehmensinformationen 1998

Beim Einsatz von verbrauchten Batterien, die mit einer Chargierate von bis zu 10 t/d in den Prozess eingebracht wurden, konnten bislang keine negativen Auswirkungen auf die angeführten Werte und die Emissionen festgestellt werden. Insbesondere da der Anteil von Batterien am zinkhaltigen Einsatzmaterial auf höchstens 1 - 2 Gew.-% der in den Ofen chargierten Menge eingestellt wird, erscheint es unwahrscheinlich, Veränderungen außerhalb der üblichen Schwankungsbreiten feststellen zu können.

6.2.2 B.U.S AG, Wälzrohr

Die B.U.S AG ist eines der größten Unternehmen zur Verwertung metallhaltiger Abfälle in Europa. Sie betreibt an einer Reihe von Standorten im In- und Ausland Wälzrohre, die hauptsächlich zur Verwertung von Elektrolichtbogenofenstäuben (EAF-Staub) eingesetzt werden [17]. Dabei stehen die Gewinnung eines Staubes (Wälzoxid), in dem Zink derart angereichert ist, dass er gut zur Zinkgewinnung genutzt werden kann, und die Erzeugung einer Schlacke, die im Straßen- und Wegebau nutzbar ist, im Vordergrund. Der prinzipielle Aufbau einer Wälzanlage ist in Abbildung 6-3 wiedergegeben.

⁴⁹⁾ EGR: Elektrostatische Gasreinigungsanlage

Verfahren/Unternehmen zur Verwertung verbrauchter Batterien

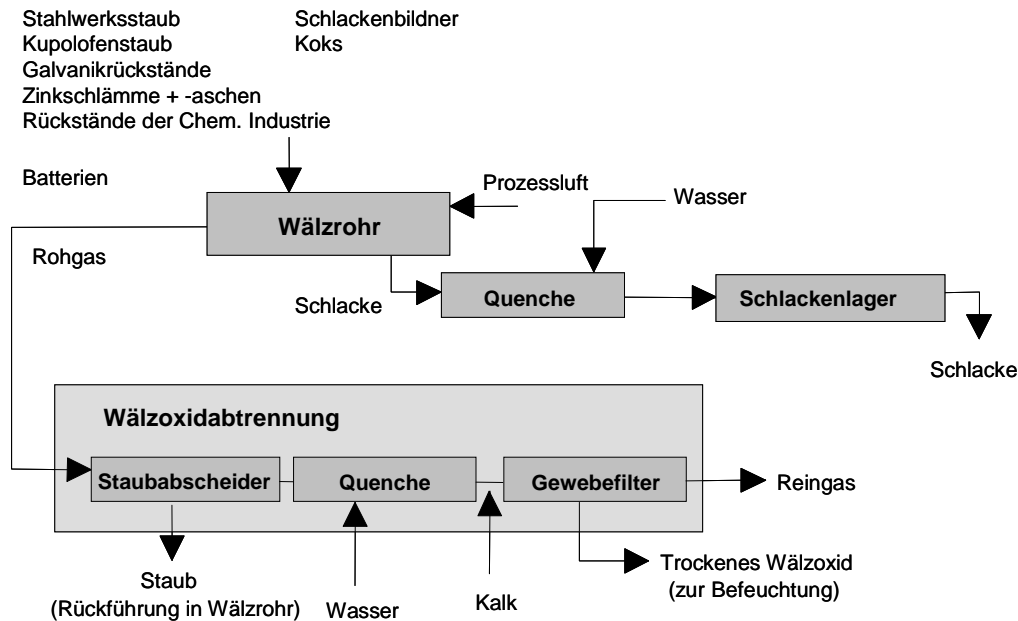


Abbildung 6-3: Schematische Darstellung einer Wälzanlage

Das Hauptprodukt des Wälzprozesses, das Wälzoxid, enthält in der Regel zwischen 50 - 60 % Zink sowie 7 - 13 % Blei. Das Wälzoxid wird an Zinkhütten verkauft, die das oxidische Material reduzieren und metallisches Zink erzeugen. Je nachdem ob das Wälzrohr mit saurer oder basischer Schlacke betrieben wird, werden neben Koks, der als Reduktionsmittel und Energieträger dient, SiO_2 (Silika) oder Kalk zugesetzt und damit die erwünschte Basizität⁵⁰ eingestellt.

In Freiberg, wo die Verwertung von Batterien im Wälzrohr erprobt wurde, setzt die B.U.S AG inzwischen das SDHL-Verfahren⁵¹ ein. Das innovative Verfahren, das eine erhebliche Verbesserung des klassischen Wälzprozesses darstellt (vgl. Tabelle 6-5), ist in Abbildung 6-4 schema-

⁵⁰⁾ Unter Basizität wird hier das Verhältnis $((\text{Gew.-% CaO} + \text{Gew.-% MgO}) / \text{Gew.-% SiO}_2)$ verstanden. Bei saurer Fahrweise liegt die Basizität etwa bei $\leq 0,5$; bei basischer bei ≥ 2 .

⁵¹⁾ Das SDHL-Verfahren ist nach seinen Erfindern Saage, Dittrich, Hasche und Langbein benannt worden [174].

tisch dargestellt.⁵² Anhand der Abbildung wird das Verfahren im Folgenden kurz beschrieben.

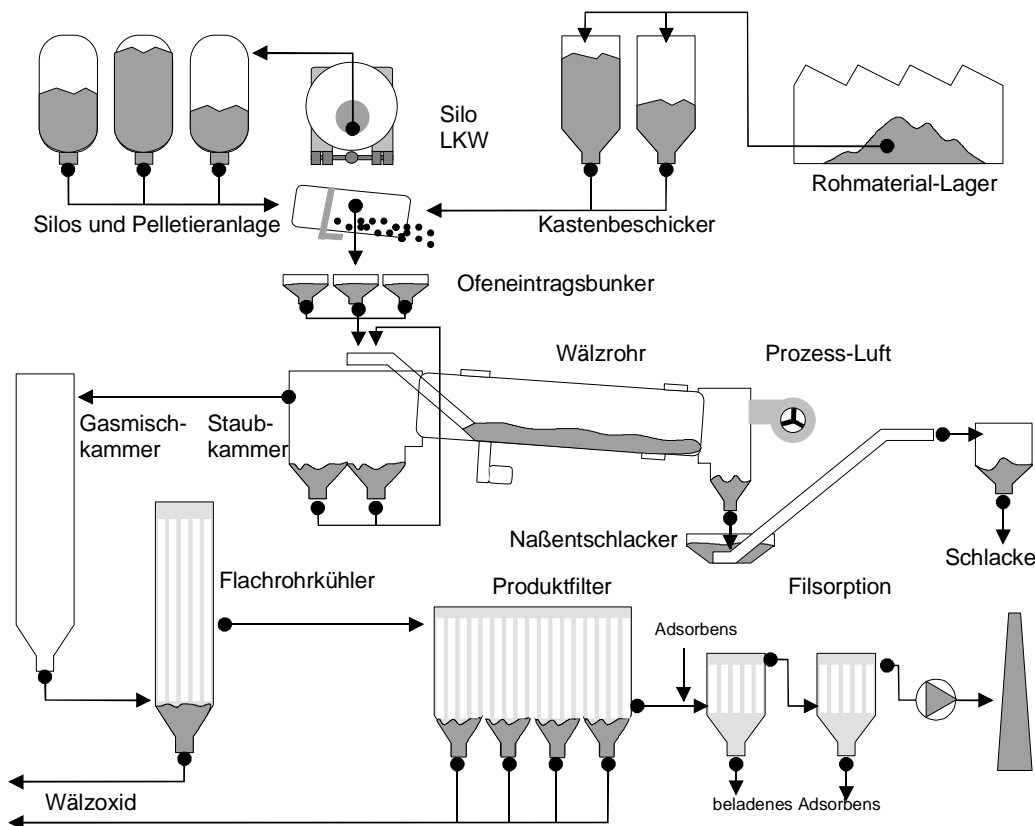


Abbildung 6-4: Darstellung der Wälzanlage mit SDHL-Verfahren in Freiberg

Quelle: [19]

Staubförmige Einsatzstoffe werden in Silos gelagert, während stichfestes, feuchtes Material sowie vorpelletierte Stahlwerksstäube in Rohmateriallagern gebunkert werden. Die staubförmigen Einsatzstoffe werden in einer Pelletieranlage mit Koks und Zuschlagstoffen gemischt und in die Ofeneintragsbunker gebracht. Die stichfesten bzw. vorpelletierten Einsatz-

⁵²⁾ Der konventionelle Wälzprozess erfordert rund 380 kg Koks je Tonne Einsatzmaterial. Mit der Entwicklung des SDHL-Verfahrens, das - neben dem Freiberg - auch in den anderen Standorten eingeführt werden soll, kann durch die erhebliche Verringerung des Restkohlenstoffes und des Anteils metallischen Eisens in der Schlacke ein erheblich verringerter Kohlenstoff- sowie ein auf Null reduzierter Erdgasverbrauch bei gleichzeitiger Steigerung des Zinkausbringens erreicht werden (vgl. Tabelle 6-5) [174].

stoffe werden über Kastenbeschicker entweder direkt in den Eintragsbunker gefördert oder ebenfalls zunächst in die Pelletieranlage gebracht. Das Wälzrohr wird aus den Ofeneintragsbunkern über ein Aufgaberohr beschickt. Dabei wird mit Hilfe von Bandwaagen die erforderliche Mischung aus Koks und dem sonstigen Aufgabegut erzeugt. Das Wälzrohr besitzt eine Länge von rund 40 m und einen Durchmesser von rund 3,6 m (außen). Es ist leicht geneigt und wird mit bis zu 1,6 Umdrehungen je Minute gedreht (Normalbetrieb 1 U/min). Durch die Drehung wandert die Charge innerhalb von 4 bis 6 Stunden durch den Ofen und wird dabei zunächst getrocknet und erhitzt. Bei etwa 1.100 bis 1.200 °C werden die im Aufgabematerial enthaltenen Metalloxide reduziert. Dabei werden Zink und Blei verdampft und mit dem Gasstrom zum Gasaustritt des Rohrs geführt. Mit dem Sauerstoff der Prozessluft bilden die Metalle wieder Oxide, die in den nachgeschalteten Gasreinigungsstufen abgeschieden werden.

Das Prozessgas wird durch eine Staubkammer geführt, in der sich schwere Partikel absetzen. Diese werden erneut in das Wälzrohr chargiert. Das von groben Partikeln befreite Prozessgas wird anschließend in sogenannte Gasmischkammern geleitet, wo es mit den Abluft der Nassentschlackung zusammengeführt wird. Dadurch wird das rund 800 °C heiße Prozessgas auf rund 350 °C gekühlt. Ehe das Gas in die Produktfilter geleitet werden kann, muss es in einem Flachrohrkühler auf etwa 135 °C gekühlt werden, wobei bereits ein Teil des Wälzoxids abgeschieden wird. Die Produktfilter (4 Kammern) sind Gewebefilter, in denen das Wälzoxid aus dem Prozessgasstrom entfernt wird. Mit rund 120 °C wird das Prozessgas einer Filsorptionsanlage zugeführt, in der ein Adsorbens⁵³ eingesprüht wird. Das beladene Adsorbens wird mit Schlauchfiltern abgeschieden [19]. Hierdurch können evtl. vorhandene Dioxine und Quecksilber aus dem Abgas entfernt werden [238].

Die durch das Pelletieren der Einsatzstoffe und die Entwicklung des SDHL-Verfahrens erzielten Prozessverbesserungen sind in Tabelle 6-5 anhand typischer Kennzahlen zusammengefasst.

⁵³) Bei dem Adsorbens handelt es sich um ein Gemisch aus Braunkohlenskokstaub, Weißkalkhydrat sowie als Hauptbestandteil Calciumkarbonat. Die Abscheidung erfolgt zweistufig, wobei das beladene Material der ersten Stufe im Wälzrohr eingesetzt wird, während das der zweiten Stufe auf Untertagedeponien verbracht wird. Es wird derzeit versucht, auch das Material der zweiten Stufe im Prozess zu nutzen [17].

Tabelle 6-5: Verbesserungen des Wälzprozesses durch Pelletieren und SDHL-Verfahren

	Durchsatz [t/d]	Zinkausbrin- gen [%]	Koksver- brauch [kg/t]	Erdgasver- brauch [m ³ /h]
klassischer Wälz-Prozess	146	84	380	180
mit Pelletieren	165 - 170	86	270	180
mit SDHL-Verfahren	200 - 210	91 - 93	160 - 170	0

Quelle: [174]

Wie die angeführten Verbrauchswerte für Erdgas und Koks, den beiden Hauptenergieträgern, zeigen, wird durch das SDHL-Verfahren eine erhebliche Einsparung bzw. im Fall des Erdgases sogar eine Reduzierung auf Null ermöglicht. Eine Gegenüberstellung der genehmigten Emissionswerte der Anlage in Freiberg und der tatsächlichen, im Betrieb gemessenen Werte ist in Tabelle 6-6 gegeben.

Tabelle 6-6: Gegenüberstellung genehmigter und gemessener Werte für das SDHL-Verfahren

Werte in [mg/m ³]	SO ₂	NO _x	HCl	HF
Grenzwert	500	200	20	5
Messwerte	5 - 70	5 - 10	1 - 2,7	0,2 - 3,0

Quelle: [174], Volumenstrom 80.000 Nm³/h

Neben dem dargestellten SDHL-Verfahren betreibt die B.U.S AG über ihre Tochterunternehmen 3 weitere Wälzrohre: jeweils eins in Duisburg sowie in Frankreich (Fouquières-les-Lens) und Italien (Mailand) [18].⁵⁴ Europaweit wird die Verwertungskapazität der Wälzrohre auf rund 20.000 t Batterien/a geschätzt. Bei dem bisherigen Einsatz zinkhaltiger Batterien wurden keine negativen Auswirkungen auf den Prozess festgestellt, jedoch bereiten die in einem Teil der Batterien enthaltenen Graphitstäbe sowie die Stahlummantelungen der Batterien Schwierigkeiten, da sie z.T. unverändert in der Schlacke wiedergefunden werden und so die sonst übliche hochwertige Verwertung dieser im Strassen- und Wege- bzw. Deponiebau gefährden. Durch Schreddern der Batterien vor ihrem Einsatz im Wälzprozess bzw. durch Aufarbeitung der Schlacke ist dieses Problem technisch zu lösen, jedoch ist es nach Angaben der B.U.S. AG aufgrund der bisher nur geringen zur Verwertung angelieferten Mengen wirtschaft-

⁵⁴) Der Anteil der B.U.S AG an den in Deutschland betriebenen Anlagen beträgt 100 %, während die Anteile in Frankreich und Italien bei 50 bzw. 40 % liegen [18].

lich nicht darstellbar gewesen. Dagegen würde bei entsprechend großem Batteriedurchsatz auch die genannte Schlackenaufbereitung wirtschaftlich vorteilhaft sein, da so neben dem Wälzoxid zusätzlich mit der Graphitstift- und der Edelstahlfraktion der Batterieummantelungen zwei weitere gut vermarktbar Recyclingprodukte erzeugt werden könnten. Ein Schreddern der Batterien vor ihrem Einsatz würde neben der Investition in den Schredder insbesondere auch geeignete Absaugeinrichtungen und Sicherheitseinrichtungen erforderlich machen, da aufgrund der derzeitigen Quecksilbergehalte der Batterien durch die Wärmeentwicklung beim Schreddern Quecksilber bereits dort verflüchtigt werden würde und daher entsprechende Umweltschutzmaßnahmen zu ergreifen wären [17].

6.2.3 Batrec Industrie AG, Batrec-(Sumitomo-) Prozess

Die Batrec Industrie AG, Wimmis (Schweiz), wurde 1999 durch die Fusion der Batrec AG und der Recymet SA gegründet. Vor dem Zusammenschluss waren die beiden Unternehmen Konkurrenten im Schweizer und europäischen Batterieverbrennungsgeschäft. Seit dem Zusammenschluss werden am Standort Wimmis Batterien mit dem Sumitomo-Prozess verwertet und am Standort Aclens, dem vormaligen Stammsitz der Recymet SA, schadstoffhaltige Glühbirnen und Leuchtstoffröhren recycelt [160]. Die in Aclens zur Batterieverbrennung installierten Anlagen (Recytec-Prozess, siehe z.B. [9], [10] und [73]) werden nicht mehr eingesetzt. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass durch die in der Schweiz anfallenden und im Ausland akquirierten Altbatteriemengen eine ausreichende Auslastung an beiden Standorten des neuen Unternehmens nicht gewährleistet war und der weitere Betrieb beider Anlagen unwirtschaftlich gewesen wäre [209]. Eigentümer der Batrec Industrie AG sind die Schweizer Kantone sowie eine Reihe öffentlicher Unternehmen (Bahn, Post), bei denen größere Mengen ausgedienter Batterien anfallen.

Die Batrec Industrie AG nimmt sämtliche Batterien zur Verwertung an. Lithium-, Ni/Cd- und NiMH-Batterien sowie Fehlwürfe (Nicht-Batterie-Abfälle) werden jedoch weitgehend durch eine manuelle Sortierung aus den zur Verwertung angenommenen Batteriegemischen entfernt und an auf diese Materialien spezialisierte Verwerter bzw. Entsorger weitergeleitet. Auch Knopfzellen werden getrennt und in einer separaten Hg-Anlage (Prinzip siehe Verfahrensbeschreibungen in Abschnitt 6.6) ver-

wertet [148]. Der seit 1994 mit der Nominalkapazität von 2.000 t/a⁵⁵ arbeitende Prozess zur Verwertung der zurückbleibenden Batterien, im Wesentlichen Zink/Kohle- und Alkali/Mangan-Batterien, wurde von der japanischen Firma Sumitomo Heavy Industries entwickelt und durch die Batrec AG zur industriellen Reife weiterentwickelt [160], [43]. Eine schematische Darstellung des Prozesses ist in Abbildung 6-6 wiedergegeben.

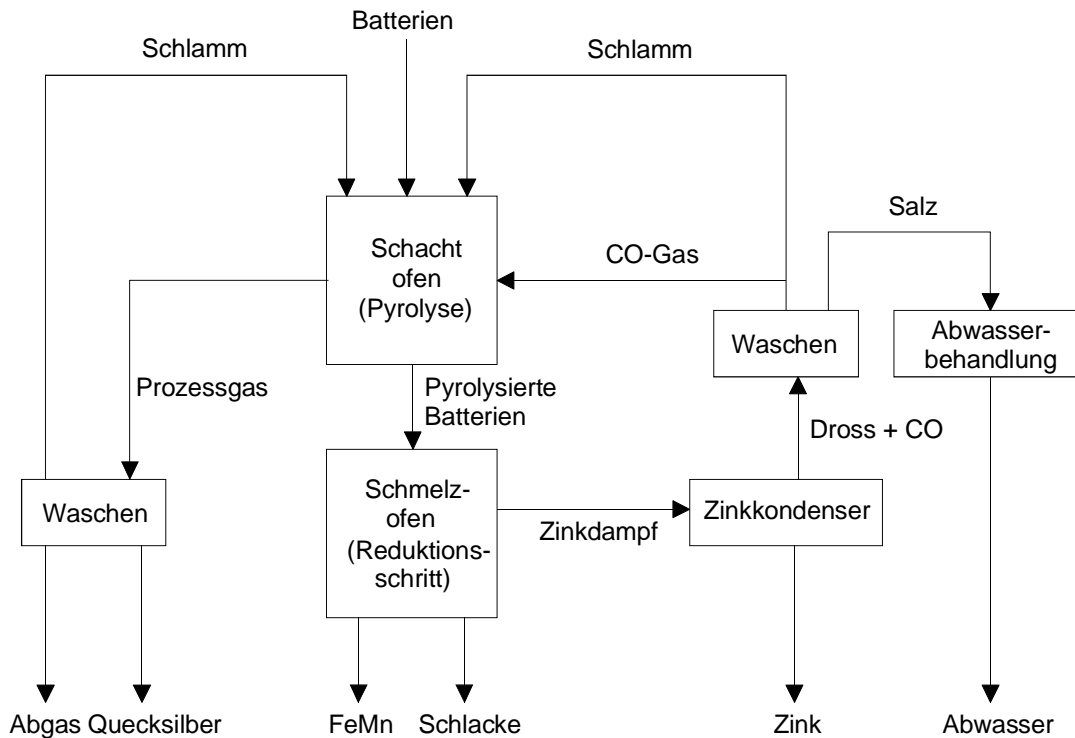


Abbildung 6-5: Schematische Darstellung des Batrec-(Sumitomo-) Prozesses

Quelle: [161]

Der Prozess ist in mehrere, räumlich voneinander getrennt ablaufende Stufen unterteilt. Zunächst wird das Einsatzmaterial in einem Schacht ofen, der mit einem reduzierenden Heißwind auf Temperaturen von 600 - 750 °C aufgeheizt wird, einer Pyrolyse unterworfen. Während der etwa vierstündigen Verweilzeit der Batterien im Schacht ofen werden die orga-

⁵⁵⁾ Derzeit (Januar 2001) beträgt die erreichte Kapazität rund 3.500 t Einsatzmaterial je Jahr. Eine Erweiterung auf 5.000 t/a ist geplant; dazu ist insbesondere die Installation einer zweiten Pyrolysestufe und eine entsprechende Erweiterung des Abgasreinigungssystems erforderlich [163].

nischen Bestandteile verbrannt bzw. ebenso wie das in dem Aufgabegut enthaltene Quecksilber verdampft. Das Abgas wird in eine Nachbrennkammer geleitet, in der bei rund 1.000 °C die vollständige Oxidation des bei der Pyrolyse entstandenen Gasmisches erreicht wird. In einer nachgeschalteten Quenche werden die Reaktionsprodukte schlagartig auf etwa 60 °C abgekühlt, so dass eine Dioxinbildung unterdrückt wird. In der nassen, mehrstufigen Gasreinigung werden die Schwermetalle und Halogenwasserstoffe sowie Schwefeloxide abgeschieden. Noch im Abgasstrom befindliches Quecksilber wird nach einer weiteren Abkühlung auskondensiert und zusammen mit den in den anderen Reinigungsstufen anfallenden Schlämmen in einer Quecksilberdestillation weiterbehandelt (vgl. Abschnitt 6.6) [161], [162], [159].

Die pyrolisierten Batterien werden anschließend in einen induktiv, d.h. unter Einsatz elektrischer Energie, auf rund 1.500 °C beheizten Schmelzofen gefördert, in dem unter reduzierenden Bedingungen bei Zugabe von Kohle und Magnesiumoxid die oxidischen Batteriebestandteile reduziert und die Metalle aufgeschmolzen werden. Die entstehende flüssige Phase besteht im Wesentlichen aus Eisen und Mangan; das in den Batterien enthaltene Zink verdampft in dieser Prozessstufe und wird mit dem Rohgasstrom in einen Sprühkondensator geleitet, in dem das Zink in der Gasphase durch Kontakt mit aufgewirbelten, flüssigem Zink kondensiert und anschließend zu Barren gegossen wird. Aus dem Schmelzofen werden das Ferromangan und die Schlacke,⁵⁶ die sich aufgrund der Dichteunterschiede einfach trennen lassen, mittels einer Abgießmaschine abgegossen. Das zu Masseln vergossene Ferromangan ist unmittelbar als Legierungsmittel in Stahlwerken einsetzbar, wobei jedoch der Kupfergehalt streng kontrolliert werden muss. Weitere metallische Bestandteile werden neutral oder positiv bewertet [288]. Das Abgas des Schmelzofens ist hoch kohlenmonoxidhaltig, so dass es zum Teil nach der Kondensation des Zinks und Durchgang durch ein Waschsystem als Energielieferant der Pyrolysestufe im Schachtofen genutzt wird. Die in den Gasreinigungsstufen anfallenden Stäube und Schlämme werden im Schachtofen verwertet, wobei zuvor aus dem in der Reinigung des Schachtofenabgases anfallenden Schlamm das enthaltene Quecksilber durch eine Destillation in separaten Anlagen zurückgewonnen wird [161]. Anfänglich wurde der aus dem Zinkkondensator

⁵⁶⁾ Es entstehen etwa 5 kg Schlacke je Stunde, entsprechend ca. 2 % der Masse der eingesetzten Batterien. Diese wird granuliert und auf Bauschuttdeponien verbracht [288].

stammende, gereinigte Dross (vgl. Abbildung 6-5) auch in den Schachtofen zurückgeführt; zwischenzeitlich stellte sich jedoch heraus, dass das Zinkoxid, aus dem der Dross überwiegend besteht, nicht rückgeführt werden muss, da seine Qualität eine direkte Vermarktung ermöglicht (vgl. Angaben zu Zinkoxid in Tabelle 6-9) [158]. Da somit weitere Prozessstufen zur Erzeugung metallischen Zinks entfallen, wie sie etwa beim DK- und Wälzprozess notwendig sind, wird in der vergleichenden Bewertung der Verfahren am Ende des Kapitels dieser Prozess bzgl. des Grades Verwertung mit der besten Verwertung versehen. Dem gegenüber steht ein im Vergleich hoher Verbrauch elektrischer Energie, die insbesondere zur induktiven Erwärmung im Schmelzofen eingesetzt wird.

Emissionen in Luft und Wasser werden regelmäßig gemessen. In Tabelle 6-7 sind die Ergebnisse einer Abgasanalyse und in Tabelle 6-8 die einer Abwassermessung wiedergegeben. Bei der Abgasanalyse ist zu beachten, dass die Dioxinkonzentrationen vor den Aktivkohlefiltern gemessen wurde.

Tabelle 6-7: Abgaswerte des Batrec- (Sumitomo-) Prozesses

Stoff	Grenzwert	Messwert	Einheit
CO	-	9 ± 7	mg/m ³
NO ₂	1.000	720	g/h
	-	1490 ± 150	mg/m ³
C _{total}	20	< 0,97	g/h
	20	< 2	mg/m ³
Hg	0,1	0,042	g/h
	0,1	0,087 ± 0,0022	mg/m ³
Feinstaub	20	< 0,5	mg/m ³
Dioxine / Furane min.	0,1	0,002	ng/m ³ I-TEq*
Dioxine / Furane max.	0,1	0,017	ng/m ³ I-TEq*

Quelle: Dr. Graf AG, Gerlafingen (10.11.97), zitiert aus [161]

* I-TEF: Internationale Toxizitätsäquivalente

Tabelle 6-8: Abwasserwerte des Batrec-(Sumitomo-) Prozesses

Stoff	Grenzwert	Messwert	Einheit
Hg	0,01	0,002 - 0,009	mg/l
Zn	2,0	0,24 - 1,46	g/h
Cd	< 0,1	0,07	mg/l
Pb	< 0,5	0,17	g/h
Cu	< 1,0	0,19	mg/m ³

Quelle: Labor Dr. Meyer, Bernd (21.01.00), zitiert aus [161]

Das mengenmäßige Hauptprodukt des Prozesses ist ein Ferromangan mit einem Mangananteil zwischen 25 und 40 Gew.-%, das als Legierungsmittel verkauft wird (vgl. Tabelle 6-9). Der Mangananteil ist von den Anteilen der einzelnen chemischen Systeme im verwerteten Batteriegemisch abhängig. Die Qualität des gewonnenen Zinks, dem derzeitigen

Hauptverkaufserlösträger, hängt ebenfalls von den Einsatzstoffen ab; so führen höhere Anteile von Ni/Cd-Batterien im eingesetzten Gemisch zu höheren Cadmiumgehalten des Zinks bzw. des Zinkoxids, so dass für zahlreiche Verwendungszwecke eine Raffination erfolgen müsste. Weiteres Produkt ist Quecksilber, das durch den Destillationsschritt eine sehr hohe Reinheit aufweist. Im Gegensatz zu den genannten Produkten ist die im Schmelzofen anfallende Schlacke derzeit nicht auf dem Markt abzusetzen, so dass sie deponiert werden muss [161]. Die Erlöse aus der Vermarktung der Produkte decken derzeit nur einen sehr geringen Teil der Verarbeitungskosten der Abfälle; für die Zukunft wird ein hoher Anteil von rund 50 % angestrebt [163].

Tabelle 6-9: Massenbilanz des Batrec AG (1999)

Abfälle [t]		Produkte [t]			
Batterien (Schweiz)	2.040	Ferromangan			640
Batterien (Ausland)	790	Zink			400
quecksilberhaltige Abfälle	170	Schlacke			310
Hilfsstoffe [t]		Zinkoxid			460
Schlackenbildner	50	Quecksilber			5
Kohle	25	Abgas [kg] (3.750.000 m ³)			
Lauge 30 %	95	NOx	1.750	Cd	0,01
Säure 30 %	5	Zn	0,2	Staub	2,3
Fällungskemikalien	30	Hg	0,1		
		Abwasser [kg] (3.750 m ³)			
		Zn	0,4	Cd	0,04
		Hg	0,01	DOC	220
		CN-	0,4	AOX	2,25
		F	94		

Analysen: Labor Dr. Meyer, Bern (21.01.00),
Quelle:[24]

Die Kapazität der Anlage in Wimmis soll zukünftig von derzeit etwa 3.000 t/a Batteriegemisch und weiteren quecksilberhaltigen Abfällen auf rund 5.000 t/a erweitert werden. Ziel dabei ist vor allem, durch Größendegressionseffekte die spezifischen Verarbeitungskosten für Batteriegemische auf unter 4.000 CHF/t zu senken [161]. Dazu gehört auch, dass die Erlöse aus dem Verkauf der Recyclingprodukte gesteigert werden sollen. So ist geplant, durch entsprechende Veränderungen der Schmelztechnologie den Mangananteil im erzeugten Ferromangan deutlich zu erhöhen und damit hochwertigere Vermarktungsoptionen zu erschließen [163]. Derzeit gehört der Batrec-Prozess zu den weniger wirtschaftlichen, d.h. mit hohen Annahmepreisen verbundenen Prozessen, wie die Gegenüberstellung der Verfahren am Ende des Kapitels zeigt.

6.2.4 VALDI, Elektrolichtbogenofen

VALDI ist ein Gemeinschaftsunternehmen von AFE Metal und TREDI. Es wurde 1997 zur Verwertung komplexer metallhaltiger Kuppelprodukte und Abfälle wie Stäube, Oxide, Hydroxide, Schlämme, Katalysatoren und nicht zuletzt Batterien gegründet. In Feurs (F) setzt VALDI zur Verwertung von Alkali/Mangan- und Zink/Kohle-Batterien als zentrales Aggregat einen 3,5 MVA Elektrolichtbogen (EAF) ein, der eine Schmelzleistung von rund 1,5 t/h besitzt. Es werden Batterien mit einem Quecksilbergehalt von bis zu 500 ppm eingesetzt [234]. Neben der Anlage in Feurs betreibt Valdi in Le Palais einen weiteren Ofen mit verdecktem Lichtbogen (SEAF), der eine Schmelzleistung von rund 3 t/h besitzt.

In Abbildung 6-6 ist stark vereinfacht der Verwertungsprozess mit seiner vorgeschalteten Sortierstufe schematisch abgebildet. In der Sortierstufe, die in einem Partnerunternehmen durchgeführt wird, werden aus dem gesammelten Batteriegemisch verschiedenen Fraktionen separiert und an geeignete Verwertungsunternehmen weitergeleitet. VALDI verwertet die Fraktionen Alkali/Mangan- und Zink/Kohle-Batterien, wobei der hohe Grenzwert von 500 ppm Hg für das Einsatzmaterial keine Trennung zwischen den jüngeren, quecksilberfreien und älteren, z.T. hoch quecksilberhaltigen Batterien erforderlich macht.

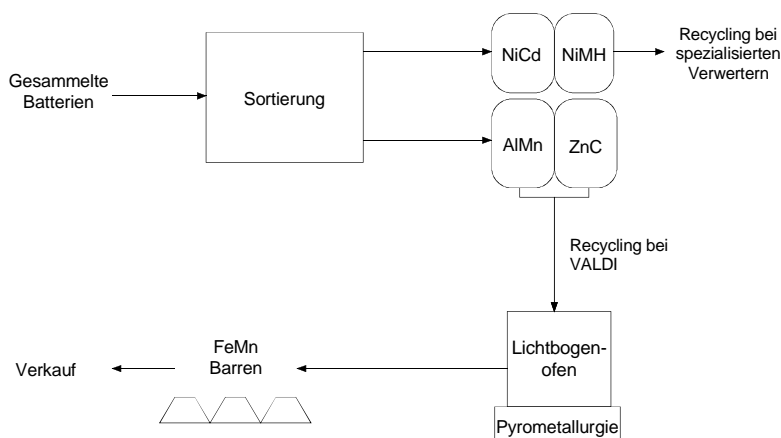


Abbildung 6-6: Prinzipieller Verfahrensablauf bei VALDI

Quelle: [222]

Batterien, die in einer Dimension mehr als 50 mm aufweisen, werden zunächst gebrochen, damit sie problemlos in den EAF gefördert werden können. Die Chargierung erfolgt automatisch und kontinuierlich durch einen Einfülltrichter über dem Ofen. Die Batteriechargierung wird erst be-

gonnen, nachdem bereits ein „Schmelzensumpf“, das heißt eine gewisse Grundmasse an flüssiger Schmelze im Ofen vorliegt. Die Zuführung weiterer Batterien wird gestoppt, wenn der Schmelzspiegel an seinem oberen Ende angekommen ist. Zusammen mit den Batterien wird kontinuierlich Kalk, Aluminium- und Siliziumoxidgemische und gebrauchtes Dolomit-Feuerfestmaterial sowie ein Reduktionsmittel hinzugefügt, um die Bildung einer gut abtrennbaren Schlacke zu erleichtern bzw. die Reduktion des Mangandioxids aus den Batterien zu erreichen. Das Mangan bildet zusammen mit den Eisen- bzw. Stahlbestandteilen aus den Batterien ein Ferromangan, das in Masseln abgegossen und verkauft wird. Die glasartige Schlacke wird seit Beginn 2000 extern weiterverwertet. In ihr sind die mineralischen Bestandteile sowie zum Teil die Alkalien und Halogene gebunden.

Das Zink der Batterien verdampft bei den hohen Temperaturen im Ofen von ca. 1.600 °C, oxidiert im Gasstrom und wird in Filtern als Produkt abgeschieden (vgl. Abbildung 6-7). Neben dem Zink werden im Gasreinigungssystem, das aus einer Kaltluftquenschne, einer Aktivkohleeindüsung sowie einen Gewebefilter besteht, als weitere Staubbestandteile Quecksilber (als Zinkverbindung) sowie über mechanische Verstaubung mitgeführte feine Bestandteile des Einsatzmaterials und die eingedühte Aktivkohle abgeschieden. Die Kaltluftquenschne zu Beginn des Abgasreinigungssystems verhindert durch die zügige Abkühlung der heißen Prozessgase von etwa 1.100 °C auf 200 °C die Bildung von Dioxinen. So wurde bei einer Messung eine Konzentration von Dioxinen und Furanen von 0,17 pg/Nm³ festgestellt [234]. Hauptenergieträger ist die über die Elektroden eingebrachten elektrische Energie, durch die die zum Einschmelzen und zur Verdampfung des Zinks erforderliche Wärmeenergie in den Prozess eingebracht wird.

Verfahren/Unternehmen zur Verwertung verbrauchter Batterien

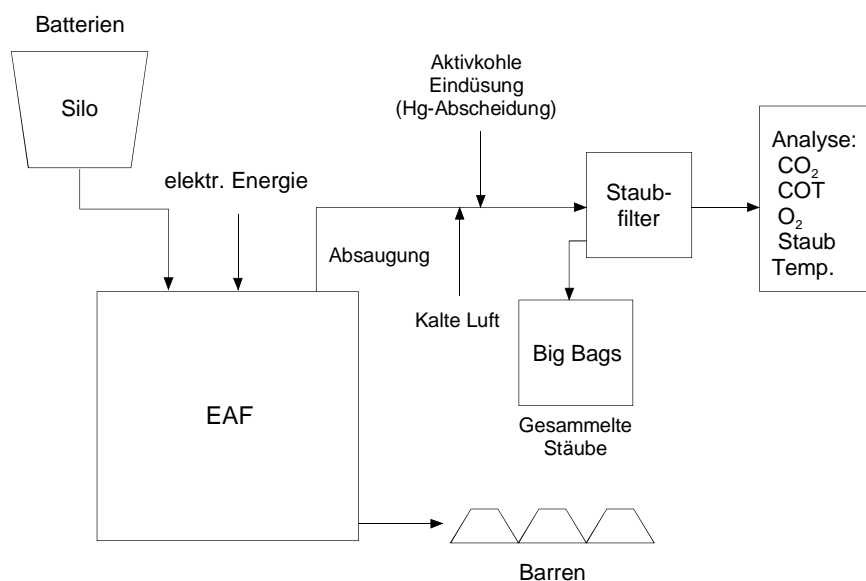


Abbildung 6-7: Schematische Darstellung der Ferromanganherstellung im EAF

Quelle: [222]

Die Produkte, ihre typischen Zusammensetzungen bzw. Hauptkomponenten und ihr weiterer Verbleib sind in Tabelle 6-10 zusammengefasst.

Tabelle 6-10: Produkte, Zusammensetzung und Verbleib der Produkt bei VALDI

Produkt	Zusammensetzung (Hauptkomponenten)	Anteil am Verbleib der Batteriebestandteile [%]	weiterer Verbleib
Ferromangan	Fe: 65 - 80 % Mn: 20 -35 %	30 - 35	Stahlguss
Staub	Zn: 60 % CaO, CaCl ₂ : 1 % Fe ₂ O ₃ : 2 % KCl: 10 %	35 - 40	Hydrometallurgische Zinkgewinnung
Schlacke	Al ₂ O ₃ , CaO, SiO ₂ , MgO, Fe ₂ O ₃	30	Externe Weiterverwertung

Quelle: [234]

In Tabelle 6-11 und Tabelle 6-12 sind Abgasmess- und Genehmigungswerte für das Batterieverwertungsaggregat bei VALDI zusammengestellt. Abwasser fällt keines an, da die zur Kühlung des Ofens notwendige Wassermenge im Kreislauf geführt wird.

Tabelle 6-11: Abgaswerte des VALDI-Prozesses bei Batterieeinsatz (Konzentrationen)

		Konzentration im feuchten Gas [µg/Nm ³]	Konzentration im trockenen Gas [µg/Nm ³]	Genehmigungs- grenzwert [µg/Nm ³]
Metallische Elemente	Staub	<1 [mg/Nm ³]	<1 [mg/Nm ³]	<10 [mg/Nm ³]
	Quecksilber	0,1	0,1	< 50
	Cadmium	0,03	0,03	< 50
	Blei	0,1	0,1	< 500
	Zink	181	186	< 5.000
Gasförmige Metalle	Quecksilber	3	3	< 50
	Cadmium	< Nachweisgrenze	< Nachweisgrenze	< 50
	Blei	< Nachweisgrenze	< Nachweisgrenze	< 500
	Zink	0,06 [mg/Nm ³]	0,06 [mg/Nm ³]	< 5.000

Volumenstrom (feucht): 77.394 Nm³/h

Quelle: [234]

Tabelle 6-12: Abgaswerte des VALDI-Prozesses bei Batterieeinsatz (Massenströme)

Element	Messwert [g/h]	Genehmigungs- grenzwert [g/h]
Staub	< 77	< 80
Aluminium	0,2	1
Cadmium	0,002	1
Zink	18,5	200
Blei	0,01	20

Quelle: [234]

Im Jahr 2000 sind von VALDI 1.500 t Alkali/Mangan- und Zink-Kohle-Batterien mit einem Quecksilbergehalt von bis zu 500 ppm verwertet worden. Für 2001 bzw. 2002 ist eine Verwertungskapazität für Batterien von 8.000 t bzw. 15.000 t vorgesehen [234]. Angaben zu den Kosten der Verwertung wurden durch das Unternehmen nicht gemacht; die zu zahlende Verwertungsgebühr soll jedoch deutlich über 1.000 DM/t liegen und damit ein Vielfaches der in Deutschland zu entrichtenden Deponiegebühren betragen. Die Reaktionen des Unternehmens auf Anfragen nach Informationen über den zur Batterieverbrennung eingesetzten Prozess sind im Rahmen des Forschungsvorhabens nur auf Verzögerung ausgerichtet gewesen, so dass die Öffentlichkeitsarbeit/Transparenz nur negativ bewertet werden kann.

6.2.5 DK Recycling und Roheisen GmbH, DK-Prozess

Die DK Recycling und Roheisen (DK), Duisburg, ist ein bedeutendes Recyclingunternehmen für die Metallindustrie und die Chemische Industrie, das durchschnittlich 400.000 t Reststoffe pro Jahr aus diesen Bereichen zur Erzeugung von Gießereirohisen einsetzt. Die DK betreibt dazu in ihrem Duisburger Werk als Hauptaggregate ein Sinterband und zwei Hochöfen. Die Struktur des Hüttenwerkes ist in Abbildung 6-8 wiedergegeben.

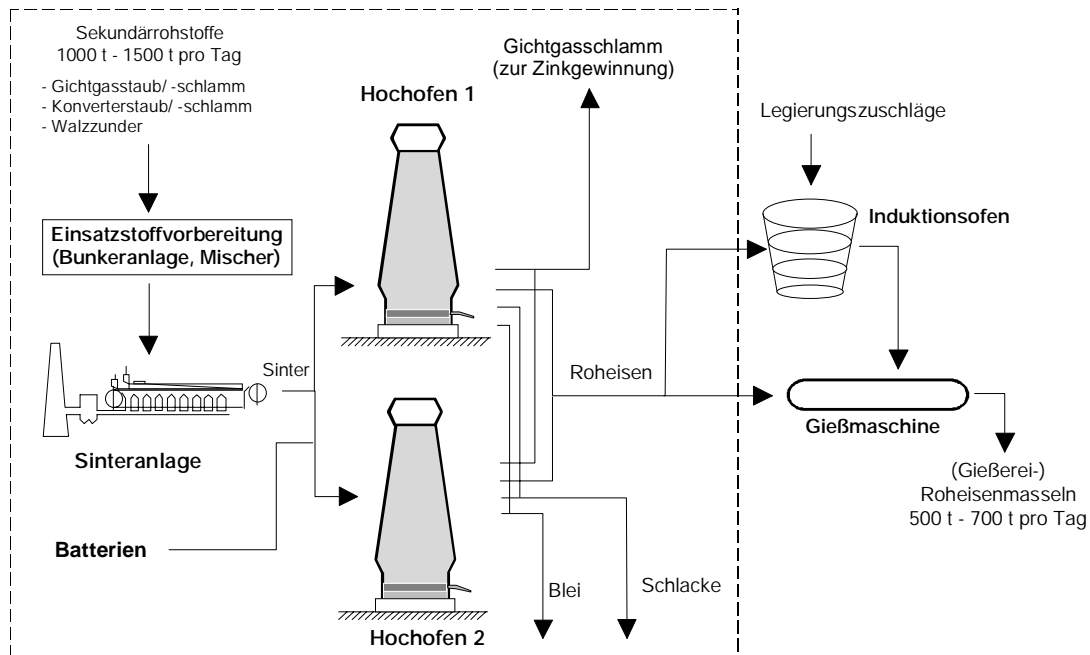


Abbildung 6-8: Schematische Darstellung des Hüttenwerkes der DK Recycling und Roheisen GmbH⁵⁷

Der DK-Prozess unterscheidet sich aufgrund des fast ausschließlichen Einsatzes sekundärer Rohstoffe erheblich von dem zur Erzeugung von Roheisen in integrierten Hüttenwerken⁵⁸ eingesetzten Hochofenprozess. Insbesondere die Temperaturführung weicht deutlich von der sonst übli-

⁵⁷⁾ Von der in der Graphik gezeigten Möglichkeit, aus den Hochöfen Blei über einen separaten Abstich zu gewinnen, wird derzeit kein Gebrauch gemacht.

⁵⁸⁾ In integrierten Hüttenwerken wird aus den Haupteinsatzstoffen Erzen und Koks Rohstahl erzeugt. Dazu wird eine Prozesskette aus Sinteranlage, Hochofen und Konverter eingesetzt (vgl. [240]).

chen Praxis ab. So ist etwa die Temperatur des Gichtgases beim Austritt aus dem Ofen erheblich höher als bei konventionellen Hochöfen. Dies ist u.a. erforderlich, um Zink in der Gasphase zu halten und unerwünschte Anbackungen zu vermeiden. Je nach Anforderung an das zu erzeugende Roheisenprodukt erfolgt die Einstellung der gewünschten chemischen Zusammensetzung der Sintermischung durch gezieltes Mischen der Reststoffe. Hierbei ist zu beachten, dass die Mischung den verfahrensbedingten Anforderungen der Sinteranlage und des Hochofens entspricht. Dies gilt insbesondere für die zulässige Obergrenze des Gehalts an Nichteisenmetallen und Alkalien sowie für den zulässigen Feinkornanteil. Im Gegensatz zum Sinterprozess in integrierten Hüttenwerken, in denen im allgemeinen die Produktion eines möglichst gleichbleibenden, homogenen Sinters angestrebt wird, stellt die DK mehrere Sorten Sinter her. Dadurch kann die Möllierung, d.h. die Beschickung des Hochofens mit den verschiedenen Einsatzmaterialien, besser auf die zu erzeugende Roheisenqualität abgestimmt werden. Nach Reduktion im Hochofen wird das erschmolzene Roheisen abgestochen. Bei etwa 50 % des abgestochenen Roheisens erfolgt eine Feineinstellung der Zusammensetzung durch die Zugabe von Legierungselementen in einem nachgeschalteten Induktionsofen ehe es als Gießereiroheisen verkauft wird. Wie beim IS-Ofen ist beim Hochofenprozess der DK Koks ein Hauptenergieträger. Auch hier gilt jedoch, dass er nicht alleine dazu dient, die erforderliche Schmelzwärme zur Verfügung zu stellen, sondern er ist auch als Reduktionsmittel und Stützgerüst im Ofen unverzichtbar.

Folgende Reststoffe werden üblicherweise in das Verfahren eingesetzt:

- Filterstäube und -schlämme aus Gasreinigungen (u.a. grober und feiner Konverterstaub),
- Gichtstaub und Gichtgasschlamm,
- Abbrände,
- grober Walzenzunder und Walzenzunderschlamm und
- eisenhaltige Reststoffe aus der chemischen Industrie und der Nichteisenmetallindustrie.

Die Reststoffzusammensetzung kann bei der Reduktion im Hochofen in relativ großen Bandbreiten variieren. Besondere Qualitätsanforderungen und Höchstgrenzen an die zu verarbeitenden Reststoffe ergeben sich hinsichtlich der geforderten Roheisenqualität sowie deren Auswirkungen auf den Hochofengang. So ergeben sich aus den Anforderungen an die Rohei-

senzusammensetzung unter anderem für die jeweiligen Anteile der Elemente Titan, Chrom, Arsen und Phosphor Höchstgrenzen.

Die Erzeugnisse des DK-Verfahrens zeigt Tabelle 6-13.

Tabelle 6-13: Erzeugnisse des DK-Verfahrens

Erzeugnisse	Zusammensetzung	Verwendungsmöglichkeit
Gießereirohisen ca. 200.000 t/a	Die vom Abnehmer geforderte Zusammensetzung wird durch Mischen der Einsatzstoffe eingestellt.	Verkauf an Gießereien
Rohblei (geringe Mengen)	Pb: > 99 %	Verkauf an NE-Metallhütten
Hochofenschlacke (ca. 60.000 t/a) Gichtgas*)	CO: 8 - 34 %, CO ₂ : 9 - 16 %, H ₂ : 1,5 - 2,0 %, CH ₄ : 1 %, N ₂ : 54 - 56 %	Baustoff Brenngas
Zinkkonzentrat (ca. 15.000 t/a)	Zn: > 60 %	NE-Metallhütten

*) Die Zusammensetzung kann in Abhängigkeit der Einsatzstoffe stark schwanken
Quellen: [124], [63]

Aufgrund der hohen Zinkeinträge durch den aus Reststoffen erzeugten Sinter in die Hochöfen gelingt es, ein hoch zinkhaltiges Konzentrat (Gichtschlamm) zu erhalten. Die Zinkgehalte sind derart hoch, dass der Gichtschlamm für die zinkerzeugende Industrie ein interessanter Rohstoff ist.

Bisher (Stand Februar 2001) wurde der Einsatz von Batterien mit quecksilberfreien Fehlchargen aus der Batterieindustrie erprobt; ab Oktober 2001 hat die DK Recycling und Roheisen GmbH einen Zuschlag innerhalb des Verwertungsloses der GRS erhalten [259]. Zink/Kohle- und Alkali/Mangan-Batterien sind für die DK Recycling und Roheisen GmbH ein interessanter Einsatzstoff, da ihre Inhaltsstoffe zu einem sehr hohen Grad in verkaufsfähige Produkte überführt werden können.⁵⁹ So werden das Eisen aus den Stahllummantelungen sowie Mangan, Kupfer und weitere Metalle in das Roheisen überführt. Zink als weiterer Hauptbestandteil der Batterien wird über das Gichtgas aus dem Hochofen ausgetragen und findet in einem bei der Gichtgaswäsche gewonnenen Zinkkonzentrat als Einsatzstoff zur Zinkgewinnung Verwendung. Der in den Batterien vorhandene Kohlenstoff dient im Hochofen als Reduktionsmittel und trägt zur

⁵⁹) Aus diesem Grund wird der DK-Prozess in der Kategorie „Grad der Verwertung“ in Tabelle 6-34 positiv bewertet.

Verringerung des Koksverbrauches bei. Aus dem Elektrolyten stammendes Kalium wird weitgehend in der Hochofenschlacke gebunden [63]. Die Kapazität des Verfahrens zur Batterieverwertung ist noch nicht bestimmbar; die Größenordnung dürfte jedoch im Bereich mehrerer Tausend Tonnen Batterien je Jahr liegen [259].

6.2.6 Elektrolichtbogenofen (EAF)

Neben der „klassischen“ Produktionslinie Sinterband-Hochofen-Konverter in integrierten Hüttenwerken wird Rohstahl im zunehmenden Maße in Elektroöfen auf Basis von Schrott hergestellt. In Deutschland betrug 1997 der Anteil der Erzeugung von Stahl in Elektrostahlwerken ca. 24,1 % der Gesamtmenge von 45 Mio. t [312]. Zum Einschmelzen von RSH-Stählen⁶⁰ werden zum überwiegenden Teil Elektroöfen verwendet [338]. Im Vergleich zum europäischen Durchschnitt hat Elektrostahl in Deutschland einen relativ niedrigen Anteil an der Gesamtstahlerzeugung, wobei seine Bedeutung jedoch in den letzten Jahren stetig zunahm [338]. Der im Elektrostahlwerk eingesetzte Elektrolichtbogenofen (EAF)⁶¹ zeichnet sich durch eine hohe Flexibilität hinsichtlich der einsetzbaren Eisenträger aus. Der Schrotteinsatz ist zwischen 0 und 100 % variierbar; gleiches gilt für den Einsatz anderer Eisenträger wie Eisenschwamm [116]. In einigen Elektrostahlwerken wird Roheisen mit als Eisenträger eingesetzt, um die erforderlichen Qualitäten zu erreichen. In EAFs können auch kleinere Produktionsmengen wirtschaftlich erzeugt werden, und sie finden deshalb besonders in Minimills genannten kleinen Stahlwerken mit Produktionsmengen unter einer Million Jahrestonnen Walzstahl Verwendung [127]. In Abbildung 6-9 sind schematisch der Aufbau und die Abfolge der verfahrenstechnischen Schritte eines Elektrostahlwerks dargestellt. In jüngerer Zeit sind im europäischen Ausland (z.B. England, Niederlande) sowie in den USA Betriebsversuche zum Einsatz von quecksilberfreien Zink/Kohle- und Alkali/Mangan-Batterien unternommen worden [82], die sowohl von den Betreibern der Anlagen als auch von den Batterieandienern als erfolgreich gewertet werden. In Deutschland sind derzeit (noch) keine Elektrostahlwerke bekannt, in denen Versuche zum Batterieeinsatz durchgeführt werden. Aufgrund der erheblichen wirtschaftlichen

⁶⁰⁾ RSH-Stähle sind rost-, säure- und hitzebeständige Stähle.

⁶¹⁾ Die gebräuchliche Abkürzung stammt aus dem Englischen und steht für „electric arc furnace“.

Vorteile, die durch die Verwertung von Batterien erzielt werden können, ist jedoch anzunehmen, dass mittelfristig auch dieser Verwertungsweg in Deutschland etabliert werden wird. So ist es für die Stahlwerksbetreiber interessant, mit den Batterien einen Eisenträger als Einsatzstoff zu erhalten, für dessen Einsatz sie eine Zuzahlung verlangen können. Für die Rücknahmesysteme wird die Verwertung von quecksilberfreien Zink/Kohle- und Alkali/Mangan-Batterien zu Preisen (100 - 200 €) ermöglicht, die unter den derzeitigen Sonderabfalldeponiegebühren liegen. Voraussetzung einer Verwertung ist jedoch die zuverlässige Abtrennung von quecksilberhaltigen Batterien aus dem Einsatzmaterial, da die üblichen Gasreinigungssysteme von Elektrolichtbogenöfen zur Stahlerzeugung in Deutschland (Quenche + Gewebefilter) keine vollständige Absecheidung evtl. eingebrachten Quecksilbers gewährleisten können.

Im Folgenden werden die Stahlerzeugung in Elektrostahlwerken beschrieben [239] und erste Erfahrungen mit der Batterieverwertung im EAF aus dem Ausland dargestellt.

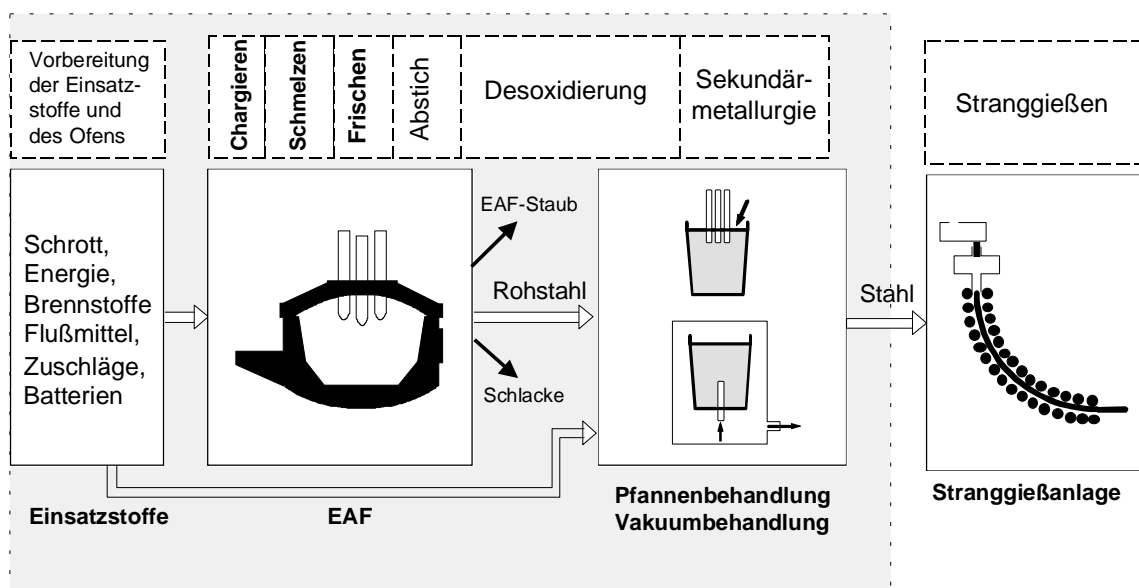


Abbildung 6-9: Schematischer Aufbau eines Elektrostahlwerks

Quelle: [238]

Übliche Elektrolichtbogenöfen zur Rohstahlerzeugung haben ein Abstichgewicht von 70 - 140 t. Kenngröße für die Leistungsfähigkeit eines Lichtbogenofens ist seine spezifische Transformatorenscheinleistung.

Für große Öfen sind Leistungen von 700 - 800 kVA/t Flüssigstahl üblich [341]. Abbildung 6-10 zeigt den schematischen Aufbau eines Lichtbogenofens. Er besteht aus drei Hauptteilen:

- Herd, der mit Feuerfestmasse ausgemauert ist und einen gewölbten Gefäßboden besitzt,
- Wand aus i.a. wassergekühlten Segmenten und
- Deckel, durch den die Graphitelektroden geführt werden.

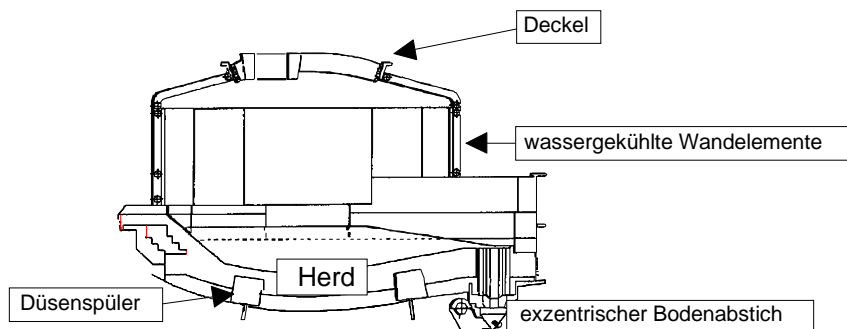


Abbildung 6-10: Schema eines Lichtbogenofens

Quelle: [62]

Die Stahlerzeugung im Elektroofen lässt sich in folgende Abschnitte einteilen:

- Einsetzen (Chargieren),
- Einschmelzen,
- Oxidationsphase (Frischperiode) und
- Desoxidationsphase (Feinungs- bzw. Reduktionsperiode).

Das Chargieren des Ofens wird in der Regel bei angehobenem und zur Seite geschwenktem Deckel vorgenommen. Mit Hilfe von Kränen werden sogenannte Schalenkörbe, die entsprechend der Ladevorschriften mit den festen Einsatzstoffen Schrott (u.a. Batterien) bzw. Eisenschwamm oder Roheisen, Erzen und Zuschlägen gefüllt sind, über das Ofengefäß gebracht und entleert. Nach dem Einschmelzen der ersten Korbladung werden üblicherweise weitere eingesetzt, im allgemeinen werden zwei bis drei chargiert. Roheisen wird in Masseln oder auch, wenn es in der Nähe erzeugt wurde, flüssig chargiert. Nach dem Schließen des Deckels werden die

Graphitelektroden abgesenkt und der Lichtbogen zum metallischen Einsatz gezündet. Zur Senkung des Stromverbrauchs kann das Einschmelzen durch Einblasen von Sauerstoff oder Brennstoff-Gasgemischen beschleunigt werden [8], [239].

Das Frischen (Oxidation) erfolgt nach der Einschmelzphase des letzten Korbes. Ziel ist die Reduzierung des Kohlenstoffgehalts der Schmelze. Dazu wird Sauerstoff in das Bad eingeblasen, der sich im Bad löst und neben dem Kohlenstoff zum Teil mit den in der Schmelze vorhandenen Metallen zu Oxiden (z.B. FeO, MnO) reagiert, die von der Schlacke aufgenommen werden.

Im nächsten Schritt wird die auf der Schmelze aufschwimmende Schlacke durch Kippen des Ofens in eine Schlackengrube bzw. -pfanne abgossen und anschließend der flüssige Stahl mit einer Temperatur von ca. 1.600 - 1.650 °C abgestochen.

Der zentrale Vorgang im Elektrolichtbogenofen ist das Einschmelzen der festen Eisenträger. Bedeutendster Eisenträger für den Einsatz in Elektrostahlwerken ist Schrott. Seiner Auswahl wird besondere Aufmerksamkeit geschenkt, da im Wesentlichen nur durch eine geeignete Auswahl oder durch eine (eher seltene) Vorbehandlung des Schrottes vor dem Einsatz im EAF der Gehalt an bestimmten Spuren- und Begleitelementen begrenzt werden kann. In Tabelle 6-14 sind Möglichkeiten zur Absenkung der Begleit- und Spurenelementgehalte im Stahl bei der Elektrostahlerzeugung aufgezeigt.

Tabelle 6-14: Möglichkeiten zur Absenkung der Gehalte von Begleit- und Spurenelementen

Absenkung bzw. Begrenzung im Einsatz	Elemente
Lichtbogenofen	Cu, Sn, Cr, Ni, Mo
Pfanne / Vakuum	C, Si, Mn, P, (S), (Cr), Al, (O), S, H, O, (N)

() = beschränkte Absenkbarkeit

Quelle: [126]

Demnach bestehen insbesondere für Elemente wie Cu, Sn, Cr, ..., die die Produktqualität entscheidend beeinflussen, kaum Möglichkeiten, diese im Elektrolichtbogenofen im nennenswerten Umfang aus der Schmelze zu entfernen. Dies muss insbesondere beim Einsatz von Batterien bedacht werden, da in diesen u.a. Kupfer verwendet wird (vgl. Tabelle 6-17). Der Vorbehandlung der Einsatzstoffe (z.B. intensive Sichtkontrolle und ggf. Nachsortieren) und der Nachbehandlung des im EAF eingeschmolzenen Stahls in den sekundärmetallurgischen Verfahrensstufen kommt zune-

mende Bedeutung zu, da die Elektrolichtbogenöfen immer mehr als reine Hochleistungseinschmelzaggregate verwendet werden und z.B. eine aufwendige Schlackenführung unterbleibt [126]. Dies bedeutet, dass die genaue Einstellung der vom Kunden gewünschten Legierung nicht im EAF, sondern zum einen durch sorgfältige Auswahl der Einsatzstoffe und andererseits durch Schmelzbehandlungsschritte in nachgeschalteten Prozessstufen vorgenommen wird.

Eine besondere Schwierigkeit bei der Stahlerzeugung im Elektrolichtbogenofen besteht dadurch, dass für den Haupteinsatzstoff, den Schrott, eine exakte analytische Bestimmung der Gehalte an einzelnen Elementen vor dem Einschmelzen nicht durchführbar ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass insbesondere bei Einsatz von Altschrotten eine Probennahme, d.h. die Auswahl einer für die Gesamtmenge repräsentativen Teilmenge, aufgrund der meist heterogenen Zusammensetzungen der Schrotte nicht möglich ist. Um die Lieferbeziehungen zwischen Stahlindustrie und Schrottwirtschaft zu vereinfachen wurden zwar verschiedene Schrottsorten definiert, jedoch sind dort nur angestrebte Obergrenzen für bestimmte Elemente festgeschrieben (vgl. Tabelle 6-15). An den angestrebten Analysenwerten für Kupfer und Zinn kann abgelesen werden, dass Batterien aufgrund ihrer Gehalte an diesen Elementen kein bevorzugter Einsatzstoff der Stahlerzeugung sind, sondern ihr Einsatz für die Betreiber der Elektrolichtbogenöfen nur durch eine Zuzahlung wirtschaftlich attraktiv werden kann.

Tabelle 6-15: Europäische Schrottsortenliste

Kategorien	Sorten Nr.	Angestrebte Analysenwerte (Reststoffe) in %:				
		Cu	Sn	Cr + Ni + Mo	S	P
Altschrott	E 3	< 0,250	< 0,010	$\Sigma < 0,250$		
	E 1	< 0,400	< 0,020	$\Sigma < 0,300$		
Neuschrott	E2					
	E8			$\Sigma < 0,300$		
	E6					
Schredderschrott	E 40	< 0,250	< 0,020			
Stahlspäne	E 5H	Eine vorherige chemische Analyse kann gefordert werden				
	E 5M	< 0,400	< 0,030	$\Sigma < 1,0$	< 0,100	
Leicht legierter Schrott	EHRB	< 0,450	< 0,030	$\Sigma < 0,350$		
Schrott mit hohem Reststoffanteil	EHRM	< 0,400	< 0,030	$\Sigma < 1,0$		
Geschredderter Schrott aus Müllverbrennung	E36	< 0,500	< 0,070			

Quelle: [126]

Für Elemente wie Cadmium oder Quecksilber sind in der Schrottsortenliste keine angestrebten Analysenwerte angegeben, da sie generell uner-

wünscht sind. Ihr Eintrag etwa durch cadmierte Oberflächen würde zu hohen Cadmiumeinträgen in den EAF-Staub bzw. zu höheren Emissionswerten führen, so dass entsprechende Teile aus dem Einsatzmaterial entfernt werden.

Eine Stoffbilanz für ein Elektrostahlwerk mit Schrott als alleinigem Eisenträger ist in Tabelle 6-16 wiedergegeben.

Tabelle 6-16: Input/Output-Bilanz für ein Elektrostahlwerk

Input		Output	
Schrott [kg/t]	1.120	Fertigprodukt (gewalzt) [kg/t]	1.000
Elektrische Energie [kWh/t]	579,3	Elektroofenschlacke [kg/t]	149,2
Erdgas [kWh/t]	296,2	Pfannenschlacke [kg/t]	15,9
Flüssiggas [kWh/t]	47,4		
Sauerstoff [Nm ³ /t]	45,6	Feuerfestausbruch [kg/t]	6,1
Kalk [kg/t]	56	Eigenschrott (Rücklaufschrutt, Separationsschrutt) [kg/t]	48,7
Kohle [kg/t]	12,5	Staub (Pellets) [kg/t]	17,7
Legierungsmittel [kg/t]	13,9	Walz- und Stranggießzunder	18,6
(je nach Stahlqualität)	(Grundstahl)	[kg/t]	
Brunnenwasser (Kühlung, Entzunderung, ...) [m ³ /t]	5,92	Produktionsabwasser (Direkteinleitung) [m ³ /t]	5,8
Feuerfestausmauerung [kg/t]	1,9 - 25,1	Lärm [dB(A)] im Nahbereich eines Elektroofens	125 - 139
	(Ø = 8,1)		
Graphitelektroden [kg/t]	1,5 - 4,5	Abgasvolumenstrom [Nm ³ /h]	1,2 Mio.

Quelle: [238]

Die Tabelle zeigt, dass der Großteil der zum Einschmelzen der Charge und zur Verdampfung der flüchtigen Bestandteile notwendigen Energie in Form von Elektroenergie in den Prozess eingebracht wird, wenngleich ein Teil bereits durch Erdgasbrenner und - im geringen Umfang - durch Kohle ersetzt wird. Neben den Schlacken stellen die Stäube, die bei der Elektrostahlerzeugung anfallen, einen bedeutenden Reststoff dar. Entscheidend für ihre Zusammensetzung sind die unterschiedlichen Einsatzstoffe, die in Abhängigkeit des Produktionsprogramms eingesetzt werden. In den Stäuben sind jene Elemente enthalten, die beim Einschmelzen des Schrotts im Lichtbogenofen als Metalle oder Metallverbindungen verdampfen und beim Abkühlen der Abgase wieder kondensieren oder direkt mit dem Abgasstrom ausgetragen werden. Die Stäube bestehen im Wesentlichen aus SiO₂, Al₂O₃, CaO und MgO, metallischem bzw. nichtmetallisch gebundenen Eisen und NE-Metallverbindungen. Je nach herzustellendem Stahl sind auch die entsprechenden Legierungsmittel wie Chrom, Nickel usw. im Staub wiederzufinden.

Kennzeichnend für Stäube der Massenstahlproduktion sind die relativ hohen Anteile an Zink- und Bleiverbindungen. Der hohe Zinkgehalt lässt sich durch den Einsatz von verzinktem Schrott in den Elektrolichtbogen-

öfen erklären. Bedingt durch den verstärkten Einsatz verzinkten Bleche z.B. in der Automobilproduktion hat sich der Zinkgehalt der Stäube in den letzten Jahren erhöht. Blei gelangt im Wesentlichen durch bleihaltige Farben und Rostschutzanstriche (Bleimennige) ebenfalls mit dem Schrott in die Elektrolichtbogenöfen und somit in den Filterstaub.⁶² Der Verbleib der bei der Mitverwertung von Batterien in den Ofen eingetragenen Batteriebestandteile ist in Tabelle 6-17 zusammengefasst.

Tabelle 6-17: Verbleib von Batteriebestandteilen beim Einsatz im EAF

Bestandteil	Anteil in der Rücklaufmischung* [Gew.-%]	Verbleib beim Einsatz
Mangan	19,36	geht hauptsächlich als MnO in Schlacke ein wird im Filterstaub aufkonzentriert und erhöht dessen Wert zum Recycling
Zink	16,72	
Kohlenstoff	5,91	im flüssigen Stahl oder als Energie wiederverwertet; kann Satzkohleverbrauch vermindern
Stahl	21,62	in der Schmelze wiederverwertet; trägt zur Ausbeute bei.
Nickel	0,32	lösen sich größtenteils im Stahlbad. Ein 1 % Zusatz an Batterien kann den Cu-Anteil in der Schmelze um ca. 0,005 % und den Ni-Anteil um ca. 0,003 % steigern. Dies ist bei Stählen niedriger Qualität unwesentlich, beschränkt aber die Zusätze auf ca. 3 %
Blei	0,02	
Zinn	0,01	
Bronze	0,75	
Kaliumhydroxid	3,22	geht in den Filterstaub als K ₂ O ein
Papier	0,87	verbrennen zu CO ₂ und H ₂ O
Bitumen	0,44	verbrennen zu CO ₂ , H ₂ O und HCl; der Großteil des HCl verbindet sich mit Metallen im Filterstaub
Kunststoffe	2,90	
Zinkchlorid	0,32	siehe Zink
Ammoniumchlorid	2,57	zersetzt sich zu NO ₂ , H ₂ O und HCl
Sauerstoff	13,98	verlässt in Oxiden gebunden den Ofen
Wasser	11,00	verdampft

* Rücklaufmischung: Typisches Gemisch aus quecksilberfreien Al/Mn- und Zn/C-Batterien
Quelle: [226]

In Betriebsversuchen ermittelte Auswirkungen des Batterieeinsatzes auf einige relevante Kennzahlen für die Produktqualität und die Umweltbelastung zeigen die folgenden Abbildungen. Die Daten stammen aus zwei Versuchsreihen, die vom britischen Elektrostahlerzeuger ASW Sheerness Steel Ltd. 1998 und 1999 durchgeführt wurden [85]. Insgesamt wurden dabei 170 t quecksilberfreie Batterien eingesetzt. Je Schmelze werden rund 100 t Schrott in den Ofen chargiert; die eingesetzten Batte-

⁶²⁾ Zur Verwertung des EAF-Staubes vgl. etwa Abschnitt 6.2.2.

rien (vgl. folgende Abbildungen) entsprechen somit 1,5 bzw. 2,5 Gew.-% des Einsatzmaterials.

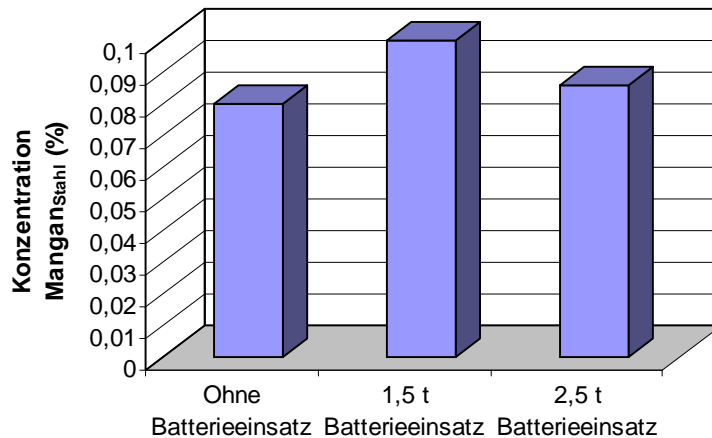


Abbildung 6-11: Auswirkungen des Batterieeinsatzes auf den Mangangehalt des Stahls

Quelle: [85]

Die in Abbildung 6-11 gezeigten Ergebnisse bzgl. des Mangangehalts im Stahl zeigen, dass obwohl Mangan bzw. Mangandioxid Hauptbestandteile der Batterien sind, keine die Produktqualität gefährdenden Erhöhungen der Mangankonzentration im Stahl auftreten. Nach Informationen von Betreibern von Elektrostahlwerken ist für viele Stahlsorten eher sogar ein erhöhter Mangangehalt in den Einsatzmaterialien vorteilhaft [257]. Ferner ist wie bei den in Abbildung 6-14 gezeigten Dioxinmesswerten keine Korrelation zwischen Messwert und eingesetzter Batteriemenge zu erkennen.

Die Auswirkungen auf die Kupfer-, Nickel- und Zinngehalte zeigt Abbildung 6-12.

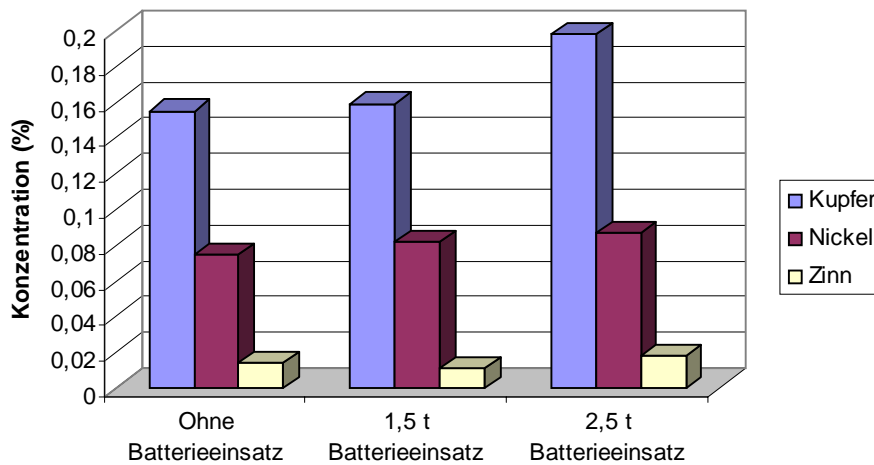


Abbildung 6-12: Kupfer-, Nickel- und Zinngehalte im Stahl bei Batterieeinsatz

Quelle: [85]

Von den untersuchten Elementen besitzt Kupfer eine besondere Bedeutung für die Qualität der erzeugten Stähle. Es verbessert die Witterungsbeständigkeit von Baustählen besonders in Kombination mit Phosphor. Die Rostneigung wird durch Kupfer vermindert und die Säurelöslichkeit herabgesetzt. Stähle, die erhöhte Witterungsbeständigkeit aufweisen müssen, werden daher mit bis zu 0,35 % Kupfer erschmolzen. Da Kupfer jedoch zu Oberflächenfehlern bei der Warmformgebung führt, ist es für die meisten Stahlsorten ein Schadelement [56]. So sind für Betonstähle Gehalte von bis zu 0,4 % Cu im Stahl zulässig, während bei Feinblechen ein Gehalt unter 0,04 % Cu gefordert ist [126]. Demnach wäre für Stähle, die zu Feinblechen verarbeitet werden sollen, der Einsatz von Batterien nur bedingt möglich. Im Schrott, der sowohl bei der Stahlherstellung auf der konventionellen Route als auch insbesondere bei der Elektrostahlerzeugung ein mengenmäßig bedeutender Einsatzstoff ist, steigt der Kupfergehalt seit einigen Jahren an. Dies ist insbesondere auf den steigenden Komfort in Automobilen zurückzuführen, da die Motoren für elektrische Fensterheber, verstellbare Spiegel u.ä. erhebliche Mengen Kupfer enthalten und die Stromzuführungen fast ausschließlich aus Kupfer bestehen

[133].⁶³ Die Konzentrationen der Elemente Nickel und Zinn weisen keine problematischen Änderungen auf. Im Folgenden werden die umweltrelevanten Ergebnisse der Versuche dargestellt.

