



Publikationen des
Umweltbundesamtes

**Ableitung von Kriterien
zur Beurteilung einer
hochwertigen Verwertung
gefährlicher Abfälle**

Forschungsprojekt im Auftrag des
Umweltbundesamtes
FuE-Vorhaben
Förderkennzeichen 202 35 310

Jürgen Giegrich
Axel Liebich
Horst Fehrenbach
(ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung)

**Umwelt
Bundes
Amt** 
Für Mensch und Umwelt

Dezember 2007

Umweltforschungsplan
des Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und Reaktorsicherheit

Förderkennzeichen 202 35 310

**Ableitung von Kriterien
zur Beurteilung einer hochwertigen
Verwertung gefährlicher Abfälle**

von
Jürgen Giegrich
Axel Liebich
Horst Fehrenbach
(ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung)

IM AUFTRAG DES UMWELTBUNDESAMTES

Heidelberg, Dezember 2007



Endbericht

**Ableitung von Kriterien
zur Beurteilung einer hochwertigen
Verwertung gefährlicher Abfälle**

**F+E Vorhaben Nr. 202 35 310
im Auftrag des
Umweltbundesamtes
Dessau-Roßlau**

**Heidelberg
Dezember 2007**

Berichts-Kennblatt

1. Berichtsnummer UBA-FB	2.	3.
4. Titel des Berichts Ableitung von Kriterien zur Beurteilung einer hochwertigen Verwertung gefährlicher Abfälle		
5. Autor(en), Name(n), Vorname(n) Giegrich, Jürgen Liebich, Axel Fehrenbach, Horst	8. Abschlussdatum Dezember 2007	
6. Durchführende Institution (Name, Anschrift) Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH IFEU Wilckensstraße 3 D-69120 Heidelberg http://www.ifeu.de	9. Veröffentlichungsdatum	
7. Fördernde Institution (Name, Anschrift) Umweltbundesamt, Wörlitzer Platz 1, 06844 Dessau-Roßlau	10. UFOPLAN-Nr. 202 35 310	
	11. Seitenzahl 98	
	12. Literaturangaben 30	
	13. Tabellen und Diagramme 44	
	14. Abbildungen 30	
15. Zusätzliche Angaben		
16. Kurzfassung Zur Sicherstellung einer hochwertigen Verwertung bei metallhaltigen, mineralischen Abfällen wurden in der Versatzverordnung (VersatzV) und der Deponieverwertungsverordnung (DepVerwV) Grenzwerte für Metallkonzentrationen festgelegt, ab denen eine Gewinnung der Metalle geboten ist. Für die Metalle Blei, Chrom, Eisen Kupfer, Nickel, Zink und Zinn waren die Grenzmetallkonzentrationen aus den Werten typischer Metallgehalte in Erzen abgeleitet worden. Mit Hilfe einer detaillierten Umweltbewertung der verschiedenen Aufbereitungsverfahren für die genannten Metalle sollte nun untersucht werden, ob die aufgestellten Kriterien einer eingehenderen Analyse standhalten oder angepasst werden müssten. Die ökologische Bilanzierung der Sekundärmetallgewinnung im Vergleich zur Primärmetallgewinnung stellte dazu die Grundlage dar. Als Bewertungsgröße wurde zum einen der kumulierte Primärenergieaufwand (KEA) herangezogen und zum anderen eine Aggregationsmethode verwendet, die Umwelteinwirkungen auf vier Schutzgüter operationalisiert (UEBEL-Methode). Um einen Break-even Punkt zwischen der Primär- und Sekundärmetallgewinnung ermitteln zu können, war es notwendig die Abfallverwertung jeweils mit einem hohen und einem niedrigen Metallgehalt zu berechnen. Bezüglich der genannten sieben Metalle waren detaillierte Auswertungen für vier Metalle möglich, nämlich für Blei, Kupfer, Nickel und Zink. Für die anderen Metalle wurden Plausibilitätsüberlegungen angestellt und darauf aufbauend Empfehlungen ausgesprochen. Das Ergebnis besteht darin, dass die Kriterien für Blei, Chrom, Eisen, Kupfer, Zink und Zinn wie bisher bestehen bleiben können. Für Nickel könnte eine Absenkung der Grenzwertkonzentrationen in Frage kommen.		
17. Schlagwörter Mineralische Abfälle, Metallverwertung, Versatzverordnung, Sekundärmetalle		
18. Preis	19.	20.

Report Cover Sheet

1. Report UBA-FB	No. 2.	3.
4. Report Title Deduction of evaluation criteria for a high quality recovery of hazardous waste		
5. Autor(s), Family Name(s), First Name(s) Giegrich, Jürgen Liebich, Axel Fehrenbach, Horst	8. Report Date December 2007	
6. Performing Organisation (Name, Address) ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung GmbH Wilckensstraße 3 D-69120 Heidelberg http://www.ifeu.de	9. Publication Date	
	10. UFOPLAN-Ref. No. 202 35 310	
	11. No. of Pages 98	
	12. No. of Reference 30	
7. Sponsoring Agency (Name, Address) Umweltbundesamt, Wörlitzer Platz 1; 06844 Dessau-Roßlau	13. No. of Tables, Diagrams 44	
	14. No. of Figures 30	
	15. Supplementary Notes	
16. Abstract The regulations Versatzverordnung (VersatzV) and Deponieverwertungsverordnung (DepVerwV) demand a certain concentration of metals in mineral waste matrices from which on the recovery of the metals is mandatory. So far these concentrations for lead, chromium, iron, copper, nickel, zinc and tin had been deducted from the values of typical metal concentrations in ore. An in depth environmental assessment of different recovery options was applied to verify or adjust the already existing metal concentrations in mineral waste. Basis was the environmental assessment of the secondary metal recovery in comparison to primary metal production. On the one hand the cumulative energy demand (CED) was chosen as evaluation parameter. And on the other hand an evaluation method was applied which is based on the environmental impact on four different environmental safeguard subjects (EVIL-Method). Metal recovery options with high and low metal concentrations in a mineral matrix were calculated to determine the environmental break-even point between primary and secondary metal production For four out of the seven metals it was possible to analyse in detail: lead, copper, nickel and zinc. Recommendations were made for all other metals by applying plausibility checks. The result is that the metal concentration of lead, chromium, iron, copper, zinc and tin should be kept as metal recovery criteria while for nickel a decrease of the concentration can be justified.		
17. Keywords Mineral waste, metal recycling, secondary metals		
18. Price	19.	20.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Einleitung	1
2 Methodische Grundlagen	4
3 Verwertung von Blei	10
3.1 Gewinnung von Primär-Blei und Umweltauswirkungen	10
3.2 Bleihaltige mineralische Abfälle	13
3.3 Aufbereitungsverfahren bleihaltiger Abfälle	15
3.4 Vergleichende Umweltbewertung	21
4 Verwertung von Chrom	30
4.1 Gewinnung von Primär-Chrom und Umweltauswirkungen	31
4.2 Chromhaltige mineralische Abfälle	32
4.3 Aufbereitungsverfahren chromhaltiger Abfälle	33
4.4 Vergleichende Umweltbewertung	34
5 Verwertung von Eisen	35
5.1 Gewinnung von Primär-Eisen und Umweltauswirkungen	35
5.2 Eisenhaltige mineralische Abfälle	36
5.3 Aufbereitungsverfahren eisenhaltiger Abfälle	37
5.4 Vergleichende Umweltbewertung	37
6 Verwertung von Kupfer	38
6.1 Gewinnung von Primär-Kupfer und Umweltauswirkungen	38
6.2 Kupferhaltige mineralische Abfälle	41
6.3 Aufbereitungsverfahren kupferhaltiger Abfälle	43
6.4 Vergleichende Umweltbewertung	48
7 Verwertung von Nickel	53
7.1 Gewinnung von Primär-Nickel und Umweltauswirkungen	53
7.2 Nickelhaltige mineralische Abfälle	56
7.3 Aufbereitungsverfahren nickelhaltiger Abfälle	58
7.4 Vergleichende Umweltbewertung	62
8 Verwertung von Zink	67
8.1 Gewinnung von Primär-Zink und Umweltauswirkungen	67
8.2 Zinkhaltige mineralische Abfälle	70
8.3 Aufbereitungsverfahren zinkhaltiger Abfälle	73
8.4 Vergleichende Umweltbewertung	78
9 Verwertung von Zinn	82
9.1 Gewinnung von Primär-Zinn und Umweltauswirkungen	82
9.2 Zinnhaltige mineralische Abfälle	83
9.3 Aufbereitungsverfahren zinnhaltiger Abfälle	84
9.4 Vergleichende Umweltbewertung	85
10 Zusammenfassende Darstellung und Handlungsempfehlungen	86
10.1 Zusammenfassende Darstellung	86
10.2 Handlungsempfehlungen bezogen auf die geregelten Metalle	89
10.3 Weitere Handlungsempfehlungen	93
11 Literatur	96

Tabellenverzeichnis

	Seite
Tab. 1-1: Grenzmittelgehalte der Versatzverordnung	2
Tab. 2-1: Umweltwirkungskategorien mit zugehörigen Sachbilanzparametern	5
Tab. 3-1: Welt-Produktion und Reserven an Blei (in 1000 t)	10
Tab. 3-2: Deutsche Bleiimporte in den Jahren 2002 bis 2005 und Hauptlieferländer	11
Tab. 3-3: Umweltbelastungen bei der Herstellung von 1 t Primärblei	13
Tab. 3-4: Schwankungsbreite von Blei in verschiedenen Abfallarten nach AVV	14
Tab. 3-5: Verbräuche und Emissionen des QSL-Verfahrens zur Sekundärbleigewinnung (realer Durchschnitt bezogen auf 1 kg Blei im Produkt)	18
Tab. 3-6: Verbräuche und Emissionen des QSL-Verfahrens zur Sekundärbleigewinnung (Hypothetische Abschätzung mit 5 % Bleigehalt im Sekundärbleiinput)	19
Tab. 3-7: Verbräuche und Emissionen des KTO-Verfahrens zur Sekundärbleigewinnung (realer Durchschnitt bezogen auf 1 kg Blei im Produkt)	20
Tab. 3-8: Verbräuche und Emissionen des QSL-Verfahrens zur Sekundärbleigewinnung (Hypothetische Abschätzung mit 5 % Bleigehalt im Sekundärbleiinput)	21
Tab. 3-9: Differenzierte und aggregierte Umwelteinwirkungsbelastungs-Ergebnisse (UEBEL) für die Primär- und QSL-Sekundärbleigewinnung (5 % und 70 % Blei-Gehalt im Input)	23
Tab. 3-10: Differenzierte und aggregierte Umwelteinwirkungsbelastungs-Ergebnisse (UEBEL) für die Primär- und KTO-Sekundärbleigewinnung (5 % und 47 % Blei-Gehalt im Input)	27
Tab. 4-1: Umweltbelastungen bei der Herstellung von 1 t Primärchrom	31
Tab. 4-2: Schwankungsbreite von Chrom in verschiedenen Abfallarten nach AVV	32
Tab. 5-1: Umweltbelastungen bei der Herstellung von 1 t Primäreisen	35
Tab. 5-2: Schwankungsbreite von Eisen in verschiedenen Abfallarten nach AVV	36
Tab. 6-1: Welt-Produktion und Reserven an Kupfer (in 1000 t)	38
Tab. 6-2: Deutsche Importe von Kupfer und kupferhaltigen Rohstoffen in den Jahren 2002 bis 2005 und Hauptlieferländer	39
Tab. 6-3: Umweltkennzahlen zur Herstellung von 1 t Primärkupfer	40
Tab. 6-4: Schwankungsbreiten von Kupfer in verschiedenen Abfallarten nach AVV	41
Tab. 6-5: Schwankungsbreiten von Kupfer in verschiedenen Abfallarten nach AVV, geordnet nach Rubriken der Abfallschlüssel	42
Tab. 6-6: Verbräuche und Emissionen des KRS-Verfahrens zur Sekundärkupfergewinnung (realer Durchschnitt bezogen auf 1 kg Kupferprodukt)	46
Tab. 6-7: Verbräuche und Emissionen des KRS-Verfahrens zur Sekundärkupfergewinnung (Hypothetische Abschätzung mit 5 % Kupfergehalt im Sekundärkupferinput)	47

Tab. 6-8:	Differenzierte und aggregierte Umwelteinwirkungsbelastungs-Ergebnisse (UEBEL) für die Primär- und Sekundärkupfergewinnung (5 % und 60 % Kupfer-Gehalt im Input)	49
Tab. 7-1:	Welt-Produktion und Reserven an Nickel (in 1000 t)	53
Tab. 7-2:	Deutsche Nickelimporte in den Jahren 2002 bis 2005 und Hauptlieferländer	54
Tab. 7-3:	Umweltbelastungen bei der Herstellung von 1 t Primärnickel	55
Tab. 7-4:	Schwankungsbreite von Nickel in verschiedenen Abfallarten nach AVV	57
Tab. 7-5:	Verbräuche und Emissionen der Nickelsekundärgewinnung (realer Durchschnitt ohne Allokation, bezogen auf 1 kg Input nickelhaltiger Stoffe)	60
Tab. 7-6:	Verbräuche und Emissionen der Nickelsekundärgewinnung (Reale Situation mit 1,7 % Kupfergehalt im Sekundärkupferinput und Allokation nach Wert)	60
Tab. 7-7:	Verbräuche und Emissionen der Nickelsekundärgewinnung (Hypothetische Abschätzung mit 5 % Kupfergehalt im Sekundärkupferinput und Allokation nach Wert)	61
Tab. 7-8:	Differenzierte und aggregierte Umwelteinwirkungsbelastungs-Ergebnisse (UEBEL) für die Primär- und Sekundärnickelgewinnung (1,7 % und 5 % Nickel-Gehalt im Input)	64
Tab. 8-1:	Welt-Produktion und Reserven an Zink (in 1000 t)	67
Tab. 8-2:	Deutsche Zinkimporte in den Jahren 2002 bis 2005 und Hauptlieferländer	68
Tab. 8-3:	Umweltbelastungen bei der Herstellung von 1 t Primärzink	70
Tab. 8-4:	Schwankungsbreite von Zink in verschiedenen Abfallarten nach AVV	72
Tab. 8-5:	Schwankungsbreite von Zink in verschiedenen Abfallarten nach AVV, geordnet nach Rubriken der Abfallschlüssel	73
Tab. 8-6:	Verbräuche und Emissionen des Wälzverfahrens (realer Durchschnitt bezogen auf 1 kg Wälzoxid-Output)	76
Tab. 8-7:	Verbräuche und Emissionen des Wälzoxid-Verfahrens zur Sekundärzinkgewinnung (Hypothetische Abschätzung mit 5 % Zinkgehalt im Sekundärzinkinput)	77
Tab. 8-8:	Verbräuche und Emissionen der Wälzoxidaufbereitung zu Zink (realer Durchschnitt bezogen auf 1 kg Zink-Output)	78
Tab. 8-9:	Differenzierte und aggregierte Umwelteinwirkungsbelastungs-Ergebnisse (UEBEL) für die Primär- und Sekundärzinkgewinnung (5 % und 24,2 % Zink-Gehalt im Input)	80
Tab. 9-1:	Umweltbelastungen bei der Herstellung von 1 t Primärzinn	82
Tab. 9-2:	Schwankungsbreite von Zinn in verschiedenen Abfallarten nach AVV	83
Tab. 10-1:	Grenzmetallgehalte der Versatz- und Deponieverwertungsverordnung	86

Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abb. 2-1: Schematische Darstellung der ökobilanziellen Vergleichssysteme	4
Abb. 3-1: Bleigewinnung im QSL-Verfahren (Quelle: Bleiberatung e.V.)	16
Abb. 3-2: Bleigewinnung im KTO-Verfahren (Quelle: Rentz 1999)	20
Abb. 3-3: Primärenergieaufwand (KEA) der QSL-Sekundärbleigewinnung als Funktion vom Bleigehalt des Inputs, ermittelt aus den beiden Datenpunkten für 70 % und 5 % Bleigehalt (schwarze Linie); die rote horizontale Linie repräsentiert die Primärbleiherstellung.	22
Abb. 3-4: Umwelteinwirkungsbelastung (UEBEL) mit Berücksichtigung der Flächenbeanspruchung der QSL-Sekundärbleigewinnung als Funktion vom Bleigehalt des Inputs, ermittelt aus den beiden Datenpunkten für 70 % und 5 % Bleigehalt (schwarze Linie); die rote horizontale Linie repräsentiert die Primärbleiherstellung.	24
Abb. 3-5: Umwelteinwirkungsbelastung (UEBEL) ohne Berücksichtigung der Flächenbeanspruchung der QSL-Sekundärbleigewinnung als Funktion vom Bleigehalt des Inputs, ermittelt aus den beiden Datenpunkten für 70 % und 5 % Bleigehalt (schwarze Linie); die rote horizontale Linie repräsentiert die Primärbleiherstellung.	24
Abb. 3-6: Schwermetall- und Dioxin-Emissionen in die Luft aus der Primär- und QSL-Sekundärbleigewinnung (5 % und 70 % Blei-Gehalt im Input) (Die Y-Achse ist logarithmisch skaliert)	25
Abb. 3-7: Primärenergieaufwand (KEA) der KTO-Sekundärbleigewinnung als Funktion vom Bleigehalt des Inputs, ermittelt aus den beiden Datenpunkten für 47 % und 5 % Bleigehalt (schwarze Linie); die rote horizontale Linie repräsentiert die Primärbleiherstellung.	26
Abb. 3-8: Umwelteinwirkungsbelastung (UEBEL) mit Berücksichtigung der Flächenbeanspruchung der KTO-Sekundärbleigewinnung als Funktion vom Bleigehalt des Inputs, ermittelt aus den beiden Datenpunkten für 47 % und 5 % Bleigehalt (schwarze Linie); die rote horizontale Linie repräsentiert die Primärbleiherstellung.	28
Abb. 3-9: Umwelteinwirkungsbelastung (UEBEL) ohne Berücksichtigung der Flächenbeanspruchung der KTO-Sekundärbleigewinnung als Funktion vom Bleigehalt des Inputs, ermittelt aus den beiden Datenpunkten für 47 % und 5 % Bleigehalt (schwarze Linie); die rote horizontale Linie repräsentiert die Primärbleiherstellung.	28
Abb. 3-10: Schwermetall- und Dioxin-Emissionen in die Luft aus der Primär- und KTO-Sekundärbleigewinnung (5 % und 47 % Blei-Gehalt im Input) (Die Y-Achse ist logarithmisch skaliert)	29
Abb. 4-1: Plasmaverfahren zur Aufbereitung chrom- und nickelhaltiger Abfälle (Quelle: B.U.S)	33
Abb. 4-2: Elektroreduktionsverfahren zur Aufbereitung chrom- und nickelhaltiger Abfälle (Quelle: B.U.S)	34
Abb. 6-1: Materialien, die von der Norddeutschen Affinerie AG verwertet werden können (Quelle: Homepage der NA AG 2006)	43
Abb. 6-2: Schematische Darstellung des Kayser Recycling Systems (KRS) zur Sekundärkupfererzeugung und Mischzinngewinnung (Quelle: NA 2005)	44
Abb. 6-3: Primärenergieaufwand (KEA) der Sekundärkupfergewinnung als Funktion vom Kupfergehalt des Inputs, ermittelt aus den beiden	

	Datenpunkten für 60 % und 5 % Kupfergehalt (schwarze Linie); die rote horizontale Linie repräsentiert die Primär- kupferherstellung.	48
Abb. 6-4:	Umwelteinwirkungsbelastung (UEBEL) mit Berücksichtigung der Flächenbeanspruchung der Sekundärkupfergewinnung als Funktion vom Kupfergehalt des Inputs, ermittelt aus den beiden Datenpunkten für 60 % und 5 % Kupfergehalt (schwarze Linie); die rote horizontale Linie repräsentiert die Primärkupferherstellung.	50
Abb. 6-5:	Umwelteinwirkungsbelastung (UEBEL) ohne Berücksichtigung der Flächenbeanspruchung der Sekundärkupfergewinnung als Funktion vom Kupfergehalt des Inputs, ermittelt aus den beiden Datenpunkten für 60 % und 5 % Kupfergehalt (schwarze Linie); die rote horizontale Linie repräsentiert die Primärkupferherstellung.	51
Abb. 6-6:	Schwermetall- und Dioxin-Emissionen in die Luft aus der Primär- und Sekundärkupfergewinnung (5 % und 60 % Kupfer-Gehalt im Input) (Die Y-Achse ist logarithmisch skaliert; Quellen: NA 2006, VDI-Entwurf 2006, Krauss 1999, Rentz 1999, IPPC 2001)	52
Abb. 7-1:	Schematische Darstellung der Aufbereitung nickelhaltiger Abfälle bei Nickelhütte Aue	59
Abb. 7-2:	Primärenergieaufwand (KEA) der Sekundärnickelgewinnung als Funktion vom Nickelgehalt des Inputs, ermittelt aus den beiden Datenpunkten für 1,7 % und 5 % Nickelgehalt (schwarze Linie); die rote horizontale Linie repräsentiert die Primärnickelherstellung.	63
Abb. 7-3:	Umwelteinwirkungsbelastung (UEBEL) mit Berücksichtigung der Flächenbeanspruchung der Sekundärnickelgewinnung als Funktion vom Nickelgehalt des Inputs, ermittelt aus den beiden Datenpunkten für 1,7 % und 5 % Nickelgehalt (schwarze Linie); die rote horizontale Linie repräsentiert die Primärnickelherstellung.	64
Abb. 7-4:	Umwelteinwirkungsbelastung (UEBEL) ohne Berücksichtigung der Flächenbeanspruchung der Sekundärnickelgewinnung als Funktion vom Nickelgehalt des Inputs, ermittelt aus den beiden Datenpunkten für 1,7 % und 5 % Nickelgehalt (schwarze Linie); die rote horizontale Linie repräsentiert die Primärnickelherstellung.	65
Abb. 7-5:	Schwermetall- und Dioxin-Emissionen in die Luft aus der Primär- und Sekundärnickelgewinnung (5 % und 1,7 % Nickel-Gehalt im Input) (Die Y-Achse ist logarithmisch skaliert)	66
Abb. 8-1:	Zinkrecycling im Wälz-Verfahren (Quelle: B.U.S)	74
Abb. 8-2:	Primärenergieaufwand (KEA) der Sekundärzinkgewinnung als Funktion vom Zinkgehalt des Inputs, ermittelt aus den beiden Datenpunkten für 5 % und 24,2 % Zinkgehalt (schwarze Linie); die rote horizontale Linie repräsentiert die Primärzinkherstellung.	79
Abb. 8-3:	Umwelteinwirkungsbelastung (UEBEL) mit Berücksichtigung der Flächenbeanspruchung der Sekundärzinkgewinnung als Funktion vom Zinkgehalt des Inputs, ermittelt aus den beiden	

Abb. 8-4:	Datenpunkten für 5 % und 24,2 % Zinkgehalt (schwarze Linie); die rote horizontale Linie repräsentiert die Primärzinkherstellung. Umwelteinwirkungsbelastung (UEBEL) ohne Berücksichtigung der Flächenbeanspruchung der Sekundärzinkgewinnung als Funktion vom Zinkgehalt des Inputs, ermittelt aus den beiden Datenpunkten für 5 % und 24,2 % Zinkgehalt (schwarze Linie); die rote horizontale Linie repräsentiert die Primärzinkherstellung.	81
Abb. 9-1:	Herstellung einer Zinn-Blei-Legierung als Nebenprodukt der Kupferaufbereitung nach dem KRS-Verfahren der NA in Lünen (Quelle: Rentz 1999)	81
Abb. 10-1:	Schematische Darstellung der Vergleichssysteme	84 87

1 Einleitung

„Eine der Art und Beschaffenheit des Abfalls entsprechende hochwertige Verwertung ist anzustreben“ heißt es in § 5 Abs. 2 Grundpflichten der Kreislaufwirtschaft im Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) von 1994. Damit wird neben der allgemeinen Hierarchie Vermeidung-Verwertung-Beseitigung auch innerhalb der Verwertung eine Unterscheidung in mehr oder weniger hochwertige Verwertungen gemacht.

Ausgangspunkt dieser Position ist, dass eine hochwertige Verwertung – pauschal beurteilt – auch die umweltverträglichere Lösung und vor allen Dingen auch die Lösung mit der größten Schonung natürlicher Ressourcen, dem Zweck des Gesetzes (§ 1, KrW-/AbfG), darstellt. Dass es Konfliktfälle gibt, in denen eine weniger hochwertige Verwertung oder sogar die Beseitigung eventuell vorzuziehen sind, hat schon eine ganze Reihe von Untersuchungen gezeigt.

Eine Diskussion um diese Grundpflichten der Kreislaufwirtschaft hat sich insbesondere bei der Verwendung von Abfällen zum Versatz unter Tage entwickelt. Dabei werden Abfälle (ggfs. zusammen mit anderen Materialien) unter Nutzung ihrer bauphysikalischen Eigenschaften zu bergtechnischen oder bergsicherheitlichen Zwecken unter Tage verwendet. Falls nun diese Versatzmaterialien andere wertgebende Inhaltsstoffe besitzen oder für andere Anwendungen zur Verfügung stehen können, sind Konfliktfälle möglich.

Die „Verordnung über den Versatz von Abfällen unter Tage“ (VersatzV) vom 24. Juli 2002 hat hier erste Regelungen getroffen, die den Vorrang der Rückgewinnung von Metallen unter bestimmten Rahmenbedingungen aufgreift. Für die sieben Metalle Zink, Blei, Kupfer, Zinn, Chrom, Nickel und Eisen wurden bestimmte Konzentrationen in Abfällen festgelegt, ab denen eine Verwertung im Bergeversatz nicht stattfinden darf. Einschränkend gilt weiter, dass die Gewinnung der Metalle aus den Abfällen technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar sowie unter Einhaltung der Anforderungen an die Zulässigkeit einer solchen Verwertung durchführbar ist. Mit dem Erlass der Deponieverwertungsverordnung wurden die Regelungen aus der Versatzverordnung auch auf die Verwertung von Abfällen auf obertägigen Deponien erweitert.

Auf der anderen Seite fällt gerade im industriellen Bereich eine Vielzahl von Abfällen an, die Wertmetalle enthalten und die zurückgewonnen werden können. Abgesehen von den stark schwankenden Weltmarktpreisen für Metalle, die nur ökonomisch darüber entscheiden, ob sich eine Verwertung „lohnt“, muss im Sinne des Ressourcenschutzes entschieden werden, wann eine „hochwertige Verwertung“ solcher metallhaltigen Abfälle Sinn macht.

Zur Beurteilung einer hochwertigen und umweltverträglichen Verwertung sind zum einen die Aufbereitungs- und Verwertungsverfahren der Abfälle selbst von Bedeutung. Die Art und Weise wie umweltfreundlich und energiesparend die Verfahren arbeiten, um die Metalle zurückzugewinnen, stellen eine wichtige Voraussetzung dar. Zum anderen – und vielfach wesentlich bedeutender – sind die Verfahren zu sehen, mit denen die Primärrohstoffe in Form der Erze aufbereitet und die Metalle schließlich gewonnen werden. Die Metallgewinnung gerade im außereuropäischen Raum ist oft mit großen Umweltbelastungen verbunden.

Daher muss die Beurteilung einer hochwertigen Verwertung eng verknüpft werden mit den Umweltbelastungen, die bei der Primärherstellung derselben Menge und Qualität eines bestimmten Metalls ersetzt werden. Es können dabei durchaus unterschiedliche Herstellungsverfahren auch zu verschiedenen Endprodukten (Metalle mit verschiedenen Reinheitsgraden, Metalle als Oxide, als Hydroxide, ionisch in Lösungen, etc.) führen, denen auch auf der Aufbereitungsseite der metallhaltigen Abfälle durchaus verschiedene Wege gegenüberstehen können. Der Auswahl der adäquaten Aufbereitungswege und verschiedener metallischer Endprodukte ist entsprechend Rechnung zu tragen.

Zur Beurteilung einer hochwertigen Verwertung metallhaltiger, gefährlicher Abfälle soll nun dieses Forschungsprojekt dienen. Zum einen ist dazu eine Übersicht über die existierenden Aufbereitungsverfahren zu erstellen, die für die ebenfalls zu beschreibenden metallhaltigen Abfälle zur Verfügung stehen. Nicht zu vernachlässigen ist die Teilaufgabe, welche Primärrohstoffe ersetzt werden und welche Umweltbelastungen von der Gewinnung, Aufbereitung und Herstellung dieser Primärmaterialien – ohne Substitution – zu erwarten gewesen wären. Mit der Kenntnis über die Prozesse und den Kriterien kann schließlich eine Beurteilung vorgenommen werden.

Die Arbeiten beziehen sich hauptsächlich auf die in der Versatzverordnung genannten Metalle Zink, Blei, Kupfer, Zinn, Chrom, Nickel und Eisen. Die Versatzverordnung bestimmt bei den sieben Metalle, die bei bestimmten Grenzwertkonzentrationen (angegeben in g/kg Feststoffgehalt) unter bestimmten Randbedingungen nicht mehr als Versatzmaterial oder als Zusatz zu einem Versatzmaterial verwendet werden dürfen.

Die Metallgehalte, ab denen zwingend eine stoffliche Aufbereitung nach der Versatzverordnung vorgeschrieben ist, sind in g/kg bzw. in Prozent in Tab. 1-1 dargestellt.

Tab. 1-1: Grenzwertkonzentrationen der Versatzverordnung

	Grenzwertkonzentration für Metalle im Abfall in g/kg	Grenzwertkonzentration für Metalle im Abfall in Prozent
Zink	≥ 100	$\geq 10 \%$
Blei	≥ 100	$\geq 10 \%$
Kupfer	≥ 10	$\geq 1 \%$
Zinn	≥ 15	$\geq 1,5 \%$
Chrom	≥ 150	$\geq 15 \%$
Nickel	≥ 25	$\geq 2,5 \%$
Eisen	≥ 500	$\geq 50 \%$

Diese Metallgehalte orientieren sich an den Metallgehalten in Primärerzen, die für die Herstellung dieser Metalle verwendet werden. Durch diese Herangehensweise ist quasi garantiert, dass bei gleichen Technologien und Umweltstandards die metallurgische Aufarbeitung von Abfällen und Erzen vergleichbar sind. Das mag zwar im Einzelnen je nach Matrix des Abfalls oder Erzes oder je nach Umweltstandard der Herstellung in einzelnen Ländern im Vergleich mit einer Aufbereitung in Deutschland nicht übereinstimmen, jedoch kann es als vernünftige erste Näherung angenommen werden.

Es ist nun durchaus möglich, dass bestimmte Abfälle mit niedrigeren Metallgehalten als in der Versatzverordnung festgelegt (s. Tab. 1-1), umweltseitige Vorteile der Metallrückgewinnung im Vergleich zum Primärrohstoff aufweisen. Diese Abfälle und die jeweiligen Metallgehalte sollen ebenfalls in dem Forschungsvorhaben identifiziert werden.

Darüber hinaus gibt es noch eine Reihe weiterer Metalle, die ebenso werthaltige Bestandteile von Abfällen sein können und die ebenso Berücksichtigung in der Versatzverordnung finden könnten. In den abschließenden Handlungsempfehlungen soll darauf eingegangen werden, ob weitere Metalle in den Anhang der Versatzverordnung aufgenommen werden sollten und falls ja, mit welchen Grenzkonzentrationen.

Ziel ist es, für die bereits in der Versatzverordnung geregelten Metalle zu untersuchen, ob die bestehenden Grenzkonzentrationen im Sinne des Umweltschutzes und Ressourcenschutzes sinnvoll gewählt sind und ob die Verordnung bezüglich neu aufzunehmender Metalle oder der Berücksichtigung relevanter Randbedingungen ergänzt werden sollte.

Nach einer kurzen Übersicht über die angewendete Methode wird auf die einzelnen Metalle eingegangen. Dabei wird begonnen mit der Art und Weise, wie ein Primärmetall hergestellt wird. Dabei ist es wichtig, welcher Energieaufwand und welche Umweltauswirkungen mit der Herstellung eines Metalls verbunden sind. Schließlich werden die Abfälle nach AVV Schlüssel aufgeführt, die relevante Anteile an den genannten Metallen beinhalten. Aus dem Mittelwert und dem Maximalwert der Metallkonzentration bei einem gegebenen Abfallschlüssel wird deutlich, welche Abfälle potenziell für eine höherwertige Verwertung in Frage kommen. Die Abfallschlüssel sind mit abnehmender Konzentration bezogen auf den Mittelwert des Metallgehaltes angeordnet.

Schließlich folgt eine kurze Beschreibung der Aufbereitungsverfahren für die Abfälle, mit denen Sekundärrohstoffe wieder gewonnen werden können. Hier können nicht alle Kennzahlen genannt werden, da sie in aller Regel vertraulich behandelt werden müssen. Im letzten Block eines jeden Kapitels schließt sich die ökologische Bewertung an, die notwendig ist, um die Umweltverträglichkeit einer Metallaufbereitung im Vergleich zur Primärmetallgewinnung steht.

Die Kapitel sind in alphabetischer Reihenfolge angeordnet (Blei, Chrom, Eisen, Kupfer, Nickel, Zink und Zinn). Bei den drei Metallen Chrom, Eisen und Zinn war es aus verschiedenen Gründen nicht möglich, Grenzkonzentrationen abzuschätzen, ab denen nach verschiedenen Methoden definitiv eine stoffliche Aufbereitung stattfinden sollte.

2 Methodische Grundlagen

Bei der Verwertung metallhaltiger mineralischer Abfälle handelt es sich um ein System, das von der Erfassung der Abfälle über die Aufbereitung, die Bereitstellung von Hilfsstoffen und Energie bis hin zum eigentlichen Herstellungsprozess des Sekundärmaterials reicht. Ebenso reicht die Herstellung des substituierten Primärrohstoffs von den Abbauaktivitäten in Minen bis zu der metallurgischen Herstellung des jeweiligen Metalls.

In beiden Fällen ist der Arbeitsansatz, nicht nur einzelne Anlagen zu berücksichtigen, sondern ganze Systeme. Bei der umweltseitigen Beurteilung von Systemen existiert als Instrumentarium die ökobilanzielle Analyse, die für die Bewertung von Systemen geeignet ist. Die Nutzung der Ökobilanz wurde bereits vielfach für Fragestellungen der Abfallwirtschaft angewendet.

Ein erster Schritt bei solch einer ökobilanziellen Betrachtung ist die Festlegung der Systemgrenzen und damit der zu untersuchenden Systeme. Gegenübergestellt werden dabei das eigentliche Verwertungssystem und das jeweils substituierte Äquivalenzsystem (siehe Abb. 2-1).

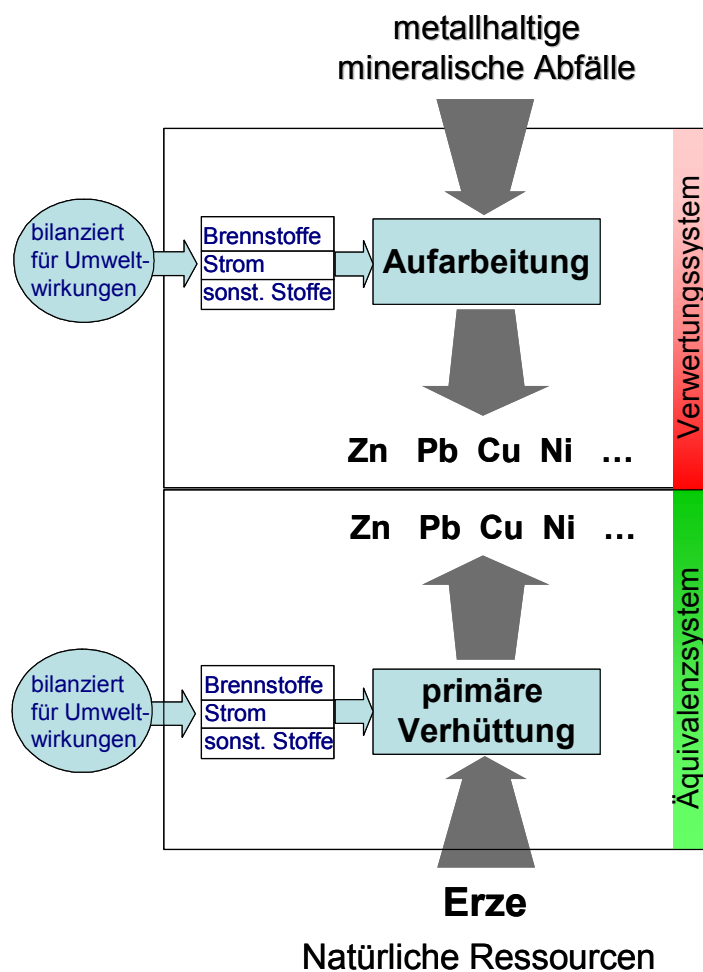


Abb. 2-1: Schematische Darstellung der ökobilanziellen Vergleichssysteme

Die Ökobilanz abfallwirtschaftlicher Systeme wird in einer festen Abfolge von Schritten bearbeitet. Dies beginnt nach der Zielformulierung mit dem Sammeln und Aufbereiten der Daten des untersuchten Systems. Dazu muss das gewünschte System zuerst beschrieben und modelliert werden. Dann müssen die benötigten Daten erhoben werden, um daraus die Input-Output-Ströme für das System selbst oder bestimmter Untersysteme zu berechnen.

Die in der so genannten Sachbilanz ermittelten Daten und Informationen sind mit Umweltwirkungen verbunden. Für die Überführung der Emissionsdaten in Umweltwirkungen müssen zunächst die zu betrachtenden Umweltwirkungskategorien (z.B. Treibhauseffekt) festgelegt werden. Anschließend wird die Zuordnung von Einzelparametern zu den jeweiligen Umweltwirkungskategorien vorgenommen. Im nächsten Schritt wird dann der Beitrag der einzelnen Parameter zu den ausgewählten Umweltwirkungskategorien ermittelt.

Die nachfolgende Tab. 2-1 zeigt eine Zusammenstellung der Umweltwirkungskategorien mit den jeweiligen Parametern aus der Bilanzierung:

Tab. 2-1: Umweltwirkungskategorien mit zugehörigen Sachbilanzparametern

Naturraum-beanspruchung	Ressourcen-beanspruchung	Treibhauseffekt	Fotooxidantien-bildung	Eutrophierung ¹⁾ + Sauerstoffzehrung	Versauerung	Humantoxizität ³⁾	Ökotoxische Wirkung ⁴⁾
Fläche	Erdöl	CO ₂ fossil	NO _x	NO _x	NO _x	As ²⁾	NH ₄ ⁺
	Erdgas	CH ₄	CH ₄	NH ₃	NH ₃	BaP ²⁾	Cr
	Braunkohle	N ₂ O	NM VOC	CSB	SO ₂	Cd ²⁾	Zn
	Steinkohle		Benzol	N-ges.	H ₂ S	Cr ^{2,6)}	
	Metallerz		Toluol	NH ₄ ⁺	HCl	Dioxin ²⁾	
			Xylol	NO ₂ ⁻	HF	Ni ²⁾	
				P-ges.		PM 10	

1) Bei NO_x (als NO₂) und NH₃ Eutrophierungspotenzial in Luft, sonst in Wasser
2) Parameter werden in Form von Arsen-Äq. zum Krebsrisikopotenzial aggregiert
3) alle Stoffe als luftseitige Emissionen
4) alle Stoffe als Schadstoffeintrag in Wasser
5) nicht fossiles C, welches dauerhaft aus der Atmosphäre fern gehalten wird, wird als C-Senke (umgerechnet als CO₂ ausgewiesen)
6) als Chrom VI

Bei der Auswertung einer üblichen Ökobilanz der Abfallwirtschaft werden die in der Bilanzierung und Wirkungsabschätzung ermittelten Umweltwirkungen zu einem Gesamturteil zusammengeführt. Dieses Gesamturteil kann aus den Einzelergebnissen mit Hilfe von Gewichtungen oder einer verbal-argumentativen Abwägung hergestellt werden.

Diese übliche Vorgehensweise bei der Auswertung einer Ökobilanz der Abfallwirtschaft kann für die Aufgabenstellung dieses Forschungsvorhabens nicht verwendet werden, da die Ermittlung einer Grenzkonzentration nur jeweils mit einer Umweltwirkung bestimmt werden kann. Um zu vermeiden, dass nicht mehrere Grenzkonzentrationen berechnet werden, sind alle Umweltauswirkungen in einer einzigen Größe auszudrücken.

Es wird demnach eine Größe benötigt, bei der die Gesamtheit der Umweltbeeinträchtigungen von Verwertungsverfahren und substituiertem Primärprozess Auskunft darüber gibt, ab welchem Metallgehalt im Abfall der Metallrückgewinnung Vorrang einzuräumen ist.

Mit verschiedenen Methoden wurde bisher versucht, die verschiedenen Umweltbelastungen zu einem einzigen Bewertungsindex zu integrieren. Alle Vorschläge weisen mehr oder weniger große Nachteile auf. In dem Vorhaben des Umweltbundesamtes „Indikatoren/Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion“ (FKZ 205 93 368) wurden solche Ansätze vorgestellt und diskutiert. Obwohl keine abschließende Vorgehensweise festgelegt wurde, sind jedoch drei Ansätze in die engere Auswahl genommen worden, die für eine zusammenfassende ökologische Bewertung geeignet sein könnten.

Diese Ansätze sollen im Rahmen dieser Studie für die Schlussbewertung ebenfalls angewendet werden. Auf einem Verfahren sollten schließlich die Empfehlungen basieren. Die Ansätze sind im Einzelnen:

Der kumulierte Rohstoffaufwand – KRA

Der Kumulierte Rohstoffaufwand (KRA) wird erzeugt, in dem alle Rohstoffaufwendungen entlang der Gewinnungsphase jedes Rohstoffes – ausgedrückt in Rohstoffmengen in Tonnen pro Tonne – aufaddiert werden. Bei Metallen wird das jeweilige Erz als Ausgangsmaterial berücksichtigt und alle mineralischen und energetischen Rohstoffe ebenso als Ausgangsmaterial dazugerechnet. Bei einem Wertstoff in einer Abfallmatrix (Metall in mineralischem Abfall) muss der ursprüngliche Abfall als Ausgangspunkt der Berechnung herangezogen werden.

Die Annahme dahinter ist, dass die Summe aller verwendeten Rohstoffe die Umweltauswirkungen repräsentieren, die während der Gewinnung und Herstellung eines Rohstoffes auftreten. Im Allgemeinen bestätigen die Untersuchungen diese Annahme, wobei es jedoch bei einzelnen Materialien zu deutlichen Abweichungen in der Korrelation mit einigen Umweltwirkungen kommen kann.

Der kumulierte Primärenergieaufwand – KEA

Analog dem kumulierten Rohstoffaufwand werden beim kumulierten Energieaufwand – KEA – nun nicht die Rohstoffe entlang der Gewinnungs- und Herstellungsphase aufaddiert, sondern die Energieaufwendungen. Sie werden in Energiegrößen z.B. als GJ pro Tonne ausgedrückt. Das gilt für die Primärrohstoffe ebenso wie für die Sekundärrohstoffe, die aus Abfällen zurück gewonnen werden können.

Der kumulierte Primärenergieaufwand soll dabei genauso wie der KRA die Umweltauswirkungen repräsentieren, die entlang der Gewinnungs- und Herstellungsschritte sowohl des Primär- als auch des Sekundärmaterials entstehen. Auch hier lassen die durchgeführten Korrelationen darauf schließen, dass in erster Näherung eine solche Übereinstimmung festzustellen ist. Für einzelne Materialien bzw. auch Wirkungskategorien trifft dies jedoch nicht immer zu.

Die Umwelteinwirkungsbelastungen – UEBEL

Im Rahmen des oben genannten Forschungsvorhabens wurde eine Bewertungsmethode entwickelt, die versucht, verschiedene Umweltbelastungen miteinander zu verknüpfen und zu einer zusammenfassenden Zahl zu gelangen, die diese Belastungen ausdrückt. Eine solche Methode ist immer mit normativen Schritten verbunden und kann nicht vollständig wissenschaftlich objektiv abgeleitet werden. Dementsprechend umstritten sind solche Bewertungsansätze.

Bei der hier angewendeten Methode muss als Ausgangspunkt eine Belastungseinheit definiert werden, die folgendermaßen lautet:

1 **Umwelteinwirkungsbelastung** (abgekürzt: 1 UEBEL) ist das Maß der jeweiligen Belastung, bei der der langfristige und nachhaltige Schutz des jeweiligen Umweltschutzgutes gerade noch gewährleistet ist.

Dieser Ansatz ist in Einklang mit dem am Umweltbundesamt vertretenen Prinzip der Leitplanken einer nachhaltigen Entwicklung. Dabei sind für jedes Umweltschutzgut die Grenzen, also Leitplanken, zu benennen, bei der die Tragfähigkeit der Umwelt nicht mehr gewährleistet ist.

Als Beispiel kann die Klimaerwärmung herangezogen werden. Als Leitplanke gilt (Umweltbarometer des UBA), dass bei einer Emission von nicht mehr als 250 Mio t CO₂-Äquivalent pro Jahr als Anteil Deutschlands an den weltweiten Anstrengungen sich die Erdatmosphäre um nicht mehr als 2° Celsius erwärmen darf. Damit entspricht dieser Wert von 250 Mio t CO₂-Äquivalent pro Jahr genau einer Umwelteinwirkungsbelastung (1 UEBEL). Per Dreisatz lassen sich die Umweltbelastungen von einzelnen Prozessen oder ganzen Prozessketten in der Einheit UEBEL ausdrücken und miteinander vergleichen.

Neben Klima konnten für die weiteren Schutzgüter Luft, Wasser und Boden (im Sinne von Flächenverbrauch) aus den Arbeiten des Umweltbundesamtes (Umweltbarometer, DUX, Kernindikatorensystem) solche Leitplanken abgeleitet werden. Die Schutzgüter und die dafür herangezogenen Parameter wurden in enger Anlehnung an die Arbeiten zum Umweltbarometer und DUX (Deutscher Umweltindex) des UBA ausgewählt. Sie wurden gleichgewichtig (normative Festlegung) zur Ermittlung des Umweltbelastungswertes UEBEL herangezogen.

Im Einzelnen umfasst dieses Konzept die Zusammenführung der Parameter Treibhausgase, Schwefeldioxid, Stickoxide, Ammoniak, flüchtige organische Verbindungen (NMVOC) als Luftschadstoffe und AOX (halogene absorbierbare Verbindungen),

Ammonium als Wasserschadstoffe. Hinzu kommt der Flächenverbrauch. Wichtige Aspekte wie die toxische Wirkung auf den Menschen z.B. durch krebserzeugende Schadstoffe und Feinstaub als auch die Berücksichtigung der Artenvielfalt und Ökosystemschanutzes fehlen.

Es bleibt zu erwähnen, dass ein Konstrukt wie der UEBEL-Indikator mit Unzulänglichkeiten und Nachteilen verbunden ist. So erfordert die Vorgehensweise eine Auswahl an Schutzgütern und Umweltwirkungen, für die wiederum im einzelnen Umweltqualitätsziele vorhanden sein müssen und diese Ziele auch „messbar“ gemacht werden können. Beides ist nur mit Einschränkungen gegeben.

Für Umweltschutzgüter wie der Schutz der menschlichen Gesundheit durch Umweltauswirkungen und Schutz der Artenvielfalt z.B. sind durch die enge Anlehnung an den Umweltbarometer keine Umsetzungsvorschläge in das UEBEL-Konzept mit eingegangen. Sie könnten ergänzt werden, was allerdings bestimmter Übereinkünfte hinsichtlich ihrer Umsetzung bedarf.

Weiterhin sind auch bereits für die umgesetzten Schutzgüter keine in ihrer Logik übereinstimmenden Umweltqualitätsziele vorhanden. Falls etwa Ziele mit unterschiedlichem Anspruch formuliert wurden, so schlägt sich dies in der Gewichtung innerhalb des UEBEL-Konzepts nieder. Oder Ziele, die für Deutschland gelten, werden auf Produktionsprozesse im Ausland übertragen. Es ist zu rechtfertigen, da Aktivitäten im Inland mit denen gleichzusetzen sind, die im Ausland stattfinden und für die Deutschland Verantwortung trägt. Dennoch sind diese Annahmen zu hinterfragen.

Letzteres z.B. ist von Bedeutung für die Bewertung der Fläche. So wurde im Zusammenhang dieses Forschungsvorhabens das Umweltziel „Verringerung der Flächenumwandlung zu Siedlungs- und Verkehrszwecken in Deutschland“ (Reduzierung von ca. 100 ha Flächenumwandlung pro Tag auf 30 ha pro Tag im Jahr 2020) gleichgesetzt mit der Flächeninanspruchnahme durch Metallerzabbau in aller Welt. Es liegt auf der Hand, dass ein ehrgeiziges Ziel für die Flächenumwandlung in Deutschland damit auf Flächennutzungen in teilweise abgelegenen Gebieten trifft und diese Umwelteinwirkung damit sehr hoch gewichtet wird. Um den Einfluss dieser Annahme zu beschreiben, wurde in der Studie der UEBEL-Indikator mit und ohne die Flächenbelegung ausgewiesen.

Ein aggregierter Indikator, wie es der UEBEL-Indikator darstellt, basiert auf jeden Fall auf politischen und wissenschaftlichen Übereinkünften und Konventionen. Mit der möglichst nahen Verwendung des Umweltbarometers wurde auf bereits getroffene Übereinkünfte zurückgegriffen. Dennoch sind die Ergebnisse, die damit erzielt wurden, vor dem Hintergrund dieser Konventionen zu sehen.

Anwendung

Zur Zielsetzung dieses Vorhabens, Ableitung von Grenzkonzentrationen von Metallen zur stofflichen Verwertung, werden die drei Vorschläge mit der Ein-Index-Bewertung für ihre Anwendung nun überprüft. Die Vorgehensweise geht davon aus, dass nicht die Fragestellung zu beantworten ist, ob bei einem gegebenen Metallgehalt Verwertung oder Versatz besser ist, sondern dass eine Grenzkonzentration zu ermitteln ist.

Aus einer ersten Überlegung heraus lässt sich bereits feststellen, dass die Verwendung des Kumulierten Rohstoffaufwandes (KRA) keine neuen Erkenntnisse bringt. Dominiert wird der KRA vom Metallgehalt im Erz beziehungsweise in der Abfallmatrix. Damit besitzen logischerweise ein Primärerz und ein mineralischer Abfall mit demselben Metallgehalt auch denselben Kumulierten Rohstoffaufwand. Die Verwendung des KRA führt demnach zu der gleichen Aussage, die bereits heute den Werten der Versatzverordnung zu Grunde liegt. Es unterscheiden sich lediglich die Massen der verwendeten Energieträger. Doch diese sind besser in Primärenergieäquivalenten mit Hilfe des Kumulierten Energieaufwandes (KEA) auszudrücken.

Die Verwendung des Kumulierten Energieaufwandes (KEA) als Näherungswert für Umweltauswirkungen ist ein Ansatz, der verwendet werden soll.

Ebenso erscheint die Anwendung der Umwelteinwirkungsbelastungen (UEBEL) als ein möglicher Weg, Umweltwirkungen in einer aggregierten Form zu verwenden, da die verschiedenen Umweltaspekte zusammengefasst vorliegen. Auf Grund Relevanz der Einbeziehung beeinflusster Flächen und der Schwierigkeiten bei der Formulierung des Qualitätsziels „Fläche“ werden die Ergebnisse mit und ohne Einbeziehung der Fläche dargestellt.

Wie gesagt sind auch mit der aggregierten Methode nicht alle Umweltauswirkungen, wie z.B. die u.U. wichtigen Emissionen human- und ökotoxischer Schadstoffe. Deshalb werden die Einzelbilanzen der Schwermetallemissionen als Ergänzung parallel berechnet und zur abschließenden Bewertung mit herangezogen. Es ist zu berücksichtigen, dass sie auf Grund ihrer Datenqualität nur mit Vorsicht zu verwenden sind.

Obwohl zur Steigerung der Transparenz einer abschließenden Aussage zu Grenzkonzentrationen mehrere Auswertungen vorliegen, soll letztendlich die Bewertung an Hand des vollständigen UEBEL-Indikators erfolgen.

3 Verwertung von Blei

3.1 Gewinnung von Primär-Blei und Umweltauswirkungen

Die wirtschaftlich abbaubaren Vorräte werden auf 67 Millionen t geschätzt. Die größten Vorkommen gibt es in China, Australien, USA und Kanada. Gefördert wurden im Jahr 2006 insgesamt 3,36 Millionen t, wobei die bedeutendsten Förderländer China, Australien und die USA mit zusammen fast 70 % Anteil waren. Die neuesten Zahlen vom US Geological Survey (USGS 2007) sind in Tab. 3-1 im Einzelnen dargestellt.

Tab. 3-1: Welt-Produktion und Reserven an Blei (in 1000 t)

World Mine Production, Reserves, and Reserve Base:				
	Mine production		Reserves⁷	Reserve base⁷
	2005	2006^a		
United States	426	430	8,100	20,000
Australia	776	780	15,000	28,000
Canada	73	79	2,000	9,000
China	1,000	1,050	11,000	36,000
India	58	60	NA	NA
Ireland	64	65	NA	NA
Kazakhstan	44	55	5,000	7,000
Mexico	130	140	1,500	2,000
Morocco	31	42	500	1,000
Peru	319	320	3,500	4,000
Poland	48	60	NA	5,400
South Africa	42	50	400	700
Sweden	61	61	500	1,000
Other countries	198	170	19,000	30,000
World total (rounded)	3,270	3,360	67,000	140,000

Quelle: USGS, 2007

In Deutschland wurden 2005 insgesamt 342.000 t Raffinadeblei hergestellt. Das bedeutet bei einem Anteil von 4,7 % an der Weltproduktion den dritten Platz hinter China und den USA. (BGR 2006) Zur Bleiherstellung in Deutschland dient ein beachtliches Aufkommen an Sekundärblei (z.B. aus Batterienrecycling), die Einfuhr von Bleierzen und Bleikonzentraten, unraffiniertem Rohblei und Abfälle und Schrotte.

Im Jahr 2005 wurde eine Menge von 170.000 t an Bleikonzentraten eingeführt, mit einem geschätzten Bleianteil von 103.000 t. Ca. 10.000 t unraffiniertes Blei und etwa 75.000 t an Abfällen und Schrott waren die weiteren Rohstoffe, um Raffinadeblei herzustellen.

Damit kann abgeschätzt werden, dass etwa die Hälfte des in Deutschland produzierten Bleis aus Sekundärblei stammt. An raffiniertem Blei wurden 70.000 t eingeführt.

Etwa 80.000 t an Raffinadeblei wurde im Jahr 2005 wiederum exportiert. Ein Export an Abfällen und Schrotten von ca. 20.000 t fand 2005 statt.

Der Verbrauch an Raffinadeblei lag in Deutschland 2005 bei 374.000 t und nimmt damit wiederum nach China und USA mit einem Weltanteil von 5 % den dritten Rang in der Welt ein.

In Tab. 3-2 sind die Importe von Blei und Bleierzen nach Deutschland sowie die jeweils wichtigsten Lieferländer nach der Statistik der BGR (BGR 2006) in aufgeführt.

Tab. 3-2: Deutsche Bleiimporte in den Jahren 2002 bis 2005 und Hauptlieferländer

METALLE	Importe Deutschland				Lieferländer (Importanteile > 5 %)	
	2002	2003	2004	2005		
Blei						
Erz & Konzentrat	228.055	193.533	207.411	171.533	Australien	24,7
					Schweden	21,5
					Irland	17,3
					Rep. Südafrika	12,2
					Polen	8,4
					Peru	6,7
Metall, raff. Blei	121.923	106.945	83.896	70.209	Großbritannien	28,1
					Belgien	25,1
					Polen	17,9
					Schweden	12,0
					Niederlande	8,5
Blei, Sb-haltig	18.714	23.663	27.988	14.696	Schweden	35,0
					Belgien	27,3
					Ukraine	10,5
					Schweiz	8,8
					Großbritannien	7,6
Metall, unraff. Blei	24.166	27.020	19.993	10.296	Polen	48,3
					Schweiz	19,7
					Großbritannien	10,5
					Belgien	9,0
					Schweden	6,3
Legierungen	22.650	16.410	12.621	13.332	Großbritannien	36,1
					Frankreich	17,1
					Niederlande	16,5
					Polen	8,8
					Schweiz	5,3
Abfälle & Schrott	33.556	12.738	60.574	74.054	Belgien	33,7
					Großbritannien	33,6
					Niederlande	6,4
					Litauen	5,1

Quelle: BGR 2006

Das wichtigste Mineral, aus dem Blei gewonnen wird, ist Bleisulfid, auch Bleiglanz genannt. Bleisulfid – PbS – besteht zu 86,6 % aus Blei. Beim Abbau wird Blei oft zusammen mit Zink abgebaut. Etwa 20 % des Bleiabbaus erfolgt aus reinen Bleiglanzlagerstätten, 70 % aus gemischten Lagerstätten mit Zink und die verbleibenden 10 % aus anderen Metallerzgemischen.

Blei-Zinkerze werden hauptsächlich aus Minen meist mittels Sprengung gewonnen. Über eine Schwerkraftabscheidung werden die metallhaltigen Mineralbestandteile dann aufkonzentriert. Es folgt ein Flotationsschritt, der ebenfalls dazu dient, die bleihaltige

von weniger bleihaltigen Erzbestandteilen zu trennen. Eine Konzentration auf bis zu 60 % Metallgehalt kann dadurch erreicht werden.

Das metallische Blei wird schließlich entweder durch Röstverfahren oder durch Direktschmelzverfahren gewonnen. Bei den Röstverfahren wird das Bleierz mit Luft von Temperaturen von ca. 1000°C durchströmt, wobei das Bleisulfid zu Bleioxid und Schwefeldioxid reagiert (Sinterprozess). Schließlich wird das Bleioxid mit Hilfe von Koks meist in Schachtöfen zu metallischem Blei reduziert. Dies kann entweder in zwei separaten Schritten erfolgen oder in einem kombinierten Verfahren.

Beim Direktschmelzverfahren finden ebenfalls beide Reaktionen in einem Reaktor statt. Bleisulfid wird teilweise zu Bleioxid geröstet und reagiert miteinander teilweise weiter zu metallischem Blei. Blei und Bleioxid fließen als Schlacke ab. In einer Reduktionszone wird Kohlestaub zugegeben, die das verbliebene Bleioxid zu Blei reduziert.

Aus beiden Verfahrensalternativen ergibt sich Werkblei mit einer Reinheit von 95 % bis 98 %. Es schließt sich ein Raffinationsschritt an, der schließlich das Blei je nach Anforderung als Weichblei mit Gehalten ab 99,9 % oder als Feinblei mit etwa 99,99 % gewinnt. Bei der Raffination werden durch pyrometallurgische Prozessschritte die verbliebenen Beimengungen von Antimon, Zinn, Arsen, Zink, Nickel und Kobalt ausgeschleust.

Die Umweltbelastungen zur Herstellung von 1 t Primärblei wurden ermittelt und in Tab. 3-3 dargestellt. Zur Abschätzung der Umweltauswirkungen der Primärbleiherstellung sind alle Prozesse von dem Erzabbau bis hin zur Erzeugung von Raffinadeblei einbezogen worden. Angaben zu einzelnen Prozessschritten oder Parametern sind sehr spärlich. Aus dem BREF zur Nichtmetallproduktion, Ayres 2002 und über Analogieschlüsse aus der Gewinnung anderer Metalle wurden die dargestellten Umweltauswirkungen zur Produktion von 1 t Primärblei berechnet.

Tab. 3-3: Umweltbelastungen bei der Herstellung von 1 t Primärblei

Umweltkennzahlen für		Blei
Parameter		Wert
Flächenverbrauch pro t	m ² /t	2,8
Energieverbrauch		
KEA, fossil	GJ/t	12
KEA, nuklear	GJ/t	4
KEA, erneuerbar	GJ/t	4
KEA, gesamt	GJ/t	20
Belastungen durch Abgasemissionen		
Treibhauseffekt	kg CO ₂ -Äq./t	1.459
Ozonloch	g FCKW-Äq./t	0,08
Versauerung	kg SO ₂ -Äq./t	48,3
Sommersmog	kg Ethen-Äq./t	1,8
terrestrische Eutrophierung	kg PO ₄ -Äq./t	2,4
Feinstaub PM 10	kg PM ₁₀ -Äq./t	16,5
Arsen	g/t	4,1
Cadmium	g/t	9,1
Quecksilber	g/t	0,13
Nickel	g/t	
Blei	g/t	577,28
Dioxine and Furane (als Teq)	g/t	1,47E-04
Belastungen durch Abwasseremissionen		
aquatische Eutrophierung	kg PO ₄ -Äq./t	12,905
Cadmium	g/t	2.602
Quecksilber	g/t	43
AOX	g/t	0,033

3.2 Bleihaltige mineralische Abfälle

Mit Hilfe der Datenbank zu Abfallanalysen des Landes Nordrhein-Westfalen wurde eine Auswertung der zu den erwarteten Bleigehalten in mineralischen Abfällen vorgenommen. Die nachfolgende Tabelle enthält die Auswertung.

Tab. 3-4: Schwankungsbreite von Blei in verschiedenen Abfallarten nach AVV

Abfallart	Einheit	[N]	Minimum	Maximum	Mittelwert	Stdabw
100402 Krätzen und Abschaum (Erst- und Zweitschmelze)	mg/kg	5	284.000	927.000	652.200	315.840
100607 Schlämme und Filterkuchen aus der Abgasbehandlung	mg/kg	4	6.700	110.000	56.425	54.659
060405 Abfälle, die andere Schwermetalle enthalten	mg/kg	21	27	292.000	43.512	83.509
060101 Schwefelsäure und schweflige Säure	mg/kg	37	0	504.000	34.557	103.605
100701 Schlacken (Erst- und Zweitschmelze)	mg/kg	4	7.988	49.880	22.192	18.939
100207 feste Abfälle aus der Abgasbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	126	0	183.645	15.678	23.640
100401 Schlacken (Erst- und Zweitschmelze)	mg/kg	4	6.700	30.769	15.642	10.531
100909 Filterstaub, der gefährliche Stoffe enthält	mg/kg	16	17	66.600	12.268	18.306
190115 Kesselstaub, der gefährliche Stoffe	mg/kg	40	120	49.520	8.675	11.682
101115 feste Abfälle aus der Abgasbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	30	5	37.210	7.846	8.212
191211 sonstige Abfälle a. d. mechanischen Behandlung v. Abfällen, d. gef. Stoffe enth.	mg/kg	3	60	21.380	7.169	12.307
100208 Abfälle aus der Abgasbehandlung mit Ausnahme derjenigen, die unter 100207 fallen	mg/kg	42	15	40.022	6.566	9.304
191003 Schredderleichtfraktionen und Staub, die gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	109	366	65.000	6.504	8.006
190204 vorgemischte Abfälle, die wenigstens einen gefährlichen Abfall enthalten	mg/kg	21	170	34.368	6.468	8.863
190113 Filterstaub, der gefährliche Stoffe enthält	mg/kg	689	3	53.500	5.538	5.675
101112 Glasabfall mit Ausnahme desjenigen, das	mg/kg	44	2	225.577	5.265	33.988
191005 andere Fraktionen, die gefährliche Stoffe	mg/kg	19	5	18.390	4.804	4.778
190205 Schlämme a. d. physikalisch-chemischen Behandlung, d. gefährl. Stoffe enthalten	mg/kg	264	0	133.700	3.636	13.463
010409 Abfälle von Sand und Ton	mg/kg	22	4	25.790	3.452	5.382
190105 Filterkuchen aus der Abgasbehandlung	mg/kg	151	0	21.988	3.059	3.580
190107 feste Abfälle aus der Abgasbehandlung	mg/kg	359	0	15.000	3.028	2.888
101116 feste Abfälle a. d. Abgasbehandlung m. Ausnahme derjenigen, d. u. 101115 fallen	mg/kg	18	20	29.360	2.693	6.907
070304 andere organische Lösemittel, Waschflüssigkeiten und Mutterlaugen	mg/kg	18	0	41.700	2.690	9.803
120116 Strahlmittelabfälle, die gefährliche Stoffe	mg/kg	117	0	34.520	2.512	5.231
120114 Bearbeitungsschlämme, die gefährliche	mg/kg	15	1	34.000	2.383	8.748
190111 Rost- und Kesselaschen sowie Schlacken, die gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	30	2	19.000	2.268	4.905
190813 Schlämme, die gef. Stoffe aus einer anderen Behandl. von industr. Abwasser enth.	mg/kg	17	3	19.000	1.984	4.883
161103 andere Auskleid. u. feuerf. Material. a. metallurg. Prozessen, gef. Stoffe enth.	mg/kg	10	0	13.270	1.937	4.108
190112 Rost- u. Kesselaschen, Schlacken m. Ausnahme derjenigen, die unter 190111 fallen	mg/kg	112	1	50.000	1.718	5.215

Ausgehend von den 6er Abfallschlüsseln nach der Abfallverzeichnisverordnung (AVV) wurden die Mittelwerte, das Minimum und das Maximum des Bleigehaltes abgefragt. Die Aufstellung wurde nach dem mittleren Bleigehalt sortiert. Die Angaben sind in mg/kg.

Nach der Versatzverordnung dürfen Abfälle mit einem Bleigehalt über 10 %, also 100.000 mg/kg nicht zur Verwertung auf obertägigen Deponien oder im Untertageversatz verwendet werden. Nach der obigen Auswertung wäre das allein der Abfallschlüssel 10 04 02 – Abfälle aus der thermischen Bleimetallurgie – Krätzen und Abschaum (Erst- und Zweitschmelze). Alle anderen vorhandenen Analysen lassen auf keine mittlere Überschreitung dieses Gehaltes schließen.

Analysiert man die Maximalgehalte, so kommen fünf weitere Abfallschlüssel hinzu. Zwei dieser fünf sind jedoch nicht weiter von Belang, da es sich zum einen um Schwefelsäure aus der Batterieaufbereitung und zum anderen um Bleiglas handelt. Die verbliebenen drei Schlüsselnummern sind zum einen aus der Kupfermetallurgie (10 06 07), der Eisen- und Stahlherstellung (10 02 07) und aus der Gruppe der Abfälle aus anorganischen chemischen Prozessen (06 04 05). Interessanterweise liegen die Bleigehalte in den Schlacken der Bleimetallurgie im Mittel bei 1,5 % und im Maximum bei etwa 3 %, also deutlich unter der Schwelle der Versatzverordnung.

Nach Statistischem Bundesamt (Fachserie 19) waren an Abfällen aus der thermischen Bleimetallurgie (AVV 10 04) für das Jahr 2001 nur 1.500 t als zur Aufkommen verzeichnet worden. Angaben zum Verbleib waren keine verfügbar. Eine Aktualisierung der Zahlen zur Blei-Potenzialabschätzung ist angefragt aber nicht erhalten worden.

3.3 Aufbereitungsverfahren bleihaltiger Abfälle

Recycling von Blei ist in erster Linie die Rückgewinnung des Bleis aus Batterien. Dieser Aspekt ist für die Aufgabenstellung dieser Studie nicht von Bedeutung. Bei der telefonischen Umfrage wurde festgestellt, dass der Einsatz von mineralischen Abfällen mit ausbeutungswürdigem Bleigehalt zur Rückgewinnung keine große Rolle spielt. Lediglich die Filterstäube der eigenen Anlagen werden wieder eingesetzt. Ist der Bleigehalt im Bereich der primären Bleikonzentrate (50 % Bleigehalt), so kann ein solches Abfallmaterial zu der Primärbleierzeugung direkt eingesetzt werden. Schlacken aus der Primär- und Sekundärbleierzeugung gehen meist in die Verwertung z.B. im Straßenbau.

Zur Berechnung der Prozessdaten und Umweltbelastungen wird mit Angaben der Firma BERZELIUS Metall GmbH gearbeitet (Rentz 1999). Die Bleiaufbereitung findet bei der BERZELIUS Metall GmbH in Stolberg und in Braubach am Rhein statt. Am Standort Stolberg wird aus Konzentraten und Rückständen nach dem QSL-Verfahren Blei erzeugt, das aus primären aber auch sekundären Quellen stammen kann. Die BSB Recycling GmbH in Braubach, rheinlandpfälzische Tochter der BERZELIUS Metall GmbH ist eine Sekundärbleihütte, die nach dem KTO Verfahren arbeitet. Sie verarbeitet verbrauchte Bleiakkumulatoren, Altblei, bleihaltige Rückstände und Strahlsände sowie kaschierte Bleifolien und Bildschirmglas zu Blei und Bleilegierungen.

Es wurde versucht, mit dem QSL und dem KTO Verfahren die möglichen Grenzwerte zu berechnen. Zunächst wird das QSL-Verfahren nach öffentlichen Herstellerangaben beschrieben:

Das QSL-Verfahren (Abb. 3-1)

Die Bleihütte "BERZELIUS" Stolberg wurde 1990 auf das QSL-Verfahren umgerüstet. Dieses Verfahren, das gegenüber der herkömmlichen Bleierzeugung die getrennten Verfahrensschritte Rösten und Reduktion im QSL-Reaktor zusammenfasst, gilt als sehr emissionsarm. Gleichzeitig bietet es die Möglichkeit, neben den Konzentraten, problematische Bleirückstände wie Sulfide, Sulfate und Silikate zu verarbeiten. Als

Energieträger können Kunststoffabfälle und Klärschlämme eingesetzt werden. Die Abwärme des QSL-Prozesses wird in elektrische Energie umgewandelt und reicht aus, um einen großen Teil des Strombedarfs des Betriebes decken.

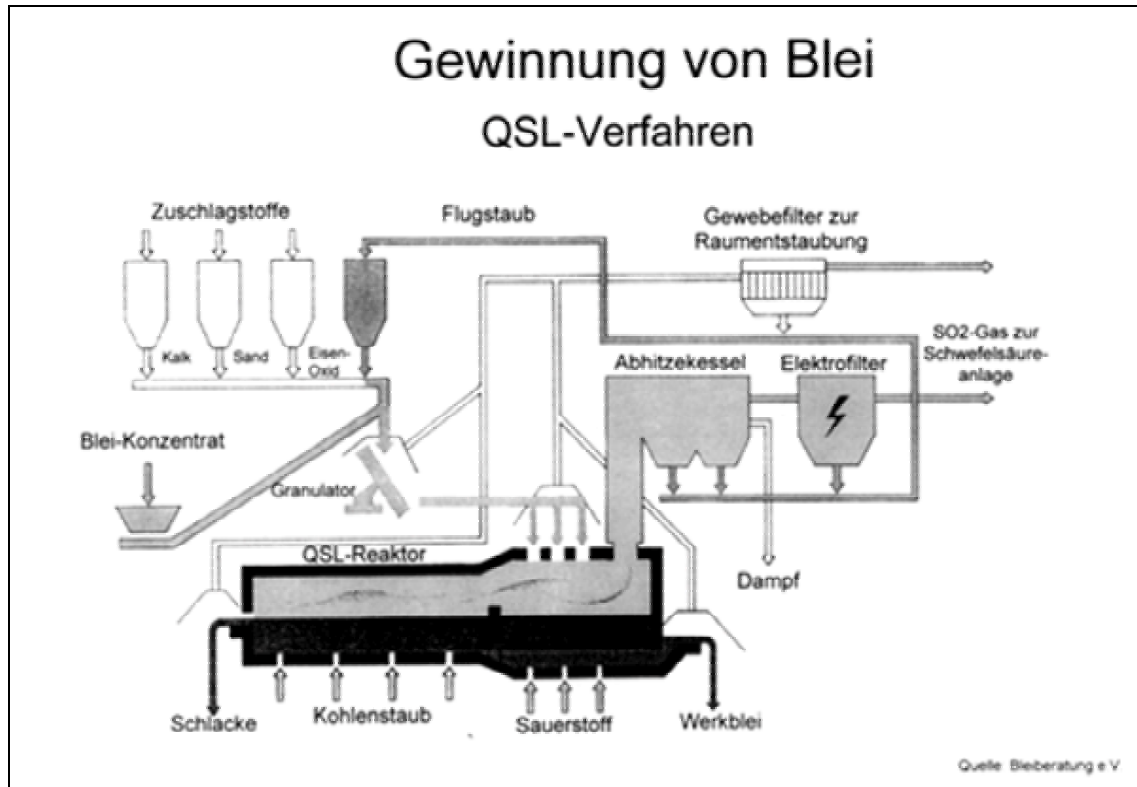


Abb. 3-1: Bleigewinnung im QSL-Verfahren (Quelle: Bleiberatung e.V.)

Das QSL-Verfahren, benannt nach seinen Erfindern Paul E. Queneau, Reinhard Schuhman und Lurgi AG, ist ein kontinuierlich arbeitendes Verfahren, bei dem in einem liegendem Reaktor die bleihaltigen Materialien eingeschmolzen und Werkblei sowie eine absetzbare Schlacke gewonnen werden. Konzentrate und Zuschlagstoffe, rezirkulierter Flugstaub sowie - falls erforderlich - geringer Kohlezusatz werden gemischt und anpelletiert.

Die Aufgabe der Mischung ist es, das Material einigermaßen gleichförmig und staubfrei dem Reaktor aufzugeben. Die Mischung wird über Aufgabetrichter dem Reaktor zugeführt und fällt in das geschmolzene Schlackenbad. Der QSL-Reaktor besteht aus einem leicht geneigten, ausgemauerten Reaktor, der um 90 Grad gedreht werden kann, falls der Arbeitsablauf unterbrochen werden muss. In der ersten Zone des Reaktors wird technischer Sauerstoff durch bodenblasende, gasgekühlte Düsen in das flüssige Bad geblasen, wobei die im Rohmaterial enthaltenen Sulfide oxidiert werden und SO₂ und verunreinigtes Blei entstehen.

Die bleihaltige Schlacke läuft durch ein Wehr in die Reduktionszone, in der durch ebenfalls bodenblasende Düsen Kohlenstaub unter Zusatz von Luft oder Sauerstoff eingeblasen wird. Der Kohlenstaub reduziert das in der Schlacke enthaltene Bleioxid zu metallischem Blei, das sich mit dem Primärblei der Oxidationszone vereinigt und

gemeinsam kontinuierlich aus dem Reaktor in einen Kessel abfließt. Die reduzierte Schlacke mit einem niedrigen Bleigehalt läuft am anderen Ende des Reaktors über und wird entweder granuliert oder kann in einem weiteren Verarbeitungsschritt einer Entzinkung zugeführt werden.

Das SO₂-haltige Abgas tritt bei einer Temperatur von etwa 1100 °C in der Oxidationszone aus, wird in einem senkrecht führenden Schacht auf eine Temperatur unter 700 °C gekühlt und passiert anschließend einen Abhitzekegel sowie eine nachgeschaltete Heiß-EGR. Die hier anfallenden Stäube werden dem Verfahren wieder zugeführt.

Nach der Heiß-EGR hat das Gas noch eine Temperatur von 320 - 350°C und einen Staubgehalt von < 100 mg/Nm³. In einem nachgeschalteten Verdampfungskühler wird das Gas nochmalig einem Waschprozeß unterzogen und auf 70 °C abgekühlt. Danach durchläuft das Gas eine zweistufige Nass-Gas-Reinigung und wird weiter abgekühlt auf 30 - 35 °C, wobei es bis auf einen Reststaubgehalt von < 1 mg/Nm³ gereinigt wird. Seit 1997 ist die Hg-Entfernungsanlage in Betrieb, welche nach dem Boliden-Norzink-Verfahren flüchtiges Hg aus der Gasphase durch eine umlaufende HgCl₂-Lösung herauswäscht. Das so gereinigte SO₂-haltige Gas durchläuft die Doppelkontakanlage und verlässt die Anlage mit einem Rest-SO₂-Gehalt von < 200 ppm/Nm³. Die dabei produzierte 96,5%-ige Schwefelsäure hat Premiumqualität mit einem Rest-Hg-Gehalt von < 0,5 ppm.

Die Umweltauswirkungen dieses Verfahrens konnten mit Hilfe verschiedener Quellen abgeschätzt werden (Rentz 1999, Deininger 1993, Neosys 2001, Ecoinvent 2002) abgeschätzt werden. Dabei beziehen sich die Angaben auf den Input an bleihaltigem Material, das etwa bei 70 % Bleigehalt liegt. Aus diesen Studien wurden die Angaben zu Schwermetallemissionen und Dioxinmissionen an die Atmosphäre entnommen und als Orientierungswert verwendet. Abwasseremissionen waren nicht angegeben und wurden mit Hilfe der genannten Quellen abgeschätzt. Als Vorketten für den Energieverbrauch wurden aktuelle Daten verwendet.

Obwohl es Hinweise gibt, dass bleihaltige Abfälle auch Silber enthalten, das rückgewinnungswürdig ist, wurden solche Silberanteile für die Auswertung hier vernachlässigt. Dies ist dann von Bedeutung, falls die Umweltauswirkungen der Rückgewinnung auf mehr als ein Metall verteilt (alloziert) werden müsste. Da es hier allein um die Bleirückgewinnung geht, soll die Annahme getroffen werden, dass die Abfälle keine weiteren silberhaltigen Bestandteile aufweisen.

Die Angaben zu Energieverbrauch und Emissionen beziehen sich normalerweise auf eine Einheit des Inputmaterials. Um jedoch die Bleirückgewinnung mit den Umweltauswirkungen der Primärproduktion vergleichen zu können, sind Anpassungen auf den Bleigehalt aus der Primärerzeugung notwendig. Da sich diese Angaben auf Werkblei mit erzeugten Bleibarren von einem Bleigehalt mit 94,5 % beziehen, sind die inputseitig bekannten Daten dementsprechend umgerechnet worden. In der folgenden Tab. 3-5 sind die Angaben zusammengestellt, die sich aus diesen Abschätzungen und Berechnungen ergeben.

**Tab. 3-5: Verbräuche und Emissionen des QSL-Verfahrens zur Sekundärbleigewinnung
(realer Durchschnitt bezogen auf 1 kg Blei im Produkt)**

QSL-Verfahren bei der Berzelius Stolberg				
Input	kg	Bemerkung	Output	kg
Bleihaltige Stoffe	1,529	Bleigehalt (berechnet) 70%	Bleibarren	1,058
Flussmittel (Kalkstein, ...)	0,235		Schwefelsäure	0,705
Sauerstoff	0,541		Rohsilber	0,003
Kohlestaub	0,141	Mittelwert	Calomel	0,000
Erdgas	0,026	Angenommener Hu: 43,750 MJ/kg	Zink-Cadmiumkarbonat	0,001
			Schlacke	0,588
			As	1,2E-03
			Cd	1,2E-05
			Cu	1,2E-03
			Pb	1,2E-02
			Zn	5,9E-02
			FeO	1,5E-01
			CaO	8,8E-02
			MgO	2,4E-02
			Al ₂ O ₃	1,8E-02
			SiO ₂	1,1E-01
			Rest	1,3E-01
			Luftemissionen (ohne diffuse): Mittelwerte, sofern nicht anders ang.	
			Kohlendioxid	5,16E-01
			Staub	8,88E-01
			SO ₂	3,01E-03
			NO _x	1,01E-03
			Blei	1,36E-05
			Cadmium	6,26E-07
			Antimon	3,55E-07
			Arsen	7,19E-08
			Quecksilber	1,12E-08
			PCDD/PCDF	2,47E-12
			Abwasseremissionen:	
			Blei	1,058E-07
			Cadmium	5,291E-08
			Arsen	5,291E-08
			Zink	3,175E-07
			Nickel	5,291E-08
			Kupfer	5,60E-06
			Quecksilber	4,82E-08
			AOX	1,058E-07
			COD	2,116E-05
			Blei in Schlacke, Luft- und Wasseremissionen	
				0,012

Um nun bestimmen zu können, ab welchen Metallgehalten es sich lohnt, mineralische Abfälle zur Rückgewinnung der Metalle aufzubereiten, reicht ein solcher Datenpunkt nicht aus. Es sind weitere Angaben nötig, wie sich Energieverbrauch und Emissionssituation bei anderen Bleigehalten im Inputmaterial darstellen würden.

Nun liegen solche weiteren Datenpunkte nicht vor. Die einzige Möglichkeit besteht darin, aus den vorhandenen Informationen zu einem bestimmten Metallgehalt auf die Situation mit anderen Metallgehalten zu extrapolieren. Um die Situation nicht überzuinterpretieren wurde die Situation zu einem weiteren Metallgehalt erarbeitet.

Im vorliegenden Fall wurde ein Abfall mit einem Bleigehalt von 5 % abgeschätzt. Dazu wurden verschiedene Annahmen getroffen:

- Metallgehalte im Input korrelieren mit Bleigehalt im Input
- Reduktionsmittelverbrauch hängt vom Bleigehalt ab
- Energieverbräuche korrelieren mit Gesamt-Inputmenge
- Schlackemenge und -zusammensetzung korreliert mit Input
- CO₂, NO_x, Dioxine werden brennstoffabhängig berechnet
- Staub und SO₂ korrelieren mit dem Gesamt-Input

- Schwermetallemissionen korrelieren mit Schwermetallgehalt im Abfall
- Abwasser: Schwermetalle korrelieren mit Schwermetall-Input, sonstige Emissionen mit dem Gesamt-Input

Im einzelnen ergeben sich daraus die folgenden Zahlen in Tab. 3-6 mit Kurzläuterungen zu den Annahmen für jeden Wert.

Tab. 3-6: Verbräuche und Emissionen des QSL-Verfahrens zur Sekundärbleigewinnung (Hypothetische Abschätzung mit 5 % Bleigehalt im Sekundärbleiinput)

QSL-Verfahren bei der Berzelius Stolberg					
Input			Output		
	kg	Bemerkung		kg	Bemerkung
Bleihaltige Stoffe	21,399	Bleigehalt (berechnet) 5%	Bleibarren	1,058	Bleigehalt nach Ecoinvent 94.5%
Flussmittel (Kalkstein, ...)	0,235	abhängig vom Pb-Input	Schwefelsäure	0,705	abhängig vom Pb-Input
Sauerstoff	0,541	abhängig vom Pb-Input	Rohsilber	0,003	abhängig vom Pb-Input
Kohlestaub	0,141	abhängig vom Pb-Input	Calomel	0,000	abhängig vom Pb-Input
Erdgas	0,363	Angenommener Hu: 43,750 MJ/kg korreliert mit Gesamt-Input	Zink-Cadmiumkarbonat	0,001	abhängig vom Pb-Input
			Schlacke	22,905	
			As	1,2E-03	korreliert mit Schwermetall-Input
			Cd	1,2E-05	korreliert mit Schwermetall-Input
			Cu	1,2E-03	korreliert mit Schwermetall-Input
			Pb	1,2E-02	korreliert mit Schwermetall-Input
			Zn	5,9E-02	korreliert mit Schwermetall-Input
			FeO	6,5E+00	korreliert mit Input an Nicht-Schwermet.
			CaO	3,9E+00	korreliert mit Gesamtinput
			MgO	1,0E+00	korreliert mit Input an Nicht-Schwermet.
			Al ₂ O ₃	7,8E-01	korreliert mit Input an Nicht-Schwermet.
			SiO ₂	5,0E+00	korreliert mit Input an Nicht-Schwermet.
			Rest	5,6E+00	korreliert mit Input an Nicht-Schwermet.
			Luftemissionen (ohne diffuse):		
			Kohlendioxid	1,34E+00	berechnet über Kohle-/Erdgas-Input
			Staub	1,24E+01	korreliert mit Gesamt-Input
			SO ₂	4,21E-02	korreliert mit Gesamt-Input
			NO _x	7,21E-03	abhängig vom Brennstoff-Input
			Blei	1,36E-05	korreliert mit Schwermetall-Input
			Cadmium	6,26E-07	korreliert mit Schwermetall-Input
			Antimon	3,55E-07	korreliert mit Schwermetall-Input
			Arsen	7,19E-08	korreliert mit Schwermetall-Input
			Quecksilber	1,12E-08	korreliert mit Schwermetall-Input
			PCDD/PCDF	1,77E-11	abhängig vom Brennstoff-Input
			Abwasseremissionen:		
			Blei	1,06E-07	korreliert mit Schwermetall-Input
			Cadmium	5,29E-08	korreliert mit Schwermetall-Input
			Arsen	5,29E-08	korreliert mit Schwermetall-Input
			Zink	3,17E-07	korreliert mit Schwermetall-Input
			Nickel	5,29E-08	korreliert mit Schwermetall-Input
			Kupfer	5,60E-06	korreliert mit Schwermetall-Input
			Quecksilber	4,82E-08	korreliert mit Schwermetall-Input
			AOX	1,48E-06	korreliert mit Gesamt-Input
			COD	2,96E-04	korreliert mit Gesamt-Input
			Blei in Schlacke, Luft- und Wasseremissionen	0,012	

Da für die Bleiaufbereitung zwei Verfahren vorliegen, die mit den genannten Einschränkungen auch berechnet werden konnten, sollen hier auch beide Verfahren in die Überlegungen mit aufgenommen werden.

Das KTO-Verfahren

Das KTO-Verfahren unterscheidet sich im Wesentlichen gegenüber dem QSL-Verfahren im Einsatz eines Kurztrommelofens für den Schmelzprozess. Dieser wird häufig als Schmelzaggregat in deutschen Sekundär-Bleihütten genutzt. Ausgangsmaterialien sind überwiegend Altbatterien, aber auch Sekundärmaterialien und Schrotte. Die BSB Recycling in Braubach setzt auch Aschen und Krätzen ein.