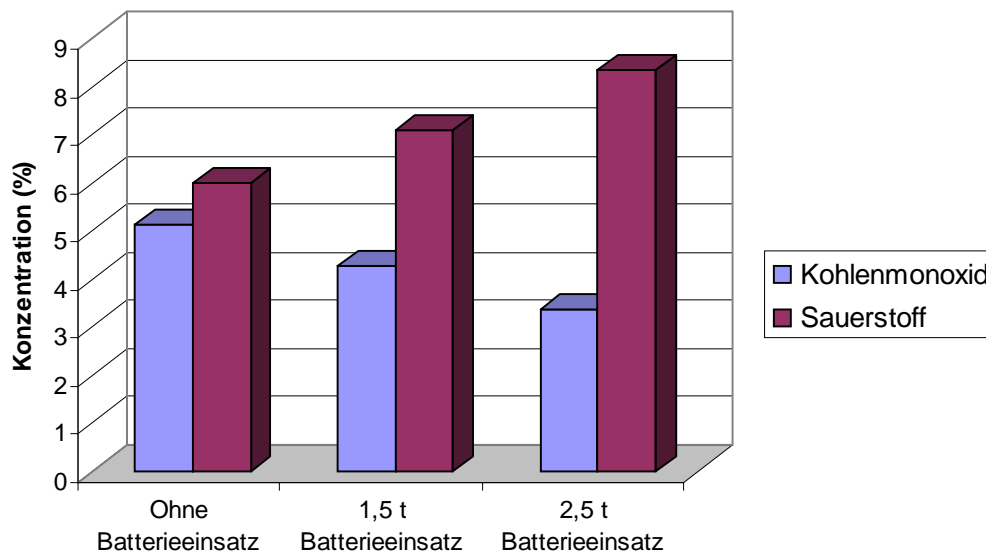


Abbildung 6-13: Veränderung der Abgaszusammensetzung des EAFs bei Batterieeinsatz

Quelle: [85]

Die Konzentration von CO im Abgas ist im Vergleich zum Betrieb ohne Batterieeinsatz rückläufig, während die von O₂ ansteigt. Da beide Konzentration voneinander abhängen und durch prozesstechnische Maßnahmen verhältnismäßig einfach gesteuert werden können, ist den in Abbildung 6-13 gezeigten Werten jedoch keine besondere Bedeutung beizumessen.

⁶³⁾ In diesem Zusammenhang ist auf die Altautoverordnung vom 4. Juli 1997 zu verweisen, die bereits explizit den Ab- bzw. Ausbau aller kupferhaltigen Teile wie Elektronik, Kabelbäume und Elektromotoren vorsieht.

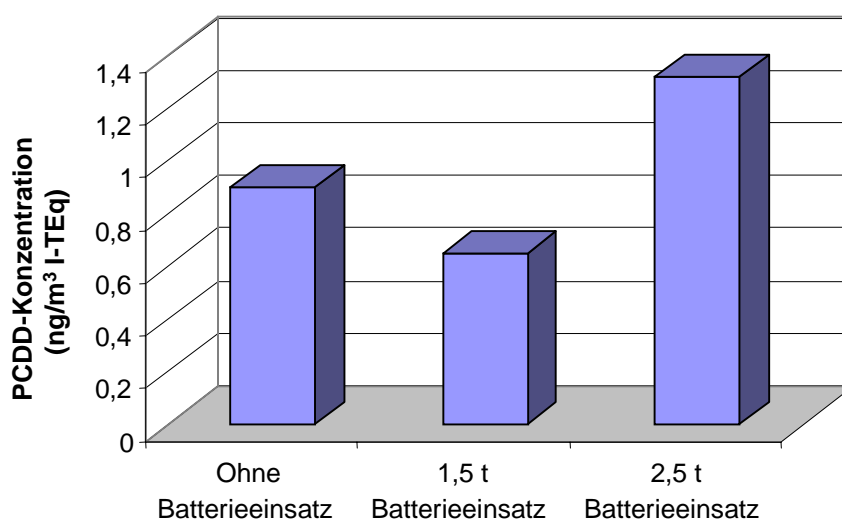


Abbildung 6-14: Dioxinwerte im EAF-Abgas bei Batterieeinsatz

Quelle: [85]

Die Änderungen der Dioxinwerte (Abbildung 6-14) im Abgas zeigen keine klare Richtung und dürften innerhalb der üblichen Schwankungsbreite liegen. Ein Zusammenhang zwischen erhöhten Dioxinkonzentrationen und dem Batterieeinsatz ist nicht erkennbar. Derzeit (2001) werden zur Erlangung der erforderlichen Genehmigungen bei ASW Sheerness weitere Versuche mit Dioxinmessungen durchgeführt, um evtl. negativen Einflüsse des Batterieeinsatzes ausschließen zu können [153]. Nach Abschluss der Erprobungsphasen des Batterieeinsatzes in den verschiedenen EAFs sowie der Genehmigungsverfahren ist damit zu rechnen, dass in den Elektrostahlwerken Batteriemengen von mehreren tausend t/a eingesetzt werden [153].

6.2.7 Weitere Verfahren

6.2.7.1 Revatech S.A., Erachem Europe

Die Firma Revatech S.A. betreibt in Lüttich, Belgien, seit 1993 einen Prozess zur mechanischen Behandlung von verbrauchten Batterien. Die Kapazität wird auf 3.000 - 4.000 t Batterien je Jahr beziffert. Zunächst (bis 1997) wurden nur die metallischen Bestandteile, die rund ein Viertel der Gesamtmasse der eingesetzten Batterien ausmachten, verwertet. Seit 1998 wird die bei der mechanischen Behandlung abtrennbare Kunststofffraktion durch den Einsatz in Zementwerken als Energieträger genutzt. Die seit 1998 bestehende Zusammenarbeit mit Erachem Europe ermöglicht mittlerweile auch die stoffliche Verwertung des in den verbrauchten Batterien

Verfahren/Unternehmen zur Verwertung verbrauchter Batterien

enthaltenen Zink und Mangans bzw. ihrer Verbindungen [307]. Eine Übersicht über den Gesamtprozess wird in Abbildung 6-15 gegeben.

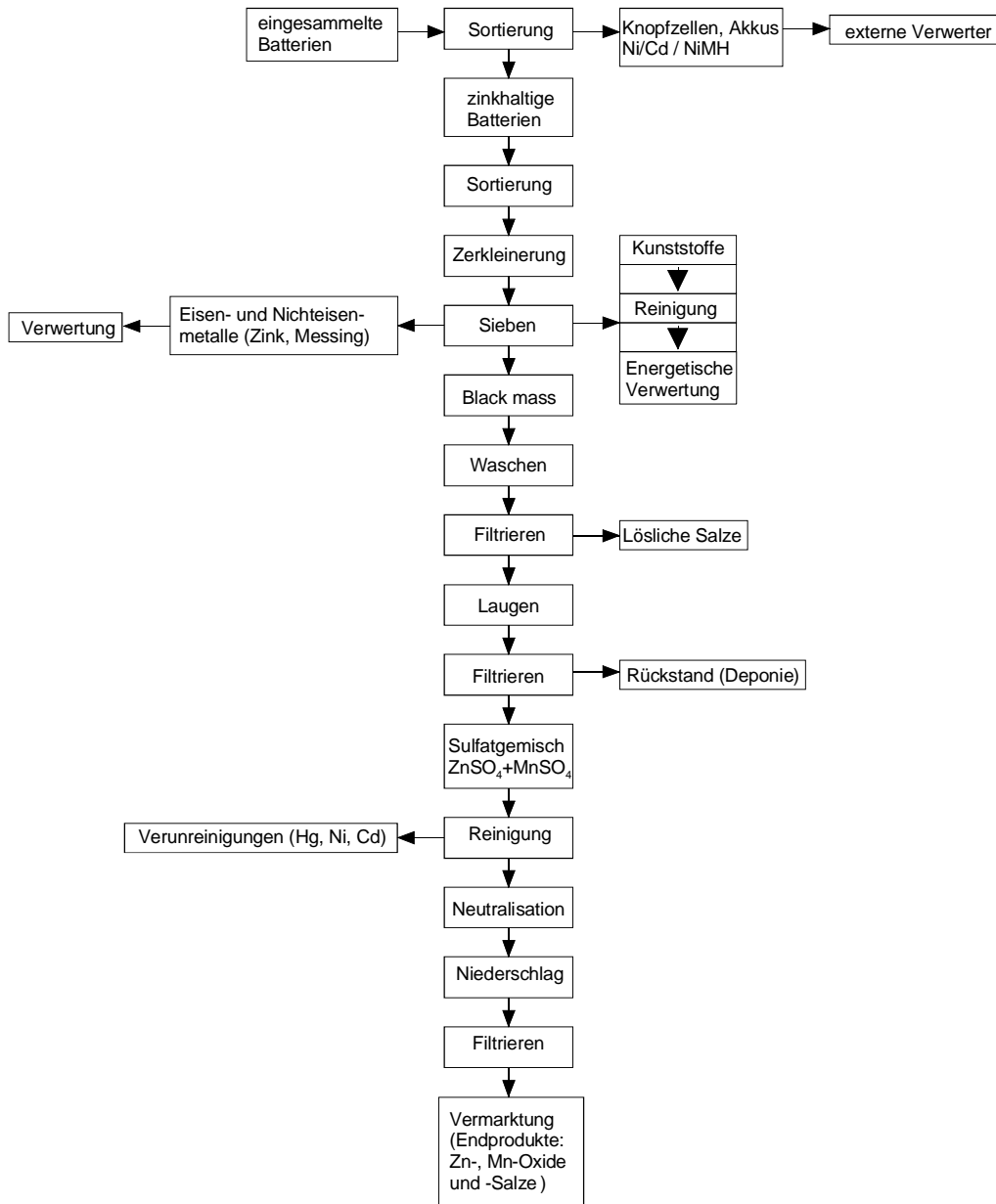


Abbildung 6-15: Schematische Darstellung des Revatech-Prozesses

Quelle: (in Anlehnung an [28])

Die angelieferten Batteriegemische werden demnach zunächst sortiert, wobei Knopfzellen sowie alle Batterien und Akkumulatoren mit Ausnahme der primären Alkali/Mangan- und Zink/Kohle-Batterien entfernt und an spezialisierte Verwerter weitergeleitet werden. Die zinkhaltigen Batterien werden mechanisch zerkleinert und in die drei Fraktionen Metalle

(Stahl, NE-Metalle (Zink)), Kunststoff und sogenannte „Schwarze Masse“ (black mass) getrennt. Die metallische Fraktion wird dem Schrotthandel zugeführt und die Kunststofffraktion in Zementwerken energetisch verwertet. Die verbleibende schwarze Masse, die gut 60 Gew.-% des Einsatzgewichtes ausmacht und im Wesentlichen aus Zink, Mangan und Kohlenstoff bzw. Verbindungen dieser Elemente besteht, wird im Anschluss bei Erachem einer bei niedrigen Temperaturen durchgeführten hydrometallurgischen Behandlung unterzogen. Dabei werden zunächst Elektrolytreste durch eine alkalische Wäsche entfernt. Anschließend wird eine Filtration vorgenommen, durch die in der alkalischen Umgebung lösliche Salze entfernt werden. In einer reduzierenden Laugung mit Schwefelsäure und einer Reihe weiterer Reagenzien werden die Zink- und Manganverbindungen reduziert und in lösliches Zink- bzw. Mangansulfat umgewandelt. Der Laugungsrückstand, der rund 25 Gew.-% der eingesetzten Batteriemasse entspricht, wird verfestigt und deponiert. Dadurch wird der ansonsten qualitativ und quantitativ hohe Grad der Verwertung etwas geschmälert. Der Rückstand besteht zum Großteil aus Kohlenstoff, jedoch dürften insbesondere die möglichen Quecksilber- und Cadmiumgehalte eine direkte Nutzung etwa als Energieträger verhindern. Aus der Lauge werden anschließend Verunreinigungen durch Ausfällen und Filtration entfernt. Verunreinigungen wie Quecksilber (250 - 500 ppm), Cadmium, Nickel u.a. gelangen mit der schwarzen Masse in den Prozess. Die Zn- und Mn-Sulfatlauge wird weiteren Prozessstufen unterzogen, in denen die am Markt absetzbaren Produkte (Salze, Oxide) aus ihnen gewonnen werden [307]. Der Prozess kann trotz der schwankenden Zusammensetzung der eingesetzten Batteriemasse sehr konstant betrieben werden, da durch die Mischung mit Lauge aus Manganerz, dem ursprünglichen Einsatzmaterial des Prozesses, die Konzentrationen von Mangan und Zink in die erforderlichen Verhältnisse gebracht werden können [306].

Im Verlaufe der Diskussionen im Rahmen des „International Battery Recycling Congress“ 1999 in Deauville, bei dem das Verfahren vorgestellt wurde, wurden Zweifel an der Umweltverträglichkeit einer mechanischen Zerkleinerung z.T. quecksilberhaltiger Batterien in einer Anlage ohne geeignete Absaug- und Filtereinrichtungen geäußert, da durch die auftretenden hohen Temperaturen beim Schreddern mit einem Verdampfen von Teilen des enthaltenen Quecksilbers zu rechnen ist. Informationen über Betriebserfahrungen wie Verwertungsergebnisse oder Emissionswerte konnten im Verlaufe dieses Vorhabens nicht recherchiert werden.

Die nasschemische Weiterverarbeitung bei Erachem ist mittlerweile im praktischen Einsatz erprobt, wenngleich trotz der Anlieferung der in Belgien anfallenden passenden Altbatteriefraktionen die Kapazität der Anlage

zur Verwertung von Batterien nicht ausgelastet ist. Bei entsprechendem Bedarf beträgt diese deutlich über 3.500 t/a [305]. Die Prozesskosten im nasschemischen Teil liegen, natürlich in Abhängigkeit der eingesetzten Gesamtmenge an Batterien, im Bereich des 3-5-fachen der Kosten einer Sondermülldeponie (etwa 200 DM/t für die genannten Batteriesysteme) in Deutschland. Neben der Zusammenarbeit mit Revatech kooperiert Erachem Europe mit weiteren Unternehmen, die die Sortierung und den mechanischen Behandlungsteil übernehmen.

6.2.7.2 CHEMTEC, DMA

Die erste Batterierecyclinganlage⁶⁴ Österreichs steht seit 1998 auf dem Gelände der Entsorgungsbetriebe Simmering (EBS). Sie wurde im April 2000 nach eineinhalbjährigem Probebetrieb regulär zur Verwertung von Zink/Kohle- und Alkali/Mangan-Batterien in Betrieb genommen. Auch können Zink/Luft und Lithiumbatterien eingesetzt werden. Die Kapazität der Anlage beträgt rund 3.000 t dieser Batterien je Jahr. Kernstück der Recyclinganlage ist ein 7 m langes Drehrohr mit einem Durchmesser von rund 0,9 m, in dem bei 600 - 700 °C Schadstoffe, im Wesentlichen Quecksilber und z.T. Cadmium⁶⁵, über die Gasphase aus den Batterien entfernt werden. Der ausgeglühte Rückstand, der vor allem aus Mangan, Zink und Eisen besteht, wird zerkleinert, getrennt und einer weiteren Verwertung zugeführt. Dabei werde das Zink zu einer Zinkhütte in Deutschland und der Eisen/Manganschrott bei VAS in Linz zur Stahlerzeugung eingesetzt. Die Graphitstifte der Batterien können in der Buntmetallerzeugung als Reduktionsmittel eingesetzt werden. Das mit den Schadstoffen beladene Prozessgas wird nachverbrannt und die gasförmigen Schwermetalle werden aus dem Gasstrom heraus kondensiert. Zur weiteren Abgasreinigung werden die Anlagen der EBS mitbenutzt, die dem Standard für Sonderabfallverbrennungsanlagen entsprechen. Die EBS betreibt die einzige Sonderabfallverbrennungsanlage Österreichs und verfügt am Standort über zwei Drehrohröfen sowie drei Wirbelschichtöfen, die vorrangig zur Verbrennung aufbereiteten Klärschlammes dienen. In die Batterierecyclinganlage wurden rund 32 Mio. ATS (~ 2,33 Mio. €) investiert; die Verwertung der Batterien wird mit rund 12.000 ATS (rund 875 €) je Tonne in Rechnung gestellt. [77], [71], [172], [292], [46].

⁶⁴) Die Anlage wird DMA, Demercurisationsanlage, genannt [172].

⁶⁵) Die in Österreich gesammelten Batterien werden durch die Firma Rumpold, Trofaich, manuell sortiert [298]. Nicht heraussortierte Ni/Cd-Gerätebatterien führen zu einem Cadmiumeintrag in die Batterieverwertungsanlage.

6.2.7.3 ABRG, Dörschelofenanlage

In Zusammenarbeit mit der Europäischen Union wurde durch die Asamer-Becker Recycling GmbH, Arnoldstein, Österreich, ein Konzept für die Verwertung von sogenannten Konsumbatterien (s.u.) entwickelt. Die Entwicklung erfolgte unter Einbeziehung der in Arnoldstein bestehenden Anlagenstruktur, die zwei Dörschel-Drehrohröfen, einen Wirbelschichtofen, eine chemisch-physikalische Abwasserreinigungsanlage und eine Standortdeponie sowie die zugehörigen Zusatzeinrichtungen umfasst. Projektiert ist derzeit eine Batterierecyclinganlage mit Hg-Rückgewinnung sowie hydrometallurgischen Verfahrensstufen. Eine Übersicht über die geplante, in der Genehmigungsphase (Stand 4/2000) befindliche Anlage wird in Abbildung 6-16 und Abbildung 6-17 gegeben [15].

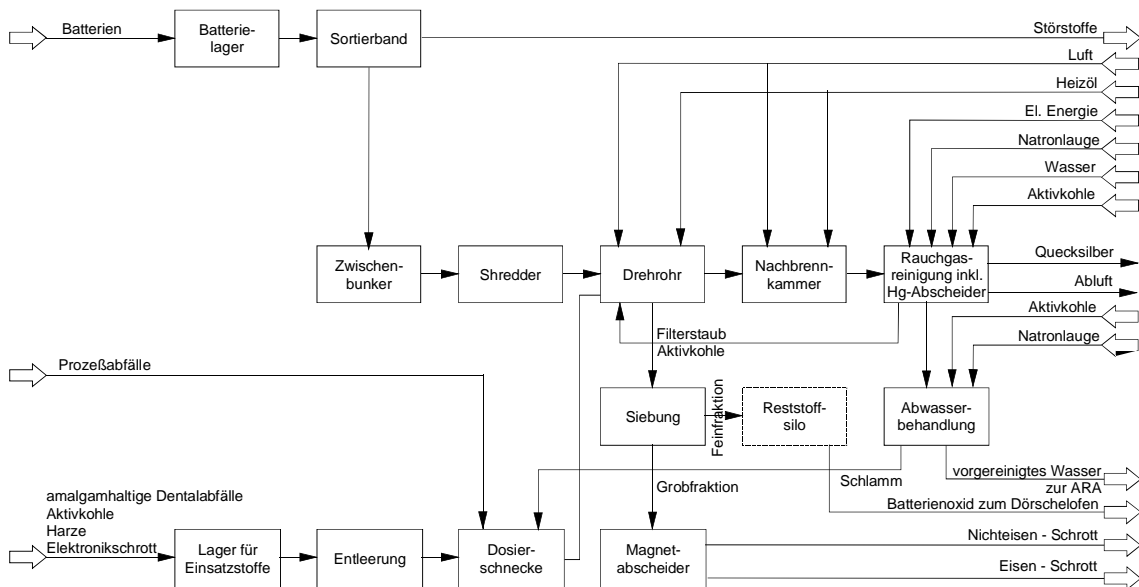


Abbildung 6-16: Grundfließbild Batterierecyclinganlage der ABRG

Quelle: [14]

In der Anlage sollen verbrauchte Zink/Kohle- und Alkali/Mangan-Batterien verwertet werden, unabhängig von ihrem Quecksilbergehalt. Sie werden zunächst zerkleinert in einem Drehrohr thermisch behandelt. Das Rauchgas, mit dem Quecksilber und weitere Schadstoffe wie Cadmium ausgetragen werden, wird mehrstufig gereinigt. Zunächst durchläuft es eine saure und alkalische Wäsche, dann eine Kondensationsstufe, Entquicksungsreaktor und schließlich einen Aktivkohlefilter. Dabei werden Schadstoffe wie HCl und SO₂ ausgewaschen und Quecksilber in elementarer Form als verkaufsfähiges Produkt wiedergewonnen. Der Rückstand des Drehrohrprozesses wird durch Siebung und Magnetscheidung in die

Fraktionen Eisenschrott, Buntmetallschrott und Batterieoxid getrennt. Eisen- und Buntmetallschrott sind Verkaufsprodukte, die zur weiteren Verwertung an entsprechende Unternehmen verkauft werden. Das verbleibende Batterieoxid mit einem Zinkgehalt von über 30 % in der Dörschelofenanlage weiterverarbeitet. Das Prozesswasser der Gaswäsche wird mit Aktivkohle behandelt, filtriert und der Abwasserreinigungsanlage zugeführt. Die abfiltrierte, quecksilberbelastete Aktivkohle wird dem Einsatzmaterial zugemischt [15], [16].

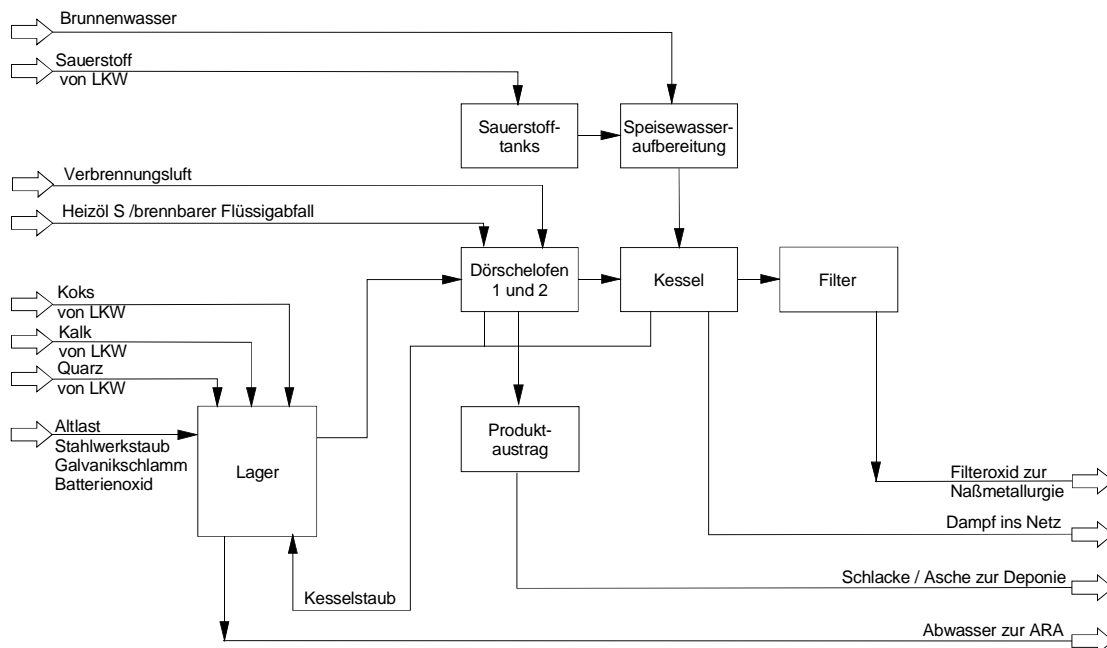


Abbildung 6-17: Grundfließbild Dörschelofenanlage der ABRG

Quelle: [14]

In der Dörschelofenanlage (vgl. Abbildung 6-17) werden Schwermetalle durch Hochtemperaturredoxreaktionen aus Abfallstoffen wie Galvanikschlämmen oder Stahlwerkstäuben rückgewonnen. Hier wird das dem Drehrohr stammende Batterieoxid weiterverarbeitet. Zinkoxide werden reduziert und metallische Zink verdampft, ebenso die in geringeren Mengen enthaltenen Elemente Blei und Cadmium. Die im Ofen zurückbleibende Schlacke wird in ein Wasserbad abgestochen und bildet dort ein glasartiges Granulat, das auf der firmeneigenen Deponie eingelagert oder im Straßenbau eingesetzt werden kann. Das verdampfte Zink oxidiert in der Gasphase und wird mit dem Abgasstrom aus dem Ofen ausgetragen. Das Metalloxid wird in einer Schlauchfilteranlage abgeschieden und nassmetallurgisch weiterverarbeitet. In der Nassmetallurgie werden aus den oxidischen (Filter-)Rückständen der Dörschelofenanlage verkaufsfähige

higen Produkte isoliert. Die hier nicht weiter dargestellte Technologie beruht auf der Lösung der Oxide in Schwefelsäure und nachfolgenden Trennschritten durch Fällungs-, Zementations-, Filtrations- und Elektrolyseprozesse. Produkte sind schließlich metallisches Zink und Cadmium sowie Blei, Kupfer, Nickel, Kobalt und Germanium in Form von Konzentraten, die in geeigneten Hütten weiterbearbeitet werden [15], [16].

6.3 Verfahren/Unternehmen zur Verwertung von Batteriemischungen

In Deutschland wird derzeit kein Verfahren zur Verwertung unsortierter Batterien betrieben. Auch im Ausland sind fast ausschließlich auf bestimmte Batteriesysteme spezialisierte Verwertungsverfahren im Einsatz. Eine Ausnahme ist der Oxyreducer-Prozess der schweizerischen CITRON SA, der in Frankreich betrieben wird, wobei strenggenommen auch hier keine Verwertung von Mischungen aus Batterien völlig verschiedener chemischer Systeme durchgeführt wird, sondern auch ein kampagnenweiser Einsatz bevorzugt wird, da so bessere Produktqualitäten und eine weitergehende Verwertung erzielt werden kann.

6.3.1 CITRON SA, Oxyreducer-Prozess

Die CITRON⁶⁶ SA wurde 1991 gegründet und wird seit 1997 an der Schweizer Börse notiert. Hauptanteilseigner sind Schweizer Banken und Versicherungen. Das Unternehmen entwickelte einen Prozess zur Verarbeitung schwermetallhaltiger Abfallstoffe, der zunächst von April 1998 an in Rogerville nahe Le Havre in einer Pilot-Anlage erprobt (Kapazität ~1.000 t/a) und seit September 1999 am gleichen Standort im industriellen Maßstab betrieben wird (Startkapazität ~23.000 t/a).⁶⁷ Die Anlage ist nicht ausschließlich für die Verwertung verbrauchter Batterien konzipiert, sondern auch für weitere Abfallstoffe geeignet, wie etwa Katalysatoren, Au-

⁶⁶) CITRON als Firmenname steht als Abkürzung für „Centre International de Traitement et de Recyclage des Ordures Nocives“, sinngemäß etwa: „Internationales Zentrum für die Behandlung und Wiederverwertung von Sondermüll“.

⁶⁷) Inzwischen ist eine Ausweitung der Kapazität auf 130.000 t/a erfolgt [117]. Die Kapazität des Verfahrens ist von den Einsatzmaterialien abhängig, wobei mit verbrauchten Batterien besonders hohe mögliche Verwertungsmengen erreicht werden können. Bislang besteht eine Betriebsgenehmigung nur für 23.000 t; die Ausweitung der Genehmigung wird derzeit (Stand 6/2000) geprüft [55].

tomobilschredderrückstände, Schleifschlämme und schwermetallbelastete organische Stoffe [42]. Von den rund 66 Mio. DM, die in die Anlage investiert wurden, entfielen rund 30 Mio. DM auf die Bereiche Abgas- und Abwasserreinigung [117]. Eine schematische Darstellung des Oxyreducer genannten Prozesses ist in Abbildung 6-18 dargestellt.

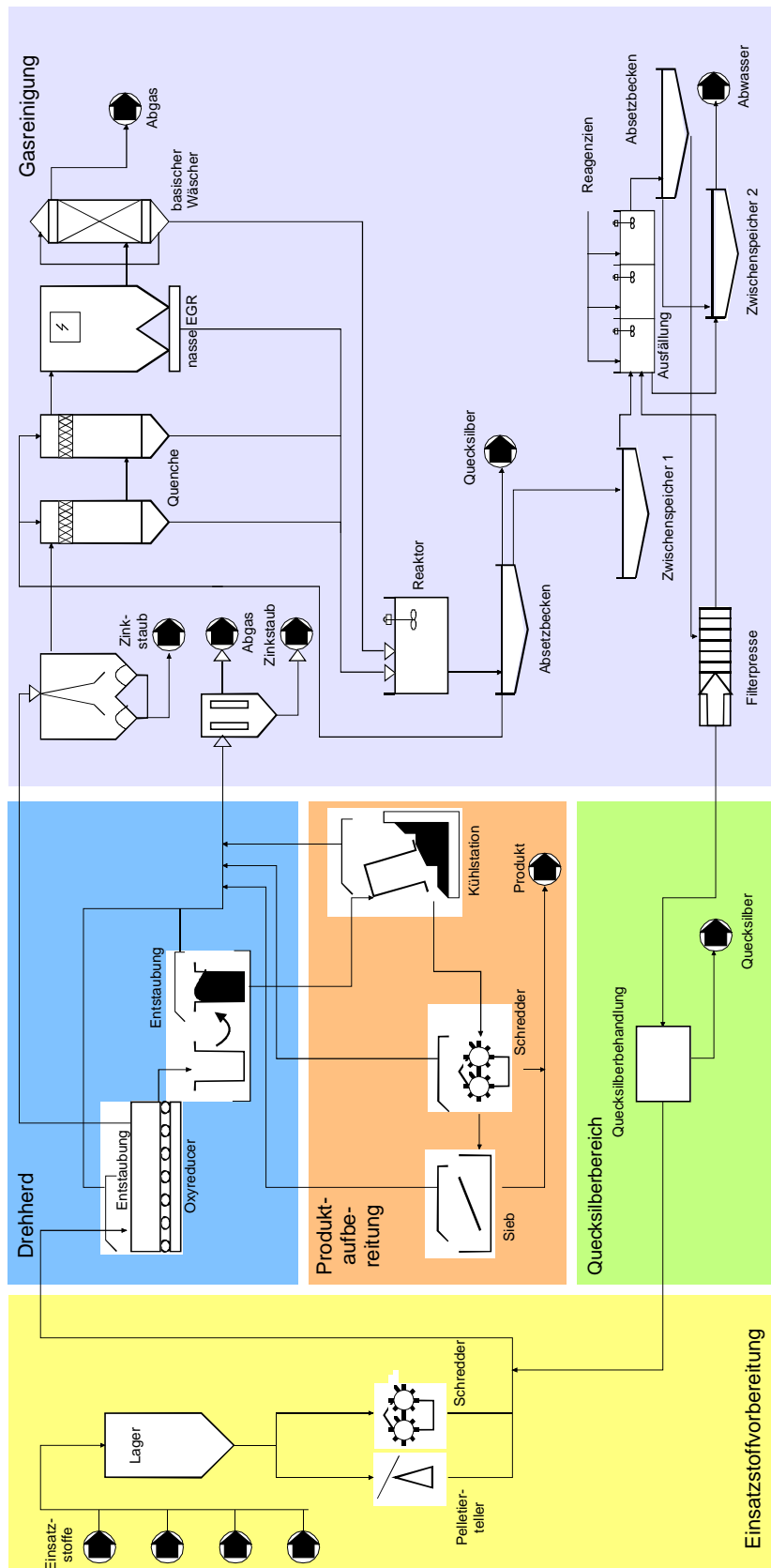


Abbildung 6-18: Schematische Darstellung des Oxyreducer-Prozesses

Quelle: [42]

Eine Besonderheit des Verfahrens ist, dass Batteriegemische ohne vorhergehende Sortierung in den Prozess eingesetzt werden können, wenn gleich die Zusammenfassung von in ihrer chemischen Zusammensetzung ähnlichen Einsatzstoffen zu einzelnen Chargen bzw. Kampagnen zur Erzielung guter Produktqualitäten erforderlich ist. Blei- und cadmiumhaltige Batterien werden so gut wie möglich aus den eingesetzten Gemischen entfernt und spezialisierten Verwertern zugeleitet, wobei letztgenannte Batterien durch Inmetco (vgl. 6.4.4) verwertet werden [55]. Kernaggregat des Prozesses ist ein Drehherdofen, dessen Aufbau weitgehend dem von Inmetco betriebenen ähnelt (vgl. 6.4.4) und der mit einer Lizenz des amerikanischen Unternehmens gebaut wurde [12]. Ziel des Prozesses, der im Folgenden näher beschrieben wird, ist es, aus den sekundären Einsatzstoffen Produkte zu erzeugen, die als Metallkonzentrate⁶⁸ in Hüttenwerken eingesetzt werden sollen.

Prinzipiell durchläuft das Einsatzmaterial folgende Prozessstufen [12], [42], [339]:

- Die Einsatzstoffe werden zunächst ggf. in eine Form gebracht, die den mechanischen Erfordernissen der Anlage genügt. Dies kann durch Pelletieren, Schreddern, Brechen oder Trocknen geschehen. Ferner werden in diesem Schritt ähnliche Abfallgruppen zusammengemischt sowie bei den meisten Einsatzstoffen Kohle als Reduktionsmittel sowie gebrannter Kalk hinzugefügt.
- Die vorbereiteten Einsatzstoffe werden in einer dünnen Schicht auf den Drehherd⁶⁹ chargiert und dort durch 18 Brenner, die das Einstellen von auf die Abfälle abgestimmten Temperaturen und Gaszusammensetzungen ermöglichen, auf bis zu max. 1.400 °C erhitzt. Organische Substanzen werden dadurch pyrolysiert und im weiteren Prozessverlauf im Gasraum oberhalb der Schicht verbrannt. Die Aufgabemischung und das Prozessgas werden im Gleichstrom geführt. Im Gasraum wird von der Chargieröffnung hin zum Produktabzug die Verbrennungsluftzufuhr durch die über den gesamten Umfang verteilten Brenner erhöht, so dass zu Beginn reduzierende, zum Ende oxidierende Bedin-

⁶⁸⁾ Da die primären Rohstoffe der Metallgewinnung (Erze) in der Regel nur sehr geringe Metallkonzentrationen aufweisen, werden sie meist vor ihrem Transport zu den Hüttenwerken aufbereitet. Die Aufbereitungsprodukte werden Konzentrate genannt.

⁶⁹⁾ Der bei CITRON gebaute Drehherd weist einen Durchmesser von 19 m und eine Breite von 5 m auf.

gungen herrschen. Die durch zugefügten Kohlenstoff und die organischen Bestandteile reduzierenden Bedingungen in der Schicht führen zur Reduktion der eingebrachten Metalloxide bzw. -hydroxide. Metalle bzw. Verbindungen mit niedrigen Siedepunkten, insbesondere Zink, Cadmium, Blei und Quecksilber verdampfen und werden mit Ausnahme des Quecksilbers im Gasstrom vor Verlassen des Drehherds oxidiert. Ein Großteil der Salze wird ebenfalls mit dem Gasstrom ausgetragen.

- Die Metalloxide verlassen den Drehherd als feine Feststoffpartikel und werden bei rund 1.100 °C in einem neuartigen Aggregat („Gravity Chamber“) aus dem Gasstrom abgeschieden und als verkaufsfähiges Produkt aus dem Prozess ausgeschleust.⁷⁰ Die hohe Temperatur in dieser Stufe gewährleistet, dass die ausgeschleusten Oxide nicht durch Salze oder Quecksilber verunreinigt werden.
- In der ersten Stufe der folgenden mehrstufigen nassen Gaswäsche (zwei Quenchen, ein nasser elektrostatischer Abscheider und ein basischer Wäscher) wird der Großteil des Quecksilbers kondensiert und abgezogen. Der verbleibende Quecksilberanteil wird zusammen mit weiteren Komponenten in den weiteren Stufen abgeschieden und nach einer chemischen Vorbehandlung in einem Destillationsofen zur Gewinnung hochreinen Quecksilbers weiterbehandelt (vgl. Abbildung 6-18). Die Destillationsrückstände werden in den Drehherd zurückgeführt. Die in der Gaswäsche aus dem Abgasstrom getrennten Salze (im Wesentlichen NaCl und KCl) verlassen die Anlage mit dem gereinigten Abwasser.
- Das feste Produkt des Drehherds wird zunächst in gekühlte Behälter chargiert, um eine Reoxidation der reduzierten Metalle zu vermeiden. In Abhängigkeit der ursprünglichen Einsatzmaterialien werden dann unterschiedliche Aufbereitungstechniken wie Schredder, Siebe, Magnet- und Wirbelstromabscheider etc eingesetzt, um weitere marktfähige Fraktionen zu isolieren. So kann etwa bei einer Nickelmetallhydrid-Kampagne ein Produkt (Ni-Co-Konzentrat) erzeugt werden, das als Legierungsmittel in der Edelstahlindustrie Einsatz finden kann, oder bei Zn/C- und Al/Mn-Batterieeinsatz Manganoxidpulver und Eisenschrott.

⁷⁰⁾ Hauptbestandteil ist Zinkoxid, so dass der Staub als Einsatzstoff zur Zinkerzeugung genutzt werden kann (vgl. auch Tabelle 6-18).

In Abbildung 6-19 sind die bei in Kampagnen eingesetzten Batterien erzielbaren Produkte dargestellt.

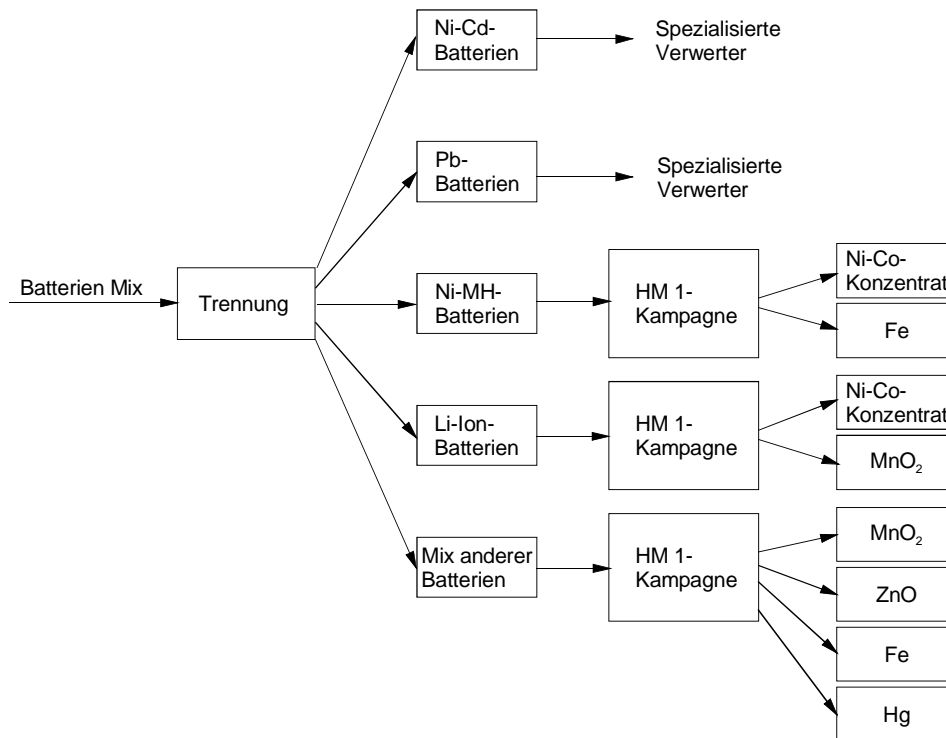


Abbildung 6-19: Recyclingprodukte bei kampagnenweiser Beschickung

Quelle: [42]

Die für den Prozess erforderliche Energie wird zum Großteil durch die über den Umfang des Drehherds verteilt angebrachten Brenner eingebracht. Zu einem Teil trägt auch die als Reduktionsmittel in die Aufgabemischung eingebrachte Kohle zum Energieeintrag bei.

In Tabelle 6-18 sind Analysen ausgewählter Produkte des Oxyreducer-Verfahrens zusammengestellt.

Tabelle 6-18: Analyse ausgewählter Produkte⁷¹ des Batterierecyclings bei CITRON AG

Zinkoxid	Manganoxid	Quecksilber
ZnO > 90 %	Mn ₂ O ₃ > 70 %	Hg > 99,99999
Cd < 0,01 %	Fe < 3 %	
Pb < 0,02 %	Cu < 0,1 %	
Cl < 0,5 %	Cd < 0,1 %	
K < 0,3 %	Pb < 0,1 %	
Na < 0,3 %	Cl < 0,5 %	
Fe < 0,3 %	K < 0,3 %	
Mn < 1,5 %	Na < 0,3 %	
	Zn < 7 %	

Quelle: [12]

Mit dem Oxyreducer-Prozess konnten bereits 7.000 t schwermetallhaltiger Abfälle behandelt werden, ehe ein Sturm zum Jahresende 1999 die Anlage erheblich beschädigte⁷² und der Betrieb unterbrochen werden musste [48]. Die Belastung der Umwelt durch den Verwertungsprozess ist bei Einsatz von Batterien gering, da einerseits durch den möglichen Verzicht auf eine weitgehende Sortierung die Transporte von Sammelstellen zu den Sortieranlagen entfallen können, und da das umfangreiche Gasreinigungssystem Gesamtstaub und organische Substanzen im Abgasstrom auf jeweils unter 10 mg/m³ reduziert, sowie Cadmium und Quecksilber auf weniger als 0,05 mg/m³ begrenzt [325].⁷³ Dem stehen größere Transportentfernungen zu der Anlage entgegen, die insbesondere bei Anlieferungen von Batterien aus dem Ausland auf dem Landwege berücksichtigt werden müssen. Die Salzfracht des Abwassers entspricht nach Firmenangaben deutschen Genehmigungsstandards [117]. Eine Zusammenstellung von Mess- und Genehmigungswerten wird in Tabelle 6-19 gegeben.

⁷¹) Die dargestellten Ergebnisse wurden in der Pilotanlage (1.000 t/a Kapazität) erzielt, die im April 1998 in Betrieb genommen wurde [12].

⁷²) Die Sturmschäden führten u.a. dazu, dass die Produktionshalle komplett neu aufgebaut und das Lager mit einem neuen Dach bedeckt werden mussten [47].

⁷³) Die Technische Anleitung Luft von 1986 sieht für Stoffe der Klasse I wie Cadmium, Quecksilber und Thallium einen Grenzwert von (in Summe) 0,2 mg/Nm³ bzw. 1 g/h vor [7].

Tabelle 6-19: Emissionen des Oxyreducer-Prozesses in Luft und Wasser

Stoffstrom	Substanz / Messgröße	Genehmigungswerte [mg/Nm ³]	Messwert [mg/Nm ³]
Abgas ca. 23.000 m ³ /h	Staub	< 10	< 9
	CO	< 50 (11 % O ₂)	< 11
	C _{organisch}	< 10	< 4
	NO _x	< 500 (11 % O ₂)	< 199
	SO ₂	< 50	< 28
	Cl	< 10	
	F	< 1	
Abwasser ca. 15 m ³ /h	pH-Wert	5,5 - 8,5	
	Temperatur	< 30 °C	
	Feststoffe	< 30 mg/l	
	COD	< 125 mg/l	ca. 100 mg/l
	Cl	< 12.500 mg/l	
	Σ Schwermetalle	< 15 mg/l	< 10 mg/l

Quelle: [55]

In Tabelle 6-19 und Tabelle 6-20 sind weitere Emissionswerte zusammengestellt, die aus einer jüngeren Veröffentlichung stammen [267].

Tabelle 6-20: Emissionen des Oxyreducer-Prozesses in die Luft

Elemente	Konzentrationen [mg/Nm ³]	Genehmigungswerte [mg/Nm ³]
Staub	5	10
Zn	1,230	-
Cd	0,016	0,05
Pb	0,453	-
Hg	0,010	0,05
Mn	0,020	-
Ni	0,008	-
Cu	0,086	-
Sb	< 0,003	-
alle anderen Metalle	0,569	5
NO _x	97	500
SO _x	0,20	50
CO	< 6	50
HF	< 0,1	1
HCl	1,1	10
VOC	< 2	10
Dioxine und Furane	0,044 [ng/Nm ³] I-TEq	0,1 [ng/Nm ³]
Volumenstrom	20.890 [Nm ³ /h] I-TEq	26.400 [Nm ³ /h]

Quelle: [267]

Tabelle 6-21: Emissionen des Oxyreducer-Prozesses ins Wasser (Messung 11/2000)

Elemente	gemessene Konzentrationen [ppm]	Genehmi- gungswerte [ppm]
pH-Wert	8,1	5,5- 8,5
Zn	0,170	2,00
Cd	0,018	0,20
Pb	0,079	0,50
Hg	0,006	0,05
Cu	0,020	0,50
alle Schwermetalle	1,900	15
Schwebestoffe	14	30
TOC	15	40
Cl	8.700	12.500

Quelle: [267]

Neben den Emissionen in Luft und Wasser fallen bei Prozess keine weiteren Abfälle an [55]. Für die Verwertung von Haushaltsbatterien erhält die CITRON derzeit (2001) zwischen 670 und 1.228 US\$ je Tonne von den Rücknahmesystemen [29]. In der Bewertung am Ende des Kapitels wird das Oxyreducer-Verfahren mit Verfahren zur Verwertung von Alkali/Mangan-, Zink/Kohle- und Zink/Luft-Batterien verglichen, da der Einsatz eines Teils dieser in Deutschland gesammelten Fraktionen am wahrscheinlichsten erscheint. Es wird derzeit nicht damit gerechnet, dass andere Batteriefractionen aus Deutschland zur Verwertung in die französische Anlage transportiert werden.

6.3.2 Weitere Verfahren

Im industriellen Maßstab betriebene Verfahren zur Verwertung von unsortierten Batteriegemischen sind derzeit nicht bekannt. Die Verfahren zur Batterieverwertung zielen in der Regel auf hochwertige Recyclingprodukte ab, die nur bei weitgehend homogenen Einsatzmaterialien zu erreichen sind. Unterschiede bestehen zwischen den Verfahren im Wesentlichen im Grad der Robustheit der Prozesse gegen Verunreinigungen der gewünschten Batteriefractionen mit anderen, bei der Sortierung nicht vollständig entfernten unerwünschten Batteriefractionen.

6.4 Verfahren/Unternehmen zur Verwertung von Nickel/Cadmium-Akkumulatoren

Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten steht bei der Verwertung von Nickel/Cadmium-Akkumulatoren zunehmend die Rückgewinnung des Nickels⁷⁴ im Vordergrund. Dies ist auf die hohen Preise für Nickel (vgl. Abbildung 7-7) und den Verfall der Cadmiumpreise (vgl. Abbildung 7-2) zurückzuführen. Die durch den aus Gerätebatterien zurückgewonnenen Metallinhalt erzielbaren Erlöse sind jedoch - wie bei den anderen chemischen Systemen, evtl. mit Ausnahme silberhaltiger Batterien, auch - nicht ausreichend, um die Kosten für die erforderlichen Sammelsysteme zu decken, so dass Verfahren zur Verwertung von Ni/Cd-Gerätebatterien erst in jüngerer Zeit entwickelt wurden. Für Industriebatterien konnten sich aufgrund der erheblich geringeren Rücknahmekosten bereits seit langem Verfahren wie etwa das von SAFT (vgl. Abschnitt 6.4.3) etablieren. Auch werden inzwischen Verfahren, die zur Behandlung von Abfällen (insbesondere Stäube) aus der Edelstahlindustrie entwickelt worden sind, zur Verwertung nickelhaltiger Batterien eingesetzt, wie das Inmetco-Verfahren (vgl. Abschnitt 6.4.4). In Deutschland wird durch die ACCUREC GmbH eine speziell zur Verwertung von Ni/Cd-Batterien entwickelte Anlage betrieben, die im Folgenden beschrieben wird.

Generell werden von Seiten der Industrie die Verwertungskosten für Nickel/Cadmium-Akkumulatoren als rund 130 €/t höher angesetzt, als die durch die Verwertungsprodukte (Nickel- und Cadmiumprodukt zu erzielenden Erlöse. Diese Kosten machen umgerechnet auf die Verkaufspreise weniger als 1 % aus [50].

6.4.1 ACCUREC GmbH / RVD-Verfahren

Die ACCUREC GmbH, Mülheim a. d. Ruhr, wurde 1995 mit dem Ziel gegründet, ein Verfahren zum Recycling verbrauchter Nickel/Cadmium-Akkumulatoren zu entwickeln und industriell zu betreiben. Ferner sollte auch die Rückgewinnung der Wertstoffe aus Nickelmetallhydrid- und Lithium-Batterien ermöglicht werden. Das Unternehmen nahm 1997 nach

⁷⁴⁾ Produkt der Verfahren ist i. d. R. nicht reines Nickel sondern ein Nickel-Eisen-Gemisch, dessen weitere Auftrennung zwar möglich wäre, jedoch technisch unnötig und nicht wirtschaftlich ist, da der Großteil des Nickels in der Stahlherstellung Verwendung findet.

einer zweijährigen Entwicklungs- und Installationsphase eine Pilotanlage mit einer Kapazität von 500 t/a in Betrieb. Die Kapazität wurde 1998 auf rund 1.100 t Ni/Cd- und NiMH-Batterien erweitert. Inzwischen ist eine abermalige Erweiterung der Anlage und eine Ausweitung der Betriebsgenehmigung auf 2.500 t/a Ni/Cd-, NiMH- und Lithiumbatterien erfolgt [334]. Eingesetzt wird das sogenannte RVD⁷⁵-Verfahren, das seit einiger Zeit in Zusammenarbeit mit der ALD Vacuum Technologies GmbH⁷⁶ weiterentwickelt wird. Auf dem RVD-Verfahrensprinzip beruhende Anlagen werden in Deutschland auch zur Behandlung quecksilberhaltiger Batterien und anderer Abfälle (vgl. Abschnitt 6.6.1 und 6.6.2) eingesetzt sowie in Japan zur Behandlung PCB-belasteter Transformatoren herangezogen [334]. Haupteinsatzstoffe der ACCUREC sind derzeit Ni/Cd-Industrie- und Gerätebatterien, wobei 2/3 der eingesetzten Masse auf Großakkumulatoren und 1/3 auf Gerätebatterien entfallen [334]. Cadmiumbelastete Produktionsabfälle aus der Akkumulatorenfertigung können ebenfalls eingesetzt werden. Die prinzipiellen Betriebsabläufe bei der Verwertung der Großakkumulatoren und Gerätebatterien sind in den beiden folgenden Abbildungen dargestellt. Der Ablauf bei der Verwertung von NiMH-Batterien ist bislang im Wesentlichen mit der von Ni/Cd-Batterien identisch; bei NiMH-Batterien wird jedoch derzeit anstelle der Cadmiumdestillation eine Entfernung des Wasserstoffs vorgenommen, da dieser eine weitere Verwertung in der Edeltahlerzeugung behindern würde.

⁷⁵) RVD: „Recycling durch Vakuumdestillation“.

⁷⁶) Die Firma ALD nennt die Verfahrensgruppe auch VTR-Verfahren (Vakuum-Thermisches Recycling) [175]. ALD ist seit 1998 zu 60 % an der ACCUREC GmbH beteiligt [5].

Verfahren/Unternehmen zur Verwertung verbrauchter Batterien

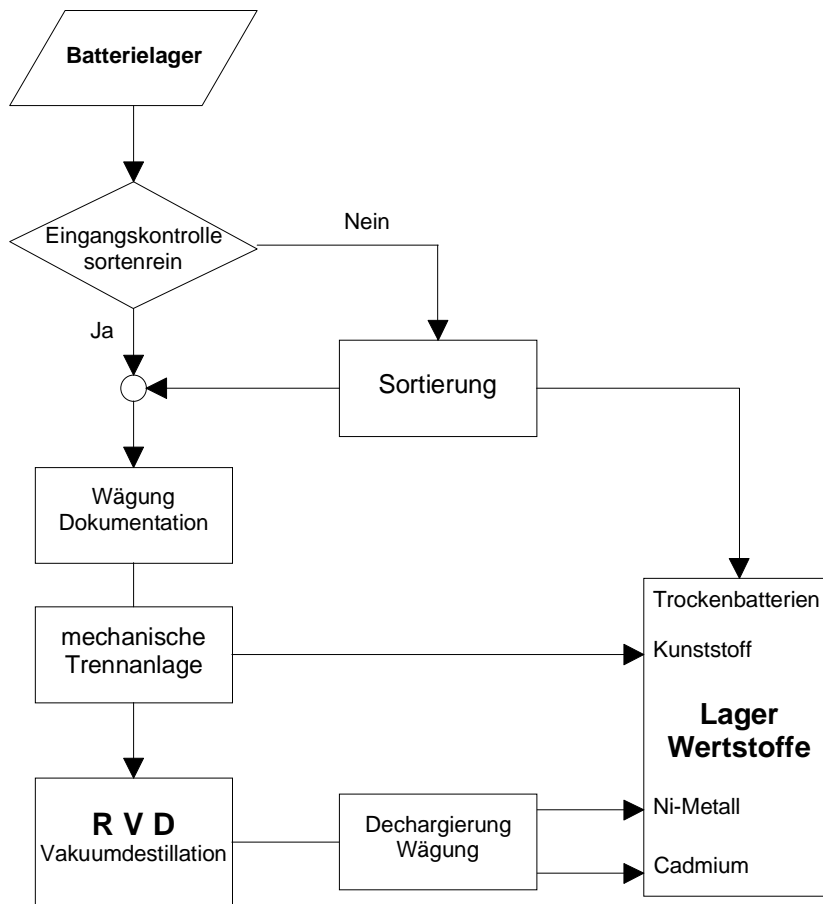


Abbildung 6-20: Betriebsablauf bei der Verwertung von Gerätebatterien bei der ACCUREC

Quelle: [2]

Bei der Verwertung von Ni/Cd-Gerätebatterien wird nach einer Eingangskontrolle und einer ggf. erforderlichen Nachsortierung zunächst das Material exakt verwogen. Der Kunststoffmantel von Batteriepacks⁷⁷ wird mechanisch vor ihrem Einsatz abgetrennt, während Einzelzellen direkt in den Ofen chargiert werden können. Nach der im Folgenden beschriebenen Vakuumdestillation werden die Fraktionen Cadmium und Nickel-Eisen-Schrott (in Abbildung 6-20 Ni-Metall genannt) aus dem Ofengefäß bzw. dem Kondensator (vgl. Abbildung 6-22) entnommen.

⁷⁷⁾ Batteriepacks bzw. „Battery packs“ sind mehrere zusammenschaltete, mit einem Kunststoffmantel umhüllte Einzelbatterien. Sie finden insbesondere in Elektrowerkzeugen wie Akkuschaubern etc. Verwendung.

Mit der anschließenden Verwiegung und der Zusammenführung der Verwertungsdaten in einer Dokumentation ist der Verwertungsablauf abgeschlossen. Die eingesetzte Charge wird solange im Ofen behandelt, bis sichergestellt ist, dass der Nickel-Eisen-Schrott die für seinen Einsatz in der Stahlherstellung erforderliche Qualität aufweist. Insbesondere der Restcadmiumgehalt muss beachtet werden, da zu hohe Cd-Werte den Einsatz in der Eisen- und Stahlindustrie verhindern würden. Die bei der ACCUREC betriebene Anlage erreicht mit der üblichen Betriebspraxis Restcadmiumgehalte zwischen 5 und 300 ppm und damit eine hohe Produktqualität [2].

Industrieakkumulatoren werden zunächst manuell vordemontiert und der Elektrolyt wird entfernt. Mit Hilfe von halbautomatischen Maschinen wird anschließend die mechanische Zerlegung durchgeführt (vgl. Abbildung 6-21). Nach einer Sortierung werden die cadmiumhaltigen Bestandteile in einem offenen Stahlgefäß in den Ofen chargiert und die Vakuumdestillation durchgeführt. Produktionsabfälle werden je nach Material vorsortiert, getrocknet und kompaktiert, um eine möglichst hohe Raum-Zeit-Ausnutzung des Ofens zu erreichen.

Verfahren/Unternehmen zur Verwertung verbrauchter Batterien

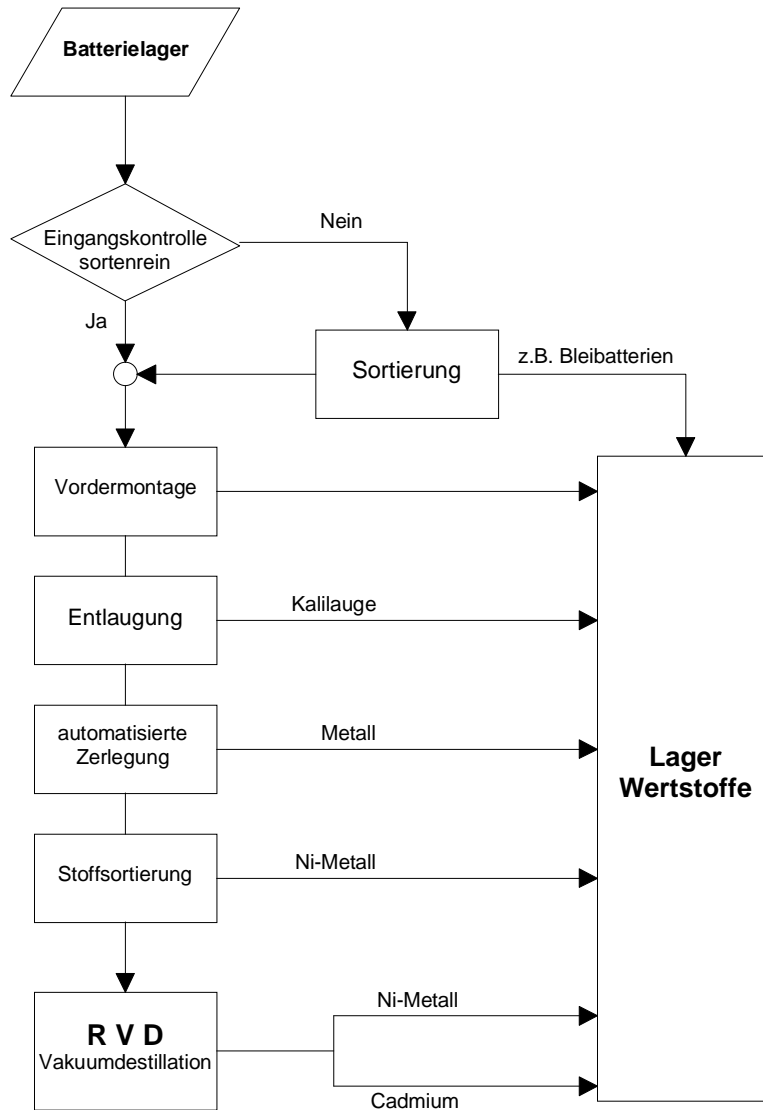


Abbildung 6-21: Betriebsablauf bei der Verwertung von Großakkumulatoren bei der ACCUREC

Quelle: [2]

Der Ablauf des eigentlichen Recyclingprozesses, d.h. das Austreiben von Elektrolyt bzw. Organika sowie die Destillation und Kondensation von Cadmium kann anhand der beiden folgenden Abbildungen verdeutlicht werden.

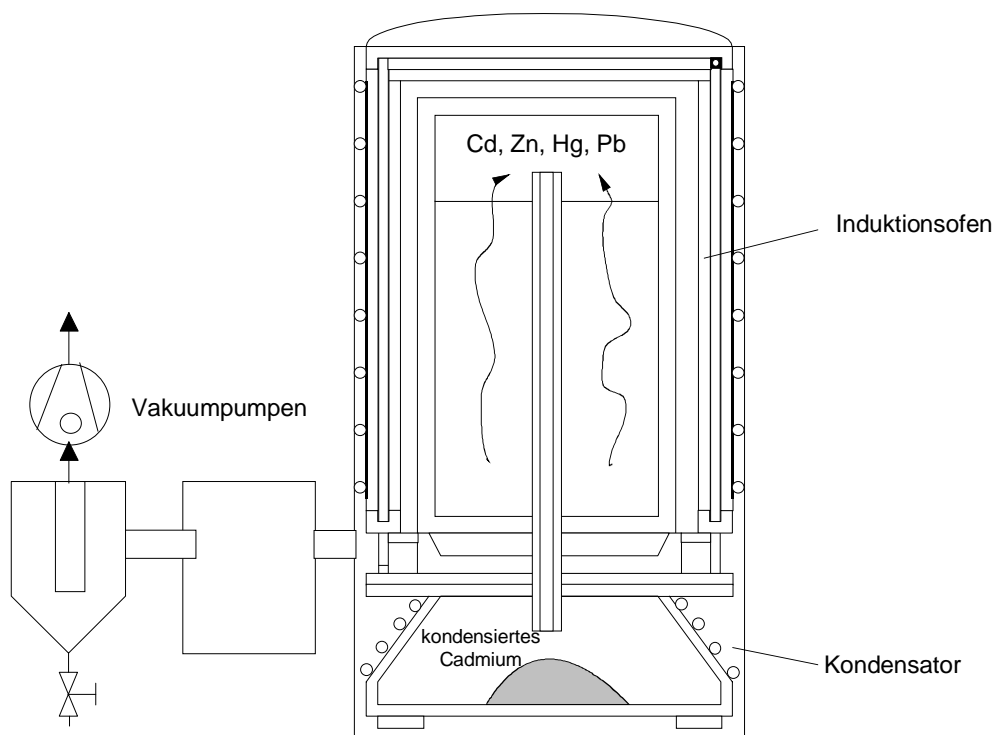


Abbildung 6-22: Schematische Darstellung der RVD-Anlage

In Abbildung 6-22 sind der Induktionsofen mitsamt Kondensator und Vakuumpumpen schematisch dargestellt. Die Ni/Cd-Gerätebatterien sowie die ihres Kunststoffmantels entledigten Batteriepacks werden in einem Stahlbehälter in den induktiv beheizten Ofen chargiert. Dieser wird dicht verschlossen und die noch vorhandene Luft aus dem Ofengefäß abgesaugt (vgl. Abbildung 6-23). Der nachfolgende physikalisch-chemische Prozess der Verdampfung und Kondensation findet im Vakuum statt; wodurch die zu behandelnde Abgasmenge minimiert wird. Ferner ist durch den Unterdruck im Ofengefäß eine erhebliche Energieersparnis gegenüber bei Umgebungsdruck arbeitenden Anlagen möglich, da das Cadmium bei deutlich geringeren Temperaturen quantitativ verdampft und so die zuzuführende Energiemenge zum Aufheizen der Charge gering gehalten werden kann.⁷⁸ Tabelle 6-22 zeigt für Quecksilber, Cadmium und Zink die Verdampfungstemperatur in Abhängigkeit des Druckes.

⁷⁸⁾ Der zusätzliche Energieverbrauch durch die Vakuumpumpen ist erheblich geringer als die durch niedrigere Temperaturen und kürzere Behandlungszeiten erreichbaren Heizenergieeinsparungen [2].

Tabelle 6-22: Verdampfungstemperatur für Hg, Cd und Zn in Abhängigkeit des Druckes

Druck [mbar]	1.000	100	10	1	0,1
Quecksilber [°C]	357	245	174	116	71
Cadmium [°C]	767	588	458	374	310
Zink [°C]	907	709	574	471	394

Quelle: [274]

Während Cadmium bei Normaldruck bei rund 767 °C verdampft, kann bei einem Druck von 1 mbar bereits bei 400 °C das Metall vollständig in die Gasphase überführt werden. Der RVD-Prozess arbeitet überwiegend bei Drücken um 30 mbar. Das Temperaturprofil (Abbildung 6-23) wird so eingestellt, dass zunächst der Elektrolyt und vorhandene Kohlenwasserstoffe aus dem chargierten Material bei etwa 100 - 150 °C ausgetrieben werden. Anschließend wird bei rund 750 °C Cadmiumoxid durch mitchargiertes Reduktionsmittel reduziert und metallisches Cadmium verdampft. Im wassergekühlten Kondensator wird das Cadmium aus der Gasphase abgeschieden und bildet dort einen festen Cadmiumblock. Der Prozess des Cadmiumverdampfens und -kondensierens wird etwa 5 Stunden aufrechterhalten, so dass insgesamt für eine Charge etwa 8 Stunden erforderlich sind. Danach ist der Cadmiumgehalt des Nickel-Eisen-Schrottes für die weitere Verwertung hinreichend verringert [2], [334].

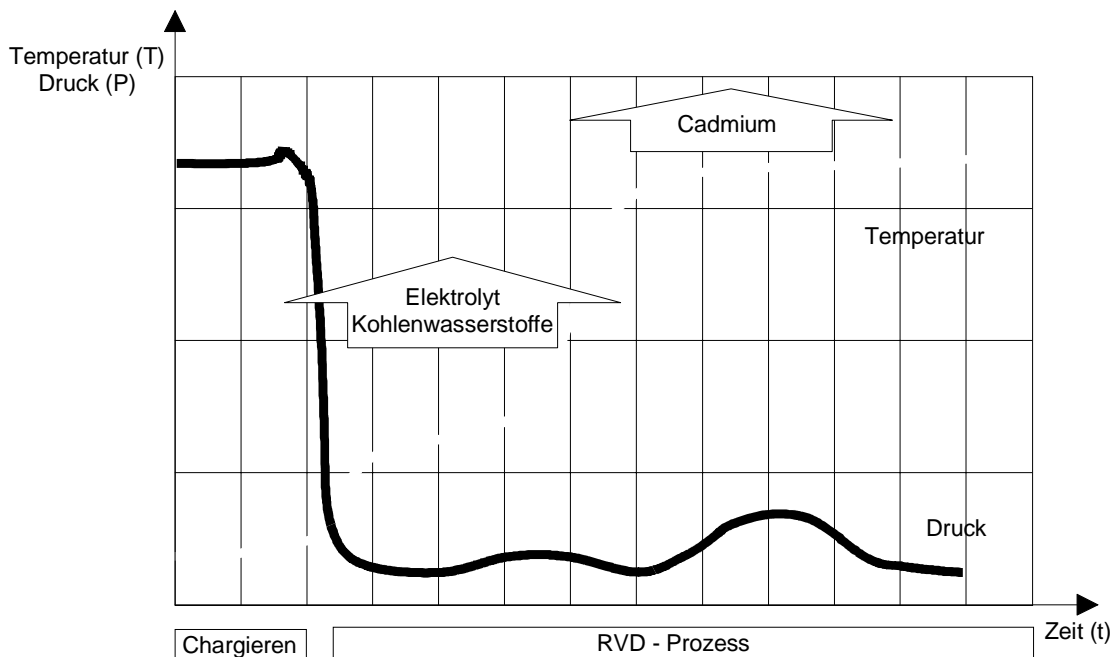


Abbildung 6-23: Druck- und Temperaturverlauf während des RVD-Prozesses

Quelle: [274]

Der Prozess der Cadmiumabtrennung im Vakuum bzw. unter stark verminderten Druck ist auch mit Vorteilen im Bereich der Abgasbehandlung verbunden. So ist der durch einen Aktivkohlefilter geleitete Volumenstrom mit weniger als 70 l/h äußerst gering. In Tabelle 6-23 ist eine typische Abgasanalyse wiedergegeben.

Tabelle 6-23: Typische Analyse des RVD-Abgases

	CO ₂	CO	Cd	Hg	Dioxine
[g/h]	58	4	n. m.	n. m.	n. m.

n. m.: nicht messbar

Quelle: [274]

Die geschlossene Bauweise des Ofens trägt auch zu den geringen Belastungen der Arbeitsplätze bei. Dies wird anhand der in Tabelle 6-24 wiedergegebenen Ergebnisse verschiedener Kontrollen deutlich. Aufgrund dieser prozessspezifischen hohen Umweltverträglichkeit und des geringeren Energieverbrauches wird das RVD-Verfahren im Vergleich zu den weiteren untersuchten Verfahren zur Verwertung von cadmiumhaltigen Batterien (vgl. Tabelle 6-35) in den Kategorien Umweltbelastung und Ressourceneinsatz besonderes gut bewertet.

Tabelle 6-24: Immissionsmessergebnisse ACCUREC

Bereich (Datum)	Zerlegung (6/97)	Reaktor (6/97)	Reaktor (4/98)	Quecksilber
[µg/m ³]	Cd 2,4	Cd 3,5	Cd 1,8	< 0,5

Quelle: [274]

Das RVD-Verfahren ist auf sortenreine Batteriefractionen als Einsatzmaterial angewiesen, wenn das zurückgewonnene Cadmium wieder zu Produktionszwecken verwendet werden soll. Insbesondere zinkhaltige Batterien stören den Verwertungsprozess insofern, als dass durch den niedrigen Verdampfungspunkt des Zinks (vgl. Tabelle 6-22) dieses mit dem Cadmium verdampft und kondensiert wird. Da das Cadmium, wenn überhaupt, nur hochrein am Markt absetzbar ist, müsste es in einem weiteren Verfahrensschritt vom Zink befreit werden. Dies ist jedoch bei den aktuellen Cadmiumpreisen (vgl. Abschnitt 7.2) wirtschaftlich nicht darstellbar.

Die Kosten der Verwertung von Ni/Cd-Batterien nach dem RVD-Verfahren können nicht allein aus den Erlösen der Recyclingprodukte gedeckt werden, so dass die Anlieferer einen Verwertungspreis zahlen müssen. Neben dem Vorteil, z.T. wertvolle Rohstoffe zurückzugewinnen, ist das Recycling zudem wirtschaftlicher als die Beseitigung der Batterien auf

Sondermüldeponien, da für diese bei cadmiumhaltigen Stoffen in Deutschland Kosten von ca. 400 - 500 DM/t angesetzt werden müssen, während die Verwertungskosten darunter liegen. Das Verhältnis von Verkaufserlösen der Verwertungsprodukte zu den Erlösen aus der Annahme der Batterien zur Verwertung liegt bei der ACCUREC bei etwa 5 : 1 bis 6 : 1 [334].

6.4.2 S.N.A.M, Cadmiumdestillation

Die „Société de Nouvelle D’Affinage des Métaux“ (SNAM), ein Tochterunternehmen der deutschen F.W. Hempel Gruppe und der belgischen Floridienne Chimie S.A., verwertet bereits seit 1977 verbrauchte Ni/Cd-Batterien, Produktionsrückstände und -abfälle. Derzeit wird die Entwicklung von Recyclingmöglichkeiten auch für Lithium-Ionen-Batterien vorangetrieben, NiMH-Batterien können bereits jetzt behandelt werden [254]. Der Verfahrensablauf ist in Abbildung 6-24 schematisch dargestellt.

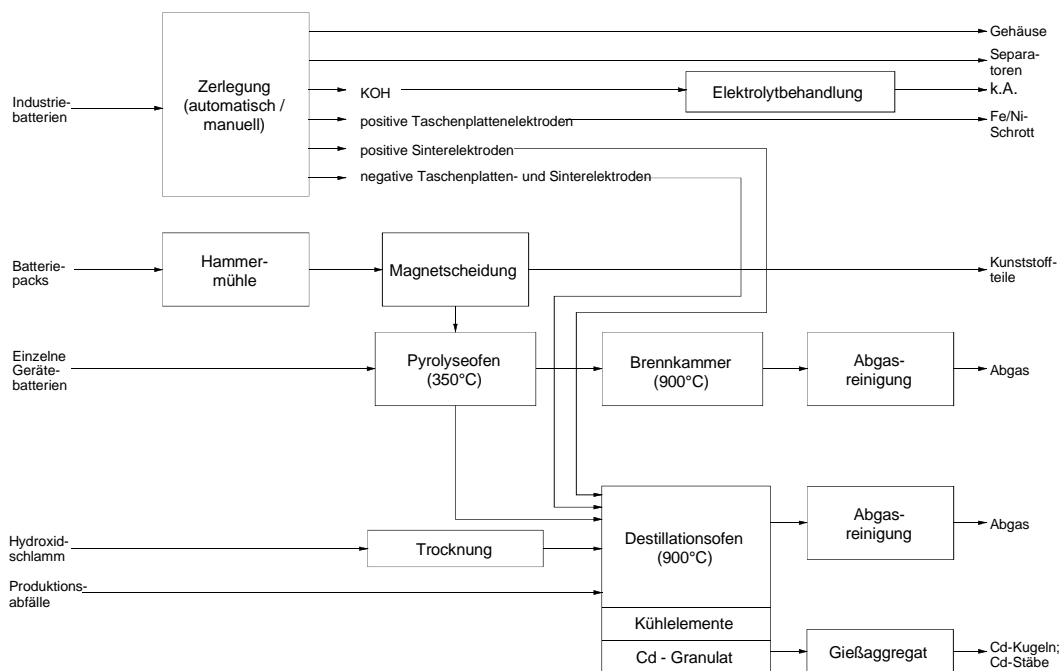


Abbildung 6-24: Verfahrensablauf bei S.N.A.M.

Quelle: [36]

Ni/Cd-Gerätebatterien (Einzelzellen), wie sie etwa in den automatischen Sortierstufen moderner Batteriesortieranlagen abgetrennt werden,

können ohne Vorbehandlung in die erste Prozessstufe, einen Pyrolyseofen, chargiert werden. Industriebatterien werden manuell oder automatisch zerlegt, um nur die cadmiumhaltigen Bestandteile⁷⁹ in den Prozess einzubringen und so unnötigen Energieeinsatz und Kapazitätsverluste zu vermeiden. Die Kunststoffhüllen von Batteriepacks werden in einer Hammermühle aufgebrochen, so dass nach Durchlaufen einer magnetischen Trennstufe eine cadmiumfreie Kunststofffraktion und die im Pyrolyse- und Destillationsofen zu behandelnden Batterien anfallen [288].

Der Pyrolyseofen ist ein gasbeheiztes, im Batchbetrieb eingesetztes Aggregat, in dem je Charge 4 t Batterien bei 350 - 500 °C unter reduzierenden Bedingungen rund 14 h behandelt werden. Dabei wird der Großteil der Kunststoffbestandteile der Batterien in flüchtige Kohlenwasserstoffe zersetzt oder verkohlt. Die Abgase des Ofens werden mit Sauerstoffüberschuss bei rund 900 °C verbrannt und nach Abreinigung durch Nasswäscher, Tuch- und Aktivkohlefilter in die Atmosphäre entlassen. Dabei wird ein Wert von 30 µg Cadmium je m³ Luft nicht überschritten [216], [288].

Die pyrolisierten Batterien werden anschließend zunächst komprimiert und nachfolgend in übereinander stapelbaren Metallkörben in zylinderförmige Destillationsöfen chargiert. In den Öfen werden auch getrocknete Schlämme und weitere cadmiumhaltige Abfälle verwertet. Die Destillationsöfen besitzen einen Durchmesser von 1,6 m und eine Höhe von 2,3 m; das nutzbare Volumen beträgt 600 l, so dass das gesamte Einsatzmaterial eine Charge üblicherweise zwischen 400 - 1.200 kg wiegt. Die Öfen werden durch einen übergestülpten Heizmantel auf 900 °C erhitzt, so dass das Cadmiumoxid reduziert⁸⁰ und Cadmium verdampft wird. Das Cadmium wird im unteren Ofenbereich an Kühlelementen kondensiert und tropft aus dem Ofen. Ferner werden Wasser und Öle aus dem Abgasstrom abgeschieden, die aus nicht vorher pyrolisierten Einsatzmaterial stammen. Das gewonnene Cadmium wird in der Regel ein weiteres Mal destilliert, um hohe Reinheitsgrade zu erreichen. Der in den Destillationsöfen noch rund 8 Stunden zur Abkühlung verbleibende Eisen-Nickel-Rückstand enthält 0,1 - 0,5 Gew.-% Cadmium, der zu Ferronickel mit weiter reduziertem Cadmiumgehalt verarbeitet wird [36], [288].

⁷⁹⁾ Nach einer Verwertungsbilanz der ACCUREC GmbH sind gut 25 % der Batteriemasse cadmiumhaltig. Der Rest sind Lauge, Gehäuse und Nickelträger [1].

⁸⁰⁾ Je nach Einsatzmaterial wird zur Reduktion der oxidischen Bestandteile Holzkohle zugesetzt [36].

Die genehmigte Verwertungsmenge für Ni/Cd- und NiMH-Batterien beträgt 4.000 t/a (1999). Die mit den Anlagen verwertbare Menge dürfte jedoch höher liegen, eine Ausweitung der Genehmigung auf 8.000 t/a wird von den Betreibern erwartet [57]. Die Kosten der Verwertung werden für Ni/Cd-Batterien mit 7,5 FF (1,15 €) /kg und für NiMH-Batterien mit 2 - 5 FF (0,3 - 0,75 €) /kg angegeben [58]. Die Annahmepreise für diese Batteriesysteme liegen jedoch niedriger, da für ihre Kalkulation auch die Erlöse aus den Recyclingprodukten einbezogen werden, die jedoch aufgrund der Schwankungen der Metallpreise z.T. starken Veränderungen unterliegen.

6.4.3 SAFT AB, SAFT Recycling Prozess

Das schwedische Unternehmen SAFT AB hat bereits seit 1917 in Oskarshamn, Schweden, dem Standort der Ni/Cd-Industrieakkumulatorenproduktion, zeitweise das Recycling von Ni/Cd-Batterien und verwandter Materialien betrieben [143]. Die heutige Einbindung des Recyclings in die Produktion in Oskarshamn zeigt Abbildung 6-25.

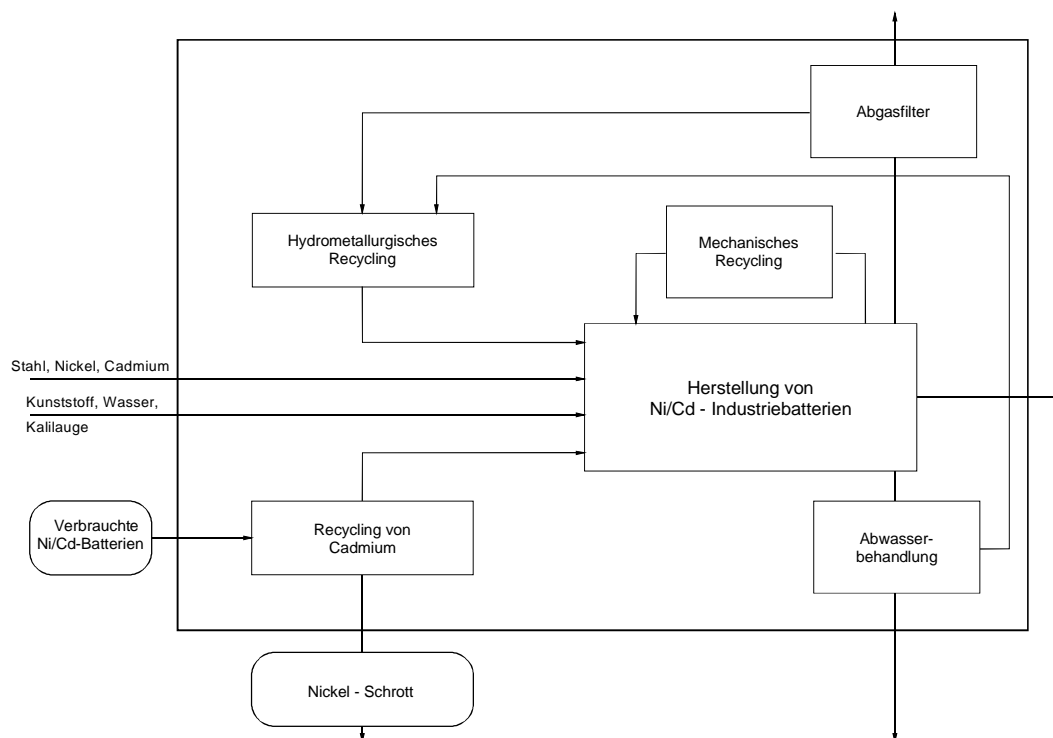


Abbildung 6-25: Gesamtstruktur der Industrieakkumulatorenproduktion bei SAFT AB in Oskarshamn

Quelle: [143]

Die erzeugten Batterien werden weltweit vermarktet. Ein großer Teil der resultierenden Batterieschrotte wird zur Verwertung zurück nach Schweden geliefert, ein weiterer Teil wird in anderen Anlagen recycelt. Die Entwicklung des derzeit eingesetzten Verfahrens begann 1978; seit 1986 findet die Rückgewinnung der Wertstoffe im industriellen Maßstab statt. Zunächst im Wesentlichen für Industrieakkumulatoren (offene Zellen) konzipiert, wurden in der Recyclinganlage zunehmend auch Ni/Cd-Gerätebatterien (gasdichte Zellen) verwertet, wobei für letztere die Effizienz des Verfahrens nicht optimal erschien. Dies führte dazu, dass 1996 die Anlage um eine separate Pyrolysestufe erweitert wurde [143]. Eine schematische Darstellung des Gesamtprozesses ist in Abbildung 6-26 gegeben.

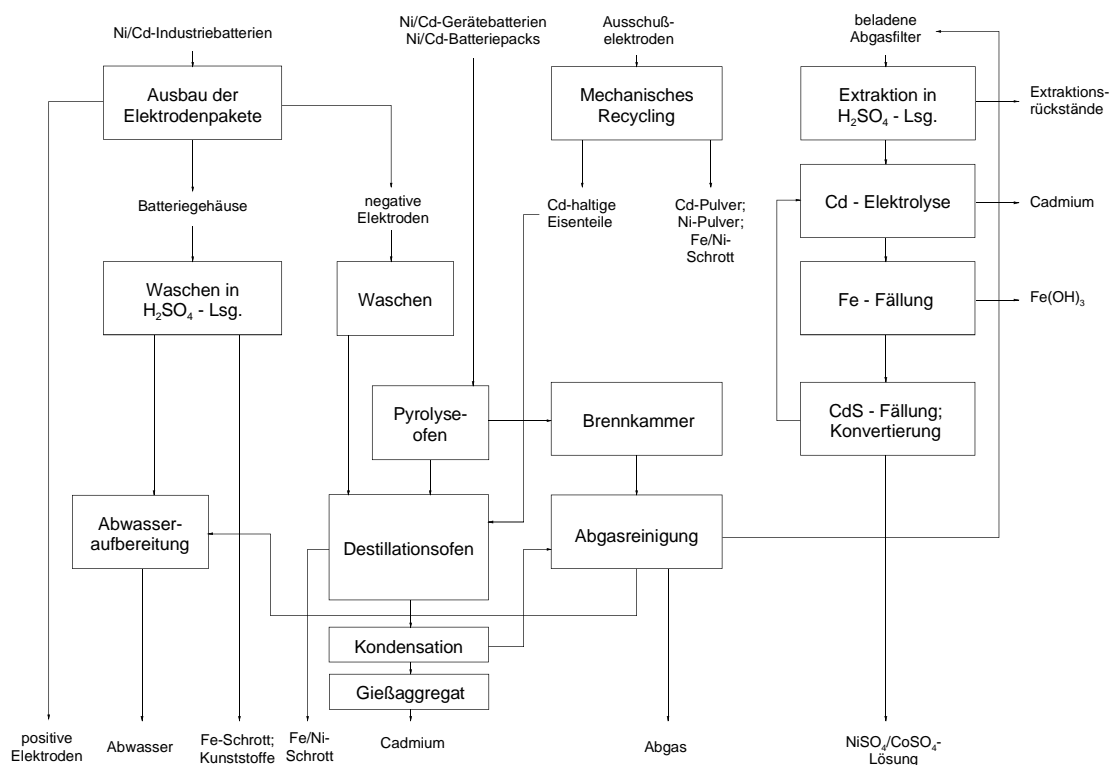


Abbildung 6-26: Übersicht über den SAFT Recycling Prozess

Quelle: [36]

Große Ni/Cd-Industrieakkumulatoren werden manuell zerlegt. Die ausgebauten negativen Platten mit einem Cadmiumgehalt von 20 - 25 % werden gewaschen und getrocknet. Sie werden zusammen mit Koks in einen Tiegel gefüllt und in einem der beiden elektrisch beheizten Destillationsöfen rund 24 Stunden bei rund 900 °C gehalten. Das dabei abdestillierte Cadmium wird flüssig abgeschieden und tropft in Wasser, wo es kleine Pellets

bildet. Das recycelte Cadmium wird zur Produktion neuer Akkumulatoren genutzt [256].

Gasdichte Ni/Cd-(Geräte-)Batterien werden vor der eigentlichen Destillation einer Pyrolysestufe unterzogen. In ihr werden bei 400 °C der Elektrolyt und die Kunststoffbestandteile zersetzt und über die Gasphase entfernt. Das Abgas der Pyrolysestufe wird nachverbrannt, gewaschen und gefiltert, ehe es in die Atmosphäre entlassen wird.⁸¹ Der freigesetzte Energieinhalt des Pyrolysegases wird über Wärmetauscher innerhalb der Produktionsanlagen genutzt [143].

Neben den pyrometallurgischen (Pyrolyse und Destillation) werden auch hydrometallurgische Verfahrensschritte eingesetzt. Diese dienen insbesondere der Aufbereitung beladener Abgasfilter, aus denen bei 60 °C mit Schwefelsäure ein Großteil der Schwermetalle herausgelöst wird.⁸² Das enthaltene Cadmium wird in einer Gewinnungselektrolyse weitgehend aus der Lauge abgeschieden und im Anschluss durch Einsatz in den Destillationsöfen weiter raffiniert. Aus der Restlauge wird anschließend zunächst Eisen als $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ausgefällt, ehe die in der Elektrolysestufe nicht abgeschiedenen Cadmiumionen als Sulfide aus der Lösung entfernt werden. Übrig bleibt nach einer Filtration eine Nickel- und Kobaltsulfatlösung, die zur Batterieproduktion eingesetzt werden kann. Das als Sulfid gefällte Cadmium wird wieder in Lösung gebracht und der Gewinnungselektrolyse erneut zugeführt [36].

Die durch das Recycling von 800 t/a Ni/Cd-Industrieakkumulatoren und 400 t/a gasdichter Ni/Cd-Batterien⁸³ im SAFT Recycling Prozess verursachten Cadmiumemissionen betragen etwa 2 kg/a. Diese setzen sich im Wesentlichen aus Emissionen des Recyclingprozesses in die Luft von unter einem kg Cadmium/a sowie Emissionen in das Wasser von 0,2 kg Cadmium/a (entsprechend einer Konzentration im gereinigten Abwasser

⁸¹⁾ Die Nachverbrennung erfolgt zur Vermeidung der Bildung von Dioxinen bei 1.200 °C und Sauerstoffüberschuss. Da bei Gerätebatterien ein Quecksilbereintrag in den Prozess nicht völlig ausgeschlossen werden kann, ist die Pyrolysestufe mit einem entsprechendem Filter ausgerüstet [143].

⁸²⁾ In den hydrometallurgischen Stufen werden auch beladene Waschwässer der weiteren Prozessstufen eingesetzt. So werden bei der Demontage der Industrieakkumulatoren mit Schlamm verunreinigte Bestandteile mit Schwefelsäure gewaschen und Carbonatschichten auf den negativen Platten nasschemisch entfernt [2].

⁸³⁾ Bei ausschließlicher Verwertung von Ni/Cd-Industrieakkumulatoren liegt die Kapazität bei rund 1.500 t/a (1997, [143]).

von 0,03 - 0,04 mg/l) zusammen. Hinzu kommen die z.T. durch die Restcadmiumgehalte (nach Firmenangaben 0,01 Gew.-%) der Destillationsrückstände sowie die Cadmiumgehalte der positiven Platten (0,2 - 0,4 Gew.-%) verursachten Cadmiumemissionen in der Eisen- und Stahlindustrie, an die der hoch nickelhaltige Schrott zu weiteren Verarbeitung verkauft wird [143].

6.4.4 Inmetco, Drehherd-Direktreduktionsverfahren

Die International Metals Reclamation Company, Inc. (Inmetco), eine Tochter des INCO-Konzerns, betreibt in Ellwood City, USA, das sogenannte Inmetco-Verfahren. Ziel dieses Verfahrens ist die Gewinnung von Eisenschwamm⁸⁴ und einer angereicherten NE-Metallfraktion durch Direktreduktion von hochmetallhaltigen Reststoffen der Eisen- und Stahlindustrie und seit jüngerer Zeit die Verwertung nickelhaltiger Batterien [123]. Das Verfahrensprinzip besteht darin, verschiedene Hüttenwerksreststoffe mit festen Reduktionsmitteln zu Pellets⁸⁵ zu agglomerieren und anschließend in einem Drehherdofen zu Eisenschwamm zu reduzieren. Der Eisenschwamm als Produkt des Prozesses kann an verschiedenen Stellen (Blasstahlwerk, Elektrolichtbogenofen) eingesetzt werden. Zur großtechnischen Anwendung kam das Verfahren zunächst in den USA bei der Verwertung von Reststoffen aus der Edelstahlindustrie (Cr/Ni) [122]. Seine Eignung für die Verarbeitung von Reststoffen (hier aus der Massenschwammerzeugung) wurde in entsprechenden Versuchen und Studien überprüft [68], [69]. So bietet das Inmetco-Verfahren die Möglichkeit einer einheitlichen Entsorgung und Verwertung einer Reihe eisenhaltiger Reststoffe aus integrierten Hüttenwerken, die ansonsten aufgrund ihrer Beschaffenheit und/oder ihrer hohen Gehalte an Zink, Blei, Alkalien oder Öl nur nach gesonderter Konditionierung oder teilweise gar nicht in die Hüttenwerksprozesse zurückgeführt werden können [240]. Die bestehende Anlage in den USA ist erweitert worden, um Ni/Cd-Akkumulatoren verwerten zu können. Dazu wurde in Europa verfügbare Technologie im-

⁸⁴⁾ Als Eisenschwamm wird das feste Produkt von Verfahren bezeichnet, bei denen hoch metallhaltige (insbesondere Eisen), überwiegend oxidische Einsatzmaterialien unter Einsatz von Kohle, Erdgas oder Erdöl reduziert werden. Hauptmotiv bei der Entwicklung dieser Verfahren war die Substitution des bei der klassischen Eisen- und Stahlproduktion erforderlichen Kokeses durch kostengünstigere Reduktionsmittel und Energieträger [313].

⁸⁵⁾ Diese ungebrannten Pellets werden auch als Greenpellets bezeichnet.

portiert (SAFT, vgl. 6.4.3), um das Cadmium weitgehend vor dem Einsatz des Nickel-Eisen-Rückstands im Drehherdofen abzutrennen. Das Schema des Drehherds ist in Abbildung 6-27 dargestellt; die prinzipiellen Vorgänge gleichen denen im Oxyreducer der CITRON SA (vgl. 6.3.1), bei dessen Bau und Inbetriebnahme auf den Erfahrungen in Ellwood City zurückgegriffen wurde.

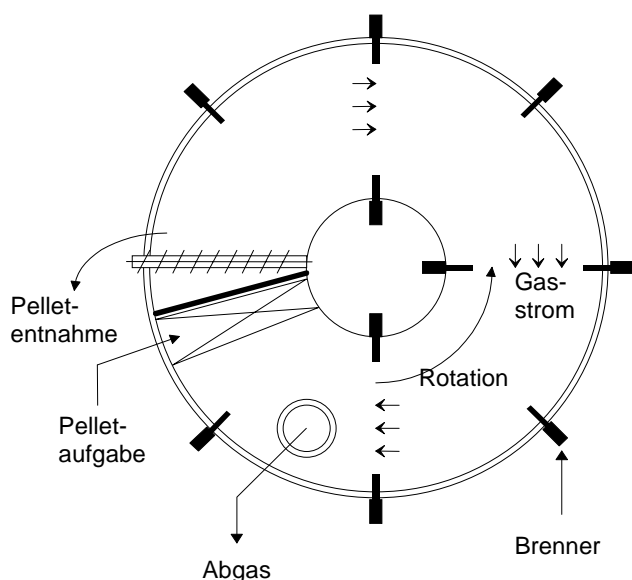


Abbildung 6-27: Schema eines Drehherdofens

Quelle:[128]

In der Reduktionszone des Drehherdofens reduziert der in den Pellets enthaltene Kohlenstoff das Eisenoxid zu Eisenschwamm. Dabei werden auch die enthaltenen Zink- und Bleioxide reduziert. Sie verdampfen und reoxidieren im Abgasstrom, so dass bei der Abgasreinigung ein vorwiegend oxidisches Blei- und Zinkstaubkonzentrat abgeschieden wird. Bei der teilweisen Nachverbrennung des in der Reduktionszone freigesetzten Kohlenmonoxids wird in der Aufheizzone zusätzliche thermische Energie, die zur weiteren Erwärmung genutzt wird, erzeugt. Entscheidender Vorteil des Drehherdofens ist, dass die Schüttung auf dem Drehteller ruht und es daher nur zu einer geringfügigen mechanischen Staubentwicklung (< 0,5 % des Einsatzmaterials) kommt. Dies führt dazu, dass Zink- und Bleioxid in stark angereicherter Form im Staub enthalten sind und dieser somit für den Einsatz in der NE-Metallindustrie geeignet ist. Das Ausbringen liegt für Zink bei 99 % und für Blei bei 80 % [124]. Das Prozessabgas verlässt den Drehherdofen mit einer Temperatur von etwa 1.100 °C. Etwa 40 % des Abgases werden zum Vorwärmen der Brennluft rückgeführt. Die verbleibende Menge kann zur Dampferzeugung genutzt werden oder wird, je nach Ausgangsfeuchte der aufzubereitenden Reststoffe, zu deren Trock-

Trocknung verwendet [26]. Am Ende des Umlaufs wird der Eisenschwamm zur Vermeidung von Reoxidationen unter Luftabschluss vom Herd abgenommen und in feuerfeste Behältnisse gefüllt. Das Einschmelzen des Eisenschwamms erfolgt ggf. zusammen mit weiteren Stoffen im Roheisen-Schmelzofen, einem Elektrolichtbogenofen (vgl. Abbildung 6-28).

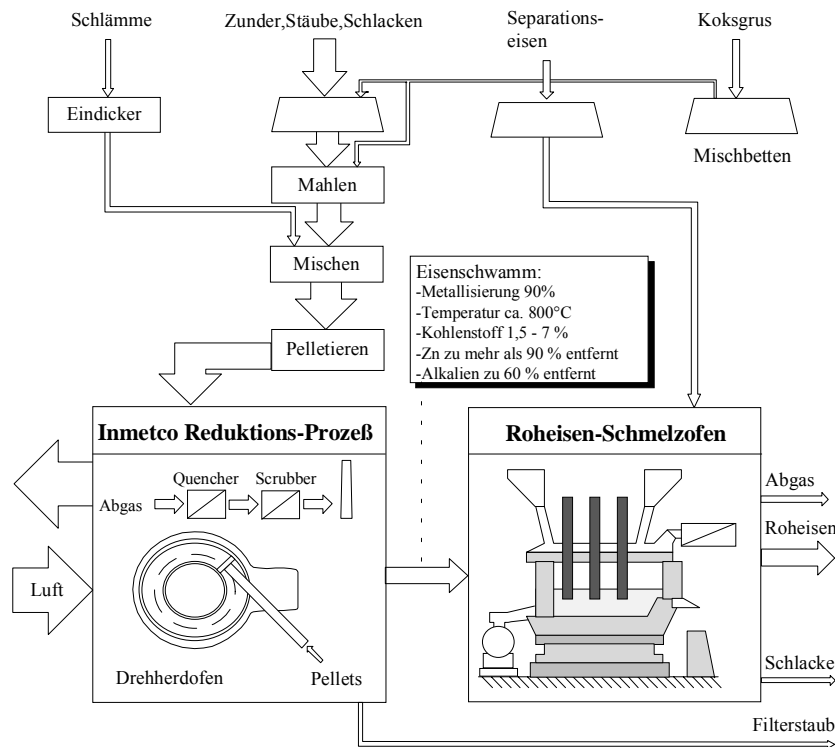


Abbildung 6-28: Inmetco-Reduktionsprozess

Quelle: [239]

Im Folgenden werden die Abläufe der Verwertung von nickelhaltigen Batterien, insbesondere Ni/Cd-Batterien, beschrieben. Der Ablauf der Verwertung von Ni/Cd-Gerätebatterien ist in Abbildung 6-29 schematisch dargestellt.

Verfahren/Unternehmen zur Verwertung verbrauchter Batterien

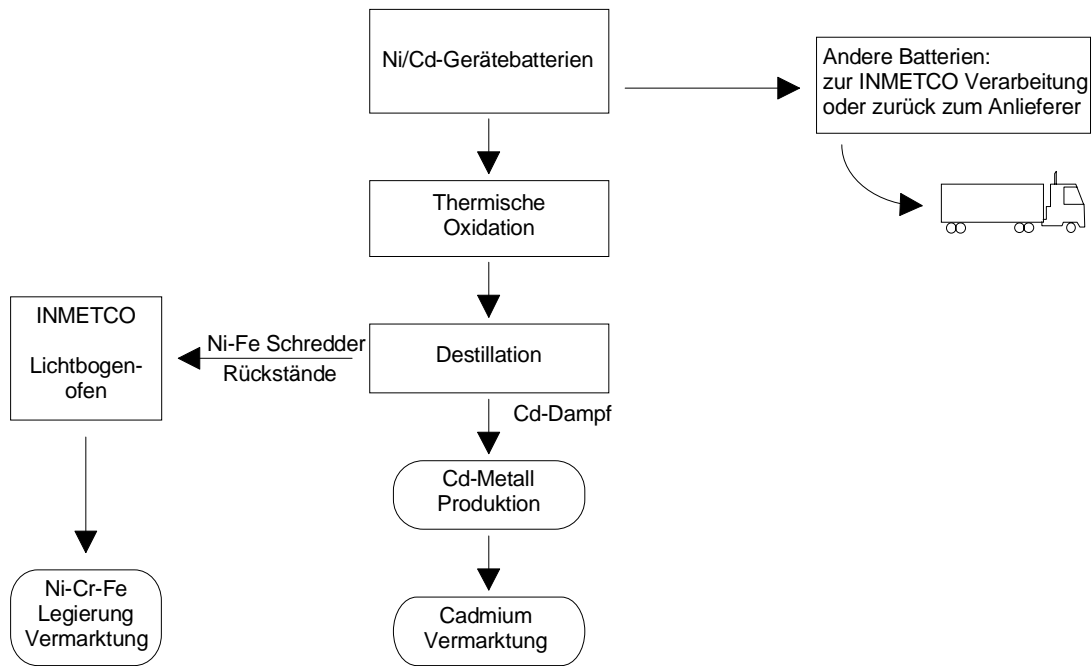


Abbildung 6-29: Schematischer Ablauf der Gerätebatterie-Verwertung im Inmetco-Prozess

Quelle: [180]

Die angelieferten Batterien werden zunächst manuell sortiert, wobei nicht-nickelhaltige Batterien aussortiert und dem Anlieferer zurück gebracht werden. Nickelmetallhydrid-Batterien werden ohne Vorbehandlung direkt in den Drehherdofen (vgl. Abbildung 6-28) chargiert. Die gasdichten Ni/Cd-Gerätebatterien werden geschreddert und zusammen mit den Kunststoffbehältnissen der verwerteten Ni/Cd-Industrieakkumulatoren (s.u.) einer sogenannten „thermischen Oxidation“ unterzogen. Dieser in einem erdgasbeheizten Drehofen durchgeführte Verfahrensschritt führt zur Zersetzung der organischen Bestandteile (Kunststoff, Papier) und zu ihrer Entfernung über die Gasphase. Der Wärmeinhalt des entstehenden Prozessgases wird in den weiteren Anlagenteilen (Drehherdofen) genutzt. Anschließend werden die Batterien einer Destillation zugeführt (siehe Beschreibung SAFT Recycling Prozess, Abschnitt 6.4.3), in der zum einen Cadmium erzeugt wird und zum anderen ein Nickel-Eisen-Destillationsrückstand, der im Anschluss im Roheisen- bzw. Legierungs-Schmelzofen⁸⁶

⁸⁶ Der Roheisen-Schmelzofen ist ein Elektrolichtbogenofen, bei dem die Elektroden in das Einsatzmaterial eintauchen (submerged electric arc furnace).

zur einer Ni-Cr-Fe-Legierung für die Edelstahlherstellung vergossen wird. Das Cadmium wird in Form kleiner Kugeln gewonnen und wird in drei Qualitäten mit unterschiedlichem Reinheitsgrad vermarktet [33]. Hauptnebenprodukt ist die Schmelzofenschlacke, die als Baumaterial u.a. im Straßenbau eingesetzt werden kann.

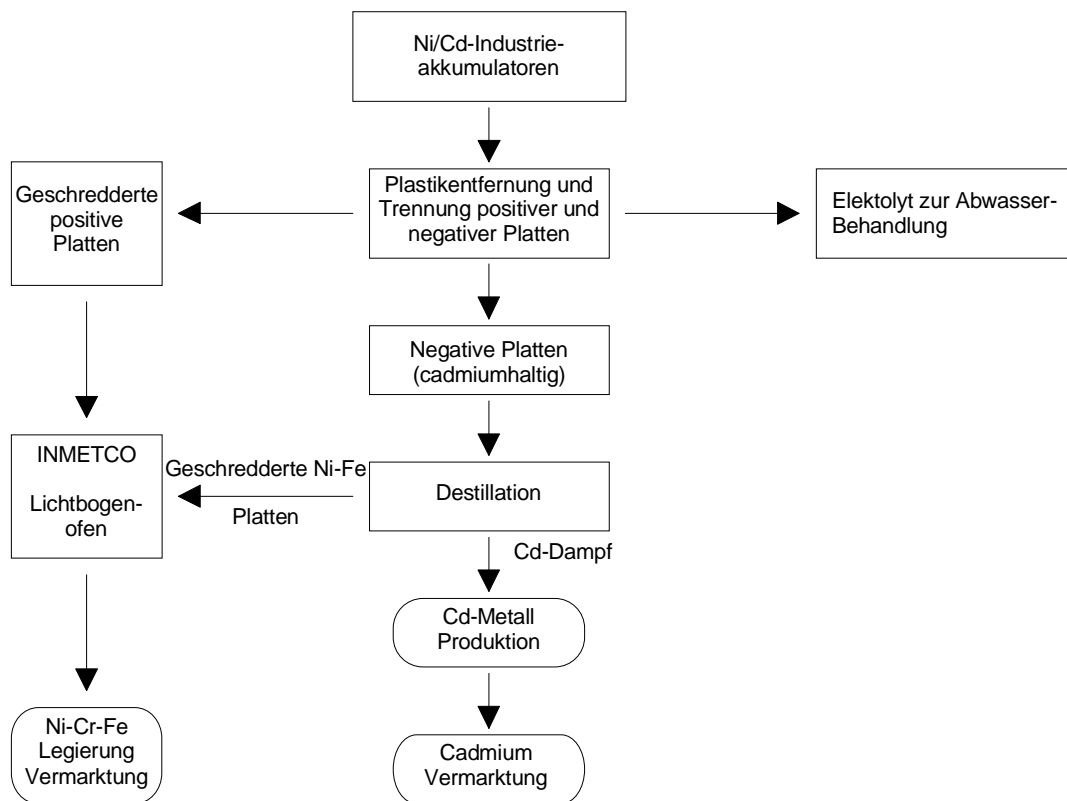


Abbildung 6-30: Schematischer Ablauf der Verwertung von Industrieakkumulatoren im Inmetco-Prozess

Quelle: [180]

Der Ablauf der Verwertung von Ni/Cd-Industrieakkumulatoren (vgl. Abbildung 6-30) beinhaltet als ersten Schritt die Trockenlegung und das Zerlegen der Zellen. Die stark basische Lösung⁸⁷ wird in der Abwasserbehandlungsanlage zur Regulierung der pH-Werte eingesetzt. Die Akkumulatoren werden zunächst an der Oberseite mit einer Bandsäge aufge-

⁸⁷) Der Elektrolyt besteht i.d.R. aus Kalium- (KOH) oder Natriumhydroxid (NaOH).

schnitten, ehe die nickel- und cadmiumhaltigen Platten demontiert und getrennt werden. Die positiven (nickelhaltigen) Platten werden in einem Schredder zerkleinert und im Drehherdofen behandelt. Der entstehende Eisenschwamm wird anschließend im Elektrolichtbogenofen zu einem Legierungsmittel für die Edelstahlherstellung erschmolzen. Die negativen Platten werden in einer Destillationsstufe (s.o.) zur Abtrennung des Cadmiums behandelt, wobei eine geringe Menge Kohlenstoff als Reduktionsmittel hinzugefügt wird. Der im Wesentlichen aus Eisen bestehende Destillationsrückstand wird geschreddert und wie die positiven Platten im Drehherdofen und anschließend im Elektrolichtbogenofen behandelt [180].

Die Verwertungskapazität wurde für 1999 auf über 3.000 t verbrauchter Ni/Cd-Batterien/a beziffert, wobei die Anlage, falls die Rücknahmesysteme für Ni/Cd-Batterien in Nordamerika zukünftig verstärkt greifen sollten, für eine Erweiterung auf 10.000 t/a geeignet ist [180].

6.5 Verfahren/Unternehmen zur Verwertung von NiMH-Akkumulatoren

Aufgrund ihres hohen Wertstoffgehaltes ist das Recycling von NiMH-Akkumulatoren wirtschaftlich reizvoll, insbesondere da etwa im Vergleich zu Ni/Cd-Akkumulatoren der energie- und zeit- und damit kostenintensive Prozessschritt zur Abtrennung des Cadmiums durch Destillation entfällt. Bislang hat sich die stoffliche Verwertung auf die Nutzung des Nickel- und Eiseninhalts der Batterien beschränkt (vgl. Beschreibung NIREC, Abschnitt 6.5.1), jedoch laufen bei verschiedenen Unternehmen Entwicklungsarbeiten, die auch auf die gezielte Nutzung der weiteren enthaltenen Wertstoffe wie Kobalt und verschiedene Seltene Erden ermöglichen sollen.

6.5.1 NIREC Recycling GmbH

Die NIREC Recycling GmbH (NIREC) ist bereits seit den achtziger Jahren auf dem Gebiet des Nickelrecyclings tätig. Ziel des in Dietzenbach ansässigen Unternehmens ist es, aus verschiedenen nickelhaltigen Reststoffen bzw. Abfällen eine Mischung (Vorlegierung) zu erzeugen, die bei der Edelstahlherstellung als Ersatz für das Legierungsmittel Ferronickel eingesetzt werden kann. Im Rahmen der freiwilligen Selbstbindung der Arbeitsgemeinschaft Batterien des ZVEI (vgl. Abschnitt 6.1) hat die NIREC lange Zeit als Vertragspartner des ZVEI die zurückkommenden Batterien gesammelt, sortiert, verpackt und an Umarbeitungsbetriebe weitergegeben [211]. Ni/Cd-Batterien werden derzeit durch spezielle Verwer-

ter wie SNAM (vgl. 6.4.2) oder die durch die NIREC initiierte ACCUREC (vgl. 6.4.1) aufbereitet, d.h. das Cadmium wird bis auf geringe Restgehalte aus den Einsatzstoffen abdestilliert. Der Destillationsrückstand wird im Anschluss als Eingangsstoff zur Herstellung der Vorlegierung eingesetzt. NiMH-Batterien werden durch die NIREC vor ihrem Einsatz aufbereitet (s.u.). Grosse Schrottteile werden vor ihrem Einsatz zerkleinert. Der Ablauf der Mischungsherstellung ist schematisch in Abbildung 6-31 dargestellt.

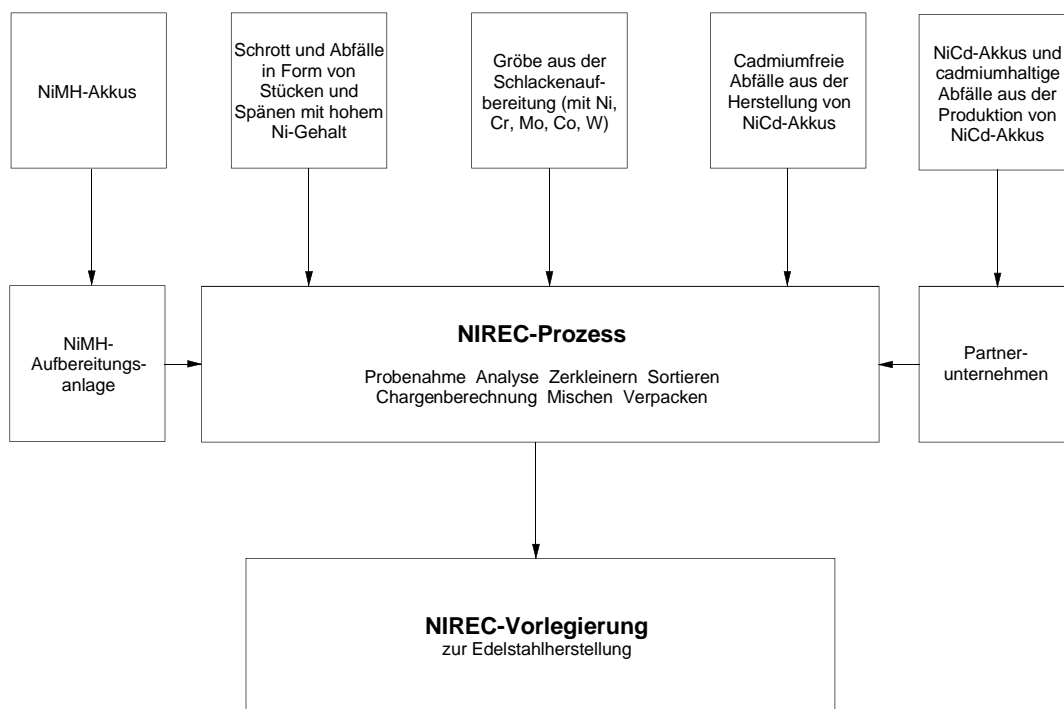


Abbildung 6-31: Ablauf der NIREC-Mischungsherstellung

Quelle: [211]

Zunächst werden die angelieferten Eingangsstoffe einer Sichtkontrolle unterzogen, gewogen, beprobt und auf ihre chemische Zusammensetzung hin im betriebseigenen Labor analysiert. Entsprechend der Vorgaben der Abnehmer der Vorlegierung werden die Mengen der zu vermischenden Einsatzstoffe errechnet. Die einzelnen Reststoffe und Abfälle werden nach dem errechneten Rezept zusammengestellt und in einem großen Trommelmischer intensiv gemischt. Aus dem Mischer wird die Vorlegierung unmittelbar in Stahlfässer abgefüllt, wobei auf gleiche Gewichte geachtet wird. Die Fässer werden in der Edeltahlproduktion vollständig eingesetzt [31]. In NiMH-Batterien sind im Gegensatz zu Ni/Cd-Batterien keine E-

lemente in einem Umfang vorhanden, die ihren unmittelbaren Einsatz zur Edelstahlherstellung verhindern würden. Jedoch würden die gasdichten Gerätebatterien in der Stahlschmelze zu Explosionen führen, so dass sie vor ihrem Einsatz geöffnet werden müssen. Dazu setzt die NIREC eine Schneidmühle ein, die anfangs unter Schutzgas betrieben wurde, um dem bei der Öffnung/Zerkleinerung der Batterien freiwerdenden Wasserstoff keine Möglichkeit zur Reaktion zu geben. Es stellte sich jedoch heraus, dass im Regelfall keine kritischen Wasserstoffkonzentrationen auftreten, so dass die Schneidmühle mittlerweile ohne Schutzgas arbeitet. Der Wasserstoffgehalt der Umgebung wird kontinuierlich überwacht und bei Überschreitung eines definierten Schwellenwertes wird die Schneidmühle zur Gefahrenvermeidung abgestellt, bis der Schwellenwert wieder unterschritten wird [31].

6.5.2 ACCUREC GmbH / RVD-Verfahren

Das RVD-Verfahren (vgl. Abschnitt 6.4.1) wird von der ACCUREC GmbH in Mülheim a.d. Ruhr auch zur Verwertung von NiMH-Akkumulatoren eingesetzt. Der Verfahrensablauf entspricht weitestgehend dem bei der Verwertung von Ni/Cd-Akkumulatoren, so dass auf die Darstellung in Abschnitt 6.4.1 verwiesen wird. Hauptunterschied ist, dass anstelle der Abdestillation des Cadmiums das Austreiben bzw. Desorbieren des Wasserstoffs im Vordergrund steht. Analog zu den Ni/Cd-Akkumulatoren findet das nickelhaltige Verwertungsprodukt als gut geeignetes Legierungsmittel in der Edelstahlherstellung Verwendung.

6.5.3 Weitere Verfahren

Es sind keine weiteren Anlagen bekannt, die speziell zur Verwertung von NiMH-Akkumulatoren betrieben werden. Im Oxyreducer-Prozess der CITRON AG (vgl. Abschnitt 6.3.1) und dem in den USA eingesetzten Inmetco-Verfahren (vgl. Abschnitt 6.4.4) sowie den Anlagen der SNAM (vgl. Abschnitt 6.4.2) ist jedoch ebenfalls eine Verwertung dieser Akkumulatoren möglich. Auch bei diesen Verfahren steht die Rückgewinnung des Nickels in Form eines für die Edelstahlherstellung einsetzbaren Produktes im Vordergrund. Aufgrund des hohen Wertes des in NiMH-Batterien enthaltenen Kobalts und der verwendeten Seltenen Erden entwickeln die Unternehmen derzeit Verfahrensvarianten bzw. -alternativen, mit denen diese Metalle gezielt zurückgewonnen werden können, da so (zumindest bei den derzeitigen Kobalt- und Seltenen Erden-Notierungen) bereits durch die Verkaufserlöse die Prozesskosten abgedeckt werden können. Einzelheiten der Entwicklungsarbeiten können jedoch aufgrund noch

noch nicht patentierter innovativer Prozessschritte derzeit nicht veröffentlicht werden.

6.6 Verfahren/Unternehmen zur Verwertung von quecksilberhaltigen Batterien

Die größten Teile des produzierten Quecksilbers finden in der Chlor-Alkali-Elektrolyse, der Batterieindustrie, in elektronischen Geräten, Laborbedarfsartikeln und Messgeräten sowie in Zahnfüllungen Verwendung. Ein erheblicher Rückgang der Produktion aus Erzen konnte in den letzten Jahrzehnten durch das aus Umweltschutzgründen erforderliche Recycling quecksilberhaltiger Altprodukte erreicht werden [213], insbesondere da auch in vielen Anwendungsfeldern der Einsatz von Quecksilber verboten oder eingeschränkt wurde und so der Gesamtbedarf sank⁸⁸ [231]. Bei der Verwertung quecksilberhaltiger Batterien wird der im Vergleich zu den anderen metallischen Batteriebestandteilen besonders hohe Dampfdruck des Quecksilbers⁸⁹ genutzt (vgl. auch Tabelle 6-22), um dieses über die Gasphase aus den Batterien zu entfernen. Produkte der auf diesem Trennprinzip beruhenden Verfahren sind ein durch Kondensation aus der Gasphase zurückgewonnenes Quecksilber sowie ein weitgehend quecksilberfreier Rückstand, der in Abhängigkeit seiner Inhaltsstoffe einer weiteren Verwertung (etwa in der Stahlindustrie) oder einer schadlosen Beseitigung, sprich Deponierung, zugeführt wird. In Deutschland werden ausschließlich auf das Quecksilberrecycling spezialisierte Anlagen zur Verwertung quecksilberhaltiger Batterien (Knopfzellen) betrieben. Diese Anlagen werden im Folgenden vorgestellt. In der Regel werden die Anlagen nicht nur zur Aufbereitung von Knopfzellen sondern auch zur Behandlung weiterer quecksilberhaltiger Abfälle eingesetzt. Die für die Behandlung zu zahlenden Preise richten sich dabei nach der Art des Abfalls und der angelieferten Menge. Für gemischte Knopfzellen werden Preise von 6,50 - 12,50 DM/kg verlangt [94]. Sonderabfalldeponien stellen für hoch quecksilberhaltige Batterien keine Entsorgungsalternative dar, da i.d.R. durch die Genehmigungsbehörden deren Einlagerung untersagt ist [283]. Insbesondere durch die erwartete Umrüstung vom Amalgamverfahren auf die Membrantechnologie bei rund 60 Chlorgewinnungsanlagen in Europa

⁸⁸⁾ So sank von 1973 bis 1993 der Verbleib von Quecksilber in Deutschland von 346,3 auf 73,4 t [231].

⁸⁹⁾ Bei Normaldruck siedet Quecksilber bereits bei 357 °C.

werden sehr große Mengen quecksilberhaltigen Schrotts anfallen, die vor ihrem Recycling in der Stahlindustrie zunächst dekontaminiert werden müssen [120]. Vor diesem Hintergrund scheint die für den wirtschaftlichen Betrieb der Anlagen erforderliche Auslastung gegeben zu sein.

6.6.1 GMR, VTR-Verfahren

Die Gesellschaft für Metallrecycling (GMR), Leipzig, befasst sich seit ihrer Gründung 1991 mit dem Recycling quecksilberhaltiger Materialien. Zunächst beschränkte sich das mögliche Einsatzmaterial aufgrund der Größe der zur Quecksilberabtrennung benutzten Destillatoren auf relativ kleinvolumiges Aufgabegut. Seit 1998 betreibt das Unternehmen eine VTR-Anlage⁹⁰ der Firma ALD Vacuum Technologies, die durch ihr Nutzvolumen von drei Kubikmetern auch den Einsatz großer Teile ermöglicht [192]. Zu den für einen Einsatz in Frage kommenden quecksilberhaltigen Abfällen gehören etwa Gleichrichter, Senderöhren, Manometer, Schalter, Thermometer, Leuchtstofflampen, Knopfzellen, Böden, Bauschutt, Amalgamschrotte, sowie Schrotte aus der Erdgasförderung und der Chlor-Alkali-Elektrolyse [110].

Ein Fließbild einer VTR-Anlage ist in Abbildung 6-32 dargestellt.

⁹⁰⁾ VTR-Anlage: Vakuumtechnische Recyclinganlage

Verfahren/Unternehmen zur Verwertung verbrauchter Batterien

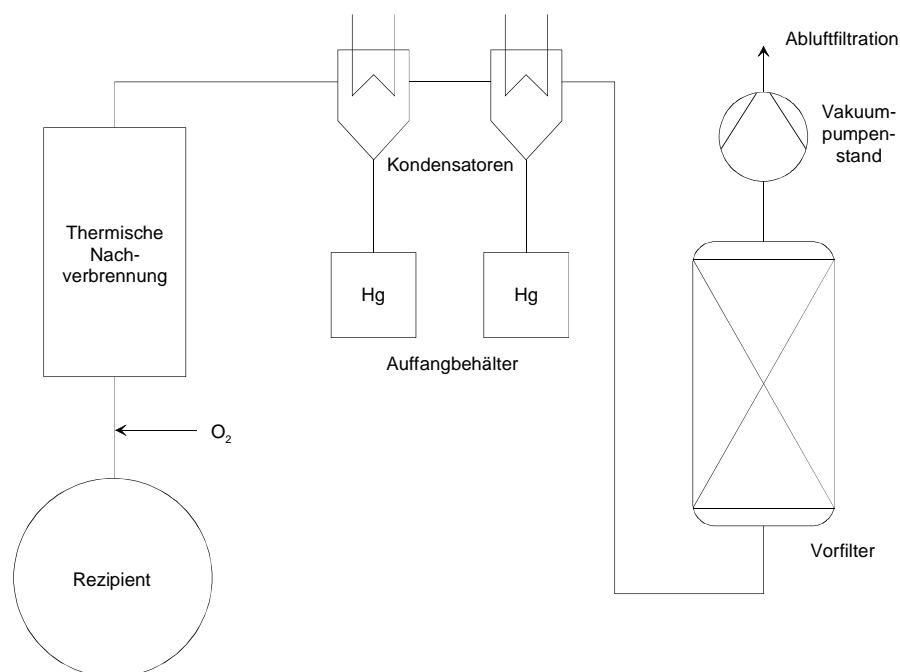


Abbildung 6-32: Fließbild einer VTR-Anlage

Quelle: [241]

Der Verfahrensablauf gliedert sich in der Regel wie folgt: Die angelieferten quecksilberhaltigen Abfälle werden sortiert und erforderlichenfalls mechanisch vorbehandelt, d.h. nach Möglichkeit wird bereits hier ein Großteil des Quecksilbers entfernt und so die zu destillierende Menge verringert. Nachdem geeignete Chargen zusammengestellt sind, werden diese in den Rezipienten chargiert und dessen Türe verschlossen. Das Material wird bei verschiedenen Unterdrücken (bis zu wenigen Millibar) auf Temperaturen zwischen 300 und 650 °C erhitzt. Der niedrige Druck bewirkt, dass die Siedetemperatur des Quecksilbers herabgesetzt wird (vgl. Tabelle 6-22) und so bessere Raum-Zeit-Ausbeuten während des Destillationsprozesses erreicht werden können und der Energiebedarf sinkt. Während der Aufheizphase platzen beim Einsatz von Batterien zunächst durch den Dampfdruck des Wassers aus den Elektrolyten die Batterien auf, ehe bei weiterer Temperaturzunahme Kohlenwasserstoffe aus Dichtungen, Bitumen und Papier entweichen. Um dabei keine schädlichen organischen Bestandteile und Quecksilberverbindungen im Abgasstrom zu erhalten, wird unter Luft- bzw. Sauerstoffzusatz eine Nachverbrennung des den Rezipienten verlassenden Abgasstroms bei 800 bis 1.000 °C durchgeführt.

Bei der nachfolgenden Quecksilberverdampfung im Rezipienten wird das Quecksilber in die Gasphase überführt und anschließend durch Kon-

densation als Rohquecksilber wieder aus der Gasphase abgeschieden. Das Rohquecksilber wird in einem mehrstufigen Raffinationsprozess auf bis zu 99,9999 % Reinheit aufbereitet und vermarktet. Der im Rezipient verbleibende Rückstand ist je nach Behandlungsdauer praktisch quecksilberfrei ($\text{Hg} < 10 \text{ ppm}$) und kann somit in Abhängigkeit der Zusammensetzung in Prozessen zur Metallerzeugung eingesetzt oder schadlos auf Deponien beseitigt werden [175], [192], [110].

Die Kapazität die Anlage beträgt 750 - 1.000 t/a, wobei die Kapazität von den eingesetzten Materialien und ihren Quecksilbergehalten abhängig ist. Die Verarbeitungskosten werden in einer Quelle mit 1.000 - 2.000 DM/t angegeben, wobei jedoch nicht klar ist, auf welche Art von Einsatzmaterial diese Werte bezogen sind [291].

6.6.2 NQR, VTR-Verfahren

Am Standort Lübeck betreibt die Nordische Quecksilber-Rückgewinnung GmbH & Co., ein zur Unternehmensgruppe Rethmann gehörendes Unternehmen, seit über 10 Jahren Anlagen zur Aufbereitung quecksilberhaltiger Abfälle. Ziel ist es, die Einsatzstoffe so zu behandeln, dass sie entweder wieder eingesetzt werden können oder sie in einen deponierbaren Zustand überführt werden. Seit 1996 wird das VTR-Verfahren (siehe Verfahrensbeschreibung in Abschnitt 6.6.1) eingesetzt. Ferner betreibt die NQR eine Reinstdestillationsanlage, in der das zurückgewonnene Quecksilber entsprechend den Anforderungen der Kunden auf Reinheitsgrade bis zu 99,999999 % raffiniert werden kann. Knopfzellen werden vor ihrem Einsatz im VTR-Verfahren in einer Sortieranlage nach dem ihnen zugrundeliegenden Stoffsystem sortiert. So gelangen die Batterien, die sich in ihren Quecksilbergehalten erheblich unterscheiden,⁹¹ in getrennten Chargen in die Vakuumdestillation und können so zielgerichtet⁹² behandelt werden [241]. Den Materialfluss bei der Aufbereitung verschiedener quecksilberhaltiger Abfälle zeigt Abbildung 6-33.

⁹¹⁾ Die Quecksilbergehalte liegen bspw. bei Zink/Quecksilberoxid-Knopfzellen bei bis zu 44 Gew.-%, während bei den meisten anderen Typen der Hg-Gehalt zum Teil deutlich unter 1 % liegt [27]. Mittlerweile ist durch die EU-Richtlinie 98/101/EG und ihre Umsetzung in der novellierten Batterieverordnung das in Verkehr bringen von Quecksilberoxidbatterien verboten (vgl. Kapitel 3).

⁹²⁾ Unterschiede ergeben sich insbesondere in der Dauer der Behandlung, die zur vollständigen Abdestillation erforderlich ist, und in der Temperaturführung.

Verfahren/Unternehmen zur Verwertung verbrauchter Batterien

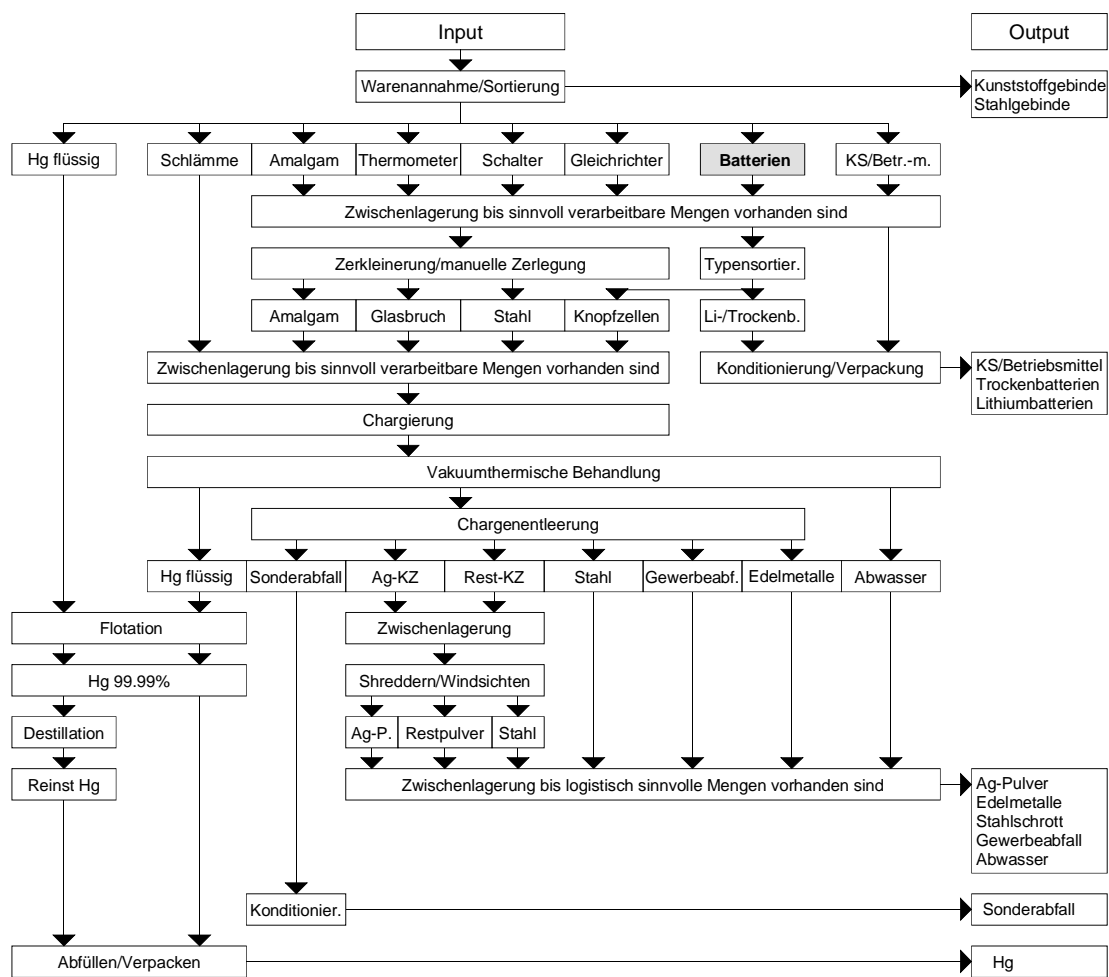


Abbildung 6-33: Materialfließbild bei der Aufbereitung quecksilberhaltiger Abfälle

Quelle: [241]

Batterien machten 1997 etwa 10 Gew.-% der eingesetzten Materialien aus. Zwischen 40 und 80 t/a Quecksilber werden zurückgewonnen, die direkt vermarktet werden [200].

6.6.3 Trienekens AG, MRT-Verfahren

Die Trienekens AG betreibt am Standort Grevenbroich, an dem sich auch eine Sortieranlage befindet (vgl. Abschnitt 5.1.2), eine Anlage zur Verwertung quecksilberhaltiger Knopfzellen nach dem MRT-Verfahren. Eine schematische Darstellung des MRT-Verfahrens ist in Abbildung 6-34 gegeben.

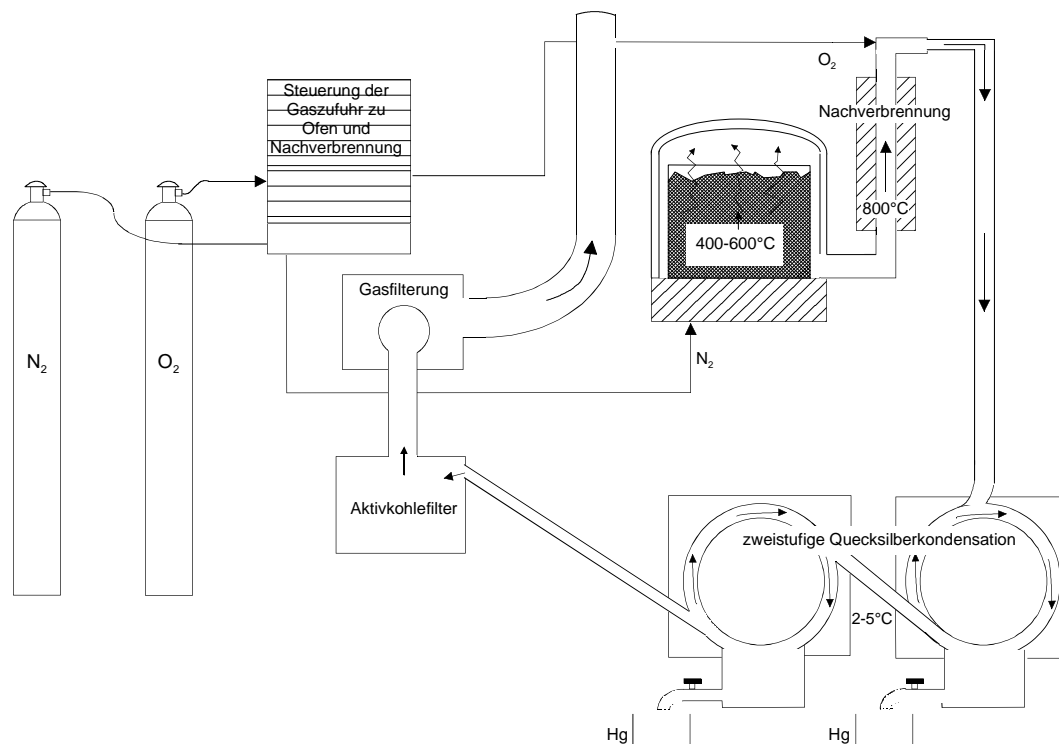


Abbildung 6-34: Schematische Darstellung einer MRT-Anlage

Quelle: [225]

Beim MRT-Verfahren werden die zu Chargen zusammengestellten Knopfzellen in einem geschlossenen Ofen auf rund 600°C erhitzt und 24 Stunden auf dieser Temperatur gehalten. Auch hier werden wie bei den in den vorhergehenden Abschnitten beschriebenen Anlagen durch die im Inneren der Knopfzellen verdampfenden Bestandteile (Wasser, Elektrolyt, etc.) der Deckel abgesprengt und so die Knopfzellen geöffnet. Das Abgas wird durch Sauerstoffzufuhr bei etwa $800 - 950^\circ\text{C}$ nachverbrannt und durch zwei Kühlfallen geleitet, in denen das Quecksilber kondensiert, ehe es über einen Aktivkohlefilter und eine Vakuumpumpe die Anlage verlässt [287], [131], [27].

6.6.4 Weitere Unternehmen und Verfahren

Die DeLuma Recycling GmbH betreibt in Frankleben (Sachsen-Anhalt) Verwertungsanlagen für Leuchtstofflampen und andere quecksilberhaltige Abfälle. Wie in den oben beschriebenen Verfahren wird auch hier das Quecksilber in einer Destillationsanlage aus den Abfällen zurückgewonnen. Obwohl das Unternehmen erfolgreich an der ersten Ausschreibung der GRS (siehe Abschnitt 4.1) teilgenommen hatte, hat das Unter-

nehmen nach eigenen Angaben bislang keine Batterien erhalten, so dass nähere Informationen über den Ablauf des Verwertungsprozesses nicht gemacht werden [60]. In der zweiten Ausschreibung der GRS ist die DeLuma Recycling GmbH nicht berücksichtigt [150].

6.7 Verfahren/Unternehmen zur Verwertung von lithiumhaltigen Batterien

Lithium wird sowohl in Akkumulatoren (Lithium-Ionen- und Lithium-Polymer-Akkus) als auch in Primärbatterien eingesetzt (etwa in den chemischen Systemen Lithium-Schwefeldioxid, Lithium-Thionylchlorid, Lithium-Mangandioxid und Lithium-Eisen), wobei insbesondere der Markt für Lithium-Akkumulatoren in den letzten Jahren ein erhebliches Wachstum aufwies (siehe Kapitel 2). Problematisch bei der Verwertung bzw. bei der Sammlung sind diejenigen lithiumhaltigen Batterien, bei denen Lithium im metallischen (elementarem) Zustand eingesetzt wird. Wie alle Alkalimetalle ist Lithium im elementarem Zustand sehr reaktionsfreudig, so dass etwa bei Beschädigung der Batteriehülle und Feuchtigkeitzutritt branderzeugende Reaktionen ablaufen können. Die Sammlung und Verwertung lithiumhaltiger Batterien stellt daher besondere Sicherheitsanforderungen. Die GRS rät etwa dazu, die Pole verbrauchter Lithiumbatterien (insbesondere aus dem Photobereich) vor der Rückgabe mit Klebestreifen zu isolieren. Größere Mengen sollten gesondert zurückgenommen werden [104]. Eine stoffliche Verwertung lithiumhaltiger Batterien findet derzeit in Deutschland nicht über Versuchsstadien hinausgehend statt. Weltweit gibt es nach dem bisherigen Erkenntnisstand nur in Nordamerika Unternehmen, in denen im industriellen Maßstab Lithiumbatterien verwertet werden [36].

6.7.1 Tieftemperaturzerlegung, ToxCo Inc.

Seit 1993 betreibt die 1984 gegründete ToxCo Inc., in Trail, Kanada, einen neuartigen Prozess zur Verwertung lithiumhaltiger Batterien. Das Unternehmen kann alle lithiumhaltigen Batterien recyceln, unabhängig von ihrer Größe und dem zugrunde liegenden chemischen System. Das Einsatzspektrum reicht dabei von klassischen Gerätebatterieformaten bis zu Spezialbatterien aus dem militärischen Bereich mit über 250 kg Gewicht [96]. Die angelieferten Lithiumbatterien werden nach System und Größe sortiert bis zu ihrer Verarbeitung in Betonbunkern gelagert. Die Verarbeitung beginnt nach der Entfernung von Verpackungsmaterial mit einer Abkühlung der Batterien durch Eintauchen in ein Bad mit flüssigen Stickstoff. Die Abkühlung erfordert je nach Größe der Batterien 1 bis 24

Stunden [96]. Durch die so erreichbaren sehr niedrigen Temperatur (der Siedepunkt von Stickstoff liegt bei minus 196 °C) wird die hohe Reaktionsfähigkeit des in den Batterien enthaltenen metallischen Lithiums und anderer Bestandteile soweit herabgesetzt, dass die weiteren Behandlungsschritte vergleichsweise gefahrlos durchgeführt werden können. Dennoch werden nach Firmenangaben die meisten Arbeitsschritte zur Sicherheit der Arbeiter ferngesteuert ausgeführt [285]. Die gekühlten Batterien werden abgeschert bzw. geschreddert und mit einer alkalischen Lösung (Natriumhydroxid, NaOH) zur Reaktion gebracht. Die Batterien werden je nach Größe durch bis zu zwei weitere Zerkleinerungs- und Reaktionsstufen geleitet, damit die vollständige Abreaktion der reaktiven Bestandteile gewährleistet ist. Dabei freiwerdender Wasserstoff wird kontrolliert an der Oberfläche des Bades durch Kontakt mit aufschwimmenden, brennendem Lithium verbrannt. Lithium und Lithiumsalze werden in der Lauge gelöst und gezielt ausgefällt. Die Laugungsrückstände (Metallschrott, Kunststoffe) werden nach Auflösung des Lithiums den Tanks entnommen und können weiteren Verwertungsprozessen zugeführt oder beseitigt werden [36]. Das ausgefällte Lithium wird als Lithiumcarbonat vermarktet. Die Verarbeitungskapazität wurde für 1999 mit rund 3.500 t im Zweischichtbetrieb angegeben [96]. Sofern die eingesetzten Lithiumbatterien Kobalt enthalten, wird auch dieses zurückgewonnen. Über die Art und Weise dieser Rückgewinnung waren keine Informationen verfügbar; es ist jedoch davon auszugehen, dass es sich dabei um eine gezielten Löse- bzw. Ausfällreaktion handelt.

6.7.2 Weitere Verfahren

Ein Verfahren zur Verwertung von Lithium-Ionen Batterien wurde von dem britischen Unternehmen AEA Technology Batteries entwickelt und patentiert [3]. Bislang wurde noch keine großtechnische Umsetzung durchgeführt; es wurde jedoch eine Demonstrationsanlage entwickelt, in der die drei nachfolgend beschriebenen Prozessschritte miteinander verbunden ablaufen können. Die Hauptschritte des AEA-Verfahrens sind die Elektrolytextraktion, die Auflösung der Elektroden und die Kobaltreduktion [166].

Die Zellen werden zunächst in einer inerten Atmosphäre geschreddert und in einem geeigneten Lösemittel mehrere Stunde zur Herauslösung des in den Poren der Elektroden und des Separators dispensierten Elektrolyten behandelt. Die so gewonnene Lösung wird unter reduziertem Druck eingedampft, wodurch das Lösemittel und der Elektrolyt zurückgewonnen werden können. Die Temperatur in diesem Schritt muss auf unter 80 °C eingestellt sein, da sich anderenfalls das Lithiumsalzes im Elektrolyten zer-

setzt. Dadurch wird die Wahl des Lösemittels leicht eingeschränkt. Die Elektroden werden durch Eintauchen in ein bewegtes, auf rund 50 °C aufgeheiztes Lösemittelbad gelöst. Dabei trennen sich die Elektrodenpartikel von zurückbleibenden Kupfer, Aluminium, Stahl und Kunststoff. Die letztgenannten können aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften (Dichte, Magnetismus) voneinander separiert werden. Die suspensierten Elektrodenpartikel werden aus der Lösung herausgefiltert. Die elektrochemische Kobalt-Reduktion aus den abfiltrierten Elektrodenpartikeln (im Wesentlichen Lithium-Kobalt-Oxid) wird zur Vermeidung von Wasserstoffbildung in wässriger Lithiumhydroxidlösung vollzogen. Dabei löst sich das Lithium aus der Elektrodenpartikelstruktur und Kobalt (III) wird zu Kobalt (II) reduziert. Lithium wird als Lithiumhydroxid gewonnen. Kobalt ist das wirtschaftlich wichtigste Recyclingprodukt des Prozesses [166].

6.8 Schadlose Beseitigung nicht verwertbarer Batterien

Sofern zurückgenommene Batterien aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen nicht verwertet werden können, stellt in der Regel das Verbringen auf Sonderabfalldeponien (SAD) den umweltverträglichsten Beseitigungsweg dar. Ausnahmen sind hier nur die metallisches Lithium enthaltenden Batterien, da bei diesen aufgrund der hohen Reaktivität des Alkalimetalls, die zu Bränden im Deponiekörper führen kann, eine Behandlung in Sondermüllverbrennungsanlagen zu bevorzugen ist. Die Deponierung auf SAD kostet nach einer im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Umfrage bei verschiedenen Sonderabfalldeponiebetreibern, bei der einigen Unternehmen der Verzicht auf Quellenangaben zugesagt wurde, zwischen knapp 200 und rund 500 DM/t. Je nach Betreiber ist der Preis von der angelieferten Menge abhängig: Je größer die zu deponierende Menge, desto geringer der je Tonne zu zahlende Preis. Die Kosten der Behandlung von Lithiumbatterien, die nicht auf Sonderabfalldeponien verbracht und statt dessen in Sonderabfallverbrennungsanlagen verbrannt werden, liegen in der Größenordnung von 1.400 bis 3.700 DM/t. In diesen Kosten sind bei je nach Betreiber der Aufwand für Zwischenlagerung und Transporte bereits enthalten [261], [115], [132]. Bei gut geführten, nach dem aktuellen Stand der Technik errichteten Deponien ist nicht mit nennenswerten Umweltbeeinträchtigungen durch die Beseitigung der Batterien zu rechnen [39]. Das in der Umweltgesetzgebung verankerte Ziel, nach Möglichkeit Abfälle zu verwerten (vgl. Kapitel 3) und somit die z.T. knappen natürlichen Ressourcen zu schonen, wird jedoch nicht erreicht. Eine Studie für das britische Department of Trade and Industry kommt ferner zu dem Ergebnis, dass es unter Umweltschutzge-

sichtspunkten am effizientesten ist, einen möglichst großen Anteil einmal gesammelter Gerätebatterien zu verwerten [72]. Es steht zu erwarten, dass der Anteil der auf Deponien beseitigten Batterien zukünftig weiter abnehmen wird. Zum einen liegt dies an den bestehenden und sich abzeichnenden (Mit-)Verwertungsoptionen für quecksilberfreie Alkali/Mangan-, Zink/Kohle- und Zink/Luft- Batterien in der NE- sowie der Eisen- und Stahlindustrie und den für die nächsten Jahre erwarteten Rückgang des Quecksilbergehaltes der zurückgenommenen Batterien auf maximal 5 ppm.⁹³ Die Verwertungskosten bewegen sich im gleichen Rahmen wie die Deponiekosten, so dass wirtschaftliche Argumente nur noch bedingt gegen Forderungen nach höheren Recyclingquoten geltend gemacht werden können. Zum anderen werden durch die zunehmende automatische Sortierung der gesammelten Batteriemische (und insbesondere die Sortierung nach UV-Markierung) größere Mengen homogener Batteriefractionen anfallen, wodurch ihnen mehr und preiswertere Verwertungsoptionen offen stehen als sie etwa derzeit für Batteriemische bzw. nur grob sortierte Batterien vorhanden sind.

6.9 Bewertung bestehender und möglicher Verwertungswege für Batterien

Im Rahmen des vorliegenden Berichtes wird eine Bewertung bestehender und möglicher Verwertungswege für verbrauchte Batterien durchgeführt. Dabei liegt ein Schwerpunkt auf den technischen Verfahren zur *Verwertung*, da in den beiden weiteren Teilschritten der Rücknahmelogistik - *Sammlung* und *Sortierung* - in Deutschland keine grundlegenden Veränderungen absehbar sind. So ist etwa die grundsätzliche Frage, ob schadstoffhaltige Batterien getrennt gesammelt werden sollen, in Deutschland bereits - basierend auf den Erfahrungen mit der Selbstverpflichtung der Industrie und des Handels von 1988 - entschieden. Unternehmen wie Duracell [153] favorisieren dagegen wegen der erheblichen Transporte (vgl. [72] zur aktuellen Diskussion in Großbritannien) nur die Sammlung und Sortierung schadstoffhaltiger Batterien.⁹⁴

⁹³) Die GRS zielt im Zuge der abnehmenden Quecksilbergehalte innerhalb der nächsten fünf Jahre auf Verwertungsquoten von über 70 % ab [104].

⁹⁴) Die restlichen Batterien sollen dabei über eine Metallabscheidung aus dem Hausmüllstrom abgetrennt werden.

Zur Bewertung der Verwertungsverfahren wird im Folgenden zunächst eine strukturierte Vorgehensweise vorgestellt, mit der die Identifikation aussichtsreicher Verwertungswege unterstützt werden kann (Abschnitt 6.9.1). Die im vorliegenden Projekt vorgenommene Bewertung wurde auf die derzeitige Informationslage zugeschnitten und beinhaltet als zentralen Schritt die Festlegung von Bewertungskategorien, die in Abschnitt 6.9.2 definiert, erläutert und auf die vorgestellten Verwertungsverfahren angewendet werden. Wie sich die Situation darstellt, wenn von anderen Rahmenbedingungen ausgegangen würde, die eine Deponierung fast aller Batterietypen zuließen, wird in Abschnitt 6.9.3 diskutiert. Die zentralen Schlussfolgerungen werden in Abschnitt 6.9.4 vorgestellt.

6.9.1 Bewertungsmethode zum Technik- und Anlagenvergleich

Prinzipiell ähneln sich die mit der Bewertung bestehender und möglicher Verwertungswege für Batterien verbundenen Fragestellungen mit denen bei der Bestimmung der „besten verfügbaren Techniken“ (BVT) im Rahmen der IVU-Richtlinie.⁹⁵ Diese Bestimmung wird derzeit für zahlreiche Industriesektoren durchgeführt. Den besten verfügbaren Techniken kommt durch die IVU-Richtlinie besondere Bedeutung zu, da sie als Grundlage für die Festlegung von Referenzwerten und die Anlagenzulassung dienen werden. Charakteristisch für BVT im Sinne der IVU-Richtlinie ist eine medienübergreifende, integrierte Betrachtung, die prinzipiell auch für die hier betrachteten Verwertungsverfahren für Batterien anzustreben ist. Zur BVT-Bestimmung wie auch zur Bewertung von Batterieverwertungsverfahren ist eine Methode zur medienübergreifenden Technikbewertung erforderlich, die es erlaubt, Techniken mit einem hohen garantierten Schutzniveau für die Umwelt insgesamt zu identifizieren [237].

Um die Arbeiten der von der EU-Kommission eingesetzten „Technical Working Groups“ (TWG) zu unterstützen, erstellt das Umweltbundesamt nationale BVT-Positionspapiere für bestimmte von der IVU-Richtlinie betroffene Sektoren. Das Deutsch-Französische Institut für Umweltforschung (DFIU) hat im Auftrag des Umweltbundesamts⁹⁶ u.a. eine entspre-

⁹⁵) IVU-Richtlinie: Richtlinie der Europäischen Gemeinschaft über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU-RL, 96/61/EG)

⁹⁶) U.a. im Rahmen des Projektes „Exemplarische Untersuchung zum Stand der praktischen Umsetzung des integrierten Umweltschutzes in der Metallindustrie und

chende Methodik zur medienübergreifenden Bewertung von BVT entwickelt. Auf diese Bewertungsmethodik kann grundsätzlich auch bei der Bewertung vorhandener sowie potentieller Verwertungswege für Batterien im Hinblick auf deren ökologische Güte zurückgegriffen werden. Abbildung 6-35 veranschaulicht das grundsätzliche Vorgehen der integrierten Bewertungsmethode (nach [100]). Im Folgenden werden die in der Abbildung dargestellten Schritte zur Entscheidungsfindung erläutert und im Zusammenhang mit den hier relevanten Fragestellungen der Batterieverwertung diskutiert.

Entwicklung von generellen Anforderungen“ (Forschungskennzeichen 109 05 006, [238]).