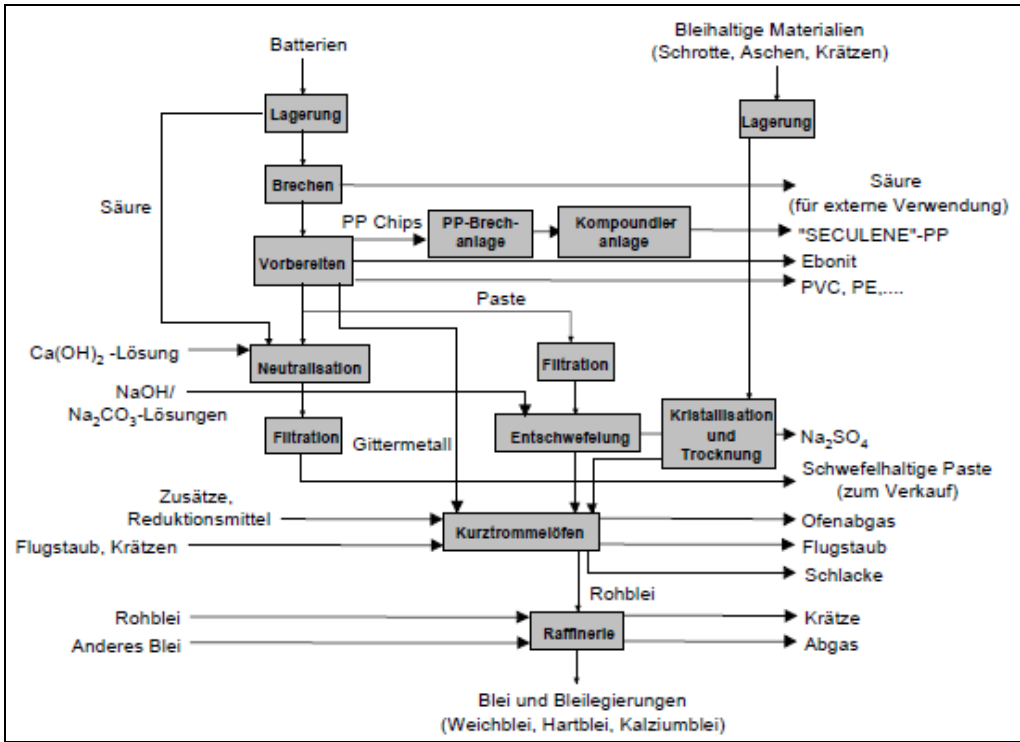


Abb. 3-2: Bleigewinnung im KTO-Verfahren (Quelle: Rentz 1999)

Tab. 3-7: Verbräuche und Emissionen des KTO-Verfahrens zur Sekundärbleigewinnung (realer Durchschnitt bezogen auf 1 kg Blei im Produkt)

KTO-Verfahren (BSB Recycling, Braubach)					
Input			Output		
	kg	Bemerkung		kg	Bemerkung
Sekundäre Einsatzmaterialien	2,120	Bleigehalt (berechnet): 47%	Blei und Bleilegierungen	1,000	
Batterieschrott	1,336		Batteriepaste	0,500	Quelle: Rentz 1999
Anderer Materialien	0,445		Polypropylenkomponenten	0,140	Quelle: Rentz 1999
Rohblei, Bleischrott	0,339		Plastikreststoffe (Abfall)	0,035	
Reagentien	0,140		Schlacke	0,230	Recycling, Entsorgung
Stahlspäne	0,064		As	4,6E-04	
Petrolkoks	0,045		Cd	4,6E-06	
Soda	0,031		Cu	4,6E-04	
PP Chips (extern)	0,040		Pb	4,6E-03	
Erdgas	0,098	Angenommener Hu: 43,750 MJ/kg	Zn	2,3E-02	
Strom in kWh	0,26		FeO	5,8E-02	Annahme: Schlacke-Zusammensetzung entspricht der aus QSL-Anlage
			CaO	3,5E-02	
			MgO	9,2E-03	
			Al ₂ O ₃	6,9E-03	
			SiO ₂	4,4E-02	
			Rest	5,0E-02	
			Luftemissionen:		Mittelwerte, sofern nicht anders ang.
			Kohlendioxid	3,83E-01	berechnet über Erdgas-/Koks-Input
			Staub	8,56E-05	
			SO ₂	1,83E-03	
			NO _x	3,50E-04	
			Blei	7,10E-06	
			Cadmium	4,21E-06	
			HCl	1,40E-04	
			PCDD/PCDF	3,06E-12	Annahme: analog QSL-Anlage
			Abwasseremissionen:		Mittelwerte, sofern nicht anders ang.
			Blei	3,771E-07	
			Cadmium	1,886E-07	
			Arsen	1,571E-07	
			Zink	4,4E-07	
			Nickel	3,143E-07	
			AOX	1,634E-06	
			COD	4,086E-05	
			Blei in Schlacke, Luft- und Wasseremissionen	0,005	

Für das KTO-Verfahren wurden analog dem QSL-Verfahren Energieverbräuche und Emissionen bezogen auf zwei verschiedene Abfälle mit unterschiedlichen Bleigehalten erzeugt. Die Ausgangsdaten beziehen sich auf einen Bleigehalt im Abfall von 47 % (s. Tab. 3-7), aus dem Werkblei erzeugt wird. Für die extrapolierte Situation wurde wiederum ein Bleigehalt von 5 % (s. Tab. 3-8) im Abfall verwendet.

Ansonsten wurden für die extrapolierten Abschätzungen dieselben Annahmen wie beim QSL-Verfahren herangezogen. Die etwas bessere Datenlage zum QSL-Verfahren bei einzelnen Emissionen wurde auch dazu genutzt, Datenlücken mit plausiblen Übertragungen zu ergänzen.

Tab. 3-8: Verbräuche und Emissionen des QSL-Verfahrens zur Sekundärbleigewinnung (Hypothetische Abschätzung mit 5 % Bleigehalt im Sekundärbleiinput)

KTO-Verfahren (BSB Recycling, Braubach)					
Input			Output		
	kg	Bemerkung		kg	Bemerkung
Sekundäre Einsatzmaterialien	20,092	Bleigehalt (Annahme): 5%	Blei und Bleilegierungen	1,000	
Reagentien	0,534		Batteriepaste	0,500	korreliert mit Pb-Input
Stahlspäne	0,064	überwiegend vom Pb-Input abhängig	Polypropylenkomponenten	0,140	korreliert mit Pb- und PP-Input
Petrolkoks	0,045	überwiegend vom Pb-Input abhängig	Plastikreststoffe (Abfall)	0,035	korreliert mit Kunststoff-Input
Soda	0,425	abhängig vom Gesamt-Input	Schlacke	1,938	abhängig vom Gesamt-Input
PP Chips (extern)	0,040	Annahme: bleibt konstant	As	4,6E-04	korreliert mit Pb-Input
Erdgas	0,928	Angenommener Hu: 43,750 MJ/kg Verbr. abhängig vom Gesamt-Input	Cd	4,6E-06	korreliert mit Pb-Input
Strom in kWh	2,464	abhängig vom Gesamt-Input	Cu	4,6E-04	korreliert mit Pb-Input
			Pb	4,6E-03	korreliert mit Pb-Input
			Zn	2,3E-02	korreliert mit Pb-Input
			FeO	5,4E-01	abhängig vom Gesamt-Input
			CaO	3,3E-01	abhängig vom Gesamt-Input
			MgO	8,7E-02	abhängig vom Gesamt-Input
			Al ₂ O ₃	6,5E-02	abhängig vom Gesamt-Input
			SiO ₂	4,1E-01	abhängig vom Gesamt-Input
			Rest	4,7E-01	abhängig vom Gesamt-Input
			Luftemissionen:		
			Kohlendioxid	2,42E+00	berechnet über Erdgas-/Koks-Input
			Staub	8,11E-04	abhängig vom Gesamt-Input
			SO ₂	1,73E-02	abhängig vom Gesamt-Input
			NO _x	3,32E-03	abhängig vom Brennstoff-Input
			Blei	7,10E-06	korreliert mit Pb-Input
			Cadmium	4,21E-06	korreliert mit Pb-Input
			HCl	1,33E-03	abhängig vom Gesamt-Input
			PCDD/PCDF	2,90E-11	abhängig vom Brennstoff-Input
			Abwasseremissionen:		
			Blei	3,77E-07	korreliert mit Pb-Input
			Cadmium	1,89E-07	korreliert mit Pb-Input
			Arsen	1,57E-07	korreliert mit Pb-Input
			Zink	4,40E-07	korreliert mit Pb-Input
			Nickel	3,14E-07	korreliert mit Pb-Input
			AOX	1,55E-05	abhängig vom Gesamt-Input
			COD	3,87E-04	abhängig vom Gesamt-Input
			Blei in Schlacke, Luft- und Wasseremissionen	0,005	

3.4 Vergleichende Umweltbewertung

Die im vorangegangenen Kapitel erzeugten Daten können nun verwendet werden, um das Projektziel zu erreichen, Grenzmehallkonzentrationen zu bestimmen, ab der unbedingt eine hochwertige Verwertung (Metallrückgewinnung) geboten ist. Der momentan in der Versatzverordnung und der Deponieverwertungsverordnung festgelegte Wert für Blei liegt bei 10 %.

Für jeweils drei Auswertungen wird nun ein solcher Grenzmittelgehalt bestimmt:

- mit dem kumulierten Primärenergieaufwand (KEA)
- mit den aggregierten Umwelteinwirkungsbelastungen (UEBEL) mit Berücksichtigung von Flächebeanspruchung
- mit den aggregierten Umwelteinwirkungsbelastungen (UEBEL) ohne Berücksichtigung von Flächenbeanspruchung

Dazu werden in einem Diagramm die zwei Punkte der Aufbereitung von Abfällen eingetragen und dazu als Linie der Wert für die Primärproduktion des Metalls. Der Graph zwischen den zwei Punkten und die Gerade für die Primärproduktion schneiden sich und der Schnittpunkt gibt den Wert für den Metallgehalt im Abfall an, ab der eine Aufbereitung des Abfalls „umweltfreundlicher“ ist als die Herstellung von Primärmetall.

Mit zwei Punkten bei der Bestimmung der Umweltauswirkungen des Recycling ist kein Verlauf einer Kurve bestimmt. Man könnte die Punkte z.B. linear miteinander verbinden. Logischer wäre allerdings ein logarithmischer Verlauf, da die Energieaufwendungen und Umweltbelastungen umso stärker pro gewonnenes Metall ansteigen, je weniger darin im Abfall enthalten ist. Dieser Verlauf ist in den Darstellungen gewählt worden.

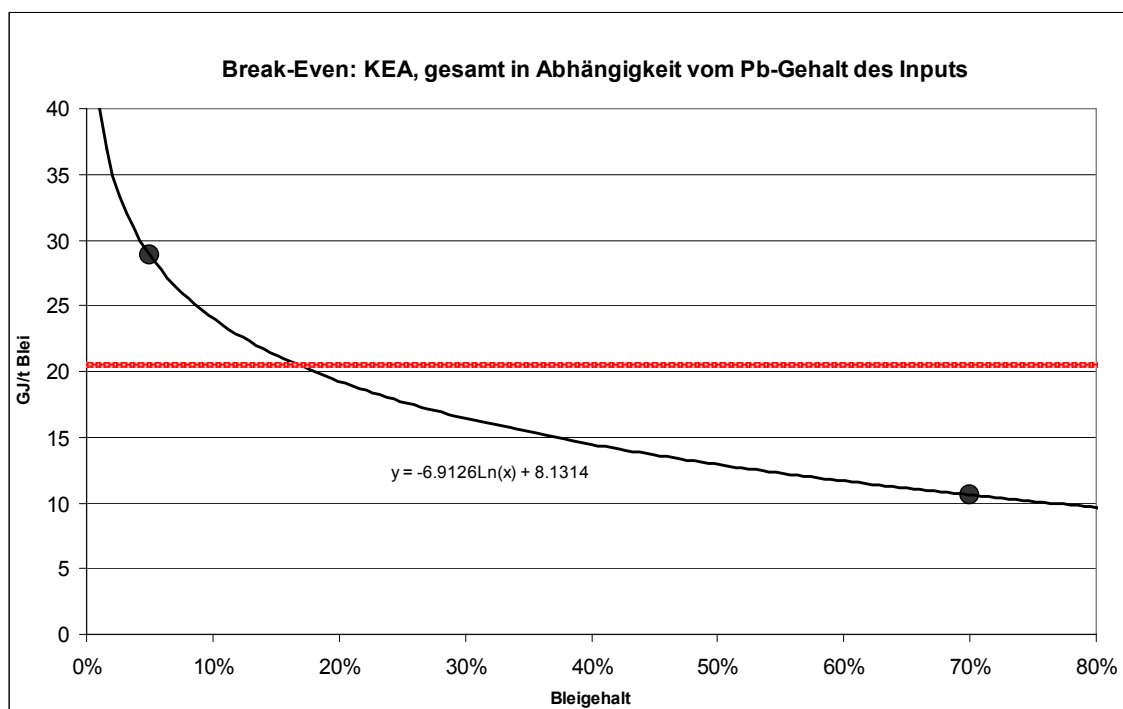


Abb. 3-3: Primärenergieaufwand (KEA) der QSL-Sekundärbleigewinnung als Funktion vom Bleigehalt des Inputs, ermittelt aus den beiden Datenpunkten für 70 % und 5 % Bleigehalt (schwarze Linie); die rote horizontale Linie repräsentiert die Primärbleiherstellung.

In der Abb. 3-3 ist die Bestimmung der Grenzkonzentration nach dem Primärenergieaufwand gewählt worden. Die Kurve schneidet den entsprechenden Wert der Primärherstellung bei 17 %.

Bei der Aggregationsmethode schließlich findet eine gleichgewichtete Zusammenfassung nach den vier Umweltschutzgütern Klima, Luft, Wasser und Fläche statt, die sich wiederum aus nationalen Umweltzielen ableiten. In der folgenden Tabelle sind die Einzelwerte des aggregierten Index (UEBEL) für das QSL-Verfahren dargestellt, nach dem sich die Linie der Primärerzeugung und die Punkte im Diagramm ergeben.

Tab. 3-9: Differenzierte und aggregierte Umwelteinwirkungsbelastungs-Ergebnisse (UEBEL) für die Primär- und QSL-Sekundärbleigewinnung (5 % und 70 % Blei-Gehalt im Input)

QSL-Verfahren UEBEL	Primär- blei	Sekundär 5% Pb-Inp.	Sekundär 70% Pb-Inp.
Klima			
CO2 Äquivalente	6,06	7,12	3,12
Luftqualität			
SO2	0,63	6,58	0,47
NOx	0,50	2,15	0,30
NH3	0,01	0,00	0,00
NMVOC	0,27	0,00	0,00
Gewässer			
AOX	0,00	1,76	0,13
Gesamt-N	0,00	0,00	0,00
Boden			
Flächenumwandlung	25,78	2,38	0,63
UEBEL-Summe	33,25	18,23	4,66
ohne Fläche	7,47	15,85	4,02

Man kann schon anhand der Zahlenwerte erkennen, dass die Flächenbeanspruchung einen großen Einfluss auf das Ergebnis hat. Das spiegelt die Realität wieder, da die Primärgewinnung von Materialien natürlich mit wesentlich bedeutenderen Eingriffen in die Fläche verbunden ist als die Gewinnung von Sekundärmetallen.

Es lässt sich erkennen, dass je nach Schadstoffemission die Sekundärmetallgewinnung mit hohen Metallgehalten durchweg Vorteile gegenüber der Primärgewinnung hat. Bei geringen Metallgehalten im Abfall schwindet dieser Vorteil.

In den nachfolgenden Diagrammen (Abb. 3-4 und Abb. 3-5) ist dieser Befund entsprechend zu erkennen. Wird – wie in Abb. 3-4 – die Fläche mit einbezogen, so dominiert die Primärmetallgewinnung und der Break-Even-Punkt wird erst bei 0,3 % Metallgehalt im Abfall erreicht.

Ohne Berücksichtigung der Flächenbeanspruchung liegt die Grenzkonzentration bei der Bleiaufbereitung nach QSL-Verfahren bei 32 %, also noch ungünstiger als bei der Berechnung mit dem Kumulierten Energieaufwand.

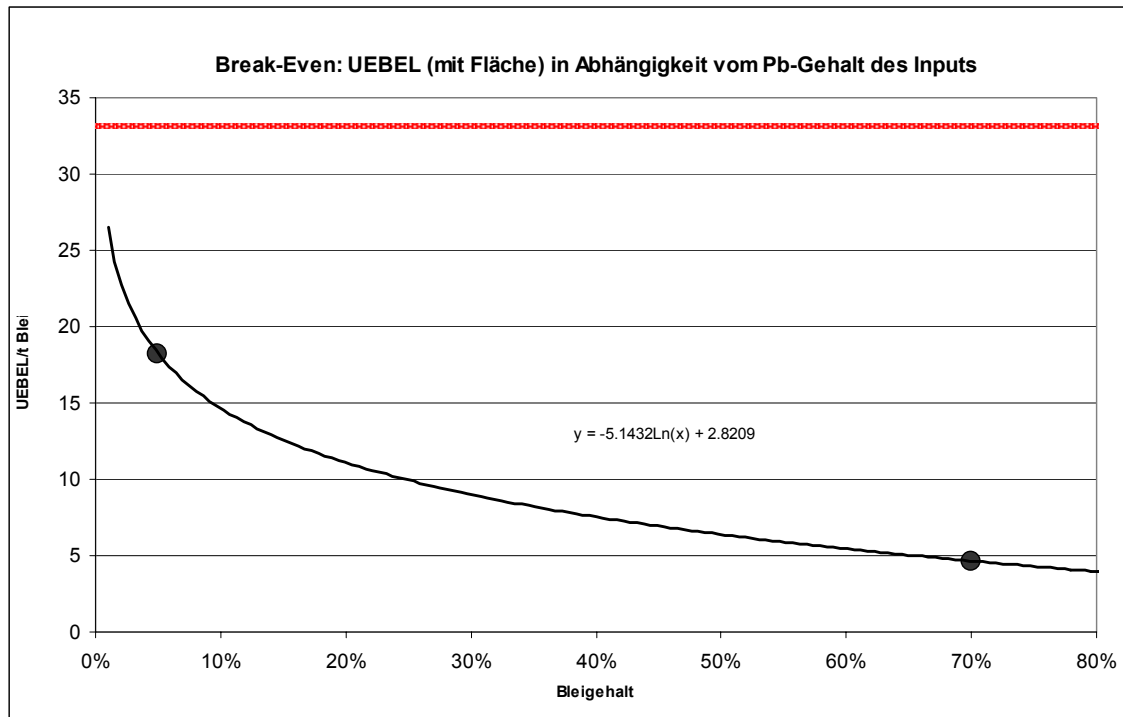


Abb. 3-4: Umwelteinwirkungsbelastung (UEBEL) mit Berücksichtigung der Flächenbeanspruchung der QSL-Sekundärbleigewinnung als Funktion vom Bleigehalt des Inputs, ermittelt aus den beiden Datenpunkten für 70 % und 5 % Bleigehalt (schwarze Linie); die rote horizontale Linie repräsentiert die Primärbleiherstellung.

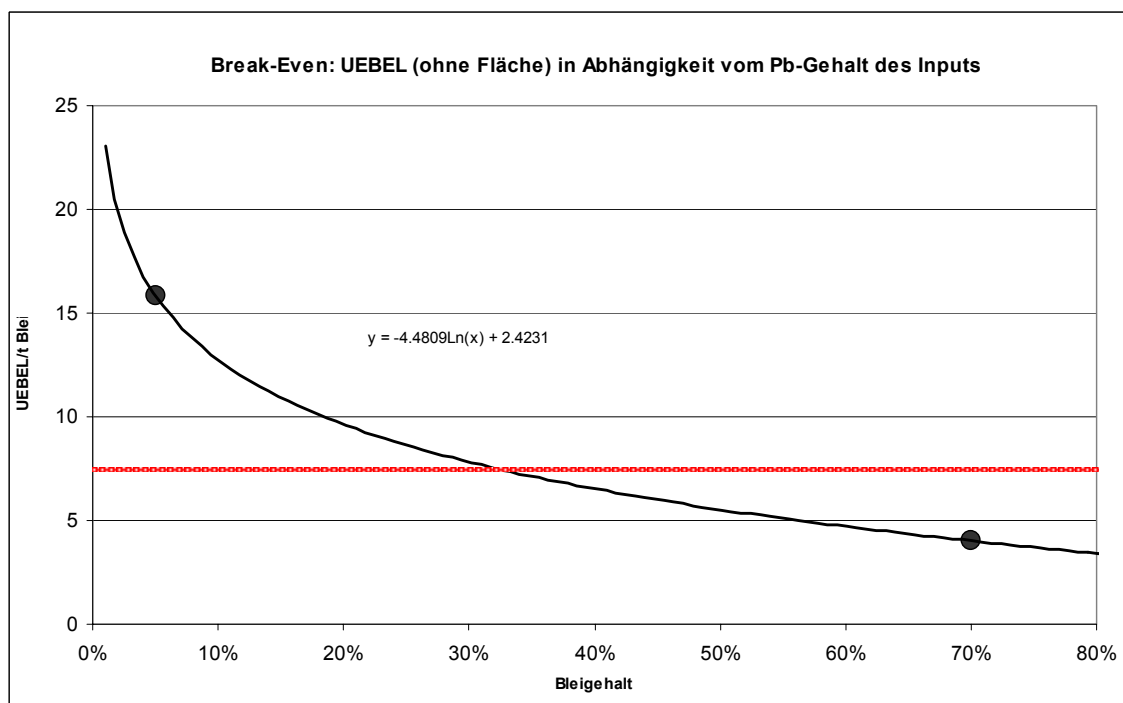


Abb. 3-5: Umwelteinwirkungsbelastung (UEBEL) ohne Berücksichtigung der Flächenbeanspruchung der QSL-Sekundärbleigewinnung als Funktion vom Bleigehalt des Inputs, ermittelt aus den beiden Datenpunkten für 70 % und 5 % Bleigehalt (schwarze Linie); die rote horizontale Linie repräsentiert die Primärbleiherstellung.

Durch die Aggregation von Umweltwirkungen oder das Ausdrücken durch eine Kennzahl wie dem KEA gehen jedoch Informationen verloren, die bei einem umweltseitigen Vergleich jedoch wichtig sein können. So spielen insbesondere Schwermetall-emissionen mit ihrer human- und ökotoxischen Wirkung eine Rolle, die gerade bei Metallerzeugungsprozessen nicht beiseite gelassen werden dürfen. Sie sollen daher separat dargestellt und ausgewertet werden.

In folgender Abb. 3-6 sind die Schwermetallemissionen und Dioxinmissionen separat für die Primärherstellung, das Recyceln bei hohen Metallgehalten und bei niedrigen Metallgehalten dargestellt. Da die Datenqualität nicht als hoch eingestuft werden kann, darf die Aussage daraus lediglich als orientierender Wert verstanden werden, der entsprechend überprüft und nachgeschärft werden muss. Achtung: es wurde eine logarithmische Skala gewählt.

Es zeigt sich, dass nach Lage der Information die Emissionen uneinheitlich zwischen Primär- und Sekundärerzeugung verteilt sind.

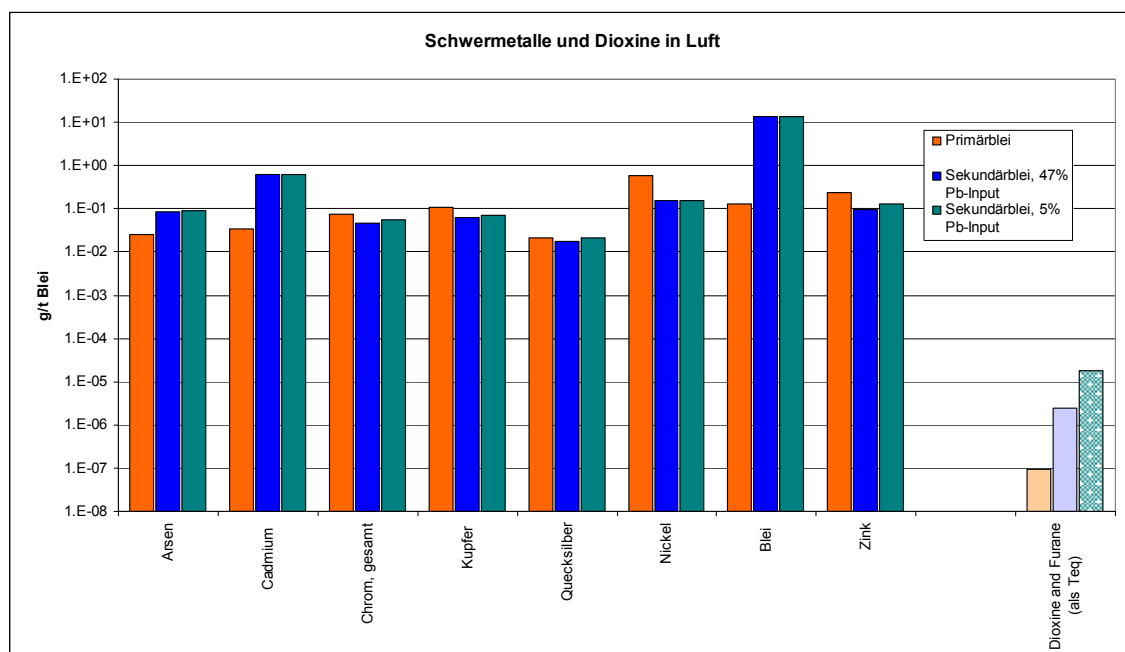


Abb. 3-6: Schwermetall- und Dioxin-Emissionen in die Luft aus der Primär- und QSL-Sekundärbleigewinnung (5 % und 70 % Blei-Gehalt im Input)
(Die Y-Achse ist logarithmisch skaliert)

Etwas ungünstiger im Vergleich zu der Primärerzeugung von Blei schneidet das KTO-Verfahren nach der vorhandenen Datenlage ab. Entsprechend hoch liegt die Grenzkonzentration nach dem Primärenergiekriterium bei 36 % (s. Abb. 3-7). Das heißt, dass das QSL-Verfahren bezogen auf die Energie etwa doppelt so effizient Blei zurückgewinnt, als das KTO-Verfahren. Damit wäre eine Bleirückgewinnung aus mineralischen Abfällen mit einem Bleigehalt unter 36 % schlechter gestellt als die Primärbleigewinnung.

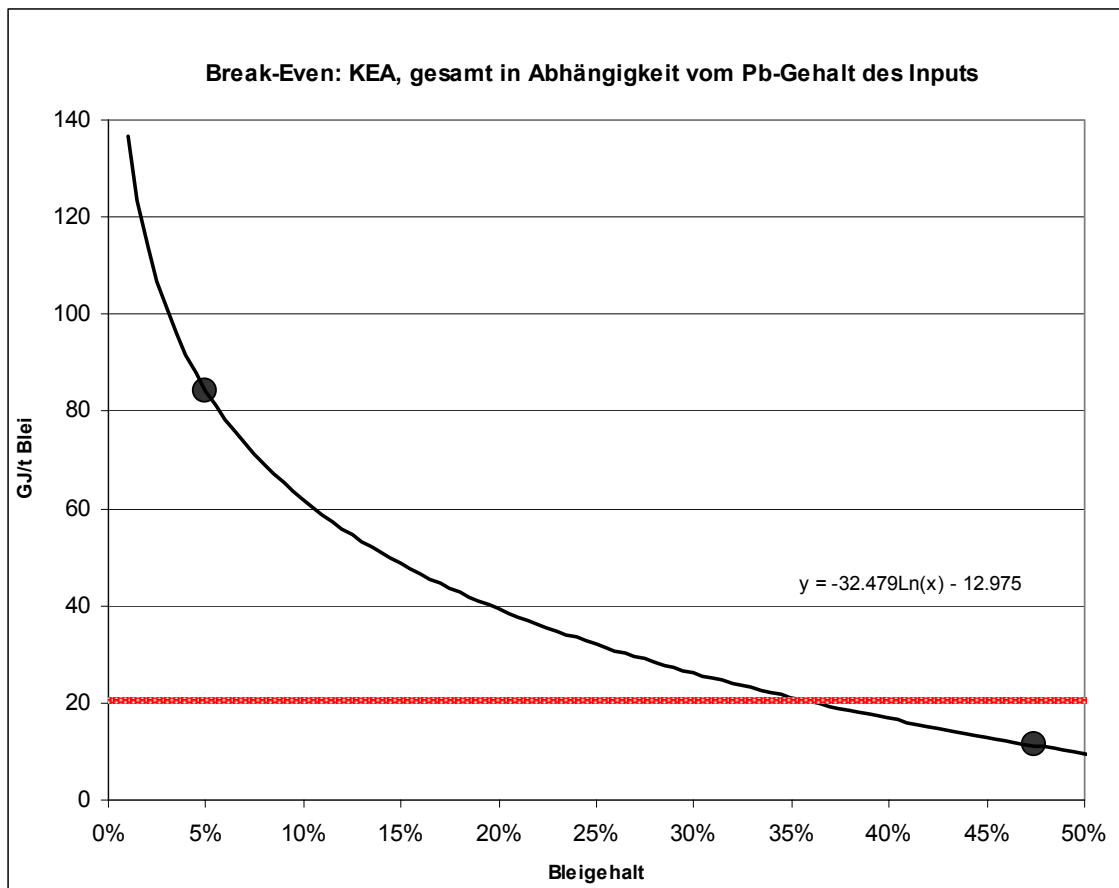


Abb. 3-7: Primärenergieaufwand (KEA) der KTO-Sekundärbleigewinnung als Funktion vom Bleigehalt des Inputs, ermittelt aus den beiden Datenpunkten für 47 % und 5 % Bleigehalt (schwarze Linie); die rote horizontale Linie repräsentiert die Primärbleiherstellung.

In der folgenden Tab. 3-10 ist nun auch für das KTO-Verfahren das aggregierte Umweltmaß der Umwelteinwirkungsbelastungen zu finden. Ebenso wie für das QSL-Verfahren sind wiederum die Flächen von hoher Bedeutung.

Tab. 3-10: Differenzierte und aggregierte Umwelteinwirkungsbelastungs-Ergebnisse (UEBEL) für die Primär- und KTO-Sekundärbleigewinnung (5 % und 47 % Blei-Gehalt im Input)

KTO-Verfahren	Primär-blei	Sekundär 5% Pb-Inp.	Sekundär 47% Pb-Inp.
UEBEL			
Klima			
CO ₂ Äquivalente	6,06	18,86	2,56
Luftqualität			
SO ₂	0,63	3,30	0,37
NO _x	0,50	1,87	0,21
NH ₃	0,01	0,35	0,03
NM _{VOC}	0,27	0,30	0,04
Gewässer			
AOX	0,00	0,01	0,00
Gesamt-N	0,00	0,07	0,01
Boden			
Flächenumwandlung	25,78	6,90	1,45
UEBEL-Summe	33,25	31,66	4,68
ohne Fläche	7,47	24,76	3,23

Bei der Berücksichtigung der Flächenbeanspruchung wird die Grenzkonzentration, ab der ein hochwertiges Recycling sinnvoll ist, bei 4,4 % festgestellt (s.Abb. 3-8).

Ohne die Berücksichtigung der Fläche liegt der Break-Even-Punkt ähnlich des Ergebnisses aus der Energiebetrachtung bei 30 % (s. Abb. 3-9).

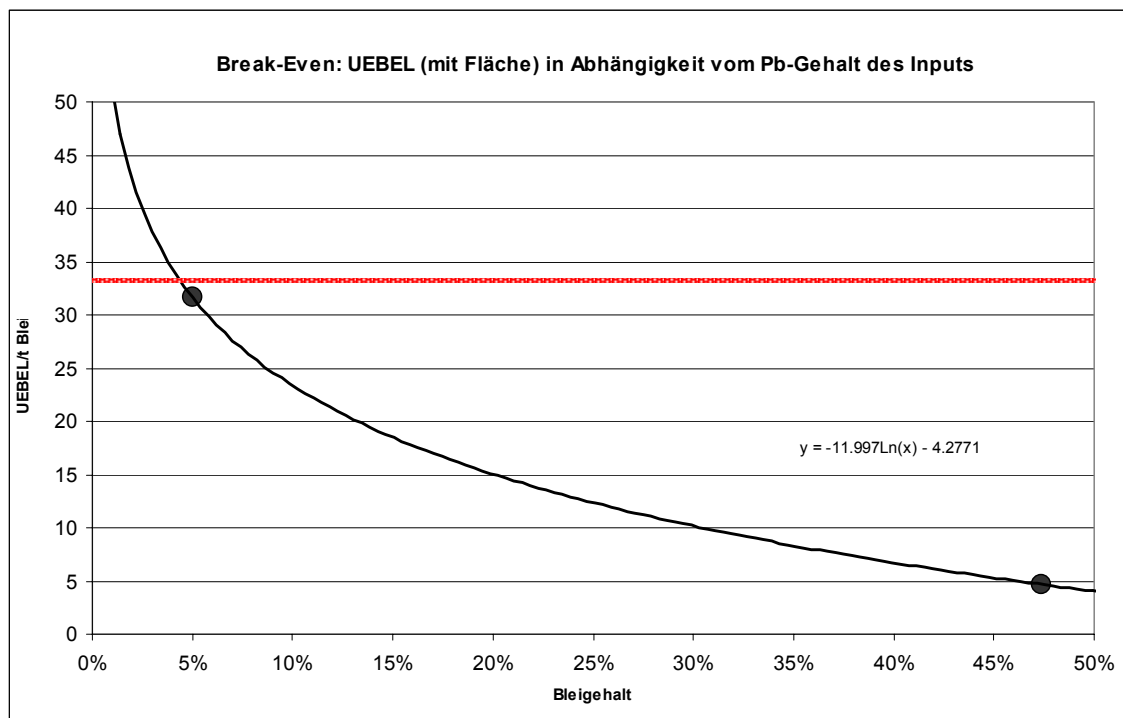


Abb. 3-8: Umwelteinwirkungsbelastung (UEBEL) mit Berücksichtigung der Flächenbeanspruchung der KTO-Sekundärbleigewinnung als Funktion vom Bleigehalt des Inputs, ermittelt aus den beiden Datenpunkten für 47 % und 5 % Bleigehalt (schwarze Linie); die rote horizontale Linie repräsentiert die Primärbleiherstellung.

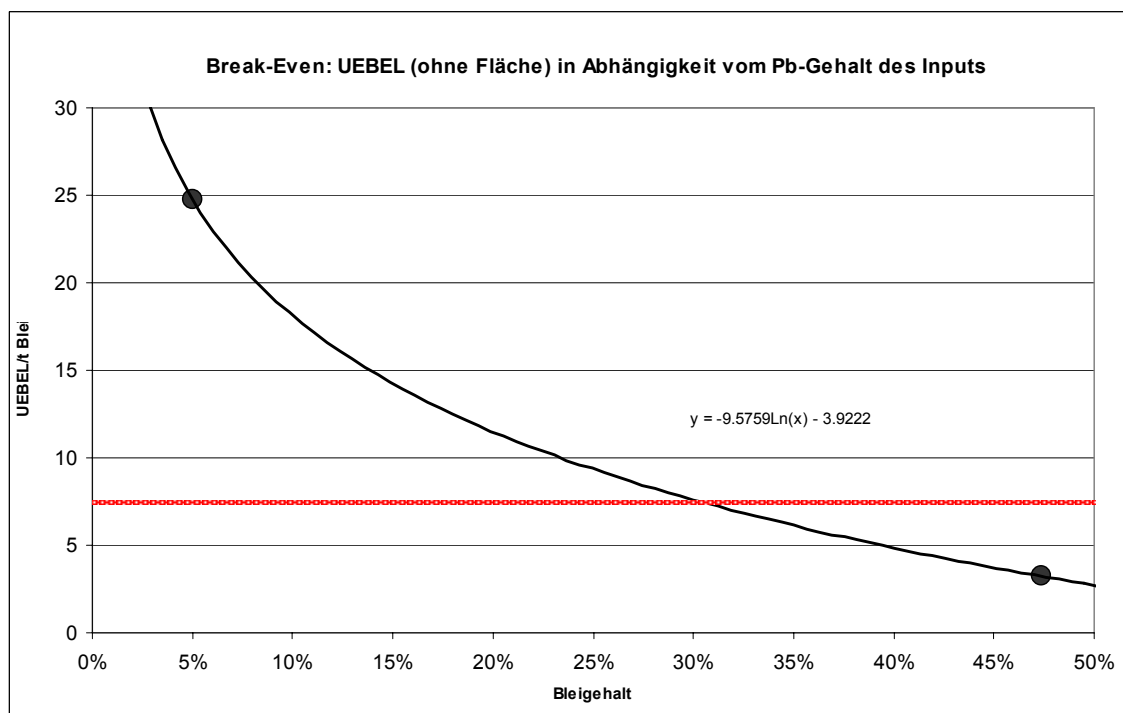


Abb. 3-9: Umwelteinwirkungsbelastung (UEBEL) ohne Berücksichtigung der Flächenbeanspruchung der KTO-Sekundärbleigewinnung als Funktion vom Bleigehalt des Inputs, ermittelt aus den beiden Datenpunkten für 47 % und 5 % Bleigehalt (schwarze Linie); die rote horizontale Linie repräsentiert die Primärbleiherstellung.

Auch bei den Schwermetallemissionen zum KTO-Verfahren zeigt sich wieder ein uneinheitliches Bild (s. Abb. 3-10), das jedoch stärker als das QSL-Verfahren beim Recycling mit niedrigen Metallgehalten schlechter liegt.

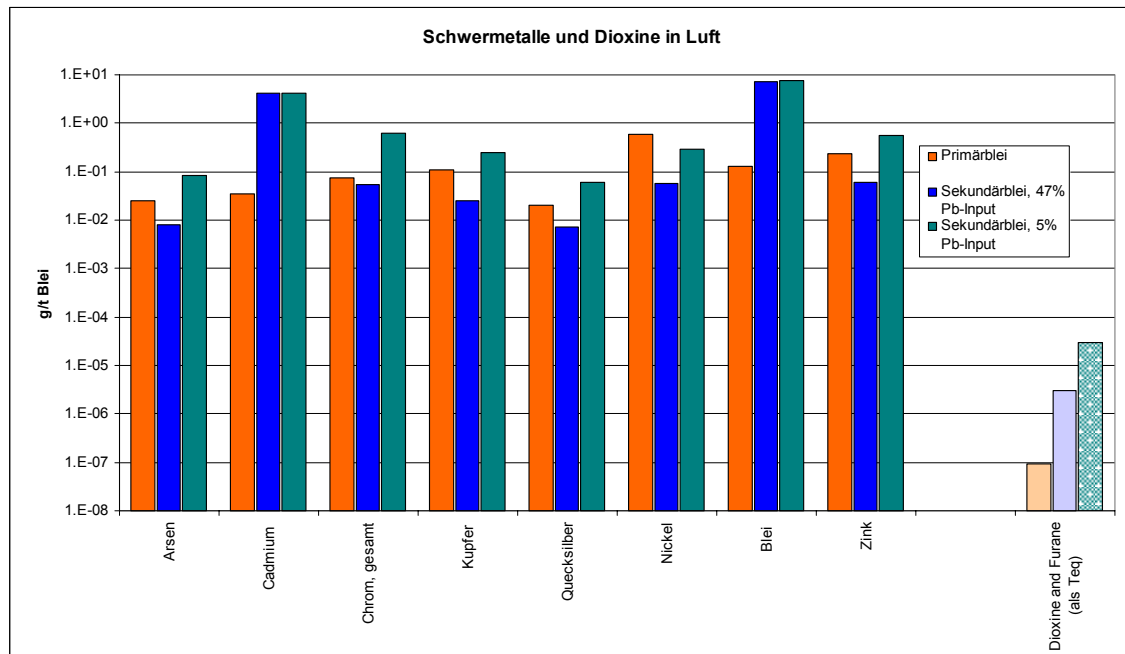


Abb. 3-10: Schwermetall- und Dioxin-Emissionen in die Luft aus der Primär- und KTO-Sekundärbleigewinnung (5 % und 47 % Blei-Gehalt im Input)
(Die Y-Achse ist logarithmisch skaliert)

Fazit:

Je nach Verfahren und Bewertungsmethode wurden die folgenden Grenzkonzentrationen bestimmt:

QSL-Verfahren:

- 17 % bei KEA
- 0,3 % bei UEBEL mit Fläche
- 32 % bei UEBEL ohne Fläche

KTO-Verfahren:

- 36 % bei KEA
- 4,4 % bei UEBEL mit Fläche
- 30 % bei UEBEL ohne Fläche

Damit ist die bisherige Grenzkonzentration von 10 % für Blei mit Blick auf alle Umweltauswirkungen streng gewählt und müsste insbesondere bei Berücksichtigung der Flächenbeanspruchung verschärft werden.

Empfehlung:

Beibehaltung der bisherigen Vorgabe von 10 %.

4 Verwertung von Chrom

Die Recherche im Rahmen des Forschungsvorhabens hat gezeigt, dass keine spezielle alleinige Chromgewinnung aus mineralischen Abfällen in Deutschland betrieben wird.

Chrom wird hauptsächlich als Legierungsbestandteil in Stahl eingesetzt und als Sekundärmaterial auch meist aus Edelstahlschrott wiedergewonnen. Beispielsweise beträgt der Chromanteil bei RHS-Stählen etwa 18 %. Die allgemeine Recyclingrate wird bei Chrom auf 15 % bis 20 % geschätzt (BGR 2004). Doch dabei handelt es sich um eine metallische Matrix und keine mineralische, wie sie für dieses Vorhaben von Bedeutung ist.

Bei der Primärgewinnung in mineralischer Form wird Chrom z.B. in Südafrika als Ferrochrom aus chromhaltigen Schlacken gewonnen. In Deutschland wird Chrom als Bestandteil der Nickel- oder Eisenrückgewinnung z.B. aus Stäuben gewonnen. Dabei ist die Chromgewinnung – bei Vorhandensein anderer Metalle – bei einem Gehalt von 8 % bis 10 % von Interesse (BUS, mündliche Mitteilung 2007)

Da keine detaillierten Informationen zur Chromgewinnung aus mineralischen Abfällen vorliegen, kann dieses Metall auch nicht auf die gleiche Art und Weise wie die anderen bearbeitet werden.

Es werden deshalb nur die grundlegenden Informationen, die zusammengetragen wurden dargestellt und ein vorläufiges Fazit gezogen.

4.1 Gewinnung von Primär-Chrom und Umweltauswirkungen

Die Umweltauswirkungen, die mit der Primärgewinnung von Chrom verbunden sind, werden in der nachfolgenden Tab. 4-1 dargestellt.