Verfahren/Unternehmen zur Verwertung verbrauchter Batterien

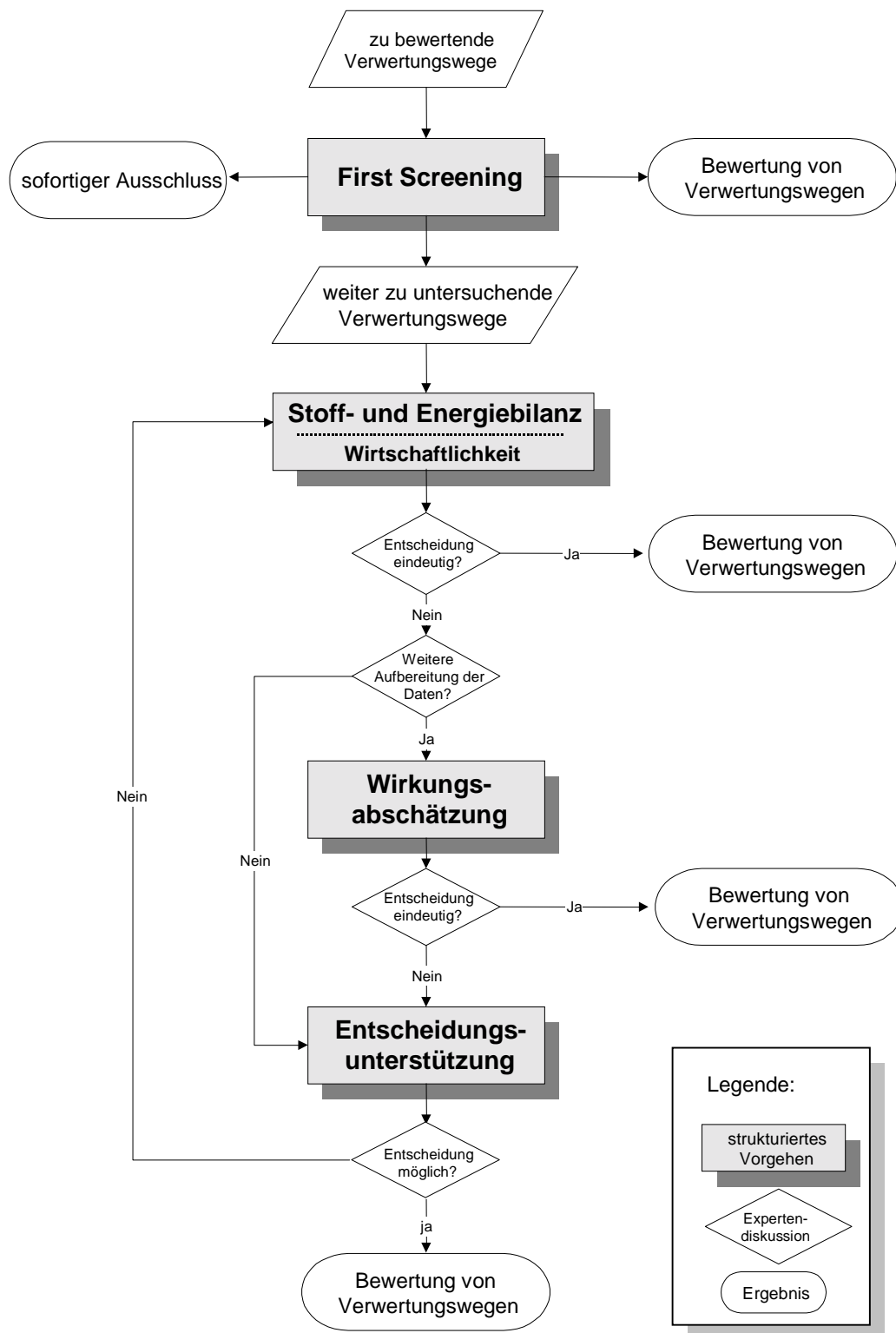


Abbildung 6-35: Ablaufschema der Methode zur Bewertung der Verwertungswege von Batterien

Quelle: in Anlehnung an [237]

Das **First Screening** umfasst die Auswahl der zu untersuchenden Techniken bzw. Batterieverwertungsverfahren aus den verfügbaren Verwertungsverfahren. Die Nichteinhaltung geltender Emissionsgrenzwerte gilt als Ausschlusskriterium für ein untersuchtes Verfahren und führt, falls keine Nachbesserung der Technik möglich ist, zu einem „sofortigen Ausschluss“, d.h. diese Option ist nicht in weitere Betrachtungen einzubeziehen. Gleichzeitig bedürfen seinerseits Verwertungsoptionen ohne relevante Umweltauswirkungen oder auch Verwertungswege, die geltende Emissionsgrenzwerte einhalten und zu denen es keine technischen Alternativen gibt, keiner weiteren detaillierten Untersuchung und werden sofort als „beste Verwertungswege“⁹⁷ identifiziert. Die übrigen Verwertungswege werden dem nächsten Bewertungsschritt zugeführt.

Während bei der BVT-Bestimmung davon ausgegangen wird, dass die untersuchten Verfahren wirtschaftlich sind, da sie anderenfalls nicht betrieben würden, ist diese Fragestellung bei der Verwertung von Batterien mit in den nächsten Schritt einzubeziehen. So können Verfahren, wie etwa der Batrec-(Sumitomo-)Prozess (vgl. Abschnitt 6.2.3), aufgrund der besonderen Bedingungen im „Gastland“⁹⁸ wirtschaftlich Batterien verwerten, während für Batterien aus anderen Ländern kostengünstigere Alternativen bestehen, sie sich also bei einem dortigen Standort nicht unbedingt am Markt behaupten könnten. Neben der rein betriebswirtschaftlichen Betrachtung der Profitabilität des Verwertungsverfahrens ist hier auch die wirtschaftliche Zumutbarkeit der Verwertung von Batterien im untersuchten Verfahren zu überprüfen. Dies ist insbesondere dann relevant, wenn für die prinzipiell im untersuchten Verfahren einsetzbaren Batteriefraktionen auch die Beseitigung statthaft ist und erhebliche Unterschiede zwischen den Annahmepreisen des Verwertungsunternehmens und den für die Beseitigung zu zahlenden Gebühren vorhanden sind.

In Deutschland ist insbesondere ein Vergleich mit den Sonderabfalldeponien zur Untersuchung der wirtschaftlichen Tragfähigkeit erforderlich. Ferner ist der Batterierecyclingmarkt ein im Vergleich zu den Sektoren, in den BVT bestimmt werden, ein verhältnismäßig junges Marktsegment, in dem sowohl auf der Prozessseite ständig Innovationen zu verzeichnen sind als auch in vielen Teilbereichen noch keine stabile Markt-

⁹⁷⁾ Ggf. auch „einziger Verwertungsweg“.

⁹⁸⁾ Die Batrec Industrie AG ist das einzige Verwertungsunternehmen für Batterien in der Schweiz und verbrauchte Batterien dürfen dort i.d.R. nicht außer Landes gebracht werden, so dass eine Monopolstellung bezogen auf den Schweizer Markt besteht.

verteilung festzustellen ist. Es ist daher nicht auszuschließen, dass Unternehmen versuchen, durch niedrige Annahmgebühren, mit denen die Verwertungskosten derzeit nicht vollständig gedeckt werden können, Marktanteile zu gewinnen und Mitbewerber zu verdrängen.⁹⁹

Für die weiter zu untersuchenden Verwertungswege ist im nächsten Schritt daher neben einer **Stoff- und Energiebilanz**, bei der für die untersuchten Verfahren die Ermittlung und Sammlung aller relevanten Einsatzmengen, Emissions- und Energiedaten erfolgt, eine Untersuchung der **Wirtschaftlichkeit** zu erstellen. Bei diesem Schritt kann auf Experten zurückgegriffen werden, die über die Erweiterung der zu untersuchenden Verwertungswege um Vorstufen oder nachgeschaltete Prozesse sowie über die Einschränkung auf relevante Emissionen und Einsatzmengen entscheiden. Sowohl im First Screening als auch bei der Erstellung der Stoff- und Energiebilanzen kann somit durch Einbeziehung von Experten eine Eingrenzung und Reduzierung des Untersuchungsaufwandes erfolgen. Wenn bereits anhand der (ggf. graphisch aufbereiteten) Informationen aus diesen beiden Schritten eine Bewertung im Expertenkreis möglich ist, kann das Verfahren beendet werden. Im Bereich der Batterieverwertung ist an dieser Stelle derzeit jedoch ein modifiziertes Verfahren anzuwenden: Zum einen sind derzeit aufgrund der ausgeprägten Konkurrenzsituation nur verhältnismäßig wenige Unternehmen bereit, ausreichende und belastbare Daten über ihre eingesetzten Verwertungsverfahren zur Verfügung zu stellen, so dass zum Teil die in Tabelle 6-34 bis Tabelle 6-38 zusammengefassten Ergebnisse der Gegenüberstellung der Verfahren auf Abschätzungen beruhen. Zudem ist es aufgrund der in den meisten Teilbereichen des Batterieverwertungsmarktes noch zu verzeichnenden Marktverschiebungen derzeit noch unwahrscheinlich, dass eine Expertenrunde, in der notwendigerweise die Betreiber der Verfahren vertreten sein müssen, klare und einvernehmliche Entscheidungen hervorbringen könnte.

Sollten aufgrund der vorliegenden Stoff- und Energiebilanzen sowie der wirtschaftlichen Bewertung noch keine abschließende Einstufung der untersuchten Verwertungswege erfolgen können, sind in der **Wirkungsabschätzung** die einzelnen Stoffe hinsichtlich ihrer potentiellen Umwelt-

⁹⁹⁾ Insbesondere durch den derzeit noch geringen Anteil der gesammelten Batterien, die einer Verwertung zugeführt werden, ist die Kapazitätsauslastung der Batterieverwertungsanlagen zum Teil sehr gering. Da somit die fixen Kosten nur auf eine geringe Menge Batterien verteilt werden können, sind die Verwertungskosten derart hoch, dass sie am Markt nicht durchgesetzt werden können.

wirkungen zu klassifizieren und - soweit möglich - in Wirkungskategorien zusammenzufassen. Dieser Schritt erfolgt in enger Anlehnung an die Ökobilanz, wie sie vom UBA für die ökologische Bewertung von Getränkeverpackungen entwickelt und angewendet wurde [293]. Für eine standortunabhängige, d.h. zunächst die mit dem Batterietransport verbundenen Belastungen ausklammernde, ökologische Bewertung von Verwertungswegen sind prinzipiell die Wirkungskategorien unmittelbar geeignet, die überwiegend regional und überregional relevante Umweltauswirkungen quantifizieren und wissenschaftlich ausreichend abgesichert sind: *Treibhauseffekt, Ozonabbau, Versauerung der Gewässer und Böden, Eutrophierung der Gewässer* und *Bildung von Photooxidantien*. Um die Bewertung von Verwertungswegen pragmatisch zu unterstützen, könnten zudem die Wirkungskategorien *Ressourcenverknappung, Humantoxizität, Ökotoxizität* und *Abfall* modifiziert herangezogen werden [237].

Allerdings ist hier einschränkend anzumerken, dass neben der bereits angesprochenen, momentan z.T. noch mangelhaften Datenlage derzeit aufgrund der komplexen Zusammenhänge für einige Wirkungskategorien noch keine konsensfähigen Aggregationsmethoden vorliegen. Eine derartige Verdichtung der in der Sachbilanz enthaltenen Informationen in Wirkungskategorien könnte die abschließende Entscheidung erleichtern. Insbesondere aufgrund der bislang noch nicht ausreichend erforschten (medienübergreifenden) Cross-Media Effekte gibt es derzeit keine abgesicherte wissenschaftliche Grundlage, die Wirkungskategorien weiter zu aggregieren. Daher ist es noch nicht möglich, eine eindeutige Rangfolge der untersuchten Verwertungswege anhand von Wirkungskategorien abzuleiten. Grundsätzlich kann die Bewertung an dieser Stelle enden, falls Experten anhand der Wirkungsabschätzung und ergänzend anhand der Stoff- und Energiebilanz eine einvernehmliche Bewertung alternativer Verwertungswege vornehmen können.

Anderenfalls wird als **Entscheidungsunterstützung** eine aussagekräftige Datenaufbereitung und ein strukturiertes Vorgehen vorgeschlagen, um eine zielgerichtete Expertendiskussion zur Entscheidung über eine Rangfolge der Verwertungsverfahren zu ermöglichen. Die Datenaufbereitung erfolgt durch Normierung auf die Mittelwerte der jeweiligen Bewertungskategorien. Die einzelnen Bewertungskategorien werden im Expertenkreis gewichtet, um ihre Bedeutung für die Entscheidung adäquat zu berücksichtigen. Als Orientierung für die Gewichtung wird dazu die mengenmäßige Relevanz durch den Vergleich mit europäischen Emissionsdaten abgeschätzt (in der Ökobilanz als Normalisierung bezeichnet). Eine formale Methode in der paarweise Vergleiche der zu untersuchenden Verwertungsverfahren vorgenommen werden, wertet die bisherigen Er-

gebnisse multikriteriell aus und bietet eine geeignete Grundlage für die abschließende Bewertung.

Die vorgestellte Methodik bildet eine strukturierte Vorgehensweise für eine gestufte Entscheidungsfindung über zu bewertende Verwertungswege und kann für die Batterieverwertung prinzipiell herangezogen werden. Aufgrund der diskutierten, momentan noch zu verzeichnenden Defizite im Bereich der Informationslage - insbesondere sind hiervon die Schritte der Wirkungsabschätzung sowie der (formalen) Entscheidungsunterstützung aufgrund der angesprochenen unzureichenden Datenlage sowie des derzeit nicht zielführend zu besetzenden Expertenkreises betroffen - wird zur Bewertung der Verwertungswege im vorliegenden Vorhaben ein modifiziertes Verfahren angewendet, das den derzeitigen Informationsdefiziten Rechnung trägt. Dennoch finden sich die geschilderte Vorgehensweise und die genannten Kriterien indirekt in der im folgenden Abschnitt vorgestellten vergleichenden Bewertung der Verwertungsprozesse wieder.

6.9.2 Vergleichende Bewertung der Verwertungsprozesse

Um eine fundierte Übersicht über die Verwertungswege für Batterien zu geben, die ergänzend zu den Verfahrensbeschreibungen (Abschnitte 6.2 - 6.7) eine zügige Einordnung der untersuchten Verfahren ermöglicht, wird in diesem Abschnitt, aufbauend auf den grundsätzlichen Erläuterungen zur strukturierten Bewertungsmethodik (Abschnitt 6.9.1), eine vergleichende Bewertung vorgenommen.

Dazu werden zunächst die Kriterien erläutert, die zur Bewertung herangezogen werden können (vgl. Tabelle 6-25). Die ersten vier Kriterien (A - D) beziehen sich dabei im Wesentlichen auf den benutzten Recyclingprozess als solchen, wohingegen die nachfolgenden Kriterien (E - H) auf die jeweilige Einzelanlage und ihren Betreiber abzielen:¹⁰⁰

¹⁰⁰⁾ In den vorangehenden Darstellungen der Verwertungsverfahren ist z.T. auf die Bewertungskriterien eingegangen worden, insbesondere dann, wenn ein Verfahren bzgl. eines Kriteriums deutlich von der Bewertung anderer Verfahren in der gleichen Kategorie abweicht.

Tabelle 6-25: Bewertungskriterien für die untersuchten Verwertungswege

	Notation	Kriterium
Prozessbezogene Kriterien	A	Vermeidung von Schadstoffeinträgen in die Umwelt
	B	Grad der Verwertung
	C	Wirtschaftlichkeit, Kosten der Verwertung
	D	Anforderungen an Einsatzstoffe
Anlagenbezogene Kriterien	E	Standort des Anlage
	F	Betriebserfahrung
	G	Kapazität
	H	Transparenz/Öffentlichkeitsarbeit

Prozessbezogene Kriterien:

1) A: Vermeidung von Schadstoffeinträgen in die Umwelt

Hauptziel der durch die Batterieverordnung initiierten Rücknahme- und Verwertung verbrauchter Batterien ist die Vermeidung von Schadstoffeinträgen in Abfälle und damit mittelbar in die Umwelt. Jedes Verfahren zur Verwertung von Batterien muss daher durch sein charakteristisches Emissionsverhalten und die Art und Menge der anfallenden, nicht weiter verwertbaren Kuppelprodukte eine Verbesserung im Vergleich zur nicht mehr statthaften Beseitigung von Batterien mit dem sonstigen Hausmüll darstellen. In der vergleichenden Bewertung der Verwertungsverfahren wird mittels Pfeilen¹⁰¹ die Einordnung des Verfahrens vorgenommen; die zugehörige Legende wird in Tabelle 6-26 vorgestellt. Zur besseren Abbildung der Prozesse wurden zwei Kategorien gebildet, um die Vermeidung von Schadstoffeinträgen in die Umwelt zu bewerten.

¹⁰¹) Prinzipiell gilt im Folgenden, dass nach oben weisende Pfeile auf eine günstigere Merkmalsausprägung hinweisen als nach unten gerichtete.

Tabelle 6-26: Legende zum Kriterium Vermeidung von Schadstoffeinträgen in die Umwelt

Symbol	Bedeutung
	<i>A1: Umweltbelastung durch die Verwertung</i>
↑	Die Umweltbelastung ist vergleichsweise niedrig; die Emissionsschutzmaßnahmen sind gut geeignet, Umweltbelastungen zu vermeiden.
↓	Die Umweltbelastung ist vergleichsweise hoch; die Emissionsschutzmaßnahmen sind nicht ausreichend.
	<i>A2: Ressourceneinsatz zur Verwertung (Energie- und Hilfsstoffverbrauch)</i>
↑	Es ist ein vergleichsweise geringer Einsatz von Energie und anderen Ressourcen für den Verwertungsprozess erforderlich.
↓	Es ist ein vergleichsweise hoher Einsatz von Energie und anderen Ressourcen für den Verwertungsprozess erforderlich.

Beim Kriterium Umweltbelastung durch die Verwertung ist - sofern verfügbar - zunächst der Abgleich genehmigter und gemessener Emissionswerte in die Umweltmedien Luft und Wasser über Abgase und Abwässer durchgeführt worden. Da die berücksichtigten Werte i.d.R. durch die Unternehmen selbst bereitgestellt wurden, überrascht es nicht, dass keine Überschreitungen von Grenzwerten festgestellt werden können. Soweit aus der verfügbaren Literatur zu entnehmen und z.T. durch Betriebsbesichtigungen festgestellt werden konnte, verfügen die untersuchten Anlagen sämtlich über geeignete Emissionsschutzmaßnahmen, die bei ordnungsgemäßen Betrieb ein hohes Schutzniveau der Umwelt gewährleisten. Ferner wurde bei diesem Kriterium mit berücksichtigt, in wie weit durch die Verwertungsprozesse Schadstoffe (hier im Wesentlichen Schwermetalle) in Produkten und Kuppelprodukten aufkonzentriert bzw. verdünnt werden. Aufgrund der verfügbaren Daten ist eine Aufteilung des Kriteriums etwa in die einzelnen Umweltmedien nicht zielführend.

Der Einsatz von Energie und Hilfsstoffen wird im Kriterium „Ressourceneinsatz zur Verwertung“ erfasst. Die zwangsläufig bei vielen metallurgischen Prozessen auftretende Problematik der Abgrenzung zwischen Energieträger und Hilfsstoff (hier i.d.R.: Reduktionsmittel) bei Kohlenstoffträgern wie Koks, Kohle oder auch Gas wird durch die Zusammenfassung in einem Kriterium vermieden. In den vorangehenden Verfahrensbeschreibungen sind die wesentlichen eingesetzten Ressourcen dargestellt. Zur Quantifizierung wird z.T. auf Abschätzungen zurückgegriffen.

2) B: Grad der Verwertung

Der qualitative und quantitative Grad der Verwertung sollte möglichst hoch sein, d.h. diejenigen Verfahren sollten bevorzugt werden, die zu einer möglichst weitgehenden stofflichen Verwertung der verschiedenen Batterieinhaltsstoffe führen. Dabei ist bei gleichwertigem Ressourceneinsatz (vgl. Spalte „Ressourceneinsatz zur Verwertung“ in Tabelle 6-25) zur

Verwertung das Verfahren mit den hochwertigeren Produkten zu bevorzugen. So ist etwa die Rückgewinnung von Lithium und/oder Seltenen Erden aus Lithium-Batterien bei ähnlichen Ressourceneinsatz höher zu bewerten als die reine Inaktivierung der Batterien, also quasi der Verzicht auf eine Verwertung der Wertstoffe, durch entsprechende Verfahrensschritte. Zur Bewertung ist demnach auch die Betrachtung des weiteren Verbleibs der Hauptverwertungs- und der Kuppelprodukte erforderlich, so dass für dieses Kriterium die Absetzbarkeit der Produkte als weiteres Unterkriterium berücksichtigt wird (vgl. Tabelle 6-27). Nach Möglichkeit sollen die Prozesse so gestaltet sein, dass die Produkte vermarktbar sind und keine bloße Transformation von einem Sonderabfall in einen anderen stattfindet. Die Legende zu diesem Kriterium ist in Tabelle 6-27 wiedergegeben.

Tabelle 6-27: Legende zum Kriterium Grad der Verwertung

Symbol	Bedeutung
	<i>B1: Grad der Verwertung</i>
↑	Es findet im vergleichsweise hohem Maße eine stoffliche bzw. energetische Verwertung statt; die Batterieinhaltsstoffe werden zu einem großen Teil stofflich oder energetisch genutzt.
↓	Es findet im vergleichsweise geringem Maße eine stoffliche bzw. energetische Verwertung statt; die Batterieinhaltsstoffe werden nur zu einem kleinen Teil stofflich oder energetisch genutzt.
	<i>B2: Absetzbarkeit der Produkte</i>
↑↓	Die wesentlichen Produkte und Kuppelprodukte sind gut vermarktbar.
↓↑	Die wesentlichen Produkte und Kuppelprodukte sind nur bedingt absetzbar.

3) C: Wirtschaftlichkeit, Kosten der Verwertung

Beim Kriterium der Wirtschaftlichkeit bzw. der Abschätzung der Kosten der Verwertung wird beurteilt, inwieweit mit den einzelnen Verfahren durch den Erlös marktfähiger Recyclingprodukte eine Kostendeckung erreicht werden kann bzw. in welcher Höhe zusätzliche Annahmgebühren für zu verwertende Batterien erhoben werden. Entsprechende Daten sind naturgemäß schwer zu ermitteln und unterliegen in der Regel der unternehmensinternen Geheimhaltung. Daher wird hier nur ein grober, qualitativer Vergleich durchgeführt, in dem etwa Abschätzungen für Prozesskosten einfließen.

Tabelle 6-28: Legende zum Kriterium Wirtschaftlichkeit

Symbol	Bedeutung
	<i>C: Wirtschaftlichkeit</i>
↑	Die Erlöse aus den Recyclingprodukten decken einen großen Teil der Prozesskosten; im Vergleich zur Deponierung (falls statthaft) ist das Recycling wirtschaftlich tragbar.
↓	Die Erlöse aus den Recyclingprodukten decken nur zu einen kleinen Teil der Prozesskosten; im Vergleich zur Deponierung (falls statthaft) ist das Recycling erheblich kostenintensiver.

4) *D: Anforderungen an Einsatzstoffe*

In dieser Kategorie wird festgestellt, wie empfindlich bzw. robust die untersuchten Verfahren gegenüber stofflichen Verunreinigungen sind. Daraus können unmittelbar die geforderten Sortierqualitäten abgeleitet werden. Beispielsweise verunreinigen bereits geringe Mengen zinkhaltiger Batterien in Prozessen für die Verwertung von Ni/Cd-Batterien das dabei erzeugte Cadmium derart, dass es vor einer Vermarktung raffiniert werden muss. Ferner sind die Abgasreinigungssysteme in vielen Anlagen der Metallindustrie nicht auf die vollständige Entfernung des bei der Batterieverwertung freigesetzten Quecksilbers ausgelegt, so dass ein quecksilberarmes Einsatzmaterial garantiert werden muss. Die zugehörige Legende findet sich in Tabelle 6-29.

Tabelle 6-29: Legende zum Kriterium Anforderungen an die Batteriefractionen

Symbol	Bedeutung
	<i>D: Anforderungen an Batteriefractionen</i>
↑	Es ist eine nur eine bedingte Reinheit der zur Verwertung angenommen Batteriefractionen erforderlich; der Verwertungsprozess und nachgeschaltete Anlagen reagieren robust auf Problemstoffeinträge.
↓	Es ist eine hohe Reinheit der zur Verwertung angenommen Batteriefractionen erforderlich; der Verwertungsprozess und nachgeschaltete Anlagen reagieren empfindlich auf Problemstoffeinträge.

Anlagenbezogene Kriterien:

5) *E: Transportaufwand*

Mit diesem Kriterium werden Transportwege von den Batteriesortieranlagen in Deutschland zu dem Standort der Verwertungsanlage bewertet. Dabei wird die Anbindung an die verschiedenen möglichen Verkehrsträger berücksichtigt, wobei Transporte nach derzeitigem Kenntnisstand überwiegend per LKW erfolgen.

Tabelle 6-30: Legende zum Kriterium Transportaufwand

Symbol	Bedeutung
	<i>E: Transportaufwand</i>
↑	Im Hinblick auf die in Deutschland gesammelten und sortierten Batteriefractionen ist der Transportaufwand niedrig.
↓	Im Hinblick auf die in Deutschland gesammelten und sortierten Batteriefractionen ist der Transportaufwand hoch.

6) *F: Betriebserfahrung*

Mit dieser Kategorie wird erfasst, wie lange die Anlage bereits erfolgreich in Betrieb ist. Damit wird insbesondere bewertet, wie die Umsetzung des zugrunde liegenden theoretischen Konzepts und evtl. der Ergebnisse aus Laborversuchen im größeren Maßstab (scale up, Implementierungsgrad) erfolgt ist und welche „Reife“, d.h. Betriebserfahrung mit der Anlage das Verwertungsunternehmen besitzt.

Tabelle 6-31: Legende zum Kriterium Betriebserfahrung

Symbol	Bedeutung
	<i>F: Betriebserfahrung</i>
↑	In der Anlage werden seit längerer Zeit erfolgreich Batterien verwertet.
↓	In der Anlage werden erst seit jüngerer Zeit Batterien verwertet bzw. der Batterieeinsatz ist bislang nicht über Versuche hinausgegangen.

7) *G: Kapazität*

In der Kategorie Kapazität wird bewertet, welchen Beitrag die Anlage zum Recycling der jeweilig einsetzbaren Batteriefractionen leisten kann (bezogen auf das Aufkommen der entsprechenden Batteriefractionen in Deutschland).

Tabelle 6-32: Legende zum Kriterium Kapazität

Symbol	Bedeutung
	<i>G: Möglicher Beitrag zum Recycling der Batteriefraction</i>
↑	Die Kapazität der Anlage ist ausreichend, einen nennenswerten Beitrag zur Verwertung der geeigneten Batteriefractionen zu leisten.
↓	Die Kapazität der Anlage erlaubt nur einen eher geringen Beitrag zur Verwertung der geeigneten Batteriefractionen.

Dieses Kriterium kann insbesondere dann herangezogen werden, wenn es gilt, Gesamtkonzepte zur Batterieverwertung zu entwickeln und zu bewerten.

8) H: *Transparenz/Öffentlichkeitsarbeit*

Der Erfolg der Recyclingaktivitäten für Gerätebatterien hängt auch entscheidend von der Bereitschaft der Konsumenten ab, ihre verbrauchten Batterien zurückzugeben und so eine geordnete und zielgerichtete Verwertung zu ermöglichen. Wenngleich in Deutschland durch die Batterieverordnung eine Rückgabepflicht für die Letztbesitzer besteht (vgl. Abschnitte 3.2.2 und 3.2.3), ist die Bewusstseinsbildung über die Schädlichkeit der Entsorgung der Batterien im Hausmüll und die erzielbaren positiven Effekte durch das Recycling eine notwendige Voraussetzung für das Erzielen hoher Rückgabequoten. Daher ist eine hinreichend hohe Transparenz der Recyclingprozesse erforderlich, damit der Verbraucher sich direkt bei den jeweiligen Unternehmen oder durch entsprechende Veröffentlichungen (z.B. im Internet) über die Schritte zur Verwertung verbrauchter Batterien informieren kann.

Tabelle 6-33: Legende zum Kriterium Transparenz/Öffentlichkeitsarbeit

Symbol	Bedeutung
	<i>H: Transparenz/ Öffentlichkeitsarbeit</i>
↑	Es sind gute Verfahrensbeschreibungen und weitere Informationen verfügbar; der Betreiber der Anlage antwortet auf Anfragen.
↓	Es sind keine Verfahrensbeschreibungen und weitere Informationen verfügbar; der Betreiber der Anlage antwortet nicht auf Anfragen.

Abgrenzungsprobleme bei der Bewertung von Verwertungsverfahren

Eine besondere Schwierigkeit bei der Bewertung ist damit verbunden, dass sowohl auf Batterien spezialisierte Verfahren als auch Mitverwertungsoptionen in Produktionsprozessen der Metallindustrie zu berücksichtigen sind. Während bei spezialisierten Verfahren sämtliche Auswirkungen auf die Umwelt unmittelbar den eingesetzten Batterien „angelernt“ werden können, ist bei der Mitverwertung nicht immer eine eindeutige Zuordnung bestimmter Umweltwirkungen möglich. Zur Berücksichtigung dieser Abgrenzungsprobleme wird bei Mitverwertungsprozessen daher beobachtet, in wie weit Veränderungen im Vergleich zum Ausgangs- bzw. Referenzzustand auftreten. Diese müssen dabei nicht unbedingt auf Messwerte zurückführbar sein. Ferner ist hier das Vorsorgeprinzip sinnvoll anzuwenden:

Dies lässt sich am **Beispiel** von Quecksilbereinträgen durch Batterien in Elektrolichtbogenöfen zur Stahlherstellung erläutern: Die aufgrund des begrenzten Anteils der Batterien am gesamten Einsatzmaterial (< 3 %, vgl. Abschnitt 6.2.6) in Relation zu den anderen Bestandteilen verschwindend geringen Quecksilbereinträge in Elektrolichtbogenöfen durch quecksilber-

haltige Batterien ($\text{Hg} > 5 \text{ ppm}$) würden vermutlich zu kaum messbaren Veränderungen im Abgasstrom führen. Aufgrund der Beschaffenheit der üblichen Gasreinigungssysteme ist jedoch davon auszugehen, dass ein großer Teil des über Batterien eingetragenen Quecksilbers mit dem Abgas in die Atmosphäre entlassen wird. Daher ist der Einsatz von nicht als quecksilberfrei identifizierten Batterien in dieses Aggregat negativ zu bewerten, selbst wenn die Genehmigungsaufgaben für das Einsatzmaterial und Emissionen den Einsatz zuließen.

Bezüglich des Verbleibs der einzelnen Batteriebestandteile, der bei Mitverwertungsprozessen schwieriger nachzuvollziehen ist als bei den spezialisierten Verfahren, werden naturwissenschaftlich bzw. technische Grundlagen herangezogen, um belastbare Aussagen zu treffen. Beispielsweise kann davon ausgegangen werden, dass sich das Zink aus Batterien im Imperial-Smelting Ofen (vgl. 6.2.1) genauso verhält, wie das sonstige, durch Konzentrate oder andere Reststoffe in den Prozess eingebrachte Zink, so dass die gleichen Verteilungskoeffizienten etc. herangezogen werden können.

Die in den folgenden Tabellen wiedergegebene Gegenüberstellung der Verfahren beruht aufgrund der bereits in Abschnitt 6.9.1 geschilderten Schwierigkeiten u.a. auf einem relativen Vergleich der Verwertungswege, der seinen Ausdruck in graphischen Symbolen, die in weiter oben erläutert werden, findet. Beim paarweisen Vergleich der Verfahren ist darauf zu achten, ob sie zur Verwertung der gleichen Batteriefractionen untersucht wurden. Teilweise werden von Unternehmen auch andere als die in folgenden Überschriften angeführten Batteriesysteme zur Verwertung angenommen. Die hier zugeordnete Fraktion ist diejenige, der in Hinsicht auf die in Deutschland anfallenden Altbatterien die größte Bedeutung zukommt. Zur verbesserten Übersichtlichkeit sind die Verfahren in den folgenden Tabellen je nach einsetzbaren Batteriefractionen gruppiert.

Der direkte Vergleich verschiedener Verwertungsalternativen für verbrauchte Batterien ist hier nur unter Einschränkungen möglich, da neben der prozesstechnischen Heterogenität der Verfahren nicht für alle Anlagen eine gleichermaßen fundierte Datenbasis erzielt werden kann. Aufgrund des starken Wettbewerbes, in dem die meisten der Verwertungsverfahren stehen, ist trotz intensiver Recherche, Fachgesprächen sowie Unternehmensbesuchen insbesondere bei der Bereitstellung belastbarer ökonomischer Daten und Werten zum Emissionsverhalten der eingesetzten Anlagen große Zurückhaltung zu verzeichnen. Die im Folgenden durchgeführte Bewertung fokussiert sich daher in ihren einzelnen Kategorien wie bereits erläutert eher auf qualitative Merkmale. Die zur Einordnung der Verfahren in den einzelnen Kategorien verwendete Symbolik wird bei

der Vorstellung der Kriterien erläutert. Dargestellt ist dort jeweils die beste und die schlechteste Bewertung; zwischen diesen Extremen sind drei Zwischenstufen einzuordnen.

6.9.2.1 Verfahren/Unternehmen zur Verwertung zinkhaltiger Batterien

In der folgenden Tabelle 6-34 werden die untersuchten Verfahren und Unternehmen zur Verwertung zinkhaltiger Batterien gegenübergestellt.

Verfahren/Unternehmen zur Verwertung verbrauchter Batterien

Tabelle 6-34: Gegenüberstellung der Verfahren zur Verwertung zinkhaltiger Batterien

<i>Prozessbezogene Kriterien</i>		A1 (1)	A2	B1	B2 (2)	C	D
Verfahren	wesentliche Produkte und Kuppelprodukte	Umweltbelastung	Ressourceneinsatz (Energie, Hilfsstoffe)	Grad der Verwertung	Absetzbarkeit der Produkte	Wirtschaftlichkeit	Anforderungen an Batteriefractionen
Imperial-Smelting-Prozess	Zink, Blei, Schwefelsäure, Schlacke	↑	→	→	↑	→	↓
Wälzprozess	Wälzoxid, Schlacke	↑	→	→ (3)	↑ (3)	→	↓
Batrec-(Sumitomo-) Prozess	Ferromangan, Zink, Quecksilber, (wenig) Schlacke	↑	↘	↑	↑	↓	↑
Elektrolichtbogenofen (Ferrolegierungsherstellung)	Ferromangan, Zinkstaub, Schlacke	↑	↘	↗	↑	↘	→
DK-(Hochofen-) Prozess (Gießereiroh-eisenerzeugung)	Gießereiroh-eisen, Zinkkonzentrat, Schlacke	↑	→	↗	↑	↗	↓
Elektrolichtbogenofen (Stahlerzeugung)	Stahl, Schlacke, Staub	↑	→	→	↑	↑	↓
Erachem-Prozess (inkl. Vorbehandlung)	Metallschrotte, Kunststoff, Zink- und Mangansulfat, Laugungsrückstand	↑	↘	↗	↗	↓	↗
DMA	Zinkstaub, Metallschrotte	↑	→	→	↑	↘	↑
Dörschelofen	Metallschrotte, Quecksilber, Zink, Cadmium, Schlacke	↑	→	→	↗	↘	↑
Oxyreducer-Verfahren	Zinkoxid, Manganoxid, Eisenschrott, Quecksilber, Salzwasser	↑	→	↗	↗	↓	↑
<i>Anlagenbezogene Kriterien</i>				E (4)	F	G	H
Verfahren	Betreiber	Standort		Transportaufwand	Betriebs-erfahrung	Mögl. Beitrag zum Recycling	Transparenz/ PR-Arbeit
Imperial-Smelting-Prozess	MIM Hüttenwerke Duisburg GmbH, Duisburg	Duisburg (D)		↑	↑	↗	↑
Wälzprozess	B.U.S. AG, Duisburg	Freiberg (D) + weitere Standorte		↑	↑	↗	↑
Batrec-(Sumitomo-) Prozess	Batrec Industrie AG, Wimmis (Schweiz)	Wimmis (CH)		↗	↑	↗	↑
Elektrolichtbogenofen (Ferrolegierungsherstellung)	VALDI, Feurs, Le Palais (Frankreich)	Feurs (F), Le Palais (F)		↗	↑	↗	↘
DK-(Hochofen-) Prozess (Gießereiroh-eisenerzeugung)	DK Recycling und Roheisen GmbH, Duisburg	Duisburg (D)		↑	↑	↗	↑
Elektrolichtbogenofen (Stahlerzeugung)	Verschiedene in den Vereinigten Staaten, Großbritannien, Spanien und den Niederlanden	z.B.: Alblaserdam (NL), Sheerness (UK), Alabama (USA)		↗ (5)	↗	↑	↑
Erachem-Prozess (inkl. Vorbehandlung)	Revatech S.A., Erachem Europe	Lüttich (B), Tertre (B)		↗	↑	↗	→
DMA	Chemtec, Österreich	Simmering (Au)		↗	↑	↗	↑
Dörschelofen	ABRG mbH, Arnoldstein, Österreich	Arnoldstein		↗	↓	↗	↑
Oxyreducer-Verfahren	Citron S.A., Rogerville (Frankreich)	Rogerville (F)		→	↑	↑	↑

Zur Erläuterung von Tabelle 6-34 ist eine Reihe von Randbemerkungen erforderlich, die in der Tabelle mit runden Klammern gekennzeichnet sind:

- (1)* Alle Anlagen verfügen über geeignete Emissionsschutzmaßnahmen im Hinblick auf die Verwertung zinkhaltiger Batterien.
- (2)* Bei der Bewertung der Absetzbarkeit der Produkte wird davon ausgegangen, dass die eingesetzten Batteriefractionen den Anforderungen an Sortenreinheit bzw. Freiheit von Störstoffen entsprechen.
- (3) Mit Schlackenaufbereitung (vgl. Abschnitt 6.2.2).
- (4)* Die Bewertung des Standorts und des Transportaufwandes erfolgt im Hinblick auf in Deutschland gesammelte und sortierte Batterien.
- (5) Bislang wurde noch in keinem der Elektrolichtbogenöfen zur Stahlerzeugung in Deutschland die Verwertung von Batterien erprobt.

Die mit einem „*“ versehenen Randbemerkungen gelten auch für die folgenden Tabellen.

Bei der Umweltbelastung (Kriterium A1) durch die Verfahren bestehen keine „Ausreißer“. Der Einsatz von Energie und Hilfsstoffen (Kriterium A2) liegt bei Batrec- und Erachem-Prozess sowie bei der Ferrolegierungsherstellung im Elektrolichtbogenofen über den der anderen Verfahren; zu berücksichtigen ist hier jedoch, dass z.T. durch die genannten Verfahren ein höherer Grad der Verwertung erreicht wird (Kriterium B1). So wird etwa aus den im Batrec-Prozess eingesetzten zinkhaltigen Batterien das Zink in metallischer Form zurückgewonnen, während bei anderen Prozessen (etwa Wälzprozess oder DMA), ein weiter zu Zink zu verarbeitendes Zinkkonzentrat (Wälzoxid, Zinkstaub) anfällt. Diese Weiterverarbeitung ist natürlich auch mit Energie- und Hilfsstoffeinsätzen verbunden. Beim Grad der Verwertung schneiden insbesondere die Verfahren bei der Bewertung gut ab, bei denen neben Zink auch das Mangan in einer hochwertigen Form etwa als Ferrolegierung oder als Manganoxid zurückgewonnen wird. Die Annahmepreise der Verfahren (Kriterium C) weichen sehr voneinander ab: Während bei der Mitverwertung im Elektrolichtbogenofen zur Stahlerzeugung Preise auf dem Niveau von Sonderabfalldeponiegebühren oder sogar darunter zu zahlen sind, wird für andere Prozesse ein Vielfaches dessen verlangt. Prozesse, die empfindlich auf Verunreinigungen reagieren, erhalten einen nach unten gehenden Pfeil bei den Anforderungen an die Batteriefractionen (Kriterium D). Im Wesentlichen

wird hier die weitgehende Freiheit von quecksilberhaltigen Batterien gefordert.

6.9.2.2 Verfahren/Unternehmen zur Verwertung von Nickel/Cadmium-Akkumulatoren

In Tabelle 6-35 werden die untersuchten Verfahren und Unternehmen zur Verwertung von Nickel/Cadmium-Akkumulatoren gegenübergestellt.

Tabelle 6-35: Gegenüberstellung der Verfahren zur Verwertung von Nickel/Cadmium-Akkumulatoren

<i>Prozessbezogene Kriterien</i>		A1	A2	B1	B2	C	D
Verfahren	wesentliche Produkte und Kuppelprodukte	Umweltbelastung	Ressourceneinsatz (Energie, Hilfsstoffe)	Grad der Verwertung	Absetzbarkeit der Produkte	Wirtschaftlichkeit	Anforderungen an Batteriefractionen
RVD-Verfahren	Nickel-Eisen-Schrott, Cadmium, Kunststoff,	↑	↑	↑	↑	↑	↓
Destillation, Pyrolyse	Nickel-Eisen-Schrott, Cadmium, Kunststoff,	↗ (1)	→	↑	↑	↑	↓
Destillation, Pyrolyse	Nickel-Eisen-Schrott, Cadmium, Kunststoff, Nickel- + Kobaltsulfatlösung	↗ (1)	→	↑	↑	↑	↓
Drehherdverfahren	Eisen-Nickel-Legierung, Cadmium, Schlacke	↗ (1)	→	↑	↑	↑	↘
<i>Anlagenbezogene Kriterien</i>				E	F	G	H
Verfahren	Betreiber	Standort	Transportaufwand	Betriebs Erfahrung	Mögl. Beitrag zum Recycling	Transparenz/ PR-Arbeit	
RVD-Verfahren	ACCUREC Recycling GmbH, Mülheim a. d. Ruhr	Mülheim a. d. Ruhr (D)	↑	↑	↗	↑	
Destillation, Pyrolyse	S.N.A.M. (Frankreich)	St. Quentin Fallavier (F), Viviez (F)	→	↑	↑	→	
Destillation, Pyrolyse	SAFT AB, Oskarshamn (Schweden)	Oskarshamn (S)	→	↑	→	↘	
Drehherdverfahren	Inmetco, Ellwood City (USA)	Ellwood City (USA)	↓	↑	↑	↑	

- (1) Die vom Bestwert abweichenden Bewertungen sind hier durch den Vergleich mit dem RVD-Verfahren (vgl. Abschnitt 6.4.1) zu erklären, dass sich durch besonders geringe Emissionen, geringen Energieverbrauch (Kriterium A2) und eine hohe Umweltverträglichkeit auszeichnet.

Die Bewertungen der Verfahren zur Verwertung von Nickel/Cadmium-Batterien sind mit der o.a. Ausnahme in den meisten Kategorien identisch oder zumindest sehr ähnlich. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Abdestillation des Cadmium bei allen Prozessen der Hauptverfahrensschritt ist und die Produkte damit zunächst weitgehend die gleichen sind. Unterschiede bestehen im Wesentlichen in den Rahmenbedingungen der Destillation (Druck, Temperatur) und darin, ob die Verwertungsschritte in einem

oder mehreren Reaktionsgefäßen ablaufen. Ferner bestehen Unterschiede im Grad der Weiterverarbeitung der Produkte aus dem Hauptverfahrensschritt (vgl. Abschnitt 6.4).

6.9.2.3 Verfahren/Unternehmen zur Verwertung von NiMH -Akkumulatoren

In Tabelle 6-36 ist die Bewertung des NIREC-Verwertungsprozesses für NiMH-Akkumulatoren dargestellt.

Tabelle 6-36: Gegenüberstellung der Verfahren zur Verwertung von NiMH-Akkumulatoren

<i>Prozessbezogene Kriterien</i>		A1	A2	B1	B2	C	D
Verfahren	wesentliche Produkte und Kuppelprodukte Vorlegung	Umweltbelastung	Ressourceneinsatz (Energie, Hilfsstoffe)	Grad der Verwertung	Absetzbarkeit der Produkte	Wirtschaftlichkeit	Anforderungen an Batteriefractionen
NIREC-Verwertungs-Prozess		↑	↑	↑	↑	↑	↓
<i>Anlagenbezogene Kriterien</i>		E	F	G	H		
Verfahren	Betreiber	Standort	Transportaufwand	Betriebserfahrung	Mögl. Beitrag zum Recycling	Transparenz/PR-Arbeit	
NIREC-Verwertungs-Prozess	NIREC Recycling GmbH, Dietzenbach	Dietzenbach (D)	↑	↑	↑	↑	

Aufgrund der recht einfachen Struktur des Prozesses (vgl. Abschnitt 6.5.1), des geringen Energieeinsatzes, des hohen Verwertungsgrades und der guten Absetzbarkeit der Verwertungsprodukte ergibt sich insgesamt eine durchgehend gute Bewertung. Ein Vergleich mit den Verfahrenskonzepten, die u.a. von den Verwertungsunternehmen für Ni/Cd-Akkumulatoren derzeit erprobt werden und die eine teilweise auch die Rückgewinnung des in NiMH-Akkumulatoren enthaltenen, wertvollen Kobalts ermöglichen, konnte noch nicht durchgeführt werden. Dies ist insbesondere auf nicht vollständig abgeschlossene Entwicklungsarbeiten und noch nicht erteilte Patente zurückzuführen, die zu einer starken Zurückhaltung bei der Weitergabe von Informationen über die Prozesse führen. Bei erfolgreichem Abschluss dieser Arbeiten wäre der Grad der Verwertung beim NIREC-Prozess etwas geringer zu bewerten, da bei diesem Prozess das Kobalt mit in die Vorlegung zur Edeltahlerzeugung geht und somit der gezielte Wiedereinsatz schwieriger ist als bei getrennter Rückgewinnung des Kobalts und des Ferronickels.

6.9.2.4 Verfahren/Unternehmen zur Verwertung von quecksilberhaltigen Batterien

In Tabelle 6-37 werden die untersuchten Verfahren und Unternehmen zur Verwertung quecksilberhaltigen Batterien gegenübergestellt.

Tabelle 6-37: Gegenüberstellung der Verfahren zur Verwertung von quecksilberhaltigen Batterien

<i>Prozessbezogene Kriterien</i>		A1 (1)	A2	B1	B2 (2)	C	D
Verfahren	wesentliche Produkte und Kuppelprodukte	Umweltbelastung	Ressourceneinsatz (Energie, Hilfsstoffe)	Grad der Verwertung	Absetzbarkeit der Produkte	Wirtschaftlichkeit	Anforderungen an Batteriefractionen
Vakuumthermisches Recycling (GMR)	Quecksilber, Metallschrott	↑	↘	↑	↑	↑	↓
Vakuumthermisches Recycling (NQR)	Quecksilber, Metallschrott	↑	↘	↑	↑	↑	↓
MRT-Verfahren	Quecksilber, Metallschrott	↑	↘	↑	↑	↑	↓
<i>Anlagenbezogene Kriterien</i>		E (4)		F	G	H	
Verfahren	Betreiber	Standort	Transportaufwand	Betriebserfahrung	Mögl. Beitrag zum Recycling	Transparenz/PR-Arbeit	
Vakuumthermisches Recycling	GMR, Leipzig	Leipzig (D)	↑	↑	↑	↘	
Vakuumthermisches Recycling	NQR, Lübeck	Lübeck (D)	↑	↑	↑	↓	
MRT-Verfahren	Trienekens AG, Grevenbroich	Grevenbroich (D)	↑	↑	↑	↗	

Bei der Bewertung der Verfahren zur Verwertung quecksilberhaltiger Batterien liegt eine ähnliche Situation vor wie sie bei der Verwertung von Ni/Cd-Akkumulatoren festzustellen ist. Auch hier ist der Hauptverfahrensschritt eine Entfernung des „störenden Metalls“ durch Destillation. Unterschiede bestehen zwischen den Verfahren wiederum in den Rahmenbedingungen der Destillation und im Aufbau der Gesamtanlage mit den Vorrichtungen zur Kondensation und weiteren Abgasreinigung, woraus jedoch keine unterschiedlichen Bewertungen abgeleitet werden konnten.

6.9.2.5 Verfahren/Unternehmen zur Verwertung von lithiumhaltigen Batterien

In Tabelle 6-38 wird die Bewertung des einzigen derzeit im industriellen Maßstab betriebenen Verfahren zur Verwertung von lithiumhaltigen Batterien durchgeführt.

Tabelle 6-38: Gegenüberstellung der Verfahren zur Verwertung von lithiumhaltigen Batterien

<i>Prozessbezogene Kriterien</i>		A1 (1)	A2	B1	B2 (2)	C	D
Verfahren	wesentliche Produkte und Kuppelprodukte	Umweltbelastung	Ressourceneinsatz (Energie, Hilfsstoffe)	Grad der Verwertung	Absetzbarkeit der Produkte	Wirtschaftlichkeit	Anforderungen an Batteriefractionen
ToxCo-Prozess	Lithiumcarbonat, Metallschrott, Kunststoffe	↑	↘	→	↗	↘	↘
<i>Anlagenbezogene Kriterien</i>		E (4)	F	G	H		
Verfahren	Betreiber	Standort	Transportaufwand	Betriebserfahrung	Mögl. Beitrag zum Recycling	Transparenz/PR-Arbeit	
ToxCo-Prozess	ToxCo, Trail (Kanada)	Trail, (Ca)	↓	↑	↑	↑	

Aufgrund des Einsatzes flüssigen Stickstoffs zur Erniedrigung der Reaktionsfähigkeit des Lithiums in den Batterien ist der Energieeinsatz relativ hoch. In Bezug auf die in Deutschland gesammelten Batterien ist der Standort der Anlage sehr ungünstig, so dass eine Verwertung der Batterien in dieser Anlage vermutlich nicht durchgeführt werden wird.

6.9.3 Vergleich der Batterieverwertung mit der Deponierung

In Deutschland besteht für einige Batteriesysteme neben der Verwertung die Option der Beseitigung auf Sonderabfalldeponien (SAD). Von dieser Option wird insbesondere für Batterien der chemischen Systeme Alkali/Mangan, Zink/Kohle und Zink/Luft Gebrauch gemacht. Der überwiegende Teil dieser Batteriefractionen wird durch die Sammelsysteme nach ihrer Sortierung auf SAD beseitigt, da derzeit die Annahmepreise vieler Verwertungsanlagen erheblich über den zu entrichtenden Deponiegebühren liegen. Wie in den vorhergehenden Abschnitten deutlich wurde, werden diese im Vergleich zur Deponierung hohen Annahmepreise hauptsächlich bei Verfahren erhoben, die über aufwendige Abgasreinigungssysteme verfügen und daher auch Batterien mit höheren Quecksilbergehalt verwerten. Die in der Regel deutlich kostengünstigeren Mitverwertungsoptionen für Batterien in der Eisen- und Stahlindustrie sowie der NE-Metallindustrie müssen dagegen niedrigere Quecksilbergrenzwerte bei ihren Einsatzmaterialien einfordern.

Für hochquecksilberhaltige Batterien, wie sie etwa in der Knopfzellenfraktion aufgrund von Quecksilberoxidzellen¹⁰² zu finden sind, besteht die Alternative einer Verbringung auf Sonderabfalldeponien nicht, da durch Genehmigungsauflagen deren Einlagerung verboten ist [283]. Für Ni/Cd- und NiMH-Akkumulatoren ist, nachdem ihre Sammlung und Sortierung erfolgt ist, eine Beseitigung durch Deponierung wirtschaftlich uninteressant, da die Annahmepreise der Verwertungsanlagen aufgrund der hochwertigen wiedergewinnbaren Inhaltsstoffe für diese Batteriesysteme in der Regel unter den Deponiegebühren liegen. Mit der für die Zukunft abzusehenden, effizienten Rückgewinnung auch der Seltenen Erden aus NiMH-Batterien wird der ökonomische Vorteil der Verwertung weiter vergrößert werden. Auch die Verwertung von Kleinbleibatterien ist derzeit wirtschaftlich günstiger als ihre Deponierung. Für Lithiumbatterien besteht derzeit in Europa noch kein großtechnisch eingesetztes Verwertungsverfahren, so dass die kontrollierte Verbrennung in Sonderabfallverbrennungsanlagen oder ihre Deponierung auf SAD die üblichen Beseitigungswege darstellen.

Der Vergleich zwischen Verwertung und Beseitigung auf SAD wird sich aufgrund des oben Dargelegten im Folgenden auf die Alkali/Mangan-, Zink/Kohle- und Zink/Luft-Batterien beschränken, insbesondere auch, da sie bei weitem den größten Anteil sowohl an den gesammelten als auch an den deponierten Batterien ausmachen.

Bei einem Vergleich der Alternativen unter ökologischen Gesichtspunkten sind zwei Fragestellungen von besonderer Bedeutung: Zum einen ist zu untersuchen, wie sich die Belastungen der Umwelt durch die Deponierung von Batterien zu den Umweltbelastungen, die durch die Verwertungsprozesse verursacht werden, verhalten. Um einen vollständigen Vergleich zu erhalten, sind hierzu auch die üblichen Erzeugungsrouten der bei der Batterieverwertung zurückgewonnenen Inhaltsstoffe mit in die Betrachtung einzubeziehen. Bei den hier betrachteten Batteriesystemen sind dies im Wesentlichen Zink, Eisen, Mangan und Kohlenstoff. Aufgrund der im Verhältnis zum Gesamteinsatz dieser Elemente sehr geringen Menge, die in Batterien Einsatz findet, ist der Beitrag des Batterierecyclings zur Schonung natürlicher Ressourcen dieser Stoffe verschwindend gering und

¹⁰²⁾ Durch die novellierte Fassung der Batterieverordnung vom 2. Juli 2001 ist das Inverkehrbringen dieses Batteriesystems verboten worden, jedoch ist in den zurückgenommenen Batteriegemischen noch für einige Zeit mit derartigen Batterien zu rechnen.

somit vernachlässigbar. Da keine Knappheit an diesen Elemente herrscht, ist ihr Wert relativ gering und auch auf absehbare Zeit nicht damit zu rechnen, dass die Kosten der Verwertung vollständig durch die Erlöse aus den Recyclingprodukten getragen werden können.¹⁰³ Die entscheidenden Informationen für eine vergleichende ökologische Bewertung von Beseitigung auf SAD und Verwertung können für diese Batteriesysteme nur durch eine umfassende Gegenüberstellung der Produktion von aus Batterien zurückgewonnenen Substanzen mit der Erzeugung aus primären Rohstoffen, etwa in Form einer Lebenszyklusanalyse bereitgestellt werden. Eine Studie, die im Auftrag des britischen Department of Trade and Industry durch das Beratungsunternehmen ERM erstellt wurde, kommt zu dem Ergebnis, dass alle negativen Auswirkungen auf die Umwelt durch eingesammelte und sortierte Haushaltsbatterien mit steigendem Anteil der Verwertung reduziert werden [72] und dieser daher möglichst hoch sein sollte. Weitere Untersuchungen werden derzeit durchgeführt, jedoch lagen zum Zeitpunkt der Drucklegung noch keine Ergebnisse vor.

Die zweite Fragestellung zielt auf die durch die Verwertung von Batterien verursachten Transporte ab. Die hier durch Variation des Verwertungsanteils zu erwarteten quantitativen Auswirkungen lassen sich modelltechnisch mit Methoden des Operations Research berechnen [266]. Hierbei stellt sich heraus, dass nur marginale Unterschiede in den zurückzulegenden Transportentfernungen und damit auch in den durch diese Verkehre verursachten Umweltbelastungen auftreten. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass die Transporte von Sortier- zu Verwertungsanlagen im Vergleich zu den mit der Einsammlung und den Transport zu den Sortieranlagen verbundenen Transporten eine geringere Bedeutung haben. Ferner ist es aufgrund der Verteilung der Verwertungsanlagen und der Sonderabfalldeponien über die Fläche in Deutschland für die transportbedingten Umweltbeeinflussungen von untergeordneter Bedeutung, ob die sortierten Batterien zu einer Verwertungsanlage oder einer Deponie gebracht werden.

¹⁰³) Bei den anderen Batteriesysteme ist die Schonung natürlicher Ressourcen und der Wert der zurückgewonnenen Rohstoffe von größerer Bedeutung, etwa bei nickel- und Seltene Erden-enthaltenden Batterien.

6.9.4 Schlussfolgerungen aus der Bewertung

Neben den unmittelbar Tabelle 6-34 bis Tabelle 6-38 zu entnehmenden Erkenntnissen ist eine Reihe zentraler Schlussfolgerungen zu ziehen, die im Folgenden kurz vorgestellt wird.

- Zunächst ist festzustellen, dass mit Ausnahme bestimmter Lithiumbatterien¹⁰⁴ und Batterien für spezielle Anforderungen prinzipiell für alle gebräuchlichen Batteriesysteme in Europa Verwertungsoptionen bestehen.
- Für quecksilberfreie Alkali/Mangan-, Zink/Kohle- und Zink/Luft-Batterien existiert eine Reihe von Verwertungsoptionen, deren Kosten sich in der Größenordnung der in Deutschland zu entrichtenden Sonderabfalldeponiegebühren oder sogar darunter bewegen. Deshalb ist es stark zu erwarten, dass in den nächsten zwei bis drei Jahren nur noch ein geringer Teil der in Deutschland gesammelten Haushaltsbatterien deponiert werden wird, da der überwiegende Anteil quecksilberfrei, entsprechend markiert und in reine Sorten sortiert sein wird (vgl. Abbildung 6-1).
- Im Hinblick auf die ökonomische Tragfähigkeit der Verwertung von Batterien in den vorgestellten Prozessen ist festzustellen, dass diejenigen Prozesse, die eigens zur Batterieverwertung konzipiert wurden, deutlich höhere spezifische Kosten je Tonne verwertete Batterien aufweisen als diejenigen Anlagen, in denen die Batterien nur einen kleinen Anteil am Einsatzmaterial ausmachen.
- Die Emissionsschutzmaßnahmen von eigens für die Verwertung von Batterien erstellten Anlagen sind in der Regel besser geeignet, die typischen in Batterien enthaltenen Schadstoffe (insbesondere Quecksilber) aus dem Abgas zu entfernen als die entsprechenden Einrichtungen von Anlagen, in denen „nur“ eine Batteriemitverwertung durchgeführt wird. Schadstoffhaltige Batterien sollten daher nur in spezialisierten Anlagen verwertet werden oder nur dann in Mitverwertungsprozesse einge-

¹⁰⁴) Zahlreiche europäische Unternehmen arbeiten derzeit an der Entwicklung bzw. technischen Erprobung von Prozessen, in denen auch Lithiumbatterien eingesetzt werden können [136]. Im Zeitraum der Untersuchung dieses Teilbereiches waren jedoch noch keine weiterführenden Informationen über vielversprechende Entwicklungen verfügbar, so dass nur die in Abschnitt 6.7 dargestellten Verfahren berücksichtigt wurden.

bracht werden dürfen, wenn die dortigen Emissionsschutzmaßnahmen ein ähnlich hohes Schutzniveau der Umwelt garantieren.

- Beim Einsatz sortierter Batteriefractionen gilt in der Regel, dass mit steigender Sortierqualität auch die erzielbare Qualität der Recyclingprodukte steigt bzw. der Anfall z.T. unerwünschter Kuppelprodukte sinkt.
- Die Kosten der Verwertung betragen insbesondere bei wiederaufladbaren Batterien nur einen vernachlässigbaren Bruchteil der Verkaufspreise dieser Akkumulatoren; auch für Primärbatterien zeichnet sich ab, dass die wirtschaftliche Zumutbarkeit der Verwertung für den Großteil im Vergleich zur Beseitigung auf Deponien kaum in Zweifel zu ziehen ist. Hierzu muss jedoch gewährleistet sein, dass eine Abtrennung der quecksilberfreien von den quecksilberhaltigen Batteriefractionen erfolgt.

7 Cadmiumproblematik

Cadmiumhaltige Gerätebatterien stellen eine der Hauptquellen für Cadmium im Haushaltsabfallstrom dar [329]. Obwohl ihr Anteil an der Gesamtmüllmenge verschwindend gering ist, verursachen sie dennoch einen überproportional großen Teil des Cadmumeintrags [168].¹⁰⁵ Um diesen Schadstoffeintrag in die Umwelt über Müllverbrennungsanlagen oder Hausmülldeponien zu verringern, wird derzeit im Zusammenhang mit der Diskussion des Entwurfes einer neuen Batterierichtlinie der Europäischen Union intensiv ein Verbot für Cadmium in Batterien diskutiert.¹⁰⁶ Auch sind Batterien, die Schwermetalle wie Cadmium enthalten, Hauptursache für die Bemühungen zur getrennten Erfassung verbrauchter Batterien.

Die mögliche Einschränkung der Einsatzgebiete für Cadmium kann erhebliche Auswirkungen auf den Eintrag von Cadmium in die Umwelt, den Cadmiummarkt sowie auf die Rücknahme- und Recyclingaktivitäten für Altbatterien ergeben. Zum einen kann durch die dann verringerte Nachfrage nach Cadmium und seinen Verbindungen die Wirtschaftlichkeit der Verwertungsverfahren vermindert werden. Auch weitere Industriebereiche können durch ein Verbot beeinflusst werden, wie etwa die Zinkindustrie, in deren Produktionsprozessen rohstoffbedingt Cadmium oder Cadmiumverbindungen als Kuppelprodukte anfallen.

Im Folgenden wird daher nach generellen Informationen über Cadmium eine Übersicht über den Cadmiummarkt gegeben. Die mit cadmiumhaltigen Batterien verbundene Problematik wird anhand einer Cadmiumbilanzierung für diesen Bereich aufgezeigt und die zukünftige Entwicklung prognostiziert. Nach einer Diskussion umweltgerechter Senken für Cad-

¹⁰⁵) Eine Untersuchung für die Schweiz, in der zum Zeitpunkt der Untersuchung bereits eine Rückgabepflicht für Batterien bestand, ergab einen Anteil von Ni/Cd-Akkumulatoren an der gesamten Hausmüllmenge von 0,0057 % und einen Anteil am Cadmumeintrag von 85 % (1994, [168]). Die International Cadmium Association errechnet basierend auf Untersuchungen in den Niederlanden und Frankreich den Anteil von Ni/Cd-Batterien an der Hausmüllmenge auf 5 ppm und den Anteil am Cadmumeintrag auf 12 % [139].

¹⁰⁶) Ab dem Jahr 2008 sollen Batterien mit einem Cadmiumgehalt von mehr als 0,002 % verboten sein, wobei definierte Anwendungen von dem Verbot ausgenommen werden sollen [81]. Praktisch würde dies auf ein Verbot von Nickel/Cadmium-Batterien hinauslaufen. Auf multinationaler Ebene (z.B. OSPARCOM) wird darüber hinausgehend sogar ein genereller Ausstieg („phase out“) aus der Verwendung von Cadmium als Werkstoff angestrebt.

mium im Wirtschaftskreislauf werden Instrumente zur Steuerung der Cadmiumstoffflüsse diskutiert. Zum Anschluss des Kapitels werden mögliche Auswirkungen eines Verbotes von Cadmium erörtert.

7.1 Generelle Informationen zu Cadmium

7.1.1 Vorkommen

Cadmium, ein silberweißes, an Luft schnell ermattendes Schwermetall mit guter Verformbarkeit, wurde 1817 durch Strohmeyer in Göttingen entdeckt. Es wurde nach seinem Aufschlussverfahren (lat. Cadmeia fornacum = Ofenbruch) benannt [141].

Mit einem Gehalt von etwa 0,08 - 0,5 g/t [290] in der Erdkruste ist Cadmium ein relativ seltenes Metall. Es sind einige Cadmiumminerale bekannt, die jedoch für die Metallgewinnung bedeutungslos sind und waren. Die Cadmiumgewinnung aus primären Rohstoffen ist ausschließlich auf Nebenprodukte der Erzeugung anderer Metalle beschränkt [221]. Insbesondere in Zinkerzen mit Zinkblende (ZnS) und Galmei (ZnCO₃) ist Cadmium mit 0,1 - 0,2 % bzw. bis zu 5 % enthalten [141]. Die Vermeidung eines cadmiumhaltigen Kuppelproduktes ist daher bei der Zinkgewinnung aus primären Rohstoffen nicht möglich. Die gewonnene Cadmiummenge wird auf rund 3 kg je Tonne gewonnenes Zink beziffert [214] und ist für rund 4/5 der Cadmiumgewinnung verantwortlich. Zu einem geringen Teil wird Cadmium auch als Nebenprodukt bei der Kupfer- und Bleiengewinnung aus primären Rohstoffen erzeugt.

Die weltweiten Cadmiumressourcen werden auf Basis der Zinkressourcen mit einem angenommenen Cadmiumgehalt von etwa 0,3 Gew.-% Cadmium auf rund 6 Mio. Tonnen geschätzt [224].

7.1.2 Umweltrelevanz

Die möglichen Auswirkungen erhöhter Cadmiumaufnahme auf die menschliche Gesundheit (siehe hierzu z.B. [84], [255], [265]) und die Umwelt führten dazu, dass mittlerweile in vielen Staaten die Verwendung von Cadmium starken Restriktionen unterworfen ist (siehe auch Abschnitt 7.2) und Maßnahmen zur Minimierung des Cadmumeintrags in die Umwelt unternommen wurden. Diese Auswirkungen werden spätestens seit dem Auftreten der sogenannten Itai-Itai-Krankheit im Stromgebiet des Jizu, eines durch eine Zinkmine stark cadmiumbelasteten Flusses in Japan, nach Ende des zweiten Weltkriegs untersucht. Zu der Thematisierung

von Cadmium als Umweltschadstoff seit Mitte der siebziger Jahre haben u.a. folgende Befunde und Erkenntnisse beigetragen [83]:

- Cadmium zählt zu den giftigsten Schwermetalle. Es weist eine starke Tendenz zur Anreicherung im menschlichen und tierischen Organismus (insbesondere in Niere und Leber) auf.
- Die Produktion hat im 20. Jahrhundert von etwa 100 t/a in den zwanziger Jahren auf derzeit rund 20.000 t/a (vgl. Tabelle 7-4) erheblich zugenommen. Entsprechend wuchs der Eintrag von Cadmium in die Umwelt durch Abfälle, Abwässer oder Emissionen.
- Die hohe Flüchtigkeit von Cadmium führt zur Anreicherung in Filter- und Flugstäuben. Die Abscheidung feinsten Staubpartikel stellt erhebliche Anforderungen an die eingesetzte Filtertechnik.
- Durch Klärschlamm und Düngemittel kommt es zu großen Cadmium-einträgen auf landwirtschaftliche Nutzflächen. Die relativ leichte Aufnahme von Cadmium über die Wurzeln in Pflanzen führt zum Eindringen von Cadmium in die Nahrungskette.

Das Augenmerk ist insbesondere auf die anthropogenen Quellen des Cadmumeintrags in die Umwelt gerichtet. Die Wesentlichen durch menschliche Tätigkeit verursachten Quellen sind in Tabelle 7-1 zusammengefasst.

Tabelle 7-1: Anthropogene Cadmumeinträge in die Umwelt

Müllverbrennungsanlagen Nichteisen-(NE-)Metallerzeugung Eisen- und Stahlproduktion Zementherstellung Verbrennen fossiler Energieträger Kalkdünger	Feste Abfälle Bodenverbesserer Phosphatdünger Klärschlämme Dung Belastetes Oberflächen- und Grundwasser
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Quelle: [215]

In Tabelle 7-2 sind einige physikalische Eigenschaften von Cadmium und die Formen, in denen es in der Umwelt zu finden ist, zusammengestellt.

Tabelle 7-2: Eigenschaften und Vorkommen von Cadmium

Symbol	Cd (Element der 2.Nebengruppe)
Atomgewicht	112,41 u
Aussehen und Form	silberweiß glänzend, ziemlich weich und plastisch verformbar, mit dem Messer schneidbar
Dichte	8,65 t / m ³
Schmelzpunkt	321°C
Siedepunkt	765°C
Vorkommen in Gewässern	als Cd ⁺⁺ , CdCl ⁺ , CdOH ⁻ , CdCO ₃ , CdS
Vorkommen in Sedimenten	in Schlämmen, Böden: als Cd(OH) ₂ , CdCO ₃ , CdSO ₄
Vorkommen in biologischen Materialien	Cd-Cysteinat, Cd-Cysteinat(OH)-, Aquo-Cd-Komplex, etc.
Vorkommen in Staub und Rauch	CdCl ₂ , CdS, CdSe, CdTe, etc.

Quelle : [145]

Im Bereich der Produktionsanlagen, in denen aufgrund der Zusammensetzung der Ausgangsmaterialien cadmiumhaltige Kuppelprodukte entstehen, sind bereits seit langem verschiedene Maßnahmen zur weitgehenden Vermeidung einer Umweltbelastung erfolgreich im Einsatz. Hierzu zählen etwa die Gas- und Abwasserreinigungssysteme in den Anlagen der NE- sowie der Eisen- und Stahlindustrie (siehe z.B. [238], [79]).¹⁰⁷ Die Cadmiumgehalte der Ausgangsmaterialien sind mit Ausnahme der Zinkindustrie sehr gering, jedoch erlangen sie durch die großen umgesetzten Mengen Relevanz. Durch die zunehmende Verwertung der in den Reinigungssystemen anfallenden Stäube und Schlämme, wie z.B. Filterstäube aus Elektrolichtbogenöfen,¹⁰⁸ gelangt das Cadmium wieder in die industriellen Stoffkreisläufe. Für das Jahr 1994 wurde für die Emissionen aus der Herstellung und Verarbeitung von Cadmium insgesamt ein Wert von 1,1 t Cadmium gemeldet [20].

Erhebliche anthropogene Einträge sind auch auf Mittel zurückzuführen, die zur Bodenverbesserung und Düngung auf land- und forstwirtschaftlich

¹⁰⁷⁾ Aufgrund seines relativ niedrigen Siedepunktes von 765 °C gelangt Cadmium in den pyrometallurgischen Prozessen überwiegend in das Rohgas und wird in den Gasreinigungssystemen abgeschieden.

¹⁰⁸⁾ Haupteinsatzmaterial der Elektrolichtbogenöfen ist Stahlschrott, der z.T. cadmiumbeschichtet ist oder mit cadmiumhaltigen Zink verzinkt wurde. Das Cadmium wird wie weitere Schwermetalle (insbesondere Zink und Blei) über die Gasphase entfernt und in Filtern bzw. elektrostatischen Abscheidern aus dem Gasstrom abgeschieden. Die Verwertung der Stäube wird in Europa überwiegend in Wälzrohren durchgeführt (vgl. Abschnitt 6.2.2); teilweise werden sie jedoch auch auf Deponien oder unter Tage zur Verfüllung von Hohlräumen verbracht.

genutzte Flächen aufgebracht werden, sowie auf cadmiumhaltige Produkte, die in den Abfallstrom gelangen. In Kalkstein und Dolomit ist Cadmium als natürliches Spurenelement enthalten und kann etwa bei Kalkeinsatz zur pH-Wert-Regelung als Schutzmaßnahme gegen „sauren Regen“ in große Flächen eingetragen werden. Besondere Bedeutung für den anthropogenen Cadmиеintrag besitzen Rohphosphate, die den Grundstoff der Phosphatdüngerproduktion darstellen. In ihnen finden sich Cadmiumgehalte von im Extremfall bis zu 150 g/t; cadmiumfreie bzw. -arme Vorkommen sind in der Minderheit (< 10 %) [21]. Da sich die bislang entwickelten Verfahren zur Entfernung des Cadmiums während der Düngemittelproduktion wirtschaftlich nicht darstellen lassen [214], kommen der Rohstoffauswahl und der Vermeidung übermäßiger Düngemittelinträge besondere Bedeutung bei der Verringerung der Cadmiumbelastung zu. Dennoch ist der Haupteintrag (ca. 60 %) auf Nutzflächen auf atmosphärische Immissionen zurückzuführen [70].

Der Bereich der cadmiumhaltigen Abfälle stellt ein besonderes Problemfeld dar, da sich Verwendungsverbote oder -einschränkungen erst nach Ende der üblichen Nutzungsdauer der betroffenen Produkte auf die Zusammensetzung der Abfälle auswirken. In Tabelle 7-3 wird für die wichtigsten Anwendungsbereiche in der Vergangenheit anhand mengenmäßig bedeutender Einzelprodukte die Spannbreite der typischen Nutzungsdauer angegeben.

Tabelle 7-3: Typische Nutzungsdauer cadmiumhaltiger Produkte

Anwendungsbereich von Cadmium	Wichtige Einzelprodukte	Nutzungsdauer in Jahren
Ni/Cd-Akkumulatoren	Gerätebatterie	2 - 7
Stabilisatoren	PVC-Fensterrahmen	20 - 30
Pigmente	PE-Flaschenkasten	10 - 15
Oberflächenbeschichtungen	Befestigungselement im Kfz	5 - 20

Quelle: [23]

Ein Vielfaches der jährlichen Cadmiumproduktion ist demnach in Produkten in der Technosphäre gespeichert. Beispielsweise wird die in den letzten 15 Jahren in Stabilisatoren eingesetzte Cadmiummenge auf über 5.000 t geschätzt [297]; dem gegenüber stehen weniger als 1.000 t/a Cd, die in Produkten aller Bereiche in Deutschland abgesetzt werden.

7.1.3 Cadmiumstoffflüsse in Deutschland

Die eindeutige toxikologische Bewertung von Cadmium und die vergleichsweise gute Datenlage führten neben der hohen Belastung von Mensch und Umwelt sowie der fehlenden Abbaubarkeit dazu, dass die Enquete Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des 12. Deutschen Bundestages Cadmium als Beispiel für Stoffstromanalysen auswählte [70]. Ziel der Stoffstromanalysen ist zunächst eine möglichst exakte Erfassung der Stoffflüsse, um mit Hilfe geeigneter Stoffstrommanagementinstrumente einen nachhaltigen Umgang mit Stoff- und Materialströmen zu erreichen. Die Cadmiumstoffflüsse in Deutschland für das Jahr 1994 sind in Abbildung 7-1 dargestellt. Anhand dieser Stoffflüsse können die verschiedenen durch Cadmium betroffenen Bereiche in ihrer Bedeutung grob eingeschätzt und ihre Verknüpfungen verdeutlicht werden.¹⁰⁹

¹⁰⁹) Detailliertere Angaben zu den verschiedenen Bereichen und ihren Verknüpfungen werden in [23] gegeben (Bilanzdaten bis 1989).

Cadmiumproblematik

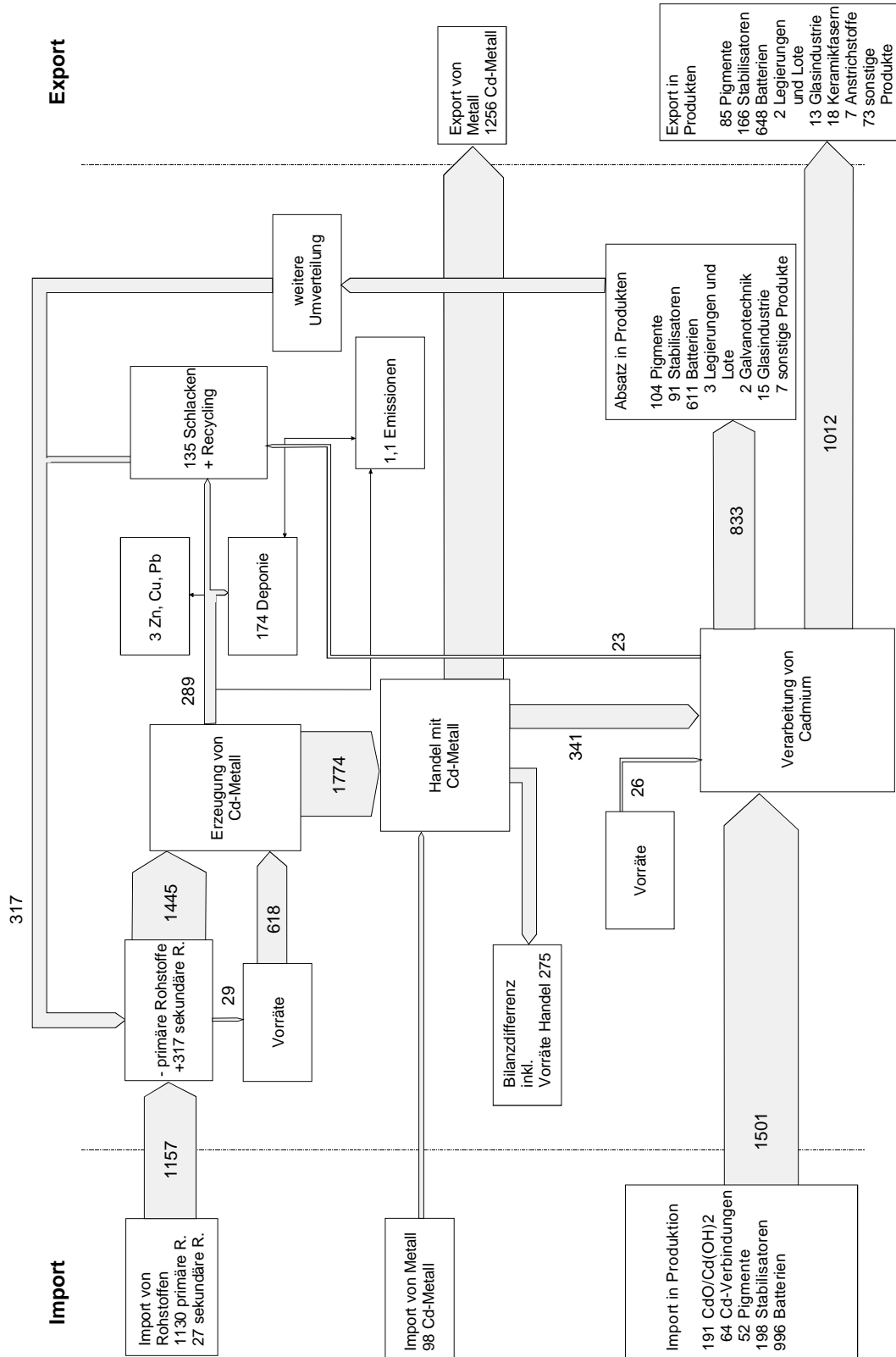


Abbildung 7-1: Cadmiumstoffflüsse in Deutschland 1994

Quelle: Werte nach Balzer [20]; alle Zahlenangaben in Tonnen

7.2 Cadmiummarkt

7.2.1 Entwicklung der Produktion von Cadmium

Deutschland war bis zum ersten Weltkrieg der einzige nennenswerte Cadmiumproduzent. Seine Hauptanwendung fand das Cadmium in sulfidischer Form als Farbstoff. Mit dem ersten Weltkrieg und dem dadurch verursachten Mangel an Zinn (u.a. für Konservendosen) steigerten die Vereinigten Staaten ihre Produktion erheblich¹¹⁰ und nahmen für die folgenden 50 Jahre die Rolle des Hauptproduzenten ein. Die guten Korrosionsschutzeigenschaften auf Eisen, Stahl, Aluminium und Messing führten vor allem im Zuge der Entwicklung der Automobilindustrie dazu, dass Beschichtungen (Cadmierungen) zum bedeutendsten Anwendungsgebiet wurden. Der Einsatz in Batterien spielte bis nach dem zweiten Weltkrieg keine Rolle, während er heute den größten Anwendungsbereich darstellt [170] (vgl. Abbildung 7-3).

In Tabelle 7-4 ist die Produktion von Cadmium für die Jahre 1990 - 2000 für ausgewählte Länder sowie die gesamte Welt zusammengefasst. Ein Großteil der Cadmiumgewinnung findet dabei in Ländern statt, die auch über eine umfangreiche Zinkproduktion verfügen.

Tabelle 7-4: Cadmiumproduktion in den Jahren 1990-2000 (in t)

Land / Jahr	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
USA	1.680	1.680	1.620	1.090	1.010	1.270	1.530	2.060	1.880	1.190	1.200
Australien	638	1.080	1.000	951	910	842	682	632	600	600	630
Belgien	1.960	1.810	1.550	1.570	1.560	1.710	1.580	1.600	1.320	1.400	1.200
Kanada	1.470	1.830	1.960	1.890	2.130	2.360	2.540	2.380	2.310	2.390	2.350
China	-	-	-	-	-	-	-	1.600	2.000	2.200	2.250
Deutschland	990	1.050	941	1.060	1.120	1.150	1.150	1.140	1.150	1.100	1.100
Japan	2.450	2.890	2.990	2.830	2.630	2.652	2.340	2.460	2.340	2.600	2.550
Kasachstan	-	-	-	-	-	-	-	1.200	900	1.060	1.000
Mexiko	882	688	602	797	646	689	675	800	1.100	1.300	1.100
Russland (UdSSR)	(2.800)	(2.500)	-	-	-	-	-	790	800	900	850
Andere	7.330	7.370	9.230	8.710	8.110	7.830	8.400	5.300	5.200	5.360	5.070
Gesamte Welt	20.200	20.900	19.900	18.900	18.100	18.500	18.900	20.000	19.600	19.100	19.300

Quelle: U.S. Geological Survey, Mineral Information, für die Jahre 1996-2000

¹¹⁰⁾ Durch den Einsatz von Cadmium konnten der Zinnanteil in Loten verringert und der Zinnmangel in Grenzen gehalten werden.

Weltweit wird rund 80 % des Cadmiums als Kuppelprodukt bei der Zinkgewinnung aus Erzen erzeugt. Der verbleibende Teil ist auf die metallurgische Gewinnung von Kupfer und Blei sowie im zunehmenden Maße auf Recyclingaktivitäten zurückzuführen [224]. Die Produktionsmenge hängt im Wesentlichen von der Nachfrage nach Zink und nicht von der Nachfrage auf dem Cadmiummarkt ab. Auch bei den zunehmenden Recyclingaktivitäten für cadmiumhaltige Produkte, insbesondere Ni/Cd-Akkumulatoren, stehen die Rückgewinnung des Nickels und der Umweltschutzgedanke im Vordergrund und nur nachrangig die Nachfrage nach Cadmium.

7.2.2 Entwicklung der Cadmiumpreise

Die Mechanismen, die bei der Preisbildung für die wichtigsten NE-Metalle wie Aluminium, Zink, Kupfer und Blei wirksam werden, greifen bei Cadmium nicht vollständig. Häufig werden bei Knappheit, also Nachfragesteigerung oder Angebotsrückgang und damit steigenden Preisen, neue Produktionskapazitäten geschaffen und alte, zwischenzeitlich stillgelegte Anlagen wieder in Betrieb genommen. Gleichzeitig werden auf Verbraucherseite die Substitutionsbemühungen verstärkt. Der umgekehrte Effekt ist bei einem Angebotsüberhang (sinkende Preise) zu beobachten, der häufig zu vorübergehenden oder finalen Schließungen von Standorten führen kann. Für den Cadmiummarkt und eine Reihe von Nebenmetallmärkten gelten diese fundamentalen Zusammenhänge nur begrenzt [273], da Cadmium im Wesentlichen als Kuppelprodukt gewonnen wird und so nur eine geringe Angebotselastizität besteht. Weiterhin waren die intensiven Substitutionsbemühungen für Cadmium im letzten Jahrzehnt nicht preisinduziert, sondern sie sind hauptsächlich auf verändertes Umweltbewusstsein und geänderte gesetzliche Rahmenbedingungen zurückzuführen.

Eine Übersicht über die Entwicklung der Cadmiumpreise wird in Abbildung 7-2 gegeben.

Cadmiumproblematik

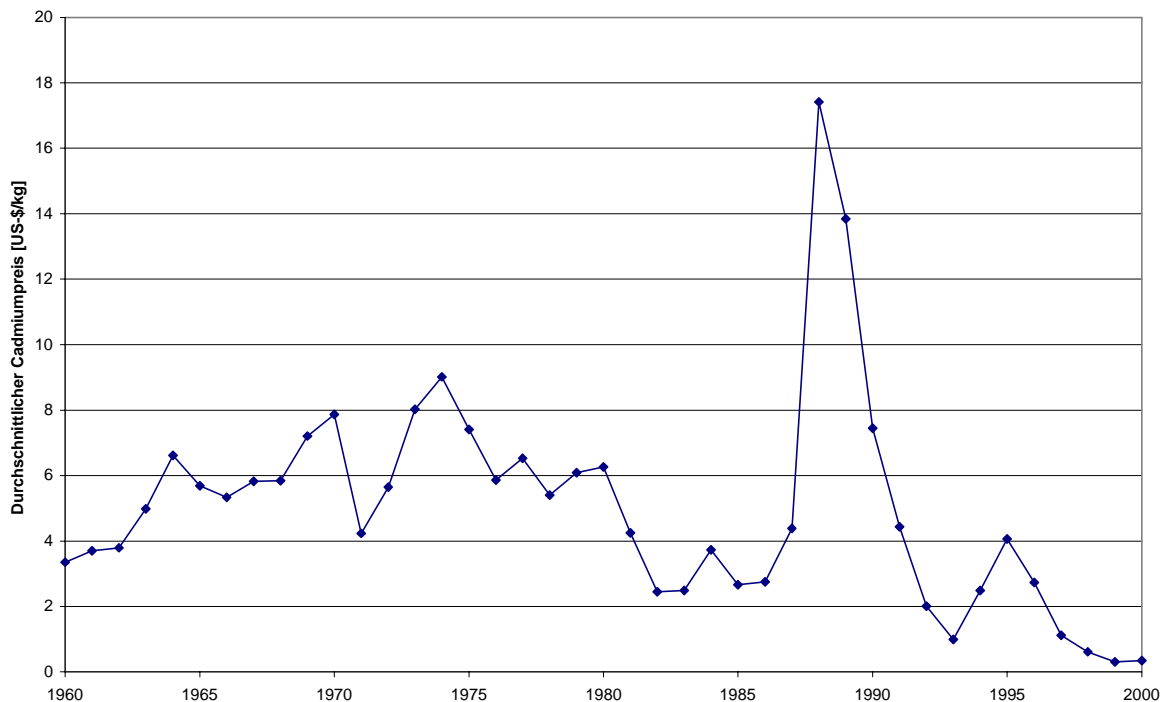


Abbildung 7-2: Entwicklung der Cadmiumpreise 1960 - 2000

Quelle: [224]

Auffällig an der Preisentwicklung ist insbesondere der enorme Anstieg Ende der achtziger Jahre, der auf Tarifdispute bei einigen Erzeugern, Spekulation und große Nachfrage seitens japanischer Ni/Cd-Akkumulatorenhersteller zurückzuführen ist [224]. Derzeit befindet sich der Cadmiumpreis auf einem äußerst niedrigem Niveau, da sich für zahlreiche Anwendungen zunehmend cadmiumfreie Substitute (s.u.) etabliert haben. In der Regel wird nur dann auf Cadmium zurückgegriffen, wenn es technisch nicht vollwertig ersetzt werden kann, wie etwa zur Einfärbung von Signalgläsern. Eine bislang weitgehend unveränderte Produktion trifft somit auf eine zurückgehende Nachfrage, so dass kurz- bis mittelfristig ein deutlicher Anstieg der Cadmiumpreise nicht zu erwarten ist. Sollten weitere Zinkerzeuger auf die Gewinnung des Cadmium verzichten und ihre cadmiumhaltigen Kuppelprodukte auf Deponien beseitigen (siehe auch Abschnitt 7.6.4), sind Steigerungen zu erwarten. Die Umsetzung des geplanten Anwendungsverbotes für Cadmium in Gerätebatterien oder darüber hinausgehende Maßnahmen werden diese Effekte vermutlich jedoch wieder umkehren.

7.2.3 Verwendung von Cadmium

Das weltweite Haupteinsatzgebiet für Cadmium sind derzeit Batterien, in denen fast $\frac{3}{4}$ der gesamten Produktion eingesetzt werden (vgl. Abbildung 7-3).

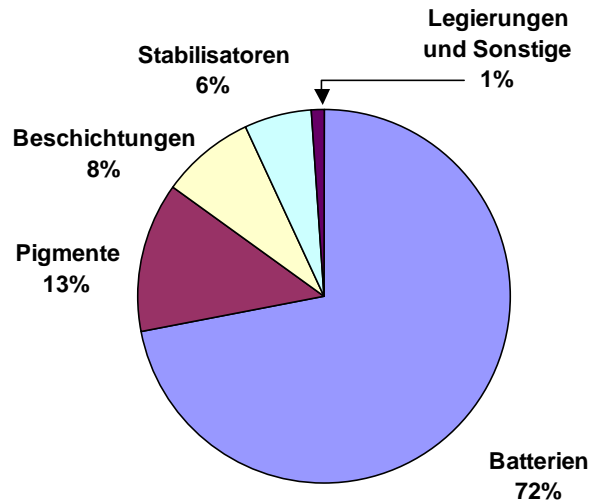


Abbildung 7-3: Einsatzgebiete für Cadmium (weltweit)

Quelle: [181]

Nach einer Studie von Balzer [20] über den Verbrauch und Verbleib von Cadmium in Deutschland waren 1994 die wesentlichen nicht exportierten Produkte, in denen Cadmium Verwendung findet, Pigmente, Stabilisatoren und Batterien (vgl. Tabelle 7-5).

Tabelle 7-5: Cadmium-Absatz in Deutschland nach Produkten (in t)

	1990	1991	1992	1993	1994
Pigmente	159,9	149,4	105,8	108,2	104,3
Stabilisatoren	206,0	141,0	154,0	100,0	91,0
Batterien	471,3	691,0	681,7	543,2	611,2
Legierungen + Lote	10,5	6,4	6,5	2,5	3,2
Galvanotechnik	0,6	1,1	0,1	1,5	2,4
Glasindustrie	7,3	17,8	10,2	12,4	14,5
Sonstige Produkte	3,4	9,1	5,4	9,4	6,7
Summe	859,0	1015,8	963,7	777,2	833,3

Quelle: Balzer [20]

Im Bereich Pigmente und Stabilisatoren sind in der Zwischenzeit die abgesetzten Cadmiummengen erheblich zurückgegangen (s.u.), so dass der Anteil der Batterien am Gesamtabsatz weiter zugenommen hat. Im Batteriebereich ist seit Beginn der achtziger Jahre der Absatz von Ni/Cd-

Akkumulatoren deutlich gestiegen, wobei das Wachstum im Wesentlichen durch die steigende Nachfrage nach wiederaufladbaren Gerätebatterien getragen wurde und weniger durch Steigerungen des Absatzes im Industriebatteriebereich [182]. Die Aufteilung der Gerätebatterien auf die verschiedenen Einsatzfelder zeigt Abbildung 7-4.

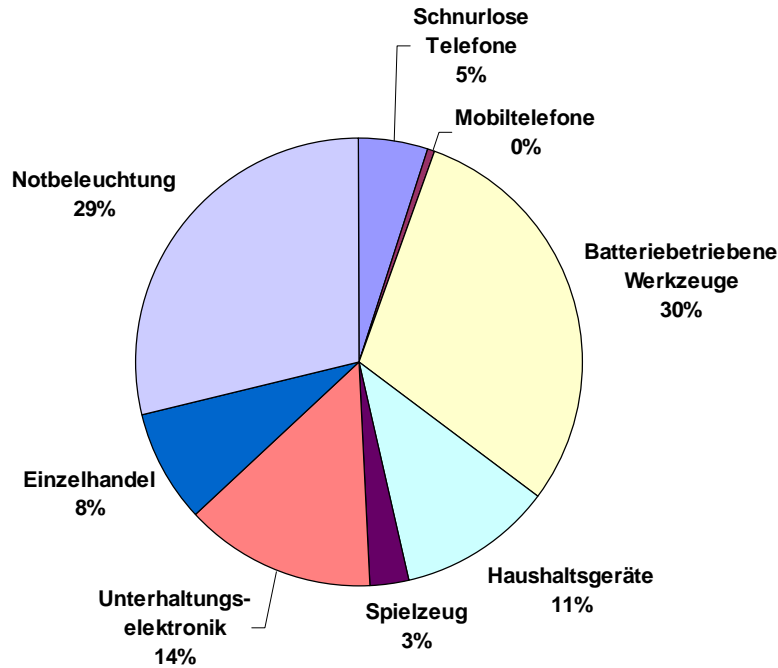


Abbildung 7-4: Einsatz für Ni/Cd-Gerätebatterien 1999 (gerundet, Gew.-%)

Quelle: [119]

Derzeit stagniert der Weltmarkt für Ni/Cd-Akkumulatoren im Gerätebatteriebereich;¹¹¹ zwar wird im Bereich der batteriebetriebenen Elektrowerkzeuge weiteres Wachstum erwartet, jedoch werden insbesondere die Märkte im Mobiltelefonbereich und für netzunabhängige Computer inzwi-

¹¹¹⁾ Der stagnierende Markt und Überkapazitäten auf dem Weltmarkt trugen neben den pessimistischen Aussichten für den Rundzellenmarkt dazu bei, dass etwa die Varta Gerätebatterien GmbH ihre Fertigung wieder aufladbarer Rundzellen am Standort Hagen im Oktober 2000 einstellte [218].

schen vollständig von anderen chemischen System (Nickelmetallhydrid, Lithium-Ionen, etc.) dominiert [204].

Die Erwartungen der deutschen Produzenten an die künftige Entwicklung im Bereich der Industriebatterien sind uneinheitlich. Die klassischen Anwendungsgebiete sind hier Unterbrechungsfreie Stromversorgungssysteme, Traktionsanwendungen, Telekommunikationseinrichtungen, Bahntechnik inkl. Signaltechnik und Dieselstarterbatterien; aber auch als Speicher für in Solaranlagen gewonnene Energie u.ä. finden sie Einsatz. Aus den Gesprächen mit deutschen Herstellern konnte keine einheitliche Tendenz bzgl. der weiteren Entwicklung abgeleitet werden. Jedoch bestehen bei den Herstellern keine Zweifel an der Notwendigkeit, an Ni/Cd als chemisches System für Akkumulatoren in zahlreichen Anwendungsbereichen festzuhalten, da nach ihrer Ansicht selbst auf mittlere bis lange Sicht keines der derzeit diskutierten alternativen Systeme (Pb/PbO und NiMH) dem Leistungsprofil der Ni/Cd-Akkumulatoren entsprechen werde (siehe z.B. [92]). Zumindest für den europäischen Raum erscheint jedoch ein weitgehender Ersatz durch alternative Systeme möglich, wobei in vielen Anwendungen jedoch ein erheblicher Aufwand zur Umstellung der Geräte auf andere Batteriesysteme getrieben werden müsste. Zum einen müssten die elektronischen Komponenten wie z.B. die Ladesysteme an die geänderten Batterien angepasst werden und andererseits ist aufgrund unterschiedlicher geometrischer Dimensionen der chemischen Systeme bei festgelegten Leistungsmerkmalen zusätzlicher konstruktiver Aufwand zu betreiben.

Durch gesetzgeberische Maßnahmen wie das Chemikaliengesetz (ChemG, [111]), die Chemikalien-Verbots-Verordnung (ChemVerbotsV, [315]) und die Gefahrstoffverordnung (GefStoffVV, [317]) ist die in Produkten eingesetzte Cadmiummenge in zahlreichen anderen Bereichen erheblich zurückgegangen bzw. es wird kein Cadmium mehr eingesetzt (s.u.).

Bei der Herstellung von Pigmenten etwa hat Cadmium zum einen durch die genannten gesetzgeberische Maßnahmen, aber auch durch die Sensibilisierung der Verbraucher (etwa bei Farbpigmenten für Kinderspielzeuge) im letzten Jahrzehnt erheblich an Bedeutung verloren. Eine Ausnahme stellen hier noch Kunststoffe dar, die bei hohen Temperaturen und/oder Drücken verarbeitet werden (High-Engineering-Plastics, wie Polyamid, Polycarbonat, Fluorpolymere [22]). Ferner ist die Zahl der Alternativen bei aggressiven Kunststoffschmelzen und Kunststoff für den Außengebrauch sehr begrenzt [44]. Für 1997 schätzt die Pigmentindustrie die in das Anwendungsgebiet Kunststoffe gegangene Menge Cadmium auf etwa 70 t [310].

Der Einsatz cadmiumhaltiger Stabilisatoren ist in den vergangenen Jahren ebenfalls sehr stark zurückgegangen (vgl. Tabelle 7-5). Für das Jahr 1995 wird ein Verbrauch von Cadmium bzw. Cadmiumverbindungen in diesem Bereich von 47 t angegeben. Durch eine Ausweitung des bestehenden Cadmiumverbots auf Produkte wie Rollläden und Fensterprofile wird diese Menge weiter abnehmen [297]. In Tabelle 7-6 ist der Verbrauch an Cadmium für PVC-Stabilisatoren, ermittelt durch Erhebungen des VKE, über einen längeren Zeitraum zusammengefasst.

Tabelle 7-6: Verbrauch an Cadmium für PVC-Stabilisatoren in Deutschland

Jahr	1979	1985	1990	1995	2000
Cadmiumverbrauch [t]	477	296	243	47	< 20*

* Schätzung

Quelle: VKE [310]

Für das Jahr 2000 wird demnach ein Verbrauch an Cadmium in PVC-Stabilisatoren von unter 20 t erwartet, so dass aus diesem Bereich zukünftig keine nennenswerte Nachfrage mehr zu erwarten ist.

Zum Schutz der Oberfläche wird eine Cadmierung noch recht häufig an extrem korrosionsbelasteten und mechanisch stark beanspruchten Teilen in der Luftfahrtindustrie angewendet [323].

Der Absatz für Legierungen und Lote ist in den letzten Jahren stark zurückgegangen (vgl. Tabelle 7-5) und hat auf den Cadmiummarkt nur marginalen Einfluss. Im Zuge der Diskussion der Europäischen Elektroschrott-Richtlinie wird derzeit u.a. ein Verbot von Cadmium und auch Blei in Loten erwogen, in denen diese zur Erniedrigung des Schmelzpunkts zum Einsatz kommen. Rund 80 % der mit Cadmium hergestellten Legierungen werden als Hartlote eingesetzt [118]. Ein weiterer Teil findet in Wismutlegierungen als Temperatursensor in Sprinkleranlagen Verwendung [221].

Der Rückgang des Cadmiumverbrauchs in zahlreichen Produkten ist neben gesetzlichen Bestimmungen insbesondere auf die Entwicklung von Substituten zurückzuführen, die z.T. zum völligen Verzicht auf den Einsatz von Cadmium geführt haben. Eine Studie zu den Substitutionsmöglichkeiten wurde 1992 von Bätcher, Böhm und Tötsch erstellt [22], in der detailliert die Anwendungsfelder von Cadmium und mögliche Alternativen vorgestellt werden. In Tabelle 7-7 werden exemplarisch einige Substitutionsmöglichkeiten für die verschiedenen Bereiche vorgestellt.

Tabelle 7-7: Beispiele für Substitutionsmöglichkeiten

Anwendungsfeld	Substitute (Beispiele)
PVC-Stabilisatoren	Ca/Zn, Pb, Sn-O, Sn-S, Ba/Zn
Pigmente	Im Bereich Kunststoffe fast völlige Substitution durch eine Vielzahl von organischen und anorganischen Verbindungen möglich und erreicht; im Bereich der keramischen Glasuren und Email nur begrenzte Ersatzmöglichkeiten
Galvanische Beschichtungen	Zink und Zinklegierungen, Zinn und Zinnlegierungen, weitere Metalle und z.T. organische Beschichtungen
Akkumulatoren	Pb/PbO, NiMH, Lithium-Systeme, ...
Lote	Zahlreiche Lotlegierungen ohne Cadmium

Quelle: basierend auf [22]

7.3 Cadmiumbilanzierung für Batterien

7.3.1 Datengrundlage

Zur Bilanzierung von Cadmium in Batterien wurden mehrere Datenquellen herangezogen. Im Bereich der Gerätebatterien wurde die zurückgenommene und einer Verwertung zugeführte Menge Ni/Cd-Gerätebatterien den Erfolgskontrollberichten der Rücknahmesysteme für 1999 bzw. 2000 entnommen. Dabei lagen zum Zeitpunkt der Berichtserstellung die Berichte des GRS-Batterien, der Vfw-REBAT sowie der Bosch GmbH vor (vgl. Kapitel 3). Der Großteil der in Verkehr gebrachten Batterien wird durch diese Systeme erfasst. Die Masse der in Verkehr gebrachten Batterien wurde ebenfalls den genannten Erfolgskontrollberichten sowie Datenzusammenstellungen des ZVEI entnommen (vgl. Tabelle 2-1). Der Cadmiumgehalt in den Batterien wurde anhand von Literaturwerten (insbesondere [27]) sowie Auswertungen der Verwertungsbetriebe (z.B. [1]) ermittelt.

Ferner wurde eine für das Jahr 1995 anhand von Daten des Statistischen Bundesamtes vorgenommene Abschätzung [296] der in Geräten importierten Menge Ni/Cd-Gerätebatterien für das Jahr 1998 aktualisiert.

Für die Ni/Cd-Industrieakkumulatoren ist eine auf Deutschland bezogene Bilanzierung schwierig. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass ein großer Teil der Produktion exportiert oder in Exportprodukten eingesetzt wird. Vielfach ist dem Hersteller der Batterien nicht bekannt, in welchem Land das Produkt, zu dem er die Batterie geliefert hat, eingesetzt wird. Aufgrund ihrer Eigenschaften finden die Ni/Cd-Industrieakkumulatoren häufig im nichteuropäischen Ausland Einsatz, etwa in den arabischen Staaten oder in Nordamerika, wo aufgrund der klimatischen Be-

dingungen besondere Anforderungen an Akkumulatoren gestellt werden müssen. Die klassischen Anwendungsbereiche sind hier Notstromversorgung, Luft- und Schienenverkehr, Photovoltaik und Elektroautos. Im Bereich der Ni/Cd-Industrieakkumulatoren wurde durch Anfragen bei den relevanten Herstellern die in der Produktion eingesetzte Cadmium- bzw. Cadmiumoxidmenge erfragt, um zumindest die Größenordnung des Cadmiumeinsatzes in diesem Produktionsbereich in Deutschland beurteilen zu können. Weltweit dominierend im Industriebatteriebereich ist allerdings das zur französischen Alcatel gehörende Unternehmen SAFT (vgl. auch 6.4.3), das nach Industrieangaben auch in Deutschland große Marktanteile besitzt.¹¹²

7.3.2 Bilanzierung von Cadmium in Batterien

Industriebatterien

Für den Bereich der Industriebatterien liegt derzeit für Deutschland aufgrund der o.a. Schwierigkeiten keine ausreichende Datengrundlage für eine vollständige Bilanzierung vor. Eine Umfrage bei den in Deutschland produzierenden Herstellern [91, 134, 99, 125] ergab, dass zur Produktion von Ni/Cd-Industrieakkumulatoren in Deutschland 1999 rund 195 t Cadmium eingesetzt wurden. Zu den zurückgenommen Mengen konnten keine Informationen gegeben werden. Durch die ACCUREC GmbH, Mülheim, wurden 1999 rund 710 t Ni/Cd-Industrieakkumulatoren verwertet (vgl. Abschnitt 6.4.1). Bei einem durchschnittlichen Cadmiumgehalt von 5 % [1] wurden somit rund 36 t Cd aus Industrieakkumulatoren zurückgewonnen. Aus diesen Daten eine Recyclingquote abzuleiten verbietet sich jedoch aufgrund der langen Lebensdauer und des hohen Exportanteils der Industrieakkumulatoren. Hinzu kommt, dass auch Recyclingunternehmen im Ausland Akkumulatoren aus deutscher Produktion verwerten, so dass derzeit kein für eine Bilanzierung ausreichendes Bild gezeichnet werden kann. Abhilfe wird hier u.U. die nachfolgend beschriebene Initiative schaffen.

Weite Teile der europäischen Hersteller und Anwender von Ni/Cd-Industrieakkumulatoren sind darum bemüht Datenmaterial zusammenzu-

¹¹²⁾ Zwischenzeitlich wurde bekannt (8/2000), dass die SAFT AB den Cadmiumbatteriebereich der Exide AG übernimmt und somit seine dominierende Marktstellung weiter ausbaut.

stellen, mit dem die Existenz weitgehend geschlossener Stoffkreisläufe für Industrieakkumulatoren belegt werden kann oder das zumindest eine realistische Beschreibung des Ist-Zustandes ermöglicht, anhand der zukünftige Fortschritte gemessen werden können.¹¹³ Die Konkurrenz zwischen den Unternehmen hat bislang eine entsprechende Datenzusammenstellung verhindert, da aus diesem Material unmittelbar Rückschlüsse auf Marktanteile und Kundenstruktur der einzelnen Wettbewerber gezogen werden könnten. Erst die Diskussion um ein Verbot von Ni/Cd-Akkumulatoren bewegt nun die betroffenen Unternehmen dazu, die relevanten Daten zu erheben und vorzustellen. In der Abbildung 7-5 f. sind die in den letzten Jahren in der Europäischen Union in Verkehr gebrachten und verwerteten Industriebatteriemengen zusammengefasst.

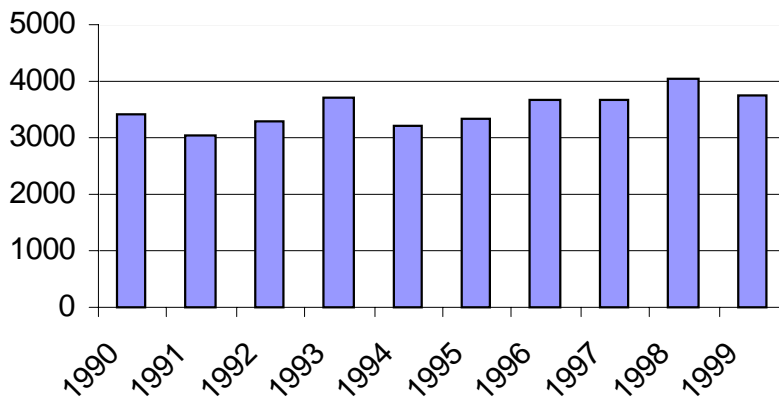


Abbildung 7-5: In der EU in Verkehr gebrachte Ni/Cd-Industriebatterien [t/a]

Quelle: CollectNiCad [49]

¹¹³) Zu diesem Zweck und zur weiteren Verbesserung der Rücknahme- und Recyclingergebnisse wurde von den Batterieherstellern die Initiative „CollectNiCad“ auf europäischer Ebene gegründet. Hauptziel dabei ist, durch eine freiwillige Selbstverpflichtung der Industrie (vgl. Abschnitt 7.5.2) und den Nachweis ausreichender Erfolge ein Verbot des Ni/Cd-Batteriesystems zu vermeiden [49].

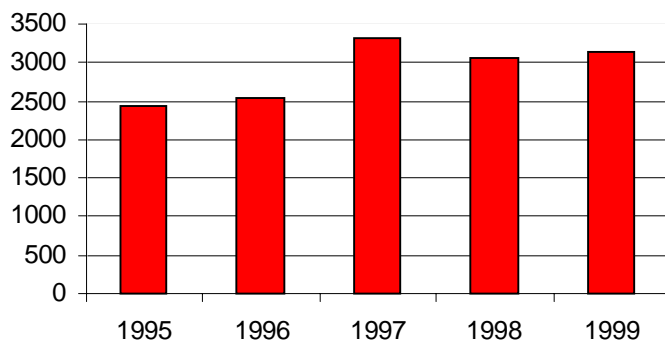


Abbildung 7-6: In der EU verwertete Ni/Cd-Industriebatterien [t/a]

Quelle: CollectNiCad [49]

Anhand der dargestellten Daten, die von CollectNiCad zusammengestellt wurden, und eines von dieser Organisation gemachten Vorschlages für die Definition einer Recyclingrate, die auf den Durchschnittswerten der in Verkehr gebrachten Mengen der letzten zehn Jahre und der recycelten Menge der letzten drei Jahre beruht, berechnet sich eine Recyclingquote von 90 %.

Auffällig an den wiedergegebenen Daten ist, dass allein die Produktion der eher kleinen deutschen Industriebatteriehersteller bei einem angenommenen Cd-Gehalt von 5 % in den Batterien und 195 t Cd-Einsatz zu einer Batteriemenge von rund 3.900 t führt, die nach den Daten der CollectNiCad der in Europa in Verkehr gebrachten Menge entspricht (1999). Eine Erklärung dafür wird von den Herstellern insbesondere im hohen Exportanteil gesehen, der dazu führt, dass weniger als die Hälfte der produzierten Batterien im Lande verbleibt [61]. Es besteht hier ein erheblicher Bedarf nach weiteren Informationen, um ein valides Bild des Ni/Cd-Industriebatteriebereich zeichnen zu können. Zu den erforderlichen Informationen zählen etwa länderspezifische Daten zu in Verkehr gebrachten Mengen sowie Daten zum Im- und Export von Ni/Cd-Industriebatterien bezogen auf die Europäische Union.

Gerätebatterien

Nach Angaben des ZVEI (siehe Tabelle 2-1) gelangten 1998 rund 2.051 t Ni/Cd-Gerätebatterien in Deutschland in Verkehr. Dies entspricht bei ei-

nem Cadmiumgehalt von rund 17 %¹¹⁴ einer Cadmiummenge von ca. 350 t. In 2000, dem ersten Jahr für das die Erfolgskontrollberichte vollständig vorliegen, wurden von den verschiedenen Sammelsystemen angeschlossenen Herstellern und Händlern 3.214 t Ni/Cd-Gerätebatterien und dementsprechend rund 550 t Cadmium in Verkehr gebracht. Im gleichen Zeitraum wurden von der GRS, Vfw-REBAT und Bosch 1.001 t Ni/Cd-Gerätebatterien zurückgenommen und in den entsprechenden Anlagen verwertet. Da von einer ordnungsgemäßen Verwertung sämtlicher zurückgenommener Ni/Cd-Akkumulatoren ausgegangen werden kann, wurden somit etwa 170 t Cadmium dem unkontrollierten Eintrag in die Umwelt entzogen. Eine Aufstellung des Umweltbundesamtes auf Basis der Erfolgskontrollberichte der Rücknahmesysteme für das Jahr 2000 ergab, dass für 69 % der in Verkehr gebrachten Nickel/Cadmium-Batterien der Verbleib nicht geklärt ist [30]. Dies entspricht bei einem Cadmiumgehalt der Batterien von 17 % einer Cadmiummenge von rund 380 t.

Vom Umweltbundesamt wurde 1998 eine Abschätzung der Anzahl an Ni/Cd-Akkumulatoren, die „versteckt“ über Importgeräte in die Bundesrepublik gelangen, durchgeführt. Datengrundlage war die Außenhandelsstatistik des Statistischen Bundesamtes für das Jahr 1995. Ergebnis der Abschätzung war, dass in der Minimalvariante mit rund 3 Mio. und in der Maximalvariante rund 8,6 Mio. Ni/Cd-Akkumulatoren mit Produkten wie schnurlosen Elektrowerkzeugen, Rasierapparate, elektr. Zahnbürsten, schnurlose Telefone, Mobiltelefone oder Unterhaltungselektronikartikeln (Walk- und Discman) in Verkehr gelangen [296]. Eine analog durchgeführte Abschätzung auf Basis der Daten des Statistischen Bundesamtes für 1998 ergab in der Minimalvariante rund 2,4 Mio. und in der Maximalvariante 6,5 Mio. Stück. Nicht berücksichtigt wurden Produkte, für die keine Datenbasis für eine Abschätzung bestand, wie etwa akkubetriebene Spielzeuge, Alarmanlagen und andere. Mittelfristig wird auch ohne ein Verbot von Ni/Cd-Gerätebatterien erwartet, dass die Anzahl „versteckt“ in Verkehr gelangender Ni/Cd-Akkumulatoren abnehmen wird, da anzunehmen ist, dass zukünftig die Zahl der Importeure und Händler abnehmen wird, die entsprechende Produkte vertreiben, ohne einem Sammelsystem und der damit verbundenen Dokumentation angeschlossen zu sein. Eine sehr

¹¹⁴) Jüngere Industriedaten legen einen Cadmiumgehalt von 13 - 14 Gew.-% nahe [50]. Die hier verwendeten Werte stammen aus den Verwertungsbilanzen eines Recyclingunternehmens [1].

grobe Abschätzung für das Jahr 1998 ergibt eine Cadmiummenge zwischen 20 und 100 t, die auf diesem Wege nach Deutschland gelangt.

7.3.3 Prognose der zukünftigen Entwicklung

Im Bereich der Gerätebatterien erscheinen für die nächsten Jahre keine großen Veränderungen der in Verkehr gebrachten Menge an Ni/Cd-Akkumulatoren wahrscheinlich. Die aktuellen Diskussionen um ein Verbot in den europäischen Ländern werden vermutlich dazu führen, dass die Hersteller nicht mehr in die Weiterentwicklung dieser Technologie investieren und statt dessen versuchen werden, mit anderen chemischen Systemen gleichwertigen Ersatz für das Ni/Cd-System zu schaffen. Insbesondere die Weiterentwicklung der NiMH-Akkumulatoren wird dazu führen, dass zum einen der Preisvorteil von Ni/Cd weiter schrumpfen wird, und andererseits für immer mehr Anwendungen geeignete Substitute vorhanden sein werden. Solange der Markt jedoch weiterhin Ni/Cd-Gerätebatterien auf einem konstant hohen Niveau aufnimmt (vgl. Kapitel 2), werden mit großer Wahrscheinlichkeit keine Produktionsanlagen geschlossen werden, sondern solange produziert, wie Gewinne zu erzielen sind. Hersteller von Produkten, die bislang fast ausschließlich mit Ni/Cd-Batterien betrieben wurden wie etwa Elektrowerkzeuge, werden frühzeitig die Umstellung ihrer Neugeräte auf andere chemische Systeme vornehmen, da anderenfalls der Absatz ihrer Produkte mit näherrückendem Verbotstermin erschwert werden würde. Der deutsche Markt für Elektrowerkzeuge ist im Vergleich etwa zu dem der Vereinigten Staaten noch nicht voll entwickelt, so dass durch die in diesem Bereich möglichen Steigerungsraten insgesamt der Ni/Cd-Absatz konstant bleiben kann. Erst auf längere Sicht, d.h. ab 2006, erscheint bei einem Inkrafttreten des Verbotes im Jahr 2008, ein deutlicher Rückgang wahrscheinlich.

Im Bereich der Industriebatterien ist eine Prognose schwierig, insbesondere da die im Rahmen des Forschungsvorhabens angesprochenen Hersteller keine einheitlichen Erwartungen an die zukünftige Entwicklung des Marktes haben und dieser auch von noch ungewissen Veränderungen der rechtlichen Rahmenbedingungen abhängig ist. Erwartete Wachstumsmärkte sind etwa der Telekommunikationsbereich, hier insbesondere die Funktion als Energielieferant bei Ausfall der Stromversorgung über die Netze. In Nordamerika kamen dazu bislang im Wesentlichen Bleiakumulatoren zum Einsatz, deren Performance bzw. Lebensdauer zunehmend in die Kritik gerät und daher Alternativen gesucht werden [187]. Der Bereich der Elektroautos (ohne Brennstoffzellen) wurde lange Zeit ebenfalls als Wachstumsmarkt für Ni/Cd-Akkumulatoren gehandelt, zumindest in Europa wird jedoch durch die Altautoverordnung u.U. dieses Marktsegment

verschlossen (s.u.). Für Europa wird daher ein Rückgang des Einsatzes von Ni/Cd-Industrieakkumulatoren erwartet, weltweit jedoch, insbesondere in Ländern mit besonderen klimatischen Bedingungen (längere Kälte- oder Hitzeperioden), werden Ni/Cd-Industrieakkumulatoren weiterhin z.T. nur bedingt ersetzbar sein.

7.4 Umweltgerechte Senken für Cadmium im Wirtschaftskreislauf

In keinem der derzeitigen Hauptanwendungsgebiete für Cadmium kann derzeit sicher von einer vollständigen Schließung der Stoffkreisläufe und damit von einer Vermeidung unkontrollierten Cadmumeintrags in die Umwelt ausgegangen werden. In einzelnen Teilbereichen erscheint es in Deutschland durchaus möglich, geschlossene Kreisläufe zu schaffen, etwa im Bereich ortsfester Batterien (z.B. Notstromaggregate in Gebäuden) oder bei elektrisch angetriebenen Kraftwagen (EV: electric vehicles). Insbesondere im letzteren Bereich werden z.B. in den USA erhebliche Steigerungen des Absatzes für möglich gehalten [289]. Auf dem europäischen Markt jedoch ist derzeit kein Anwendungsgebiet abzusehen, das einen steigenden Bedarf an Cadmium aufweisen könnte, insbesondere da der EV-Bereich durch die Altautoverordnung der EU als potentieller Wachstumsmarkt vermutlich entfällt.¹¹⁵ Mit der Erschließung neuer Verwendungsmöglichkeiten ist ebenfalls nicht zu rechnen, da das Gefahrenpotential von Cadmium bereits seit längerer Zeit bekannt ist und auf europäischer wie nationaler Ebene zahlreiche Anwendungseinschränkungen bzw. -verbote ausgesprochen wurden (vgl. Abschnitt 7.2.3). Investitionen in die Entwicklung von neuen Anwendungsbereichen für Cadmium sind somit mit dem Risiko behaftet, sich aufgrund von staatlichen Maßnahmen nicht amortisieren zu können, und unterblieben deshalb. Selbst wenn neue Anwendungsgebiete erschlossen würden oder in bestehenden wie den Elektroauto-Bereich Steigerungen der eingesetzten Cadmiummenge möglich wären, so wären diese nur kurzfristige Senken, da davon auszugehen ist, dass derartige Anwendungen nur bei hohen Recyclingraten für die jeweiligen Produkte Bestand haben werden und somit durch die wiederverwerteten Mengen der Bedarf nach „frischem“ Cadmium sinkt.

¹¹⁵) Die Altautoverordnung der EU sieht ein Verbot von Cadmium in Automobilen vor, die nach Juli 2003 auf den Markt kommen, es sei denn, das es in einem auf einer Ausnahmeliste angeführten Bauteil verwendet wird [205], [243].

Das besondere Problem des Cadmiums besteht darin, dass seine Produktion nicht aufgrund fehlender Einsatzgebiete und damit fehlenden Absatzmöglichkeiten eingestellt werden kann, da cadmiumhaltige Kuppelprodukte zwangsläufig bei einigen Metallgewinnungsprozessen (insbesondere Zink) anfallen. Weiterhin sind viele cadmiumhaltige Produkte recht langlebig (vgl. Tabelle 7-3), so dass über Jahre hinaus mit einer cadmiumhaltigen Fraktion beim Recycling der entsprechenden Produkte zu rechnen ist. Im Falle von Verboten für einzelne oder alle Anwendungsbereiche von Cadmium und somit wegfallenden Verbleibmöglichkeiten im Wirtschaftskreislauf müssen daher die Cadmiumstoffströme von den Quellen an geplant und gesteuert werden. Die derzeit gesehenen Senken mit dem geringsten Gefährdungspotential sind Untertagedeponien zur Beseitigung des Cadmiums bzw. der cadmiumhaltigen Kuppel- oder Recyclingprodukte (vgl. Abschnitt 6.8).

Dass aus Kostengründen der Cadmiumgehalt des Zinks erhöht wird, um so einen preiswerten Auslass für das Cadmium zu erhalten, ist unwahrscheinlich. Für viele Zinkanwendungen werden hohe Qualitätsanforderungen an das eingesetzte Zink gestellt, die mit erhöhten Cadmiumgehalten nicht eingehalten werden können. So ist etwa für Zinkhalbzeug, eines der wichtigsten Zinkprodukte, das Ausgangsmaterial Elektrolyt-Feinzink, das eine Reinheit von über 99,995 % besitzt [328]. Ferner weisen die in der EU gültigen Qualitätsnormen für Zink Höchstgehalte für Cadmium auf (Tabelle 7-8 f.), so dass es auch nach Angaben der Initiative Zink, einem Zusammenschluss von Herstellern und Verarbeitern von Zink und Zinkverbindungen, nicht zu erwarten ist, dass die Cadmiumgehalte des Zinks erhöht werden [114].

Tabelle 7-8: Primärzinkqualitäten (alle Angaben in Gew.-%)

Qualität	Farbcode	Nominaler Zinkgehalt	1	2	3	4	5	6	Summe 1 bis 6
			Pb max.	Cd* max.	Fe max.	Sn max.	Cu max.	Al max.	
Z1 (SHG)	weiß	99,995	0,003	0,003	0,002	0,001	0,001	0,001	0,005
Z2	gelb	99,99	0,005	0,005	0,003	0,001	0,002	-	0,01
Z3	grün	99,95	0,03	0,01	0,02	0,001	0,002	-	0,05
Z4	blau	99,5	0,45	0,01	0,05	-	-	-	0,5
Z5	schwarz	98,5	1,4	0,01	0,05	-	-	-	1,5

Anmerkungen:

*Für eine Dauer von fünf Jahren nach der Ratifizierung dieses Standards liegt der max. Cd-Gehalt der Qualitäten Z3, Z4 und Z5 bei 0,020, 0,050 bzw. 0,050 .

Tabelle 7-9: Sekundärzinkqualitäten (alle Angaben in Gew.-%)

		1	2	3	4	5	6	Summe	
	Nominaler	Pb	Cd*	Fe	Sn	Cu	Al	1 bis 6	
Qualität	Zinkgehalt	max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.	Bemerkung
ZS1	98,5	1,4	0,05	0,05	*)	-	-	1,5 **)	hauptsächlich hergestellt aus Schrotten und Altprodukten
ZS2	98	1,6	0,07	0,12	*)	-	-	2,0**)	
ZS3	97,75	1,7	0,09	0,17	-	-	-	2,25	
ZSA	98,5	13	0,02	0,05	-	-	-	1,5	hauptsächlich hergestellt aus zinkhaltigen Abfällen, A-schen

Anmerkungen::

*) Sn max. 0,3 % für Messingherstellung, 0,7 % für Galvanisierungen. Falls Sn zu diesen Anteilen vorhanden ist, kann der tatsächliche Zinkgehalt niedriger als nominale Zinkgehalt sein.

**) Mit Ausnahme von Sn falls in den in *) genannten Anteilen vorhanden

Quelle: [80]

7.5 Instrumente zur Steuerung der Cadmiumstoffflüsse

In diesem Abschnitt werden verschiedene Instrumentarien zur Beeinflussung und Steuerung der Cadmiumstoffflüsse vorgestellt und bewertet, wobei Batterien im Mittelpunkt der Betrachtung stehen. Die zur Diskussion stehenden Instrumente müssen einer Reihe von Anforderungen genügen, um als effiziente Lösung dauerhaft geeignet zu sein. Zunächst werden kurz einige grundsätzliche Punkte zu umweltpolitischen Instrumenten zur Steuerung von Cadmiumstoffflüssen angesprochen, ehe in Abschnitt 7.5.2 verschiedene konkrete Maßnahmen diskutiert werden.

7.5.1 Grundsätzliches

Eine Hauptschwierigkeit bei der Wahl des richtigen Instruments zur Stoffstromsteuerung ist, neben der Wahrung der Verhältnismäßigkeit, dessen Wirksamkeit und die Auswirkungen der ihm innewohnenden Parameter abzuschätzen. Um zielgerichtet Maßnahmen ergreifen zu können, sollte von einer möglichst breiten und belastbaren Datenbasis ausgegangen werden können. Am Beispiel der Ni/Cd-Industrieakkumulatoren wird diese Problematik deutlich: Während bisher die cadmiumhaltigen Gerätebatterien im Mittelpunkt der Diskussion standen, sind zunehmend auch die Industrieakkumulatoren ins Blickfeld geraten. Da es sich hierbei häufig

um große Installationen handelt,¹¹⁶ die einzelnen Kunden bekannt sind und die verbrauchten Großakkus noch einen gewissen Materialwert besitzen, ist meist in Europa von Rücklaufquoten über 90 % und damit von weitgehend geschlossenen Stoffkreisläufen ausgegangen worden. Mit den restlichen 10 %, deren Verbleib ungewiss ist, besteht dennoch immer noch ein nicht zu vernachlässigendes Gefahrenpotenzial für die Umwelt. Ein überzeugender Beleg für die hohe Recyclingquote konnte außerdem bislang nicht präsentiert werden, da u.a. der Wettbewerb zwischen den Unternehmen das Zusammentragen der erforderlichen Zahlen verhinderte. Derzeit versucht die Industrie, diesen Missstand zu beseitigen, um so ein Eingreifen des Staates¹¹⁷ unnötig zu machen. So hat sich unter anderem die Initiative CollectNiCad, deren Hauptziel die Verhinderung eines Verbotes von Ni/Cd-Batterien ist, kurz nach Ablauf des Forschungsvorhabens bereiterklärt, bei der Schließung von Datenlücken zu helfen [52].¹¹⁸ Zudem dürfte nach dem Inkrafttreten der Batterieverordnung in ihrer novellierten Fassung (vgl. Kapitel 3), in der umfangreiche Dokumentationspflichten auch für Industriebatterien enthalten sind, eine bessere Datenlage für diesen Bereich zu erwarten sein.

Zur Erreichung umweltpolitischer Ziele werden in Deutschland konkrete, in der Regel fallbezogene Werkzeuge eingesetzt. Diese bauen auf dem Umweltschutz-, Verursacher-, Vorsorge-, Kooperations- und Gemeinlastprinzip auf. Es werden direkte (ordnungsrechtliche) und indirekte (ökonomische) Maßnahmen unterschieden (vgl. [64]): Direkte Maßnahmen umfassen Gesetze, Verordnungen, Verwaltungsvorschriften sowie Einzelanordnungen. Eine der Hauptschwächen der direkten Maßnahmen ist das Fehlen von Knappheitssignalen¹¹⁹, was zu einer - unter der umweltpolitischen Zielsetzung - Fehlallokation von Ressourcen führen kann. Indirekte Maßnahmen zielen auf den Markt, dessen Wettbewerbsmechanismen zur Erreichung der gesetzten Ziele genutzt werden sollen. Den Markt-

¹¹⁶) Beispiele hierfür sind etwa Batterien zur Sicherstellung der Stromversorgung in Krankenhäusern oder für Verkehrsleitsysteme.

¹¹⁷) Bzw. übernationaler Organisationen wie die Europäische Union.

¹¹⁸) Erörterungen zur Datenlage zu Cadmium in Batterien fanden am 28.06.01 im Rahmen eines Fachgespräches im Umweltbundesamt statt.

¹¹⁹) Knappheitssignale weisen auf die begrenzte Verfügbarkeit eines (Wirtschafts-) Gutes hin. Bei Rohstoffen und Produkten ist in der Regel der Preis ein geeigneter Indikator für die relative (im Vergleich zu möglichen Substituten) Knappheit. Bei Umweltgütern fehlen häufig diese Signale, da nur begrenzt eine Internalisierung externer Kosten (etwa zur Beseitigung von Umweltschädigungen) erfolgt.

teilnehmern soll weitgehend selbst überlassen sein, wie sie in dem durch den Staat gesteckten Rahmen die Zielvorgaben erreichen.

7.5.2 Konkrete Maßnahmen

Von den zur Steuerung der Cadmiumstoffflüsse in Frage kommenden Instrumenten werden im Folgenden zunächst die zentralen aktuell diskutierten Möglichkeiten vorgestellt und erörtert. Dabei handelt es sich um ein Verbot von Cadmium in Batterien - u.U. mit regelmäßig zu überprüfenden Ausnahmeregelungen¹²⁰ -, wie es im Entwurf der Generaldirektion Umwelt der EU-Kommission vorgesehen ist, und Freiwillige Selbstverpflichtungen der Industrie, wie sie von weiten Teilen der Ni/Cd-Industrie, vertreten durch die Organisation CollectNiCad, vorgeschlagen werden. Ergänzend werden noch eine Reihe flankierender und sonstiger Maßnahmen zum Erreichen der umweltpolitischen Ziele diskutiert.

▪ **Verbot des Einsatzes von Cadmium in Batterien:**

Dies ist mit Abstand der weitgehendste mögliche Eingriff zur Verhinderung des **Eintrages** von Cadmium in Batteriestoffkreisläufe. Auf internationaler Ebene sind bereits direkt oder indirekt entsprechende Forderungen erhoben worden, wie etwa im Rahmen eines Ministertreffens der OSPAR-Kommission¹²¹ [217] oder auf europäischer (EU-) Ebene, wo die Einleitungen, Emissionen und Verluste als besonders gefährlich erachteter Stoffe (u.a. Cadmium) beendet bzw. schrittweise eingestellt werden sollen [151]. Bei dieser Maßnahme ist mit erheblichem Widerstand auf Seiten der Ni/Cd-Batteriehersteller und -anwender zu rechnen. Die Wirksamkeit der Maßnahme, d.h. das Vermeiden von Cadmumeinträgen in die Umwelt durch Batterien, erscheint gesichert. Zu beachten ist, dass Informationen über Anwendung und Substitutionsmöglichkeiten von Nickel/Cadmium-Batterien fast ausschließlich zu den größeren Einsatzbereichen vorliegen (vgl. Abschnitt 7.6.1); vor einem entsprechenden Verbot sollte

¹²⁰) Der Entwurf für die neue EU-Batterierichtlinie sieht ein Verbot des Inverkehrbringens von Batterien mit mehr als 0,002 Gew.-% Cadmium ab dem Jahr 2008 vor. Bis zum 01. Januar 2007 können die Mitgliedstaaten Ausnahmeregelungen für Anwendungsbereiche beantragen, für die keine geeigneten Substitute verfügbar sind [75].

¹²¹) Die Osparcom (OSLO-PARIS-Konvention) ist ein internationales Übereinkommen zum Schutz der Meeresumwelt des Nordatlantiks [54].

daher geprüft werden, ob nicht andere Anwendungsgebiete, in denen evtl. keine Substitutionsmöglichkeiten bekannt oder verfügbar sind, zu sehr geschädigt würden.¹²² Prinzipiell erscheint jedoch insbesondere für Ni/Cd-Gerätebatterien, die in Geräte eingebaut oder über den Ersatzbatteriehandel in Verkehr gelangen, ein Verbot mit Ausnahmeregelungen zielführend. Es ist bei Betrachtung der bisherigen Erfolge der Sammelsysteme unwahrscheinlich, dass eine weitgehende Rücknahme aller cadmiumhaltigen Gerätebatterien erreicht werden kann und somit sichergestellt ist, dass diese nicht unkontrolliert nach Gebrauch in die Umwelt gelangen. Ein Verbot würde auf lange Sicht dieses Risiko ausschließen. Zu den ggf. zu treffenden Ausnahmeregelungen sind die politischen Entscheidungsträger auf belastbare und nachvollziehbare Informationen aus der Industrie angewiesen, um beurteilen zu können, in welchen Anwendungsbereichen konkret Nachteile durch eine Substitution entstehen bzw. wo eine solche gar derzeit als unmöglich betrachtet wird.

▪ **Freiwillige Selbstverpflichtungen der Industrie:**

Freiwillige Selbstverpflichtungen sind naturgemäß das Instrument mit den geringsten Akzeptanzproblemen seitens der Industrie und mit dem Höchstmaß an Gestaltungsfreiheit für die betroffenen Unternehmen. Schwierigkeiten bereitet bei diesem Instrument zunächst, dass die Vereinbarungen meist von Verbänden geschlossen werden und nicht alle relevanten Unternehmen zwangsläufig Mitglied dieser Verbände sein müssen. Dadurch tritt das Problem der „Trittbrettfahrer“ auf, d.h. es profitieren Firmen von den Verbandsaktivitäten, ohne dass sie diese in irgendeiner Form unterstützen, oder durch diese wird die Zielerreichung unmöglich gemacht. Hauptzweck der freiwilligen Selbstverpflichtungen ist in der Regel das Verhindern „härterer“ staatlicher Maßnahmen zur Erreichung der gesetzten umweltpolitischer Ziele. Vorteilhaft ist vor allem, dass durch Freiwillige Selbstverpflichtungen eher auch unter ökonomischen Gesichtspunkten günstige Problemlösungen erreicht werden als durch zu deterministische staatliche Vorgaben hinsichtlich der zu ergreifenden Maßnahmen. Aufgrund der Erfahrungen mit der freiwilligen Selbstverpflichtung zur Rücknahme von schadstoffhaltigen Batterien von 1988 ist jedoch weder von Regierungs- als auch von Seiten der Batterieindustrie insgesamt die notwendige Akzeptanz zu erwarten,

¹²²) Entsprechende Hinweise wurden von Seiten der Industrie im Rahmen eines Fachgespräches am 28.06.01 im Umweltbundesamt vorgebracht.

dustrie insgesamt die notwendige Akzeptanz zu erwarten, die dieses Instrument zur erfolgreichen Umsetzung benötigt. Insofern ist die Erreichung des umweltpolitischen Ziels einer deutlichen Reduzierung bzw. eines Stopps des Cadmиеintrags in die Umwelt fraglich. Auf nationaler Ebene wird daher für Deutschland im Batteriebereich kaum eine Möglichkeit für entsprechende Vereinbarungen mehr gesehen.

Die Hersteller von Ni/Cd-Batterien versuchen derzeit, durch eine freiwillige Selbstverpflichtung ein Verbot auf europäischer Ebene zu verhindern. Dazu wurde die bereits erwähnte Organisation CollectNiCad ins Leben gerufen, in der neben den Herstellern von Ni/Cd-Batterien¹²³ auch Batterierecyclingunternehmen, OEMs,¹²⁴ sowie eine Reihe anderer Industrieverbände vertreten sind. In dem im Dezember 1999 der Generaldirektion Umwelt der Europäischen Kommission vorgeschlagenen Selbstverpflichtung verpflichteten sich die angeschlossenen Batteriehersteller, alle notwendigen Maßnahmen zu ergreifen, um eine ordentliche Sammlung und Verwertung verbrauchter Ni/Cd-Batterien innerhalb der Europäischen Union zu erreichen. Konkret soll dies bedeuten, dass im Bereich der Ni/Cd-Gerätebatterien über einen Zeitraum von vier Jahren 5.000 t Ni/Cd-Batterien/a gesammelt und verwertet werden. Dies stellt eine deutliche Steigerung gegenüber der 1999 verwerteten Menge von 1.451 t Ni/Cd-Gerätebatterien (2000: 2.040 t) dar. Im Industriebatteriebereich soll über den gleichen Zeitraum versucht werden, eine Recyclingquote¹²⁵ von 95 % der „zur Sammlung zur Verfügung stehenden“ Batterien zu erreichen [51], [50]. Zur Sammlung soll auf bereits bestehende Rücknahmesysteme in den Mitgliedsländern zurückgegriffen werden, wo noch keine derartigen Systeme bestehen, sollen entsprechende Strukturen aufgebaut werden.

Insbesondere für den Bereich der *Gerätebatterien* erscheint die Selbstverpflichtung jedoch kein geeignetes Instrument zu sein. Dies

¹²³) Von den Mitgliedern von CollectNiCad werden nach eigenen Angaben über 90 % der weltweit in Verkehr gebrachten Ni/Cd-Batterien hergestellt [51].

¹²⁴) OEMs sind **O**riginal **E**quipment **M**anufacturer, die eingekaufte Produkte (hier Ni/Cd-Batterien) in ihre eigenen Produkte einbauen und in Verkehr bringen, zum Beispiel in Elektrowerkzeugen.

¹²⁵) Zur von CollectNiCad vorgeschlagenen Berechnungsmethode der Recyclingquote vgl. Abschnitt 7.3.2.

ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass für diese eher kleinen und in privaten Haushalten weit verbreiteten Batterien derart hohe Sammelquoten, die auf tatsächliches Schließen des Cadmiumstoffkreislaufes in Batterien schließen ließen, nicht erreichbar erscheinen. Zudem entsprechen die angestrebten Sammelmengen etwa 15 g Ni/Cd-Gerätebatterien je Einwohner, ein Wert, der zumindest in Deutschland bereits jetzt nahezu erreicht wird (vgl. Abschnitt 7.3.2), ohne dass eine vollständige Schließung des Stoffkreislaufes erreicht wurde. Daher wird der Vorschlag in Deutschland vermutlich kaum die notwendige Akzeptanz finden können. Unabhängig davon, ob die angestrebten 5.000 t Ni/Cd-Gerätebatterien erreicht würden, bestünden ferner Zweifel, ob nicht weiterhin Ni/Cd-Gerätebatterien im nennenswerten Umfang durch die Sammelaktivitäten nicht erfasst werden. Aufgrund der größeren geometrischen Ausmaße und den zu einem Großteil gewerblichen Verbraucher erscheinen dagegen für *Industriebatterien* die gesteckten Ziele eher erreichbar, jedoch würde eine Recyclingquote von 95 % bezogen auf die Werte für 1999 in Deutschland (vgl. 7.3.2) bedeuten, dass immer noch für rund 10 t Cadmium/a aus Industriebatterien der ordnungsgemäße Umgang am Ende der Nutzungsdauer nicht gesichert ist. Ein weiteres Problem ist mit der Frage verbunden, was bei Nichterreichen der gesetzten Ziele geschieht. Hier wäre eine Art gesetzgeberischer Automatismus vorzusehen, damit nicht nach dem u.U. erfolglosen Auslaufen der Selbstverpflichtung erneut der langwierige politische Diskussionsprozess von vorne beginnen müsste und somit die beabsichtigte Umweltentlastung weiter verzögert würde. Ferner besitzen die Verbände selbst keinerlei wirksame Druckmittel gegenüber Trittbrettfahrern, wie die Erfahrungen mit den in Deutschland gegebenen Selbstverpflichtungen zeigen, so dass in diesen Fällen der Staat doch eingreifen müsste. Insbesondere diese in Deutschland gesammelten Erfahrungen deuten darauf hin, dass im Batteriebereich ohne direktes Eingreifen des Gesetzgebers keine deutlichen Umweltentlastungen erreicht werden können, es sei denn, es bestehen auch wirtschaftliche Vorteile durch die Verwertung wie im Falle der Bleistarterbatterien (vgl. Kapitel 8). Durch die Annahme einer Selbstverpflichtung stehen die Staaten der EU ferner unter einer Art moralischen Zwang, zunächst keine weiteren Maßnahmen zu ergreifen und den Erfolg oder Misserfolg der Selbstverpflichtung abzuwarten.

- **Flankierende und sonstige Maßnahmen:**
Der Staat kann neben den bereits genannten Instrumenten durch eine Reihe von flankierenden Maßnahmen auf die industriellen Stoffströ-

me Einfluss nehmen. Nachfolgend werden einige dieser Maßnahmen diskutiert.

Subventionierung der Entsorgung von zwangsläufig anfallendem Cadmium

Neben dem bei den Recyclingprozessen für Ni/Cd-Batterien anfallenden Cadmium fällt das Schwermetall zwangsläufig bei der Gewinnung von NE-Metallen, insbesondere bei der Zinkgewinnung an (vgl. Abschnitt 7.2.1). Eine Subventionierung der Entsorgung von Cadmium bzw. hoch cadmiumhaltiger Recycling- und Kuppelprodukte könnte die Folgen eines evtl. Verbotes für die Recyclingunternehmen und die Bereiche der Metallindustrie, in denen Cadmium als Kuppelprodukt zwangsläufig anfällt, prinzipiell abmildern helfen. Die Subventionierung könnte etwa durch die Bereitstellung einer kostengünstigen Entsorgungsmöglichkeit (Untertagedeponie) erfolgen. Damit wird gewährleistet, dass nicht durch zu hohe Entsorgungskosten¹²⁶ das Recycling der derzeit im Wirtschaftskreislauf befindlichen cadmiumhaltigen Produkte eingestellt wird und dass Wettbewerbsnachteile gegenüber Konkurrenten aus dem Ausland möglicherweise verschärft werden. So ist beispielsweise Zink ein auf dem Weltmarkt gehandeltes Produkt, bei dem die deutsche bzw. die europäische Zinkindustrie von ihrer Wettbewerbsfähigkeit verlöre, wenn sie mit Entsorgungskosten für ihre zwangsläufig anfallenden cadmiumhaltigen Kuppelprodukte konfrontiert würde, die Konkurrenten im Ausland nicht zu tragen haben. Die Subventionierung könnte kostenneutral durch Einnahmen finanziert werden, die der Staat durch das Belegen des Einbringens von Cadmium in die Umwelt bzw. den Wirtschaftskreislauf mit einer Abgabe erhält (vgl. folgende Maßnahme).¹²⁷

¹²⁶) So liegt allein der für die Untertagedeponierung derzeit zu zahlende Preis bei rund 470 DM/t [261]. Hinzu kommen noch Kosten für die u.U. erforderliche Konditionierung der Abfälle vor ihrer Einlagerung.

¹²⁷) Die Enquete-Kommission des 12. Deutschen Bundestages zum Schutz der Menschen und der Umwelt weist insbesondere der Zinkindustrie eine hohe Bedeutung zu. In einer Stoffstrombetrachtung wurde ihre gute Eignung als Möglichkeit, Cadmium gezielt aus den Stoffkreisläufen zu entfernen, festgestellt und empfohlen, nicht verkaufbares Cadmium in geeigneter Form durch die öffentliche Hand kostenfrei zu deponieren [70].

Abgabelösungen und Steuern

Abgabelösungen können etwa derart ausgestaltet werden, dass die Einnahmen den Einzählern erstattet werden. Schweden und Norwegen setzen dieses Instrument zur Lenkung von Stickoxid-Emissionen ein [93]. Die Grundidee ist zunächst eine Abgabe für in Umlauf gebrachte Schadstoffe. Die auf diesem Wege erzielten Einnahmen kommen allerdings nicht dem Staatshaushalt zugute, sondern werden, eventuell abzüglich der Verwaltungskosten, den Einzählern - im erwähnten Fall den Stickoxidemittenten - zurückerstattet. Der Anreiz für Unternehmen liegt nun in den unterschiedlichen Berechnungsgrundlagen für Abgabe und Subvention. Während sich die Abgabe an der emittierten Menge Stickoxid orientiert, wird die Subvention anhand allgemeinerer Kriterien vergeben. Im Fall des Cadmiums wäre es etwa denkbar, die Abgabe an die eingesetzte Cadmiummenge zu koppeln, die Subvention aber auf Grundlage der Rücknahme- und Recyclingaktivitäten zu vergeben. Das Konzept läuft darauf hinaus, dass Hersteller mit geringen ökologischen Ambitionen die umweltgerechter Arbeitenden durch ihre Abgaben fördern. Die in Schweden und Norwegen mit diesem Instrument gemachten Erfahrungen im Bereich der Stickoxid-Emissionen sind zwar sehr positiv, durch den Rückerstattungsmodus ist das Modell auch leichter durchzusetzen als eine weitere Steuer oder Abgabe ohne Rückerstattung. Voraussetzung für die Wirksamkeit ist jedoch vor allem ein ausreichend hoher Abgabesatz, so dass der Innovationsanreiz für die Unternehmen deutlich wird. Schwierigkeiten dürfte bei einer praktischen Umsetzung zudem insbesondere die Festlegung des Rückerstattungsschlüssels und die Vermeidung von Wettbewerbsverzerrungen bereiten. Für die wirksame Steuerung von Cadmiumstoffflüssen erscheint eine Abgabelösung daher nicht zielführend.

Einfacher gestaltet sich der Fall bei der Erhebung einer Steuer, d.h. wenn die Einnahmen dem allgemeinen Staatshaushalt zugeführt werden. Da in diesem Fall keine Rückerstattung erfolgt, wird die Verwendung von Cadmium für den Hersteller und letztendlich für den Kunden verteuert. Diese Lösung ist damit ein klassisches Beispiel für die Internalisierung externer Effekte. Die Wirtschaftssubjekte stehen vor der Wahl, wie bisher Cadmium zu verwenden, allerdings deutlich mehr dafür zu bezahlen, oder aber Cadmium zu substituieren. Eine angemessene, spürbare Höhe der Abgabe ist zwingend erforderlich, um die Wirksamkeit der Maßnahme zu gewährleisten. Es sollte dennoch deutlich werden, dass diese Abgabe nicht zum Zweck der Haushaltsfinanzierung erhoben wird, sondern tatsächlich ökologischen Zwecken dient. Dies wird ein wesentliches Kriterium bei der Akzep-

tanz dieses Instruments sein. Dazu könnte etwa beitragen, mit den Einnahmen Subventionen in Bereiche zu lenken, die zur Schließung der Stoffkreisläufe beitragen (s.o.). Die Batterieindustrie wird die Belastung durch Abgaben über einen Aufschlag auf die Verkaufspreise ganz oder teilweise auf die Verbraucher umwälzen wollen und müssen. Dadurch werden Ni/Cd-Akkumulatoren gegenüber anderen Akkumulatorensystemen an Preisvorteil verlieren. Umweltfreundlichere Produkte, etwa Lithium-Ionen- oder Nickelmetallhydrid-Akkumulatoren gewinnen an Wettbewerbsfähigkeit und tragen dazu bei, die Cadmiummengen in den Stoffkreisläufen zu verringern. Ein Beispiel für sogenannte Ökosteuern im Batteriebereich liefert Belgien. Dort wird diese Konzeption erfolgreich auf unterschiedliche Produktarten angewandt. Ziel der belgischen Ökosteuer ist die Förderung des Recyclings bestimmter, als gefährlich eingestufte Stoffe. Bei Erfüllung bestimmter Wiederverwendungs-/Recyclingquoten wird auf die Erhebung der Ökosteuer ganz oder teilweise verzichtet. Batterien sind herstellerunabhängig von der Ökosteuer befreit, solange es der Industrie gelingt, jedes Jahr mittels der zu diesem Zweck gegründeten Organisation BEBAT die geforderten Quoten zu erreichen. Der Anreiz für die Industrie besteht hier also vor allem in der Etablierung eines effektiven Recyclingsystems, um der zusätzlichen Steuerbelastung zu entgehen. Unter Annahme einer 100%igen Rücklaufquote wäre dieses Konzept mithin genauso geeignet wie z.B. ein völliges Verbot: Es würde kein Cadmium mehr unkontrolliert aus dem Kreislauf in die Umwelt gelangen. Diese Annahme ist aus einer Vielzahl von Gründen jedoch wenig realistisch. Der hauptsächliche Schwachpunkt, der darüber hinaus zunächst einmal außerhalb der Einflussnahme der Industrie steht, ist die momentan noch sehr enttäuschende Rücklaufquote seitens der Haushalte. Die Einführung einer Ökosteuer scheint daher nur in Kombination mit anderen Maßnahmen, etwa der Einführung eines Pfandsystems (s.u.), sinnvoll. Ferner stehen in Belgien Rücknahmequoten im Vordergrund, eine Lenkwirkung in Richtung Substitution durch weniger umweltgefährliche Stoffe ist nicht vorhanden. Dies könnte etwa durch nach chemischen Batteriesystem gestufte Abgaben und geforderte Quoten erreicht werden.

Pfandpflicht

Eine Alternative zu einem völligen oder teilweisen Verbot von Cadmium in Batterien könnte theoretisch ein in sich geschlossener Kreislauf für das Cadmium sein. Das Ziel, die Umweltbelastung durch Cadmium zu minimieren würde dadurch erreicht, dass das Cadmium vollständig recycelt wird. Dies ist auch der von den Batterie-

herstellern favorisierte Weg. Das am schwierigsten zu beeinflussende Glied im Kreislauf im Falle von Batterien sind jedoch nun die privaten Haushalte. Die Bereitschaft, gebrauchte Batterien und Akkumulatoren zu Händlern und Sammelstellen zurückzubringen ist noch zu schwach ausgeprägt. Sowohl Sammelsysteme als auch Recyclingeinrichtungen sind wenig effizient, solange Teile der Haushalte ihre Akkumulatoren in den Hausmüll entsorgen. Nachfolgend sollen Möglichkeiten aufgezeigt werden, über Pfandpflichten die Haushalte zu verstärkter Batterierückgabe zu animieren.

Die Erhebung eines Pfandes wird in der Batterie-Richtlinie 91/157/EWG vom 18. März 1991 ausdrücklich als geeignete Maßnahme zur Sicherstellung eines effektiven Recyclingsystems erwähnt. In der deutschen Batterieverordnung schlägt sich dies in der Pfandpflicht für Auto-Starterbatterien nieder; ein Pfandsystem für andere Batterien ist zunächst nicht vorgesehen. Dieses könnte auf Grundlage der EU-Richtlinie jedoch geändert werden. Pfandsysteme sind den deutschen Verbrauchern vor allem durch den Getränkehandel bekannt und vertraut. Ein Pfandsystem für Batterien oder zumindest Ni/Cd-Akkumulatoren wäre also wenig erklärungsbedürftig. Auch haben die Erfahrungen im Getränkehandel gezeigt, dass ein solches System auf Dauer prinzipiell praktikabel ist.