Tab. 4-1: Umweltbelastungen bei der Herstellung von 1 t Primärchrom

Umweltkennzahlen für		Chrom
Parameter		Wert
Flächenverbrauch pro t	m ² /t	5,4
Energieverbrauch		
KEA, fossil	GJ/t	340
KEA, nuklear	GJ/t	122
KEA, erneuerbar	GJ/t	142
KEA, gesamt	GJ/t	604
Belastungen durch Abgasemissionen		
Treibhauseffekt	kg CO ₂ -Äq./t	25.450
Ozonloch	g FCKW-Äq./t	1,76
Versauerung	kg SO ₂ -Äq./t	103,6
Sommersmog	kg Ethen-Äq./t	5,7
terrestrische Eutrophierung	kg PO ₄ -Äq./t	7,6
Feinstaub PM 10	kg PM ₁₀ -Äq./t	31,8
Arsen	g/t	1,2
Cadmium	g/t	0,3
Quecksilber	g/t	0,53
Nickel	g/t	
Blei	g/t	4,40
Dioxine and Furane (als Teq)	g/t	1,35E-03
Belastungen durch Abwasseremissionen		
aquatische Eutrophierung	kg PO ₄ -Äq./t	0,365
Cadmium	g/t	3,52
Quecksilber	g/t	0,16
AOX	g/t	0,17

4.2 Chromhaltige mineralische Abfälle

Mit Hilfe der Datenbank zu Abfallanalysen des Landes Nordrhein-Westfalen wurde eine Auswertung zu den erwarteten Chromgehalten in mineralischen Abfällen vorgenommen. Die nachfolgende Tab. 4-2 enthält die Auswertung.

Tab. 4-2: Schwankungsbreite von Chrom in verschiedenen Abfallarten nach AVV

Abfallart	Einheit	[N]	Minimum	Maximum	Mittelwert	Stdabw
190206 Schlämme aus der physikalisch-chemischen Behandlung ohne 190205	mg/kg	4	1.185	160.957	46.002	76.787
110109 Schlämme und Filterkuchen, die gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	226	0	300.000	29.052	47.981
100815 Filterstaub, der gefährliche Stoffe enthält	mg/kg	2	18.890	33.730	26.310	10.493
100817 Schlämme u. Filterkuchen aus d. Abgasbehandlung, d. gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	2	423	40.840	20.632	28.579
060499 Abfälle a. n. g.	mg/kg	3	10.800	28.200	18.933	8.755
100207 feste Abfälle aus der Abgasbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	89	2	155.000	16.740	37.487
060315 Metalloxide, die Schwermetalle enthalten	mg/kg	1	16.100	16.100	16.100	0
120114 Bearbeitungsschlämme, die gefährliche	mg/kg	21	12	148.000	14.907	37.669
120118 ölhaltige Metallschlämme (Schleif-, Hon-	mg/kg	21	0	170.100	10.978	37.173
190205 Schlämme a. d. physikalisch-chemischen Behandlung, d. gefährl. Stoffe enthalten	mg/kg	260	0	161.000	10.535	25.478
100208 Abfälle aus der Abgasbehandlung mit Ausnahme derjenigen, die unter 100207 fallen	mg/kg	45	2	44.940	9.239	13.675
040106 chromhaltige Schlämme, insbesondere aus der betriebseigenen Abwasserbehandlung	mg/kg	8	8	20.000	7.237	7.221
060405 Abfälle, die andere Schwermetalle enthalten	mg/kg	16	17	62.900	5.304	15.627
190204 vorgemischte Abfälle, die wenigstens einen gefährlichen Abfall enthalten	mg/kg	13	27	32.760	5.115	8.813
060602 Abfälle, die gefährliche Sulfide enthalten	mg/kg	3	1.130	8.291	5.019	3.620
100907 gefährliche Stoffe enthaltende Gießformen und -sande nach dem Gießen	mg/kg	8	14	31.800	4.690	11.106
100909 Filterstaub, der gefährliche Stoffe enthält	mg/kg	6	138	11.070	4.401	4.122
060313 feste Salze und Lösungen, die	mg/kg	17	2	21.900	4.133	6.970
160708 ölhaltige Abfälle	mg/kg	12	0	34.000	3.413	9.787
190901 feste Abfälle aus der Erstfiltration und	mg/kg	1	2.831	2.831	2.831	0
080201 Abfälle von Beschichtungspulver	mg/kg	15	7	8.850	2.402	3.194
190813 Schlämme, die gef. Stoffe aus einer anderen Behandl. von industr. Abwasser enth.	mg/kg	17	6	22.000	2.130	5.543
100202 unverarbeitete Schlacke	mg/kg	18	10	8.800	2.085	2.382

Keiner der ausgewerteten mineralischen Abfälle liegt beim Chromgehalt im Bereich der Grenzkonzentration nach Versatzverordnung von 15 %. Der höchste Mittelwert ist bei etwa 5% zu finden. Alle weiteren mit z.T. sehr niedrigen Messzahlen liegen unter 3 %.

Offensichtlich deuten die Auswertungen jedoch darauf hin, dass einzelne Abfälle innerhalb einer Schlüsselnummer durchaus hohe Chromgehalte aufweisen. Eine weitere Auswertung auf Basis der 6-er Schlüssel scheint daher wenig hilfreich.

4.3 Aufbereitungsverfahren chromhaltiger Abfälle

Chromhaltige Abfälle werden z.B. im Plasmaverfahren oder Elektroreduktionsverfahren der Firma B.U.S Metall GmbH verarbeitet.

Plasmaverfahren

Die Stahlwerkstäube, Walzenzunder sowie sonstige nickel- und chromhaltige Reststoffe werden in Containern und big bags per Schiff, Bahn oder LKW angeliefert und gelagert. Zur Vorbereitung wird der Staub in Silo zwischengelagert und analysiert. Der Staub wird mit Wasser und Schlackebildner gemischt und indirekt vorgetrocknet. Das so vorbereitete Material wird über drei Plasmageneratoren in den Ofen injiziert und geschmolzen.

Mehrmals pro Tag wird der Ofen abgestochen und Metall und Schlacke gravimetrisch getrennt. Das Metall wird entweder in Form von Granulat, bzw. größeren Blöcken an die Kunden zurückgeliefert oder auf dem freien Markt veräußert. Die Schlacke findet z.B. im Straßen- und Wegebau Einsatz. Die dabei entstehenden Abgase werden in mehreren Nachbehandlungsstufen gereinigt und als Injektionsgas in den Plasmageneratoren oder zur Energieerzeugung eingesetzt.

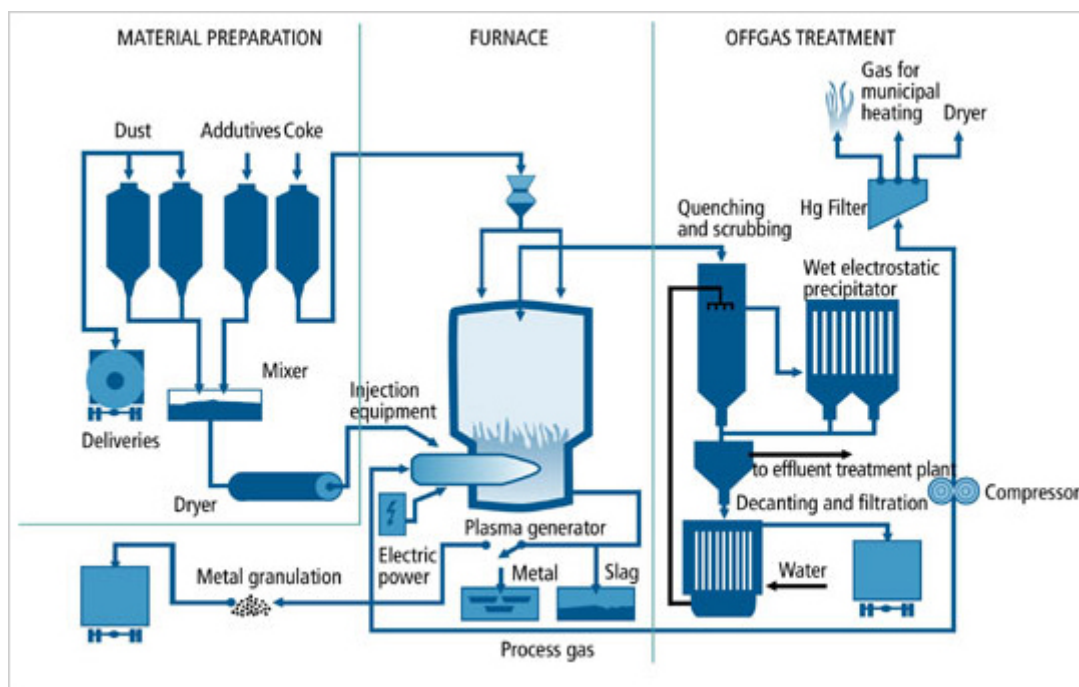


Abb. 4-1: Plasmaverfahren zur Aufbereitung chrom- und nickelhaltiger Abfälle (Quelle: B.U.S)

Elektroreduktionsverfahren

Die Stahlwerkstäube, Walzenzunder sowie sonstige chrom- und nickelhaltigen Reststoffe werden lose oder in big bags per Schiff, Bahn oder LKW angeliefert und gelagert. Die Materialien werden zunächst befeuchtet und zwischengelagert. In einem zweiten Schritt werden sie mit Additiven brikettiert und erneut gelagert. Die Briketts werden mit Koks und Schlackebildner dem Lichtbogenofen zugeführt. Mehrmals pro Tag wird der Ofen abgestochen und Metall und Schlacke gravimetrisch getrennt. Das dabei entstehende Abgas wird in mehreren Nachbehandlungsstufen gereinigt.

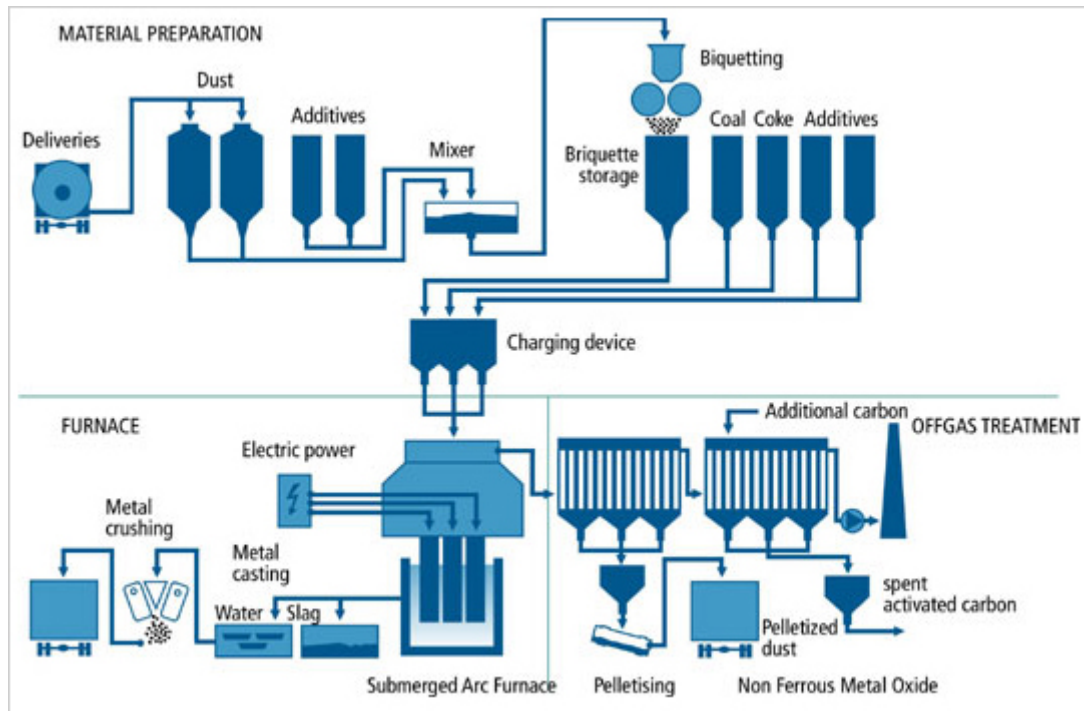


Abb. 4-2: Elektroreduktionsverfahren zur Aufbereitung chrom- und nickelhaltiger Abfälle
(Quelle: B.U.S)

4.4 Vergleichende Umweltbewertung

Da keine Auswertung analog den anderen Metallen möglich war, kann auch keine abschließende Umweltbewertung abgegeben werden.

Der Chromgehalt in Chromiten liegt zwischen 17 % und 41 % (Ecoinvent 2002). Die Herstellung über die aluminothermische Route ist sehr energieintensiv, so dass ein Recycling lohnend erscheint. Die elektrolytische Gewinnung liegt dabei nur im Bereich von 10 % bis 15 % des Energieaufwandes im Vergleich zur aluminothermischen Herstellung. Damit ist der Vergleich stark davon abhängig, mit welcher Primärerzeugung gerechnet wird.

Nach Angaben von Herrn Jäger (BUS, persönliche Mitteilung 2007) ist derzeit ein Chromgehalt von 8 % bis 10 % bei Vorhandensein anderer Metalle recyclingwürdig.

Empfehlung:

Es kann zur Zeit kein Beweis angetreten werden, dass ein Chromgehalt von unter 15 % im mineralischen Abfall umweltseitige Vorteile gegenüber der Primärgewinnung aufweist. Damit sollte der bisherige Wert beibehalten werden.

5 Verwertung von Eisen

Die Verwertung von Eisen ist von nachrangiger Relevanz, da offensichtlich nur Thyssen-Krupp ein Verfahren zur Nutzung von geringen Eisengehalten in mineralischen Abfällen entwickelt. Bei der Schwelle nach Versatzverordnung von 50 % Eisengehalt liegt der Abfall in der Größenordnung des Primärerzes und kann mit diesem verhüttet werden.

5.1 Gewinnung von Primär-Eisen und Umweltauswirkungen

Die Umweltauswirkungen, die mit der Primärgewinnung von Eisen verbunden sind, werden in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

Tab. 5-1: Umweltbelastungen bei der Herstellung von 1 t Primäreisen

Umweltkennzahlen für		Eisen
Parameter		Wert
Flächenverbrauch pro t	m ² /t	0,1
Energieverbrauch		
KEA, fossil	GJ/t	9
KEA, nuklear	GJ/t	1
KEA, erneuerbar	GJ/t	0
KEA, gesamt	GJ/t	10
Belastungen durch Abgasemissionen		
Treibhauseffekt	kg CO ₂ -Äq./t	520
Ozonloch	g FCKW-Äq./t	0,02
Versauerung	kg SO ₂ -Äq./t	4,8
Sommersmog	kg Ethen-Äq./t	0,9
terrestrische Eutrophierung	kg PO ₄ -Äq./t	0,4
Feinstaub PM 10	kg PM ₁₀ -Äq./t	5,4
Arsen	g/t	0,015
Cadmium	g/t	0,025
Quecksilber	g/t	0,087
Nickel	g/t	
Blei	g/t	3,55
Dioxine and Furane (als Teq)	g/t	9,66E-03
Belastungen durch Abwasseremissionen		
aquatische Eutrophierung	kg PO ₄ -Äq./t	0,31
Cadmium	g/t	8,98
Quecksilber	g/t	0,90
AOX	g/t	0,00

5.2 Eisenhaltige mineralische Abfälle

Mit Hilfe der Datenbank zu Abfallanalysen des Landes Nordrhein-Westfalen wurde eine Auswertung zu den erwarteten Eisengehalten in mineralischen Abfällen vorgenommen. Die nachfolgende Tab. 5-2 enthält die Auswertung.

Tab. 5-2: Schwankungsbreite von Eisen in verschiedenen Abfallarten nach AVV

Abfallart	Einheit	[N]	Minimum	Maximum	Mittelwert	Stdabw
120115 Bearbeitungsschlämme mit Ausnahme derjenigen, die unter 12 01 14 fallen	mg/kg	1	799.000	799.000	799.000	0
100208 Abfälle aus der Abgasbehandlung mit Ausnahme derjenigen, die unter 100207 fallen	mg/kg	7	29.600	742.000	507.657	295.364
070708 andere Reaktions- und Destillationsrückstände	mg/kg	4	60	637.000	319.015	261.220
120118 ölhaltige Metallschlämme (Schleif-, Hon- und Läppschlämme)	mg/kg	13	1.760	850.000	286.543	340.332
120102 Eisenstaub und -teile	mg/kg	6	66.470	899.000	272.245	314.919
110202 Schlämme aus der Zink-Hydrometallurgie (einschließlich Jarosit, Goethit)	mg/kg	1	249.000	249.000	249.000	0
060405 Abfälle, die andere Schwermetalle enthalten	mg/kg	10	24.300	675.300	223.900	206.085
120114 Bearbeitungsschlämme, die gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	12	980	694.000	211.833	244.643
130502 Schlämme aus Öl-/Wasserabscheidern	mg/kg	3	1.343	586.000	206.881	328.715
100207 feste Abfälle aus der Abgasbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	83	2.000	742.000	198.976	196.218
120117 Strahlmittelabfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 12 01 16 fallen	mg/kg	11	106	800.000	194.955	239.053
190902 Schlämme aus der Wasserklärung	mg/kg	10	17.155	368.000	182.416	133.897
070108 andere Reaktions- und Destillationsrückstände	mg/kg	4	4	310.000	178.951	129.804
110108 Phosphatierschlämme	mg/kg	30	180	371.000	177.223	111.400
100202 unverarbeitete Schlacke	mg/kg	15	3.800	590.000	159.131	148.449
160602 Ni-Cd-Batterien	mg/kg	1	151.300	151.300	151.300	0
110105 saure Beizlösungen	mg/kg	2	120.000	150.000	135.000	21.213
120116 Strahlmittelabfälle, die gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	37	1	770.000	118.969	205.704
070208 andere Reaktions- und Destillationsrückstände	mg/kg	7	1	728.470	113.595	272.203
190205 Schlämme a. d. physikalisch-chemischen Behandlung, d. gefährl. Stoffe enthalten	mg/kg	108	10	507.000	103.726	108.051
191003 Schredderleichtfraktionen und Staub, die gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	53	5	333.000	102.371	99.253
190814 Schlämme aus einer anderen Behandlung von industriellem Abwasser ohne 190813	mg/kg	65	0	318.000	94.960	77.395
150202 Aufsaug- u. Filtermaterial; Ölfilter a.n.g., Schutzkleid. verunr. d. gef. Stoffe	mg/kg	11	5	420.000	79.861	152.309
100115 Aschen, Schlacken und Kesselstaub aus der Abfallmitverbrennung ohne 100104	mg/kg	3	3.000	181.000	72.967	94.909
100903 Ofenschlacke	mg/kg	16	4.400	471.000	69.591	112.408
061199 Abfälle a. n. g.	mg/kg	4	2.626	210.000	68.132	97.619
050699 Abfälle a. n. g.	mg/kg	4	33.600	110.000	67.900	37.109
110109 Schlämme und Filterkuchen, die gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	134	1	580.000	63.262	85.305
190112 Rost- u. Kesselaschen, Schlacken m. Ausnahme derjenigen, die unter 190111 fallen	mg/kg	19	18.000	230.000	62.967	46.292
161105 Auskleid. u. feuerf. Materialien a. nichtmetallurg. Prozessen, gef. Stoffe enth.	mg/kg	4	3.000	211.000	58.900	101.477
080113 Farb- o. Lackschlämme, organ. Lösemittel o. andere gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	6	1	240.000	48.317	94.416
010407 Abfälle m. gef. Stoffen a. physik.-chem. Verarb. nichtmetallhalt. Bodenschätze	mg/kg	27	24.040	76.315	47.481	13.580
100906 Gießformen u. -sande vor dem Gießen mit Ausnahme derjenigen, d. u. 100905 fallen	mg/kg	2	29.000	57.000	43.000	19.799

5.3 Aufbereitungsverfahren eisenhaltiger Abfälle

Die Thyssen Krupp AG bewirbt eine neue Technologie zum Eisenrecycling aus eisenhaltigen Stäuben und Schlacken mit Hilfe eines Schachtofens. Das Verfahren arbeitet im Pilotverfahren und es sei aus einem Artikel der Thyssen Krupp AG zitiert:

Recyclingwunder: Ein neuer Schachtofen wandelt Reststoffe in hochwertiges Roheisen um.

Ressourcen schonen und Abfall vermeiden. Beides ist der ThyssenKrupp Steel AG mit ihrem neuen Schachtofen, dem "OxiCup Shaft Furnace" gelungen. Ein Pioniertrupp von 35 Mitarbeitern arbeitet seit 1999 an der Neuentwicklung einer der modernsten Recyclinganlagen der Welt. Im Ofen wird aus eisenhaltigen Stäuben, Schrotten und Schlacken hochwertiges Roheisen gewonnen, das direkt in die eigenen Arbeitskreisläufe zurückgeführt wird. Die Recyclingquote liegt damit bei 99 Prozent, und das Unternehmen muss weniger Erze aus Übersee einkaufen. Rohstoff für den Ofen sind große schwarze, sechseckige Steine. Hergestellt sind sie aus den sogenannten Gicht- und Stahlwerkstäuben. Diese bleiben zurück, wenn die Luft bei der Roheisen- und Stahlherstellung gefiltert wird. Doch Staub allein lässt sich in dem Ofen nicht verarbeiten. Deswegen hat das Team ein Verfahren entwickelt, mit dem sich aus den Stäuben Agglomeratsteine herstellen lassen. Bis klar war, welche Größe und Festigkeit die Steine haben müssen und wie viel Sauerstoff im Ofen zugeführt werden muss, gab es einige Versuchsschleifen. Doch der Aufwand hat sich gelohnt; die Investition von rund 25 Millionen Euro ist gut angelegt. Das im "OxiCup" entstehende Gas wird dem eigenen Kraftwerk zugeführt, die entstehende Schlacke im Strassenbau verwendet. Und weil rund fünf Prozent der Tagesproduktion an Roheisen jetzt aus dem neuen Schachtofen kommt, muss weniger auf der "klassischen" Hochofenroute erzeugt werden. Das senkt die CO₂-Emissionen um bis zu 200.000 Tonnen jährlich.

(Quelle: ThyssenKrupp 2007)

5.4 Vergleichende Umweltbewertung

Da Thyssen-Krupp die Anlage ausschließlich für eigene Materialströme betreibt und auch sehr vertraulich mit Informationen zu diesem Verfahren umgeht, gibt es zur Zeit keinen Ansatz, eine detailliertere Betrachtung anzuschließen.

Empfehlung:

Es ist keine Veränderung an der bestehenden Grenzkonzentration von 50 % für Eisenrecycling aus mineralischen Matrices vorzunehmen.

6 Verwertung von Kupfer

6.1 Gewinnung von Primär-Kupfer und Umweltauswirkungen

Die weltweiten Vorräte an Kupfer werden mit 480 Millionen t angegeben. Chile allein verfügt dabei über etwa ein Drittel aller Kupferreserven. Neben Chile haben eine Reihe weiterer Länder wie die USA, Indonesien, Mexiko und Peru noch große Vorkommen.

Im Jahr 2006 wurden über 15 Millionen t Kupfer gefördert, wobei das bedeutendste Förderland Chile mit 5,4 Millionen t war. Weitere wichtige Förderländer waren die USA, Peru, Australien und Indonesien. Die Statistik des US Geological Survey (USGS 2007) gibt einen Überblick:

Tab. 6-1: Welt-Produktion und Reserven an Kupfer (in 1000 t)

World Mine Production, Reserves, and Reserve Base: Official reserves reported by Poland include properties being considered for future development.				
	Mine production		Reserves⁷	Reserve base⁷
	2005	2006^e		
United States	1,140	1,220	35,000	70,000
Australia	927	950	24,000	43,000
Canada	567	600	9,000	20,000
Chile	5,320	5,400	150,000	360,000
China	755	760	26,000	63,000
Indonesia	1,070	800	35,000	38,000
Kazakhstan	402	430	14,000	20,000
Mexico	429	380	30,000	40,000
Peru	1,010	1,050	30,000	60,000
Poland	523	525	30,000	48,000
Russia	700	720	20,000	30,000
Zambia	436	540	19,000	35,000
Other countries	1,720	1,920	60,000	110,000
World total (rounded)	15,000	15,300	480,000	940,000

Quelle: USGS, 2007

Im Jahr 2005 hat in Deutschland nur die Norddeutsche Affinerie als einzige Kupferhütte Konzentrate eingeführt und verarbeitet. Insgesamt wurden 1,15 Millionen t Kupferkonzentrat eingeführt mit einem geschätzten Kupferinhalt von 345.000 t. Ein großer Teil davon wurde aus Chile eingeführt. Inklusive Kupfer aus Sekundärquellen wurde 2005 in Deutschland 639.000 t Raffinadekupfer erzeugt.

Desweiteren wurden etwas über 470.000 t an Rohkupfer eingeführt und in Deutschland verarbeitet. Weiterhin wurden 430.000 t an Abfällen und Schrott, sowie fast 50.000 t an kupferhaltigen Aschen und Schlacken eingeführt. Dem gegenüber steht jedoch ein Export an Kupferabfällen und Schrott in Höhe von 440.000 t, was das hohe Handelsvolumen des Abfallbereichs aufzeigt.

Der Bedarf an Raffinadekupfer in Deutschland ist mit 1,1 Millionen Tonnen gleichbleibend hoch und bedeutet mit 6,7 % weltweit einen vierten Platz hinter China, USA und Japan.

In der folgenden Tab. 6-2 sind die Importe von Kupferkonzentrat und anderen Kupferprodukten nach Deutschland und die Anteile der wichtigsten Lieferländer nach der Statistik der BGR (BGR 2006) dargestellt:

Tab. 6-2: Deutsche Importe von Kupfer und kupferhaltigen Rohstoffen in den Jahren 2002 bis 2005 und Hauptlieferländer

METALLE	Importe Deutschland				Lieferländer (Importanteile > 5 %)	
	2002	2003	2004	2005		
Kupfer						
Erz & Konzentrat (1.000 t)	1.037	880	1.142	1.149	Chile	35,9
					Peru	18,5
					Argentinien	17,5
					Papua/Neuguinea	8,6
					Indonesien	6,9
					Brasilien	6,2
Aschen & Rückstände, Cu-haltig	58.484	54.418	49.837	47.524	Italien	24,3
					Ukraine	14,6
					Niederlande	12,2
					USA	7,7
					Schweiz	6,9
Matte, Zementkupfer	3.029	33.897	15.086	27.618	Brasilien	58,3
					Chile	18,3
					Rumänien	12,2
Metall, unraff. Kupfer	38.455	17.319	11.635	36.671	Armenien	25,9
					Chile	16,3
					Peru	12,7
					Namibia	10,4
					Mexiko	5,5
					Kongo (Zaire)	5,4
Metall, raff. Kupfer, nicht legiert (1.000 t)	491	534	644	625	Rußland	36,3
					Chile	22,9
					Polen	16,1
					Belgien	8,0
Legierungen	27.312	36.729	26.055	26.657	Großbritannien	22,5
					Belgien	15,8
					Polen	14,9
					Niederlande	7,1
					Spanien	6,0
Abfälle & Schrott	466.297	393.548	500.748	432.147	Frankreich	15,5
					Niederlande	10,4
					Großbritannien	8,9
					Schweiz	8,3
					Österreich	5,8
					Italien	5,2

Kupfer wird aus abbauwürdigen Lagerstätten meist im Tagebau abgebaut. Es kommt mehrheitlich als Kupferkies (CuFeS_2) oder Kupferglanz (Cu_2S) vor, seltener auch als Bornit (Cu_5FeS_4). Kupfererz wird mit einem Kupfergehalt ab ca. 0,5 % abgebaut. Es ist oft mit Nickel, Molybdän und Metallen der Platingruppe vergesellschaftet und wird zusammen mit diesen gewonnen. Nach dem Abbau wird das Kupfererzkonzentrat zunächst mit Klassier- und Flotationstechniken zu Konzentraten angereichert. Anschließend wird das Konzentrat in Öfen verarbeitet, wobei die Eisenbestandteile oxidieren und verschlacken. Diese Schlacke kann dann abgezogen werden und man erhält Kupferstein (hauptsächlich Cu_2S) mit einem Kupfergehalt von bis zu 70 %.

Der Kupferstein wird in einem Konverter noch glutflüssig unter hohen Temperaturen mit Sauerstoff behandelt, so dass das verbliebene Eisen zu Eisenoxid reagiert und verschlackt wird (Schlackeblasen).

Es entsteht Rohkupfer, das anschließend noch elektrolytisch raffiniert werden muss, um ausreichend hohe Qualitäten mit Kupfergehalten von 99,9 zu erreichen. Das unreine Kupfer ist die Anode, von der das Kupfer als Ion zur Kathode wandert und sich dort mit der gewünschten Reinheit niederschlägt.

Die Umweltkennzahlen zur Herstellung von 1 t Primärkupfer sind der folgenden Tabelle zu entnehmen:

Tab. 6-3: Umweltkennzahlen zur Herstellung von 1 t Primärkupfer

Umweltkennzahlen für		Kupfer
Parameter		Wert
Flächenverbrauch pro t	m ² /t	20,4
Energieverbrauch		
KEA, fossil	GJ/t	38
KEA, nuklear	GJ/t	11
KEA, erneuerbar	GJ/t	13
KEA, gesamt	GJ/t	62
Belastungen durch Abgasemissionen		
Treibhauseffekt	kg CO ₂ -Äq./t	2.917
Ozonloch	g FCKW-Äq./t	0,23
Versauerung	kg SO ₂ -Äq./t	477,7
Sommersmog	kg Ethen-Äq./t	20,8
terrestrische Eutrophierung	kg PO ₄ -Äq./t	10,4
Feinstaub PM 10	kg PM ₁₀ -Äq./t	57
Arsen	g/t	907
Cadmium	g/t	317
Quecksilber	g/t	2,0
Nickel	g/t	
Blei	g/t	2.265
Dioxine and Furane (als Teq)	g/t	6,90E-04
Belastungen durch Abwasseremissionen		
aquatische Eutrophierung	kg PO ₄ -Äq./t	0,145
Cadmium	g/t	1,078
Quecksilber	g/t	0,104
AOX	g/t	0,144

Die Angaben zu Umweltbelastungen wurden hauptsächlich aus Krauss 1999, Rentz 1999, Ayres 2002 sowie dem Nichteisenmetall-BREF entnommen. Die Daten stellen eine Situation dar, die aus einer Kuppelproduktion mit Molybdän auf einer wertmäßigen Basis berechnet wurden.

6.2 Kupferhaltige mineralische Abfälle

Eine Auswertung von Abfällen und deren Kupfergehalt mit den entsprechenden Schlüsselnummern der Abfallverzeichnisverordnung (AVV) ist in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tab. 6-4: Schwankungsbreiten von Kupfer in verschiedenen Abfallarten nach AVV

Abfallart	Einheit	[N]	Minimum	Maximum	Mittelwert	Stdabw
100607 Schlämme und Filterkuchen aus der Abgasbehandlung	mg/kg	4	2.600	65.000	38.650	27.212
110109 Schlämme und Filterkuchen, die gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	231	1	670.400	33.230	98.234
060315 Metalloxide, die Schwermetalle enthalten	mg/kg	1	24.900	24.900	24.900	0
191003 Schredderleichtfraktionen und Staub, die gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	180	0	409.800	21.268	50.070
100906 Gießformen u. -sande vor dem Gießen mit Ausnahme derjenigen, d. u. 100905 fallen	mg/kg	3	6	57.000	19.004	32.905
120114 Bearbeitungsschlämme, die gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	19	100	300.000	18.296	68.511
161103 andere Auskleid. u. feuerf. Material. a. metallurg. Prozessen, gef. Stoffe enth.	mg/kg	8	0	133.000	17.148	46.816
190205 Schlämme a. d. physikalisch-chemischen Behandlung, d. gefährl. Stoffe enthalten	mg/kg	241	1	550.000	13.779	46.895
070308 andere Reaktions- und Destillationsrückstände	mg/kg	3	4	39.000	13.109	22.423
100401 Schlacken (Erst- und Zweitschmelze)	mg/kg	3	160	28.250	9.903	15.899
060499 Abfälle a. n. g.	mg/kg	3	6.010	14.110	9.733	4.089
060404 quecksilberhaltige Abfälle	mg/kg	3	460	25.500	8.987	14.304
110203 Abfälle aus der Herstellung von Anoden für wässrige elektrolytische Prozesse	mg/kg	4	13	32.982	8.323	16.440
191005 andere Fraktionen, die gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	20	19	20.090	7.284	5.466
100309 schwarze Krätzen aus der Zweitschmelze	mg/kg	1	7.100	7.100	7.100	0
160803 gebr. Katalysatoren, d. Übergangsmetalle o. deren Verbindungen enthalten, a.n.g.	mg/kg	6	9	31.390	6.960	12.650
060405 Abfälle, die andere Schwermetalle enthalten	mg/kg	20	7	94.141	6.021	20.821
190814 Schlämme aus einer anderen Behandlung von industriellem Abwasser ohne 190813	mg/kg	82	0	444.200	5.786	49.022
100315 Abschaum, entzündl. oder mit Wasser entzündl. Gase in gefährlicher Menge abgibt	mg/kg	3	0	10.000	5.600	5.107
110202 Schlämme aus der Zink-Hydrometallurgie (einschließlich Jarosit, Goethit)	mg/kg	3	98	11.000	5.366	5.460
100308 Salzschlacken aus der Zweitschmelze	mg/kg	3	4.095	7.263	5.326	1.698
191204 Kunststoff und Gummi	mg/kg	4	2	17.800	4.635	8.783
190117 Pyrolyseabfälle, die gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	9	380	9.257	3.871	2.482
120118 ölhaltige Metallschlämme (Schleif-, Hon- und Läppschlämme)	mg/kg	22	0	40.900	3.456	8.973
120105 Kunststoffspäne und -drehspäne	mg/kg	17	3	38.000	3.444	9.550
190111 Rost- und Kesselaschen sowie Schlacken, die gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	24	67	43.540	3.392	8.889
190112 Rost- u. Kesselaschen, Schlacken m. Ausnahme derjenigen, die unter 190111 fallen	mg/kg	115	3	65.450	3.011	8.675
161101 Auskleid. u. feuerf. Mat. auf C-Basis a. metallurg. Prozessen, gef. Stoffe enth.	mg/kg	7	0	9.920	2.622	3.664
100501 Schlacken (Erst- und Zweitschmelze)	mg/kg	2	2.200	3.000	2.600	566
190813 Schlämme, die gef. Stoffe aus einer anderen Behandl. von industr. Abwasser enth.	mg/kg	17	1	34.800	2.396	8.365
100402 Krätzen und Abschaum (Erst- und Zweitschmelze)	mg/kg	2	40	4.400	2.220	3.083
190114 Filterstaub mit Ausnahme desjenigen, die unter 19 01 13 fällt	mg/kg	10	172	9.020	2.187	2.767
100506 Schlämme und Filterkuchen aus der Abgasbehandlung	mg/kg	1	2.100	2.100	2.100	0
070499 Abfälle a. n. g.	mg/kg	1	1.880	1.880	1.880	0

Ausgehend von den 6er Abfallschlüsseln nach der Abfallverzeichnisverordnung (AVV) wurden die Mittelwerte, das Minimum und das Maximum des Kupfergehaltes abgefragt. Die Aufstellung wurde nach dem mittleren Kupfergehalt sortiert. Die Angaben sind in mg/kg.

Nach der Versatzverordnung dürfen Abfälle mit einem Kupfergehalt über 1 %, also 10.000 mg/kg nicht zur Verwertung auf obertägigen Deponien oder im Untertageversatz verwendet werden. Nach der Auswertung kommt das Kriterium für 9 Abfallarten in Betracht. Bezieht man sich auf den Maximalwert, so sind es fast 20 Abfallschlüssel, die über dem Versatzverordnungskriterium liegen.

Um einen besseren Überblick über die Herkünfte der Abfälle zu erhalten, wurde die Auswertung noch einmal geordnet nach den Rubriken der Abfallschlüssel wiederholt. Für die wichtigsten Abfallschlüssel der Gruppen 6 und 7 (Abfälle aus chemischen Prozessen) Gruppe 10 (Anorganische Abfälle aus thermischen Prozessen) mit allen metallurgischen Prozessen, der Gruppen 11 und 12 mit Prozessen der Oberflächenbearbeitung (z.B. Galvanisieren) und der Gruppe 19 (Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen) wurden die relevanten Abfallarten mit ihren jeweiligen Kupfergehalten dargestellt.

Tab. 6-5: Schwankungsbreiten von Kupfer in verschiedenen Abfallarten nach AVV, geordnet nach Rubriken der Abfallschlüssel

Abfallart	Einheit	[N]	Minimum	Maximum	Mittelwert	Stdabw
06 - 07 Abfälle aus chemischen Prozessen						
060404 quecksilberhaltige Abfälle	mg/kg	3	460,0	25.500,0	8.986,6667	14.303,5147
060405 Abfälle, die andere Schwermetalle enthalten	mg/kg	20	7,0	94.141,0	6.021,08	20.820,6082
060499 Abfälle a. n. g.	mg/kg	3	6.010,0	14.110,0	9.732,6667	4.089,4916
070308 andere Reaktions- und Destillationsrückstände	mg/kg	3	3,5	39.000,0	13.108,8333	22.422,9771
10 Abfälle aus thermischen Prozessen						
100308 Salzschlacken aus der Zweitschmelze	mg/kg	3	4.095,0	7.263,0	5.326,3333	1.697,6977
100315 Abschaum, entzündl. oder mit Wasser entzündl. Gase in gefährlicher Menge abgibt	mg/kg	3	0,31	10.000,0	5.600,1033	5.106,6882
100401 Schlacken (Erst- und Zweitschmelze)	mg/kg	3	160,0	28.250,0	9.903,3333	15.898,9004
100607 Schlämme und Filterkuchen aus der Abgasbehandlung	mg/kg	4	2.600,0	65.000,0	38.650,0	27.211,9459
100906 Gießformen u. -sande vor dem Gießen mit Ausnahme derjenigen, d. u. 100905 fallen	mg/kg	3	5,57	57.000,0	19.004,0567	32.905,4522
11 - 12 Chemischen Oberflächenbearbeitung von Metallen; Nichteisen-Hydrometallurgie; Formgebung						
110109 Schlämme und Filterkuchen, die gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	231	0,5	670.400,0	33.230,2239	98.233,9285
110203 Abfälle aus der Herstellung von Anoden für wässrige elektrolytische Prozesse	mg/kg	4	13,0	32.982,0	8.322,75	16.439,896
120105 Kunststoffspäne und -drehspäne	mg/kg	17	3,0	38.000,0	3.444,1176	9.549,8029
120114 Bearbeitungsschlämme, die gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	19	100,0	300.000,0	18.295,7895	68.510,6494
120118 ölhaltige Metallschlämme (Schleif-, Hon- und Läppschlämme)	mg/kg	22	0,13	40.900,0	3.456,3241	8.973,2196
Abfälle, die nicht anderswo im Verzeichnis aufgeführt sind						
160803 gebr. Katalysatoren, d. Übergangsmetalle o. deren Verbindungen enthalten, a.n.g.	mg/kg	6	9,0	31.390,0	6.960,3667	12.650,1241
161103 andere Auskleid. u. feuerf. Material. a. metallurg. Prozessen, gef. Stoffe enth.	mg/kg	8	0,05	133.000,0	17.147,6313	46.816,487
19 Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen						
190205 Schlämme a. d. physikalisch-chemischen Behandlung, d. gefährl. Stoffe enthalten	mg/kg	241	1,0	550.000,0	13.779,1646	46.894,7902

Trotz schlechter statistischer Basis wird aber deutlich, dass kupferhaltige Abfälle mit einer mineralischen Matrix eine Gruppe sind, die im Sinne der hier bearbeiteten Fragestellung zu beachten ist.

Nach Statistischem Bundesamt (Fachserie 19) waren an Abfällen aus der thermischen Kupfermetallurgie (AVV 10 06) für das Jahr 2001 nur 300 t als Aufkommen verzeichnet worden. Eine Potenzialabschätzung muss daher weitere Abfallschlüsselnummern auf 6er Schlüsselbasis berücksichtigen.

6.3 Aufbereitungsverfahren kupferhaltiger Abfälle

Die Norddeutsche Affinerie AG (NA) zusammen mit der Tochter Hüttenwerke Kayser in Lünen ist der nach eigenen Angaben größte Verarbeiter von kupferbasierten, komplexen Sekundärrohstoffen. Im Vordergrund steht die Gewinnung von raffiniertem Kupfer sowie von Edelmetall-, Zinn-, Nickel- und Zinkprodukten. Es ist nach dem bisherigen Stand der Recherchen auch der einzige Anbieter, der kupferhaltige mineralische Abfälle verwerten kann. In der Abb. 6-1 sind Materialien aufgelistet, die nach Angaben der NA AG an ihren Standorten verwertet werden können.

ANNAHME VON MATERIALIEN ZUR VERARBEITUNG BZW. VERWERTUNG :	
Nachfolgend eine Kurzbeschreibung der in den Verhüttungsprozessen einsetzbaren Materialgruppen. Eine detaillierte Auflistung genehmigter Materialien entsprechend der Abfallschlüsselnummern ist der beiliegenden Tabelle zu entnehmen.	
Materialgruppen	Kurzbeschreibung / Beispiele
Kupfer	Kupferschrotte einschl. Späne, Shredderschrott, Kabel-Granulate, Trafospulen, auch PCB-haltig
Katalysatoren	Kupferhaltige Elektronikschrotte (Platinenschrott),
Kupferlegierungen	Bronzen / Rotguß - Schrotte
Kupferhaltige Materialien	Kupferhaltige Schlämme, Anodenschlämme, sonstige metallhaltige Galvanik- und Hydroxidschlämme, Metalloxide, Kupferätzlösungen, Cu-haltige Schlacken, -Aschen und -Matten / -Steine, Filterstäube
Blei	Bleischrotte
Bleihaltige Materialien	Bleihaltige Galvanik- und Fällschlämme, Bleioxide und -hydroxide, Bleikrätzen, Bleihaltige Aschen und Rückstände (Matten / Steine, Dross, Skimmings)
Nickelhaltige Materialien	Nickelhaltige Schrotte, Katalysatoren, Galvanikschlämme
Edelmetallhaltige Materialien	Edelmetallhaltige Schrotte, Katalysatoren, Schlämme, Gekrätze, Scheidgüter Elektronikschrott, Platinenschrott bestückt, Filmaschen, Edelmetallhaltige Aschen, Flugstäube und Schlämme, Silber - Quecksilberhaltige Knopfzellen
Siliziumhaltige Materialien	Sand aus Bodenwaschanlagen, Bildschirm- und sonstige technische Gläser, Strahlmittelrückstände mit
schädlichen	Verunreinigungen, Reststoffe aus der Silizium- / Silicon-Herstellung, Gießereialsande, Si-haltige Reststoffe Klärschlammaschen, Ofenausbruch

Abb. 6-1: Materialien, die von der Norddeutschen Affinerie AG verwertet werden können
(Quelle: Homepage der NA AG 2006)

Kupfererzeugung ist das Kerngeschäft der NA. Bei der Herstellung von Kupferkathoden aus kupferhaltigen Vorstoffen – Kupfererzkonzentrat oder Recycling-Rohstoffen – werden weitere Metalle, Eisensilikatgestein und Schwefelsäure gewonnen. Durch die vorhandene Verfahrenstechnik werden die angelieferten Rohstoffe verwertet. Durch Begleitelemente in den Primärerzen, aber auch durch den gezielten Ankauf und Aufbereitung edelmetallhaltiger Sekundärrohstoffe wie Scheidgüter, Gekrätz, Katalysatoren, Schlacken oder Schlämmen zählt der NA-Konzern zu den größten Edelmetallproduzenten Europas.