Zur Einrichtung eines Pfandsystems ist eine zentrale Einrichtung wie etwa die GRS erforderlich, an die Hersteller und Importeure das von den nachgeschalteten Vertriebsstellen erhobene Pfand weiterleiten. Die Rücknahmestellen, also vor allem die Einzelhändler, zahlen dann ihren Kunden den Pfandbetrag bei Rückgabe aus und bekommen diesen von der Zentralstelle erstattet. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die festzulegende Höhe des Pfandes. Bätcher und Böhm [22] vergleichen hierzu wieder mit dem System des Getränkehandels. Dort ist die Pfandhöhe zwar niedriger als der Materialwert, aber dennoch hoch genug bemessen, um einen Anreiz zur Rückgabe zu erzeugen. Akkumulatoren haben hier zwei wesentliche Abweichungen: Zum einen beträgt der Materialwert nur wenige Pfennige, so dass das Pfand zwangsläufig höher sein muss, um einen spürbaren Anreiz zu erzeugen, zum anderen fallen alte Akkumulatoren in wesentlich kleineren Mengen als leere Getränkeflaschen an, die ja meist in Kästen gehandelt werden. Das Pfand muss also so bemessen sein, dass beim Verbraucher nicht der Eindruck entsteht, für die jeweils geringe anfallende Menge lohne sich der Aufwand der Rückgabe doch nicht. Aber auch nach oben sind dem Pfandbetrag Grenzen gesetzt: Amerikanischen Studien zufolge hat ab einem bestimmten Betrag eine Er-

höhung des Pfandes keine feststellbare Veränderung der Rücklaufquote mehr zur Folge [22]. Die Autoren empfehlen ein Pfand zwischen DM 1,- und DM 5,- pro Akkumulator. Sie führen aus, dass eine zu hohe Pfandbelastung eine erhebliche Kapitalbindung bedeuten kann, ein Argument, das auch von der Bundesregierung bei der Verabschiedung der Batterierichtlinie gegen ein allgemeines Pfand genannt wurde. Das durch das Pfand gebundene Geld wirkt quasi wie ein zinsloser Zwangskredit der Konsumenten an den Handel [177]. Bei einem Pfandsystem müssen zudem Betrugsmöglichkeiten ausgeschlossen werden. Die Einführung eines Pfandsystems zieht schließlich weitere Kosten nach sich. Jegliche Kosten wären letztendlich von den Verbrauchern zu tragen, so dass neben der Pfanderhebung auch noch diese Kosten dem Akkumulatorpreis zugeschlagen werden würden.¹²⁸

In Deutschland ist regierungsseitig allerdings nicht mit einer Wiederaufnahme der Diskussion um Pfandregelungen zu rechnen, wie die jüngste Novellierung der Batterieverordnung zeigt (vgl. Abschnitt 3.2.3). In ihr sind keine über das Pfand für Starterbatterien hinausgehende Pfandregelungen enthalten; und auch im Vorfeld der Novellierung sind keine erneuten Diskussionen über dieses Instrument bekannt geworden.

Weitere flankierende Maßnahmen

Im Bereich der flankierenden Maßnahmen sind ferner die Unterstützung der Industrie oder wissenschaftlicher Forschungseinrichtungen bei der Entwicklung cadmiumfreier Produkte für Anwendungsfelder zu nennen, in denen derzeit aufgrund unzureichender Substitutionsmöglichkeiten bei einem Verbot Lücken entstehen würden. Zusätzlich sollte durch entsprechende Informationen in den Schulen und an anderen öffentlichen Stellen zum umweltgerechten Umgang mit verbrauchten Batterien aufgerufen werden, wobei diese Maßnahme nur langfristig Früchte tragen kann. Eine verstärkte Dokumentationspflicht für die Industrie und großen Anwender von cadmiumhaltigen Produkten über deren Verbleib müsste für alle Bereiche zwingend sein, in denen kein Verbot bzw. eine Ausnahmeregelung ausgesprochen wird.

¹²⁸) Der Umweltrat empfiehlt in seinem letzten Gutachten [299] eine Pfandregelung für schadstoffhaltige Batterien.

Zusammenfassende Bewertung der Instrumente:

Zusammenfassend ergibt sich aus der Diskussion der Instrumente zur Steuerung der Cadmiumstoffflüsse und aus den vorhergehenden Informationen, dass für den Gerätebatteriebereich ein Verbot von Cadmium, wie im Entwurf für die neue europäische Batterierichtlinie vorgesehen, der einzige sichere Weg ist, zukünftig eine Umweltbelastung durch Cadmium aus Gerätebatterien zu verhindern. Offen bleiben muss an dieser Stelle jedoch die Frage der Ausnahmeregelungen, also der möglicherweise noch fehlenden Substituierbarkeit in einigen Anwendungsbereichen, da hierzu gegensätzliche Aussagen von verschiedenen Batterieherstellern und Anwendern vorliegen. In vielen Feldern wie etwa schnurlosen Telefonen, Akkurasierern oder einfachen Elektrowerkzeugen ist jedoch unstrittig schon jetzt ein vollständiger Ersatz möglich. Auf eine Verwertung der Ni/Cd-Batterien zu verzichten und diese statt dessen vollständig zu entsorgen ist unter dem Gesichtspunkt der Ressourcenschonung (Wiedergewinnung des Nickels und Eisens) nicht anzuraten. In den Bereichen, in denen aufgrund einer Ausnahmeregelungen das Verbot zunächst nicht wirksam wird, sind Maßnahmen zu ergreifen, die eine Schließung der Stoffkreisläufe zum Ziele haben. Hier sind u.a. hohe Anforderungen an die Dokumentation des Verbleibes der Ni/Cd-Batterien zu stellen. Da auch im Industriebatteriebereich trotz der deutlich besseren Situation im Vergleich zu den Gerätebatterien nicht von geschlossenen Stoffkreisläufen ausgegangen werden kann, erscheint auch hier ein Verbot mit Ausnahmeregelungen als sicherer Weg zur Verhinderung möglicher Umweltbelastungen vertretbar.

7.6 Mögliche Konsequenzen eines generellen Verbots von Cadmium in Batterien

7.6.1 Konsequenzen für Produkte

Im Bereich der schnurlosen Elektrowerkzeuge wie Bohrmaschinen, Bohrhämmer, Tacker, Heckenscheren etc. wird z.T. als Argument gegen ein Verbot cadmiumhaltiger Batterien ins Feld geführt, dass keine technischen Alternativen verfügbar seien (z.B. [272]). Insbesondere die Hochstromfähigkeit wird dabei als entscheidender Vorteil genannt. Cadmiumfreie Alternativen (insbesondere Nickelmetallhydrid, NiMH) sind jedoch verfügbar und werden bereits in einem Teil der Geräte bedeutender Hersteller wie Bosch, Black&Decker, Metabo, Makita und Electrolux eingesetzt. Diese besitzen zwar derzeit noch nicht in allen Fällen die gleiche gute

Tieftemperaturunempfindlichkeit und Schnellladefähigkeit wie die Ni/Cd-Akkumulatoren, und auch die Zahl der möglichen Ladezyklen ist geringer, jedoch können bei gleichem Platzbedarf größere Energiemengen gespeichert werden [193], [284]. Bei der bisherigen Entwicklung der als Hauptalternative angesehenen NiMH-Batterien stand die höhere Kapazität im Fordergrund. Aufgrund der Erfahrungen, die bei der Entwicklung von Ni/Cd-Akkumulatoren zu ihrer jetzigen Leistungsfähigkeit gemacht wurden, scheint das Potential der Ni/MH-Akkumulatoren derzeit noch nicht ausgereizt zu sein, so dass die Nachteile gegenüber Ni/Cd-Akkumulatoren abnehmen werden bzw. gar deren Leistungsfähigkeit übertroffen werden kann [284]. Nach Herstellerangaben sind für den Großteil der Anwendungen von Ni/Cd-Akkumulatoren bereits heute gute Alternativen verfügbar, wobei gerade im Bereich der preiseempfindlichen qualitativ einfachen Geräte (sogenannte „Vatertagsgeschenke“) die Leistungsunterschiede der Systeme irrelevant geworden sind [179]. Schwierigkeiten für eine Substitution werden durch die Industrie vor allem im Bereich der Elektrowerkzeuge für professionelle Anwender gesehen. Aufgrund von Weiterentwicklungen der Ni/Cd-Akkus seien hier in den letzten Jahren Steigerungen der Leistungsfähigkeit erreicht worden, die in diesem Marktsegment zu einem anhaltenden großen Wachstum geführt haben. Hier wird befürchtet, dass der Einsatz von weniger leistungsfähigen Akkus den Absatz erheblich behindern wird [52].

Auch wenn derzeit noch nicht für alle Einsatzbereiche von Ni/Cd-Gerätebatterien Alternativen zur Verfügung stehen, erscheint doch die im aktuellen Entwurf für eine neue EU-Batterierichtlinie vorgesehene Übergangszeit bis 2008 ausreichend, um diese Lücken zu schließen. Gegebenfalls besteht weiterhin die Möglichkeit, eine Ausnahme für bestimmte Anwendungen zu beantragen, bis auch für diese geeignete Substitute entwickelt worden sind. Dies kann in Bereichen der Fall sein, wo - wie etwa bei Notstromeinrichtungen in Krankenhäusern - langwierige Zulassungsprozesse für alternative Systeme durchlaufen werden müssen [212]. Analoges gilt etwa für Sicherheitsbeleuchtungssysteme, bei denen zahlreiche Vorschriften beachtet werden müssen. Insbesondere die Funktionsfähigkeit bei hohen Temperaturen etwa im Falle eines Brandes sowie die Ausfallsicherheit ist hier bedeutsam. Hier ist es nach Industrieangaben noch nicht möglich, mit alternativen Batteriesystemen die Anforderungen zu erfüllen, die an Ni/Cd-Akkumulatoren für diesen Einsatzbereich, in dem rund 29 % der Ni/Cd-Gerätebatterien eingesetzt werden (vgl. Tabelle 7.4), gestellt werden [50].

Im Bereich der Ni/Cd-Industriebatterien, etwa Antriebsbatterien oder ortsfesten Energiespeichern, wurden bislang keine derart rasanten techno-

logischen Fortschritte, die mit der Entwicklung alternativer Batteriesysteme einhergingen, gemacht, wie sie im Gerätebatteriebereich (vgl. Kapitel 2) in den letzten Jahren zu beobachten waren. Eine Ausnahme besteht im Bereich der Elektrofahrzeuge, wo auch mit NiMH- oder Lithiumakkumulatoren aufgrund ihrer dort besonders zum Tragen kommenden höheren Leistungsdichte der Einsatz erprobt wird. Jedoch besteht im Wesentlichen der Wettbewerb zwischen Ni/Cd- und Bleiakkumulatoren. Da in Deutschland in der Regel die klimatischen Anforderungen gering sind, finden hier häufig die billigeren Bleiakkumulatoren Verwendung. Aber auch in Ländern mit extremen hohen oder niedrigen Temperaturen erscheint in fast allen Anwendungen ein Ersatz möglich, wobei dieser mit z.T. erheblich höheren Kosten verbunden sein wird.¹²⁹

7.6.2 Konsequenzen für die bestehenden bzw. sich in der Entwicklung befindlichen Rücknahmesysteme

Aller Voraussicht nach wird ein Verbot von Cadmium in Batterien mit Übergangsfristen bis zum vollständigen Inkrafttreten verbunden sein werden. Diese sollen den Batterieherstellern und -anwendern Gelegenheit geben, sich entsprechend den neuen Marktbedingungen zu positionieren und ihre Produktpalette auf alternative chemische Systeme umzustellen. Bei der derzeit diskutierten Übergangsperiode bis zum Jahr 2008 könnte die Motivation der Hersteller von Ni/Cd-Akkumulatoren abnehmen, intensiv zu erfolgreichen Rücknahme- und insbesondere Verwertungssystemen in den einzelnen europäischen Staaten beizutragen. Insbesondere da die Schädlichkeit von unkontrolliert in die Abfallstoffströme eingehenden cadmiumhaltigen Batterien ein Hauptmotiv für die Forderung des Gesetzgebers zur Einrichtung derartiger Systeme gewesen war, könnte das weitgehende Auslaufen¹³⁰ der Ni/Cd-Akkumulatorenproduktion zu einer erheblichen Verringerung der Anstrengungen bzgl. geschlossener Stoffkreisläufe für die in den Batterien enthaltenen Materialien führen. Insbesondere dort, wo noch keine Rücknahmesysteme bestehen, könnte nach Ansicht der International Cadmium Association die Motivation zur Einführung neuer Programme verringert werden [182].

¹²⁹) Die höheren Kosten resultieren beispielsweise aus zusätzlichen Maßnahmen, die zur Stabilisierung der Batterietemperatur (Kühlung bzw. Heizung) erforderlich sind.

¹³⁰) Für besondere Anwendungen etwa im militärischen Bereich wird vermutlich ein Teil der Produktionskapazitäten für Ni/Cd-Gerätebatterien erhalten bleiben.

U.U. werden von dem Verbot betroffene Hersteller aus gemeinsamen Rücknahmesystemen ausscheiden; beachtet werden sollte jedoch, dass die bedeutenden Batteriehersteller in der Regel mehrere chemische Systeme in ihrer Produktpalette führen und daher auch langfristig ein Interesse an effizienten Rücknahmesystemen zur Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen besteht. Dies gilt insbesondere in Deutschland, da hier die Verpflichtung zur Rücknahme und Verwertung bzw. schadlosen Beseitigung für Batterien unabhängig vom chemischen System besteht. In den Ländern, in denen nur auf bestimmte schadstoffhaltige Batterien gezielte Rücknahmeprogramme initiiert wurden, könnten drastischere Auswirkungen auftreten, wenn nicht entsprechende Gegenmaßnahmen, wie sie auch im EU-Richtlinienentwurf vorgesehen sind, durch die Gesetzgeber ergriffen werden.

Auf Seiten der Vertreiber/des Handels sind keine Verhaltensänderungen zu erwarten. Die ohnehin noch verbesserungsfähige Information der Verbraucher über die Rückgabepflicht und die Möglichkeiten dazu in den Geschäften (vgl. [311]) dürfte nicht beeinflusst werden. Für den Handel und seinen Beitrag zu den Rücknahmesystemen besitzen die chemischen Systeme der zurückgenommenen Batterien - solange keine akuten Gefahren¹³¹ mit ihnen verbunden sind - keine Bedeutung, da der zu betreibende Aufwand von ihnen unabhängig ist.

Die Partizipation der Verbraucher an den Rücknahmeaktivitäten wird vermutlich nicht beeinflusst werden, da er im Normalfall nicht unterscheidet, welchem chemischen System seine verbrauchten Batterien angehören. Prinzipiell gehören Batterien zu den Produkten, die der Verbraucher als erstes nennt, wenn nach getrennt zu sammelnden Schadstoffen gefragt wird [138].

7.6.3 Konsequenzen für Verwerter

Ziel der Verwerter von Ni/Cd-Batterien ist zum einen, für die Hersteller und Händler eine entsprechend vergütete Entsorgungsdienstleistung zu erbringen. Die Vergütung für die schadlose Entsorgung allein ermöglicht keinen rentierlichen Betrieb der Verwertungsverfahren, so dass auf der

¹³¹) So können etwa Batterien, die metallisches Lithium enthalten, bei unsachgemäßer mechanischer oder elektrischer Behandlung zu Bränden, Explosionen und der Freisetzung schädlicher Gase (z.B. Chlorwasserstoff) führen [6].

anderen Seite die Erzeugung möglichst hochwertiger Verwertungsprodukte aus den Einsatzmaterialien angestrebt wird (vgl. Abschnitt 6.4).¹³² Aufgrund des Verfalls der Cadmiumpreise (vgl. Abschnitt 7.2.2) besitzt das Cadmium dabei die geringere Bedeutung. Sofern aufgrund unzureichend sortierter Eingangsstoffe etwa erhöhte Zink- oder Quecksilberspuren im Cadmiumprodukt auftreten, wird dieses i.d.R. auf Deponien beseitigt, da die Kosten einer Raffination, die technisch ohne weiteres möglich wäre, nicht an den Markt weitergegeben werden können. Selbst im Falle ausreichender Reinheit des Cadmiums bereitet bereits jetzt das Absetzen auf dem Markt Schwierigkeiten, da die Nachfrage zu gering ist. Ein Verbot wird diese Problematik verschärfen, so dass der Verbleib des aus dem Recycling resultierenden Cadmiums diskutiert werden muss (vgl. Abschnitte 7.4 und 7.5).

Die entscheidende Bedeutung bei den Verwertungsprodukten besitzt das Nickel/Eisen-Produkt, das - sofern die Restcadmiumgehalte hinreichend gering sind - ein gut absetzbarer Einsatzstoff für die Stahlherstellung ist. Die in Abbildung 7-7 gezeigte Entwicklung der Nickelpreise verdeutlicht die hohe Bedeutung des Nickel/Eisen-Produktes im Vergleich zum Cadmium.

¹³²) Häufig sind die für die Dienstleistung zu zahlenden Preise Funktionen des Cadmium- und Nickelpreises an der Londoner Metallbörse.

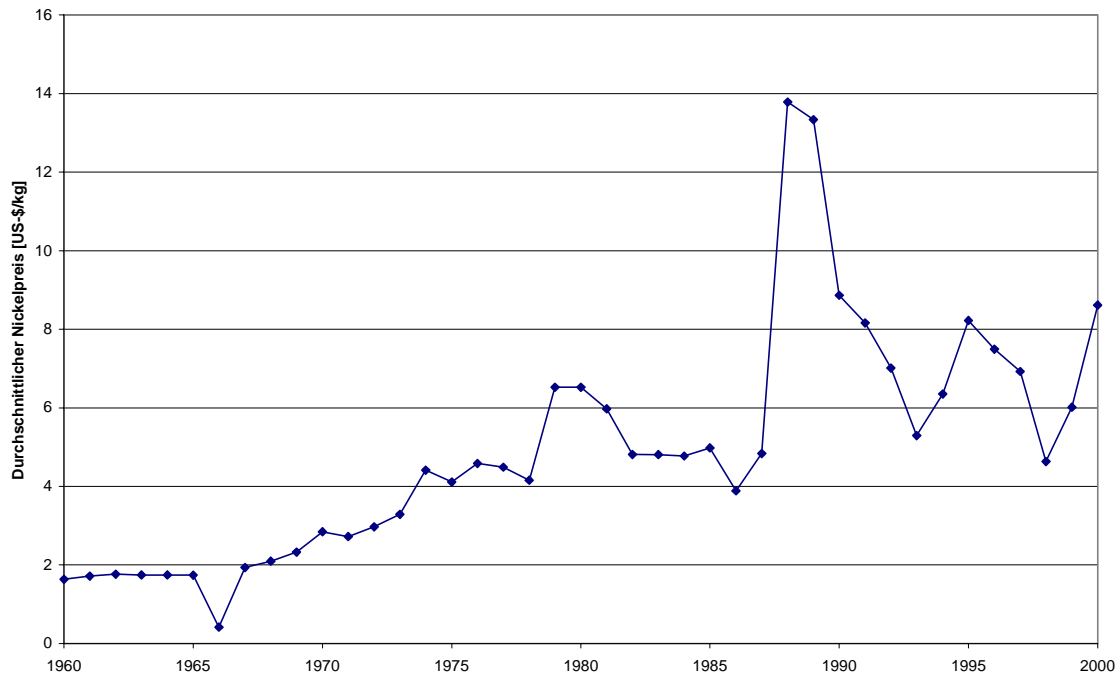


Abbildung 7-7: Entwicklung der Nickelpreise 1960 – 2000

Quelle: [164]

Im Jahr 2000 wurden zeitweise Nickelpreise von über 10 US-\$/kg bezahlt, wobei sich zum Jahreswechsel die recht volatilen Preise um bei knapp über 7 US-\$/kg bewegten [121]; die wirtschaftliche Bedeutung des Nickels bei der Verwertung wird daher voraussichtlich weiter zunehmen. Für den Nickelmarkt sind durch ein Verbot von Ni/Cd-Akkumulatoren keine Auswirkungen zu erwarten. Im Gegensatz zum Cadmium geht nur ein sehr geringer Teil in die Batterieindustrie; die Haupteinsatzfelder sind nichtrostende Stähle (51 %), legierte Stähle (12 %), Nickelbasislegierungen (15 %) sowie Vernickelungen (11 %) und Gussprodukte (5 %) [118]. Zudem dürften die im Verhältnis zum Gesamtnickeleinsatz ohnehin geringen Minderverbräuche im Gerätebatteriebereich durch weitere Zunahmen im Bereich der Nickelmetallhydrid-Akkumulatoren mehr als kompensiert werden.

Je mehr zu recycelndes Material zur Verfügung steht, umso kosteneffizienter können Verwerter arbeiten. In Abhängigkeit der konkreten Ausgestaltung des Verbotes sind unterschiedliche Konsequenzen zu erwarten. Sofern sich das Verbot auf Gerätebatterien beschränkt, dürfte ein Weiterbestand der Verwertungsanlagen als gesichert gelten, da bereits ohne ein Verbot ein Großteil des Einsatzmaterials aus dem Industriebatteriebereich und Produktionsabfällen stammt. Sollte sich das Verbot auf alle Arten von cadmiumhaltigen Batterien beziehen ist, der dauerhafte Weiterbestand aller bestehenden Verwertungsunternehmen unwahrscheinlich.

Aufgrund der langen Nutzungsdauer der Akkumulatoren vor allem in industriellen Anwendungen könnte so eine Zeit lang eine Kluft zwischen zurückkommenden Ni/Cd-Akkumulatoren und Verwertungskapazitäten entstehen. Auf der anderen Seite haben die Verwertungsunternehmen (vgl. auch Abschnitt 6.4) bereits ihr Dienstleistungsangebot um die Verwertung von NiMH-Akkumulatoren und z.T. weiterer Batteriesysteme erweitert bzw. arbeiten an entsprechenden Prozessentwicklungen. Dies könnte zum Weiterbestand der Anlagen auch nach einem Verbot beitragen.

7.6.4 Konsequenzen für die Zinkindustrie

Bei den in Deutschland zur Zinkgewinnung eingesetzten pyro- und hydrometallurgischen Prozessen (siehe Tabelle 7-10) fallen aufgrund der Cadmiumgehalte der primären und sekundären Rohstoffe cadmiumhaltige Kuppelprodukte an.¹³³

¹³³) Ausnahmen stellen hier z.T. die Prozesse dar, in denen nur metallische Einsatzstoffe (Schrotte) eingesetzt werden, oder die Zwischenprodukte wie Wälzoxid erzeugen.

Cadmiumproblematik

Tabelle 7-10: Zinkerzeugung und -recycling in Deutschland

Unternehmen	Metaleurop Weser GmbH, Nordenham	Ruhrzink GmbH, Datteln	Metallhütte M.I.M. Hüttenwerke Duisburg	B.U.S. Metall GmbH, Duisburg
Prozesstechnik	Elektrolyse	Elektrolyse	Imperial-Smelting-Prozess, Thermische Raffination	Wälzverfahren
Einsatzstoffe	Erzkonzentrate	Erzkonzentrate	50 % Sekundärmaterialien	hauptsächlich EAF-Staub*
Verbrauch [t/a]	225.000	170.000	250.000	60.000
Kapazität (erzeugtes Zink) [t/a]	130.000	105.000	100.000	12.000 (Zinkgehalt des Wälzoxids)
Hauptprodukte	Zink und Zinklegierungen	Zink	Zink und Zinklegierungen, Rohblei	Wälzoxid
Wichtigste Nebenprodukte	Schwefelsäure, Cadmium	Schwefelsäure, Cadmiumschwamm	Schwefelsäure, Cadmiumkarbonat, Schlacke	Schlacke
Unternehmen	B.U.S. Zinkrecycling Freiberg GmbH	Harzer Zink GmbH, Harlingerode	Harz Metall GmbH, Goslar	Metallwerk Dinslaken
Prozesstechnik	Wälzverfahren, Wälzoxidlaugung	Schmelzreaktor	Wälzverfahren	Umschmelzen
Einsatzstoffe	hauptsächlich EAF-Staub*	Sekundärmaterialien	57 % EAF-Staub*, 43 % Retortenreststoffe	hauptsächlich Zinkschrotte
Verbrauch [t/a]	40.000	60.000	65.000	45.000
Kapazität (erzeugtes Zink) [t/a]	9.000 (Zinkgehalt des Wälzoxids)	20.000 SHG-Zink** 6.500 Umschmelz-zink	9.500 (Zinkgehalt des Wälzoxids)	40.000
Hauptprodukte	Gelaugtes Wälzoxid	Zink	Wälzoxid	Zink und Zinklegierungen
Wichtigste Nebenprodukte	Schlacke	Schlacke, Mischoxid	Schlacke	Zinkaschen

Quelle: [238], eigene Aktualisierungen

* EAF = Elektrolichtbogenofen

** Special High Grade (entspricht Z1 in Tabelle 7-8)

Zur Abschätzung der möglichen Konsequenzen einer durch ein Verbot in Batterien erheblich verringerten Nachfrage nach Cadmium wurde mit Unternehmensvertretern die Problematik diskutiert [253, 173, 176]. Dabei ergab sich, dass bereits bei der derzeitigen Marktsituation (vgl. Abbildung 7-2) die durch die Erzeugung und den Verkauf eines Cadmiumproduktes zu erzielenden Erlöse die Gestehungskosten - sofern überhaupt - nur knapp decken. Ein bedeutendes Unternehmen der deutschen Zinkindustrie, die Ruhrzink GmbH, hat aus wirtschaftlichen Überlegungen heraus bereits die Weiterverarbeitung des bei der Laugenreinigung¹³⁴ zwangsläufig anfall-

¹³⁴) Zur Beschreibung der Produktionsprozesse siehe z.B. [238].

lenden cadmiumhaltigen Kuppelproduktes (sogenannter Cadmiumschwamm) zu hochreinem Cadmium eingestellt und deponiert den Cadmiumschwamm statt dessen nach einer Konditionierung auf einer Untertagedeponie. Dieses Unternehmen verarbeitete früher auch das bei der Behandlung der Sinteranlagenstäube der Metallhütte M.I.M. Hüttenwerke Duisburg anfallende Cd/Zn-Mischkarbonat [23]. Auch dieses Kuppelprodukt wird zwischenzeitlich in einer Untertagedeponie beseitigt. Ein Verbot von Ni/Cd-Batterien und der damit verbundene anhaltende Verfall der Cadmiumpreise wird voraussichtlich aufgrund unzureichender Wirtschaftlichkeit auch in weiteren Unternehmen zur Einstellung der „Veredelung“ der cadmiumhaltigen Kuppelprodukte führen. Diese Unternehmen werden dann durch die Kosten der erforderlichen Untertagedeponierung und ggf. vorhergehenden Konditionierung belastet.¹³⁵ Demgegenüber steht u.U. der Wegfall z.T. arbeits- und damit personalintensiver Prozessstufen.

¹³⁵) Zu einer groben Abschätzung dieser Kosten für die großen Zinkerzeuger können etwa folgende Annahmen dienen: anfallende Menge cadmiumhaltigen Zwischenprodukts: ca. 500 t/a; Deponiegebühren und Konditionierung: 500 – 700 DM/t; demnach zusätzliche Kosten: 250.000 – 350.000 DM/a. Der Großteil der Kosten ist auf die Deponiegebühren zurückzuführen, die für eine Untertagedeponie bei rund 470 DM/t liegen [261].

8 Analyse des Starterbatteriebereichs

In diesem Kapitel wird der Bereich der Blei-Säure-Batterien - der „klassischen“ Starterbatterien - analysiert. Zunächst werden in Abschnitt 8.1 einige allgemeine Informationen über die Produktion und den Gebrauch von Blei vorangestellt, ehe in Abschnitt 8.2 die Verfahren und Unternehmen in Deutschland vorgestellt werden, die Blei aus primären und - hier besonders relevant - sekundären Rohstoffen erzeugen. Die Strukturen zur Rücknahme und Verwertung verbrauchter Starterbatterien werden in Abschnitt 8.3 vorgestellt. Abschließend wird in Abschnitt 8.4 eine Abschätzung der Recyclingquote für Bleistarterbatterien in Deutschland durchgeführt, die eine Bewertung der aktuellen Situation in diesem speziellen Anwendungsfall für Batterien ermöglicht.

8.1 Produktion und Gebrauch von Blei

Deutschland gehört zu den Haupterzeugern und -verwendern von Nichteisenmetallen in der Europäischen Union. Weitere bedeutende Produzenten und Verwender sind Großbritannien, Frankreich, Belgien und Italien sowie mit einigem Abstand Spanien und Schweden. Im Folgenden werden zunächst Informationen über Produktion und Gebrauch von Blei gegeben, ehe die Verwertung verbrauchter Bleibatterien beschrieben wird.

Blei ist mit rund 350.000 t Jahresproduktion in Deutschland und mit über 6 Mio. t weltweit (vgl. Tabelle 8-1) eines der am meisten gebrauchten Nichteisenmetalle.

Tabelle 8-1: Bleiproduktion/-verbrauch in Deutschland, der EG und weltweit in Mio. t

Jahr	Deutschland [Mio. t]		EG [Mio. t]		Weltweit [Mio. t]	
	Produktion	Verbrauch	Produktion	Verbrauch	Produktion	Verbrauch
1990	0,349	0,392	1,389	1,513	5,419	5,407
1991	0,363	0,414	1,425	1,503	5,299	5,216
1992	0,354	0,412	1,372	1,454	5,314	5,168
1993	0,334	0,350	1,356	1,348	5,429	5,146
1994	0,332	0,354	1,569	1,604	5,464	5,493
1995	0,314	0,360	1,541	1,685	5,762	5,866
1996	0,238	0,342	1,796	1,942	5,837	5,987
1997	0,329	0,336	1,891	1,968	6,019	6,014
1998	0,352	0,321	1,848	1,952	5,999	5,998
1999	0,353	0,339	1,846	1,999	6,276	6,245
Ø 90 - 99	0,332	0,362	1.603	1.697	5.682	5.654

Quellen: [238], [140]

Die Anwendungsfelder für Blei haben sich im Laufe der letzten Jahrzehnte grundlegend geändert. Während aufgrund toxikologischer Er-

kenntnisse eine ganze Reihe von Anwendungen wie z.B. Kosmetika, Trinkwasserleitungen, Nahrungsmittelverpackungen und der Bereich der Kraftstoffadditive wegfielen, kam Blei in anderen Anwendungen verstärkt zum Einsatz. Insbesondere sind hier Blei-Säure-Batterien zu nennen, für deren Herstellung derzeit weltweit rund 60 - 70 % des erzeugten Bleis verwendet werden. Weitere Einsatzgebiete sind die Herstellung medizinischer Ausrüstung, die Atomindustrie, die Druckereibranche und das Baugewerbe. Eine Übersicht über die Bleimengen, die in Deutschland in den verschiedenen Produkten Verwendung finden, gibt Tabelle 8-2.

Tabelle 8-2: Bleinutzung 1989, 1998 und 1999

	Bleiverbrauch [Tsd. t]		
	1989	1998	1999
Akkumulatoren	178	182	197
Farben, Chemie	107	70	71
Halbzeuge	47	53	53
Kabel	14	3	3
Legierungen	12	12	14
Sonstiges	6	1	1
Gesamt	364	321	339

Quelle: [337]

Der weltweite Verbrauch an Blei nimmt unter den Nichteisenmetallen nach Aluminium, Kupfer und Zink den vierten Rang ein. In Europa liegt der Bleiverbrauch derzeit bei etwa 2,0 Mio. t pro Jahr. Blei wird zu einem großen Teil recycelt. Weltweit wird etwa die Hälfte der gesamten Produktion aus sekundären Einsatzstoffen erzeugt. In Deutschland liegt dieser Anteil aufgrund des Recyclings von Blei-Akkumulatoren mit 54 % über dem weltweiten Durchschnitt [238].

In Deutschland wird in zwei Unternehmen Blei in Badschmelzprozessen aus primären und sekundären Materialien erzeugt. Eine weitere Anlage arbeitet nach dem Imperial-Smelting-Prozess. Da ihr Hauptprodukt jedoch Zink ist, wird sie in diesem Kapitel nicht behandelt. Auf sie wurde jedoch bereits in Abschnitt 6.2.1 als Verwertungsaggregat für zinkhaltige Batterien eingegangen. Die Bleierzeugung ausschließlich aus Sekundärmaterialien wird in mehreren großen Sekundärhütten und einigen kleinen Recyclinganlagen durchgeführt. Die Standorte der deutschen Anlagen zur Bleierzeugung sind in Abbildung 8-1 dargestellt, detaillierte Informationen über diese Anlagen enthält Tabelle 8-3.

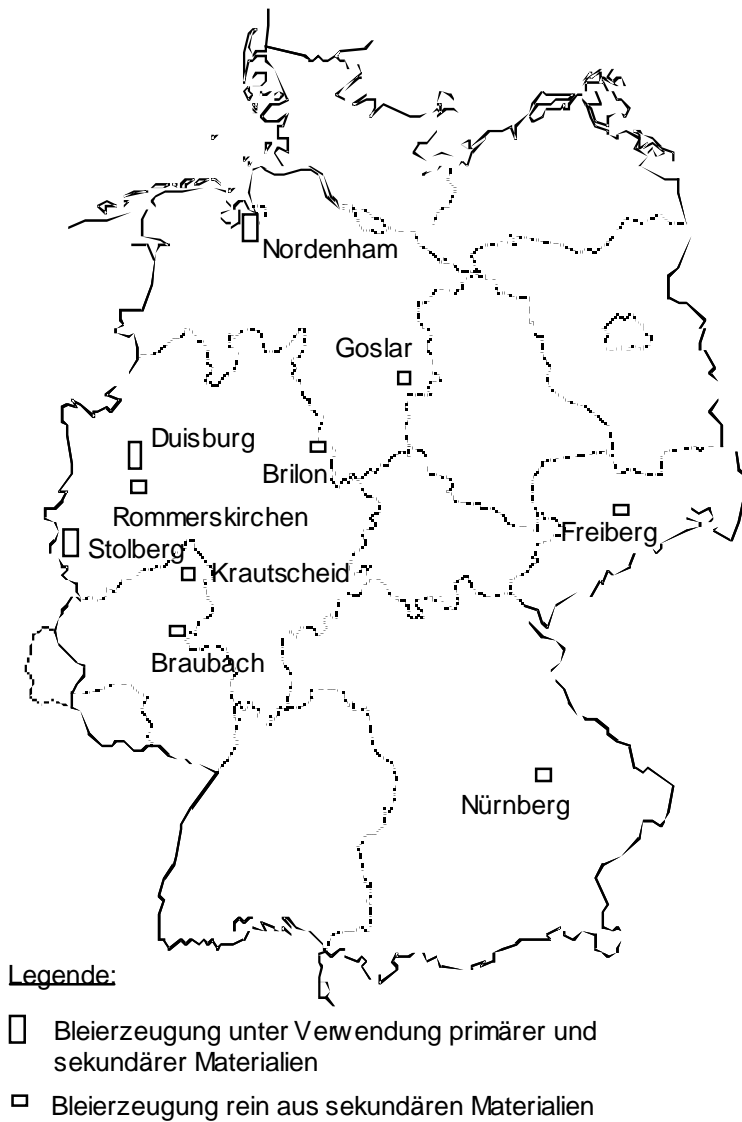


Abbildung 8-1: Standorte von Anlagen zur Bleierzeugung in Deutschland

Quelle: [238]

Analyse des Starterbatteriebereichs

Tabelle 8-3: Daten zu Bleihütten und Recyclinganlagen in Deutschland

Technische Daten/ Betreiber	Berzelius Metall GmbH, Stolberg	Metaleurop Weser Blei GmbH, Nordenham	Metallhütte M.I.M. Hüttenwerke, Duisburg	MRU GmbH, Freiberg ^{*)}	VARTA Recycling GmbH, Krautscheid
Prozesstechnik	QSL	Sirosmelt	Imperial-Smelting-Prozess	Engitec-Technik, KTOs	VARTA-Prozess (Bleischachtofen)
Spezielle Anlagen	-	-	-	Sonderabfallverbrennungsanlage	-
Verbrauch Einsatzstoffe [t/a]	150.000	130.000	250.000	55.000	55.000
Zusammensetzung	Bleikonzentrate (60%), bleihaltige Sekundärmaterialien (40%) (Rohblei)	Bleikonzentrate (45%), bleihaltige Sekundärmaterialien (55%) (Rohblei)	Bleikonzentrate (50%), blei-/zinkhaltige Sekundärmaterialien (50%) 100.000 Zink	Altbatterien, bleihaltige Sekundärmaterialien, Schrotte	Altbatterien, bleihaltige Sekundärmaterialien, Schrotte
Prod.kapazität Rohblei ^{*)} [t/a]	90.000	90.000	35.000	40.000	35.000
Prod.kap. raffiniertes Blei [t/a]	150.000	120.000	-	50.000	50.000
Hauptnebenprodukte	Schwefelsäure, Schlacke	Schwefelsäure, Schlacke	Schwefelsäure, Cadmiumkarbonat, Schlacke	Natriumsulfat, PP-Chips	Schlacke, Blei-Eisen-Stein, Bleikrätze
Technische Daten/ Betreiber	BSB Recycling GmbH, Braubach ^{**)}	Bleihütte Oker, Harz-Metall GmbH, Goslar	Metallhütte Hoppecke GmbH & Co. KG, Brilon	Metallhüttengesellschaft Schumacher Rommerskirchen	Hetzel Metalle GmbH, Nürnberg
Prozesstechnik	Engitec-Technik, KTOs	MA-Technik, KTOs	KTOs	KTOs	KTOs
Spezielle Anlagen	Kompoundierungsanlage	-	-	-	-
Verbrauch Einsatzstoffe [t/a]	55.000	75.000	12.000	18.000	22.000
Zusammensetzung	Altbatterien, bleihaltige Sekundärmaterialien, Schrotte	Altbatterien, bleihaltige Sekundärmaterialien, Schrotte	Altbatterien, bleihaltige Sekundärmaterialien, Schrotte	Schrotte (75%), Altbatterien (25%)	Schrotte (80%), Altbatterien (20%)
Prod.kapazität Rohblei ^{*)} [t/a]	35.000	25.000	10.000	15.000	18.000
Prod.kap. raffiniertes Blei [t/a]	40.000	50.000	10.000	15.000	20.000
Hauptnebenprodukte	PP, PP-Chips, Paste	Paste	Schlacke, Bleikrätze	Schlacke, Blei-Eisenstein, Bleikrätze	Schlacke

^{*)} Die Nominalkapazität liegt meist über den oben genannten Werten.

^{**)} MRU: Muldenhütten Recycling und Umwelttechnik, BSB: Blei- und Silberhütte Braubach
Quelle: [238]

Im Folgenden werden die in der Tabelle 8-3 aufgeführten Produktionsprozesse zur Bleigewinnung aus primären und sekundären Rohstoffen vorgestellt.

8.2 Produktions- bzw. Verwertungsprozesse

In diesem Abschnitt werden sowohl die Bleierzeugung in Primärbleihütten als auch Prozesse der Bleierzeugung aus Sekundärmaterialien in Deutschland kurz dargestellt. Die Einbeziehung der Primärhütten ist erforderlich, da sie ebenfalls Sekundärmaterialien einsetzen, und daher eine scharfe Trennung zwischen Primär- und Sekundärerzeugung nicht möglich ist. Zur Bleierzeugung werden derzeit nur pyrometallurgische Verfahren im industriellen Maßstab eingesetzt, hydrometallurgische Verfahren finden keine kommerzielle Verwendung. Ausgangsmaterial der primären Bleierzeugung sind in der Regel sulfidische Bleikonzentrate mit einem mittleren Gehalt von 60 - 70 % Blei. Kohlenstoffhaltige/oxidische Bleikonzentrate sind von geringerer Bedeutung. Der überwiegende Teil an sekundären Einsatzstoffen für die Bleiproduktion sind die hier im Mittelpunkt stehenden Blei-Akkumulatoren. An zweiter Stelle stehen Schrotte aus der Akkumulatorenherstellung. Ferner werden Bleche, Rohrschrotte, Schlämme und Krätzen als sekundäre Einsatzstoffe eingesetzt.

Eine vergleichende Bewertung der verschiedenen Blei-Säure-Batterie-Verwertungsverfahren und -anlagen ist im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht erforderlich gewesen, da erst vor kurzer Zeit im Rahmen der Bestimmung „Beste Verfügbarer Techniken“ (BVT) im Zuge der Umsetzung der IVU-Richtlinie der Europäischen Gemeinschaften die in Deutschland eingesetzten Techniken untersucht worden sind und ein - im europäischen Kontext gesehen - generell hoher Qualitätsstand festgestellt werden konnte [80], [238]. Einen Überblick über die in Abstimmung mit Industrie- und Behördenvertretern identifizierten BVT in der Bleierzeugung geben Tabelle 8-4 ff. (Quelle [238]):

Tabelle 8-4: BVT-Übersicht Bleierzugung (1)

Techniken für QSL-Prozess-Anlage
Verminderung von Emissionen in die Luft
Rohstoffvorbereitung
 Hauben
 Gewebefilter

QSL-Reaktor/Gasreinigungssystem
 Prozessgasreinigung: Kühlung Heißgas-EGR, Nass-EGR
 Weitere Abgasreinigung (Boliden/Norzink-Prozefß)
 Weitere Abgasbehandlung in Schwefelsäureanlage
 Hauben, Einhausung Rohblei- /Schlackeöffnungen
 Gewebefilter zur Abgasreinigung

Schwefelsäureanlage
 Doppelkontakanlage

Schlackebehandlung
 Hauben
 Naß-EGR

Cadmiumlaugungsanlage
 Säurelaugung

Raffination
 siehe Bleiraffinationsanlage

Wasserverbrauchsminderung, Abwasserbehandlung
 Zentrale Kläranlage
 Interne Prozesswassernutzung
 Rezirkulation von Kühlwasser

Reststoffrecycling, Abfallvermeidung/-behandlung
 Schlackengranulation
 Laugung der Flugstäube
 Interne Rezirkulation der Laugungsrückstände
 Entkupferung des Rohbleis
 Rückgewinnung von Quecksilber aus Röstgas

Verminderung Energieverbrauch, Wärmerückgewinnung
 Abhitzeessel zur Ofenabgaswärmerückgewinnung
 Erzeugung elektrischer Energie

Techniken für Bleiraffinationsanlagen
Verminderung von Emissionen in die Luft
 Absaugung/Haubensystem für Raffinationskessel
 Gewebefilter zur Abgasreinigung
 Abziehmaschine zur Entfernung von Krätzen, Schlacken

Recycling, Abfallvermeidung/ -behandlung
 Internes oder externes Recycling von Krätzen, Ansätzen

Tabelle 8-5: BVT-Übersicht Bleierzugung (2)

Techniken für Siros melt Anlage
Verminderung von Emissionen in die Luft
Rohstoffvorbereitung
 Komplette Einhausung der Lagerung und Hauben, geschlossene Förderbänder
 Gewebefilter

Reaktor/Gasreinigungssystem
 Prozessgasreinigung mit Kühlung:
 Heißgas-EGR, Nass-EGR
 Abgasreinigung (Boliden/Norzink-Prozess)
 Abgasbehandlung in der Schwefelsäureanlage
 Hauben und komplette Einhausung der Rohblei/Schlackenöffnungen
 Hochvakuumstaubungseinheit

Schwefelsäureanlage
 Doppelkontakanlage
 Boliden Chemie Prozess zur Quecksilberentfernung

Schlackebehandlung
 Hauben
 Nass-EGR

Cadmiumlaugungsanlage
 Säurelaugung

Raffination
 siehe Bleiraffinationsanlage

Wasserverbrauchsminderung, Abwasserbehandlung
 Zentrale Kläranlage
 Interne Verwendung von Regen- und Prozesswasser
 Rezirkulation von Kühlwasser

Reststoffrecycling, Abfallvermeidung/-behandlung
 Schlackengranulation
 Interne Rezirkulation der Hauptmenge des Flugstaubs
 Interne Laugung des verbleibenden Flugstaubs
 Interne Rezirkulation der Laugungsreststoffe
 Entkupferung des Rohbleis
 Quecksilberrückgewinnung aus der Schwefelsäure

Verminderung Energieverbrauch, Wärmerückgewinnung
 Abhitzeessel zur Ofenabgaswärmerückgewinnung
 Sauerstoffanreicherung des Windes

Tabelle 8-6: BVT-Übersicht Bleierzeugung (3)

Techniken für Schachtofenanlage - Batterierecycling
Verminderung von Emissionen in die Luft
Rohstoffvorbereitung
 Befuchtung der Einsatzmaterialien
 Geschlossene bzw. überdachte Lagerung
 Entfernung von Teilen der Abfallsäure
Schachtofen/Gasreinigung
 Sekundärhauben am Abstich
 Gasreinigungssystem mit Nachbrennkammer (Minimum: 850 °C, typisch: 1.100 °C), trockenes Quenchen mit sekundären Abgasen, Gewebefilter
 Sauerstoffanreicherung der Prozessluft
 Eindüsung von Kalziumhydroxid, falls notwendig
Raffination
 siehe Bleiraffinationsanlage

Wasserverbrauchsminderung, Abwasserbehandlung
 Angemessene Abwasserbehandlung
 Interne Verwendung des behandelten Abwassers
 Rezirkulation des Schachtofenkühlwassers

Reststoffrecycling, Abfallvermeidung/-behandlung
 Abtrennung, Sammlung, Behandlung und Wiederverwendung der Abfallsäure
 Externe Behandlung des Steins
 Externe Laugung des Schachtofenstaubs
 Internes Recycling des Schachtofenstaubs
 Internes Recycling der Schachtofenschlacke
 Externe Verwendung verbleibender Schachtofenschlacke
 Verwendung raffinierter Krätzen (intern/extern)

Verminderung Energieverbrauch, Wärmerückgewinnung
 Sauerstoffanreicherung der Prozessluft

Tabelle 8-7: BVT-Übersicht Bleierzeugung (4)

Techniken für Kurzstrommelanlage
Verminderung von Emissionen in die Luft
Rohstoffvorbereitung/Batteriebehandlung
 Geschlossene bzw. überdachte Lagerung (Typ A+B)
Drehofen/Abgasreinigungssystem
 Ofeneinhausung (Typ A+B)
 Gewebefilter zur Abgasreinigung (Typ A+B)
Raffination
 siehe Bleiraffinationsanlage

Wasserverbrauchsminderung, Abwasserbehandlung
 Angemessene Abwasserbehandlung (Typ A+B)
 Rezirkulation des Prozesswassers der Hydroseparation (Typ A+B)

Reststoffrecycling, Abfallvermeidung/-behandlung
 Trennung von Ebonit, PVC und Polypropylen (Typ A+B)
 Sammlung, (interne) Behandlung Abfallsäure (Typ A+B)
 Agglomeration, Recycling des Flugstaubs (Typ A+B)
 Kompoundierung von Polypropylen (Typ A+B)
 Entschwefelung der Paste (Typ B)
 Externes Recycling der Batteriepaste (Typ A)
 Internes Recycling von Schlämmen aus der Abwasserbehandlung (Typ A+B)

Verminderung Energieverbrauch, Wärmerückgewinnung
 Trennung Kunststoffmaterial (Typ A+B)
 Wärmerückgewinnung (Ofenabgas) (Typ A+B)

Typ A: Einschmelzen des Gittermetalls und externe Verwertung der Batteriepaste
 Typ B: Entschwefelung Batteriepaste, Einschmelzen von Gittermetall und Paste, Produktion Natriumsulphat

8.2.1 Moderne Verfahren zur Bleierzeugung aus primären Rohstoffen

In den letzten Jahrzehnten wurden einige neuartige Prozesse zur Erzeugung von Blei entwickelt, mit denen die Nachteile¹³⁶ des konventionellen Sinteranlagen-Schachtofenprozesses überwunden werden sollten. Auf dieser konventionellen Prozessroute wird in Deutschland bereits seit 1995

¹³⁶) Nachteilig sind vor allem die hohen Unterhaltungskosten, der erforderliche Einsatz teuren metallurgischen Koks und die unzureichende Nutzung der bei der Röstung sulfidischer Einsatzmaterialien freiwerdenden Wärme. Auch die steigenden Anforderungen an den Umweltschutz führten zur Entwicklung alternativer Technologien.

kein Blei mehr gewonnen. Die vielversprechendsten modernen Verfahren sind Schwebeschmelz- und Badschmelzprozesse. Unter ihnen haben der QSL (Queneau-Schuhmann-Lurgi)-Prozess, die Kivcet-Technik und der TBRC-Prozess ihre Anwendbarkeit im industriellen Maßstab bewiesen. Auch der Siros melt-Prozess wird seit einiger Zeit im großtechnischen Maßstab betrieben. Der QSL-Prozess wird weltweit in drei Anlagen industriell eingesetzt. Eine Anlage wird in Deutschland betrieben („Berzelius“ Metall GmbH, Stolberg), die beiden anderen Anlagen operieren in Südkorea (Korea Zinc, Onsan) und China (CNIEC). Der Kivcet-Prozess wird in Italien (Nuova Samim, Sardinien), in Kasachstan (UK Lead and Zinc Combine) und in Kanada (Trail, British Columbia) betrieben. In Schweden (Boliden, Rönnskar) wird seit 1976 die TBRC-Technik eingesetzt [238].

Die wichtigste Innovation der genannten Prozesse ist die Kombination des Oxidations- und Reduktionsschrittes, wodurch der Energieverbrauch, die zu behandelnde Abgasmenge und die Schwefeldioxidemissionen drastisch gesenkt werden können. Die resultierende hohe Schwefeldioxidkonzentration im Abgas ermöglicht die Gewinnung von Schwefelsäure in einer Kontaktanlage. Die Prozesse erlauben auch den Einsatz sekundärer Einsatzstoffe wie etwa Batteriepaste bis zu einem Anteil von etwa 50 %. Im Folgenden werden die beiden in Deutschland betriebenen Verfahren, die u.a. primäre Einsatzstoffe verwenden, skizziert. Diese sind der QSL-Prozess und der noch nicht vollständig großtechnisch erprobte Siros melt-Prozess.

8.2.1.1 QSL-Prozess

Die Bleihütte der „Berzelius“ Metall GmbH setzt seit 1990 das QSL-Verfahren zur Werkbleigewinnung ein. Mit dem Verfahren wurde am Standort Stolberg (Rhld.) die konventionelle Sinteranlage-Schachtofen-Technologie abgelöst, wodurch erhebliche Verbesserungen im Hinblick auf die Umweltbelastungen insbesondere durch Emissionen erzielt wurden [59]. Der QSL-Reaktor und seine wichtigsten Nebenanlagen sind in Abbildung 8-2 schematisch dargestellt.

Analyse des Starterbatteriebereichs

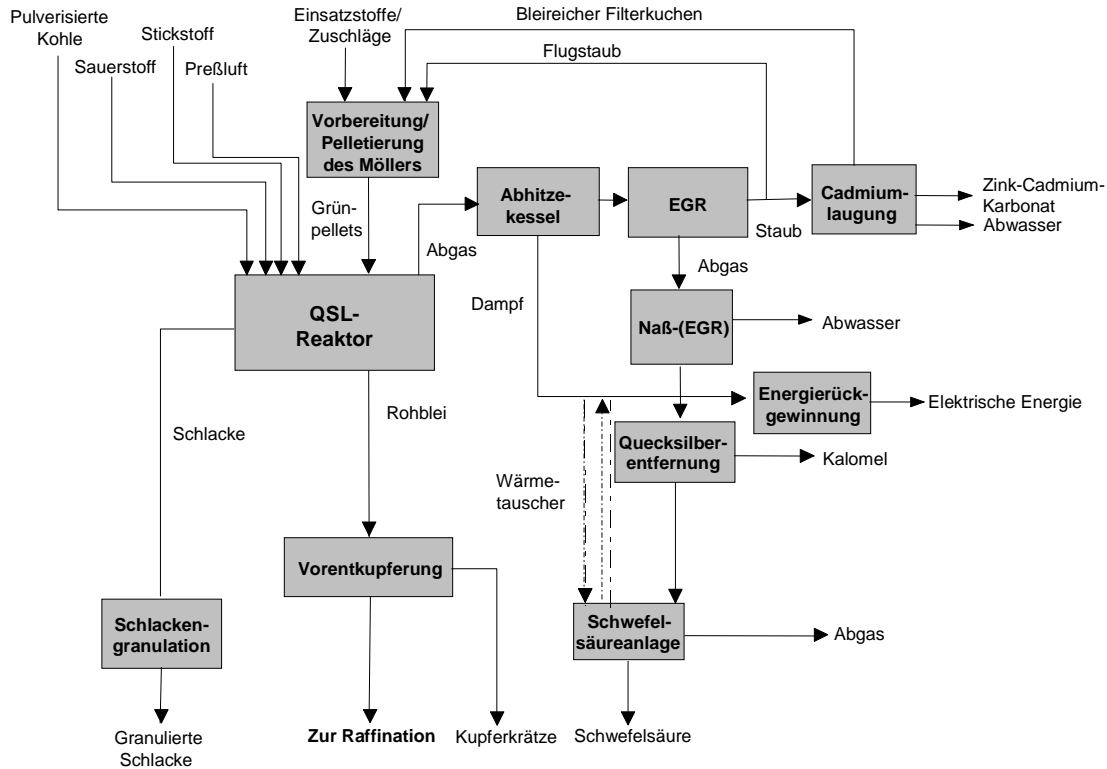


Abbildung 8-2: Schematische Darstellung einer QSL-Anlage

Quelle: [238]

Für eine ausführliche Darstellung der in den einzelnen Anlagen und Reaktoren ablaufenden Prozessschritte sowie für eine Zusammenstellung relevanter Emissionsdaten wird auf das deutsche Positionspapier zur BVT-Bestimmung im Bereich NE-Metallerzeugung (Bereich Blei) verwiesen [238]. Die wichtigsten Verbrauchs- und Produktionsdaten sind in Tabelle 8-8 zusammengefasst.

Tabelle 8-8: Verbrauchs- und Produktionsdaten der QSL-Anlage

Input	[t/a]	Output	[t/a]
Bleihaltige Materialien	130.000	Rohblei	90.000
Zuschläge (Kalk, ...)	20.000	Schlacke	50.000
Stickstoff	k. A.	Schwefelsäure	60.000
Sauerstoff	46.000	Dorée Silber	250
Kohle (Staub)	12.000	Kalomel	2-5
Erdgas	k. A.	Zink-Cadmium-Karbonat	100-150

Stand der Daten: 1997, Quelle [238]

Bei den bleihaltigen Einsatzmaterialien können sekundäre Stoffe einen Anteil von bis zu 60 % besitzen; so können u.a. auch Reststoffe aus der Bleiakkulatorenaufbereitung wie Batteriepaste genutzt werden.

8.2.1.2 Sirosmelt-Prozess

Die Metaleurop Weser Blei GmbH hat die an ihrem Standort Nordenham zur Bleigewinnung betriebene Sinteranlagen-Schachtofen-Technologie 1995 durch den Sirosmelt-Prozess ersetzt. Eine schematische Darstellung der Anlage inklusive der erforderlichen Nebenanlagen ist in Abbildung 8-3 gegeben.

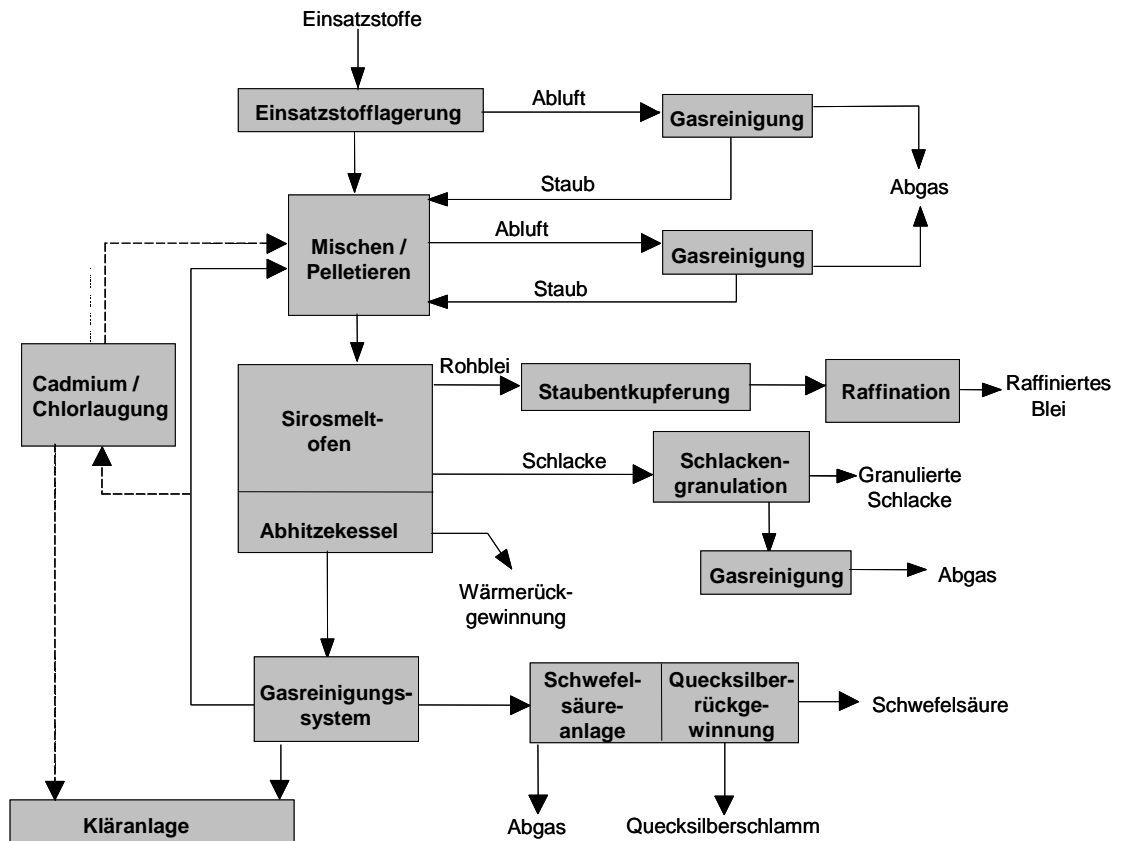


Abbildung 8-3: Schematische Darstellung einer Sirosmelt-Anlage

Quelle: [238]

Die Hauptbestandteile des Prozesses sind die Lagerung der Einsatzstoffe und die Chargenzusammenstellung (Mischen, Pelletieren), der Schmelzprozess im Reaktor, die Gasreinigung, die Schwefelsäureanlage zur SO₂-Abtrennung, die Raffination (vgl. Abschnitt 8.2.2) und die Schlackenaufbereitung. Die in den einzelnen Teilanlagen ablaufenden Prozesse werden u.a. in [238] näher beschrieben. Dort finden sich auch detaillierte Angaben zu den mit dem Betrieb verbundenen Emissionen und Reststoffen.

Die Produktionsdaten der Sirosmelt-Anlage sowie die wichtigsten Einsatzstoffe sind in Tabelle 8-9 zusammengestellt.

Tabelle 8-9: Verbrauchs- und Produktionsdaten der Sirosmelt-Anlage

Input ^{*)}	[t/a]	Output ^{*)}	[t/a]
Batteriebleipaste, andere	82.000	Blei	90.000
Bleikonzentrate	40.000	Schwefelsäure	25.000
Recycler Flugstaub	34.000	Schlacke	10.000
Zuschläge	3.500	quecksilberhaltige Reststoffe	20
Kohle oder Koks	7.100	Flugstaub (wird zum Ofen zurückgeführt)	34.000
Sauerstoff	13.300		

^{*)} Daten stammen aus der Projektierungsphase [238]

8.2.2 Verfahren der Bleierzeugung aus Sekundärmaterialien

Die Bleierzeugung aus sekundären Materialien umfasst prinzipiell die Prozessschritte Aufbereitung von Schrotten und Batterien, Schmelzen der bleihaltigen Einsatzstoffe, Raffination, Legieren und weitere chemische und metallurgische Prozesse.

- **Vorbereitung der Schrotte und Batterien:** Zur Vorbereitung gebrauchter Blei-Säure-Batterien existieren zwei unterschiedliche (Haupt-)Verfahrenswege. Bei einem werden die Batterien aufgebrochen und in ihre Bestandteile wie Bleigitter und -paste, Kunststoffe und Säure aufgetrennt. Nach Entschwefelung der Bleipaste kann diese zusammen mit dem Bleigitter im anschließenden Schmelzprozess separat weiterverarbeitet werden kann. Beim zweiten Verfahrensweg werden die Batterien aufgebrochen und nach dem Entfernen der Säure als Ganzes weiterverarbeitet (vgl. Abbildung 8-4).

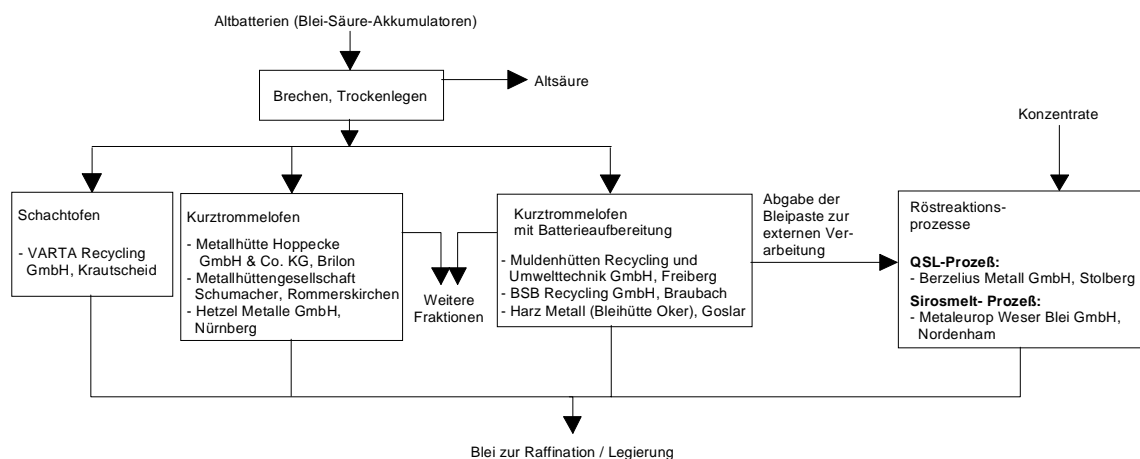


Abbildung 8-4: Verwertungswege für Blei-Säure-Batterien

- **Schmelzöfen:** In sekundären Bleihütten werden als Schmelzaggregate hauptsächlich Kurztrommelöfen (KTO, vgl. Abschnitt 8.2.2.2) eingesetzt, wesentlich seltener werden Langtrommelöfen, Flammöfen, Schachtöfen und die ISA-Technik zum Schmelzen der Schrotte verwendet. In Schachtöfen (vgl. Abschnitt 8.2.2.1) werden entleerte Batterien oder Batterieschrott eingesetzt. In Deutschland sind ausschließlich Anlagen auf Basis von Schachtöfen und Trommelöfen in Betrieb und werden hier zur Erzeugung von Rohblei aus Sekundärmaterialien - insbesondere Bleistarterbatterien - eingesetzt.
- **Bleiraffination:** Der letzte Schritt der Bleierzeugung ist normalerweise die **pyrometallurgische** (über 90 % der Produktion weltweit) oder seltener die elektrolytische Raffination des Rohbleis. Die Raffination wird durchgeführt, um Verunreinigungen aus dem Rohblei, die von den Einsatzstoffen und den Zuschlägen herrühren, zu entfernen. Eine typische Raffination besteht aus den folgenden Schritten:
 - Verschlacken/Entkupfern: Das vor- und endgültige Entfernen des Kupfers (Colcord-Prozess),
 - Weichmachen: Entfernen von Arsen, Zink und Antimon mit dem Harris-Prozess oder durch Sauerstoffeinsatz,
 - Entfernen von Edelmetallen (Parkes-Prozess),
 - Entfernen von Zink durch Vakuumdestillation,
 - Entfernen des Wismuts (Kroll-Betterton Prozess),
 - Entfernen von Alkalimetallen und Erdalkalimetallen,
 - Oxidation und Zugabe von Natriumhydroxid.

Die Raffinationsprozesse werden in verschiedenen Reaktoren wie z.B. Harris-Reaktoren, Flammöfen, Destillationsöfen oder Induktionsöfen durchgeführt. Am häufigsten kommen bei der Raffination von Rohblei aus der Primärerzeugung die Entkupferung und die Entfernung von Arsen, Zink und Antimon mit dem Harris-Prozess, die Entsilberung und die Entfernung von Zink durch Vakuumdestillation zum Einsatz. Bei Sekundäranlagen werden ähnliche Prozesse eingesetzt, die notwendige Anzahl der Prozesse ist jedoch geringer, da bei Sekundärblei eine Entfernung von Kupfer, Silber und Wismut meist nicht notwendig ist. Das Endprodukt der sekundären Bleiproduktion ist Weichblei oder Antimonblei.

8.2.2.1 Varta-Schachtofenverfahren

Die VARTA Recycling GmbH betreibt einen Schachtofen für das Recycling von Blei-Säure-Batterien. In Abbildung 8-5 ist der Prozess schematisch dargestellt. Neben der in Krautscheid betriebenen Anlage wird der Prozess in weiteren Europäischen Ländern wie Belgien, Tschechien, Russland und Schweden zum Bleirecycling eingesetzt. Altbatterien, die das Haupteinsatzmaterial darstellen, werden zunächst gebrochen, damit die flüssige Säure abfließen kann. Gemischt mit weiteren Einsatz- und Zuschlagstoffen wie Koks, Kalk, Eisenschrott (als Reduktionsmittel) und rückgeführter Schachtofenschlacke werden sie an der Gicht mit einem Schaufellader in den Schachtofen chargiert, wo sie im Gegenstrom zu mit Sauerstoff angereicherter Luft langsam absinken. Die oxidischen Bestandteile werden dabei reduziert und die Beschickung aufgeschmolzen. Das Blei wird am unteren Ende des Ofens ebenso wie die Schlacke abgestochen. Die Schlacke wird in speziellen Kübeln langsam abgekühlt, so dass zwei leicht trennbare Phasen entstehen: Einerseits eine Eisensilikat-schlacke, die zu einem Großteil im Kreislauf geführt wird und zum anderen ein sogenannter Stein, der u.a. Kupfer, Blei und Schwefel enthält. Letzterer wird an externe Verwerter abgegeben. Das erzeugte Rohblei wird raffiniert und entsprechend den Anforderungen der Kunden legiert.

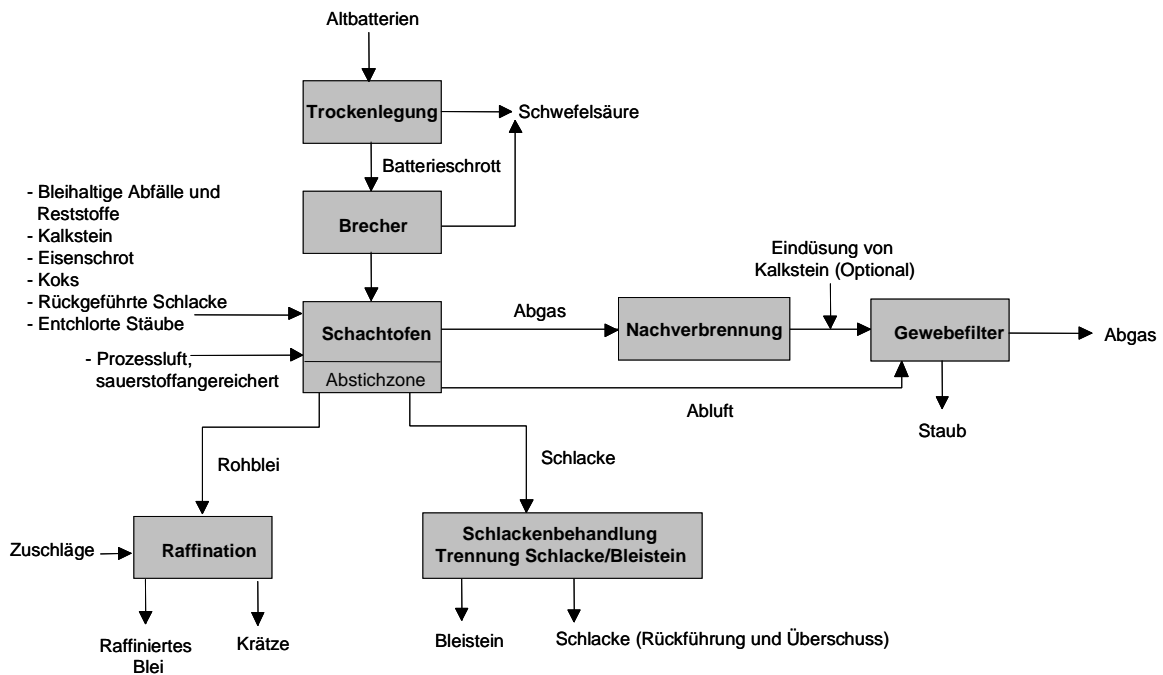


Abbildung 8-5: Schematische Darstellung einer Schachtofenanlage zur Altbatterieverwertung

Tabelle 8-10 gibt einen Überblick über Verbrauchs- und Produktionsdaten zur groben Charakterisierung des Prozesses und Tabelle 8-11 einen Überblick über anfallende Nebenprodukte und Reststoffe.

Tabelle 8-10: Verbrauchs- und Produktionsdaten der Schachtofenanlage

Input	[t/a]	Output	[t/a]
Altbatterien, trocken	33.000	Rohblei	30.000
Bleischrott, Abfall	9.600	Flugstaub	950
Zuschläge (Kalk)	450	Schlackenüberschuss	1.500
Koks	3.600	Rückgeführte Schlacke	16.000 - 18.000
Andere Einsatzstoffe (Eisen)	2.000	Bleistein	4.200
Schlacke (Rückführung)	k. A.	Verbrauchte Schwefelsäure	3.350
Sauerstoff	1,3 Mio. Nm ³		
Bleikarbonat (aus der Flugstaubbehandlung)	1.200		
Erdgas	450.000 m ³		
Elektrische Energie	3.200 MWh		

Stand der Daten: 1998, Quelle [238]

Tabelle 8-11: Nebenprodukte und Reststoffe der Schachtofenanlage

Prozesseinheit	Nebenprodukte/ Reststoffe	Menge [t/a]	Verwendung/Behandlung
Batteriebehandlung	Batteriesäure	3.350	Externes Recycling
Schachtofen	Schlacke	1.500	Internes Recycling / Straßenbau
	Flugstaub	950	Externes / Internes Recycling
	Bleistein	4.200	Nebenprodukt zum Verkauf an primäre Bleierzeuger
Raffination	Bleikrätze	3.100	Nebenprodukt zum Verkauf zur Metallrückgewinnung

Stand der Daten: 1997/98, Quelle [238]

8.2.2.2 Einsatz von Kurztrommelöfen

Mit Ausnahme des im vorhergehenden Abschnitts skizzierten VARTA-Schachtofenverfahrens setzen alle weiteren Sekundärbleihütten in Deutschland Kurztrommelöfen in Kombination mit verschiedenen Aufbereitungsschritten ein. Im Folgenden werden exemplarisch die Verfahrensschemata und die wichtigsten Haupt- und Nebenprodukte sowie die wesentlichen Einsatzstoffe von zwei der mengenmäßig besonders bedeutenden Hütten vorgestellt.

8.2.2.3 Muldenhütten Recycling und Umwelttechnik GmbH, Freiberg

Abbildung 8-6 zeigt eine schematische Ansicht der bei der Muldenhütten Recycling und Umwelttechnik GmbH (MRU) in Freiberg betriebenen Kurztrommelofenanlage. Eine Besonderheit dieser Anlage ist die Integra-

tion einer modernen Sonderabfallverbrennungsanlage am gleichen Standort. In Tabelle 8-12 ist ein Überblick über Verbrauchs- und Produktionsdaten der Kurztrommelofenanlage zusammengestellt.

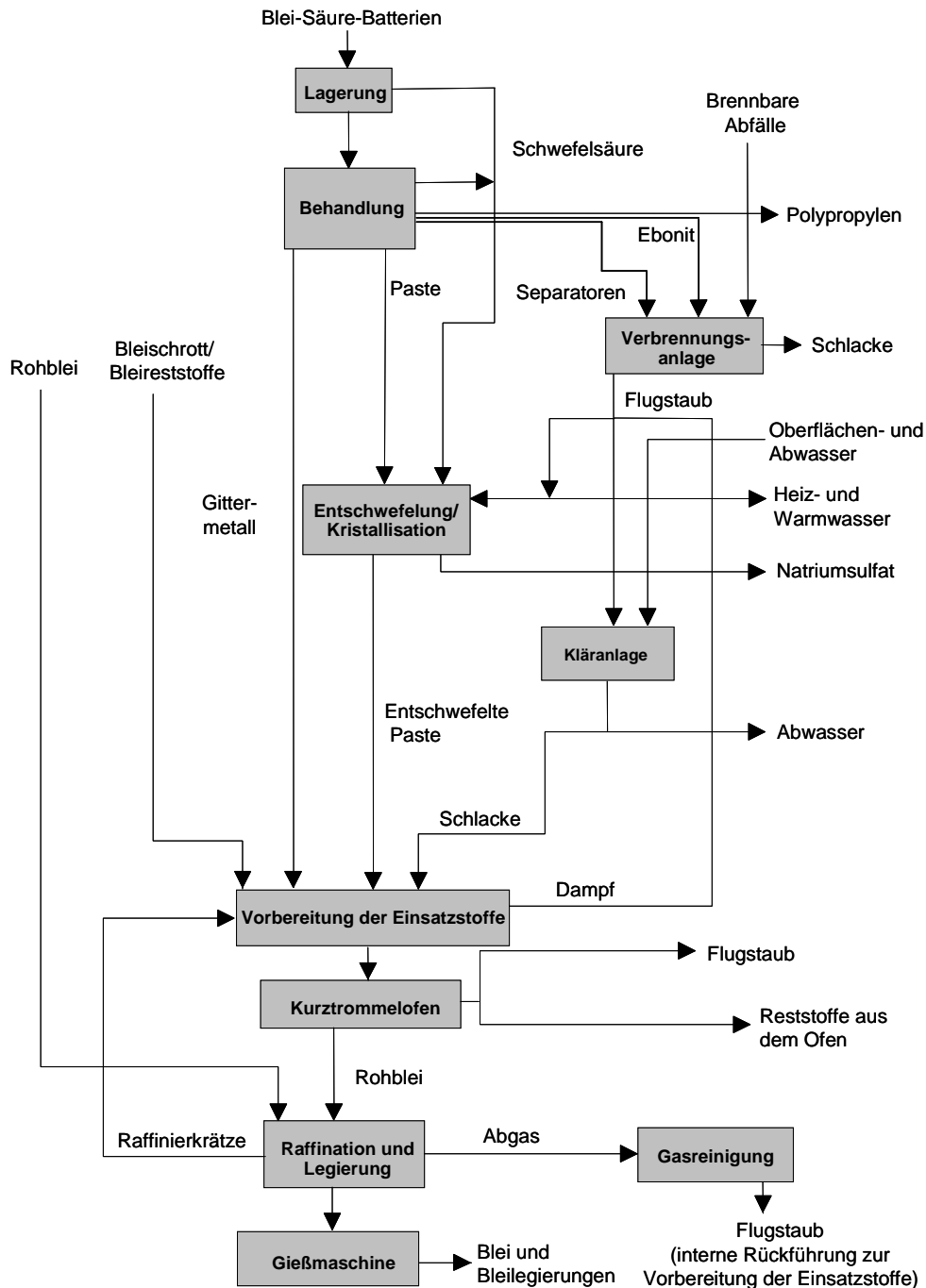


Abbildung 8-6: Schematische Darstellung der KTO-Anlage der MRU

Quelle: [238]

In der in die Anlage integrierten modernen Müllverbrennungsanlage wird ein Teil der beim Batterierecycling anfallenden Kunststoffe ver-

brannt. Die Batterien werden zunächst gebrochen und hydrodynamisch sowie mechanisch behandelt, so dass die Fraktionen Polypropylen, Ebonit, Separatoren (Polyethylen, PVC, Glass), Gittermetall sowie Elektrodenpaste getrennt werden können. Eine detaillierte Beschreibung der Prozesse findet sich u.a. in [238].

Tabelle 8-12: Verbrauchs- und Produktionsdaten der MRU

Input ^{*)}		Output ^{*)}	
Sekundäre Einsatzstoffe	[t/t Pb]	1,41	Produkte
<i>davon:</i> Batterieschrott	[%]	79,0	Blei und Bleilegierungen [t/t Pb] 1
Andere Materialien	[%]	3,8	Natriumsulfat [t/t Pb] 0,096
Rohblei, Bleischrott	[%]	16,6	Polypropylenchips [t/t Pb] 0,051
Flugstaub aus Verbrennungsanlage	[%]	0,6	Abfälle
Reagenzien	[t/t Pb]	0,307	Kunststoffreststoffe [t/t Pb] 0,108
<i>davon:</i> NaOH	[%]	49,8	Metallurgische Schlacke [t/t Pb] 0,18
Stahlspäne	[%]	9,4	Andere: Abgase [Nm ³ /t Pb] 37.000
Petrolkoks	[%]	17,6	
Soda	[%]	23,1	
Andere: Elektrische Energie	[MWh/t Pb]	0,20	
Erdgas	[MWh/t Pb]	0,73	
Dampf	[MWh/t Pb]	0,84	

^{*)} Alle Werte auf eine Tonne erzeugten Bleis oder Bleilegierungen bezogen (inkl. Raffination);
Stand der Daten: 1997

Quelle: Unternehmensinformationen MRU, 1998

8.2.2.4 Bleihütte Oker, Harz-Metall GmbH, Goslar

Haupteinsatzstoff der von der Harz-Metall GmbH seit 1971 in der Bleihütte Oker betriebenen Kurztrommelofenanlage sind gebrauchte Blei-Säure-Batterien. Die Anlage umfasst als wesentliche Prozessschritte¹³⁷⁾

- Batterievorbehandlung inkl. Wasseraufbereitung und Polypropylenaufbereitung,
- Einschmelzen im Kurztrommelofen und
- Raffination.

¹³⁷⁾ Für eine detailliertere Beschreibung der einzelnen Prozessschritte sei auf [238] verwiesen.

Analyse des Starterbatteriebereichs

Eine schematische Ansicht der Anlage zeigt Abbildung 8-7, Verbrauchs- und Emissionswerte sind in Tabelle 8-13 zusammengestellt.

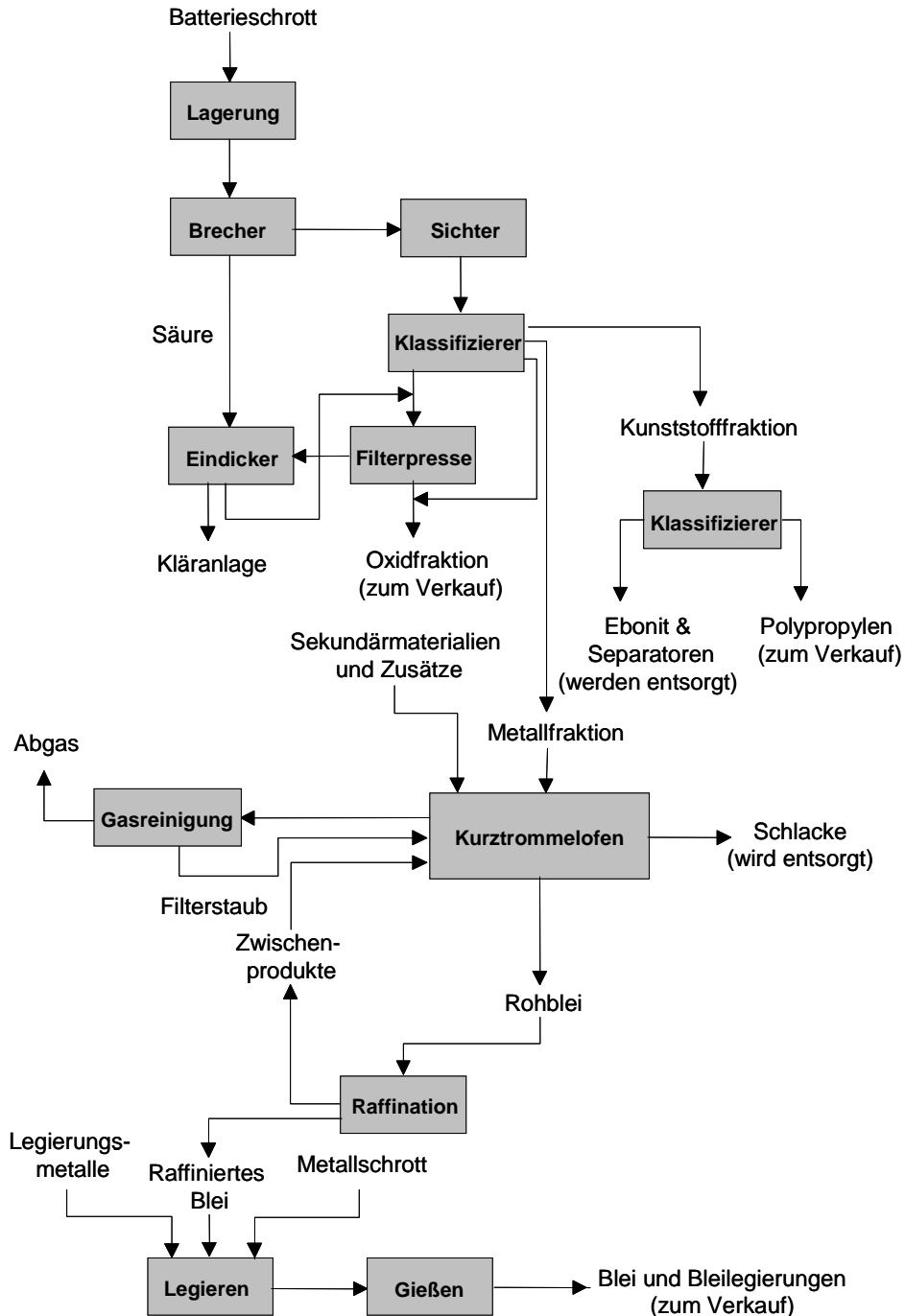


Abbildung 8-7: Schematische Darstellung der KTO-Anlage der Harz-Metall GmbH

Tabelle 8-13: Verbrauchs- und Produktionszahlen der Harz-Metall GmbH

Input	[t/a]	Output	[t/a]
Batterieschrott	65.000	Raffiniertes Blei und Legierungen	28.000
Batterieplatten	4.000	Batteriepaste	32.500
Bleischrott	6.000	Polypropylen	2.750
		Ebonit und Separatoren	3.500
		Schlacke	3.300

Quelle: Unternehmensinformationen Unternehmen L7, 1998

Sowohl die Fraktion der Separatoren und des Ebonits aus der Batterie-verarbeitungsanlage als auch die Schlacke des Kurztrommelofens werden auf einer eigenen Deponie entsorgt. Bei der Reinigung der Abwässer in einer Kläranlage fallen Schlämme an, die aus der Neutralisation der Schwefelsäure Gips enthalten. Dieser Schlamm wird zur Weiterverarbeitung an Primärhütten verkauft.

Im Folgenden werden zunächst die Strukturen zur Rücknahme verbrauchter Starterbatterien beschreiben (Abschnitt 8.3), ehe anhand der verfügbaren Daten in Abschnitt 8.4 zur Bewertung der Effizienz der Strukturen der Erfolg der Rücknahme zahlenmäßig erfasst wird.

8.3 Rücknahme von Bleibatterien

8.3.1 Einsatz von Bleibatterien

Bleiakkumulatoren haben durch ihre große Vielfalt an Ausführungs- und Anwendungsmöglichkeiten eine sehr weite Verbreitung gefunden. Im Wesentlichen können sie in drei Kategorien unterteilt werden.¹³⁸ Diese sind

- Starterbatterien für Verbrennungs-Kraftmaschinen,
- Traktions-(Antriebs-)batterien und
- Ortsfeste Bleibatterien für Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV)

Im Folgenden werden kurz diese Anwendungsbereiche charakterisiert. Zum Teil besteht in den Anwendungsgebieten die Konkurrenz anderer

¹³⁸) Hier werden die sogenannten Kleinbleibatterien ausgeklammert, da für sie bzgl. der Strukturen zur Rücknahme das für die übrigen Gerätebatterien (vgl. Kapitel 4) geschriebene gilt.

Batteriesysteme, insbesondere von Nickel/ Cadmium-Akkumulatoren. Bleibatterien zeichnen sich im Vergleich zu diesen insbesondere durch einen geringen Preis und einfache Wartung aus, während andere Kriterien durch alternative Systeme (Ni/Cd, NiMH) besser abgedeckt werden können.

Starterbatterien für Verbrennungskraftmaschinen werden für viele Motorentypen eingesetzt: Verwendung finden sie in Personenkraftwagen (PKW), Nutzkraftwagen (NKW), Luftfahrzeugen, im militärischen sowie im Hobbybereich. Die wesentlichen Kriterien die Starterbatterien zu erfüllen haben, sind ein geringes Gewicht und eine hohe Zuverlässigkeit, hier insbesondere die sogenannte Zyklfestigkeit. Neben dem Startvorgang der Verbrennungsmotoren dienen sie der Speisung von elektrischen Bordnetzen. Der Einsatz in PKW und NKW ist hier der bedeutendste, wie in Abschnitt 8.4 gezeigt wird. Die militärischen Einsatzgebiete können aufgrund von Geheimhaltungsvorschriften nicht weiter differenziert werden. Die Verbreitung von Starterbatterien in Flugzeugen und Booten ist im Verhältnis zum PKW als gering zu bewerten. In geringem Maße werden Bleistarterbatterien auch zur Energieversorgung von Baustellenbeleuchtungen, und (selten) Haushaltsgeräten eingesetzt.

Traktionsbatterien oder Antriebsbatterien haben sehr unterschiedlichen Anforderungen hinsichtlich Lebensdauer und Leistungsfähigkeit zu genügen. Traktionsbatterien finden in etwa in Flurförderzeugen (Gabelstapler, Elektrowagen,...), Kleinfahrzeugen (Krankenfahrstühle, Kehrmaschinen, ...), Straßenfahrzeugen (Elektro- und Hybridfahrzeuge, Busse, ...), Schienenfahrzeugen (Triebwagen, Grubenlokomotiven, ...) sowie in Wasserfahrzeugen (Schiffe, U-Boote, Boote, ...) Einsatz. Bei diesen für Antriebszwecke eingesetzten Batterien sind die Faktoren Kapazität, Spannung, Gewicht und das Volumen entscheidende Parameter. Aus ihnen ergeben sich die Lebensdauer, die Betriebsdauer, die maximale Zuladung und das Platzangebot des jeweiligen Fahrzeugs. Des Weiteren ist besonderen Anforderungen Rechnung zu tragen. Hierzu gehören zum Beispiel Grubenlokomotiven, die eine spezielle explosionsgeschützte Bauweise erfordern.

Typische Einsatzgebiete stationärer bzw. **ortsfester Bleibatterien** sind die Notstromversorgung (Krankenhäuser, Signalanlagen, Fernmeldeanlagen, Rechenzentren, ...) und Solarstromspeicher. Notstrombatterien dienen dabei der Überbrückung des Zeitraums vom Ausfall des Stromnetzes bis zur Wiederaufnahme der regulären Stromversorgung oder dem Anlaufen netzunabhängiger Stromquellen (Notstromdieselmotoren etc.). Sie haben dazu sehr unterschiedliche Zeitfenster zu überbrücken. Diese reichen von einigen Sekunden (Dauer bis zum Start eines Notstromaggregates) bis zu einigen Stunden (Betrieb von Notbeleuchtungen und Fernmeldenetzen).

Die Leistungsfähigkeit der Ersatzstromquelle muss zu jedem Zeitpunkt sichergestellt sein. Weitere Kriterien für die Auslegung einer solchen Batterie sind die Belastbarkeit mit sehr großen Strömen, ein geringer Wartungsaufwand, und Langlebigkeit.

Im Weiteren wird auf den Bereich der Starterbatterien fokussiert, da er den mengenmäßig bedeutendsten Anwendungsbereich bildet.

8.3.2 Rechtlicher Rahmen der Rücknahme von Starterbatterien

Das Recycling für Bleistarterbatterien beginnt in der Regel mit der durch die Batterieverordnung geregelten Rücknahme. Jeder Vertreiber der Batterien an Endverbraucher abgibt, ist zur Rücknahme der Batterie in der Verkaufsstelle oder deren unmittelbaren Nähe verpflichtet. Eine neue Starterbatterie wird beim Kauf, wenn keine alte Starterbatterie abgegeben wird, mit einem Pfand in Höhe von DM 15,- belegt. Der Vertreiber kann bei der Pfanderhebung eine Pfandmarke ausgeben und die Pfanderstattung von der Rückgabe der Pfandmarke abhängig machen. Gewerbliche oder sonstige wirtschaftliche Unternehmen und öffentliche Einrichtungen können Art und Ort der Rückgabe mit dem Vertreiber vereinbaren (§ 5 und 6 BattV). Die Hersteller von Bleiakkumulatoren sind verpflichtet die von den Vertreibern zurückgenommenen oder die von einem öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger bereitgestellten Batterien unentgeltlich zurückzunehmen und entsprechend der Vorschriften des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes zu verwerten und nicht verwertbare Batterien zu beseitigen (vgl. Abschnitte 3.2.2 und 3.2.3).

8.3.3 Struktur der Rücknahme und Entsorgung von Starterbatterien

Die Struktur der Rücknahme und Entsorgung ist bei privaten Endverbrauchern und Werkstätten unterschiedlich. Für den privaten Verbraucher, der seine Starterbatterie bei einem Ersatzteihändler kauft, fällt ein Pfand in Höhe von DM 15,- an. Hat er beim Kauf eine alte Starterbatterie abgegeben, muss er dieses Pfand nicht entrichten. Der Verbraucher bringt seine Altbatterie zu einem Zwischenlager (Ersatzteihändler); somit liegt ein Bringsystem vor. Die Erfassungsquote soll durch das Pfand verbessert werden. Der Batteriewechsel in einer Werkstatt und die Entnahme der Starterbatterie im Zusammenhang mit der Altautoentsorgung sind ebenso dem Bringsystem zuzuordnen. Auch in diesen Fällen wird der Transportvorgang zum Zwischenlager durch den Verbraucher durchgeführt. Der Ersatzteilhandel und die Werkstätten werden durch ein Holsystem bedient.

Durch den zeitlich unregelmäßigen Anfall (s.u.) wird eine Lagerung auf Seiten des Ersatzteilhandels und der Werkstätten nötig.

Die Hauptanfallstellen ausgedienter Starterbatterien liegen in den Bereichen Ersatzteilhandel, Werkstätten und Altautoentsorger. Die an diesen Quellen anfallenden Starterbatterien werden durch Entsorgungsunternehmen eingesammelt und den Verwertungsunternehmen zugeführt. Hierbei übernehmen die Entsorgungsfirmen, nach Vorgaben des Gesetzgebers zum Transport und Lagerung von Gefahrgut (z.B. Gefahrstoffverordnung [317]), die logistischen Funktionen. Sie organisieren den Transport, die Sortierung und den Umschlag der angefallenen Starterbatterien. In Deutschland besteht ein flächendeckendes Netz aus zahlreichen regional arbeitenden Entsorgungsunternehmen. Diese Entsorgungsunternehmen sind i.d.R. einem überregionalen Systemanbieter angegliedert oder dienen als Subunternehmer. Die drei wesentlichen Systemanbieter sind nach Unternehmensangaben Pape Entsorgung GmbH & Co. KG, Hannover, CCR Logistics Systems AG, München sowie ZENTEK Gesellschaft für Kreislaufwirtschaftssysteme in Deutschland GmbH & Co KG, Köln [219]. Die von diesen Firmen bzw. ihren angeschlossenen Unternehmen eingesammelten und in Deutschland verbleibenden Bleiakkumulatoren werden in einer der in Tabelle 8-3 aufgeführten Bleihütten nach den in Abschnitt 8.2.2 beschriebenen Verfahren verwertet.

Am konkreten Beispiel wird nachfolgend die Struktur zur Rücknahme und Verwertung von Starterbatterien beschrieben: Die Firma Pape Entsorgungslogistik GmbH & Co. KG unterhält im norddeutschen Raum vier regionale Entsorgungszentren (vgl. Abbildung 8-8). Diese regionalen Zentren werden durch eine übergeordnete Organisationsebene, ein überregionales Logistiksystem, unterstützt. Die Bleihütte Oker, Harz-Metall GmbH (vgl. Tabelle 8-3), in Goslar dient als Verwertungsunternehmen für diese regionalen Entsorger. Die vier Logistikzentren befinden sich in Magdeburg, Göttingen, Hannover und Osnabrück. Das Sammelzentrum in Göttingen besitzt dabei eine Sonderstellung, da es nur als Lager- und Umschlagplatz für Fremdfirmen dient. Die Firma Pape verfügt an diesem Standort über keinen eigenen Fuhrpark, sondern übernimmt ausschließlich die Verwaltung und Organisation des Entsorgungszentrums. Die übrigen drei Standorte werden sowohl von Pape selbst, als auch von Fremdfirmen als Umschlagplatz angefahren. Die Einzugsgebiete dieser Sammelzentren belaufen sich jeweils auf ein Gebiet mit einem Radius von rund 50 bis 60 km Radius. Im Sammelzentrum Hannover werden beispielsweise neben anderen Rückständen etwa 23 Tonnen Starterbatterien pro Monat umgeschlagen. Die anderen großen Entsorgungsunternehmen weisen eine ähnliche Struktur auf.

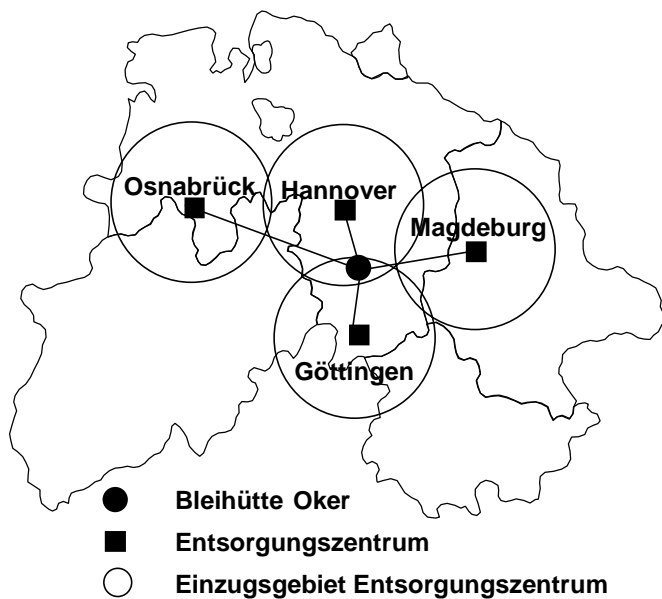


Abbildung 8-8: Regionale Entsorgungsstruktur Pape

Quelle: nach [219]

Die Anlieferung der Starterbatterien an die Sekundärbleihütten erfolgt in standardisierten Behältern. Die Batterien werden bis zum Erreichen einer wirtschaftlich sinnvollen Charge im jeweiligen Entsorgungszentrum gesammelt. Der Anfall verbrauchter Starterbatterien ist dabei u.a. von den Außentemperaturen abhängig, da mit abnehmendem Ladezustand der Batterie die Dichte des Elektrolyten abnimmt und dessen Gefrierpunkt ansteigt. Bei geringen Außentemperaturen kann es so zum Einfrieren der Batterie und damit zu ihrem Ausfall kommen. Zu hohe Temperaturen von über 50 °C verkürzen ebenfalls die Lebensdauer der Starterbatterien erheblich. In warmen Sommermonaten werden im Motorraum durchaus derart hohe Betriebstemperaturen erreicht, dass ebenso wie nach extrem kalten Tagen vermehrt defekte Starterbatterien gegen neue ausgetauscht werden. Dieser stark vom Temperaturverlauf abhängige Anfall von Starterbatterien bedingt eine bedarfsgerechte Abholung, da feste Abholintervalle dem Altbatterieanfall nicht gerecht werden können. Dieser Umstand wird noch durch geringe Lagerkapazitäten für die einzelnen Rückstände seitens der Werkstätten und Ersatzteihändler verstärkt. Werkstätten müssen für zahlreiche Rückstände Behälterkapazitäten vorhalten. Hierzu zählen neben den Starterbatterien etwa Behältnisse für Öl, Bremsflüssigkeit, Glasfraktionen, Stoßstangen und andere. Dies bedeutet zum einen hohe absolute Behältermieten und zum anderen hohe Lagerkosten durch die Lager-

stellflächen. Eine Optimierung dieses Sachverhaltes wird durch Vorhalt geringer Behälterkapazitäten angestrebt.

Bei der Lagerung und Handhabung der Bleiakkumulatoren sind besondere Vorkehrungen zu treffen. Starterbatterien müssen in einem säuredichten, verschließbaren und belüfteten Behälter gelagert werden. Die Batteriegehäuse dürfen weder geöffnet noch zerstört werden. Diese Lagerbedingungen implizieren eine getrennte Erfassung von anderen, zu entsorgenden Abfällen der Autowerkstätten, des Ersatzteilhandels sowie der Altautoverwerter. Dennoch werden zumindest im Fall der Autowerkstätten und der Altautoverwerter die logistischen Funktionen der Entsorgung in der Regel durch sogenannte Systementsorger übernommen, die sämtliche anfallenden Rückstandsarten erfassen.¹³⁹ Der Systementsorger steht dafür ein, dass sämtliche Genehmigungen für Transport und Lagerung erfüllt sind und stellt den Kunden für dessen Rückstände entsprechende Bescheinigungen aus. Diese Nachweise dienen ggf. auch als Basis für die Erstellung von Abfallbilanzen. Alle zur Sammlung und Entsorgung nötigen Behälter werden zur Verfügung gestellt bzw. vermietet und auf Anfrage geleert. Der eigentliche Abtransport der Rückstände erfolgt durch Subunternehmer oder den Systementsorger selbst.

Die Sammlung großer Chargen von Starterbatterien etwa in regionalen Entsorgungszentren erfolgt in loser Schüttung. Die hierfür vorgesehenen Edelstahlbehälter dienen gleichzeitig als Transportbehälter und können von LKW direkt aufgenommen werden. Die Standorte beliefern im geschilderten Fall von Pape Entsorgung die Bleihütte Oker unabhängig voneinander. Die Anlieferung ist üblicherweise mit dem Erreichen eines festgelegten Füllgrades im Sammelcontainers verbunden [219]. In den Entsorgungszentren werden neben Starterbatterien auch andere von Handel, Autowerkstätten und Altautoentsorgern eingesammelte Rückstände nach Art und Menge sortiert, zusammengefasst und zu den jeweiligen Verwertern gebracht.

Bleiakkumulatoren, die als Antriebsbatterien bzw. ortsfeste Batterien eingesetzt (vgl. Abschnitt 8.3.1) werden, sind ebenfalls nach Ablauf ihrer

¹³⁹) Systemanbieter, die sämtliche Abfälle entsorgen, haben sich vor allem aufgrund des Markteintritts branchenfremder Unternehmen, steigender Auflagen hinsichtlich der Umweltgesetzgebung und aufgrund starker Nachfrage der Kunden nach überregionalen, ganzheitlichen Entsorgungslösungen in den letzten 10 Jahren entwickelt [219], [340].

Nutzungsdauer zu verwerten. Für sie besteht kein institutionalisiertes Entsorgungssystem. Durch die relativ geringe Verbreitung und die hohe Lebensdauer (bis zu 15 Jahre) ist der Anfall dieser Batterietypen vergleichsweise gering [342]. Die Recyclingquote in diesem Bereich liegt nach Herstellerangaben insbesondere durch enge Geschäftsbeziehungen zwischen Produzenten und Kunden bei etwa 99 % [303]. Die Rückführung der ausgedienten Akkumulatoren wird von den Herstellern bzw. den Vertreibern und den Abnehmern individuell unter Berücksichtigung der Batterieverordnung geregelt.

8.4 Abschätzung der Recyclingquote für Bleistarterbatterien

8.4.1 Vorgehensweise und Datengrundlage

In diesem Abschnitt wird zur Beurteilung der Effizienz der Strukturen zur Rücknahme und Verwertung eine Abschätzung der Recyclingquote von Bleistarterbatterien vorgenommen. Da, wie in Abschnitt 8.3 gezeigt wurde, keine zentrale Organisation für die Rücknahme und Verwertung verantwortlich ist, sondern zahlreiche, z.T. konkurrierende Akteure wesentliche Aufgaben der Rücknahme- und Verwertungslogistik erfüllen, liegen keine verlässlichen Daten über den Gesamterfolg der Starterbatterierücknahme vor. Für die somit erforderliche Abschätzung wurde das neueste verfügbare Datenmaterial herangezogen, das eine Abschätzung der Recyclingquote für das Jahr 1999 ermöglicht. Bei der ermittelten Recyclingquote handelt es sich um eine Abschätzung, die - wie im Folgenden noch näher ausgeführt wird - durch zahlreiche Annahmen gestützt wird, wodurch das letztendliche Resultat keinen Anspruch auf absolute Richtigkeit erheben kann.

Der durchschnittliche Bleianteil von Akkumulatoren ist zur Quotenermittlung eine unverzichtbare Rechengröße. Dieser Wert wird sowohl für gefüllte als auch für ungefüllte Bleiakkumulatoren benötigt.¹⁴⁰ In Tabelle 8-14 sind die im Weiteren verwendeten Werte wiedergegeben.

¹⁴⁰) Bei gefüllten Akkumulatoren ist der Elektrolyt mit einbezogen, bei ungefüllten (entleerten) wurde er entfernt.

Tabelle 8-14: Gewichtsanteile in Bleiakkumulatoren

	Blei [Gew.-%]	Kunststoffe [Gew.-%]	Elektrolyt [Gew.-%]
gefüllter Akku	60	17	23
entleerter Akku	65	18	17

Quelle: Mittelwerte aus [27]

Ausgangsdaten der Abschätzung sind die Produktionszahlen von Akkumulatoren und das daraus abgeleitete Angebot. Die Produktionsdaten, korrigiert um Im- und Export, ergeben das in Deutschland verfügbare Angebot an Starter-, Antriebs- und ortsfesten Batterien. Für den Bereich der Starterbatterien erfolgt ferner eine Abschätzung der Nachfrage. Der Bedarf ergibt sich einerseits aus der Erstausrüstung von Fahrzeugen und zum anderen aus der erforderlichen Anzahl von Ersatzbatterien. Der Bedarf zur Erstausrüstung hängt dabei direkt von der Fahrzeugproduktion ab, während sich der Ersatzbedarf für defekte Starterbatterien (Nachrüstung) aus dem Fahrzeugbestand und der Lebensdauer der Starterbatterien ergibt. Der **Gesamtbedarf** an Starterbatterien ergibt sich demnach aus Batterien zur Nach- und Erstausrüstung.

Tritt eine Nachrüstung auf, fällt eine verbrauchte Starterbatterie an. Der **Anfall verbrauchter Starterbatterien** ist somit u.a. direkt an die Nachrüstung und damit an den Fahrzeugbestand und die Lebensdauer der Starterbatterien gekoppelt. Aus dem Fahrzeugregister gelöschte Fahrzeuge bilden neben dem Austausch die zweite Quelle für verbrauchte Batterien. In der Abschätzung wird davon ausgegangen, dass jedes gelöschte Fahrzeug über eine zu entsorgende Starterbatterie verfügt. Anhand der genannten beiden Quellen von verbrauchten Starterbatterien wird das maximale Aufkommen an Altbatterien in Deutschland ermittelt. Korrigiert um Im- und Exporte von Altfahrzeugen und -batterien ergibt sich schließlich die für das Recycling maximal zur Verfügung stehende Menge.

Die Verwertung der Bleibatterien findet in Bleihütten statt. Dort werden die verfügbaren Bleiakkumulatoren gegebenenfalls nach einer Vorbehandlung (vgl. Abschnitt 8.2.2) als Einsatzstoff zur Bleiproduktion eingesetzt. Werden bei der Herstellung nur Altprodukte¹⁴¹ eingesetzt, spricht man von Sekundärbleihütten. Das dort zurückgewonnene Blei steht der Produktion von Batterien erneut zur Verfügung. In der Abschätzung dient

¹⁴¹) Neben Altakkumulatoren und Schrotten aus der Akkumulatorenproduktion spielen weitere sekundäre Vorstoffe nur eine untergeordnete Rolle (vgl. Tabelle 8-3).

die in den Hütten eingesetzte aus Starterbatterien stammende Bleimasse als Basiswert für die tatsächlich ordnungsgemäß zurückgenommene und verwertete Starterbatteriemenge.

8.4.2 Abschätzung des Angebots an Bleiakkumulatoren in Deutschland

Zunächst wird eine Abschätzung des **Bleiakkumulatorenangebots** in Deutschland vorgenommen. Unter diesem Angebot wird dabei die Produktion im Inland zuzüglich des Imports und abzüglich des Exportes verstanden. Die Datenquellen der folgenden Analysen bilden im Wesentlichen die Außenhandelsstatistik der BRD [275] und die Statistik über die Produktion im Produzierenden Gewerbe [277]. Die verwendeten Daten beziehen sich auf die Jahre 1993 bis 1999. Dabei sind für Im- und Exporte Daten sowohl über Stückzahl als auch Gewicht uneingeschränkt verfügbar. Aufgrund von Vorschriften zum Schutz unternehmensinterner Daten sind Produktionszahlen jedoch nur verfügbar, wenn mindestens drei Hersteller auf einem Marktsegment konkurrieren [276]. Bei den Produktionszahlen liegen ferner nur Angaben zur Anzahl der hergestellten Akkumulatoren vor. Aussagen über das Gewicht werden für die Produktion nicht getroffen. Daraus resultiert notwendigerweise, dass zum einen Annahmen über die nicht veröffentlichten Stückzahlen gemacht und zum anderen Werte zur Berechnung des Gewichtes der produzierten Bleiakkumulatoren aus weiteren Quellen abgeleitet werden müssen. Im Rahmen der Abschätzungen wurden verschiedene Szenarien erstellt und überprüft, von denen im Folgenden lediglich das wahrscheinlichste näher vorgestellt wird.

Die Abschätzung der nicht veröffentlichten Produktionszahlen basiert hier auf einer mittleren Exportquote aus bekannten Datensätzen und dem mittleren Exportaufkommen der Jahre 1993 bis 1999. Anhand dieser Werte ergeben sich die im Weiteren verwendeten kalkulierten Produktionszahlen. Die mittlere Exportquote ist der Quotient aus Produktion und Export auf Basis der bekannten Stückzahlen. Dieser Quotient wurde für die drei unterschiedlichen Akkumulatortypen getrennt ermittelt (vgl. Tabelle 8-15)

Tabelle 8-15: Exportkoeffizienten für Bleiakkumulatoren

Kategorie	mittlerer Exportkoeffizient
Starterbatterien	46,7
Traktions-(Antriebs-)Batterien	33,3
Ortsfeste Batterien	28,3

Durch die geringe Anzahl an nicht geheimen Produktionsdatensätzen muss eine Abschätzung auf Basis dieser Prozentzahlen kritisch bewertet werden. Jedoch relativiert sich die Bedeutung der Datensätze bei der Betrachtung der tatsächlichen und der kalkulierten Stückzahlen im Bezug auf Starter- und Antriebsakkumulatoren, da der berechnete, zusätzliche Anteil einen eher geringen Prozentsatz an der sich ergebenden Summe ausmacht. Bei den Ergebnissen für ortsfeste Batterien bleibt ein hohes Maß an Unsicherheit bestehen (vgl. Tabelle 8-16).

Die Qualität der berechneten Zahlen wurde durch Vergleich mit der Nachfrage nach Starterbatterien und dem Angebot an Rohblei überprüft. Dabei wurde festgestellt, dass die wie geschildert ermittelten Werte für das Angebot von Starterbatterien gut mit der Nachfrage zur Erstausrüstung und zur Nachrüstung in Deckung zu bringen sind.

Tabelle 8-16: Produktionsmengen für Bleiakumulatoren (1999)

Kategorie	aus Datensätzen	Produktion [Stück]		Anteil kalkuliert [%]
		berechnet	Summe	
Starterbatterien	8.554.867	1.279.860	9.834.727	13,0
Traktions-(Antriebs-)Batterien	2.011.872	241.047	2.252.919	10,7
Ortsfeste Batterien	552.897	13.499.651	14.052.548	96,1
Gesamt	11.119.636	15.020.558	26.140.194	57,5

Tabelle 8-17 stellt das auf den Annahmen basierende, im Inland verfügbare Angebot in den drei Akkumulatorkategorien dar. Die Zahlen der Produktion werden zur Ermittlung des zur Batterieherstellung erforderlichen Bleis verwendet.

Tabelle 8-17: Angebot von Bleiakumulatoren im Inland (Berechnung)

	Starter	Antrieb	Ortsfest	Summe
Produktion [Stk.]	9.834.727	2.252.919	14.052.548	26.140.194
[t]	160.044	54.405	92.655	307.104
Import [Stk.]	8.331.249	764.073	4.601.265	13.696.587
[t]	101.658	6.934	12.874	121.465
Export [Stk.]	4.248.711	615.020	4.061.109	8.924.840
[t]	72.166	15.570	35.245	122.982
Angebot [Stk.]	13.917.265	2.401.972	14.592.704	30.911.941
[t]	189.536	45.768	70.284	305.587

Einen Anhaltspunkt für die Qualität der getroffenen Annahmen stellt das sich ergebende durchschnittliche Gewicht je Batterie dar (vgl. Tabelle 8-18). Die berechneten Werte der hier im Mittelpunkt stehenden Starterbatterien über 5 kg decken sich gut mit Literaturangaben [167], [95].

Tabelle 8-18: Gewichte von Bleibatterien

Typ	Angebot [Stk.]	Angebot [t]	Gewicht [kg/Stck.]
Antriebsakkumulatoren für LFZ	159	1	7.8
Antriebsakkumulatoren mit festem Elektrolyt	698.935	3.199	4.5
Antriebsakkumulatoren mit fl. Elektrolyt	1.702.878	42.647	25.0
Antriebsakkumulatoren gesamt	2.401.972	45.768	19.1
Ortsfeste Akkumulatoren mit festem Elektrolyt	14.065.630	60.538	4.3
Ortsfeste Akkumulatoren mit fl. Elektrolyt	527.074	9.746	18.5
Ortsfeste Akkumulatoren gesamt	14.592.704	70.284	4.8
Starterbatterie für LFZ	1.340	10	7.4
Starterbatterien bis 5 kg, mit festem Elektrolyt	258.919	621	2.4
Starterbatterien bis 5 kg, mit fl. Elektrolyt	1.150.782	2.316	2.0
Starterbatterien über 5 kg, mit festem Elektrolyt	1.439.736	26.361	18.3
Starterbatterien über 5 kg, mit fl. Elektrolyt	11.066.488	160.299	14.5
Starterbatterien gesamt	13.917.265	189.536	13.6
Batterien gesamt	30.911.941	305.587	9.9

Die Haupteinsatzgebiete von Bleistarterbatterien liegen, wie erwähnt, vor allem im Bereich der Personenkraftwagen und der Nutzkraftwagen sowie, jedoch in einem deutlich geringeren Umfang, im Bereich der Kraft- räder. Luftfahrzeuge (LFZ) spielen wie die in Tabelle 8-19 dargestellten Berechnungsergebnisse zeigen, sowohl im Hinblick auf die Menge als auch in Bezug auf das Gewicht nur eine vernachlässigbare Rolle. Blei- starterbatterien bis 5 kg werden schwerpunktmäßig in Krafträdern einge- setzt, während das Haupteinsatzgebiet von Starterbatterien über 5 kg PKW und NKW sind.

Tabelle 8-19: Starterbatterien nach Einsatzgebiet (1999)

	Angebot [Stk.]	Angebot [t]	Gewicht [kg/ Stck.]
LFZ	1.340	10	7,4
Krafträder	1.409.701	2.937	2,1
PKW/NKW	12.506.224	186.590	14,9
Starterbatterien gesamt	13.917.265	189.536	13,6

8.4.3 Bedarfsabschätzung für Blei als Einsatzstoff der Akkumulatorenproduktion

Basierend auf einem durchschnittlichen Bleianteil von 60 % (siehe Tabelle 8-14) in einem Akkumulator lässt sich der Bedarf an Blei als Einsatzstoff der Akkumulatorenproduktion ermitteln (vgl. Tabelle 8-20).

Tabelle 8-20: Bleibedarf der berechneten Produktion in Deutschland (1999)

	Starter	Antrieb	Ortsfest	Summe
Produktion [Stk.]	9.834.727	2.252.919	14.052.548	26.140.194
tj	160.044	54.405	92.655	307.104
Bleibedarf [t]	96.027	32.643	55.593	184.262

Im Jahr 1999 wurden demnach zur Bleiakkumulatorenproduktion 184.262 t Blei eingesetzt. Der Gewichtsanteil der Starterbatterien am zur Batterieproduktion erforderlichen Bleibedarf betrug rund 52 %.

Im nächsten Schritt werden die entsprechenden Werte für das Bleibatterieangebot in Deutschland ermittelt (vgl. Tabelle 8-21)

Tabelle 8-21: Bleibedarf zur Deckung des Batterieangebots (1999)

	Starter	Antrieb	Ortsfest	Summe
Angebot [Stk.]	13.917.265	2.401.972	14.592.704	30.911.941
[t]	189.536	45.768	70.284	305.587
Bleibedarf [t]	113.722	27.461	42.170	183.352

Für das oben berechnete Angebot an Akkumulatoren ist demnach ein Bleibedarf von 183.352 Tonnen festzustellen. Der Anteil der Starterbatterien beläuft sich, bezogen auf den Bleiinhalt, auf ca. 62 %.

8.4.4 Nachfrage nach Starterbatterien

Im zweiten Schritt wird eine **Bedarfsanalyse** durchgeführt. Das Hauptaugenmerk in diesem Abschnitt wird auf den Bedarf an Starterbatterien gelegt. Unter Bedarf wird hierbei die Nachfrage nach Akkumulatoren zur Nach- und Erstausrüstung verstanden. Die Akkumulatoren kommen in Personenkraftwagen, Krafträdern, Luftfahrzeugen und Nutzkraftwagen zum Einsatz. Die Gruppe der Nutzkraftwagen setzt sich aus LKW, Omnibussen und Zugmaschinen zusammen. Die Bandbreite der zum Einsatz kommenden Bleibatterien ist sehr unterschiedlich. Sie ist vom Einsatzgebiet des Fahrzeuges, der Motorleistung und dem Motorentyp (Otto- oder Dieselmotor) abhängig.

Der Batteriebedarf für die *Erstausrüstung* von PKW, NKW, Krafträdern und sonstigen Fahrzeugen ist direkt an die Produktion der jeweiligen

Fahrzeuggattung gekoppelt. PKW und NKW werden mit einem vergleichbaren Batterietyp ausgestattet. Es handelt es sich um Bleiakumulatoren von einem Gewicht über 5 kg (vgl. Tabelle 8-18). Krafträder werden mit Bleiakumulatoren bis 5 kg ausgerüstet. Beide Batterietypen werden mit flüssigem oder festem Elektrolyt hergestellt und eingesetzt. Fahrzeuge der Kategorie Sonstige lassen sich hinsichtlich des eingesetzten Batterietyps nicht näher bestimmen. Jedes in Deutschland fertiggestellte Fahrzeug wird ab Werk mit einer Starterbatterie ausgestattet. Die Produktion umfasst sowohl die für den Export bestimmten als auch die für den deutschen Markt produzierten Fahrzeuge. Die Daten für PKW und NKW stammen vom Verband Deutscher Automobilhersteller [309]. Die Produktionsdaten für Krafträder und Sonstige Fahrzeuge wurden durch den Mittelwert aus den Quotienten von Produktion und Bestand für PKW und NKW ihrer Bestandsdaten hochgerechnet. Für die Jahre 1996 bis 2000 stellt sich die Situation wie folgt dar:

Tabelle 8-22: Fahrzeugproduktion in Deutschland

Jahr	PKW	NKW	Krafträder	Sonstige	Summe
1995	4.362.038	307.227	205.304	55.543	4.932.107
1996	4.236.257	303.326	215.653	54.594	4.811.826
1997	4.678.022	344.906	165.916	60.939	5.251.780
1998	5.348.115	378.673	314.900	67.842	6.109.530
1999	5.309.524	378.168	333.826	67.425	6.088.943
Ø 95 - 99	4.786.791	342.460	247.120	61.269	5.438.837

Quelle: [309]

Die für die Erstausrüstung der jeweiligen Fahrzeuge benötigten Starterbatterien können nur bedingt mit den angegebenen Produktionszahlen gleichgesetzt werden. Dies ist in der Definition der inländischen Produktion begründet. Danach gilt ein Fahrzeug als in Deutschland produziert, wenn mindestens 60 % der verwendeten Teile aus der BRD stammen. Dies bedeutet, dass etwa ein im Ausland endmontiertes Fahrzeug aus mindestens 60 % in Deutschland produzierten Teilen als Inlandsproduktion ausgewiesen wird. Der umgekehrte Fall, also ein Fahrzeug das aus 60 % ausländischen Teilen besteht und in der BRD endmontiert wird, tritt nicht in nennenswertem Umfang auf [308]. Da Fahrzeuge erst in der Endmontage mit einer Starterbatterie ausgestattet werden, tragen im Ausland endmontierte Fahrzeuge nicht zum Starterbatteriebedarf im Inland bei. Laut ZVEI wurden im Jahr 1999 4,4 Millionen PKW/NKW-Starterbatterien zur Erstausrüstung vertrieben [344]. Anhand dieses Wertes ergibt sich, dass rund 22 % der Fahrzeuge im Ausland mit Starterbatterien bestückt wurden. Nach Korrektur der Produktionsdaten ergibt sich somit für den Bedarf an Starterbatterien durch Erstausrüstung folgendes Bild:

**Tabelle 8-23: Erstausrüstungsbedarf in Deutschland
(korrigierte Fahrzeugproduktion, 1995-1999)**

Jahr	PKW	NKW	Krafträder	Sonstige	Summe
1995	3.402.390	239.637	160.137	43.324	3.847.482
1996	3.304.280	236.594	168.209	42.583	3.753.663
1997	3.648.857	269.027	129.415	47.532	4.096.828
1998	4.171.530	295.365	245.622	52.917	4.765.433
1999	4.141.429	294.971	260.384	52.591	4.749.375
Ø 95 - 99	3.816.524	273.989	200.907	48.906	4.341.325

Der Bedarf an PKW- und NKW-Starterbatterien ergibt sich somit für 1999 zu 4.436.400 Batterien. Dies entspricht einem Anteil von PKW/NKW am gesamten Erstausrüstungsbedarf von 93,4 %.

Im weiteren wird die Berechnung des zur Produktion der Starterbatterien benötigten Bleis durchgeführt. Hierzu wird der Bedarf der jeweiligen Fahrzeugklassen mit den in Tabelle 8-18 dargestellten durchschnittlichen Gewichten bewertet. Für PKW, NKW und Sonstige wurden 14,9 kg/Stück, für Krafträder 2,1 kg/Stück angenommen. Bei einem Bleianteil von 60 Gew.-% an einer Starterbatterie ergeben sich für das Jahr 1999 folgende Werte:

Tabelle 8-24: Berechneter Bleibedarf für Erstausrüstung (1999)

	PKW/ NKW	Krafträder	Sonstige	Summe
Erstausrüstung [Stk.]	4.436.400	260.384	52.591	4.749.375
[t]	66.102	547	784	67.433
Bleibedarf [t]	39.661	328	470	40.460

Den rund 4,7 Mio. Starterbatterien entsprechen demnach ein Gewicht von 67.615 Tonnen bzw. einer für die Produktion erforderlichen Bleimenge von 40.460 Tonnen. Bei einer Betrachtung des Durchschnitts der Jahre 1995 bis 1999 ergibt sich ein um ca. 4.000 Tonnen geringerer Bedarf (vgl. Tabelle 8-25).

**Tabelle 8-25: Berechneter Bleibedarf für Erstausrüstung
(Durchschnitt 1995 - 1999)**

	PKW/ NKW	Krafträder	Sonstige	Summe
Erstausrüstung [Stk.]	4.000.816	192.753	47.789	4.241.359
[t]	59.612	405	712	60.729
Bleibedarf [t]	35.767	243	427	36.437

Der Bedarf an *Ersatzbatterien* hängt in erster Linie von der Anzahl betriebener Fahrzeuge und der Lebensdauer der Starterbatterien ab. Die An-

zahl betriebener Fahrzeuge wird durch das Kraftfahrt-Bundesamt aufgezeichnet und als Fahrzeugbestand veröffentlicht (vgl. Tabelle 8-26):

Tabelle 8-26: Bestand an Kraftfahrzeugen in der BRD (1995 - 1999)

	PKW	NKW	Krafträder	Sonstige	Summe
1995	40.404.294	4.201.121	2.267.428	613.435	47.486.278
1996	40.987.547	4.258.321	2.470.451	625.405	48.341.724
1997	41.371.992	4.299.737	1.716.780	630.547	48.019.056
1998	41.673.787	4.356.511	2.925.843	630.347	49.586.488
1999	42.323.672	4.466.265	3.177.437	641.768	50.609.142
Ø 95-99	41.352.258	4.316.391	2.511.588	628.300	48.808.538

Quelle: [155]

Der Fahrzeugbestand setzt sich dabei aus regulär angemeldeten und vorübergehend stillgelegten Fahrzeuge zusammen. Vorübergehend stillgelegte Fahrzeuge verfügen über kein amtliches Kennzeichen und dürfen nicht auf öffentlichen Straßen bewegt oder abgestellt werden. Nach Ablauf einer Frist von 18 Monate werden sie von Amtswegen aus dem Fahrzeugregister gelöscht und nicht mehr im Fahrzeugbestand geführt [155]. Der durchschnittliche Anteil vorübergehend stillgelegter Fahrzeuge am Bestand betrug im Jahr 1999 rund 10,1 % (vgl. Tabelle 8-32).

Tabelle 8-27: Vorübergehend stillgelegte Fahrzeuge (1999)

	Bestand [Stk.]	Vorübergehend stillgelegt [Stk.]	Verfügbarer Bestand [Stk.]	Anteil [%]
PKW	42.323.672	3.996.478	38.327.194	9,4
NKW	4.466.265	512.662	3.953.603	11,5
Krafträder	3.177.437	532.045	2.645.392	16,7
Sonstige	641.768	93.956	547.812	14,6
Gesamt	50.609.142	5.135.141	45.474.001	10,1

Quelle: [155]

Bei der Berechnung des Bedarfs an Ersatzbatterien werden die vorübergehend stillgelegten Fahrzeuge nicht berücksichtigt. Tatsächlich verfügbar und für den Straßenverkehr zugelassen sind ca. 45 Mio. Fahrzeuge. Der Bedarf an Ersatzbatterien für diese Fahrzeuge hängt u.a. von der durchschnittlichen Lebensdauer der eingesetzten Starterbatterien ab. Diese wiederum ist im Wesentlichen von der Anzahl der Ladezyklen und den klimatischen Bedingungen, in denen die Batterie betrieben wird, abhängig. Die Bandbreite einer durchschnittlichen Lebensdauer von Starterbatterien liegt zwischen 4 und 6 Jahren. Bei Fahrzeugen die überwiegend auf Kurzstrecken zum Einsatz kommen, ist die Lebenserwartung der Batterie deutlich geringer als bei Langstreckenfahrzeugen. Dies hängt mit der häufigen Beanspruchung in Verbindung mit einem nicht optimalen Ladepro-

zess zusammen. Weitere Einflüsse wie die Anzahl der elektrischen Verbraucher im Fahrzeug und klimatische Bedingungen machen die Angabe einer durchschnittlichen Lebensdauer zusätzlich problematisch.

Die nachfolgende Bestimmung des Bedarfs an Starterbatterien als Ersatzbatterien geht von einer gleichverteilten Altersstruktur des Fahrzeugbestandes aus. Bei Gleichverteilung kann der Bedarf an Starterbatterien durch den Quotient aus der im Bestand geführten verfügbaren Fahrzeugen und der durchschnittlichen Lebensdauer einer Starterbatterie ermittelt werden. Die durchschnittliche Lebensdauer wird üblicherweise mit 4 bis 6 Jahren angesetzt. Laut ZVEI wurden im Jahr 1999 7,7 Millionen PKW/NKW mit Ersatzbatterien ausgestattet [344]. Anhand dieses Wertes Angabe ergibt sich die durchschnittliche Lebensdauer einer PKW/ NKW-Starterbatterie zu 5,5 Jahren. Damit lässt sich der Bleibedarf für Ersatzbatterien berechnen:

Tabelle 8-28: Berechneter Bleibedarf für Ersatzstarterbatterien (1999)

	PKW/ NKW	Krafträder	Sonstige	Summe
Ersatzbatterien [Stk.]	7.690.526	481.237	99.649	8.271.412
[t]	114.589	1.011	1.485	117.084
Bleibedarf [t]	68.753	606	891	70.251

Den rund 8,3 Mio. Ersatzstarterbatterien im Jahr 1999 entspricht demnach ein Gewicht von 117.084 Tonnen. Das für die Produktion benötigte Blei errechnet sich zu 70.251 Tonnen. Bei einer Betrachtung der Durchschnittswerte von 1995 bis 1999 ergibt sich ein um 2.200 Tonnen geringerer Bedarf an Blei (vgl. Tabelle 8-29) .

Tabelle 8-29: Berechneter Bleibedarf für Ersatzstarterbatterien (Ø 1995 - 1999)

	PKW/ NKW	Krafträder	Sonstige	Summe
Ersatzbatterien [Stk.]	7.506.391	380.391	97.588	7.984.341
[t]	111.845	799	1.454	114.098
Bleibedarf Ø 95-99 [t]	67.107	479	872	68.459

Zusammenfassend ergeben sich aus dem Starterbatteriebedarf auf Basis der vorgestellten Berechnungen damit die in Tabelle 8-30 zusammengestellten Werte:

Tabelle 8-30: Erforderliche Bleimenge zur Deckung des berechneten Starterbatteriebedarfs (1999)

	PKW/ NKW	Krafträder	Sonstige	Summe
Erstausrüstung [Stk.]	4.436.400	260.384	52.591	4.749.375
[t]	66.102	547	784	67.433
Bleibedarf [t]	39.661	328	470	40.460
Ersatzbatterien [Stk.]	7.690.526	481.237	99.649	8.271.412
[t]	114.589	1.011	1.485	117.084
Bleibedarf [t]	68.753	606	891	70.251
Batterien gesamt [Stk.]	12.126.925	741.621	152.241	13.020.787
[t]	180.691	1.557	2.268	184.517
Bleibedarf gesamt [t]	108.415	934	1.361	110.710

Bei der analogen Berechnung auf Basis der durchschnittlichen Werte für 1995 - 1999 ergibt sich ein um rund 6.000 t geringerer Bleibedarf. Die Erstausrüstung ist mit rund 37 % am Bleibedarf für Starterbatterien beteiligt, während Ersatzbatterien rund 63 % des entsprechenden Bleibedarf verursachen. Es ist eine deutliche Dominanz der PKW/NKW-Starterbatterien festzustellen. Dieser Bereich verursacht ca. 98 % des gesamten Bleibedarfs.

8.4.5 Anfall verbrauchter Starterbatterien

Der im Folgenden ermittelte **Anfall verbrauchter Starterbatterien** speist sich wie einleitend erwähnt aus zwei Quellen, dem Batterieaustausch sowie der Löschung (und inländischen Verwertung) von Fahrzeugen. Die entsprechenden Daten lassen sich aus dem Bedarf an Ersatzbatterien und aus der Anzahl der Löschung von Fahrzeugen aus dem Register des Kraftfahrt-Bundesamtes ableiten. Dabei wird davon ausgegangen, dass für jede eingebaute Ersatzbatterie eine Altbatterie als Entsorgungsobjekt anfällt. Ausgehend von den oben ermittelten Mengen (vgl. Tabelle 8-31) lässt sich nun der Entsorgungsbedarf für Starterbatterien in der BRD ermitteln. In Bezug gesetzt zu den tatsächlich entsorgten Batterien ergibt sich die Recyclingquote.

Ausgehend von einem Bleianteil von 60 Gew.-% wird das Bleiaufkommen durch den Austausch defekter Starterbatterien ermittelt (Tabelle 8-31):¹⁴²⁾

¹⁴²⁾ Da für jede neue Batterien im Austauschfall genau eine verbrauchte anfällt, entspricht Tabelle 8-31 exakt Tabelle 8-28.

Tabelle 8-31: Bleianfall durch ausgetauschte Starterbatterien (1999)

	PKW/ NKW	Krafträder	Sonstige	Summe
Ersatzbatterien [Stk.]	7.690.526	481.237	99.649	8.271.412
[t]	114.589	1.011	1.485	117.084
Bleiaufkommen [t]	68.753	606	891	70.251

Der maximale Altbatterieanfall durch Nachrüstung beläuft sich demnach für den PKW/NKW-Bereich auf rund 7,7 Mio. Stück. Der Anteil der PKW-Starterbatterien beträgt dabei rund 85 %.

Im Bereich der Löschung von Fahrzeugen aus dem Fahrzeugregister müssen prinzipiell vier Gründe, die zu einer Löschung führen können, berücksichtigt werden. Diese sind

- Verwertung/Verschrottung,
- Export,
- Stilllegung länger als 18 Monate (Sammlerauto) sowie
- unbekanntes Verbleiben (Diebstahl).

Der für den Anfall von Starterbatterien relevante Lösungsgrund ist die Verwertung/Verschrottung. Nur in diesem Fall kommt es i.d.R. zu einem Altbatterieanfall. Seit 1987 wird vom Kraftfahrt-Bundesamt nur die Gesamtzahl der Löschungen erfasst, die Untergliederung nach Gründen findet nicht mehr statt. Die deshalb zu treffenden Annahmen werden im Folgenden mit ihren Begründungen vorgestellt. Grundlage ist zunächst die Anzahl der Löschungen von Fahrzeugen aus dem Fahrzeugregister:

Tabelle 8-32: Löschungen aus dem Fahrzeugregister (1995 - 1999)

Jahr	PKW	NKW	Krafträder	Sonstige	Summe
1995	2.949.704	204.610	120.342	29.266	3.303.922
1996	3.145.259	229.841	120.186	32.420	3.527.706
1997	3.392.358	251.902	126.681	35.264	3.806.205
1998	3.468.798	256.102	144.776	38.396	3.908.072
1999	3.290.203	265.902	178.625	41.423	3.776.153
Ø 95 - 99	3.249.264	241.671	138.122	35.354	3.664.412

Quelle: [156]

Die maximale Anzahl zu entsorgender PKW beträgt demnach für 1999 ca. 3,3 Mio. Stück. Dieser Wert hat jedoch nur Gültigkeit, wenn keine nennenswerten Stückzahlen der gelöschten Altfahrzeuge exportiert werden und wenn nicht zusätzlich Altfahrzeuge zur Entsorgung in die BRD importiert werden. Die Arbeitsgemeinschaft-Alttauto (ARGE-Alttauto) gibt das mittlere jährliche Alttautoaufkommen in der BRD jedoch mit 1,1 bis

1,7 Mio. PKW in den Jahren 1997 bis 1999 an [13], so dass die Zahl der Löschungen entsprechend bewertet werden muss. Die Verwertung dieser Altautos wird von anerkannten Annahmestellen durchgeführt. Diese zertifizierten Betriebe sind zur ordnungsgemäßen Entsorgung aller anfallenden Rückstände verpflichtet. Es wird deshalb hier von einer vollständigen Entsorgung der den Betrieben überlassenen Fahrzeuge ausgegangen. Basierend auf den durchschnittlichen Löschungen errechnet sich, dass zwischen 33,8 % und 52,3 % der gelöschten Fahrzeuge in der BRD verschrottet bzw. verwertet werden.

Tabelle 8-33: Abschätzung des Altbatterieanfalls durch die Verwertung gelöschter Fahrzeuge (1999)

Entsorgungsquote		PKW	NKW	Krafträder	Sonstige	Summe
34 %	[Stk.]	1.112.089	89.875	60.375	14.001	1.276.340
	[t]	16.570	1.339	127	209	18.245
52 %	[Stk.]	1.720.776	139.067	93.421	21.664	1.974.982
	[t]	25.640	2.072	196	323	28.231
100 %	[Stk.]	3.290.203	265.902	178.625	41.423	3.776.153
	[t]	49.024	3.962	375	617	53.978
Ø = 43 %	[Stk.]	1.416.432	114.471	76.898	17.833	1.625.634
	[t]	21.105	1.706	161	266	23.238

Ausgehend von einer mittleren Entsorgungsquote von 43,1 % ergibt sich ein verfügbarer Altbatterieanfall von 1,6 Mio. Stück in der BRD. Der maximale (theoretische) Anfall beläuft sich auf 3,8 Mio. Batterien. Bei einem Bleianteil von 60 % in den Starterbatterien und der mittleren Entsorgungsquote von 43,1 % ergeben sich für das maximale und das verfügbare Bleiaufkommen die in Tabelle 8-35 wiedergegebenen Werte.

Tabelle 8-34: Abschätzung des Bleiaufkommens durch die Verwertung gelöschter Fahrzeuge (1999)

Entsorgungsquote		PKW	NKW	Krafträder	Sonstige	Summe
Ø = 43 %	[Stk.]	1.416.432	114.471	76.898	17.833	1.625.634
	[t]	21.105	1.706	161	266	23.238
verfügbares Bleiaufkommen	[t]	12.663	1.023	97	159	13.943
	[Stk.]	3.290.203	265.902	178.625	41.423	3.776.153
100 %	[t]	49.024	3.962	375	617	53.978
	[t]	29.414	2.377	225	370	32.387
Bleiaufkommen maximal						

Das gesamte Bleiaufkommen setzt sich aus den Anteilen für Entsorgung und Nachrüstung zusammen (vgl. Tabelle 8-35).

Tabelle 8-35: Bleiaufkommen aus Entsorgung und Nachrüstung (1999)

	PKW	NKW	Krafträder	Sonstige	Summe
Entsorgung [Stk.]	1.416.432	114.471	76.898	17.833	1.625.634
[t]	21.105	1.706	161	266	23.238
Bleiaufkommen [t]	12.663	1.023	97	159	13.943
Nachrüstung [Stk.]	6.971.863	718.663	481.237	99.649	8.271.412
[t]	103.881	10.708	1.011	1.485	117.084
Bleiaufkommen [t]	62.328	6.425	606	891	70.251
Gesamt [Stk.]	8.388.295	833.133	558.135	117.482	9.897.046
[t]	124.986	12.414	1.172	1.750	140.322
Bleiaufkommen [t]	74.991	7.448	703	1.050	84.193

Die Betrachtung der Durchschnittswerte von 1995 -1999 ergibt folgendes Bild (Tabelle 8-36):

Tabelle 8-36: Bleiaufkommen aus Entsorgung und Nachrüstung (Durchschnitt 1995 - 1999)

	PKW	NKW	Krafträder	Sonstige	Summe
Entsorgung [Stk.]	1.398.808	104.040	59.462	15.220	1.577.529
[t]	20.842	1.550	125	227	22.744
Bleiaufkommen [t]	12.505	930	75	136	13.646
Nachrüstung [Stk.]	6.811.845	694.547	380.391	97.558	7.984.341
[t]	101.496	10.349	799	1.454	114.098
Bleiaufkommen [t]	60.898	6.209	479	872	68.459
Gesamt [Stk.]	8.210.653	798.586	439.853	112.778	9.561.870
[t]	122.339	11.899	924	1.680	136.842
Bleiaufkommen [t]	73.403	7.139	554	1.008	82.105

8.4.6 Einsatz von Altbatterien zur Bleigewinnung

Im Folgenden wird nun auf die **Bleigewinnung** eingegangen, um im Anschluss die Recyclingquote abschätzen zu können. 1999 wurden in Deutschland 353.000 Tonnen Blei hergestellt (vgl. Tabelle 8-1). Der Anteil von Sekundärblei betrug dabei bei einem Anteil von 54 % an der Gesamtproduktion ca. 190.000 Tonnen. Zur Herstellung einer Tonne Sekundärblei werden im Schnitt 1,22 Tonnen entleerte Bleiakumulatoren und etwa 0,3 Tonnen anderer Bleischrotte verwendet (nach [238]). Für die Herstellung von 190.000 Tonnen Sekundärblei müssen demnach rund 230.000 Tonnen entleerter Bleiakumulatoren eingesetzt werden. Aus dem ermittelten Angebot an Bleibatterien (vgl. Tabelle 8-37) und der Annahme einer (fast) vollständigen Rückgabe und Verwertung für Antriebs- und ortsfeste Akkulatoren [303] lässt sich der Anteil benötigter Starterbatterien ermitteln (vgl. Tabelle 8-38).

Tabelle 8-37: Angebot Bleiakкумуляtoren (1999)

	Starter	Antrieb	Ortsfest	Gesamt
gefüllt [t]	189.536	45.768	70.284	305.587
entleert [t]	174.956	42.247	64.877	282.081
Bleihalt [t]	113.722	27.461	42.170	183.352

Tabelle 8-38: Berechneter Starterbatteriebedarf für die Sekundärbleigewinnung (1999)

	Starter	Antrieb	Ortsfest	Gesamt
Akkumulatoren gefüllt [t]	136.866	45.768	70.284	252.917
Akkumulatoren entleert [t]	126.337	42.247	64.877	233.462
Bleigehalt [t]	82.119	27.461	42.170	151.750

Für die Produktion von 190.000 Tonnen Sekundärblei müssen ca. 137.000 Tonnen Starterbatterien eingesetzt werden. Setzt man diese Zahl mit dem verfügbaren Bleiaufkommen (siehe Tabelle 8-35) in Beziehung, lässt sich eine Recyclingquote für Starterbatterien ermitteln. Bei einem maximal verfügbaren Bleiaufkommen von 84.193 Tonnen ergibt sich eine Recyclingquote von ca. 97,5 %.

Die in den obenstehenden Betrachtungen auftretende Differenz zwischen Angebot und Bedarf lässt sich durch Lagerbestandsänderungen erklären. Die Differenz zwischen dem Altbatterieaufkommen in Deutschland und den hier eingesetzten Batterien entsteht zum Großteil durch den Export von Altfahrzeugen. Hierdurch stehen viele Fahrzeuge nicht in Deutschland zur Entsorgung zur Verfügung.

8.4.7 Ergebnis der Abschätzung: Recyclingquote für Bleistarterbatterien in Deutschland

Auf Basis der vorgestellten Daten und der getroffenen Annahmen ergibt sich bezüglich der Recyclingquote für Starterbatterien das in Tabelle 8-39 zusammengefasste Bild.

Tabelle 8-39: Ermittlung der Recyclingquote für Starterbatterien für das Jahr 1999

Bleianfall in verbrauchten Starterbatterien [Tsd. t]	Aus Starterbatterien in Hüttenprozesse zurückgeführte Bleimenge [Tsd. t]	Recyclingquote [%]
82,119	84,193	97,5

Die dargestellte Abschätzung der Recyclingquote ist mit einer Reihe von Unsicherheiten behaftet. Dennoch kann die ermittelte Recyclingquote von 97,5 % als sehr belastbarer Wert angesehen werden, der die in zahl-

reichen Quellen angegebenen hohen Quoten von z.T. deutlich über 90 % bestätigt [167], [278]. Bei einer (hier nicht im Einzelnen dargestellten) analogen Betrachtung der Durchschnittswerte der Jahre 1995 - 1999 wird eine etwas geringe Quote ermittelt, die mit 91,1 % aber ebenfalls im Rahmen der üblicherweise angegebenen Werte liegt. Die über dem Durchschnitt liegende Recyclingquote für 1999 ist möglicherweise auf die Einführung der Pfandregelung für Bleistarterbatterien durch die Batterieverordnung zu erklären.

Als **Fazit der Abschätzung** lässt sich festhalten, dass im Bereich der Bleistarterbatterien effiziente Rücknahme- und Verwertungswege seit langem etabliert sind und strengere Vorgaben des Gesetzgebers nicht erforderlich erscheinen. Die geplante Umstellung der elektrischen Kfz-Bordnetze von 12 V auf 42 V (vgl. [185]) und ihre Auswirkungen auf den Bleimarkt sollten jedoch beobachtet werden. Es ist zu erwarten, dass die steigenden Anforderungen an die Kfz-Batterien nur bedingt durch das Blei-Säure-Batteriesystem erfüllt werden können, so dass u.U. der Markt für Bleistarterbatterien schrumpft. Da der Batteriesektor den Haupteinsatzbereich von Blei darstellt, werden in diesem Fall erhebliche Auswirkungen auf die Bleipreise und damit auch auf die Rücknahmebemühungen (sofern diese nicht gesetzlich vorgegeben sind) erwartet. Hier sollte der Gesetzgeber gegebenenfalls durch frühzeitiges Eingreifen Fehlentwicklungen verhindern.

9 Vorschlag für einen nationalen Berichtsentwurf zur Batterieverwertung

In diesem Kapitel werden zunächst die generellen Anforderungen an einen nationalen Berichtsentwurf zur Batterieverwertung skizziert. Diese sollen gewährleisten, dass die für die politischen Entscheidungsträger und Umweltbehörden erforderlichen Informationen über den Stand der Batterierücknahme und -verwertung im hinreichenden Maße vorliegen. Dabei sind ferner die Anforderungen der EU an ihre Mitgliedsstaaten bzgl. einer Dokumentation der Umsetzung und des Erfolges der auf europäischer Ebene in Kraft getretenen Richtlinien zu beachten. Insbesondere der Umsetzung der aktuell diskutierten neuen Batterierichtlinie (vgl. 3.1.4) kommt dabei wegen der geplanten Festlegung von zu erzielenden Rücknahme- und Verwertungsquoten große Bedeutung zu.

Im zweiten Abschnitt dieses Kapitels werden auf Basis der Erfahrungen im vorliegenden Forschungsvorhaben Schwierigkeiten und Informationsdefizite hinsichtlich der Erstellung eines nationaler Berichtsentwurf zur Batterieverwertung angesprochen und - wo möglich - Lösungswege aufgezeigt.

9.1 Anforderungen an den nationalen Berichtsentwurf

Nach dem Entwurf für die neue Batterierichtlinie der Europäischen Union sollen die Mitgliedsstaaten „die notwendigen Maßnahmen ergreifen, um zu gewährleisten, dass Datenbasen über die Mengen verbrauchter Batterien und Akkumulatoren und ihre Sammlung, Verwertung und Beseitigung eingerichtet werden, die die Mitgliedsstaaten und die Kommission in die Lage versetzen, die Implementierung der Ziele der Richtlinie zu überwachen“¹⁴³. Zur Datenerhebung sollen sämtliche wirtschaftlich Beteiligten herangezogen werden. Die Mitgliedsstaaten sollen der Kommission ihre Daten in einer von der Kommission zu beschließenden Form vorlegen [75].

Die an einen nationalen Bericht zum Stand der Batterierücknahme und -verwertung in Deutschland zu stellenden Anforderungen sollten zweckmäßigerweise nur auf den in den Monitoringberichten nach BattV erhobenen Daten beruhen. Dadurch kann ihnen regelmäßig ohne unver-

¹⁴³) Frei übersetzt.

hältnismäßig großen bürokratischen Aufwand genügt werden. Im Folgenden werden zunächst die in den Monitoringberichten erhobenen Daten vorgestellt und mögliche Verbesserungen erläutert. Ferner werden Ergänzungen vorgeschlagen, die jedoch nicht zwingend Bestandteile jedes (jährlichen) nationalen Berichtes sein müssen.

Die Batterieverordnung schreibt vor, dass die zur Sammlung und Verwertung eingerichteten Systeme (vgl. Kapitel 3 und 4) unabhängig davon, ob das Gemeinsame Rücknahmesystem (GRS) oder herstellereigene Systeme sind, zum 31. März jeden Jahres eine nachprüfbar dokumentierte (sogenannte Monitoringberichte) vorlegen. Im Einzelnen sind folgende Bestandteile der Monitoringberichte und eine Reihe von Ergänzungen für einen nationalen Bericht heranzuziehen:

Bestandteile der Monitoringberichte

1. Batterieaufkommen: Besondere Relevanz bei den dort aufzuführenden Daten besitzt die Entwicklung des Batteriemarktes, die durch *die Masse der im Vorjahr in Verkehr gebrachten Batterien, untergliedert nach Systemen und Typengruppen*, erfasst wird. Insbesondere bei der Bestimmung von Recyclingquoten in den kommenden Jahren sind diese Daten unverzichtbar. Hier erschwert derzeit die unterschiedliche Untergliederung, die die Sammelsysteme vornehmen, die zusammenfassende Auswertung der Monitoringberichte. Durch die Vorgabe einer Mindestuntergliederung kann die Auswertung deutlich erleichtert werden.
2. Zurückgenommene Batteriemenge: Der Erfolg der Bemühungen der einzelnen Systeme wird durch die Erfassung der im gleichen Zeitraum *zurückgenommenen Batteriemasse* messbar, wobei auch hier die Untergliederung nach System und Typgruppe zu erfolgen hat. Bei den zurückgenommenen Batterien erscheint es sinnvoll, die geforderte Untergliederung der in den Sortieranlagen separierten Fraktionen anzupassen (vgl. Kapitel 5), d.h. beispielsweise, dass auch Bestandteil der Berichte sein sollte, welche Massen der gesammelten und sortierten Batterien durch die entsprechende UV-Markierung als *quecksilberfreie Fraktion* anfielen. Der Anteil UV-markierter Batterien sollte auch für die in Verkehr gebrachten Massen angegeben werden.
3. Erfolg der Verwertung: Die *Verwertungs- und Beseitigungsergebnisse* werden nach BattV sowohl qualitativ als auch quantitativ mitgeteilt. Um diese Ergebnisdokumentation, wie in der novellierten Batterieverordnung gefordert, nachprüfbar zu gestalten, sollte an dieser Stelle nicht eine Aufsummierung der Verwertungsergebnisse über alle Anla-

gen erfolgen sondern eine eindeutige Zuordnung der in den einzelnen Anlagen verwerteten Batteriemengen. Da diese Informationen aufgrund der Konkurrenzsituation der Verwertungsunternehmen sensible Daten sind, sollten sie nur zur einfacheren Überprüfbarkeit der Monitoringberichte erhoben werden und nicht Bestandteil der Berichte an die Europäische Kommission sein. Auf supranationaler Ebene erscheint die bisherige, aggregierte Darstellung ausreichend.

4. Kosten der Batterierücknahme und -verwertung: In den Monitoringberichten nach BattV wird weiterhin erfasst, welche Kosten insgesamt für die Sortierung, Verwertung und Beseitigung der Batteriefraktionen entstehen. Hier sollte neben der Einzeldarstellung eine alle Systeme integrierende Aggregation erfolgen, so dass auf europäischer Ebene einfach überblickt werden kann, mit welchem Aufwand in den einzelnen Mitgliedsstaaten welche Erfolge erzielt werden und so Handlungsempfehlungen abgeleitet werden können.