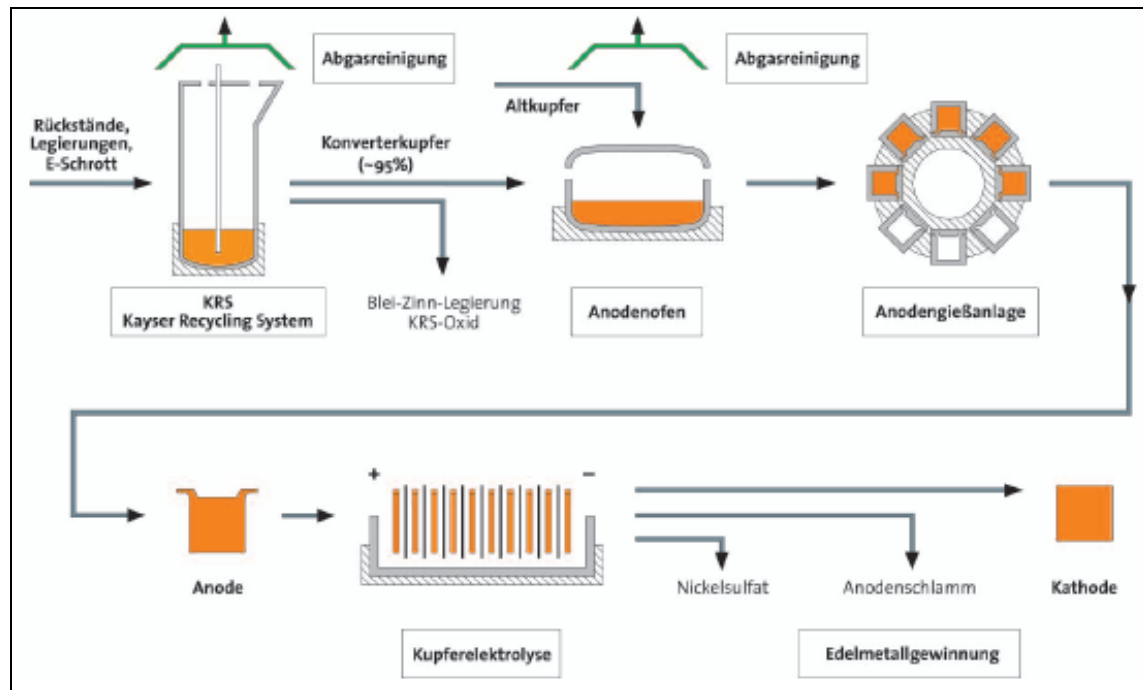


Abb. 6-2: Schematische Darstellung des Kayser Recycling Systems (KRS) zur Sekundärkupfererzeugung und Mischzinngewinnung (Quelle: NA 2005)

KRS-Verfahren (Abb. 6-2)

Das KRS-Verfahren wird von der NA am Standort Lünen eingesetzt. Es wurde für den Einsatz von Recyclingmaterialien mit geringeren Kupfer- und Edelmetallgehalten als auch von komplexen Materialien entwickelt.

Der Verarbeitungsprozess beginnt – sofern notwendig - mit einer Vorbereitungsstufe. Je nach Beschaffenheit und Zusammensetzung können die Rohstoffe mit einer Schere zerkleinert oder in einer spezifischen Materialvorbereitungsanlage behandelt werden. Hierdurch wird grobes Material einsatzfähig. Eisen, Aluminium und Kunststoffe lassen sich abtrennen und zu verkaufsfähigen Partien zusammenstellen.

Das Herzstück des KRS-Verfahrens stellt ein so genannter Badschmelzofen nach dem Prinzip der IsaSmelt-Ofentechnologie dar. In diesem Aggregat, das den herkömmlichen Schachtofen zur Gewinnung von NE-Metallen aus Sekundärmaterialien ersetzt, können vielfältige Einsatzmaterialien genutzt werden. Dazu gehören kupfer- und edelmetallhaltige Sekundärrohstoffe aus der Kupfererzaufbereitung, der Kupferverhüttung und -

raffination, den Kupfergießereien, aus der metallverarbeitenden Industrie oder Aufbereitungsanlagen für kupferhaltige Materialien, wie z.B. kupferreiche Schlacken, Kupferkrätzen, Filter- und Zyklonstäube, Fällschlämme, Ziehschlämme und Kupferlegierungsschrotte.

Die pyrometallurgische Verarbeitung, d.h. das Einschmelzen, erfolgt im Badschmelzofen. Charakteristisches Merkmal ist die Verwendung einer Tauchbrennlanze, die von oben in den Ofen eingebracht wird und der Zufuhr von Heizöl, Sauerstoff und Luft dient. Die Lanze kann sowohl oxidierend wie auch reduzierend gefahren werden, so dass der Einsatz an Reduktionsmittel verringert wird. Zur Reduktion und Schlackenbildung werden Koks oder Kohle, Eisen-, Kalk- und Kieselsäureträger zugegeben. Der Schmelzprozess läuft im KRS sehr schnell ab, so dass die Chargenzeiten insgesamt kurz sind.

Der Schmelzprozess unterscheidet sich von der Schacht- und Elektroofentechnologie dadurch, dass er diskontinuierlich in einem zweistufigen Schmelz- und Konvertierungsprozess betrieben wird.

In der ersten Stufe entsteht eine metallische Phase (Schwarzkupfer) und eine Schlackenphase, die über den Schlackenstich abgestochen und mit Wasser granuliert wird. Der so erhaltene Eisensilikatsand wird als Baustoff vermarktet. Es enthält nur sehr niedrige Restgehalte an Kupfer. Das Schwarzkupfer verbleibt im Ofen.

In der zweiten Stufe (Konvertierungsstufe) werden aus dem Schwarzkupfer unter Zugabe von Legierungsschrotten bei oxidierenden Bedingungen das Konvertermetall und die Konverterschlacke erzeugt. Letztere wird zur Weiterverarbeitung über eine Rinne dem Mischzinnofen (Drehtrommelofen) zugeführt. Zinn und Blei sind in der Schlacke angereichert und werden im Mischzinnofen zu einer Zinn-Blei-Legierung verarbeitet. Das Konvertermetall fließt in einen als Warmhalteofen betriebenen Kipptrommelofen, von dem es mit Hilfe einer Pfanne zum Anodenofen verbracht und dort raffiniert wird. Die abschließende Raffination erfolgt in der Kupferelektrolyse. Die Qualität des raffinierten Kupfers entspricht der des aus primären Einsatzmaterialien. Wichtige Begleitmetalle, insbesondere Gold, Silber und Selen werden im Anodenschlamm angereichert und zur Gewinnung einer weiteren Verarbeitung zugeleitet.

Die heißen Abgase aus dem Schmelzprozess werden zur Energiegewinnung über einen Abhitzeessel geleitet, in dem eine Nachverbrennung der CO-haltigen Ofengase erfolgt. Die Abgase werden gemeinsam mit Nebenhaubenabgasen in einer Filteranlage gereinigt. Die zinkreichen Filterstäube (KRS-Oxid) werden zur Metallgewinnung genutzt.

Verbräuche und Emissionen des Kupferrecycling-Prozesses

Zur Abschätzung der Umweltbelastungen des KRS-Verfahrens wurden verschiedene Veröffentlichungen und persönliche Mitteilungen der Norddeutschen Affinerie sowie weitere Literaturquellen zum Kupferrecycling ausgewertet. (NA 2005, NA 2006, NA 2007, VDI-Entwurf 2006, Rentz 1999, EEA 1999). Durch den kooperativen Beitrag der NA AG konnten wesentliche Lücken bei der Beurteilung der Verwertung geschlossen werden.

Die für den KRS-Prozess ermittelten Daten werden in der Tab. 6-6 zusammengefasst, wobei eine Normierung der Werte auf 1 kg Kupferkathode als Produkt vorgenommen wurde. Die Literaturquellen werden für die einzelnen Werte mit angegeben.

Tab. 6-6: Verbräuche und Emissionen des KRS-Verfahrens zur Sekundärkupfergewinnung (realer Durchschnitt bezogen auf 1 kg Kupferprodukt)

Sekundärkupfererzeugung bei der Norddeutschen Affinerie Lünen (ehem. Hüttenwerke Kayser AG)					
Input			Output		
	kg	Bemerkung		kg	Bemerkung
Sekundärkupfer (mittl. Cu-Geh. 20-40%)	7,75E-01	Kupfergehalt im Mittel beträgt 60%	Kupferkathoden	1,00E+00	Produkt; Umwelterklärung 2006
Sekundärkupfer (mittl. Cu-Geh. 90-95%)	6,92E-01		KRS Oxid	8,24E-02	Nebenprodukt zum Verkauf
Anoden (mittl. Cu-Geh. 99%)	1,87E-01				
Kalk	2,47E-02	Quelle: Umwelterklärung 2005	Schlacke / Eisensilikatsand	5,82E-01	Verwendung als Baustoff / Strahlmittel
Sand	5,16E-02	Quelle: Umwelterklärung 2005	FeO	2,0E-01	Quelle: Rentz 1999
Sauerstoff	1,81E-01	Quelle: Umwelterklärung 2005	SiO ₂	1,3E-01	Quelle: Rentz 1999
Stickstoff	5,50E-03	Quelle: Umwelterklärung 2005	CaO	9,0E-02	Quelle: Rentz 1999
			Al ₂ O ₃	5,8E-02	Quelle: Rentz 1999
			MgO	1,7E-02	Quelle: Rentz 1999
			Na ₂ O	1,2E-02	Quelle: Rentz 1999
Kohle, Koks	1,23E-02	Annahme Hu: 29 MJ/kg	Zn	3,5E-02	Quelle: Rentz 1999
Erdgas	1,71E-02	Annahme Ho: 50 MJ/kg	Cu	5,5E-03	Quelle: Rentz 1999
Diesel	2,75E-03	Annahme Hu: 44 MJ/kg	Sn	4,4E-03	Quelle: Rentz 1999
Heizöl	1,76E-01	Annahme Hu: 44 MJ/kg	Pb	1,7E-03	Quelle: Rentz 1999
			Ni	5,8E-04	Quelle: Rentz 1999
Strom in kWh	6,76E-01	Quelle: Umwelterklärung 2005	As	5,8E-04	Quelle: Rentz 1999
			Cd	5,8E-04	Quelle: Rentz 1999
			Rest	2,2E-02	Quelle: Rentz 1999
			Luftemissionen		
			Kohlendioxid	6,97E-01	berechnet über Brennstoff-/Kalkeinsatz
			PM<2,5	2,32E-04	Quelle: Umwelterklärung 2006; Verteilung
			PM _{2.5-10}	7,74E-05	der Größenklassen aus Ecoinvent 1.2
			PM>10	7,74E-05	abgeleitet
			SO ₂	3,60E-03	Quelle: Umwelterklärung 2006
			NO _x	1,30E-03	Quelle: Umwelterklärung 2006
			CO	2,33E-03	Quelle: Ecoinvent 1.2
			Quecksilber	3,22E-07	Quelle: abgel. aus Entwurf VDI 2102
			Thallium	3,22E-07	Quelle: abgel. aus Entwurf VDI 2102
			Cobalt	3,22E-07	Quelle: abgel. aus Entwurf VDI 2102
			Chrom	1,61E-06	Quelle: abgel. aus Entwurf VDI 2102
			Mangan	3,22E-07	Quelle: abgel. aus Entwurf VDI 2102
			Vanadium	3,22E-07	Quelle: abgel. aus Entwurf VDI 2102
			Zinn	1,61E-06	Quelle: abgel. aus Entwurf VDI 2102
			Arsen	1,00E-06	Quelle: Umwelterklärung 2006
			Antimon	3,49E-06	Quelle: EEA 1999
			Cadmium	5,00E-07	Quelle: Umwelterklärung 2006
			Kupfer	4,41E-05	Quelle: Umwelterklärung 2006
			Blei	2,38E-05	Quelle: Umwelterklärung 2006
			Nickel	1,00E-06	Quelle: Umwelterklärung 2006
			Zink	4,46E-05	Quelle: Umwelterklärung 2006
			Cyanide	3,22E-07	Quelle: abgel. aus Entwurf VDI 2102
			Fluoride	3,22E-07	Quelle: abgel. aus Entwurf VDI 2102
			PCDD/PCDF	3,22E-12	Quelle: abgel. aus Entwurf VDI 2102
			Wasseremissionen		
			CSB	1,50E-04	Quelle: abgel. aus Entwurf VDI 2102
			Quecksilber	1,00E-07	Quelle: abgel. aus Entwurf VDI 2102
			Chrom, gesamt	1,00E-06	Quelle: abgel. aus Entwurf VDI 2102
			Kupfer	1,16E-06	Quelle: Rentz 1999
			Blei	5,82E-07	Quelle: Rentz 1999
			Arsen	1,16E-07	Quelle: Rentz 1999
			Nickel	3,49E-07	Quelle: Rentz 1999
			Cadmium	1,16E-08	Quelle: Rentz 1999
			Zink	2,33E-07	Quelle: Rentz 1999
			Verpackungen, etc.	5,64E-03	Quelle: Umwelterklärung 2006
			Bau-Abfälle	7,42E-02	Quelle: Umwelterklärung 2006
			Ofenausbruch	7,47E-03	Externe Verwendung; UE 2006
			Kupferverlust, ges.	5,6E-03	Cu in Schlacke und Emissionen

Aus den Angaben zu den kupferhaltigen Input- und Outputmaterialien ergibt sich für die eingesetzten Kupfermaterialien ein durchschnittlicher Kupfergehalt von 60%. Als Nebenprodukte fallen pro Kilogramm Kupferkathode ca. 0,58 kg Eisensilikatsand und 0,08 kg KRS-Oxid an. Die Bestandteile des Eisensilikatsandes werden in der Tab. 6-6 zusätzlich kursiv aufgeführt.

Entsprechend der Aufgabenstellung soll eine Grenzkonzentration an Kupfer im Abfallinput ermittelt werden. Dazu werden weitere Informationen zu dem Prozess benötigt, die die Abhängigkeit von Verbräuchen und Emissionen vom Kupfergehalt aufzeigen. Diese Daten liegen auch bei der NA AG nicht vor und müssen daher

abgeschätzt werden. Ausgangspunkt für die Abschätzung stellt ein 5 %-iger Kupferanteil im Abfall dar.

Folgende Annahmen wurden für den veränderten Metallgehalt im Input getroffen, die im einzelnen auch in Tab. 6-7 hinter den Werten genannt werden:

- Das Reduktionsmittel Koks hängt wesentlich vom Cu-Input ab
- Die Energieverbräuche korrelieren mit der Gesamt-Inputmenge
- Die Schlackemenge korreliert mit dem Input an nichtkupferhaltigen Materialien, die Metallgehalte in der Schlacke mit dem Metallinput (Rest: Oxide und Silikate)
- Die Luftemissionen CO₂, Partikel, SO₂, CO und NO_x, Dioxine sind hauptsächlich brennstoffabhängig; die Metallemissionen korrelieren mit dem Cu-Input
- Die Metallemissionen ins Abwasser hängen vom Kupferinput ab, der CSB-Eintrag eher von der Gesamtmenge auf der Inputseite

Tab. 6-7: Verbräuche und Emissionen des KRS-Verfahrens zur Sekundärkupfergewinnung (Hypothetische Abschätzung mit 5 % Kupfergehalt im Sekundärkupferinput)

Sekundärkupfererzeugung bei der Norddeutschen Affinerie Lünen (ehem. Hüttenwerke Kayser AG)					
Input	kg	Bemerkung / Annahmen	Output	kg	Bemerkung / Annahmen
Sekundärkupfer (mittl. Cu-Geh. 5%)	2,00E+01	Kupfergehalt: 5%; enthält Silikate und Oxide	Kupferkathoden KRS Oxid	1,00E+00 2,18E+00	Produkt; Umwelterklärung 2006 abhängig vom Nicht-Cu-Input
Sand	5,16E-02	enth. Silikate; abh. v. Cu-Input	Schlacke / Eisensilikatsand	1,62E+01	überwiegend abh. vom Nicht-Cu-Input
Sauerstoff	1,81E-01	enth. Oxide; abh. v. Cu-Input	SiO2	3,7E+00	abhängig vom Nicht-Cu-Input
Stickstoff	6,65E-02	abhängig vom Gesamt-Input	CaO	2,5E+00	abhängig vom Nicht-Cu-Input
			Al2O3	1,6E+00	abhängig vom Nicht-Cu-Input
			MgO	4,9E-01	abhängig vom Nicht-Cu-Input
			Na2O	3,2E-01	abhängig vom Nicht-Cu-Input
Kohle, Koks	1,23E-02	abhängig vom Kupfer-Input	Zn	3,7E-02	Korrelation mit Cu-Gehalt im Input
Erdgas	2,07E-01	abhängig vom Gesamt-Input	Cu	5,8E-03	Korrelation mit Cu-Gehalt im Input
Diesel	3,32E-02	abhängig vom Gesamt-Input	Sn	4,6E-03	Korrelation mit Cu-Gehalt im Input
Heizöl	2,13E+00	abhängig vom Gesamt-Input	Pb	1,8E-03	Korrelation mit Cu-Gehalt im Input
			Ni	6,1E-04	Korrelation mit Cu-Gehalt im Input
Strom in kWh	5,84E+00	ca. 0,375 kWh für Elektrolyse; Rest inputabhängig	As	6,1E-04	Korrelation mit Cu-Gehalt im Input
			Cd	6,1E-04	Korrelation mit Cu-Gehalt im Input
			Rest	1,9E+00	abhängig vom Nicht-Cu-Input
			Luftemissionen		
			Kohlendioxid	8,43E+00	überwiegend vom Brennstoff abhängig
			PM<2.5	2,81E-03	überwiegend vom Brennstoff abhängig
			PM2.5-10	9,36E-04	überwiegend vom Brennstoff abhängig
			PM>10	9,36E-04	überwiegend vom Brennstoff abhängig
			SO2	4,35E-02	überwiegend vom Brennstoff abhängig
			NOx	1,57E-02	überwiegend vom Brennstoff abhängig
			CO	2,82E-02	überwiegend vom Brennstoff abhängig
			Quecksilber	3,22E-07	Korrelation mit Cu-Gehalt im Input
			Thallium	3,22E-07	Korrelation mit Cu-Gehalt im Input
			Cobalt	3,22E-07	Korrelation mit Cu-Gehalt im Input
			Chrom	1,61E-06	Korrelation mit Cu-Gehalt im Input
			Mangan	3,22E-07	Korrelation mit Cu-Gehalt im Input
			Vanadium	3,22E-07	Korrelation mit Cu-Gehalt im Input
			Zinn	1,61E-06	Korrelation mit Cu-Gehalt im Input
			Arsen	1,00E-06	Korrelation mit Cu-Gehalt im Input
			Antimon	3,49E-06	Korrelation mit Cu-Gehalt im Input
			Cadmium	5,00E-07	Korrelation mit Cu-Gehalt im Input
			Kupfer	4,41E-05	Korrelation mit Cu-Gehalt im Input
			Blei	2,38E-05	Korrelation mit Cu-Gehalt im Input
			Nickel	1,00E-06	Korrelation mit Cu-Gehalt im Input
			Zink	4,46E-05	Korrelation mit Cu-Gehalt im Input
			Cyanide	3,90E-06	abhängig vom Gesamt-Input
			Fluoride	3,90E-06	abhängig vom Gesamt-Input
			PCDD/PCDF	3,90E-11	überwiegend vom Brennstoff abhängig
			Wasseremissionen		
			CSB	1,81E-03	Korrelation mit Cu-Gehalt im Input
			Quecksilber	1,00E-07	Korrelation mit Cu-Gehalt im Input
			Chrom, gesamt	1,00E-06	Korrelation mit Cu-Gehalt im Input
			Kupfer	1,16E-06	Korrelation mit Cu-Gehalt im Input
			Blei	5,82E-07	Korrelation mit Cu-Gehalt im Input
			Arsen	1,16E-07	Korrelation mit Cu-Gehalt im Input
			Nickel	3,49E-07	Korrelation mit Cu-Gehalt im Input
			Cadmium	1,16E-08	Korrelation mit Cu-Gehalt im Input
			Zink	2,33E-07	Korrelation mit Cu-Gehalt im Input
			Verpackungen, etc.	6,82E-02	abhängig vom Gesamt-Input
			Bau-Abfälle	8,97E-01	abhängig vom Gesamt-Input
			Ofenausbruch	9,04E-02	abhängig vom Gesamt-Input
			Kupferverlust, ges.	5,9E-03	Cu in Schlacke und Emissionen

6.4 Vergleichende Umweltbewertung

Auf Basis der Daten aus dem Kapitel 6.3 kann das System für die ökobilanzielle Betrachtung der Sekundärkupfergewinnung aufgestellt werden und mit der Primärgewinnung verglichen werden. Bei dem Vergleich werden die Ergebnisse der Primärherstellung denen der Gewinnung aus Sekundärmaterialien gegenübergestellt. Dabei muss berücksichtigt werden, dass es sich bei den Daten zu dem Recycling mit durchschnittlich 60 % Kupfergehalt im Input um einen realen Prozess handelt mit insgesamt hoher Datenqualität und bei dem hypothetischen Prozess mit 5 % Kupfergehalt um eine Abschätzung, die von den Annahmen abhängt.

Für die Umweltbewertung und die Bestimmung eines Grenzkupfergehaltes werden die in Kap. 2 „Methodische Grundlagen“ genannten Indikatoren herangezogen:

- Kumulierter Primärenergieaufwand (KEA)
- Aggregierte Umwelteinwirkungsbelastungen (UEBEL) mit Berücksichtigung von Flächebeanspruchung
- UEBEL ohne Berücksichtigung von Flächenbeanspruchung

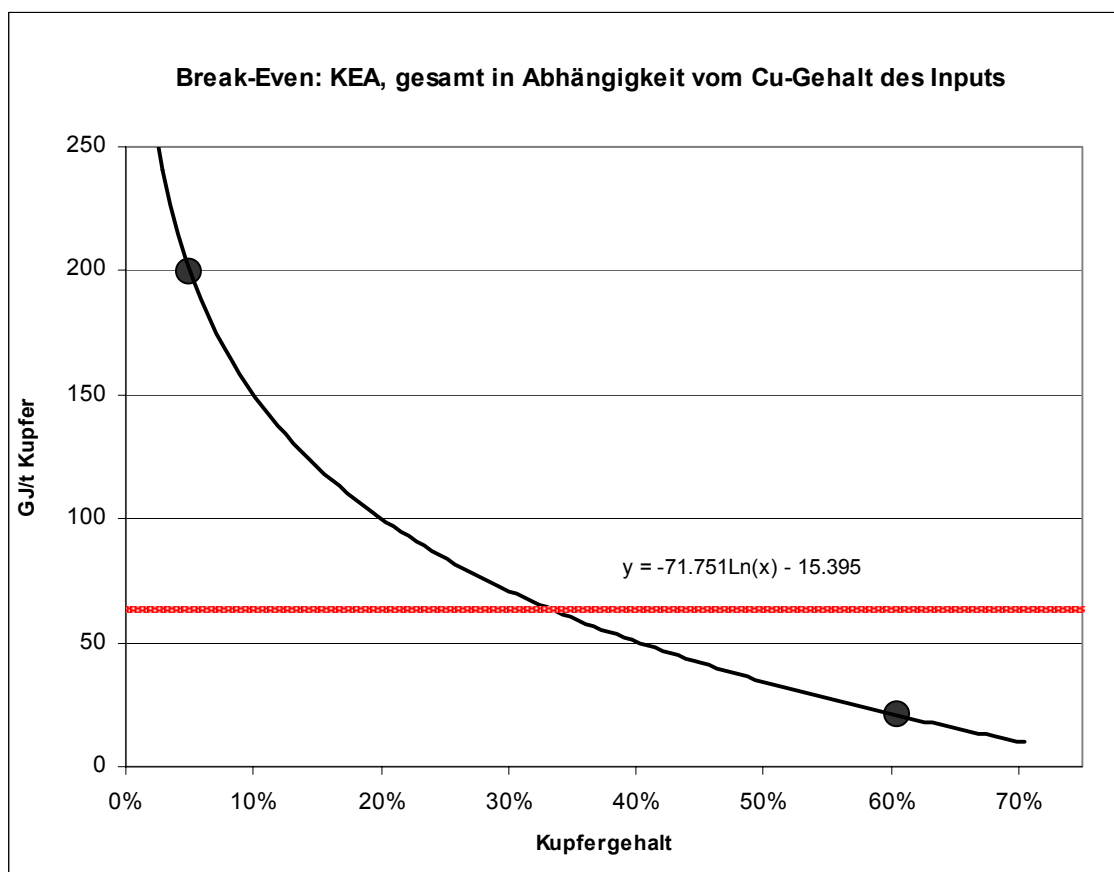


Abb. 6-3: Primärenergieaufwand (KEA) der Sekundärkupfergewinnung als Funktion vom Kupfergehalt des Inputs, ermittelt aus den beiden Datenpunkten für 60 % und 5 % Kupfergehalt (schwarze Linie); die rote horizontale Linie repräsentiert die Primärkupferherstellung.

In der Abb. 6-3 werden die Ergebnisse der Vergleichssysteme für den Primärenergieaufwand (KEA) dargestellt. Für die Interpolation zwischen den beiden Datenpunkten für die Sekundärkupfergewinnung (5 % und 60 %) wurde eine logarithmische Ausgleichsfunktion gewählt, die widerspiegelt, dass die Aufwendungen des Recyclings überproportional mit abnehmendem Metallgehalt ansteigen. Der Aufwand der Primärherstellung beträgt ca. 62 GJ pro Tonne Primärkupfer und ist in Abb. 6-3 als horizontale Linie dargestellt. Der Schnittpunkt für beide Funktionen liegt bei 33 %. Eine Rückgewinnung von Kupfer aus kupferhaltigen Abfällen ist demzufolge ab einem Gehalt von über 33 % mit einem geringeren Primärenergieaufwand verknüpft als die Primärkupferherstellung. Dieser Wert ist hoch im Vergleich zu Kupfergehalten im Roherz (unter 1 %) oder dem Grenzwert von 1 % in der Versatzverordnung. Wie in Kap. 6.1 erläutert, erfolgt aber der erste Aufbereitungsschritt vom Erz zum Konzentrat bei der Primärkupferherstellung „kalt“ über Klassierung und Flotation. Im Vergleich zur Schmelze der Sekundärkupfergewinnung weist dieser Aufkonzentrierungsprozess einen geringen Energiebedarf auf und erzielt Gehalte im Kupferkonzentrat von ca. 30 %.

In der folgenden Tab. 6-8 sind die Ergebnisse der Aggregationsmethode UEBEL einzeln für die Vergleichssysteme aufgeführt. Es werden zusätzlich die Summenwerte sowohl mit wie auch ohne Berücksichtigung der Flächenbeanspruchung ausgewiesen.

Tab. 6-8: Differenzierte und aggregierte Umwelteinwirkungsbelastungs-Ergebnisse (UEBEL) für die Primär- und Sekundärkupfergewinnung (5 % und 60 % Kupfer-Gehalt im Input)

UEBEL	Primär- kupfer	Sekundär 5% Cu-Inp.	Sekundär 60% Cu-Inp.
Klima			
CO2 Äquivalente	12,30	53,75	5,22
Luftqualität			
SO2	66,42	8,75	0,78
NOx	15,36	6,89	0,64
NH3	9,50	0,08	0,01
NMVOG	2,16	0,75	0,07
Gewässer			
AOX	0,19	0,16	0,01
Gesamt-N	5,21	0,10	0,01
Boden			
Flächenumwandlung	184,09	38,27	3,44
UEBEL-Summe	295,22	108,73	10,19
ohne Fläche	111,13	70,47	6,75

Die Tabellenwerte zeigen, dass die Primärgewinnung in der Summe mit und ohne Berücksichtigung der Fläche in den betrachteten Umweltkategorien mit höheren Belastungen verbunden ist, als die Vergleichssysteme. Die Primärgewinnung wird von der Flächenbeanspruchung dominiert, gefolgt von den SO₂-Emissionen, die deutlich höher als bei der Sekundärgewinnung ausfallen. Für die Sekundärgewinnung spielen insbesondere die CO₂-Emissionen eine große Rolle, die mit dem Einsatz an Energieträgern verknüpft ist.

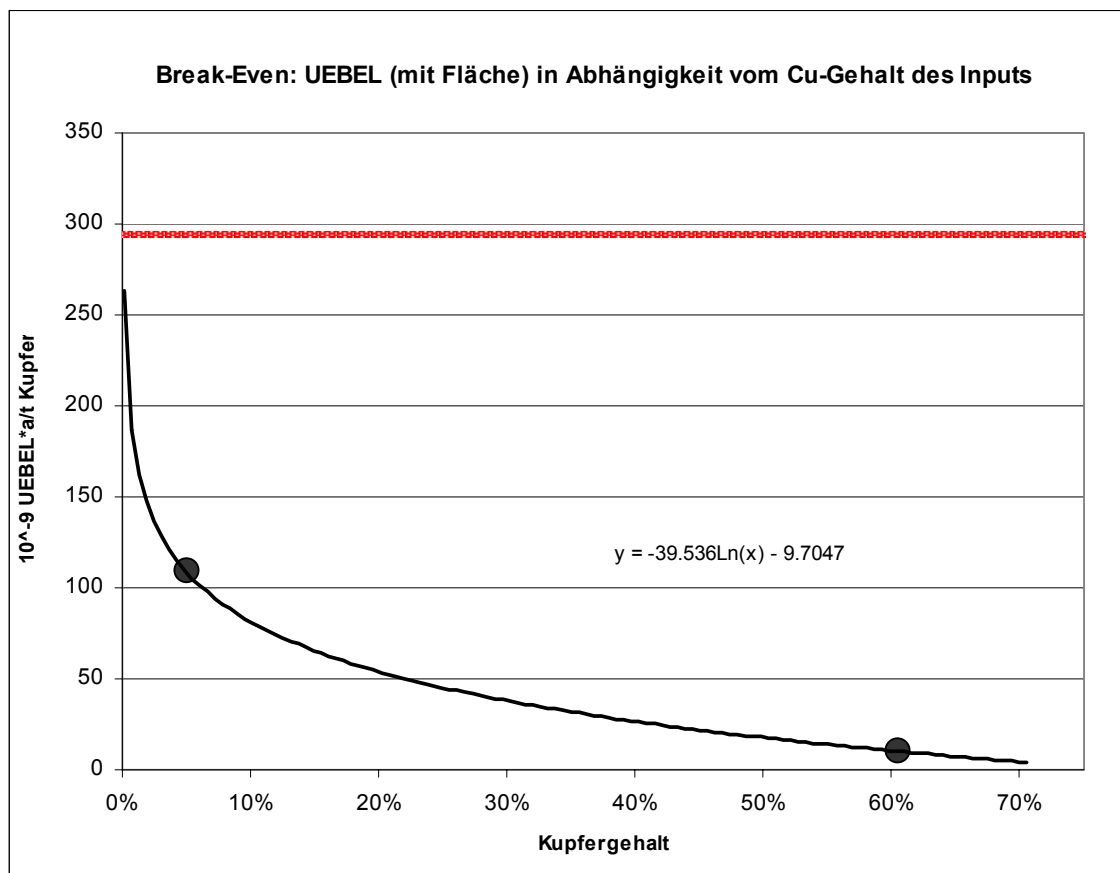


Abb. 6-4: Umwelteinwirkungsbelastung (UEBEL) mit Berücksichtigung der Flächenbeanspruchung der Sekundärkupfergewinnung als Funktion vom Kupfergehalt des Inputs, ermittelt aus den beiden Datenpunkten für 60 % und 5 % Kupfergehalt (schwarze Linie); die rote horizontale Linie repräsentiert die Primärkupferherstellung.

Analog zu dem Vorgehen für den Kumulierten Energieaufwand werden für die Aggregationsmethode UEBEL Grenzkonzentrationen für den Kupfergehalt im Input der Sekundärgewinnung ermittelt, bei denen eine Metallrückgewinnung noch sinnvoll ist. Die Abb. 6-4 zeigt die abgeleitete Funktion der Sekundärgewinnung in Abhängigkeit vom Kupfergehalt unter Berücksichtigung der Flächeninanspruchnahme. Das Kupferrecycling verursacht bei dieser Auswertung erst ab Kupfergehalten von unter 0,04 % höhere Umweltbelastungen als die Primärkupferherstellung.

Wird die Flächenbeanspruchung bei dieser Methode nicht berücksichtigt (s. Abb. 6-5) so ergibt sich ähnliches Bild. Die Grenzkonzentration beläuft sich hierbei auf 1,0 %.

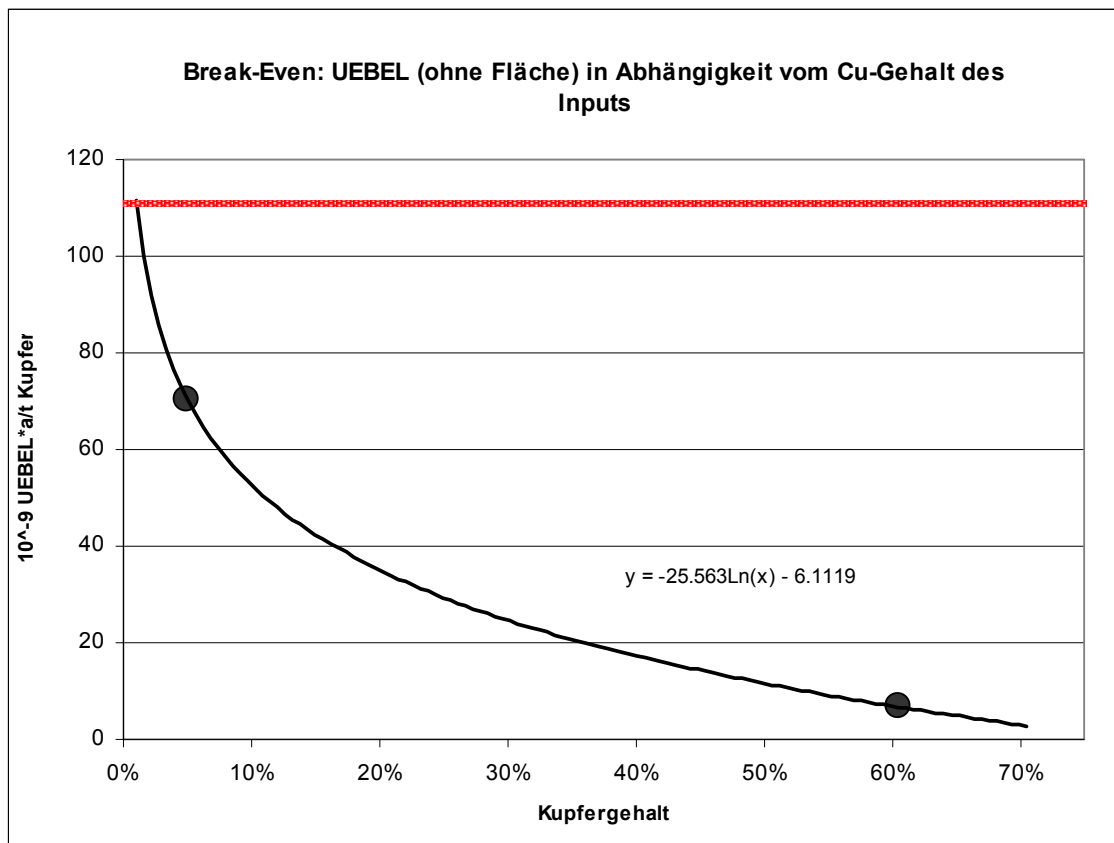


Abb. 6-5: Umwelteinwirkungsbelastung (UEBEL) ohne Berücksichtigung der Flächenbeanspruchung der Sekundärkupfergewinnung als Funktion vom Kupfergehalt des Inputs, ermittelt aus den beiden Datenpunkten für 60 % und 5 % Kupfergehalt (schwarze Linie); die rote horizontale Linie repräsentiert die Primärkupferherstellung.

Die verwendeten Methoden KEA und UEBEL zur Bewertung der Umweltbelastungen berücksichtigen keine Schwermetallemissionen in die Luft. Diese human- und ökotoxischen Emissionen treten aber bei Hüttenprozessen auf. Sie werden in Abb. 6-6 für die Vergleichssysteme dargestellt. Bei der Auswertung ist aber zu beachten, dass die Datenqualität für diese Emissionen eingeschränkt ist und die Werte als orientierend zu betrachten sind.

Alle Schwermetallemissionen der Sekundärgewinnung liegen ein bis drei Größenordnungen niedriger als die vergleichbare Primärerzeugung. Für die ebenfalls dargestellten Dioxinmissionen weist das Recyclingsystem mit geringem Kupfergehalt im Ausgangsmaterial höhere Werte als die Primärgewinnung auf. Der Wert für die Dioxinmissionen der Sekundärkupfergewinnung beruht auf Angaben des VDI-Entwurfs 2006, der eine Bandbreite von über einer Größenordnung aufweist. Berücksichtigt man, dass der obere Wert übernommen wurde und, dass die NA in Lünen bereits weitere dioxinmindernde Maßnahmen umsetzt bzw. umgesetzt hat (NA 2005), könnten die realen Dioxinmissionen über eine Größenordnung niedriger liegen. Somit kann der Unterschied nicht als signifikant gewertet werden.

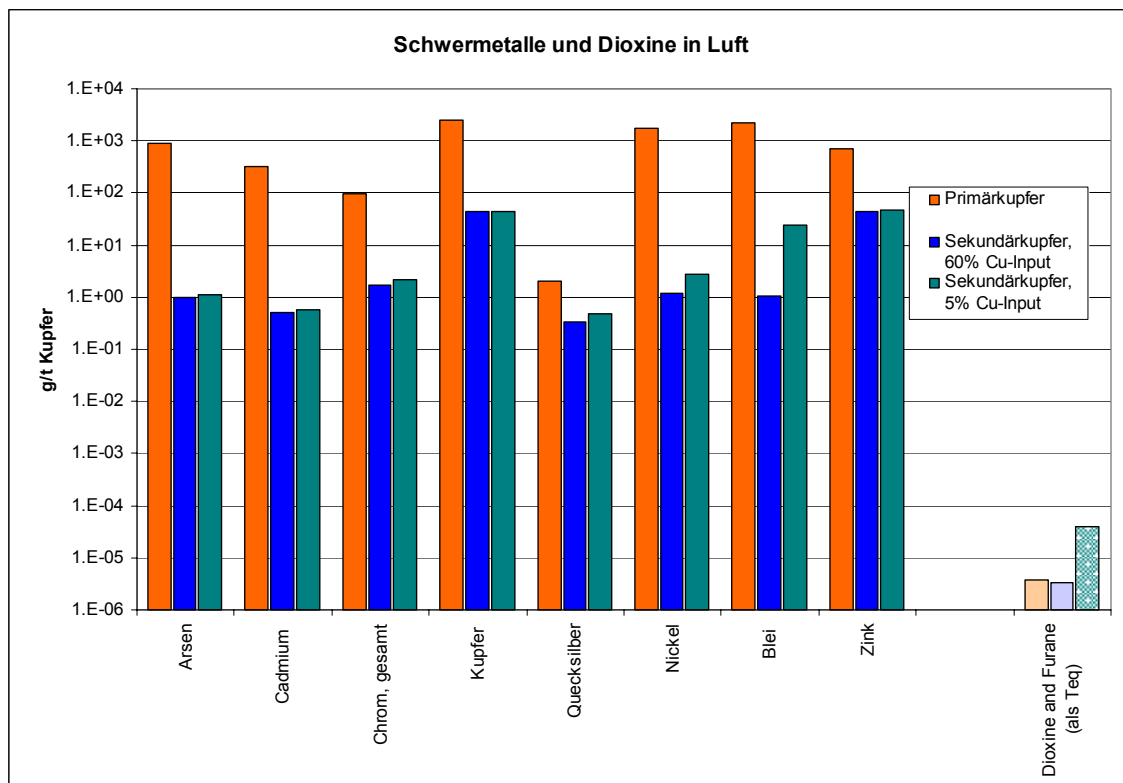


Abb. 6-6: Schwermetall- und Dioxin-Emissionen in die Luft aus der Primär- und Sekundärkupfergewinnung (5 % und 60 % Kupfer-Gehalt im Input)
(Die Y-Achse ist logarithmisch skaliert; Quellen: NA 2006, VDI-Entwurf 2006, Krauss 1999, Rentz 1999, IPPC 2001)

Fazit:

Je nach Bewertungsmethode wurden die folgenden Grenzkonzentrationen bestimmt:

- 33 % bei KEA
- 0,04 % bei UEBEL mit Fläche
- 1,0 % bei UEBEL ohne Fläche

Die Bandbreite der Grenzkonzentrationen von 0,04 % bis 33 % ist sehr groß. Es zeigt sich auch, dass der KEA für die betrachteten Vergleichssysteme nur einen bedingt geeigneten Proxy-Indikator für alle Umweltwirkungen darstellt. So nutzt z.B. die Primärkupfergewinnung sulfidische Kupfererze, die in den Röst-, Schmelz- und Konverterprozessen hohe SO_2 -Emissionen verursachen. Dies wird durch den KEA nicht ausreichend repräsentiert. Zieht man den UEBEL-Indikator heran, der mehrere Umweltbelastungen aggregiert, und berücksichtigt man die Datenunsicherheiten bei der Ermittlung der Grenzkonzentrationen, so scheint der in der Versatzverordnung genannte Wert von 1 % angemessen.

Empfehlung:

Beibehaltung des bisherigen Wertes für die Grenzwertkonzentration im Abfall von 1 %.

7 Verwertung von Nickel

7.1 Gewinnung von Primär-Nickel und Umweltauswirkungen

Die weltweiten Vorräte an Nickel werden auf 64 Millionen t geschätzt. Daneben sind große Mengen an Erzen mit niedrigen Nickelgehalten bekannt, die bei veränderten Preisbedingungen zu den Reserven hinzugerechnet werden müssen (z.B. Manganknollen am Meeresgrund). Die weltweit größten Vorkommen gibt es in Australien, Russland, Kuba, Kanada und Brasilien.