Empfehlungen bei der Berichtserstellung

5. Datenbereitstellung: Es ist hilfreich, wenn die zur Vorlage von Monitoringberichten Verpflichteten diese nicht nur bei den *obersten Abfallbehörden in den Bundesländern*, sondern zeitgleich auch einer *zentralen Stelle* des Bundes (etwa dem Umweltbundesamt) vorlegen, da so zeitnah eine Beurteilung des Gesamterfolges der Rücknahme- und Verwertungssysteme ermöglicht wird und Reibungsverluste, wie sie z.T. auch in dem vorliegenden Forschungsvorhaben festgestellt werden konnten, vermindert werden können. Auch wird so die Erstellung des nationalen Berichtes organisatorisch erleichtert.
6. Berichtsformat: Die Europäische Union wird wie eingangs erwähnt nach der Verabschiedung der neuen Batterierichtlinie ein *Datenformat* festlegen, dem die nationalen Berichte zu entsprechen haben. Hier sollte darauf geachtet werden, dass nationale und europäische Vorgaben für die Berichte aufeinander abgestimmt sind.
7. Zukünftige Entwicklungen: In unregelmäßigen Abständen erscheint eine *umfassendere Darstellung der Entwicklung* sowohl die Sammelsysteme als auch die Sortier- und Verwertungsprozesse betreffend sinnvoll, wie sie etwa im vorliegenden Bericht erfolgt. Damit können zum einen die in den Monitoringberichten wiedergegebenen Zahlen auf ihre Plausibilität überprüft und zudem ein Abgleich der Erwartungen des Gesetzgebers mit den tatsächlich realisierten Strukturen durchgeführt werden. Des Weiteren kann eine Informationsgrundlage geschaffen werden, die zur Beurteilung der wirtschaftlichen Zumutbarkeit einer

Verwertung im Vergleich zu einer Deponierung verbrauchter Batterien herangezogen werden kann. Weiterhin ist nur durch eine umfassende Analyse und Bewertung der in den Anlagen ablaufenden Verwertungsprozesse ein Urteil über die Plausibilität der Verwertungsergebnisse möglich.¹⁴⁴

9.2 Schwierigkeiten und Informationsdefizite

Zur effizienten Nutzung der Erfolgskontrollberichte zur Erstellung eines nationalen Berichtes zur Batterieverwertung sind folgenden Schwierigkeiten zu beseitigen:

- Zum Teil werden in den derzeit vorliegenden Erfolgskontrollberichten von den Sammelsystemen gesehene Schwachstellen der aktuell verfügbaren Verwertungsprozesse aufgezeigt und nur wage auf eigene Aktivitäten in Zusammenarbeit mit Verwertungsunternehmen zur Behebung dieser hingewiesen. In diesem Zusammenhang ist es wünschenswert, dass - soweit dies unter Berücksichtigung evtl. noch nicht erlangter Patente möglich ist - sowohl die betroffenen Unternehmen als auch die angestrebten Ziele konkretisiert und spezifiziert werden. Ferner ist es hilfreich anzugeben, wie weit Entwicklungsarbeiten im Einzelnen vorangeschritten sind und wann mit einem Abschluss gerechnet wird, damit nicht der Eindruck entsteht, die Problemlösung, also hier konkret die Verwertung bestimmter Batteriefractionen, soll nur möglichst weit in die Zukunft gelegt und die derzeit preiswerte Lösung (oftmals Deponierung) so lange wie möglich genutzt werden.
- Ein Defizit in der Dokumentation ist derzeit insbesondere im Bereich der Industriebatterien zu verzeichnen. Hier erscheint nur durch eine herstellerübergreifende Zusammenarbeit unter Einbeziehung der beteiligten Recyclingunternehmen eine konsistente Datenzusammenstellung möglich. In der novellierten Batterieverordnung wird explizit auch für diesen Bereich die Erstellung von Monitoringberichten gefordert; diese sind erstmals Ende März 2002 auf Verlangen der zuständigen Behörde vorzulegen.

¹⁴⁴) Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens traten keine Unstimmigkeiten bei den Verwertungsergebnissen in den vorliegenden Monitoringberichten auf.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Gemäß der im Oktober 1998 vollständig in Kraft getretenen und im Juli 2001 novellierten Batterieverordnung sind verbrauchte Batterien zurückzugeben und getrennt vom sonstigen Hausmüll gemäß den Vorgaben des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes zu verwerten bzw. schadlos zu beseitigen. Insbesondere für Gerätebatterien haben sich dazu in den letzten Jahren neue Strukturen zur Rücknahme, Sortierung und Verwertung herausgebildet. Im vorliegenden Forschungsvorhaben wird eine umfassende Analyse der Batterierücknahme und -verwertung in Deutschland vorgenommen, um den Stand der bisherigen Entwicklung aufzuzeichnen, Entwicklungstrends zu beleuchten, Defizite herauszuarbeiten und Verbesserungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Grundlage dieser Analyse bildet zum einen eine umfassende Bestandsaufnahme und Analyse **des Batteriemarktes** und seiner dynamischen Entwicklungen in den letzten Jahren, die vor allem durch die Entwicklungen im Bereich mobiler Kommunikations-, Datenverarbeitungs- und Unterhaltungselektronik voran getrieben wurden. Obwohl innovative Batteriesysteme, etwa auf Lithiumbasis, bereits nennenswerte Marktanteile erringen konnten bzw. in bestimmten Anwendungen den Markt zwischenzeitlich sogar dominieren, blieben dennoch die produzierten Stückzahlen etablierter Systeme, hier insbesondere Nickel/Cadmiumbatterien, aufgrund des wachsenden Gesamtmarktes auf etwa konstantem Niveau. Schadstoffhaltige Batterien, die als Hauptgrund für die getrennte Erfassung verbrauchter Batterien und die mit ihnen verbundene Umweltproblematik anzusehen sind, gelangen somit weiterhin im erheblichen Umfang in Verkehr.

Neben den marktwirtschaftlichen Rahmenbedingungen, ist der **rechtliche Rahmen**, sowohl auf nationaler als auch auf europäischer Ebene, für die sich herausbildenden Strukturen einer Batterierücknahme und -verwertung prägend. Maßgeblich sind hier insbesondere die EU-Batterierichtlinie(n) und die nationale Batterieverordnung. In ihnen werden u.a. Grenzwerte für den Schadstoffgehalt von Batterien festgelegt, Kennzeichnungspflichten geregelt sowie Rücknahme- und Rückgabepflichten für verbrauchte Batterien festgeschrieben.

Demzufolge werden im vorliegenden Bericht zunächst die für die Batterieverwertung in Deutschland relevanten europäischen sowie nationalen Regelwerk erörtert und die aktuellen Entwicklungen hervorgehoben.

Anschließend erfolgt eine **Analyse der derzeitigen Rücknahmesysteme**, mit denen Hersteller und Vertreiber ihren gesetzlichen Verpflichtungen zur Produktverantwortung nachkommen. Auf Basis der Batterieverordnung hat sich in Deutschland ein Gemeinsames Rücknahmesystem

für Batterien (GRS) etabliert, das als Non-Profit-Organisation für den Großteil der in Verkehr gebrachten Batterien für die Hersteller und Händler die rücknahme- und verwertungslogistischen Funktionen übernimmt. Neben diesem gemeinsamen System sind mit der Vfw-REBAT und der Robert Bosch GmbH zwei Unternehmen als beauftragte Dritte mit der Rücknahme und Verwertung verbrauchter Batterien befasst. Insbesondere bei Batterien für spezielle Anwendungen besitzen diese einen nennenswerten Marktanteil.

Es zeigt sich, dass nur in Ausnahmefällen, etwa Anwendungen mit wenigen Kunden, herstellereigene Rücknahmesysteme mit ausreichendem Erfolg operieren können. Aufgrund der hohen Marktanteile ist das Gemeinsame Rücknahmesystem prägend für die sich etablierenden Strukturen. Als problematisch ist in diesem Zusammenhang anzusehen, dass die Batterieverordnung die Ausschreibungsdauer der Entsorgungsdienstleistungen auf maximal drei Jahre begrenzt, wodurch aufgrund der damit verbundenen kurzen Amortisationszeit die Markteintrittsbarriere für neue Anbieter hoch ist. Ein weiteres Problem kann durch eine nicht verursachungsgerechte Lastenverteilung zwischen den Sammelsystemen entstehen, da derzeit alle am Markt operierenden Rücknahmesysteme alle Batterien unabhängig davon, mit welchem System der jeweilige Hersteller vertraglich zusammenarbeitet, zurücknehmen, die zurückgenommenen Batteriemengen aber nicht zwingend mit der in Verkehr gebrachten Menge der einzelnen Sammelsysteme in Korrelation stehen.

Zur **Sammlung** verbrauchter Batterien installieren die Rücknahmesysteme im Handel, bei öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern und anderen Stellen Behälter, in denen Batteriegemische gesammelt werden. Diese Gemische müssen vor einer zielgerichteten Verwertung oder Beseitigung in die verschiedenen Batteriesysteme sortiert werden. Die hierbei zu beantwortende Frage, ob alle Batterien getrennt vom restlichen Hausmüll zurückgenommen werden sollen oder ob eine getrennte Erfassung der schadstoffhaltigen Batterien sinnvoller ist, kann für Deutschland aufgrund der Erfahrungen mit der freiwilligen Selbstverpflichtung der Industrie und des Handels von 1988 als ausdiskutiert und für die Sortierung entschieden betrachtet werden.

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführte Analyse der Batteriesortier- und Verwertungsprozesse belegt zudem, dass die hierzu lande durchgeführte **Sortierung** der Batterien zwingend notwendig ist, um hochwertige und gleichzeitig kostengünstige Recyclingoptionen für zurückgegebene Batterien zu eröffnen. Vier Unternehmen betreiben dazu in Deutschland (teil-) automatische Sortieranlagen, mit denen die Batteriegemische mit hoher Qualität in die verschiedenen chemischen Systeme

sortiert werden können. Hier ist in jüngster Zeit insbesondere die Erkennung von Alkali-Mangan-, Zink-Kohle- und Zink-Luft-Batterien, die durch Aufbringen eines speziellen UV-Lackes als quecksilberfrei markiert sind, von Bedeutung, da dadurch für diese Batteriefraktion kostengünstige Verwertungsoptionen eröffnet werden. Bislang werden diese Batteriefractionen überwiegend auf Sonderabfalldeponien verbracht, da die Kosten für Verwertungsverfahren, die unempfindlich gegenüber Quecksilbereinträgen sind, ein Vielfaches der Deponiegebühren betragen.

Nach ihrer Sortierung steht eine Reihe von Verfahren und Anlagen zur **Verwertung**, von Batteriefractionen zur Verfügung. Insgesamt 19 Anlagen in Deutschland sowie im europäischen und - sofern es sich um besonders relevante Verfahren handelt - im sonstigem Ausland werden im Forschungsvorhaben untersucht. Im vorliegenden Bericht wird zur vergleichenden Analyse der verschiedenen Verwertungsverfahren eine Methodik zur Bewertung vorgestellt, die ein strukturiertes Vorgehen und damit eine belastbare Entscheidungsgrundlage ermöglicht. Aufgrund einer Reihe von Widrigkeiten, die vor allem ihren Ursprung im noch jungem, umkämpften Batterieverwertungsmarkt und der Weiter- und Neuentwicklung von Verwertungsprozessen sowie z.T. noch nicht im ausreichenden Maße verfügbaren Daten haben, ist die vorgeschlagene Methodik derzeit jedoch noch nicht vollständig einsetzbar. Im Forschungsvorhaben wird daher zunächst eine vereinfachende, qualitative Gegenüberstellung der betrachteten Verfahren durchgeführt, die der derzeitigen Situation Rechnung trägt und anhand der eine zügige Beurteilung der Optionen zur Verwertung verbrauchter Batterien möglich ist.

Als zentrale Ergebnisse sind hierbei insbesondere folgende Punkte festzuhalten:

- Generell bestehen für fast alle nach der Sortierung vorliegenden Batteriefractionen hochwertige Verwertungsoptionen, d.h. es sind Verfahren entwickelt und im industriellen Maßstab realisiert, mit denen eine stoffliche Verwertung der Elemente bzw. Verbindungen erreicht werden kann, aus denen die Batterien bestehen.
- Es zeigt sich, dass auf Batterien spezialisierte Verwertungsverfahren in der Regel höhere Kosten aufweisen, als sie bei der Nutzung von Mitverwertungsoptionen in der NE- oder Eisen- und Stahlindustrie entstehen. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass aufgrund der Emissionsschutzmaßnahmen, insbesondere zum Schutz der Luft, bei der Mitverwertung höhere Anforderungen an die Qualität der Sortierung zu stellen sind, als sie bei robusten, d.h. auch für Problemstoffe wie etwa

Quecksilber geeigneten, spezialisierten Verfahren eingehalten werden müssen.

Ein besonderes Augenmerk gilt aufgrund seiner Schädlichkeit dem Schwermetall **Cadmium** als Batteriebestandteil. Das zwangsläufig als Kuppelprodukt bei der Gewinnung von Metallen aus primären und auch sekundären Rohstoffen anfallende Cadmium besitzt neben der Produktion von Nickel-Cadmium-Akkumulatoren in Europa kaum weitere nennenswerte Einsatzfelder, so dass ein Verbot, wie es im derzeitigen Entwurf für die neue Europäische Batterierichtlinie vorgesehen ist, erhebliche Auswirkungen auf den Cadmiumeintrag in die Umwelt haben wird. Eine Bilanzierung von Cadmium in Batterien zeigt, dass im Bereich der Gerätebatterien ein Verbot der einzige sichere Weg zu sein scheint, Umweltbelastungen durch diese Batterien im Hausmüllstrom zu vermeiden, da in diesem Segment hohe Rücknahmequoten und damit nahezu geschlossene Stoffkreisläufe nicht erreichbar scheinen. Günstiger sieht es in Teilbereichen der Industrieakkumulatoren aus, wo teilweise von Rücknahmequoten von über 90 % ausgegangen wird. Im Forschungsvorhaben konnte aufgrund der derzeit eingeschränkten Datenlage dieser hohe Wert nicht bestätigt werden; es bleibt abzuwarten, ob durch die novellierte Batterieverordnung, die explizit auch für diesen Bereich die Erstellung von Erfolgskontrollberichten fordert, aufschlussreichere Daten bereitgestellt werden können. Anderenfalls erscheint auch hier ein Verbot erforderlich. Im vorliegenden Bericht werden verschiedene Instrumente wie Anwendungsverbote, freiwillige Selbstverpflichtungen, Ökosteuern, Pfandregelung etc. zum „Phase-Out“ von Cadmium, die Konsequenzen des Verbots sowie ggf. verbleibende Senken erörtert.

Im Bereich der **Bleistarterbatterien** bestehen seit langer Zeit etablierte Rücknahme- und Verwertungswege, da durch ihr Recycling nicht nur Umweltbelastungen verringert werden können sondern auch ökonomische Vorteile zu erzielen sind. Mit der in der Batterieverordnung festgeschriebenen Pfandregelung für diese Batterien ist vermutlich eine leichte Erhöhung der mit über 90 % bereits sehr hohen Recyclingquote erreicht worden. Eine Abschätzung im Rahmen des Forschungsvorhabens bestätigt die stets in dieser Größenordnung bezifferte Recyclingquoten für Bleistarterbatterien. Es sind zahlreiche Anlagen zum Bleirecycling in Deutschland vorhanden, die über mehr als ausreichende Verwertungskapazität verfügen. Eine neuerliche Bewertung der Anlagen zur Blei-Säure-Batterie-Verwertung ist im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht erforderlich, da erst vor kurzer Zeit im Rahmen der Bestimmung „Bester Verfügbarer Techniken“ im Zuge der Umsetzung der IVU-Richtlinie der Europäischen Gemeinschaften die in Deutschland eingesetzten Techniken untersucht

worden sind und ein - im europäischen Kontext gesehen - generell hoher Qualitätsstand festgestellt werden konnte. Die Entwicklungen des Blei-marktes sind jedoch zu beobachten, da durch die Umstellung der Kfz-Bordnetze auf ein höheres Spannungsniveau die Zukunft der Blei-Säure-Starterbatterie und damit auch der Fortbestand der teilweise freiwilligen Strukturen zur Rücknahme und Verwertung in Frage gestellt sein kann.

Abschließend werden die entscheidenden Merkmale diskutiert, die ein Bericht über den Stand und Erfolg der Bemühungen zur Rücknahme und Verwertung verbrauchter Batterien in Deutschland an die Europäische Union aufweisen sollte. Es wird auf mögliche Schwierigkeiten der Datenerhebung und auf sinnvolle Ergänzungen zu den in den Monitoringberichten der Sammelsysteme erfassten Daten, die letztendlich die Basis des nationalen Berichtes bilden müssen, hingewiesen.

Letztendlich ist darauf hinzuweisen, dass während des Forschungsvorhabens und insbesondere zum Ende der Projektlaufzeit positive Veränderungen in der Bereitschaft verschiedener Unternehmen und Lobbyverbände zu verzeichnen waren, die Arbeiten durch Bereitstellung von Informationen sowie die gemeinsame Diskussion strittiger Punkte zu unterstützen.

Weiterer Forschungsbedarf wird in Deutschland für eine Reihe von Feldern gesehen:

- Zunächst ist hier die Neu- bzw. Weiterentwicklung leistungsfähiger, schadstofffreier und, nach Möglichkeit, recyclinggerechter Batteriesysteme zu nennen, da so ein Großteil der mit Batterien verbundenen Umweltprobleme von vorneherein umgangen werden kann.
- Im Bereich der Analyse und Bewertung von Mitverwertungsoptionen in der Eisen- und Stahlindustrie, wo aufgrund von Erfahrungen aus dem Ausland sowohl unter Mengen- als auch Kostengesichtspunkten aussichtsreiche Möglichkeiten gesehen werden, besteht in Deutschland drängender Handlungsbedarf. Hier erscheint insbesondere der Einsatz von metallurgischer/verfahrenstechnischer Simulation der betroffenen Prozesse zur technischen, ökologischen und wirtschaftlichen Bewertung entsprechender Verfahren sinnvoll, da so zum einen eine fundierte Datenbasis für die Entscheidungsträger bereits im Vorfeld von Betriebsversuchen oder dem großtechnischen Einsatz besteht und zum anderen die Einstellung optimaler Betriebsparameter erheblich erleichtert wird.
- Eine Bewertung der Verwertungsoptionen für Batterien sollte anhand der vorgeschlagenen Bewertungsmethodik durchgeführt werden, so-

bald eine belastbare, umfangreiche Datenbasis zu Verfügung steht und die Einberufung eines entsprechenden Expertenkreises mit guten Erfolgsaussichten möglich ist.

- Unter dem Gesichtspunkt einer Bewertung der mit Batterien verbundenen Stoffströme ist insbesondere die optimale Ausgestaltung der Logistik- und Verwertungssysteme von entscheidender Bedeutung. Zur Minimierung der Transportentfernungen zwischen Sammelstellen und Sortier- sowie Verwertungsanlagen sind beispielsweise Modelle zur optimalen Allokation von Sortieranlagen und zur Zuordnung sinnvoller Einzugsbereiche zu entwickeln.

11 Literaturverzeichnis

- [1] ACCUREC GmbH.:
*Verwertungsbilanz NiCd-Trockenzellen und
Verwertungsbilanz NiCd-Industrie-Accumulatoren*
Firmeninformation, 2000
- [2] ACCUREC GmbH.:
Verwertung von Nickel-Cadmium-Accumulatoren – Verfahrensbeschreibung
Firmeninformation 2000
- [3] AEA Technology plc.:
Recycling of Galvanic Cells
Patentschrift WO 99/34473
- [4] Aegerter, C.; Göhler, L.; Weber, R.:
Reinstquecksilber aus Abfällen
Recycling Magazin 24/1998, S. 20 ff.
- [5] ALD Vacuum Technologies AG:
Lagebericht 1999
- [6] Allen Bradley:
Beipackinformationen zu einer Lithiumbatterie
- [7] Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundesimmissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur
Reinhaltung der Luft - TA Luft) vom 27.02.1986,
in: GMBI, S. 95 ff., 1986
- [8] Altgeld, A.; Schneider, C.: *Steel 2000*; in: Thyssen Technische Berichte 24, Nr. 1, S. 1-21 (1992)
- [9] Ammann, P.:
Advantages of Pyrolysis in Recycling of Dry Batteries: The Recytec Process
in: R'95 Recovery Recycling Re-integration, Collected papers of the R'99 World Congress,
Genf, EMPA, 1995
- [10] Ammann, P.:
Economic Considerations of Battery Recycling Based on the Recytec Process
Journal of Power Sources, 1995, Band 57, Heft 1-2, S. 41 ff.
- [11] Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften vom 18. Mai 1990, C 122
- [12] Antenen, A.:
CITRON – A New Generation Of Recycling Plant
in: R'99 Recovery Recycling Re-integration, Collected papers of the R'99 World Congress,
Genf, Februar 2-5, EMPA, 1999
- [13] Arbeitsgemeinschaft Altauto:
Informationen zum Altautorecycling in der Bundesrepublik
URL: www.arge-altauto.de (zuletzt aufgerufen 3/2001)
- [14] Asamer-Becker Recycling GmbH:
AWG-Einreichungsplan – Fließbilder
Asamer-Becker Recycling GmbH, 1998
- [15] Asamer-Becker Recycling GmbH:
Internetauftritt des Unternehmens
URL: www.abrg.at (zuletzt aufgerufen 2/2001)
- [16] Asamer-Becker Recycling GmbH:
Persönliche Information, 4/2000
- [17] B.U.S AG:
Persönliche Information 3/2001 und 7/2001
- [18] B.U.S Berzelius Umwelt-Service AG
Geschäftsbericht 1999/2000
- [19] B.U.S. Zinkrecycling Freiberg GmbH:
Nachhaltige Entwicklung am Standort Freiberg
Firmeninformation 11/2000
- [20] Balzer, D.:
*Eintrag von Blei, Cadmium und Quecksilber in die Umwelt - Bilanzen über Verbrauch und
Verbleib - Band I Blei und Cadmium*
Forschungsbericht Nr. 106 01 047, Umweltbundesamt 1996

Literaturverzeichnis

- [21] Bätcher, K.; Böhm, E.:
Investigation into the effects of the planned legal restrictions with regard to the use, the circulation and substitution of cadmium in products
Forschungsbericht Nr. 104 08 320, Umweltbundesamt 1992
- [22] Bätcher, K.; Böhm, E.:
Untersuchungen über die Auswirkungen geplanter gesetzlicher Beschränkungen auf die Verwendung, Verbreitung und Substitution von Cadmium in Produkten
Forschungsbericht Nr. 104 08 320, Umweltbundesamt 1992
- [23] Bätcher, K.; Böhm, E.:
Zusammenfassende Darstellung des Kenntnisstandes zu Cadmiumstoffströmen in der Bundesrepublik
in: Enquete Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des Deutschen Bundestages (Hrsg.), Umweltverträgliches Stoffstrommanagement, Band 3, Bewertung
Economica Verlag 1995
- [24] Batrec Industrie AG:
Massenbilanz der Batrec AG 1999
Firmeninformation 5/2000
- [25] Battery technologies Inc.:
Worldwide battery market and the potential for RAM in Primary and single use sectors.
URL: <http://www.bti.ca/actual.htm>, (zuletzt aufgerufen 3/2001)
- [26] Bauer, K.H.; Grebe, K.; Lehmkuhler, H.J.; Vorwerk, H.; Rosenstock, H.G.; Schmauch, H.: *Aufarbeitung von Hüttenreststoffen nach dem Inmetco-Direktreduktionsverfahren*; in: Stahl und Eisen Nr. 7, S. 89-96, Düsseldorf (1990)
- [27] Baumann, W.; Muth, A.:
Batterien – Daten und Fakten zum Umweltschutz
Springer, 1996
- [28] BEBAT:
Het REVABAT-procédé
Internetauftritt der Organisation unter URL: <http://www.bebat.be>
zuletzt abgerufen 01/2001
- [29] Beck, M.:
Battery recyclers in search of low-cost processing
Recycling International, June 2001
- [30] Behnke, A. (Umweltbundesamt):
Geschlossene Stoffkreisläufe für Nickel-Cadmium-Akkus in Deutschland
Kurzvortrag im Rahmen eines Informationsaustausches mit Vertretern der Organisation CollectNiCad
- [31] Berger, M. (Nickel-Recycling GmbH):
Persönliche Information 5/2000
- [32] Besenhard, J. (Hrsg.):
Handbook of Battery Materials
Wiley VCH, Weinheim, 1999
- [33] Bleakney, R.:
Pyrometallurgical Battery Recycling at INMETCO
in: Proceedings of the International Congress for Battery Recycling, Montreux, May 2-4, 2001
- [34] Bluetooth:
The Official Bluetooth Website
URL: <http://www.bluetooth.com/bluetoothguide/faq/1.asp>
zuletzt aufgerufen 01/2001
- [35] Boffo, H. (L.S.I. Industrieelektronik):
Persönliche Information 1/2001
- [36] Bräutigam, A.; Fellmuth, P.:
Verwertung von Altbatterien
Müllhandbuch, 1998
- [37] Brodd, R.:
Recent developments in batteries for portable consumer electronics applications
in: The electrochemical society interface, Fall 1999

Literaturverzeichnis

- [38] Bündler, H.:
Frankfurter Allgemeine Zeitung vom Dienstag, 12. September 2000, Nr. 212, S. 27
- [39] Bundesministerium für Wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Hrsg.):
Umwelt-Handbuch, Arbeitsmaterialien zur Erfassung und Bewertung von Umweltwirkungen - Umweltkatalog, Umweltverträgliche Batterieentsorgung und -verwertung
Nachdruck 2000
- [40] Bundestagsdrucksache 14/4303 vom 12. Oktober 2000
- [41] Bundestagsdrucksache 14/4600 vom 15. November 2000
- [42] Burri, R.:
The Oxyreducer Technology – A New Process To Recycle Batteries
in: Proceedings of the 5th International Battery Recycling Congress, Deauville, September 27-29, 1999
- [43] Burri, R.; Weber, A.:
The Wimmis Project
Journal of Power Sources 57 (1995), S. 31-35
- [44] Buxmann, G.:
Industrial Inorganic Pigments
VCH-Verlag, 1993
- [45] Cerowski, U. (Robert Bosch GmbH):
Persönliche Information 5/2000
- [46] CHEMTEC:
Recycling Facility for Waste Batteries (Preliminary)
Firmenbroschüre, April 2001
- [47] CITRON AG:
4.th Quarter Report 1999
vom 24.02.2000
- [48] CITRON AG:
Persönliche Information 2/2000
- [49] CollectNiCad (European Economic Interest Grouping (in formation)):
Präsentation für die Generaldirektion Umwelt vom 22.05.2000
- [50] CollectNiCad
Nickel-Cadmium Batteries - Position Papers
CollectNiCad, Brüssel, Mai 2001
- [51] CollectNiCad:
Brief Overview of CollectNiCad
Internetauftritt des Verbandes
URL: <http://www.collectnicad.org> (zuletzt aufgerufen 3/2001)
- [52] CollectNiCad:
Ergebnisse eines Informationsaustausches zwischen CollectNiCad und Umweltbundesamt vom 28.Juni 2001
- [53] Constantinesco, L.-J.:
Rechtsvergleichung, Europarecht und Staatenintegration
Heymann 1983
- [54] Convention for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic:
Internetauftritt der Convention
URL: www.ospar.org (zuletzt aufgerufen 9/2001)
- [55] CRI Technology Services BV:
HSE Audit Report (28.06.2000)
Als PDF-File abrufbar unter: www.citron.ch
zuletzt abgerufen 01/2001
- [56] Dahl, W.(Hrsg.):
Eigenschaften und Anwendungen von Stählen, Band 2: Stahlkunde
Verlag der Augustinus Buchhandlung, Aachen 1993
- [57] David, J.:
Battery-Recycling 99
in: Proceedings of the 5th International Battery Recycling Congress, Deauville, September 27-29, 1999

Literaturverzeichnis

- [58] David, J.:
Persönliche Information 5/2001
- [59] Deininger, L. E.; Höhn, R. W.:
Emissionsminderung einer Bleihütte durch Ersatz der Sinter- und Schachtofenanlage mit einem QSL-Reaktor
Band I und II, Programm des Bundesministers für Umweltschutz, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Luftreinhaltung, Nr. 3050, Bonn, 10/1993
- [60] DeLuma Recycling GmbH:
Persönliche Information, 3/2000
- [61] Deutsche Exide GmbH:
Persönliche Information 9/2000
- [62] DIDIER-Werke AG (Hrsg.): Gesamtkatalog 1994/1995, Feuerfest-Produkte und Leistungen,
DIDIER-Werke AG, Wiesbaden 1994
- [63] DK Recycling und Roheisen GmbH:
Verwertung von Batterien im Hochofen der DK Recycling und Roheisen GmbH
Firmeninformaton 12/1999
- [64] Dorn, R.:
Effizienz umweltpolitischer Instrumente zur Emissionsminderung: technische und ökonomische Kriterien
Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1996
- [65] Draft proposal for a European Parliament and Council directive on batteries and accumulators Nr. 1/14. April 1999
- [66] Dreher, J.; Ripp, C.:
Studie zum Einsatz von Lithiumkobaltoxid in wiederaufladbaren Batterien
Fraunhofer Institut Chemische Technologie, Abt, Angewandte Elektrochemie, 1998
- [67] Edelhoff AG & Co:
Techem vertraut Edelhoff
Information der Edelhoff-Gruppe vom 06.04.2000, recherchierbar unter www.edelhoff.de (zuletzt aufgerufen 7/2000)
- [68] Eisenhütte Südwest, Arbeitsgemeinschaft für die Planung einer Demonstrationsanlage zur Verwertung eisenhaltiger Hüttenreststoffe:
Planung und Bau einer Demonstrationsanlage zur Verwertung eisenhaltiger Hüttenreststoffe, Vorläufiges Engineering und Sonderuntersuchungen; Schlussbericht, Nr. 7215.BA/102 - P 1.1/87 (PP 104), Band 1, Kommission der Europäischen Gemeinschaften (Hrsg.), (1989)
- [69] Eisenhütte Südwest, Arbeitsgemeinschaft für die Planung einer Demonstrationsanlage zur Verwertung eisenhaltiger Hüttenreststoffe:
Planung und Bau einer Demonstrationsanlage zur Verwertung eisenhaltiger Hüttenreststoffe, Vorläufiges Engineering und Sonderuntersuchungen; Schlussbericht, Nr. 7215.BA/102 - P 1.1/87 (PP 104), Band 2, Kommission der Europäischen Gemeinschaften (Hrsg.), (1989)
- [70] Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des Deutschen Bundestages (Hrsg.):
Verantwortung für die Zukunft – Wege zum nachhaltigen Umgang mit Stoff- und Materialströmen
Economica Verlag, 1993
- [71] Entsorgungsbetriebe Simmering GmbH:
Persönliche Information, 4/2000
- [72] Environmental Resources Management:
Analysis of the Environmental Impact and Financial Costs of a Possible New European Directive on Batteries (Executive Summary)
Department of Trade and Industry (UK), November 2000
- [73] Equey, J.-F.:
Recyemet: Our Experience in the Recycling of Spent Batteries
in: Proceedings of the 4th International Battery Recycling Congress, Hamburg, July 1-3, 1998
- [74] Erfolgskontrollberichte von Herstellern mit eigenem Rücknahmesystemen nach § 10 BattV; zur Verfügung gestellt durch die deutschen Bundesländer

Literaturverzeichnis

- [75] Europäische Kommission:
Draft Proposal for a EUROPEAN PALIAMENT AND COUNCIL DIRECTIVE .././EC of
on batteries and accumulators
Europäische Kommission, April 1999
- [76] Europäische Kommission:
Proposal for a Council Decision on behalf of the European Community of the 1998 Protocol to the 1979 Convention on Long Range Transboundary Air Pollution on Heavy Metals
Official Journal of the European Communities, 31.10.2000, S. C 311 E/136 ff. , Table 10 (E/155)
- [77] Europäischer Wirtschaftsdienst GmbH (EUWID):
Batterierecycling-Anlage in Wien in Betrieb
EUWID Recycling und Entsorgung Nr. 16 vom 18.04.2000, S. 23
- [78] Europäischer Wirtschaftsdienst GmbH (EUWID):
Batteriesortierung in Grevenbroich in Betrieb
EUWID Recycling und Entsorgung Nr. 21 vom 23.05.2000, S. 13
- [79] European IIPC Bureau:
Integrated Pollution Prevention and Control (IIPC)
Best Available Techniques Reference Document on the Production of Iron and Steel
European Commission, Directorate-General JRC, 1999
- [80] European IPPC Bureau:
Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC)
Reference Document on Best Available Techniques in the Non Ferrous Metals Industries
<http://eippcb.jrc.es>, May 2000
- [81] European Portable Battery Association (EPBA):
EPBA Position on the Proposed Prohibition of Nickel Cadmium Batteries
<http://www.epba-europe.org/docs/pos03.htm>
- [82] European Portable Battery Association (EPBA):
Tagungsband zur EPBA-Konferenz „*Battery Recycling in the Metals Industry*“, 26 Mai 2000, Brüssel
- [83] Ewers, U.:
Untersuchungen zur Cadmiumbelastung der Bevölkerung in der Bundesrepublik Deutschland
Verlag Erich Schmidt, 1990
- [84] Foulkes, E. C.(Hrsg.):
Handbook of Experimental Pharmacology, Vol. 80 – Cadmium
Springer-Verlag, 1986
- [85] Fowler, J.:
Recycling batteries within Shaft furnaces
in: Tagungsband zur EPBA-Konferenz „*Battery Recycling in the Metals Industry*“, 26 Mai 2000, Brüssel
- [86] Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen (IIS):
Bluetooth
http://www.iis.fhg.de/pwn/technology/bluetooth/index_d.html
zuletzt aufgerufen 01/2001
- [87] Freiherr von Oldershausen, N.:
Vfw-REBAT, a Privat, Profit-Orientated Battery Collection Corporation in the German Market for Spent Batteries
in: Proceedings of the 5th International Battery Recycling Congress, Deauville, September 27-29, 1999
- [88] Fricke, J. L., Knudsen, N.:
Entsorgung verbrauchter Gerätebatterien (Stand 03/2000)
Als PDF-File abrufbar unter: www.grs-batterien.de
zuletzt abgerufen 01/2001
- [89] Fricke, J; Kiehne, H.-A.:
Collection and Recycling of Spent Portable Batteries - the Actual Situation in Europe-
in: Telecommunication Energy Conference, 1999, INTELEC '99, 6-9 June 1999
- [90] Frieling, M. (EC DG ENV):
European Legislation on Batteries and Electrical and Electronic Waste
Vortragsunterlagen zur Tagung Batteries 2000, Paris, 28.-30. März 2000

Literaturverzeichnis

- [91] Friemann & Wolf Batterietechnik GmbH:
Persönliche Information 5/2000
- [92] Friwo Silberkraft, Duisburg:
Position Paper of FRIWO SILBERKRAFT, Duisburg, Regarding Prohibition of Nickel Cadmium Batteries and Cells Year 2008
Duisburg, 2000
- [93] Führ, M.; Gebers, B.; Roller, G.; Bizer, K.:
Ansätze für proaktive Strategien zur Vermeidung von Umweltbelastungen im internationalen Vergleich,
abgedr. in Enquete Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des Dt. Bundestages (Hrsg.), Umweltverträgliches Stoffstrommanagement, Band 2, Instrumente, Economica Verlag 1995
- [94] Gabske, V.; Meyer, U.:
Auf Spurensuche
Müllmagazin 1/2000
- [95] Galler, J.:
Lehrbuch Umweltschutz - Fakten, Kreisläufe, Maßnahmen
Landsberg 1999
- [96] Ganivet, C.:
6 Years Experience in Lithium Battery Recycling
in: Proceedings of the 5th International Battery Recycling Congress, Deauville, September 27-29, 1999
- [97] Ganivet, C.; Mellen, H.-J.:
Collection Conception and Sorting Solutions
in: Proceedings of the 3th International Battery Recycling Congress, Noordwijk Aan Zee, July 1-4, 1997
- [98] Ganivet, C.; Wiaux, J.-P.:
Incentives for Automated Spent Batteries Sorting
in: Proceedings of the OECD Workshop on the Effective Collection and Recycling of Nickel-Cadmium Batteries, Lyon, 23-25 September 97
OECD, Environment Directorate, 1999
- [99] GAZ Geräte- und Akkumulatorenwerk Zwickau GmbH:
Persönliche Information 5/2000
- [100] Geldermann, J.:
Entwicklung eines multikriteriellen Entscheidungsunterstützungssystems zur integrierten Technikbewertung
Fortschr.-Ber. VDI Reihe 16 Nr. 105, Düsseldorf: VDI Verlag 1999
- [101] Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien (GRS):
Bericht des Gemeinsamen Rücknahmesystems Batterien für das Jahr 1999
GRS, Hamburg, 2000
- [102] Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien (GRS):
Erfolgskontrolle 2000
GRS, Hamburg, 2001
- [103] Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien (GRS):
Fact Sheet No 4 / 2000
GRS, Hamburg, 2000
- [104] Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien (GRS):
Internetauftritt der Stiftung
URL: <http://www.grs-online.de> (zuletzt aufgerufen 2/2001)
- [105] Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien (GRS):
Persönliche Information 8/2000
- [106] Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien:
Entsorgungskostenbeiträge für Gerätebatterien
Anlage zum Nutzervertrag, gültig ab 01.01.2000
- [107] Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien:
GRS visiert „Zwischenlager Haushalt“ - Positive Bilanz: Batterierücknahme gesteigert.
Pressemitteilung 6/2000

Literaturverzeichnis

- [108] Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien:
Unentgeltliches Batterierücknahmesystem für die Industrie - GRS Batterien erweitert ihr Serviceangebot
Pressemitteilung 9/2000
- [109] Gesellschaft für Materialkreislauf und Abfallwirtschaft mbH & Co. KG
Internetauftritt des Unternehmens
URL: <http://www.gma-online.de>
(zuletzt abgerufen 10/2000)
- [110] Gesellschaft für Metallrecycling:
Firmeninformation 11/2000
URL: <http://www.gmr-leipzig.de> (zuletzt aufgerufen 11/2000)
- [111] Gesetz zum Schutz vor gefährlichen Stoffen (Chemikaliengesetz - ChemG)
in der Fassung vom 25. Juli 1994
(BGBl. I 1994 S. 1703; 1994 S. 1963; 1994 S. 2705; 1997 S. 1060; 1998 S. 969)
- [112] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz - KrW-/AbfG) vom 27. September 1994
(BGBl. I 1994 S. 2705; 1998 S. 2455)
- [113] GLOBAL LABELING INTERNATIONAL, Ltd.:
Japanese color code
URL: <http://www.gli-ltd.com/ccode.htm> (zuletzt aufgerufen 3/2000)
- [114] Grund, S. (Initiative Zink in der Wirtschaftsvereinigung Metalle):
Persönliche Information 2/2001
- [115] GSB Sonderabfall-Entsorgung Bayern GmbH:
Persönliche Information 1/2001
- [116] Gudenau, H.W. et al.:
Eisenhüttenmännische Verfahrenstechnik, Vom Erz zum Stahl
Materialsammlung zum Praktikum; Institut für Eisenhüttenkunde der RWTH Aachen (1989)
- [117] Günther, C. (CITRON SA):
Recycling von Abfällen im Citron-Prozess
Vortrag im Rahmen der Rohstoff- und Metalltage 2000, 20.06.00, Clausthal
- [118] Habashi, F. (Edit.):
Handbook of Extractive Metallurgy, Volume II
Kapitel 12 (Nickel) und 16 (Cadmium)
Verlag Wiley-VCH, 1997
- [119] Hake, M.:
Collection situation in Europe – portable rechargeable battery focus
in: Proceedings of the 5th International Battery Recycling Congress, Deauville, September 27-29, 1999
- [120] Hamm, M.; Quade, U.:
Auslaufmodell Quecksilber
Chemie Produktion, November 2000, S. 330 f.
- [121] Handelsblatt:
Börse: Kursliste Rohstoffe
URL: <http://www.handelsblatt.com> (zuletzt aufgerufen 01/2001)
- [122] Hanewald, R.; Pohl, U.:
Metal Recovery from Iron and Steelmaking Residues Using the Inmetco Process; in: Abstract zum Vortrag, UN-ECE Seminar, Düsseldorf (1995)
- [123] Hanewald, R.; Schweers, J.; Liotta, J.:
Recycling Nickel-Cadmium Batteries through the High Temperature Metal Recovery Process and New Cadmium Recovery Facility
Battery Conference on Applications and Advances, Eleventh Annual, 1996, S. 207-212, 1996
- [124] Harp, G.; Klima, R.; Steffen, R.:
Untersuchung und Bewertung der Einsatzmöglichkeiten verschiedener Verfahren zur Aufbereitung von Hüttenwerksrest- und -abfallstoffen
Betriebsforschungsinstitut (BFI) des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute, Düsseldorf (1990)
- [125] Hawker GmbH (vormals VHB-Industriebatterien GmbH):
Persönliche Information 6/2000

Literaturverzeichnis

- [126] Heinen, K.-H. (Hrsg.): *Elektrostahlerzeugung*, 4. Auflage, Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf 1997
- [127] Heinrich, P.; Schubert, M.: *Ministahlwerke und neuere Entwicklungen bei Gleichstrom-Lichtbogenöfen* in: *Stahl und Eisen* 115, Nr. 5, S. 47-53, Düsseldorf (1995)
- [128] Hennig, M.; Lehmkuhler, H. J.: Thermische Aufbereitung metallischer Hüttenreststoffe mit Hilfe des Inmetco-Direktreduktionsverfahrens; in: Agst, J. (Hrsg.): *Dritte Duisburger Recycling-Tage*, S. 139-156, U. Agst, Moers (1988)
- [129] Hester, E.:
Industry Corner: The U.S. Market for Primary and Secondary Batteries
in: *Business Economics*, Band 34, Heft 2 (April 1999)
- [130] Hiller, F.:
Die Batterie und die Umwelt
expert-Verlag, 1990
- [131] Hiller, F.; Giercke, R.; Kiehne, H.-A.:
Entsorgung von Gerätebatterien
3., verbesserte und aktualisierte Auflage, expert-Verlag, 1998
- [132] HIM Hessische Industriemüll GmbH
Persönliche Information 1/2001
- [133] Hong-jie, L.; Masanori, T.:
Thermodynamic Simulation Analysis of Ironmaking Processes
in: *Proceedings of „The First International Congress of Science and Technology of Ironmaking“*, ISIJ, Sendai 1994
- [134] Hoppecke Batterie Systeme:
Persönliche Information 5/2000
- [135] Hurd, D. J.; Muchnick, D. M.; Schedler, M. F.; Mele, T.:
Recycling of Consumer Dry Cell Batteries
Noyes Data Corporation, 1993
- [136] ICM AG:
Tagungsband zum „*International Congress for Battery Recycling*“, Montreux, 2001
- [137] Institut für Metallhüttenwesen und Elektrometallurgie der TU Clausthal
Einführung in das Hüttenwesen
Skript zur Vorlesung, Clausthal, 1990
- [138] Institut für Umweltechnologie und Umweltanalytik e.V.:
Bundesweite Ist-Analyse der Sammlung und Entsorgung von Problemstoffen aus privaten Haushalten/Kleingewerbe zur Entwicklung von Konzepten für ein optimiertes Entsorgungsvorgehen
Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben FZK 1471009, BMBF
Duisburg, 1998
- [139] International Cadmium Association:
The contribution of Portable Nickel-Cadmium batteries to the flow of cadmium into the environment
Brüssel, April 2001
- [140] International Lead Zinc Study Group:
Lead and Zinc Statistics
URL: <http://www.ilzsg.org>, Letzte Datenaktualisierung 11.01.2001
- [141] Jaksch, H.-D.:
Batterie-Lexikon
Pflaum Verlag, 1993
- [142] Jasinski, S. M.:
The Material Flow of Mercury in the United States
United States Department of the Interior, Bureau of Mines Information Circular/1994
- [143] Johansson, L. E.:
The SAFT Recycling Process with Respect to Industrial Nickel-Cadmium Batteries
in: *Proceedings of the OECD Workshop on the Effective Collection and Recycling of Nickel-Cadmium Batteries*, Lyon, 23-25 September 97
OECD, Environment Directorate, 1999

Literaturverzeichnis

- [144] Jury Umweltzeichen:
Grundlage für Umweltzeichenvergabe: Wiederaufladbare Alkali/Mangan-Batterien
RAL-UZ 92, Ausgabe Juli 1998
- [145] Kaufmann M.; von Schulthess, C.; Ziegler, M.:
Cadmium Stoffflussanalyse
Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern, 1997
- [146] Kettle, A. (Sorbat S.A.):
Persönliche Information 5/2000
- [147] Kiehne, H.-A.:
Collection and Recycling of Ni-Cd Batteries in Germany
in: Proceedings of the OECD Workshop on the Effective Collection and Recycling of Nickel-Cadmium Batteries, Lyon, 23-25 September 97
OECD, Environment Directorate, 1999
- [148] Klammer, H.; Krebs, A.:
Recycling von Batterien und anderen Hg-haltigen Abfällen
in: Agst, J. (Hrsg.): Achte Duisburger Recycling-Tage, Mores 1998, S. 146 ff.
- [149] Klepper, G.; Michaelis, P.; Mahlau, G.:
Industrial Metabolism – A Case Study of the Economics of Cadmium Control
in: Siebert, H. (Hrsg.): Kieler Studien, Mohr, Tübingen, 1995
- [150] Knudsen, N. (GRS):
Persönliche Information 2/2001
- [151] Kommission der Europäischen Gemeinschaften
Geänderter Vorschlag für eine Entscheidung des Europäischen Parlaments und des Rates zur Festlegung der Liste prioritärer Stoffe im Bereich der Wasserpolitik
2000/0035 (COD), Brüssel, 16.01.2001
- [152] Konsolidierte Fassung der Batterieverordnung vom 02. Juli 2001
BGBl. I Seite 1486
- [153] Korfmacher, H.(EPBA, Duracell):
Persönliche Information 3/2001
- [154] Korthauer, R. (Fachverband Batterien im ZVEI):
Verbleib von Gerätebatterien in Deutschland
Persönliche Information, 1/2000 + 10/2001
- [155] Kraftfahrt-Bundesamt:
Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeiganhängern nach Fahrzeugarten sowie Zahl der Kraftfahrzeuge je 1000 Einwohner 1996 - 2000 in Deutschland
Statistische Mitteilungen des Kraftfahrt-Bundesamtes, Reihe 1, Heft 9/2000, Flensburg 2000
- [156] Kraftfahrt-Bundesamt:
Löschungen an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeughängern nach Bundesländern und BRD gesamt
Statistische Mitteilungen des Kraftfahrt Bundesamtes, Reihe 1, Heft 6/2000, Flensburg 2000
- [157] Kraftfahrt-Bundesamt:
Persönliche Information 2/2001
- [158] Krebs, A. (Batrec Industrie AG):
Persönliche Information 11/2000
- [159] Krebs, A.:
Provocation
in: Proceedings of the 4th International Battery Recycling Congress, Hamburg, July 1-3, 1998
- [160] Krebs, A.:
Batrec Industry
in: Proceedings of the 5th International Battery Recycling Congress, Deauville, September 27-29, 1999
- [161] Krebs, A.:
Das Wimmis-Projekt der Batrec AG
Unternehmensinformation Batrec AG, Stand November 2000

Literaturverzeichnis

- [162] Krebs, A.:
Waste Management by Batrec AG
in: Proceedings of the 3th International Battery Recycling Congress,
Noordijk Aan Zee, 1997
- [163] Krebs, A; Klammer, H. (BATREC Industrie AG):
Persönliche Information 1/2001
- [164] Kuck, P. H.:
Nickel
in: Minerals Yearbook, Volume I.- Metals and Minerals,
U.S. Geological Survey, aktuelle Jahrgänge
- [165] L.S.I. Industrieelektronik:
Internetauftritt des Unternehmens
URL: <http://www.lsi-elektronik.de> (zuletzt aufgerufen 3/2001)
- [166] Lain, M. J.:
Recycling of Lithium Ion Cells and Batteries
in: Proceedings of the 5th International Battery Recycling Congress, Deauville, September 27-
29, 1999
- [167] Lamm, K. F.:
Secondary Lead
Erzmetall, Heft 6, 1998, S. 438-455
- [168] Lemann, M.; Walder, R.; Schwyn, A.:
Heavy Metals in MSWI-Residues
in: Proceedings of the 1st International Battery-Recycling Congress, Lucerne 1995
- [169] Lithium Sonnenschein GmbH:
Persönliche Information 2/2000
- [170] Llewellyn, T. O.:
Cadmium (Materials Flow)
US Department of Interior, Bureau of Mines Information Circular 1994
- [171] Logico:
Intelligent Smartcard Solutions
URL: http://www.logico.net/smartcard_1.htm
zuletzt aufgerufen 01/2001
- [172] Lukschanderl, L.:
Batterieentgiftung im Drehrohrofen
Umweltschutz, Wien (3), 2000, S. 30 f.
- [173] M.I.M. Hüttenwerke Duisburg GmbH:
Persönliche Information 3/2000
- [174] Mager, K.; Meurer, U. ; et al.:
*Recovery of Zinc Oxide from Secondary Raw Materials : New Developments of the Waelz
Process*
in: Proceedings of the "Forth International Symposium on Recycling of Metals and Engineered
Materials" TMS, 2000, S. 329 ff.
- [175] Melber, A.:
Batterierecycling in Deutschland
in: Ina Schwabe (Hrsg.): Begleittexte zum Entwicklerforum „Batterien, Ladekonzepte &
Stromversorgungsdesign“ 31. März 1998, München
- [176] Metaleurop Weser Zink GmbH, Nordenham
Persönliche Information 3/2000
- [177] Michaelis, P.:
Ökonomische Aspekte der Abfallgesetzgebung
in: Siebert, H. (Hrsg.): Kieler Studien, Mohr, Tübingen, 1993
- [178] Ministere van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer:
Cadmium, kwik en lood in uit Azie geïmporteerde batterijen
Distributiecentrum VROM, Nr.: 17254/184, Juli 2000
- [179] Moltech Power Systems
Produktinformationen zu NiMH-Akkumulatoren, März 2001

Literaturverzeichnis

- [180] Money, K. L.; Griffin, K. J.; Bleakney, R. R.:
The Collection and Processing of Spent Ni-Cd-Batteries in North America and Inmetco's Role
in: Proceedings of the 5th International Battery Recycling Congress, Deauville, September 27-29, 1999
- [181] Morrow, H. (President, International Cadmium Association):
Persönliche Information, 1999, zitiert nach [224]
- [182] Morrow, H.; Keating, J.:
Overview Paper on Effective Recycling of Ni-Cd Batteries
in: Proceedings of the OECD Workshop on the Effective Collection and Recycling of Nickel-Cadmium Batteries, Lyon, 23-25 September 97
OECD, Environment Directorate, 1999
- [183] N.N.:
Alkaline und Co.
in: ELRAD 1996, Heft 12
- [184] N.N.:
Batterien und Akkus: Umsatzprognose.
in: Industrieanzeiger 12/2000
- [185] N.N.:
42 Volt vehicles are set to roll in just 24 month but will lead acid be involved?
Batteries International, Greyshott, Band 2001, Heft 46, S. 11
- [186] N.N.:
Batterierücknahme: Wettbewerb durch Auslegung?
UmweltMagazin, Mai 1999
- [187] N.N.:
Bell companies get behind SAFT's NiCd range
Batteries International, Greyshott, Band 2001, Heft 46, S. 11
- [188] N.N.:
Bluetooth-Chip in der Batterie
in: Elektronik 49 (2000), Nr. 11
- [189] N.N.:
Einer für alle
in: test 7/2000
- [190] N.N.:
Erstmals mehr Handys als Festnetz-Anschlüsse
in: Handelsblatt, 09.01.2001
- [191] N.N.:
Getting the big picture
in: Batteries International, Greyshott, Band 2000, Heft 43, S. 113 ff.
- [192] N.N.:
Hg im Griff
UmweltMagazin, Oktober 1999, S. 56
- [193] N.N.:
Hochstromfähige NiM-Hybrid-Akkus
Markt&Technik, Nr. 34/ 20.08.1999
- [194] N.N.:
Key patent granted to Electrosorce
in: Batteries International, July 2000
- [195] N.N.:
Lithium-Polymer power Bluetooth-Anwendungen
Markt&Technik, Nr. 19/ 05.05.2000
- [196] N.N.:
Miniatur-Brennstoffzellen für portable Anwendungen
Markt&Technik, Nr. 44, 17.10.2000, S. 40 ff.
- [197] N.N.:
Need for small rechargeable batteries surges on with market growth
in: Journal of the Electronics Industry, February 2000

Literaturverzeichnis

- [198] N.N.:
Neues von Akkus und Batterien
Elektor 2/2000
- [199] N.N.:
Ohne Batterien geht es nicht
in: Markt & Technik Nr. 20, 12.5.2000
- [200] N.N.:
Quecksilber: Recycling gewinnt an Bedeutung
Recycling Magazin 5/1998
- [201] N.N.:
Rechargeables: Why not a bigger success?
The Grocer, September 11, 1999, S. 57
- [202] N.N.:
Rücknahme von Altakkus aus Elektrowerkzeugen
in: Industrieanzeiger 11/99, S. 14
- [203] N.N.:
Sanyo will mehr Akkus für Handys herstellen
in: Handelsblatt, 10.01.2001
- [204] N.N.:
Screwing your way out of trouble
Batteries International, Greyshott, Band 1999, Heft 38, S. 41-47
- [205] N.N.:
Surprise ban hits NiCd in EV market
Batteries International 2000, Band 2000, Heft 44, S. 10
- [206] N.N.:
The grocer focus on batteries
The Grocer, September 11, 1999, S. 45-48
- [207] N.N.:
Wettkampf um die höchste Spannung
in: Industrieanzeiger 14/2000
- [208] N.N.:
ZEVs help to boost US battery work
in: Batteries International, October 2000
- [209] N.N.:
Zusammenschluss von Batteriefirmen
Tagesanzeiger (Schweiz) vom 04.02.1999
- [210] N.N.:
Zweite Chance für Lithium-Polymer
Markt&Technik, Nr. 40/ 29.09.2000
- [211] NIREC Recycling GmbH:
Firmenbroschüre, ohne Datum
- [212] Noréus, D.:
Substitution of rechargeable NiCd batteries - A background document to evaluate the possibilities of finding alternatives to NiCd batteries
Arrhenius Laboratory, Stockholm University, August 2000,
<http://europa.eu.int/comm/environment/waste/nicd.htm> (zuletzt aufgerufen 4/2001)
- [213] OECD Environment Monograph Series No. 103:
Risk Reduction Monograph No. 4: Mercury
OECD, Environment Directorate, Paris, 1995
- [214] OECD Environment Monograph Series No. 104:
Risk Reduction Monograph No. 5: Cadmium
OECD, Environment Directorate, Paris, 1994
- [215] OECD Proceedings:
Sources of Cadmium in the Environment
OECD, 1996
- [216] OekoConsult GmbH:
Behandlungsgrundsätze für Batterien und Akkumulatoren
Studie für das Umweltbundesamt (Österreich), Wien 12/2000

Literaturverzeichnis

- [217] OSPAR:
Ministertreffen der OSPAR-Kommission, Sintra, 22.-23. Juli 1998
Bericht recherchierbar unter URL: <http://www.ospar.org>
- [218] ots Ad hoc-Service:
Varta beabsichtigt Werkschließung in Hagen
ots Ad hoc-Service vom 24.03.2000
- [219] Pape Entsorgung GmbH & Co. KG:
Persönliche Information 3/2001
- [220] Patentschrift:
Verfahren zum Lösen der Wirkstoffe von Alkali-Metall-Batterien
Deutsche Patentamt, DE 44 19 695 C 1, Bundesdruckerei 6/95
- [221] Pawlek, F.:
Metallhüttenkunde
de Gruyter, 1983
- [222] Picard, L.:
The VALDI Process
in: Tagungsband zur EPBA-Konferenz „Battery Recycling in the Metals Industry“, 26 Mai 2000, Brüssel
- [223] Pillot, C.:
Batteries 2000 – The battery market and its main applications 1999 – 2004
in: Tagungsband zu „Batteries 2000“, 28.-30. März 2000, Paris
- [224] Plachy, J.:
Cadmium
in: Minerals Yearbook, Volume I.- Metals and Minerals,
U.S. Geological Survey, 2000
- [225] Plieth, W.:
Die Wiederaufarbeitung von Batterien – Ein Beispiel für die Rezyklisierung von Industrieprodukten
in: Naturwissenschaften 81, Springer-Verlag 1994, S. 293-299
- [226] Pope, P. G.:
The Future Potential for Battery Recycling in Europe
in: Tagungsband zur EPBA-Konferenz „Battery Recycling in the Metals Industry“, 26 Mai 2000, Brüssel
- [227] Pressemitteilung Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit vom 16. Oktober 2000
recherchierbar unter: <http://www.bmu.de/presse>
- [228] Pressemitteilung Nokia vom 05.01.2001
recherchierbar unter: URL: <http://www.nokia.de/presse/pressemitteilungen>
- [229] R. Hikmet:
New lithium-ion polymer battery concept for increased capacity
in: Journal of power sources 92 (2001), pp. 212-220
- [230] Rahbeck, L.:
Present and Future Collection of Batteries in Denmark
in: Proceedings of the 5th International Battery Recycling Congress, Deauville, September 27-29, 1999
- [231] Rauhut, A.:
Eintrag von Blei, Cadmium und Quecksilber in die Umwelt - Bilanzen über Verbrauch und Verbleib - Band II Quecksilber
Forschungsbericht Nr. 106 01 047, Umweltbundesamt 1996
- [232] Rausch, S. (Uni-cyc):
Persönliche Information 2/2000
- [233] Rausch, S.:
Sorting of spent batteries by a fast X-ray-technique in the SORBAREC-process
in: Proceedings of the 4th International Battery Recycling Congress, Hamburg, July 1-3, 1998
- [234] Rebeaux, D., Nicolet, M.:
Pyrometallurgic Process of Recycling at VALDI
in: Proceedings of the International Congress for Battery Recycling, Montreux, May 2-4, 2001

Literaturverzeichnis

- [235] REDUX GmbH:
Persönliche Information 5/2000
- [236] Rehbinder, E.:
Konzeption eines in sich geschlossenen Stoffrechts
abgedr. in: Enquete Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des 12. Dt. Bundestages (Hrsg.), Umweltverträgliches Stoffstrommanagement, Band 2, Instrumente, Economica Verlag 1995
- [237] Rentz, O.; Geldermann, J.; Jahn, C.; Spengler, T.:
Vorschlag für eine medienübergreifende Bewertungsmethode zur Identifikation der „Besten Verfügbaren Techniken“ BVT im Rahmen der Arbeiten der Europäischen Kommission
Bericht im Rahmen des Forschungsvorhaben Nr. 10905006, Umweltbundesamt 1998
- [238] Rentz, O.; Hähre, S.; Jochum, R.; Geldermann, J.; Krippner, M.; Jahn, C.; Spengler, T.; Schultmann, F.:
Exemplarische Untersuchung zum Stand der praktischen Umsetzung des integrierten Umweltschutzes in der Metallindustrie und Entwicklung von generellen Anforderungen
Bericht zum Forschungsvorhaben Nr. 29694006, Umweltbundesamt 1999
- [239] Rentz, O.; Püchert, H.; Penkuhn, T.; Spengler, T.:
Stoffstrommanagement in der Eisen- und Stahlindustrie, Konkretisierung des § 5 Abs. 1 Nr. 3 BImSchG;
Bericht des Umweltbundesamtes 5/96, Erich Schmidt Verlag, Berlin (1996)
- [240] Rentz, O.; Schultmann, F.; Spengler, T.; Sieverdingbeck, A.; Engels, B.:
Prozeßintegrierte Umweltschutzmaßnahmen in der Eisen- und Stahlindustrie -Teil 2-
Abschlußbericht zum gleichnamigen BMBF-Forschungsvorhaben, FKZ: 01RV9701, Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion, Karlsruhe, Dezember, 1999
- [241] Rethmann-Gruppe:
Verfahrensbeschreibung VTR-Verfahren, 1999
- [242] Rheinzink GmbH, Datteln
Persönliche Information 3/2000
- [243] Richtlinie 2000/53/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 18. September 2000 über Altfahrzeuge
- [244] Richtlinie 75/442/EWG des Rates vom 15. Juli 1975
- [245] Richtlinie 91/156/EWG des Rates vom 18. März 1991
- [246] Richtlinie 91/157/EWG des Rates vom 18. März 1991
- [247] Richtlinie 93/86/EWG der Kommission vom 4. Oktober 1993
- [248] Richtlinie 98/101/EG der Kommission vom 22. Dezember 1998
- [249] Riezenman, M. J.:
Fuel Cells for the Long Haul, Batteries for the Spurts
IEEE SEPCTRUM, January 2001, S. 95 ff.
- [250] Robert Bosch GmbH (Recyclingzentrum Elektrowerkzeuge):
Erfolgskontrolle gemäß § 10 Batterieverordnung
Kalefeld, März 2001
- [251] Robert Bosch GmbH, Recyclingzentrum Willershausen
Persönliche Information 1/2000
- [252] Robert Bosch GmbH:
Erfolgskontrollbericht 1999
Willershausen, 2000
- [253] Ruhrzink GmbH, Datteln
Persönliche Informationen 3/2000
- [254] S.N.A.M.:
Firmeninformation, recherchierbar unter
URL: <http://www.snam.com> (zuletzt aufgerufen 11/2000)
- [255] SAB DART ID Committee Draft:
Evidence on Developmental and Reproductive Toxicity of Cadmium
Reproductive and Cancer Hazard Assessment Section,
Office of Environmental Health Hazard Assessment,
California Environmental Protection Agency, 1996

Literaturverzeichnis

- [256] SAFT AB:
Recycling of industrial Ni-Cd batteries
Firmeninformation 11/1999
- [257] Salzgitter AG:
Persönliche Information 1999
- [258] SANYO:
Transfer to SANYO Electric Co., Ltd of Toshiba Group's Nickel Metal Hydride Battery Business Complete
Pressemitteilung vom 27.04.2001
recherchierbar unter: URL: www.sanyo.co.jp
- [259] Sassen, K.-J. (DK Recycling und Roheisen GmbH)
Persönliche Information 2/2001
- [260] Sattler, H.-P.:
See the Label - Know the Type, a New Sorting Technique for Spent Batteries
in: Proceedings of the 4th International Battery Recycling Congress, Hamburg, July 1-3, 1998
- [261] SBW Sonderabfallentsorgung Baden-Württemberg GmbH:
Persönliche Information 1/2001
- [262] Schäfer, M. (GMA):
Batteriesortierung zur Verwertung, eine Herausforderung
Handout zum Vortrag im Rahmen des Forums „Ein Jahr Batterierücknahme“ der GRS, Hamburg, 1999
- [263] Schäfer, M. (GMA):
Persönliche Information 2/2000
- [264] Schäfer, M. (GMA):
Persönliche Information 2/2001
- [265] Schröter, S.:
Toxikologie des Kadmiums
Verlag Kohlhammer, 1996
- [266] Schultmann, F.; Engels, B.; Rentz, O.:
Planung von Logistiksystemen für die Verwertung von Batterien
in: Inderfurth, K.; ... (Hrsg.): *Logistik 2000plus: Herausforderungen, Trends, Konzepte*, LOGISCH GmbH, Magdeburg, 2000
- [267] Schutz B.:
Economical Aspects of Battery Recycling - The Citron Experience
in: Proceedings of the International Congress for Battery Recycling, Montreux, May 2-4, 2001
- [268] Schwab, B.:
The Imperial Smelting Furnace for the Recycling of Zinc Containing Batteries
in: Proceedings of the 4th International Battery Recycling Congress, Hamburg, July 1-3, 1998
- [269] Schwab, B.:
New ways for economical and ecological battery recycling based on first operating results
in: Proceedings of the 5th International Battery Recycling Congress, Deauville, September 27-29, 1999
- [270] Scrosati, B.:
Development of portable battery market
in: Proceedings of the 5th International Battery Recycling Congress, Deauville, September 27-29, 1999
- [271] Seki, K.:
Market Trend of Portable Rechargeable Batteries
NEC Research & Development 1/2000
- [272] Sempels, R. (International Cadmium Association):
The Voluntary Agreement for the collection and recycling of Ni-Cd batteries
in: Proceedings of the 5th International Battery Recycling Congress, Deauville, September 27-29, 1999
- [273] Simon, W.:
Unternehmensstrategien zur Beeinflussung der Angebotselastizität auf Nebenmetall-Märkten
Dissertation, RWTH Aachen, 1994

Literaturverzeichnis

- [274] Sojka, R.:
Innovative Recycling Technologies for Rechargeable Batteries
in: Proceedings of the 4th International Battery Recycling Congress, Hamburg,
July 1-3, 1998
- [275] Statistisches Bundesamt:
Außenhandelsstatistik 2001
- [276] Statistisches Bundesamt:
Persönliche Information 3/2001
- [277] Statistisches Bundesamt:
Produktion 2001
- [278] Steil, H.-U.:
Stand der Technik beim Recycling von Blei-Batterien
in: Augst, J. (Hrsg.) Achte Duisburger Recycling-Tage, S. 135 -144
- [279] Stober, R. (Hrsg.):
Wichtige Umweltgesetze für die Wirtschaft
5., erw. Aufl., Herne [u.a.] : Verl. Neue Wirtschafts-Briefe, 1996
- [280] Stober, R.:
Wirtschaftsverwaltungsrecht
Kohlhammer, Stuttgart 1996
- [281] Stotz, D.:
Batterien wieder aufladen.
In: Elektronik, Heft 19/98, Seite 62 - 68
- [282] Suck, A.:
Chances and Limits of Environmental Agreements in Waste Management Policy in Germany
CAVA (European Research Network on Voluntary Approaches for Environmental Protection)
Working Paper no 2000/2/17
- [283] Telefonische Umfrage bei Betreibern von Sonderabfalldeponien in Baden-Württemberg
DFIU 2001
- [284] Telefonische Umfrage bei Herstellern von Elektrowerkzeugen
DFIU 2000
- [285] TOXCO Inc.
The Lithium Battery Recyclers
Internetauftritt des Unternehmens unter: URL: <http://www.toxco.com>
- [286] Trienekens AG:
Firmeninformation anlässlich der Inbetriebnahme der automatischen Batteriesortieranlage im
Zerlegezentrum Grevenbroich am 12.05.00
- [287] Trienekens AG:
Firmenvideo: Batteriesortierung, (Produktionsdatum nicht angegeben)
- [288] Trueb, L. F.; Rüetschi, P.:
Batterien und Akkumulatoren – Mobile Energiequellen für heute und morgen
Springer Verlag, 1998
- [289] U.S. Department of the Interior:
Mineral Commodity Summaries 2000
<http://minerals.usgs.gov/minerals>
- [290] Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry:
Kapitel: Cadmium and Cadmium Compounds
Sixth Edition, Electronic Release, 1999
- [291] Umweltbundesamt (Hrsg.):
Handbuch der Sanierung von quecksilberkontaminierten Altlasten
Endbericht des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens „Modellhafte Sanierung von Altlasten
am Beispiel eines vorwiegend quecksilberkontaminierten Industriestandortes“, gefördert durch
das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Förderkennzeichen: 14907744,
1998
- [292] Umweltbundesamt (Österreich):
In Österreich eingesetzte Verfahren zur Dioxinminderung
Monographien, Band 116, M-116, Wien 2000

Literaturverzeichnis

- [293] Umweltbundesamt (Schmitz, S.; Oels, H.-J.; Tiedemann, A.):
Ökobilanz für Getränkeverpackungen
UBA-Texte 52/95, Berlin 1995
- [294] Umweltbundesamt: *Batterien - neue Fakten und Trends*.
URL: <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-daten/daten/battrend.htm>, (zuletzt aufgerufen 11/2000)
- [295] Umweltbundesamt: *Batterien und Akkus*.
URL: <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-daten/daten/batterien.htm>, (zuletzt aufgerufen 11/2000)
- [296] Umweltbundesamt:
Abschätzung der Anzahl an NiCd-Akkus, die „versteckt“ über Importgeräte in die Bundesrepublik Deutschland gelangen
UBA-interner Bericht, 3/1998
- [297] Umweltbundesamt:
Handlungsfelder und Kriterien für eine vorsorgende nachhaltige Stoffpolitik am Beispiel PVC
Erich Schmidt Verlag, 1999
- [298] Umweltforum Batterien:
Internetauftritt der Interessensgemeinschaft
URL: <http://www.batteriensammeln.at> (zuletzt aufgerufen 2/2001)
- [299] Umweltrat:
Kurzfassung des Umweltgutachten 2000
URL: <http://www.umweltrat.de>
- [300] Uni-cyc:
Fließbild und Kurzbeschreibung einer Röntgen-SORBAREC-Sortieranlage
Firmeninformation 1/2001
- [301] VARTA AG:
Bleirecycling ist immer noch lohnenswert
in: *Recycling Magazin* 53, Nr. 4, S.23, Elsevier Verlag, Gräfelfing, 1998
- [302] VARTA AG:
Geschäftsbericht 1999
- [303] VARTA AG:
Persönliche Information 1/2001
- [304] VARTA:
Allgemeine Fragen über nicht wiederaufladbare Gerätebatterien (Primärbatterien)
URL: <http://www.varta.de/?knowhow/100quest/100-005.html>
zuletzt aufgerufen am 22.11.2000
- [305] Vassart, A. (Erachem Europe SA):
Persönliche Information 5/2001
- [306] Vassart, A.:
Chemical Valorization of Mn & Zn from Primary Batteries: A Key to Achieve high Recycling Rates and to Complete the Recycling Loop
in: *Proceedings of the International Congress for Battery Recycling*, Montreux, May 2-4, 2001
- [307] Vassart, A.; Bauduin, M.:
Recycling of Primary Used Batteries: The Belgian Experience
in: *Proceedings of the 5th International Battery Recycling Congress*, Deauville, September 27-29, 1999
- [308] Verband der Automobilindustrie e.V.:
Persönliche Information 3/2001
- [309] Verband der Automobilindustrie e.V.:
Statistische Informationen aus dem Internetauftritt des Verbandes
URL: www.vda.de/aktuell/statistik (zuletzt aufgerufen 2/2001)
- [310] Verband Kunststoffherzeugende Industrie e.V.
Persönliche Information 1/2000
- [311] Verbraucher-Zentrale NRW e.V.:
Umsetzung der Batterieverordnung in der Praxis – Ergebnisse einer Untersuchung in NRW
Düsseldorf, 1999

Literaturverzeichnis

- [312] Verein Deutscher Eisenhüttenleute (Hrsg.):
Jahrbuch Stahl 1999 - Band I
Verlag Stahleisen, Düsseldorf (1999)
- [313] Verein Deutscher Eisenhüttenleute:
Stahlfibel
Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1989
- [314] Verordnung über die Rücknahme und Entsorgung gebrauchter Batterien und Akkumulatoren (Batterieverordnung - BattV) vom 27. März 1998
(BGBl. I 1998 S. 658)
- [315] Verordnung über Verbote und Beschränkungen des Inverkehrbringens gefährlicher Stoffe, Zubereitungen und Erzeugnisse nach dem Chemikaliengesetz (Chemikalien-Verbotsverordnung – ChemVerbotsV) vom 19. Juli 1996
(BGBl. I 1996 S. 1151; 1996 S. 1498; 1998 S. 3956)
- [316] Verordnung über Verwertungs- und Beseitigungsnachweise (Nachweisverordnung - NachwV) vom 10. September 1996 (BGBl. I 1996 S. 1382),
- [317] Verordnung zum Schutz vor gefährlichen Stoffen (Gefahrstoffverordnung - GefStoffV) vom 26. Oktober 1993
(BGBl. I 1993 S. 1782, S. 1870; 1994 S. 1416, S. 1689, S. 2557; 1996 S. 818, S. 1502; 1997 S. 313, S. 783; 1998 S. 1286, 3956; 1999 S. 50)
- [318] Vertrag zur Gründung der europäischen Gemeinschaft (EGV)
URL: http://europa.eu.int/eur-lex/de/treaties/dat/ec_cons_treaty_de.pdf
- [319] Vfw AG (Vfw-REBAT):
Erfolgskontrolle gemäß §10 Batterieverordnung für das Jahr 2000
Vfw AG, Köln 2000
- [320] Vfw AG (Vfw-REBAT):
Erfolgskontrolle gemäß §10 Batterieverordnung
Vfw AG, Köln 2000
- [321] Vfw AG:
Vfw AG verbreitert Kapitalbasis
Pressemitteilung 4/2000
- [322] Vfw AG:
Vfw AG: 50 % der Altbatterien kamen zurück
Pressemitteilung 4/2000
- [323] Vogelsang, J. (Gesellschaft für Korrosionsschutz e.V.):
Persönliche Information, 1/2000
- [324] Vollrath, K.:
Altbatterien: Sortieren vor dem Deponieren
Recycling Magazin 11/2000
- [325] Vollrath, K.:
Giftmüll gibt Zunder
in: VDI Nachrichten vom 24.12.1999, Nr. 51, S. 22
- [326] Vollrath, K.:
Mit Sieben und Sensoren
UmweltMag@zin, September/Oktober 2000
- [327] Vollrath, K.:
Suche nach dem Giftzweig
in: VDI Nachrichten vom 9.6.2000, Nr. 23, S. 20
- [328] Vollrath, K.:
Zinkband: Maßstäbe bei Präzision und Produktivität
Blech Rohre Profile, 3/2000, S. 44 ff.
- [329] Walker, T.:
Estimation of Cadmium Discards in Municipal Solid Wastes
Tagungsbeitrag in [215], 1996
- [330] Ward Seitz, C.:
Industrial Battery Technologies and Markets
in: IEEE AES Systems Magazine, May 1994

Literaturverzeichnis

- [331] Ward, J.:
Recharges
in: Engineering for innovators in technology, manufacturing and management 240 (1999), Nr. 2, S. 33 f.
- [332] Watson, N.:
Advances in Battery Sorting Technology
in: Proceedings of the International Congress for Battery Recycling, Montreux, May 2.-4., 2001
- [333] Watson, N.:
Post consumer battery sorting - a review of the high speed sorting process in the Netherlands
in: Proceedings of the 5th International Battery Recycling Congress, Deauville, September 27-29, 1999
- [334] Weyhe, R. T. (ACCUREC GmbH):
Persönliche Information 1/2000
- [335] Wiaux, J.-P.:
Battery Sorting Technology - Selectivity, Efficiency and Economy
in: Tagungsband zur EPBA-Konferenz „Battery Recycling in the Metals Industry“, 26 Mai 2000, Brüssel
- [336] Wiaux, J.-P.:
Spent Battery Sorting: The Future
in: Proceedings of the 4th International Battery Recycling Congress, Hamburg, July 1-3, 1998
- [337] Wirtschaftsvereinigung Metalle:
Metallstatistik 1999
Düsseldorf, 1999
- [338] Wirtschaftsvereinigung Stahl (Hrsg.):
Statistische Jahrbuch der Stahlindustrie 1998
Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf (1998)
- [339] Witter, U.:
Vier nominierte Projekte für den M.U.T.-Umweltpreis 2000
Technische Rundschau, Nr. 20, 2000
- [340] ZENTEK Gesellschaft für Kreislaufwirtschaftssysteme in Deutschland GmbH & Co KG:
Internetauftritt des Unternehmens
www.zentek.de (zuletzt aufgerufen 4/2001)
- [341] Zörcher, H.:
Stand der Elektrostahlerzeugung in Deutschland
Auszüge aus den Vorträgen zum Eisenhüttentag 1993,
in: Stahl und Eisen 113, S. 11 ff., Düsseldorf 1993
- [342] ZVEI (Fachverband Batterien)
Persönliche Information 1/2001
- [343] ZVEI:
Pressemitteilung 38/2000
- [344] ZVEI:
Internetauftritt des Verbandes
URL: www.zvei.de (zuletzt aufgerufen 2/2001)
- [345] ZVEI:
Pressemitteilung 75/2000