Insgesamt wurden im Jahr 2006 mehr als 1,5 Millionen t Nickel gefördert. Die bedeutendsten Förderländer waren Russland, Kanada und Australien. Allein diese drei Länder zusammen förderten etwa 50 % der weltweit gewonnenen Menge an Nickel. Die Statistik des US Geological Survey (USGS 2007) gibt Auskunft:

Tab. 7-1: Welt-Produktion und Reserven an Nickel (in 1000 t)

World Mine Production, Reserves, and Reserve Base:				
	Mine production		Reserves⁶	Reserve base⁶
	2005	2006^e		
United States	—	—	—	—
Australia	189,000	191,000	24,000,000	27,000,000
Botswana	28,000	28,000	490,000	920,000
Brazil	52,000	74,200	4,500,000	8,300,000
Canada	198,000	230,000	4,900,000	15,000,000
China	77,000	79,000	1,100,000	7,600,000
Colombia	89,000	90,000	830,000	1,100,000
Cuba	72,000	73,800	5,600,000	23,000,000
Dominican Republic	46,000	46,000	720,000	1,000,000
Greece	23,200	24,000	490,000	900,000
Indonesia	160,000	145,000	3,200,000	13,000,000
New Caledonia ⁷	112,000	112,000	4,400,000	12,000,000
Philippines	26,600	42,000	940,000	5,200,000
Russia	315,000	320,000	6,600,000	9,200,000
South Africa	42,500	41,000	3,700,000	12,000,000
Venezuela	20,000	20,000	560,000	630,000
Zimbabwe	9,500	9,000	15,000	260,000
Other countries	25,000	25,000	2,100,000	5,900,000
World total (rounded)	1,490,000	1,550,000	64,000,000	140,000,000

Quelle: USGS, 2007

In Deutschland findet keine Verhüttung für Primärnickel statt. Allerdings werden große Mengen an Ferronickel und Nickelmetall nach Deutschland eingeführt. Fast 160.000 t an Ferronickel und knapp 90.000 t an Nickelmetall wurden benötigt. Großbritannien, Russland und Griechenland sind für Ferronickel die wichtigsten Herkunftsländer.

Auf Grund der hoch entwickelten Edelstahlindustrie liegt Deutschland mit einem Weltanteil von 8,8 % auf dem fünften Rang der Nickelverbraucher. Etwa zwei Drittel des Weltverbrauchs an Raffinadenickel gehen in die Edelstahlindustrie.

Lediglich Sekundärnickel wird in Deutschland erzeugt, in der Nickelhütte Aue. Dieses Unternehmen bezieht auch Sekundärrohstoffe aus dem Ausland.

In der Tabelle sind die Importe an Nickel und verwandten Stoffen nach Deutschland aus der aktuellen Statistik der BGR (BGR 2006) aufgeführt:

Tab. 7-2: Deutsche Nickelimporte in den Jahren 2002 bis 2005 und Hauptlieferländer

METALLE	Importe Deutschland				Lieferländer (Importanteile > 5 %)	
	2002	2003	2004	2005		
Nickel						
Oxide & Hydroxide	672	564	603	502	Tschechische Republik	31,3
					Kanada	23,6
					Belgien	15,9
					Japan	11,1
					Niederlande	8,2
					Finnland	7,9
Aschen & Rückstände, Ni-haltig	9.487	10.245	11.101	8.206	Niederlande	34,5
					Frankreich	11,4
					USA	11,1
					Singapur	7,5
					Großbritannien	7,2
Ferronickel	89.802	82.618	129.300	157.091	Großbritannien	40,0
					Griechenland	23,5
					Venezuela	20,2
					Indonesien	6,4
Matte & ähnl. Material	11.513	4.035	7.264	6.902	Niederlande	99,4
Metall, nicht legiert	85.890	73.304	88.288	87.939	Rußland	40,5
					Großbritannien	30,8
					Norwegen	12,0
Legierungen	1.680	2.004	2.032	2.182	Großbritannien	51,7
					Österreich	20,8
					USA	6,1
					Belgien	5,3
					Niederlande	5,2
Abfälle & Schrott	11.464	10.983	11.973	11.672	Österreich	21,6
					Großbritannien	9,8
					Frankreich	8,7
					USA	8,3
					Rußland	7,5
					Schweiz	6,2

Nickel ist in der Erdkruste weit verbreitet, kommt oft aber nur in geringen Konzentrationen vor. Abgebaut wird es meist aus nickelhaltigen Erzen wie Nickelmagnetkies, der Kupferkies (CuFeS_2) und Pentlandit ($(\text{NiFe})_9\text{S}_8$) enthält. Nickel wird mit einem Metallgehalt von ca. 0,5 % im Erz abgebaut.

Das Nickel wird in eisen- und kupferhaltigen Minen im Übertagebau gewonnen. Mit Hilfe der Flotationstechnik wird es zunächst auf Metallgehalte von etwa 5 % angereichert. Schließlich werden durch Vorrösten die eisenhaltigen Bestandteile oxidiert und es bildet sich der Kupfer-Nickel-Rohstein, der die Metalle in sulfidischer Form beinhaltet.

Der Kupfer-Nickel-Rohstein wird zusammen mit Siliziumdioxid in einen Konverter gegeben und bei hohen Temperaturen wird Sauerstoff eingeblasen. Aus einem Teil des Materials entsteht Kupfer-Nickel-Feinstein, das zu 80 % aus diesen Metallen und zu 20

% aus Schwefel besteht. Schließlich muss Nickel mit Hilfe von Natriumsulfid von Kupfer getrennt werden.

Das entstandene Nickelsulfid wird durch das Hauptrösten in Nickeloxid überführt und diese Verbindung kann schließlich unter Zugabe von Koks zu metallischem Nickel reduziert werden. Allerdings hat das metallische Nickel noch nicht die Reinheit, um für viele Anwendungen eingesetzt zu werden.

Der letzte Prozessschritt um Reinnickel zu gewinnen ist eine Elektrolyse. Das Rohnickel der Anode geht in einer Nickelsalzlösung in Lösung und schlägt sich an der Kathode als Reinnickel mit einem Reinheitsgrad von 99,9 % ab.

Die Umweltbelastungen bei der Herstellung von 1 t Primärnickel mit einem Reinheitsgrad von 99,5 % sind im Folgenden wiedergegeben:

Tab. 7-3: Umweltbelastungen bei der Herstellung von 1 t Primärnickel

Umweltkennzahlen für		Nickel
Parameter		Wert
Flächenverbrauch pro t	m ² /t	14,8
Energieverbrauch		
KEA, fossil	GJ/t	118
KEA, nuklear	GJ/t	29
KEA, erneuerbar	GJ/t	47
KEA, gesamt	GJ/t	194
Belastungen durch Abgasemissionen		
Treibhauseffekt	kg CO ₂ -Äq./t	24.074
Ozonloch	g FCKW-Äq./t	0,79
Versauerung	kg SO ₂ -Äq./t	1441
Sommersmog	kg Ethen-Äq./t	66
terrestrische Eutrophierung	kg PO ₄ -Äq./t	14,7
Feinstaub PM 10	kg PM ₁₀ -Äq./t	72,2
Arsen	g/t	6,0
Cadmium	g/t	1,0
Quecksilber	g/t	0,26
Nickel	g/t	
Blei	g/t	35,37
Dioxine and Furane (als Teq)	g/t	6,45E-04
Belastungen durch Abwasseremissionen		
aquatische Eutrophierung	kg PO ₄ -Äq./t	0,394
Cadmium	g/t	2,83
Quecksilber	g/t	0,12
AOX	g/t	0,19

Die Daten zur Umweltbelastung durch die Nickelproduktion stammen hauptsächlich aus Hilbrans 1999 und Angaben aus dem Nichtmetall BREF-Dokument (IPPC 2001). Dabei war es notwendig, Allokationen zwischen der Nickel- und der Kupferherstellung vorzunehmen, da beide Metalle in der Regel gemeinsam gewonnen werden. Diese Allokation wurde wertmäßig vorgenommen.

Ausgehend von den Quellenangaben beziehen sich die Umweltwirkungen auf einen Mix der Nickelgewinnung entsprechend der weltweit verteilten Produktionsstätten, gibt also nicht direkt den nach Deutschland importierten Nickelmix wieder.

7.2 Nickelhaltige mineralische Abfälle

Aus der Datenbank des Landes Nordrhein-Westfalen wurde eine Auswertung der mineralischen Abfallarten nach Abfallschlüssel vorgenommen, die hohe Nickelgehalte aufweisen. Die Ergebnisse der Auswertung sind in Tab. 7-4 dargestellt.

Tab. 7-4: Schwankungsbreite von Nickel in verschiedenen Abfallarten nach AVV

Abfallart	Einheit	[N]	Minimum	Maximum	Mittelwert	Stdabw
110109 Schlämme und Filterkuchen, die gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	235	0	260.000	17.062	30.536
100817 Schlämme u. Filterkuchen aus d. Abgasbehandlung, d. gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	2	2.518	30.450	16.484	19.751
060503 Schlämme aus der betriebseigenen Abwasserbehandlung ohne 060502	mg/kg	3	8.972	16.290	12.301	3.703
190813 Schlämme, die gef. Stoffe aus einer anderen Behandl. von industr. Abwasser enth.	mg/kg	17	3	142.000	10.291	34.104
120118 ölhaltige Metallschlämme (Schleif-, Hon- und Läppschlämme)	mg/kg	21	0	166.400	8.299	36.229
190205 Schlämme a. d. physikalisch-chemischen Behandlung, d. gefährl. Stoffe enthalten	mg/kg	275	1	150.000	6.926	16.082
080201 Abfälle von Beschichtungspulver	mg/kg	14	2	24.900	6.388	7.684
060405 Abfälle, die andere Schwermetalle enthalten	mg/kg	19	7	95.700	5.456	21.872
190206 Schlämme aus der physikalisch-chemischen Behandlung ohne 190205	mg/kg	3	152	14.867	5.066	8.488
060602 Abfälle, die gefährliche Sulfide enthalten	mg/kg	3	2.138	8.184	5.042	3.030
060404 quecksilberhaltige Abfälle	mg/kg	2	3	9.030	4.517	6.383
100207 feste Abfälle aus der Abgasbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	85	1	41.100	4.381	9.716
110111 wässrige Spülflüssigkeiten, die gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	3	3.300	4.400	3.900	557
160803 gebr. Katalysatoren, d. Übergangsmetalle o. deren Verbindungen enthalten, a.n.g.	mg/kg	4	5	13.100	3.700	6.315
100402 Krätzen und Abschaum (Erst- und Zweitschmelze)	mg/kg	1	3.000	3.000	3.000	0
110108 Phosphatierschlämme	mg/kg	44	16	16.000	2.944	3.855
100208 Abfälle aus der Abgasbehandlung mit Ausnahme derjenigen, die unter 100207 fallen	mg/kg	39	1	18.830	2.916	4.726
100118 Abfälle aus der Abgasbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	12	1	30.450	2.585	8.775
190111 Rost- und Kesselaschen sowie Schlacken, die gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	30	1	31.505	1.956	5.955
110202 Schlämme aus der Zink-Hydrometallurgie (einschließlich Jarosit, Goethit)	mg/kg	1	1.850	1.850	1.850	0
060315 Metalloxide, die Schwermetalle enthalten	mg/kg	1	1.750	1.750	1.750	0
150202 Aufsaug- u. Filtermaterial; Ölfilter a.n.g., Schutzkleid. verunr. d. gef. Stoffe	mg/kg	320	0	476.000	1.685	26.629
160708 ölhaltige Abfälle	mg/kg	12	0	17.000	1.543	4.874
050199 Abfälle a. n. g.	mg/kg	2	1.100	1.810	1.455	502
110299 Abfälle a. n. g.	mg/kg	4	20	3.141	1.383	1.598
100319 Filterstaub, der gefährliche Stoffe enthält	mg/kg	9	24	2.500	1.222	810
060502 Schlämme a. betriebseigener Abwasserbehandlung, d. gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	9	1	6.400	1.180	2.103
190204 vorgemischte Abfälle, die wenigstens einen gefährlichen Abfall enthalten	mg/kg	16	5	6.064	1.075	1.569
100315 Abschaum, entzündl. oder mit Wasser entzündl. Gase in gefährlicher Menge abgibt	mg/kg	3	0	3.000	1.067	1.677
060499 Abfälle a. n. g.	mg/kg	2	624	1.385	1.005	538
061199 Abfälle a. n. g.	mg/kg	25	2	11.015	917	2.824

Ausgehend von den 6er Abfallschlüsseln nach der Abfallverzeichnisverordnung (AVV) wurden die Mittelwerte, das Minimum und das Maximum des Nickelgehaltes abgefragt. Die Aufstellung wurde nach dem mittleren Nickelgehalt sortiert. Die Angaben sind in mg/kg.

Nach der Versatzverordnung dürfen Abfälle mit einem Nickelgehalt über 2,5 %, also 25.000 mg/kg nicht zur Verwertung auf obertägigen Deponien oder im Untertageversatz verwendet werden. Nach der Auswertung käme dafür kein Abfall in Betracht.

Nimmt man die Abfallarten hinzu, die in ihren Maximalmessungen über den 2,5 % Nickelgehalt liegen, so sind immerhin 11 Abfallarten zumindest potenziell Träger hoher Nickelgehalte. Es lässt sich demnach festhalten, dass kein unmittelbarer Abfallschlüssel zu betrachten ist, sondern die Abfälle nach ihrer besonderen Herkunft zu analysieren sind. Zum Beispiel weist der Abfallschlüssel 10 08 17 Schlämme und Filterkuchen aus der Abgasbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten aus der Rubrik „Abfälle aus sonstiger thermischer Nichteisenmetallurgie“ möglicherweise hohe Nickelgehalte auf.

Aber auch Abfälle aus der Nickelanwendung, wie sie in der Abfallgruppe 1101 Abfälle aus der chemischen Oberflächenbearbeitung und Beschichtung von Metallen und anderen Werkstoffen (z. B. Galvanik, etc.) können bei der Oberflächenbehandlung mit Nickel hohe Nickelkonzentrationen in den Abfällen aufweisen. In obiger Tabelle ist 11 01 09 Schlämme und Filterkuchen, die gefährliche Stoffe enthalten, zu nennen, die für die Nickelgewinnung von Bedeutung sein können.

Die angefragten Angaben auf 6er Schlüsselbasis beim Statistischen Bundesamt können vor der geschilderten Situation allerdings nicht dazu dienen, ein Potential zur Nickelgewinnung sicher abzubilden.

7.3 Aufbereitungsverfahren nickelhaltiger Abfälle

Nickel kann sowohl pyrometallurgisch als auch hydrometallurgisch aufbereitet werden, was z.B. bei der Nickelhütte Aue GmbH praktiziert wird. Dieses Unternehmen ist nach dem Stand der Recherche das einzige, das in Deutschland Nickel aus Sekundärmaterial erzeugt.

Die pyrometallurgische Aufbereitung konzentriert sich in dem dargestellten Fall hauptsächlich auf das Metall Nickel, während bei der hydrometallurgischen Verarbeitung auch Kobalt zurückgewonnen werden kann.

Die pyrometallurgische Aufbereitung erfolgt in Drehflammöfen. Eingesetzt werden Galvanikschlämme, Katalysatoren, Schleifschlämme und nickelhaltige Stäube, die auch Kupfer und Kobalt enthalten können. Sie werden durch Einsatz eines Öl-Sauerstoffbrenner geschmolzen, so dass sich eine Metall- und eine Schlackephase bilden. Die Schmelze wird abgestochen. Beim Erkalten in den Gießkübeln erfolgt eine Dichtentrennung. Der schwerere Nickelstein setzt sich am Boden ab, während die Schlacke oben erstarrt. Der gewonnene Nickelstein muss weiter aufbereitet werden.

Ein schematisches Fließbild der Nickelhütte Aue ist in Abb. 7-1 dargestellt. Auf die hydrometallurgische Aufbereitung wird nicht weiter eingegangen.

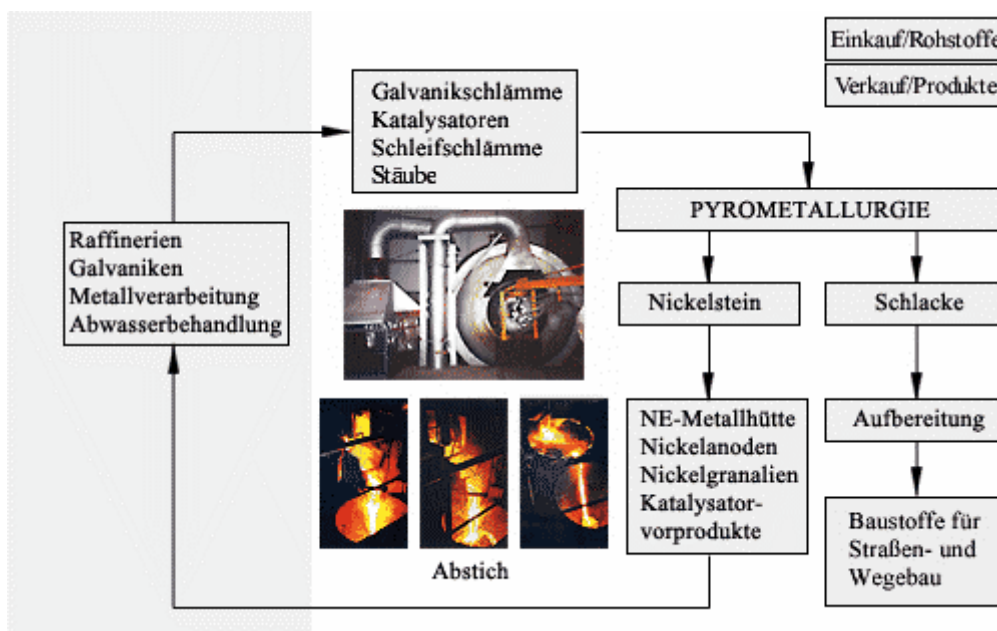


Abb. 7-1: Schematische Darstellung der Aufbereitung nickelhaltiger Abfälle bei Nickelhütte Aue

Abfälle mit einem höheren Nickelgehalt, wie Monoschlämme oder verbrauchte Katalysatoren werden zuerst in einem Drehrohrofen geröstet und die entstandenen Konzentrate schließlich hydrometallurgisch weiterverarbeitet. Im Drehrohrofen werden insbesondere organische Verbindungen und Kohlenstoff durch Verbrennung entfernt. Die weitere hydrometallurgische Verarbeitung erfolgt durch Autoklaven und Solventextraktion. Hergestellt werden Nickel-, Kupfer- und Kobaltchemikalien.

Die Umweltauswirkungen wurden aus Angaben der Nickelhütte Aue und von NEOSYS 2001 abgeschätzt. In der Studie von NEOSYS wird die Verwertung von nickelhaltigen Hydroxidschlämmen untersucht. Erschwert ist die Auswertung der Umweltbelastungen aus dieser Studie dadurch, dass bei den verarbeiteten Abfällen verschiedene Wertmetalle vorhanden sind. Einen genauen Bezug nur auf das Nickel ist nicht ohne weiteres möglich. Hier muss noch im Dialog mit der Nickelhütte Aue überlegt werden, wie ein direkter Bezug zum Nickel hergestellt werden kann.

Die folgende Tab. 7-5 zeigt, dass aus einem Abfall mit 1,7 % Nickel 1,4 % gewonnen werden können. Das entspricht einer Ausbeute von etwa 84 %. Der Gesamtenergiebedarf wird dafür mit ca. 10 MJ pro Kilogramm Abfall angegeben. Es ist zu erkennen, dass ebenfalls noch Kupfer, Chrom, Zink und Blei wiedergewonnen werden. Damit ist der Aufwand nicht alleine wegen des Nickels unternommen worden und die anderen Metalle müssen entsprechend mitgerechnet werden.

Zunächst sind die Zahlen in Tab. 7-5 auf die gesamte Produktpalette bezogen. Um die Verbräuche und Emissionen bezogen auf die Nickelgewinnung darstellen zu können, wurde eine wertmäßige Allokation durchgeführt, d.h. für alle Metalle wurden die mittleren Marktpreise über die letzten 10 bis 15 Jahre ermittelt und für die Gewichtung der Aufwendungen herangezogen. Einzelmetallspezifische Inputs oder Outputs wurden diesen direkt zugeordnet. Alloziert auf 1 kg Nickelprodukt ergeben sich somit die Werte aus Tab. 7-6; der Nickelgehalt im Input liegt dabei unverändert bei 1,7 %.

**Tab. 7-5: Verbräuche und Emissionen der Nickelsekundärgewinnung
(realer Durchschnitt ohne Allokation, bezogen auf 1 kg Input nickelhaltiger Stoffe)**

Nickelverhüttung (Aufwendungen für Nickel und Nebenprodukte)					
Input			Output		
	kg	Bemerkung		kg	Bemerkung
Nickelhaltige Stoffe	1		Produkt(e)	0,066	Quelle: NEOSYS 1999
Zn	5,2E-02	Quelle: NEOSYS 1999	Ni	1,4E-02	Ausbeute ca. 84%
Ni	1,7E-02	Quelle: NEOSYS 1999	Cu	1,9E-02	Ausbeute ca. 73%
Cu	2,5E-02	Quelle: NEOSYS 1999	Cr	1,8E-02	Ausbeute ca. 96%
Co	1,8E-04	Quelle: NEOSYS 1999	Zn	1,0E-02	Ausbeute ca. 20%
Cr	1,9E-02	Quelle: NEOSYS 1999	Pb	5,4E-03	Ausbeute ca. 78%
Al	2,4E-02	Quelle: NEOSYS 1999			
Ba	7,0E-04	Quelle: NEOSYS 1999	Schlacke	0,934	Quelle: NEOSYS 1999
Fe	9,5E-02	Quelle: NEOSYS 1999	Zn	4,1E-02	Quelle: NEOSYS 1999
Pb	6,9E-03	Quelle: NEOSYS 1999	Ni	2,6E-03	Quelle: NEOSYS 1999
As	1,0E-04	Quelle: NEOSYS 1999	Cu	6,9E-03	Quelle: NEOSYS 1999
Hg	3,1E-06	Quelle: NEOSYS 1999	Cr	7,6E-04	Quelle: NEOSYS 1999
Cd	8,0E-05	Quelle: NEOSYS 1999	Pb	1,5E-03	Quelle: NEOSYS 1999
Cl	8,7E-03	Quelle: NEOSYS 1999	Hg	1,0E-06	Quelle: NEOSYS 1999
Mn	3,8E-03	Quelle: NEOSYS 1999	Cd	8,0E-05	Quelle: NEOSYS 1999
Sn	2,5E-03	Quelle: NEOSYS 1999	Rest (nicht angegebe.	8,8E-01	Quelle: NEOSYS 1999
Sb	7,3E-05	Quelle: NEOSYS 1999			
Bi	1,3E-07	Quelle: NEOSYS 1999	Gips (AzB)	k.A.	
V	1,3E-05	Quelle: NEOSYS 1999	Cl im Gips	4,4E-03	
Rest (nicht angegeben)	7,5E-01	Quelle: NEOSYS 1999			
Flussmittel	k.A.		Luftemissionen		
			CO2	1,7E-01	berechnet
Brennstoff (Öl)	0,053	Quelle: Nickelhütte Aue 2007	SO2	5,0E-04	Quelle: NEOSYS 1999
		Annahme Hu 40,4 MJ/kg	CO	4,0E-04	Quelle: NEOSYS 1999
			Staub	1,0E-05	Quelle: NEOSYS 1999
Strom in MJ	2,660	Quelle: Nickelhütte Aue 2007	NO2	1,2E-03	Quelle: NEOSYS 1999
			PCDD/PCDF	7,0E-13	Quelle: NEOSYS 1999
			Pb	1,4E-07	Quelle: NEOSYS 1999
			Hg	2,1E-06	Quelle: NEOSYS 1999
			Cd	2,0E-07	Quelle: NEOSYS 1999
			Cl	4,4E-03	Quelle: NEOSYS 1999
			Wasseremissionen	k.A.	

Tab. 7-6: Verbräuche und Emissionen der Nickelsekundärgewinnung (Reale Situation mit 1,7 % Kupfergehalt im Sekundärkupferinput und Allokation nach Wert)

Nickelverhüttung (Aufwendung bezogen nur auf Nickel; Preisallokation)					
Input			Output		
	kg	Bemerkung		kg	Bemerkung
Nickelhaltige Stoffe	19,0	Ni-Gehalt: 1,7%	Produkt(e)	1,000	
Zn	-	entfällt; Allokation auf Ni	Ni	1,0E+00	Ausbeute ca. 84%
Ni	1,2E+00		Cu	-	Allokation auf Ni
Cu	-	entfällt; Allokation auf Ni	Cr	-	Allokation auf Ni
Co	3,7E-03		Zn	-	Allokation auf Ni
Cr	-	entfällt; Allokation auf Ni	Pb	-	Allokation auf Ni
Al	4,8E-01				
Ba	1,4E-02		Schlacke	18,9	
Fe	1,9E+00		Zn	8,4E-01	
Pb	-	entfällt; Allokation auf Ni	Ni	5,4E-02	
As	2,1E-03		Cu	1,4E-01	
Hg	6,3E-05		Cr	1,5E-02	
Cd	1,6E-03		Pb	3,1E-02	
Cl	1,8E-01		Hg	2,1E-05	
Mn	7,7E-02		Cd	1,6E-03	
Sn	5,0E-02		Rest (nicht angegeben)	1,8E+01	
Sb	1,5E-03				
Bi	2,6E-06		Gips (AzB)	k.A.	
V	2,5E-04		Cl im Gips	4,2E-01	
Rest (nicht angegeben)	1,5E+01				
Flussmittel	k.A.		Luftemissionen		
Brennstoff (Öl)	1,1	Quelle: Nickelhütte Aue 2007	CO2	3,3E+00	berechnet
		Annahme Hu 40,4 MJ/kg	SO2	1,0E-02	
Strom in MJ	53,8	Quelle: Nickelhütte Aue 2007	CO	8,1E-03	
			Staub	2,0E-04	
			NO2	2,4E-02	
			PCDD/PCDF	1,4E-11	
			Pb	2,8E-06	
			Hg	4,2E-05	
			Cd	4,1E-06	
			Cl	8,8E-02	
			Wasseremissionen	k.A.	

Für die Bestimmung der Grenzkonzentration an Nickel im Abfall wird eine Funktion benötigt, die die Abhängigkeit von Verbräuchen und Emissionen vom Nickelgehalt aufzeigen. Da diese Daten weder bei der Nickelhütte Aue noch in der Literatur verfügbar sind, wird eine Abschätzung vorgenommen, die einen Abfall mit 5 % Nickelgehalt voraussetzt.

Folgende Annahmen wurden für den veränderten Metallgehalt im Input getroffen, die im einzelnen auch in Tab. 7-7 hinter den Werten genannt werden:

- Die Gehalte der Inhaltsstoffe im eingesetzten Abfall bleiben bis auf den Nickelgehalt konstant
- Die Energieverbräuche korrelieren mit Gesamt-Inputmenge
- Die Schlackemenge und -Zusammensetzung korrelieren mit dem Abfallinput
- Die Luftemissionen CO₂, SO₂, CO, NO_x, Dioxine sind brennstoffabhängig
- Schwermetallemissionen in die Luft korrelieren mit dem Schwermetallinput

Tab. 7-7: Verbräuche und Emissionen der Nickelsekundärgewinnung (Hypothetische Abschätzung mit 5 % Kupfergehalt im Sekundärkupferinput und Allokation nach Wert)

Nickelverhüttung (Aufwendung bezogen nur auf Nickel; Preisallokation)				
Input	kg	Bemerkung / Annahmen	Output	kg
Nickelhaltige Stoffe	6,3	Ni-Gehalt: 5,0%	Produkt(e)	1,000
Zn	-	entfällt; Allokation auf Ni	Ni	1,0E+00
Ni	1,2E+00		Cu	-
Cu	-	entfällt; Allokation auf Ni	Cr	-
Co	1,2E-03	Gehalt im Abfall bleibt konstant	Zn	-
Cr	-	entfällt; Allokation auf Ni	Pb	-
Al	1,6E-01	Gehalt im Abfall bleibt konstant	Schlacke	6,3
Ba	4,7E-03	Gehalt im Abfall bleibt konstant	Zn	2,8E-01
Fe	6,4E-01	Gehalt im Abfall bleibt konstant	Ni	5,4E-02
Pb	-	entfällt; Allokation auf Ni	Cu	4,6E-02
As	6,8E-04	Gehalt im Abfall bleibt konstant	Cr	5,1E-03
Hg	2,1E-05	Gehalt im Abfall bleibt konstant	Pb	1,0E-02
Cd	5,4E-04	Gehalt im Abfall bleibt konstant	Hg	6,8E-06
Cl	5,8E-02	Gehalt im Abfall bleibt konstant	Cd	5,4E-04
Mn	2,6E-02	Gehalt im Abfall bleibt konstant	Rest (nicht angegeben)	5,9E+00
Sn	1,7E-02	Gehalt im Abfall bleibt konstant	Gips (AzB)	k.A.
Sb	4,9E-04	Gehalt im Abfall bleibt konstant	Cl im Gips	1,4E-01
Bi	8,7E-07	Gehalt im Abfall bleibt konstant	Luftemissionen	
V	8,4E-05	Gehalt im Abfall bleibt konstant	CO ₂	1,1E+00
Rest (nicht angegeben)	5,0E+00		SO ₂	3,3E-03
Flussmittel	k.A.		CO	2,7E-03
Brennstoff (Öl)	0,4	Korrelation mit Gesamt-Input	Staub	6,7E-05
		Annahme Hu 40,4 MJ/kg	NO ₂	8,0E-03
Strom in MJ	17,8	Korrelation mit Gesamt-Input	PCDD/PCDF	4,7E-12
			Pb	9,3E-07
			Hg	1,4E-05
			Cd	1,3E-06
			Cl	2,9E-02
			Wasseremissionen	k.A.

7.4 Vergleichende Umweltbewertung

Die Umweltbewertung basiert auf den ermittelten Prozessdaten für die Nickelaufbereitung aus dem vorangegangenen Kapitel. Die Datenqualität ist dabei auch ein wichtiges Kriterium für Interpretation der Ergebnisse und wird im folgenden Abschnitt kurz dargestellt.

Die Zahlenwerte wurden überwiegend aus dem Forschungsbericht von NEOSYS (1999) abgeleitet. Die dort verwendeten Datengrundlagen sind nur teilweise transparent und nicht alle Werte können nachvollzogen werden. Insgesamt erscheinen die Schwermetall- und Dioxin-Emissionen hoch, Angaben zu Abwasseremissionen fehlen. Bei den Produkten fehlen auch Informationen zur Qualität der Metalle – es wurden daher Primärmetallqualitäten für dieses Vorhaben angenommen. Allgemein erscheint eine Überprüfung und Ergänzung der Datensätze notwendig. Die Energieverbräuche und die brennstoffbedingten CO₂-Emissionen konnten durch Zahlen der Nickelhütte Aue (NHA 2007) bereits auf den neusten Stand gebracht werden; sie spiegeln die aktuelle Situation in 2007 wider.

Analog zu dem Vorgehen für Blei und Kupfer werden die Grenzkonzentrationen mithilfe der Datenpunkte für 1,7 % und 5 % Nickelgehalt ermittelt. Die Abhängigkeit der Umweltbelastung von dem Nickelgehalt wird mit einer logarithmischen Funktion dargestellt. Diese Auswertung erfolgt für entsprechend der methodischen Festlegung in Kap. 2 für die drei Methoden KEA, UEBEL mit Fläche und UEBEL ohne Berücksichtigung der Flächeninanspruchnahme.

In Abb. 7-2 wird für den Primärenergieaufwand KEA der Funktionsverlauf der Sekundärnickelgewinnung der Primärnickelherstellung gegenübergestellt. Der Break-Even-Punkt liegt bei 2,2% Nickel im Input – das Recycling von Abfällen mit höheren Nickelgehalten benötigt demzufolge weniger Primärenergie als die Primärverhüttung

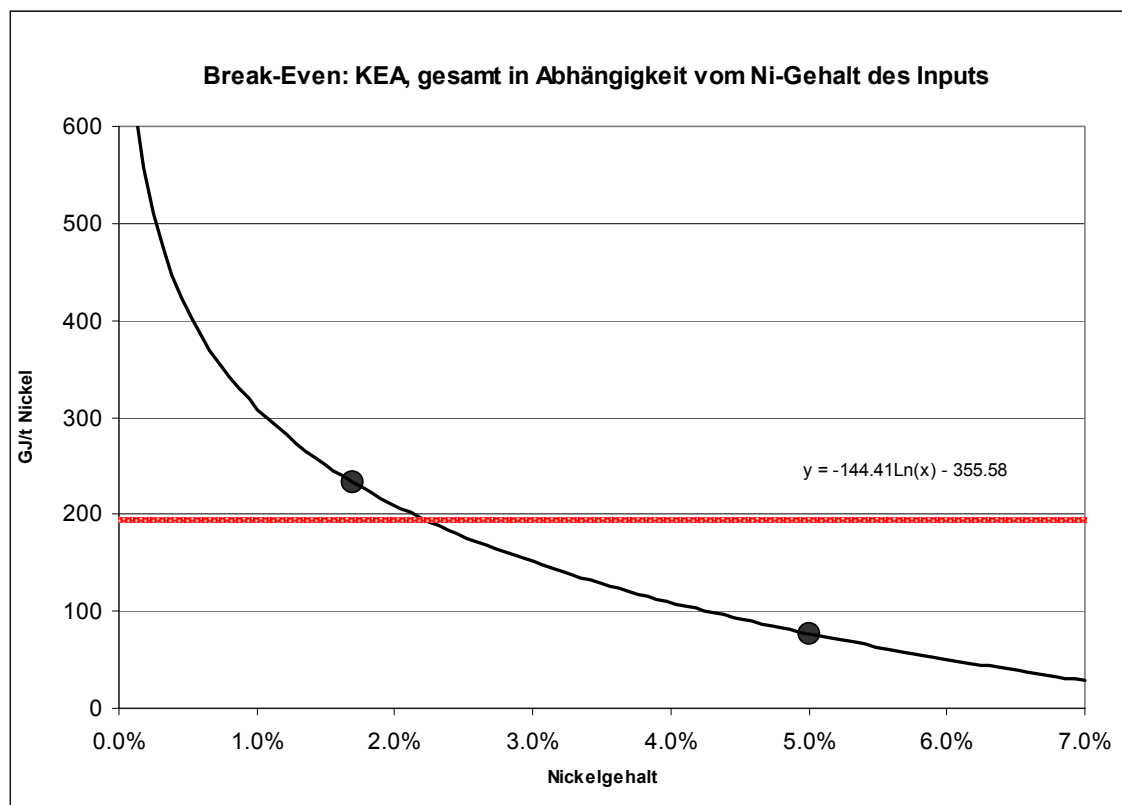


Abb. 7-2: Primärenergieaufwand (KEA) der Sekundärnickelgewinnung als Funktion vom Nickelgehalt des Inputs, ermittelt aus den beiden Datenpunkten für 1,7 % und 5 % Nickelgehalt (schwarze Linie); die rote horizontale Linie repräsentiert die Primärnickelherstellung.

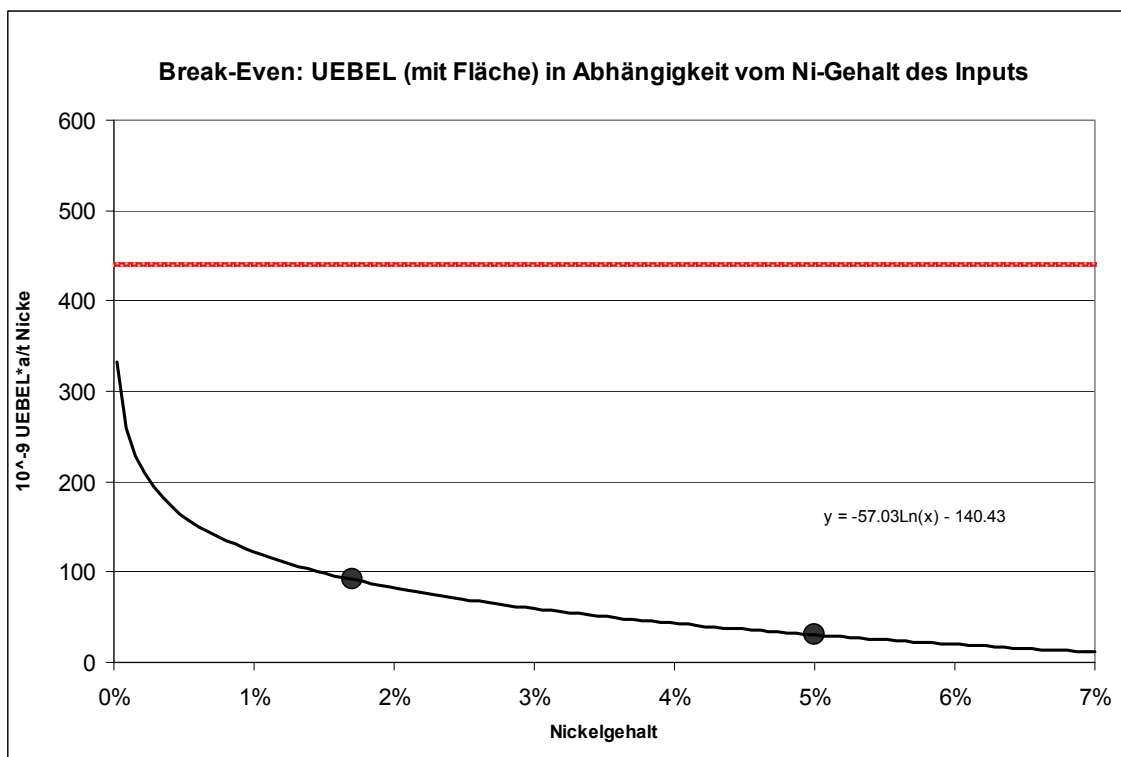
Die Aggregationsmethode UEBEL berücksichtigt als Indikator für die Umweltbelastung die Umweltschutzgüter Klima, Luft, Wasser und Boden (in Form von Fläche). Für die Vergleichssysteme der Nickelgewinnung sind die Einzel- und Summenwerte in Tab. 7-8 dargestellt.

Betrachtet man die Werte für das Schutzgut Klima alleine, so zeigt sich für die Systeme ein ähnliches Bild wie für den Indikator KEA. Damit repräsentiert KEA erwartungsgemäß diesen Aspekt gut, da die CO₂-Emissionen von dem Energieeinsatz abhängen. Das Gesamtergebnis wird aber durch die SO₂-Emissionen dominiert, die hauptsächlich bei der Primärverhüttung der sulfidischen Erze auftreten. Obwohl der real eingesetzte Nickelgehalt von 1,7 % niedriger als der in der Versatzverordnung genannte Grenzwert von 2,5% liegt, weist das Nickelrecycling geringere Belastungen auf als die Primärgewinnung. Dies gilt auch für die anderen berücksichtigten Parameter – mit Ausnahme für die CO₂-Emissionen.

Der große Abstand zwischen der Primär und Sekundärgewinnung wird auch in den beiden Abbildungen (Abb. 7-3 und Abb. 7-4) ersichtlich. Unter Berücksichtigung der Flächenbeanspruchung bei der Aggregationsmethode liegt der Grenzwert für eine weniger umweltbelastende Nickelgewinnung bei 0,004 % Nickelgehalt. Ohne die Flächenbetrachtung ist eine Aufbereitung von Abfällen mit 0,01 % Nickelgehalt noch sinnvoll.

Tab. 7-8: Differenzierte und aggregierte Umwelteinwirkungsbelastungs-Ergebnisse (UEBEL) für die Primär- und Sekundärnickelgewinnung (1,7 % und 5 % Nickel-Gehalt im Input)

UEBEL	Primär-nickel	Sekundär 1,7% Ni-Inp.	Sekundär 5% Ni-Inp.
Klima			
CO2 Äquivalente	42,55	54,46	18,02
Luftqualität			
SO2	216,35	3,46	1,15
NOx	19,65	10,29	3,41
NH3	8,55	0,15	0,05
NMVOG	2,71	0,54	0,18
Gewässer			
AOX	0,25	0,11	0,04
Gesamt-N	7,57	0,09	0,03
Boden			
Flächenumwandlung	144,52	22,84	7,56
UEBEL-Summe	442,16	91,95	30,42
ohne Fläche	297,63	69,10	22,86

**Abb. 7-3:** Umwelteinwirkungsbelastung (UEBEL) mit Berücksichtigung der Flächenbeanspruchung der Sekundärnickelgewinnung als Funktion vom Nickelgehalt des Inputs, ermittelt aus den beiden Datenpunkten für 1,7 % und 5 % Nickelgehalt (schwarze Linie); die rote horizontale Linie repräsentiert die Primärnickelherstellung.

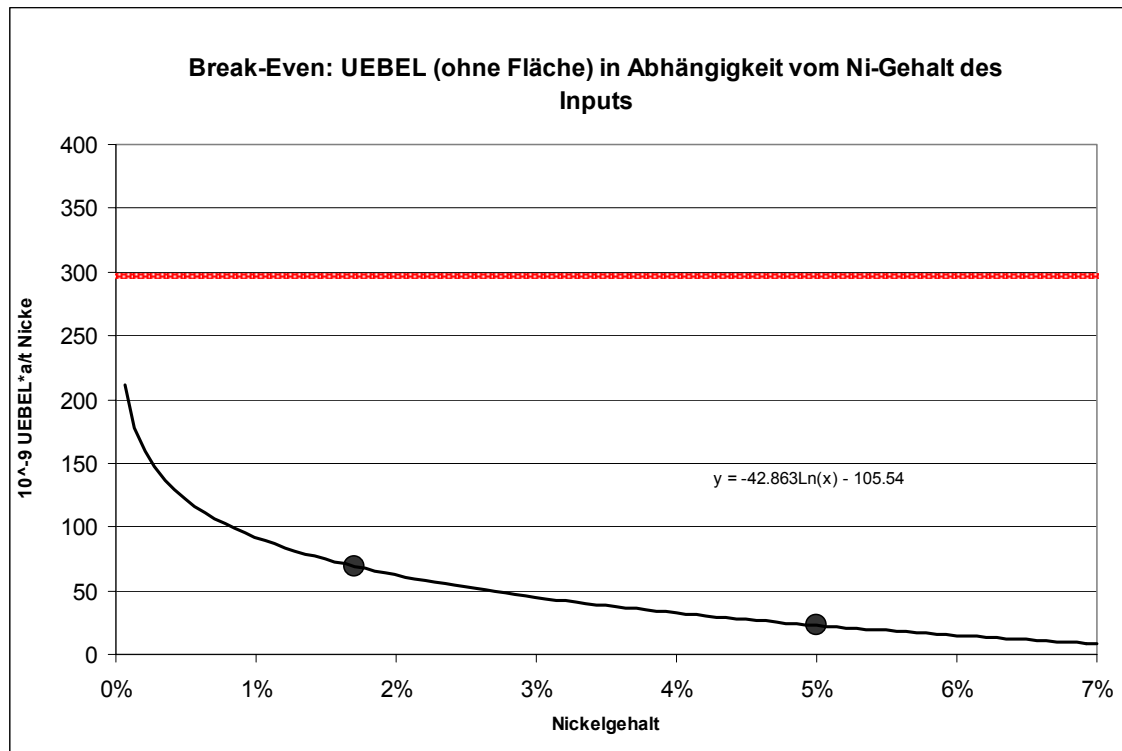


Abb. 7-4: Umwelteinwirkungsbelastung (UEBEL) ohne Berücksichtigung der Flächenbeanspruchung der Sekundärnickelgewinnung als Funktion vom Nickelgehalt des Inputs, ermittelt aus den beiden Datenpunkten für 1,7 % und 5 % Nickelgehalt (schwarze Linie); die rote horizontale Linie repräsentiert die Primärnickelherstellung.

Ergänzend sind die Schwermetall- und Dioxinmissionen in die Luft zu betrachten. Der Vergleich in Abb. 7-5 zeigt ein uneinheitliches Bild für die Schwermetallemissionen. So ist die Sekundärgewinnung unabhängig vom Nickelgehalt im Input vorteilhaft für die Schadstoffe Arsen, Chrom, Kupfer, Nickel, Blei und Zink. Für Cadmium und Quecksilber weist es höher Emissionen als die Primärgewinnung auf. Die Dioxinmissionen liegen insgesamt in einer der gleichen Größenordnung. Wie zu Beginn des Kapitels 7.3 erläutert ist aber die Datenqualität für diese Emissionen eingeschränkt – insbesondere für die Sekundärgewinnung. Vor einer abschließenden Bewertung sollten für diese Parameter aktuelle Zahlen der Nickelhütte Aue berücksichtigt werden.

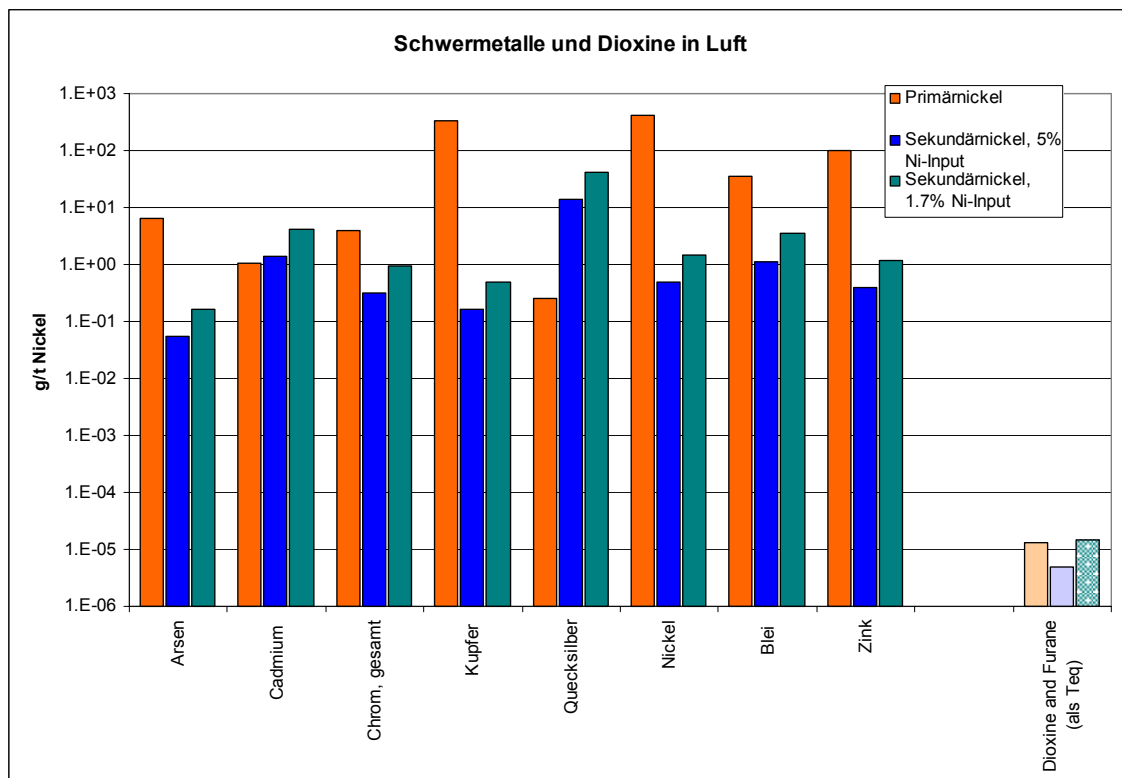


Abb. 7-5: Schwermetall- und Dioxin-Emissionen in die Luft aus der Primär- und Sekundärnickelgewinnung (5 % und 1,7 % Nickel-Gehalt im Input)
(Die Y-Achse ist logarithmisch skaliert)

Fazit:

Je nach Bewertungsmethode wurden die folgenden Grenzkonzentrationen bestimmt:

- 2,2 % bei KEA
- 0,004 % bei UEBEL mit Fläche
- 0,1 % bei UEBEL ohne Fläche

Die Umweltbelastungen der Nickelgewinnung werden über den Indikator KEA eingeschränkt repräsentiert. Insbesondere die bei der Verhüttung schwefelhaltiger Erze in hohem Maß auftretenden SO₂-Emissionen werden nicht ausreichend abgebildet. Betrachtet man die Ergebnisse der Aggregationsmethode (UEBEL) erscheint eine Reduktion der Grenzwertkonzentration angemessen. Dies wird dadurch bestätigt, dass bei der Nickelhütte Aue durchschnittlich Stoffe mit geringerem Nickelgehalt verarbeitet werden. Dennoch sollte vor einer Änderung der Versatzverordnung und Festlegung eines Grenzwertes die Daten und die Annahmen durch Experten, z.B. von der Nickelhütte Aue, überprüft werden.

Empfehlung:

Überprüfung der Datenbasis und Annahmen und ggf. eine Reduktion der Grenzwertkonzentration auf Basis der aktualisierten Ergebnisse.

8 Verwertung von Zink

8.1 Gewinnung von Primär-Zink und Umweltauswirkungen

Die weltweiten Vorräte an Zink werden auf 220 Millionen t geschätzt. Die größten Vorkommen gibt es in Australien, China, Kasachstan und USA. Ca. 10 Millionen t an Zink war die Fördermenge im Jahr 2006, wobei China, Australien und Peru die wichtigsten Förderländer mit einem Anteil größer 50 % waren. Auch hier wieder die Aufstellung des US Geological Survey (USGS 2007):

Tab. 8-1: Welt-Produktion und Reserven an Zink (in 1000 t)

World Mine Production, Reserves, and Reserve Base:				
	Mine production⁶		Reserves⁷	Reserve base⁷
	2005	2006^a		
United States	748	725	30,000	90,000
Australia	1,330	1,400	33,000	80,000
Canada	755	725	11,000	31,000
China	2,450	2,500	33,000	92,000
Kazakhstan	400	450	30,000	35,000
Mexico	470	450	8,000	25,000
Peru	1,200	1,210	16,000	20,000
Other countries	<u>2,400</u>	<u>2,500</u>	<u>59,000</u>	<u>87,000</u>
World total (rounded)	9,800	10,000	220,000	460,000

Quelle: USGS, 2007

Die Produktion von Hüttenzink in Deutschland betrug im Jahr 2005 insgesamt 335.000 t, was einem Weltanteil von 3,3% und in der Rangliste einem 9. Platz entspricht (BGR 2006). Einsatzmaterial dafür sind Zinkkonzentrate und Sekundärmaterial aus dem Inlandsaufkommen und zu geringen Teilen aus dem Ausland.

Zinkerze und hauptsächlich Zinkkonzentrate wurden im Jahr 2005 mit etwa 400.000 t eingeführt. Das entspricht einem Zinkinhalt von 200.000 t. Die Einfuhr an zinkhaltigen Aschen und Rückständen schlug mit etwa 22.000 t zu Buche.

Neben den Mengen zur Zinkherstellung aus Konzentraten und Sekundärmaterial war mit etwa 250.000 t an Zink in metallischer Form und 77.000 t in Form von Legierungen eine nicht unbedeutende Einfuhr verbunden. Bei einer Ausfuhr von ca. 85.000 t an metallischem Zink und 30.000 t an Zinklegierungen ergibt sich ein Nettoimport an Zinkmetall von 165.000 t und an Zinklegierungen von 47.000 t.

Interessant ist im Zusammenhang dieses Vorhabens, dass den Einfuhren von 22.000 t Aschen und Rückständen Ausfuhren von 36.000 t gegenüberstehen. Zu 50 % gehen diese Exporte nach Belgien. Ein ähnliches Bild ergibt sich bei Zinkabfall und Schrott. Das bedeutet, dass in Deutschland Aufbereitungskapazitäten für Aschen und andere Abfälle fehlen.

Der Verbrauch an Rohzink lag im Jahr 2005 bei 556.000 t. Damit ist Deutschland das viertgrößte Verbraucherland für Hüttenzink und liegt mit einem Weltanteil von 5,3 % nur hinter China, den USA und Japan.

Im Folgenden sind die Importe von Zinkkonzentraten und Zink nach Deutschland sowie die jeweils wichtigsten Lieferländer nach der Statistik der BGR (BGR 2006) aufgeführt:

Tab. 8-2: Deutsche Zinkimporte in den Jahren 2002 bis 2005 und Hauptlieferländer

METALLE	Importe Deutschland				Lieferländer (Importanteile > 5 %)	
	2002	2003	2004	2005		
Zink						
Erz & Konzentrat	316.121	436.787	495.066	401.829	Irland	27,4
					Peru	16,5
					Schweden	15,4
					USA	13,6
					Spanien	6,7
					Belgien	5,8
Aschen & Rückstände, Zn-haltig	17.277	16.226	18.026	22.066	Niederlande	21,6
					Schweiz	19,9
					Frankreich	13,1
					Österreich	11,5
					USA	8,2
					Polen	6,4
Matte & ähnl. Material	22.847	22.166	13.793	17.703	Niederlande	25,5
					Belgien	15,4
					Frankreich	11,8
					Großbritannien	11,5
					Österreich	8,7
					Tschechische Republik	7,7
					Luxemburg	5,3
Metall (nicht legiert)	250.998	261.371	259.802	245.794	Spanien	33,0
					Finnland	25,0
					Niederlande	19,4
					Belgien	6,4
					Polen	5,6
Metall (Pulver, Staub)	8.589	8.363	7.341	6.126	Belgien	59,4
					Norwegen	23,1
					USA	5,7
					Großbritannien	5,5
Legierungen	82.895	103.187	85.062	76.981	Belgien	64,5
					Frankreich	12,4
					Finnland	8,8
					Luxemburg	5,6
					Großbritannien	5,1
Abfälle & Schrott	34.673	26.743	24.382	22.480	Frankreich	37,6
					Niederlande	27,4
					Dänemark	9,9

Zink kommt hauptsächlich als Zinksulfid ZnS vor, mit einem Zinkanteil von 65 % in der Verbindung. Darüber hinaus ist auch noch Zinkspat (Zinkcarbonat) von Bedeutung. Beim Abbau von Zinksulfid ist oft eine Vergesellschaftung mit Bleisulfid gegeben.

Blei-Zinkerze werden hauptsächlich aus Minen meist mittels Sprengung und Räum-baggern gewonnen. Die Gehalte an Zink im Roherz betragen zwischen 3 und 8 %. Daher müssen vor der Weiterverarbeitung mittels Klassiertechniken und Flotationsverfahren Konzentrate hergestellt werden. Dies ist die Voraussetzung sowohl für den Einsatz in der Pyro- wie auch in der Hydrometallurgie.

Im weiteren Verfahrensgang wird das sulfidische Zinkerzkonzentrat entweder in der Drucksinteranlage für den Einsatz in der Pyrometallurgie oder im Wirbelbettverfahren vor dem Einsatz in der Hydrometallurgie geröstet. Die Röstreaktion wandelt das sulfidische Zinkerzkonzentrat in oxidisches Konzentrat um.

Das durch die Röstreaktion entstandene ZnO ist immer noch vergesellschaftet mit der Gangart der Erzkonzentrate, wie auch im Erzkonzentrat enthaltenen anderen Metallen, wie z.B. PbO , so dass eine Verwendung als ZnO nach wie vor ausgeschlossen ist und nicht als Fertigprodukt vermarktet werden kann. Hier ist nach wie vor ein Raffinationsprozess notwendig.

Zur Gewinnung von metallischem Zink gibt es zwei Herstellungswege.

Der pyrometallurgische Weg führt über die Reduktion des Oxids unter Zugabe von Koks. Dabei wird das gesinterte oxidische Zinkerzkonzentrat mit Koks vermischt und in den Imperial Smelter gegeben, in dem das Zink reduziert wird und in metallischer Form gasförmig den Reaktor verlässt. Metallisches Zink wird schließlich auskondensiert und erreicht auf diesem Weg eine Reinheit von etwa 98 % (Hütten- oder Rohzink). Üblicherweise ist diesem Produktionsweg noch ein Raffinationsschritt nachgeschaltet, der die erforderlichen Reinheiten von 99,9 % Zinkgehalt erreicht.

Die nasschemische Herstellung des Metalls erfolgt über die Reaktion des gerösteten oxidischen Zinkerzkonzentrates zu Zinksulfat durch Zugabe von Schwefelsäure. Auf elektrolytischem Wege wird das Zink reduziert und abgeschieden. Elektrolysezink hat gleich einen wesentlich höheren Reinheitsgrad als Hütten- oder Rohzink, so dass ein weiterer Raffinationsschritt hinfällig ist. Die hydrometallurgische Herstellung ist mit 80 % Anteil der vorherrschende Prozess weltweit.

Die Umweltbelastungen zur Herstellung von 1 t Primärzink wurden mit einem Herstellungsmix von 80 % hydrometallurgisch zu 20 % pyrometallurgisch ermittelt und in Tab. 8-3 dargestellt.

Tab. 8-3: Umweltbelastungen bei der Herstellung von 1 t Primärzink

Umweltkennzahlen für		Zink
Parameter		Wert
Flächenverbrauch pro t	m ² /t	2,3
Energieverbrauch		
KEA, fossil	GJ/t	28
KEA, nuklear	GJ/t	10
KEA, erneuerbar	GJ/t	13
KEA, gesamt	GJ/t	51
Belastungen durch Abgasemissionen		
Treibhauseffekt	kg CO ₂ -Äq./t	2.438
Ozonloch	g FCKW-Äq./t	0,14
Versauerung	kg SO ₂ -Äq./t	39,0
Sommersmog	kg Ethen-Äq./t	1,5
terrestrische Eutrophierung	kg PO ₄ -Äq./t	2,5
Feinstaub PM 10	kg PM ₁₀ -Äq./t	9,8
Arsen	g/t	12,8
Cadmium	g/t	4,5
Quecksilber	g/t	23
Nickel	g/t	
Blei	g/t	625
Dioxine and Furane (als Teq)	g/t	2,87E-04
Belastungen durch Abwasseremissionen		
aquatische Eutrophierung	kg PO ₄ -Äq./t	0,071
Cadmium	g/t	4,80
Quecksilber	g/t	0,21
AOX	g/t	0,04

Datengrundlage für die Ermittlung der Primärzinkherstellung sind wiederum die BREF-Dokumente (IPPC 2001) sowie Ayres 2002 und Xiao 2003. Zurzeit wird ein Dateninventar von dem Internationalen Zinkverband – International Zinc Association – vorbereitet, das nach Auskunft im März 2007 vorliegen soll. Es wird eine aktuelle weltweit gültige Datenbasis der Zinkgewinnung beinhalten.

8.2 Zinkhaltige mineralische Abfälle

Mit Hilfe der Datenbank zu Abfallanalysen des Landes Nordrhein-Westfalen wurde eine Auswertung der zu erwartenden Zinkgehalte in mineralischen Abfällen vorgenommen.

Ausgehend von den 6er Abfallschlüsseln nach der Abfallverzeichnisverordnung (AVV) wurden die Mittelwerte, das Minimum und das Maximum des Zinkgehaltes abgefragt. Die Aufstellung ist in Tab. 8-4 dargestellt und wurde nach dem mittleren Zinkgehalt sortiert. Die Angaben sind in mg/kg.

Nach der Versatzverordnung dürfen Abfälle mit einem Zinkgehalt über 10 %, also 100.000 mg/kg nicht zur Verwertung auf obertägigen Deponien oder im Untertageversatz verwendet werden. Nach der Auswertung käme das für vier Abfälle in Betracht:

- 10 06 07 Schlämme und Filterkuchen aus der Abgasbehandlung; aus: Abfälle aus der thermischen Kupfermetallurgie
- 10 05 06 Schlämme und Filterkuchen aus der Abgasbehandlung; aus: Abfälle aus der thermischen Zinkmetallurgie
- 10 09 10 Filterstaub mit Ausnahme desjenigen, der unter 100909 fällt; aus Abfälle vom Gießen von Eisen und Stahl
- 10 02 13 Schlämme und Filterkuchen aus der Abgasbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten; aus: Abfälle aus der Eisen- und Stahlindustrie

Darüber hinaus wurden etwa 20 weitere 6er Abfallschlüsselnummern identifiziert, deren Maximalkonzentration an Zink über der in der Versatzverordnung genannten Grenze liegen. Obwohl für manche Abfallgruppen die statistische Belastbarkeit nicht hoch ist, sind die Hinweise eindeutig, dass zinkhaltige mineralische Abfälle eine wichtige Gruppe sind, deren Entsorgung eine besondere Beachtung verdient.

Aus diesem Grund wurde eine zweite Tabelle (übernächste Seite) erstellt, bei der die wichtigsten Abfallschlüssel der Gruppe 10 (Anorganische Abfälle aus thermischen Prozessen) mit allen metallurgischen Prozessen, der Gruppen 11 und 12 mit Prozessen der Oberflächenbearbeitung (z.B. Galvanisieren) und der Gruppe 19 (Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen) mit ihren jeweiligen Zinkgehalten dargestellt sind.

Nach Statistischem Bundesamt (Fachserie 19) waren an Abfällen aus der thermischen Zinkmetallurgie (AVV 10 04) für das Jahr 2001 nur 900 t als zur Aufkommen verzeichnet worden. Doch kommen zinkhaltige mineralische Abfälle verstärkt aus der Eisen- und Stahlindustrie. Dazu ist es aber notwendig, die 6er Schlüssel auszuwerten, die nicht veröffentlicht sind. Zu einer Potenzialabschätzung wurden die Mengen beim Statistischen Bundesamt angefragt.

Tab. 8-4: Schwankungsbreite von Zink in verschiedenen Abfallarten nach AVV

Abfallart	Einheit	[N]	Minimum	Maximum	Mittelwert	Stdabw
100607 Schlämme und Filterkuchen aus der Abgasbehandlung	mg/kg	4	110.000	740.000	498.750	293.582
100506 Schlämme und Filterkuchen aus der Abgasbehandlung	mg/kg	1	239.000	239.000	239.000	0
100910 Filterstaub mit Ausnahme desjenigen, der unter 10 09 09 fällt	mg/kg	14	278	386.100	126.822	154.161
100213 Schlämme u. Filterkuchen a. d. Abgasbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	4	1.262	250.000	121.611	131.005
100207 feste Abfälle aus der Abgasbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	123	1	398.400	89.470	100.447
100909 Filterstaub, der gefährliche Stoffe enthält	mg/kg	8	8.602	322.000	83.799	100.029
110109 Schlämme und Filterkuchen, die gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	232	0	688.000	67.013	109.632
100309 schwarze Krätzen aus der Zweitschmelze	mg/kg	1	66.700	66.700	66.700	0
110108 Phosphatierschlämme	mg/kg	55	41	228.000	63.619	51.669
100208 Abfälle aus der Abgasbehandlung mit Ausnahme derjenigen, die unter 100207 fallen	mg/kg	48	42	298.500	62.212	75.231
190206 Schlämme aus der physikalisch-chemischen Behandlung ohne 190205	mg/kg	4	170	145.503	48.359	68.456
110202 Schlämme aus der Zink-Hydrometallurgie (einschließlich Jarosit, Goethit)	mg/kg	16	44	568.889	45.107	141.779
100401 Schlacken (Erst- und Zweitschmelze)	mg/kg	3	5.390	78.322	41.237	36.482
190205 Schlämme a. d. physikalisch-chemischen Behandlung, d. gefährl. Stoffe enthalten	mg/kg	288	0	378.800	40.060	72.411
061199 Abfälle a. n. g.	mg/kg	25	10	273.000	29.146	75.482
191005 andere Fraktionen, die gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	20	49	198.850	27.802	41.974
101009 Filterstaub, der gefährliche Stoffe enthält	mg/kg	1	26.100	26.100	26.100	0
100505 feste Abfälle aus der Abgasbehandlung	mg/kg	1	24.744	24.744	24.744	0
120114 Bearbeitungsschlämme, die gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	17	63	200.000	24.143	52.605
190813 Schlämme, die gef. Stoffe aus einer anderen Behndl. von industr. Abwasser enth.	mg/kg	16	32	162.000	22.114	45.959
060503 Schlämme aus der betriebseigenen Abwasserbehandlung ohne 060502	mg/kg	3	18.040	23.820	21.827	3.281
100815 Filterstaub, der gefährliche Stoffe enthält	mg/kg	2	8.577	34.760	21.669	18.514
191212 sonstige Abfälle aus der mechanischen Behandlung von Abfällen ohne 191211	mg/kg	2	14.000	26.000	20.000	8.485
190113 Filterstaub, der gefährliche Stoffe enthält	mg/kg	519	90	201.261	19.979	19.683
100214 Schlämme und Filterkuchen aus der Abgasbehandlung ohne 100213	mg/kg	6	756	46.000	19.418	18.042
100501 Schlacken (Erst- und Zweitschmelze)	mg/kg	4	306	53.000	18.702	24.127
060405 Abfälle, die andere Schwermetalle enthalten	mg/kg	26	180	145.000	16.257	32.190
190117 Pyrolyseabfälle, die gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	10	74	71.529	15.724	20.148
190115 Kesselstaub, der gefährliche Stoffe enthält	mg/kg	35	1.869	45.700	15.669	11.751
190105 Filterkuchen aus der Abgasbehandlung	mg/kg	143	1	334.500	13.334	30.856
190111 Rost- und Kesselaschen sowie Schlacken, die gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	32	199	198.850	12.587	34.894
161103 andere Auskleid. u. feuerf. Material. a. metallurg. Prozessen, gef. Stoffe enth.	mg/kg	8	0	84.100	11.555	29.417
060502 Schlämme a. betriebseigener Abwasserbehandlung, d. gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	8	5	51.500	11.295	17.820
100817 Schlämme u. Filterkuchen aus d. Abgasbehandlung, d. gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	2	409	21.810	11.110	15.133

Zur besseren Übersicht sind in der Tab. 8-5 die 6er Abfallschlüssel zusammengestellt worden, die für eine Zinkverwertung in Frage kommen.

Tab. 8-5: Schwankungsbreite von Zink in verschiedenen Abfallarten nach AVV, geordnet nach Rubriken der Abfallschlüssel

Abfallart	Einheit	[N]	Minimum	Maximum	Mittelwert
10 Abfälle aus thermischen Prozessen					
1020 Abfälle aus der Eisen- und Stahlindustrie					
100207 feste Abfälle aus der Abgasbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	123	1	398.400	89.470
100208 Abfälle aus der Abgasbehandlung mit Ausnahme derjenigen, die unter 100207 fallen	mg/kg	48	42	298.500	62.212
100213 Schlämme u. Filterkuchen a. d. Abgasbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	4	1.262	250.000	121.611
1004 - 1006 Abfälle aus Blei-, Zink- und Kupfermetallurgie					
100401 Schlacken (Erst- und Zweitschmelze)	mg/kg	3	5.390	78.322	41.237
100501 Schlacken (Erst- und Zweitschmelze)	mg/kg	4	306	53.000	18.702
100607 Schlämme und Filterkuchen aus der Abgasbehandlung	mg/kg	4	110.000	740.000	498.750
1090 Abfälle vom Gießen von Eisen und Stahl					
100909 Filterstaub, der gefährliche Stoffe enthält	mg/kg	8	8.602	322.000	83.799
100910 Filterstaub mit Ausnahme desjenigen, der unter 10 09 09 fällt	mg/kg	14	278	386.100	126.822
11 - 12 Chemischen Oberflächenbearbeitung von Metallen; Nichteisen-Hydrometallurgie; Formgebung					
110108 Phosphatierschlämme	mg/kg	55	41	228.000	63.619
110109 Schlämme und Filterkuchen, die gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	232	0	688.000	67.013
110202 Schlämme aus der Zink-Hydrometallurgie (einschließlich Jarosit, Goethit)	mg/kg	16	44	568.889	45.107
120114 Bearbeitungsschlämme, die gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	17	63	200.000	24.143
19 Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen					
190205 Schlämme a. d. physikalisch-chemischen Behandlung, d. gefährl. Stoffe enthalten	mg/kg	288	0	378.800	40.060
190206 Schlämme aus der physikalisch-chemischen Behandlung ohne 190205	mg/kg	4	170	145.503	48.359

8.3 Aufbereitungsverfahren zinkhaltiger Abfälle

Stahlwerksstäube sind die mengenmäßig relevanten zinkhaltigen Abfälle, die zur Sekundärzinkgewinnung verwendet werden. In Deutschland ist der Wälzrohrföfen das am häufigsten eingesetzte Verfahren, um Zink zurück zu gewinnen. Dabei entsteht zunächst Wälzoxid, ein zinkreiches Konzentrat, mit einem Zinkanteil von etwa 60 %. Im Wälzoxid finden sich auch noch ausbeutbare Bleianteile. Zinkrecycling nach dem Wälzverfahren betreibt die B.U.S Steel Services GmbH mit ihren Tochtergesellschaften, der B.U.S Metall GmbH, Duisburg, und der B.U.S Zinkrecycling Freiberg GmbH & Co. KG in Freiberg. Weiterhin wird dieses Verfahren von der Harz-Metall GmbH in Goslar angewandt. Als typisches Beispiel wird das Wälzverfahren der B.U.S Steel Services GmbH vorgestellt (s.a. Abb. 8-1).

Bei der B.U.S Steel Services GmbH werden die angelieferten Stäube, Schlämme, Filterkuchen oder sonstigen zinkhaltigen Reststoffen entweder in geschlossenen Siloanlagen oder eingehausten Boxen zwischengelagert. Diese Vorstoffe werden in einem ersten Schritt mit Wasser, Reduktionsmittel und Kalk zu Pellets verarbeitet um so die Reaktionsfähigkeit der zu verarbeitenden Stoffe zu erhöhen und eine homogene Ofenbeschickung zu gewährleisten. Die Pellets werden entweder direkt oder über eine Zwischenlagerung dem Drehrohrföfen zugeführt. Bei Temperaturen von bis zu 1.200 °C wird insbesondere Zink verdampft. Dieses reagiert in der Gasphase des Ofens zu Zinkoxid, das mit sonstigen flüchtigen Bestandteilen in den Filteranlagen des Ofens als Zinkkonzentrat, dem Wälzoxid gewonnen wird. Dieses wird an die Zinkindustrie als Zinkkonzentrat vermarktet.

Am Standort Freiberg wird das Wälzoxid durch eine dreifache Laugung zusätzlich gewaschen und aufkonzentriert. Die bei dem Prozess anfallenden Schlacken werden als Deponiebaustoff einer weiteren Verwertung zugeführt.

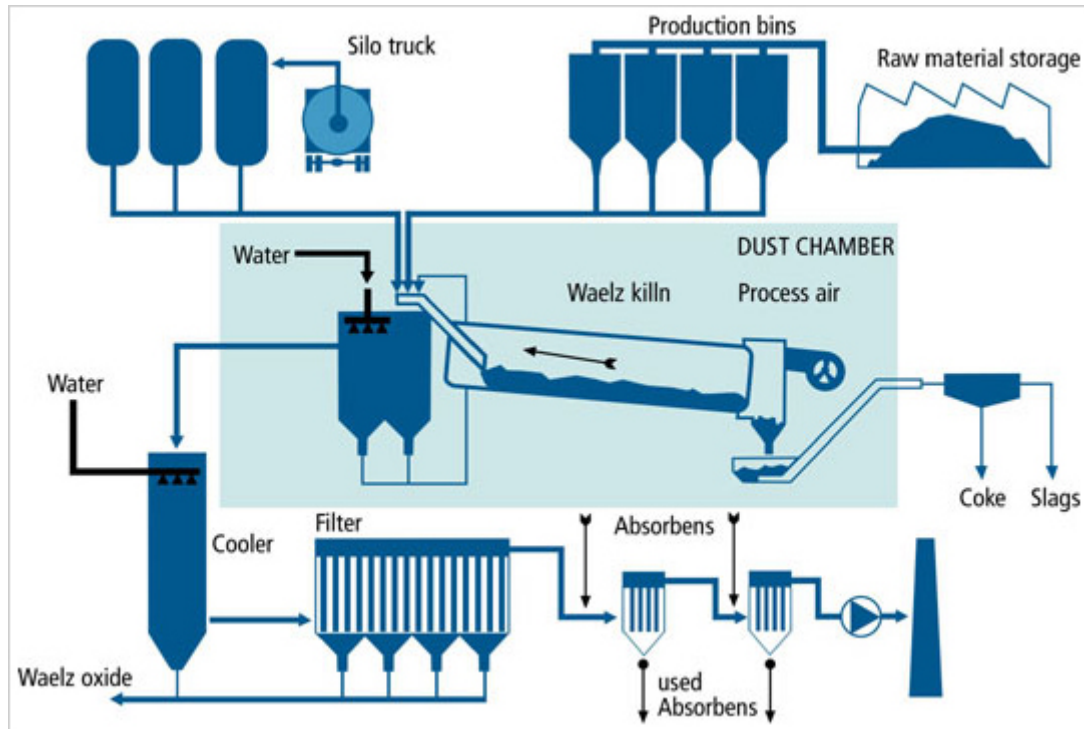


Abb. 8-1: Zinkrecycling im Wälz-Verfahren (Quelle: B.U.S)

Das Wälzoxid wird als Ausgangsstoff für die Zinkherstellung genutzt. Die Ruhr-Zink GmbH in Datteln ist einer der größten Verarbeiter dieses Sekundärkonzentrates in Deutschland. Bis vor wenigen Jahren war das zur mg-technologies gehörende Unternehmen noch eine „klassische“ Primärzinkhütte, die aus schwefelhaltigen Erzen in einem mehrstufigen Verfahren hochreines Elektrolytzink als Vormaterial für Bleche sowie für die Verzinkung von Stahl erzeugte. Ungefähr ein Drittel des Zinks erzeugt die Ruhr-Zink inzwischen nicht mehr über die Röststufe, sondern über Wälzoxide als Ausgangsmaterial. Das Verfahren der Ruhr-Zink GmbH ist wie folgt im einzelnen:

Röstung

Die Röstung ist der erste Schritt der Primärzinkgewinnung und ist bei Nutzung von Wälzoxid nicht notwendig.

In Wirbelschichtöfen wird der Schwefel aus den Zinkkonzentraten mit Luftsauerstoff zu Schwefeldioxidgas verbrannt. Die meisten Metalle in den Konzentraten werden dabei oxidiert. Die Reaktion findet bei Temperaturen zwischen 900°C und 1000°C statt. Das entstandene Röstgut, in dem die Metallinhalte nunmehr überwiegend in säurelöslicher Form vorliegen, wird aus den Öfen, den Abhitzekeßeln und der heißen Gasreinigung abgezogen. Gekühlt und aufgemahlen wird es pneumatisch in die Vorratssilos der Laugerei gepumpt. Das Röstgut wird in den Abhitzekeßeln der Öfen bei gleichzeitiger Dampferzeugung abgekühlt. Nach einer Vorentstaubung in Zyklonen erfolgt eine weitere Entfernung des staubförmigen Röstgutes mit Heiß-Elektrofiltern. Anschließend

werden die Gase noch mehrstufig nass gereinigt und von Quecksilberspuren befreit. Das SO₂ aus den staub- und nebelfreien Röstgasen wird in der Kontakanlage zu 96 %iger Schwefelsäure umgesetzt. Die Umsetzung findet in einer Doppelkatalyse mit Vanadiumpentoxid als Katalysator statt. Die Säure wird in drei großen Tanks gelagert und mit Hilfe von LKWs und Schiffen zu den Kunden transportiert

Laugung und Laugenreinigung

Das Röstgut und die Wälzoxide aus dem Wälzrohrofen werden getrennt mit Zellsäure gemischt. Dabei werden überwiegend Zink, Kupfer und Cadmium in Lösung gebracht, während die in verdünnter Säure schwer löslichen Bestandteile wie Zink-Eisen-Oxide, Blei, Kieselsäure, Tonerde und Silber als Rückstand verbleiben. Am Ende des Laugungsprozesses wird die restliche freie Schwefelsäure mit Röstgut oder Wälzoxid neutralisiert; die festen Rückstände werden abgebrannt. Die Feststoffe werden nach Waschung und Entwässerung am Hafen in Zwischenbunkern gelagert und mit Schiffen oder LKWs abtransportiert. Die feststofffreie Rohlauge wird aufgeheizt und dreistufig gereinigt. In der ersten Stufe werden für die Elektrolyse schädliche Elemente wie Kupfer, Nickel, Arsen u.a. unter Zusatz von Zinkstaub und Arsenverbindungen ausgefällt. Nach dieser Reinigung wird der Feststoff abgetrennt, gewaschen, filtriert und verkauft. Die filtrierte Lösung fließt danach in die zweite Laugenreinigungsstufe. Hier werden durch Zugabe von Zinkstaub in Schwebebettreaktoren Elemente wie Cadmium und Thallium auszementiert. Das Zementat wird gewaschen und in Filterpressen abgetrennt, um als Abfall deponiert zu werden. In der dritten Stufe wird eine Kontrollreinigung unter Zugabe von Zinkstaub vorgenommen.

Vorrats- und Mischstation

Die gereinigte Neutrallauge wird in Kühltürmen auf Elektrolyttemperatur abgekühlt und mit aus der Bäderhalle erwärmt zurücklaufender Zellsäure gemischt. Mit Hilfsstoffen versetzt, wird sie zur weiteren Verwendung in die Vorrattanks geleitet. Ein Teil der aus der Elektrolyse rücklaufenden Zellsäure wird zur Laugerei gegeben, um damit Röstgut und Wälzoxid auszulaugen. Ein weiterer Teil wird nach Entzinkung in der Zellsäurereinigung der Laugerei zur Abwasserbehandlungsanlage gegeben.

Elektrolyse

Der so entstandene Elektrolyt gelangt über Rinnen und Verteilerrohre in die 106 Elektrolysebecken, in denen jeweils 85 Bleianoden und 84 Aluminiumkathoden hängen. Die Zellen sind elektrisch hintereinander geschaltet und werden von einem sehr starken Gleichstrom durchflossen. Dadurch scheidet sich auf den Aluminiumkathoden metallisches Zink ab. Einmal pro Tag wird das abgeschiedene Zink mit Strippmaschinen von den Aluminiumblechen abgezogen und zum Trocknen auf der Bühne der Einschmelzöfen zwischengelagert. Die zinkfreien Aluminiumbleche werden in der Strippmaschine gebürstet, gewaschen und mit einer automatischen Krananlage in die Zellen zurücktransportiert. Die Bleianoden werden ebenfalls regelmäßig gereinigt und gerichtet.

Umschmelz- und Gießanlage

Das in der Bäderhalle gewonnene Kathodenzink wird nach dem Verwiegen auf dem Kathodenflur zwischengestapelt, dem Bedarf entsprechend mit Gabelstaplern zu den Chargieranlagen transportiert und in zwei Induktionsöfen eingeschmolzen. Das flüssige Zink gelangt dann über Rinnen zu Gießkreisen, in denen Blöcke mit 1t bzw. 6t Gewicht oder Sonderformate wie Granalien oder Platten abgegossen werden. In zwei Drehrohr-

öfen werden die Asche aus den Induktionsöfen sowie zinkhaltige Schrotte und Rücklaufmetalle eingesetzt, wobei der metallische Anteil ausgeschmolzen wird u.a. zur Herstellung von Zinkstaub Verwendung findet.

Für die Berechnung der Umweltauswirkungen ist die Kombination aus den beiden Verfahrensschritten Wälzoxidherstellung und -aufbereitung zu Sekundärzink zu berücksichtigen; diese kann der Primärzinkgewinnung gegenübergestellt werden. Unterschiede bezüglich der Umweltbelastungen in Abhängigkeit vom Zinkgehalt im eingesetzten Abfall treten dabei nur im Wälzoxid-Verfahren auf.

Dieser Aufbereitungsschritt wird für zwei Situationen abgebildet: Zum einen die reale Situation mit Einsatz von Stoffen mit durchschnittlich 24 bis 25 % Zinkgehalt und zum anderen eine hypothetische mit nur 5 % im eingesetzten Material. Aus Originaldaten der B.U.S (2007) und Ergänzungen mit Literaturdaten nach Rentz 1999 wurde die Input-/Output-Bilanz in Tab. 8-6 zusammengestellt, die sich auf 1 kg Wälzoxid bezieht.

Die verwendeten Literaturdaten von 1999 sind teilweise nicht mehr aktuell, da die Anlage in den letzten Jahren mehrfach umgebaut wurde. Es fehlen auch einige Emissions-Parameter für ökobilanzielle Bewertung, wie z.B. NO_x und Dioxine in die Luft. Die Daten insbesondere zu der Schlackezusammensetzung und Luftemissionen wurden von der B.U.S aktualisiert und teilweise ergänzt (B.U.S 2007c).

**Tab. 8-6: Verbräuche und Emissionen des Wälzverfahrens
(realer Durchschnitt bezogen auf 1 kg Wälzoxid-Output)**

Wälzverfahren der B.U.S Steel Services GmbH					
Input			Output		
	kg	Bemerkung		kg	Bemerkung
Zinkhaltige Reststoffe	2,680	Zinkgehalt (berechnet) 24,2%	Wälzoxid	1,000	
Kalk	0,210	Quelle: B.U.S 2007	davon Zn	0,600	Quelle: B.U.S 2007
Koks	0,480	Mittelwert; Quelle: B.U.S 2007	Schlacke	1,630	Entsorgung auf Deponie; B.U.S 2007
Strom in MJ	0,864	Quelle: B.U.S 2007	Zn	4,9E-02	Mittelwert; Quelle: B.U.S 2007
			Pb	1,6E-03	Mittelwert; Quelle: B.U.S 2007
			S	2,4E-02	Mittelwert; Quelle: B.U.S 2007
			F	3,4E-03	Mittelwert; Quelle: Rentz 1999
			Cl	5,1E-04	Mittelwert; Quelle: Rentz 1999
			C	1,6E-02	Mittelwert; Quelle: B.U.S 2007
			Fe, total	7,3E-01	Mittelwert; Quelle: B.U.S 2007
			MnO	1,1E-01	Mittelwert; Quelle: B.U.S 2007
			CaO	2,4E-01	Mittelwert; Quelle: B.U.S 2007
			MgO	4,9E-02	Mittelwert; Quelle: B.U.S 2007
			Al ₂ O ₃	3,1E-02	Mittelwert; Quelle: B.U.S 2007
			SiO ₂	1,0E-01	Mittelwert; Quelle: B.U.S 2007
			Na ₂ O	2,7E-02	Mittelwert; Quelle: Rentz 1999
			K ₂ O	1,5E-02	Mittelwert; Quelle: Rentz 1999
			As	1,1E-04	Maximalwert; Quelle: B.U.S 2007
			Cr	1,6E-03	Maximalwert; Quelle: B.U.S 2007
			Ni	8,2E-04	Maximalwert; Quelle: B.U.S 2007
			Cu	6,5E-03	Maximalwert; Quelle: B.U.S 2007
			Beladener Adsorbent	0,008	Entsorgung; Quelle: B.U.S 2007
			Luftemissionen		
			Kohlendioxid	1,6E+00	Quelle: B.U.S 2007
			Staub	2,8E-05	Quelle: B.U.S 2007
			Zink	1,7E-05	Mittelwert; Quelle: Rentz 1999
			Blei	3,0E-06	Quelle: B.U.S 2007
			Cadmium	1,0E-07	Quelle: B.U.S 2007
			SO ₂	2,5E-03	Quelle: B.U.S 2007
			NO _x	6,6E-04	Quelle: B.U.S 2007
			Zinkverluste über Schlacke und Luftemissionen	7-8%	

Für den Einsatz von Abfällen mit geringeren Zinkgehalten existieren keine Daten. Für Ausgangsstoffe mit 5 % Zinkgehalt musste eine Abschätzung vorgenommen werden, die auf folgenden Annahmen beruht:

- Koks als Reduktionsmittel korreliert mit dem Zink-Input
- Der Stromverbrauch hängt von der Gesamt-Inputmenge ab
- Schlackemenge und -zusammensetzung: Metallgehalte korrelieren mit Zinkinput, Nichtmetalle mit Einsatz von nichtzinnhaltigen Stoffen
- Luftemissionen CO₂ und SO₂ sind überwiegend brennstoffabhängig
- Staubemissionen stammen nach Rentz 1999 aus Elektrolyse; demzufolge diese hauptsächlich vom Zink-Output abhängig
- Schwermetall-Emissionen in Luft und Wasser korrelieren mit dem Schwermetall-Input

Unter diesen Rahmenbedingungen ergeben sich die in Tab. 8-7 dargestellten Verbräuche und Emissionen für die Aufbereitung von Abfällen mit 5 % Zinkgehalt.

Tab. 8-7: Verbräuche und Emissionen des Wälzoxid-Verfahrens zur Sekundärzinkgewinnung (Hypothetische Abschätzung mit 5 % Zinkgehalt im Sekundärzinkinput)

Wälzverfahren der B.U.S Steel Services GmbH					
Input			Output		
	kg	Bemerkung / Annahmen		kg	Bemerkung / Annahmen
Zinkhaltige Reststoffe	12,060	Zn-Gehalt, Annahme: 5%	Wälzoxid	1,000	
Annahme über Begleitstoffe: überwiegend Silikate und Oxide			davon Zn	0,600	
Kalk	0,210	überwiegend v. Zn-Input abhängig	Schlacke	6,240	Entsorgung auf Deponie; B.U.S 2007
Koks	0,480	überwiegend v. Zn-Input abhängig	Zn	4,9E-02	Korrelation mit Zn-Gehalt im Input
Strom in MJ	3,888	abhängig vom Gesamt-Input	Pb	1,6E-03	Korrelation mit Zn-Gehalt im Input
			S	1,1E-01	abhängig vom Gesamt-Input
			F	2,3E-03	abhängig vom Gesamt-Input
			Cl	7,3E-02	abhängig vom Gesamt-Input
			C	3,3E+00	abhängig vom Gesamt-Input
			FeO	4,8E-01	abhängig vom Gesamt-Input
			MnO	1,1E+00	abhängig vom Gesamt-Input
			CaO	2,2E-01	abhängig vom Gesamt-Input
			MgO	1,4E-01	abhängig vom Gesamt-Input
			Al ₂ O ₃	4,5E-01	abhängig vom Gesamt-Input
			SiO ₂	1,2E-01	abhängig vom Gesamt-Input
			Na ₂ O	6,9E-02	abhängig vom Gesamt-Input
			K ₂ O	5,1E-04	abhängig vom Gesamt-Input
			Cr	1,6E-03	Korrelation mit Zn-Gehalt im Input
			Ni	8,2E-04	Korrelation mit Zn-Gehalt im Input
			Cu	6,5E-03	Korrelation mit Zn-Gehalt im Input
			Feuerfestmaterialien	0,030	abhängig vom Input
			Beladener Adsorbent	0,036	abhängig vom Input
			Luftemissionen		
			Kohlendioxid	1,5E+00	vom Koksinput abhängig
			Staub	2,8E-05	von Elektrolyse/Zn-Output abhängig
			Zink	1,7E-05	vom Zn-Output abhängig
			Blei	3,0E-06	Korrelation mit Zn-Gehalt im Input
			Cadmium	1,0E-07	Korrelation mit Zn-Gehalt im Input
			SO ₂	1,1E-02	überwiegend vom Brennstoffinput abh.
			NO _x	3,0E-03	überwiegend vom Brennstoffinput abh.
			Zinkverluste über Schlacke und Luftemissionen	8,1%	berechnet

Für Verarbeitung des Wälzoxids zu Zink bei der Ruhr-Zink Datteln konnten teilweise Unternehmensdaten herangezogen werden. Darüber hinaus wurden Angaben von Rentz 1999 und Xiao 2003 genutzt. Für einige Parameter mussten Annahmen getroffen werden, da sich die Angaben häufig auf die gesamte Zinkherstellung inklusive der Röstung der Erze beziehen. Im folgenden werden wichtige Annahmen genannt und wird eine Einschätzung der Datenqualität vorgenommen:

- Die Zink-Effizienz für die Aufbereitung des Wälzoxids wird mit 93 % angenommen, abgeleitet aus Unternehmensangaben; demzufolge gehen ca. 7% über Zink-/Eisenlaugungsrückstand verloren
- Wärmeinput für Laugung stammt aus Abwärme der Röstung (Oxidation) von Konzentraten und wird nicht auf Wälzoxid alloziert
- Der Strombedarf wird überwiegend für Elektrolyse und Umschmelzanlage benötigt; Quelle hierfür ist Xiao 2003 (die Datenqualität kann nicht geprüft werden, aber der genannte Wert ist plausibel)
- Alle weiteren Angaben sind aus Rentz 1999 abgeleitet
- Luftemissionen berücksichtigen nur Staub, Zn, Cd
- Abwasseremissionen enthalten nur die Parameter Pb und Cd
- Die Angaben von Rentz 1999 sind vermutlich nicht mehr aktuell, da zwischenzeitlich die Anlage verbessert wurde
- Alle Nebenprodukte der Ruhrzink Datteln (Schwefelsäure, Cadmium, Kupfer) bleiben unberücksichtigt, und die Aufwendungen werden insgesamt dem Zink angerechnet

Unter den genannten Rahmenbedingungen ergibt sich folgende Prozessbilanz für die Aufbereitung von Wälzoxid zu Zink bei der Ruhr-Zink in Datteln:

**Tab. 8-8: Verbräuche und Emissionen der Wälzoxidaufbereitung zu Zink
(realer Durchschnitt bezogen auf 1 kg Zink-Output)**

Aufbereitung von Wälzoxid zu Zink: Ruhr-Zink Datteln					
Input			Output		
	kg	Bemerkung		kg	Bemerkung
Wälzoxid	1,79	Zinkgehalt (B.U.S.) 60%	Zink	1,000	Quelle: B.U.S.
Strom in MJ	13,09	Xiao 2003; Gesamtstrombedarf wird hierbei Elektrolyse und Umschmelzanlage zugerechnet	Schwefelsäure	-	kommt aus Primärzinkherstellung
			Reines Cadmium	k.A.	Quelle: Rentz 1999
			Kupfer	k.A.	Quelle: Rentz 1999
Dampf	k.A.	Dampf wird bei der exothermen Reaktion in der Rösterei gewonnen	Zink/Eisenlaugungs- rückstand	0,476	ext. Zn-Recycling; Rentz 1999
			Blei/Silberrückstand	k.A.	ext. Pb-Recycling; Rentz 1999
			Metallische Zementate	k.A.	ext. Cu-Recycling; Rentz 1999
			Schlämme	k.A.	interne Behandlung; Rentz 1999
			Gips	k.A.	Zementherzeugung; Rentz 1999
			Luftemissionen		
			Staub	2,1E-06	Mittelwert; Rentz 1999
			Zink	9,7E-06	Mittelwert; Rentz 1999
			Cadmium	1,4E-08	Mittelwert; Rentz 1999
			Abwasseremissionen:		
			Zink	1,3E-06	Mittelwert; Rentz 1999
			Blei	5,9E-07	Mittelwert; Rentz 1999
			Cadmium	1,3E-07	Mittelwert; Rentz 1999
			Zink in Luft- und Wasseremissionen		
				0,0004%	Hauptverlust über Zn/Fe-Konzentrat

8.4 Vergleichende Umweltbewertung

Die Bewertung unterschiedlicher Zinkgehalte im eingebrachten Abfall verändern, wie oben beschrieben, nur die Umweltbelastungen durch das Wälzoxid-Verfahren. Die weitere Aufbereitung des Wälzoxids ist dann für beide Datenpunkte gleich. Da diese weitere Aufbereitung jedoch sehr energieintensiv (Umschmelzvorgang und Elektrolyse)

ist, findet kaum eine Differenzierung zwischen Abfällen mit hohen und mit niedrigen Zinkgehalten statt.

Das hat zur Folge, dass auch für alle umweltbezogenen Auswertungen die Unterschiede zwischen Abfällen mit hohem und niedrigem Zinkgehalt gering sind und damit die gewählte Funktion sehr flach wird.

Es entscheidet für einen Break-even-point dadurch weniger die Lage der Punkte, sondern die Werte des absoluten Energieverbrauchs für Primärzink und Sekundärzink. Doch genau zu diesen Zahlen liegen zwar plausible, aber nicht überprüfbare Literaturwerte vor, die nur von der Ruhr-Zink Datteln verifiziert werden können.

Auf Grund der Abhängigkeit der Ergebnisse von einem Wert im Falle des Zinks, darf hier keine abschließende Bewertung abgegeben werden.

Im Falle der Auswertung für den kumulierten Primärenergieaufwand (KEA) liegt die Rückgewinnung von Sekundärzink für beide Datenpunkte über dem Herstellungsaufwand von Primärzink. Damit ist kein Break-Even-Punkt gegeben und die Bestimmung einer Grenzmetallkonzentration nicht möglich.

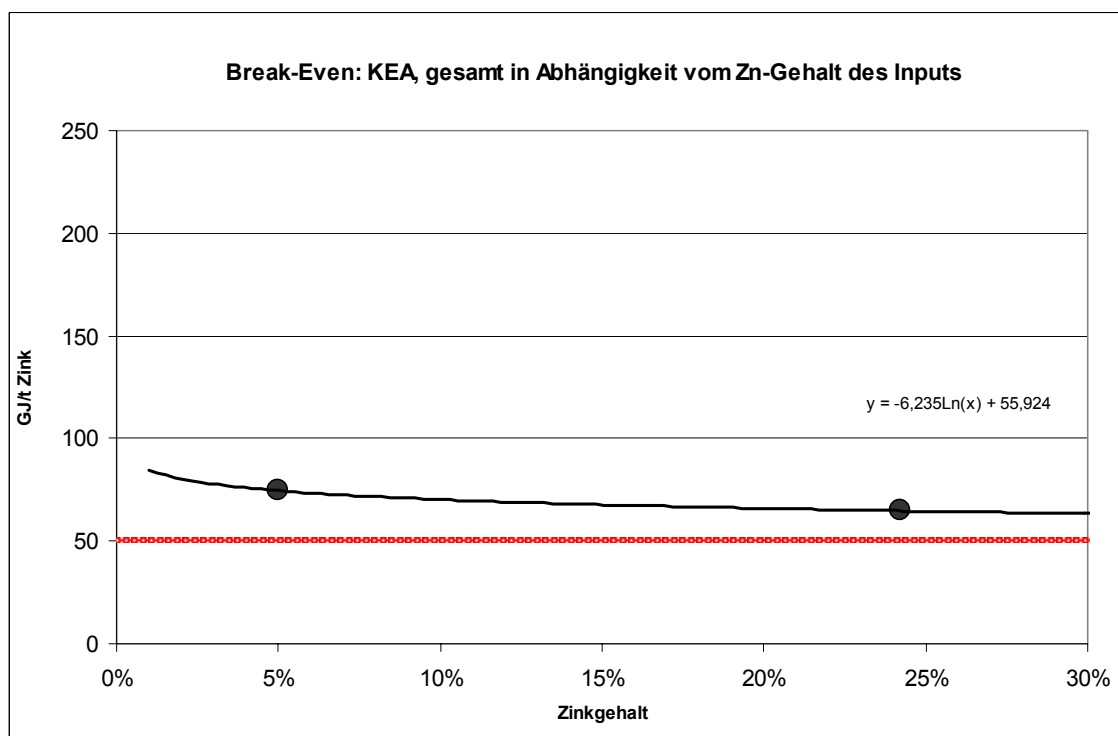


Abb. 8-2: Primärenergieaufwand (KEA) der Sekundärzinkgewinnung als Funktion vom Zinkgehalt des Inputs, ermittelt aus den beiden Datenpunkten für 5 % und 24,2 % Zinkgehalt (schwarze Linie); die rote horizontale Linie repräsentiert die Primärzinkherstellung.

Bei der Auswertung des UEBEL-Konzepts sieht man bereits an Tabelle 8-9, dass die Sekundärzinkherstellung von dem Treibhausgaspotenzial dominiert wird, das – wie

eben schon beschrieben – sich bei den zwei Konzentrationswerten nicht stark voneinander unterscheidet. Bei der Primärzinkherstellung bekommt die Berücksichtigung der Fläche eine entscheidende Bedeutung.

Tab. 8-9: Differenzierte und aggregierte Umwelteinwirkungsbelastungs-Ergebnisse (UEBEL) für die Primär- und Sekundärzinkgewinnung (5 % und 24,2 % Zink-Gehalt im Input)

UEBEL	Primär- zink	Sekundär 5% Zn-Inp.	Sekundär 24,2% Zn-Inp.
Klima			
CO2 Äquivalente	9,84	19,51	17,59
Luftqualität			
SO2	4,14	1,16	1,02
NOx	1,52	0,09	0,08
NH3	0,48	0,11	0,10
NM VOC	0,00	0,00	0,00
Gewässer			
AOX	0,05	0,02	0,01
Gesamt-N	1,21	0,02	0,01
Boden			
Flächenumwandlung	21,31	3,05	2,74
UEBEL-Summe	42,60	27,61	22,69
ohne Fläche	21,29	24,56	19,96

Daraus ergibt sich als Konsequenz, dass die Aggregationsmethode unter Berücksichtigung des Schutzgutes Fläche die Sekundärzinkaufbereitung generell besser abschneidet. Es ergibt sich wiederum kein Schnittpunkt zwischen der Funktion der zwei Aufbereitungsstufen mit unterschiedlichen Zinkgehalten und der Primärgewinnung – nun aber anders als beim KEA mit Vorteilen für die Sekundärgewinnung (s. Abb. 8-3).

Lässt man die Flächenbewertung aus dem Konzept heraus, so ergeben sich fast identische Zahlenwerte der Primär- und Sekundärgewinnung, die sogar zu einem Schnittpunkt führen (s. Abb. 8-4). Allerdings kommt unter Berücksichtigung der schwachen Datenqualität der Wälzoxidaufbereitung und der flachen Funktion berechnet aus der Aufbereitung bei den zwei Zinkgehalten ein zufälliger Wert zustande (15 %), der nicht überinterpretiert werden darf.

Empfehlung:

Beibehaltung der bisherigen Grenzkonzentration von 10 %.

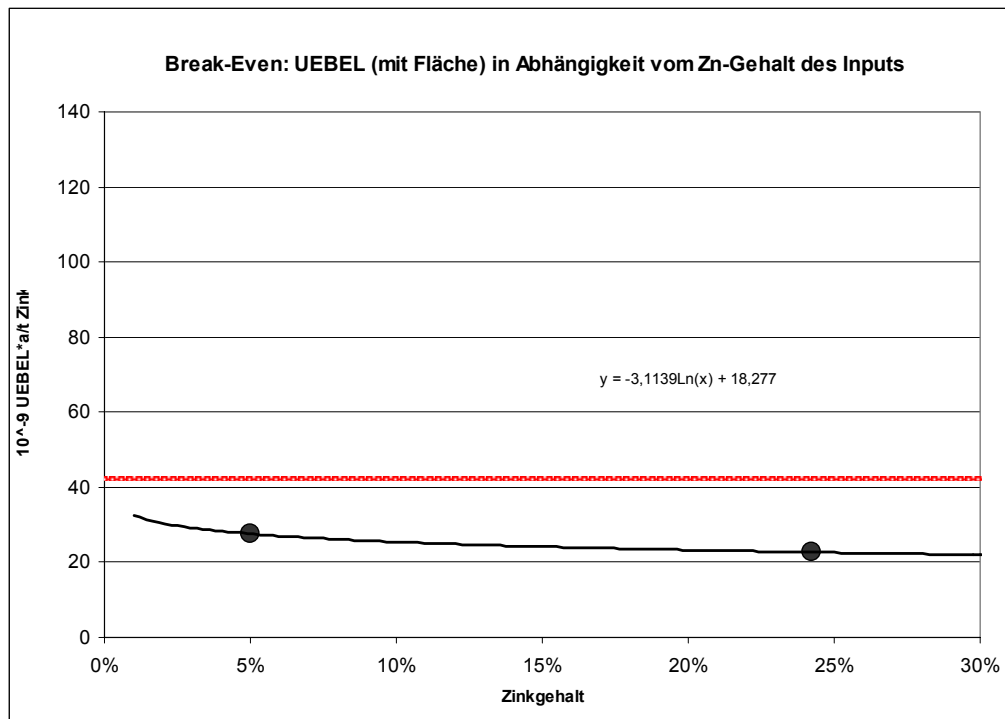


Abb. 8-3: Umwelteinwirkungsbelastung (UEBEL) mit Berücksichtigung der Flächenbeanspruchung der Sekundärzinkgewinnung als Funktion vom Zinkgehalt des Inputs, ermittelt aus den beiden Datenpunkten für 5 % und 24,2 % Zinkgehalt (schwarze Linie); die rote horizontale Linie repräsentiert die Primärzinkherstellung.

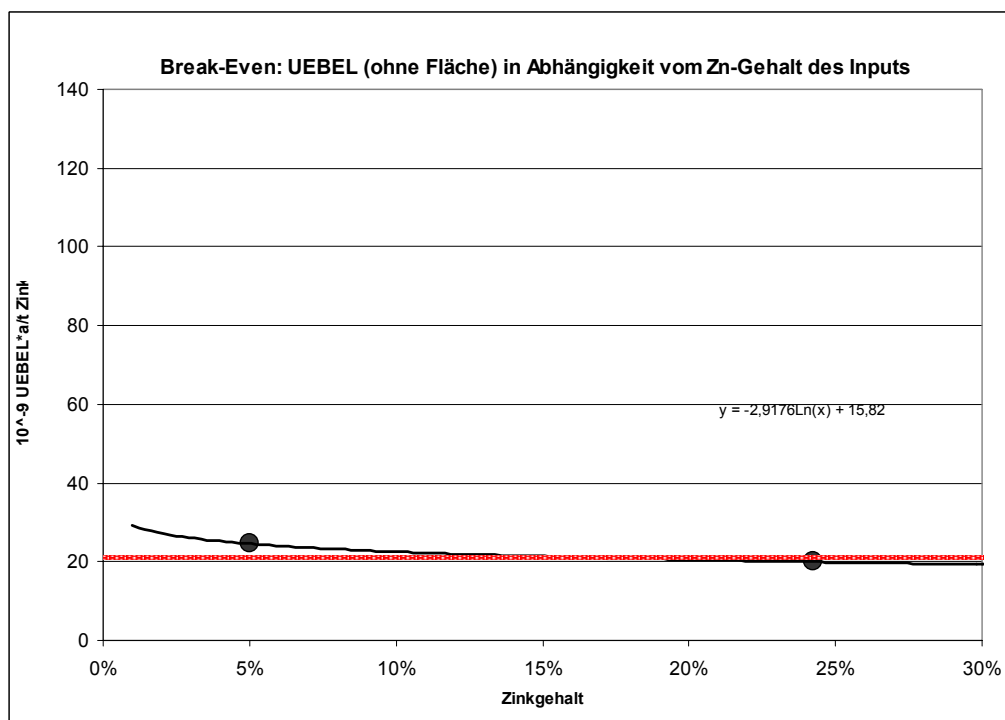


Abb. 8-4: Umwelteinwirkungsbelastung (UEBEL) ohne Berücksichtigung der Flächenbeanspruchung der Sekundärzinkgewinnung als Funktion vom Zinkgehalt des Inputs, ermittelt aus den beiden Datenpunkten für 5 % und 24,2 % Zinkgehalt (schwarze Linie); die rote horizontale Linie repräsentiert die Primärzinkherstellung.

9 Verwertung von Zinn

Auch nach intensiver Recherche konnten keine Anlagen zur hauptsächlichen Zinnverwertung aus einer mineralischen Matrix in Deutschland gefunden werden. Auch in dem BVT-Merkblatt für die Nichteisenmetallindustrie (BREF-Dokument, IPPC 2001) fehlt Zinn als Metall und jegliche Anlagen zur speziellen Zinngewinnung oder Zinnrecycling.

Allerdings werden im Rahmen des Recyclings anderer Metalle (z.B. von Kupfer nach dem KSR-Verfahren der NA in Lünen) durchaus zinnhaltige Abfälle angenommen, aus denen dann z.B. eine Mischzinnfraktion gewonnen werden kann.

9.1 Gewinnung von Primär-Zinn und Umweltauswirkungen

Die Umweltauswirkungen, die mit der Primärgewinnung von Zinn verbunden sind, werden in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

Tab. 9-1: Umweltbelastungen bei der Herstellung von 1 t Primärzinn

Umweltkennzahlen für		Zinn
Parameter		Wert
Flächenverbrauch pro t	m ² /t	122,1
Energieverbrauch		
KEA, fossil	GJ/t	203
KEA, nuklear	GJ/t	104
KEA, erneuerbar	GJ/t	20
KEA, gesamt	GJ/t	327
Belastungen durch Abgasemissionen		
Treibhauseffekt	kg CO ₂ -Äq./t	16.200
Ozonloch	g FCKW-Äq./t	1,01
Versauerung	kg SO ₂ -Äq./t	514
Sommersmog	kg Ethen-Äq./t	17,8
terrestrische Eutrophierung	kg PO ₄ -Äq./t	35,0
Feinstaub PM 10	kg PM ₁₀ -Äq./t	203,0
Arsen	g/t	0,8
Cadmium	g/t	0,5
Quecksilber	g/t	0,37
Nickel	g/t	
Blei	g/t	3,65
Dioxine and Furane (als Teq)	g/t	1,08E-03
Belastungen durch Abwasseremissionen		
aquatische Eutrophierung	kg PO ₄ -Äq./t	0,51
Cadmium	g/t	3,20
Quecksilber	g/t	0,17
AOX	g/t	0,32

9.2 Zinnhaltige mineralische Abfälle

Mit Hilfe der Datenbank zu Abfallanalysen des Landes Nordrhein-Westfalen wurde eine Auswertung zu dem erwarteten Zinngehalt in mineralischen Abfällen vorgenommen. Die nachfolgende Tab. 9-2 enthält die Auswertung.

Tab. 9-2: Schwankungsbreite von Zinn in verschiedenen Abfallarten nach AVV

Abfallart	Einheit	[N]	Minimum	Maximum	Mittelwert	Stdabw
100402 Krätzen und Abschaum (Erst- und Zweitschmelze)	mg/kg	1	529.600	529.600	529.600	0
070107 halogenierte Reaktions- und Destillationsrückstände	mg/kg	1	350.000	350.000	350.000	0
070109 halogenierte Filterkuchen, gebrauchte Aufsaugmaterialien	mg/kg	1	40.000	40.000	40.000	0
110109 Schlämme und Filterkuchen, die gefährliche	mg/kg	64	1	200.000	23.803	50.696
190205 Schlämme a. d. physikalisch-chemischen Behandlung, d. gefährl. Stoffe enthalten	mg/kg	116	1	150.000	7.535	26.741
070103 halogenorganische Lösemittel, Waschflüssigkeiten und Mutterlaugen	mg/kg	7	1	50.000	7.165	18.889
101009 Filterstaub, der gefährliche Stoffe enthält	mg/kg	1	3.210	3.210	3.210	0
190814 Schlämme aus einer anderen Behandlung von industriellem Abwasser ohne 190813	mg/kg	6	5	17.000	2.868	6.923
161103 andere Auskleid. u. feuerf. Material. a. metallurg. Prozessen, gef. Stoffe enth.	mg/kg	2	5	4.870	2.438	3.440
190204 vorgemischte Abfälle, die wenigstens einen gefährlichen Abfall enthalten	mg/kg	9	23	11.911	1.914	3.910
060499 Abfälle a. n. g.	mg/kg	2	1.760	1.760	1.760	0
100315 Abschaum, entzündl. oder mit Wasser entzündl. Gase in gefährlicher Menge abgibt	mg/kg	2	100	3.000	1.550	2.051
110299 Abfälle a. n. g.	mg/kg	2	405	1.701	1.053	916
120117 Strahlmittelabfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 12 01 16 fallen	mg/kg	3	220	1.831	1.017	806
190113 Filterstaub, der gefährliche Stoffe enthält	mg/kg	239	0	17.400	988	1.834
191212 sonstige Abfälle aus der mechanischen Behandlung von Abfällen ohne 191211	mg/kg	2	430	1.500	965	757
100299 Abfälle a. n. g.	mg/kg	4	7	2.761	915	1.274
100213 Schlämme u. Filterkuchen a. d. Abgasbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten	mg/kg	2	5	1.700	853	1.199
100214 Schlämme und Filterkuchen aus der Abgasbehandlung ohne 100213	mg/kg	6	5	2.761	777	1.032

Die Grenzkonzentration für die Versatzverordnung liegt bei Zinn bei 1,5 % oder 15.000 mg/kg Abfall. Bei der Auswertung der Abfallschlüssel wird bei 4 Abfallarten diese Grenzkonzentration überschritten. Darunter beruhen allerdings 3 der 4 Abfallarten nur auf einer einzigen Angabe, so dass daraus nicht geschlossen werden, kann dass die jeweiligen Abfallschlüssel generell zinnhaltige Abfälle darstellen. Der Abfallschlüssel 10 04 02 Krätzen und Abschaum aus der Bleimetallurgie spiegelt jedoch durchaus wider, dass Zinn im Zusammenhang mit der Gewinnung anderer Metalle anfallen kann.

Zu erwarten sind auch zinnhaltige Abfälle aus der chemischen Oberflächenbearbeitung und Beschichtung von Metallen und anderen Werkstoffen (z.B. Galvanik) wie bei Abfallschlüssel 11 01 09, falls dabei zinnhaltige Beschichtungen aufgetragen werden.

9.3 Aufbereitungsverfahren zinnhaltiger Abfälle

Wie eingangs erwähnt, konnten keine speziellen Anlagen zu Zinnverwertung als Hauptzweck identifiziert werden.

Im Rahmen der Betrachtung der anderen Metalle finden sich jedoch Hinweise, dass auch Zinn aus mineralischen Matrices verwertet wird. Dann ist es jedoch Nebenprodukt und nicht das Zielprodukt einer Verwertung. Bei der sekundären Kupferverhüttung etwa werden auch Kupfer-Zinn-Legierungen verhüttet, deren Zinnanteil schließlich mit Blei zusammen wiedergewonnen wird.

So kann z.B. im KRS-Verfahren der NA in Lünen eine Zinn-Blei-Legierung gewonnen werden. In der Abb. 9-1 ist zu erkennen, wie der Flugstaub des Konverters aus der Kupfergewinnung in eine Zinn-Blei-Legierungsanlage gegeben wird. Dort wird mit Hilfe z.B. eines Öl- oder Gasbrenners der Zinkanteil abgetrennt und auf Grund der höheren Flüchtigkeit dem Abgasstrom mitgegeben. Während das Zinkoxid daraus mit Hilfe von Gewebefiltern abgetrennt werden kann, verbleibt die Zinn-Blei-Legierung im Reaktor und kann auf Grund der unterschiedlichen Dichten von anderen Schlackebestandteilen abgetrennt werden.

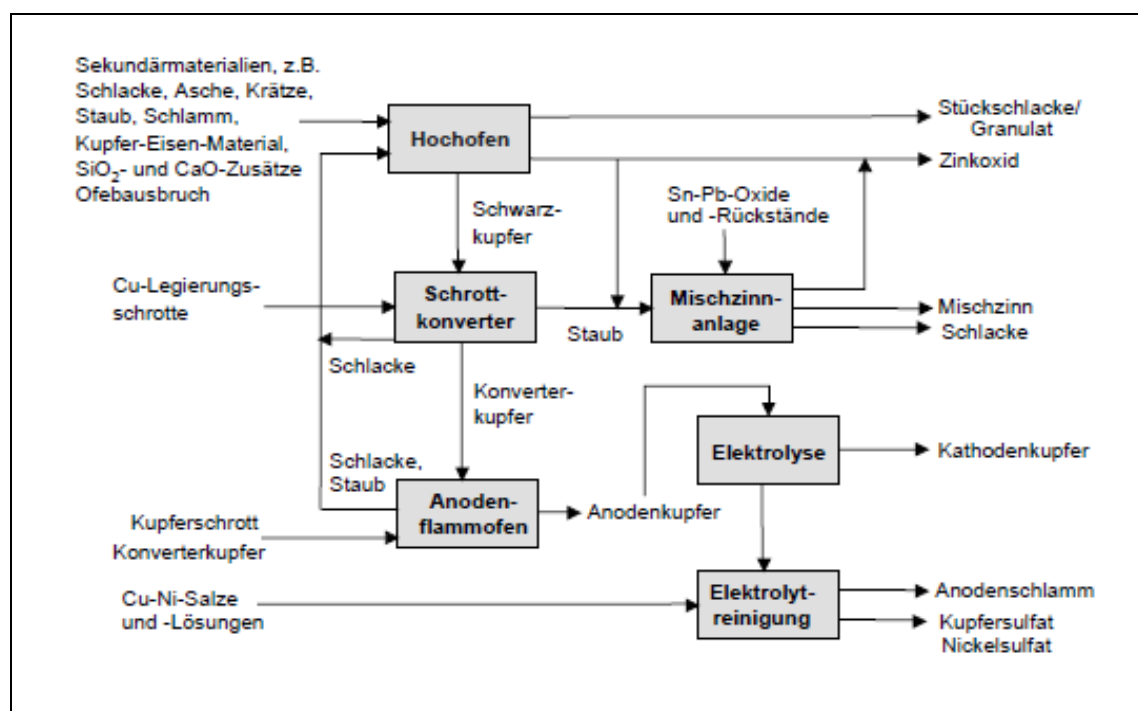


Abb. 9-1: Herstellung einer Zinn-Blei-Legierung als Nebenprodukt der Kupferaufbereitung nach dem KRS-Verfahren der NA in Lünen (Quelle: Rentz 1999)

9.4 Vergleichende Umweltbewertung

Eine vergleichende Umweltbewertung ist nicht möglich, da eine separate und gezielte Zinnengewinnung aus einer mineralischen Abfallmatrix in Deutschland nicht durchgeführt wird. Demnach ist es auch nicht sinnvoll, die Aufwendungen eines Teilaggregats einer Anlage wie z.B. der Zinn-Blei-Legierungsanlage mit der Primärzinngewinnung zu vergleichen.

Jedoch lässt sich konstatieren, dass die Primärgewinnung mit 327 GJ/t Zinn einen sehr hohen Energieverbrauch aufweist, was auch mit entsprechend hohen sonstigen Umweltbelastungen verbunden ist (siehe Kap. 9.1). Ohne die Einspareffekte durch Zinnrückgewinnung nun beziffern zu können, lässt der hohe Energieverbrauch der Primärseite jedoch den Schluss zu, dass ein Zinnrecycling auf jeden Fall vorteilhaft sein wird.

Empfehlung:

Um zu vermeiden, dass auf die Aufbereitung sekundärer zinnhaltiger Abfallströme im Rahmen sonstiger Metallgewinnung z.B. aus Flugstäuben verzichtet wird, sollte die bisherige Grenzkonzentration von 1,5 % Zinngehalt in der Abfallmatrix als Anforderung zur Verwertung aufrechterhalten werden, auch wenn sie nicht verifiziert werden konnte.

10 Zusammenfassende Darstellung und Handlungsempfehlungen

10.1 Zusammenfassende Darstellung

Ausgangspunkt und Aufgabenstellung

Mit der „Verordnung über den Versatz von Abfällen unter Tage“ (VersatzV) vom 24. Juli 2002 und die „Verordnung über die Verwertung von Abfällen auf Deponien über Tage“ (DepVerwV) vom 25. Juli 2005 wurden Regelungen getroffen, die den Vorrang der stofflichen Rückgewinnung von Metallen aus einer mineralischen Abfallmatrix fest schreibt.

Für die sieben Metalle Zink, Blei, Kupfer, Zinn, Chrom, Nickel und Eisen wurden Grenzkonzentrationen (siehe Tabelle 10-1) in Abfällen festgelegt, ab denen eine bauliche Verwertung im Bergeversatz oder auf einer oberirdischen Deponie nicht stattfinden darf. Einschränkend gilt allerdings, dass die Gewinnung der Metalle aus solchen Abfällen technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar sowie unter Einhaltung der Anforderungen an die Zulässigkeit einer solchen Verwertung durchführbar sein muss.

Tab. 10-1: Grenzmittelgehalte der Versatz- und Deponieverwertungsverordnung

	Grenzwertkonzentration für Metalle im Abfall in g/kg	Grenzwertkonzentration für Metalle im Abfall in Prozent
Zink	≥ 100	$\geq 10 \%$
Blei	≥ 100	$\geq 10 \%$
Kupfer	≥ 10	$\geq 1 \%$
Zinn	≥ 15	$\geq 1,5 \%$
Chrom	≥ 150	$\geq 15 \%$
Nickel	≥ 25	$\geq 2,5 \%$
Eisen	≥ 500	$\geq 50 \%$

Diese Grenzmittelgehalte sollen sicherstellen, dass die in Abfällen vorhandenen metallischen Rohstoffe hochwertig genutzt werden und somit dem Ressourcen- und Umweltschutz dienen.

Die Festlegung der Kriterien fand in Anlehnung an die Metallgehalte in den typischerweise ausgebeuteten Erzen statt. Dabei stand der Gedanke Pate, dass die Umweltbelastungen der Metallgewinnung aus Abfall und Erzen in erster Näherung gleich sind.

Nun galt es, zu überprüfen, ob die genannte pauschale Aussage einer tiefer gehenden Umweltbewertung standhält. Somit ist eine Grundlage vorhanden, um bei einer möglichen Revision der Verordnungen bei den Grenzwertkonzentrationen korrigierend einzugreifen.

Methodische Vorgehensweise

Grundgedanke der Umweltbewertung ist die Bewertung des ganzen Systems der sekundären Aufbereitung eines bestimmten Metalls, das alle Verfahrensschritte, Energieeinsätze und Einsatzstoffe berücksichtigt (Lebenszyklusbetrachtung). Auf der anderen Seite steht dem Sekundärmetall der gesamte Aufwand der Erzgewinnung und Verhüttung des Primärmetalls gegenüber. Wichtig bei einem solchen Vergleich ist, dass die erzeugten Metallprodukte aus der Sekundär- und der Primärroute die gleiche Endqualität aufweisen (funktionale Äquivalenz).

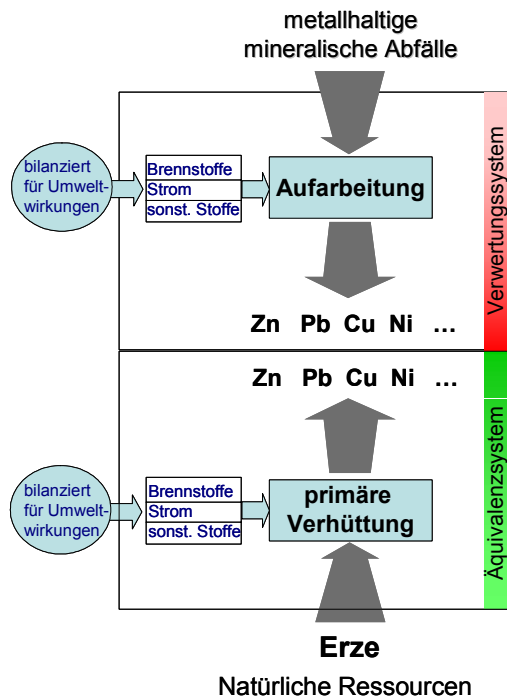


Abb. 10-1: Schematische Darstellung der Vergleichssysteme

Zu einer fundierten Umweltbeurteilung bestehen Notwendigkeiten bei der Datenbeschaffung. Die Angaben wie Energieeinsatz, Stoffströme der Verfahrensschritte, Emissionen von Schadstoffen in Wasser und Luft, Flächenbedarf der Aktivitäten, etc., konnten mit Hilfe der verfügbaren Literatur aber vor allem mit der Hilfsbereitschaft von Anlagenbetreibern angegangen werden.

Eine wesentliche methodische Schwierigkeit bei der Bearbeitung der Aufgabenstellung lag darin, ein Maß für die Umweltbelastungen zu finden. Umweltbelastungen setzen sich aus vielen negativen Einzelwirkungen zusammen. Jedoch ist für die Bestimmung eines Grenzmittelgehaltes ein einheitliches Maß vonnöten. Da es hierzu vielfältige Ansätze gibt, wurden zwei ausgewählt und verwendet:

- der „kumulierte Primärenergieaufwand (KEA)“ als repräsentativer Wert für energiebezogene Umweltwirkungen
- die Methode der „Umwelteinwirkungsbelastungen – UEBEL“, die ausgerichtet an den für Deutschland geltenden Umweltziele für die Schutzgüter Klima, Luft, Wasser und Fläche, mögliche Umweltwirkungen auf definierte, aber normativ

geprägte Weise zusammenfasst. (auf Grund der Bedeutung und der schwierigen Formulierung des Schutzziels wurden Auswertung mit und ohne Fläche vorgenommen).

Ein weiterer vorgeschlagener Umweltindikator der „kumulierte Rohstoffaufwand (KRA)“ konnte nicht verwendet werden, da er sich hauptsächlich aus der Metallkonzentration im Abfall und Erz ergibt und daher für die Aufgabenstellung keine weitere Erkenntnisse beisteuern kann.

Ergänzend dazu wurden auch die insbesondere für Prozesse der Hüttenindustrie wichtigen Schwermetallemissionen berechnet, aber nicht weiter aggregiert, sondern als Zusatzinformation bereitgestellt.

Hauptschwierigkeiten bei der Bearbeitung und Bewertung

Bei der Bearbeitung traten vielfältige Schwierigkeiten auf, die es zu lösen galt. Allerdings ergeben sich aus diesen Schwierigkeiten auch die Einschränkungen, unter denen die Ergebnisse und Empfehlungen zu verstehen sind.

- Die Bewertung beruht auf wenigen, sehr individuellen Anlagen der Gewinnung sekundärer Metalle. Sie sind auf spezielle Abfalleinsatzstoffe ausgelegt und können bestimmte metallische Produkte erzeugen. Damit ist es nur schwer möglich, allgemeingültige Aussagen zu erzielen. Die Aussagen beziehen sich vielmehr auf die konkreten Einzelfälle, die sich zudem zeitlich verändern können.
- Demgegenüber basieren die Informationen zur Primärmetallerzeugung aus mittleren oder auch nur aus verfügbaren Datenquellen von Anlagen weltweit. Im Einzelfall bestehen nicht unerhebliche Unterschiede der Produktion in verschiedenen Ländern.
- Sowohl für die Sekundärmetallgewinnung wie für die Primärmetallgewinnung waren nur eingeschränkte Parameterlisten zum Prozessverhalten und den Schadstoffemissionen verfügbar. Ergänzungen wurden mit Hilfe der Literatur vorgenommen, doch können sie für den Einzelfall nicht passend sein.
- Bei der Gewinnung der Sekundärmetalle ist eine beträchtliche Abhängigkeit der Verfahren von der Abfallmatrix gegeben, in der ein Metall vorliegt. Das schließt die Art der chemischen Verbindung des Metalls selbst, die Zusammensetzung des Abfalls und das Vorhandensein weiterer Metalle mit ein. Damit ist es schwierig von den Betriebsdaten einer Anlage mit speziellen Abfällen auf andere Abfälle zu schließen.
- Bei den zu Grunde liegenden Daten wurde auf ein Hauptmetall abgehoben und die meist in vergesellschafteter Form vorkommenden Metalle vernachlässigt oder rausgerechnet. Demgegenüber müssten sich Aussagen zu Grenzmetallkonzentrationen eigentlich auf die Summe aller in einem Abfall vorhandenen Metalle beziehen.

- Generell unterstützt die Klassifizierung der Abfälle nach Abfallschlüsseln der Europäischen Abfallverordnung nicht gut die Kategorisierung gleichartiger Abfälle, so dass eine durchaus hilfreiche Abfallanalysendatenbank an ihre Grenzen stößt (eine geplante Potenzialabschätzung für Deutschland erschien auf Grund der Datenbasis nicht sinnvoll).
- Zur Berechnung einer Grenzkonzentration von Metallen im Abfall wären mehrere Anlagendatenpunkte notwendig, die bei verschiedenen Metallkonzentrationen im Abfall hätten ermittelt werden müssen. So war von einem gegebenen Datenpunkt bei meist hohen Metallkonzentrationen auf einen mit niedrigen Konzentrationen zu extrapolieren. Dazu konnte nicht von einem linearen Verlauf zwischen den Datenpunkten ausgegangen werden, so dass eine exponentielle Beziehung angenommen wurde.
- Während die Berechnung des Energiebedarfs und damit die Ermittlung des Kumulierten Energieaufwandes (KEA) verlässlich erscheint, ist die Berücksichtigung der eigentlichen Umweltauswirkungen mit höheren Datenunsicherheiten behaftet. Dennoch sind sie nicht zu vernachlässigen, da sie wichtige zusätzliche Aspekte (z.B. hohe SO₂ Emissionen bei sulfidischen Erzen) berücksichtigen, die nur mit einer Energiebetrachtung verloren gegangen wären.

10.2 Handlungsempfehlungen bezogen auf die geregelten Metalle

Trotz der genannten Schwierigkeiten bei der Bearbeitung bieten die Berechnungen wichtige Orientierungen, die es erlauben, die Grenzmetailkonzentrationen entsprechend der Aufgabenstellung zumindest orientierend anzugeben.

Für jedes der untersuchten Metalle sind die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst und eine Einschätzung hinsichtlich der bestehenden Grenzmetailkonzentration gegeben:

Blei

Bestehende Grenzmetailkonzentration: 10 %

Für zwei Recyclingverfahren wurden die Grenzkonzentrationen bestimmt. Sie belaufen sich auf:

- 17 % und 36 % bei KEA

- 0,3 % und 4,4 % bei UEBEL mit Fläche
- 32 % und 30 % bei UEBEL ohne Fläche

Bei KEA und UEBEL ohne Fläche ergibt sich die Aussage, dass Abfälle sogar erst mit höheren Bleigehalten als bisher gefordert metallisch verwertet werden sollten. Unter Berücksichtigung der Fläche, wäre der bestehende Wert je nach Verfahren nicht streng genug. Der Wert liegt jedoch knapp darunter, so dass die bestehende Grenzmietallkonzentration von 10 % bestehen bleiben sollte.

Empfehlung: 10 % beibehalten

Chrom

Bestehende Grenzmietallkonzentration: 15 %

Da es keine allein auf Chrom ausgerichtete Metallgewinnung gibt, wird Chrom nur in Kombination mit anderen Zielmetallen gewonnen. Damit war es auch nicht möglich, eine allein für Chrom geltende Berechnung durchzuführen. Nach Expertenmeinung ist derzeit ein Chromgehalt von 8 % bis 10 % bei Vorhandensein anderer Metalle recyclingwürdig. Allerdings kann auf Grund der fehlenden Berechnungen zur Zeit auch nicht der Beweis angetreten werden, dass ein Chromgehalt unter 15 % im mineralischen Abfall umweltseitige Vorteile gegenüber der Primärgewinnung aufweist.

Empfehlung: 15 % beibehalten

Eisen

Bestehende Grenzmietallkonzentration: 50 %

Da Eisenerz mit einem Eisengehalt unter 50 % nur bei günstigen Vorkommen und anderen wichtigen Randbedingungen (Transportwege, Begleitgestein, etc) zur Verhütung verwendet wird, gilt diese Aussage für eisenhaltige mineralische Abfälle umso mehr. Dementsprechend konnte auch nur ein Verfahren identifiziert werden, das offensichtlich Vorteile bei bisher ungenutzten eisenhaltigen Materialströmen aufweist. Es wird zur Zeit allerdings nur für unternehmensinterne Stoffe verwendet, so dass eine Neubewertung zur Zeit nicht möglich ist und noch nicht ansteht.

Empfehlung: 50 % beibehalten

Kupfer

Bestehende Grenzmietallkonzentration: 1 %

Die Umweltbewertung für Kupfer hat folgende Ergebnisse gezeitigt:

- 33 % bei KEA
- 0,04 % bei UEBEL mit Fläche

- 1,0 % bei UEBEL ohne Fläche

Allein bezogen auf die energetische Kenngröße KEA sollten mineralische Abfälle erst ab einem Kupfergehalt von etwa 30 % zur Metallrückgewinnung genutzt werden. Das entspricht etwa dem Kupfergehalt von Kupferkonzentrat, das zur Verhüttung gelangt. Mit dem Blick auf weitere Umweltauswirkungen im UEBEL-Konzept zeigt sich, dass die hohen Schwefelemissionen und noch mehr der Flächenverbrauch der Primärkupfergewinnung das Kupferrecycling deutlich vorteilhafter aussehen lassen. Allerdings werden wohl die Energiekosten bedingen, dass eine Aufarbeitung von Abfällen mit 1 % Kupfergehalt die Hürde der wirtschaftlichen Zumutbarkeit deutlich überschreitet. Dennoch sollte - belegt durch die Berechnungen aus Umweltsicht - das 1 % Kriterium beibehalten werden.

Empfehlung: 1 % beibehalten

Nickel

Bestehende Grenzmetailkonzentration: 2,5 %

Die Überprüfung im Rahmen dieser Arbeit hat folgende Metallkonzentrationen ergeben:

- 2,2 % bei KEA
- 0,004 % bei UEBEL mit Fläche
- 0,1 % bei UEBEL ohne Fläche

Die Auswertung zeigt, dass eine primärenergetische Bewertung ein Ergebnis im Bereich des bestehenden Grenzwertes ergibt. Jedoch berücksichtigt erst das UEBEL-Konzept andere Umweltauswirkungen wie etwa die SO₂-Emissionen der Primärverhüttung und die Flächeninanspruchnahme. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte wäre eine Absenkung der Grenzmetailkonzentration anzuraten. In der Tat verarbeitet bereits heute die Nickelhütte Aue Abfälle mit Nickelkonzentrationen unter 2,5 %.

Empfehlung: Absenkung des bestehenden Wertes (z.B. auf 0,5 % oder 1 %)

Zink

Bestehende Grenzmetailkonzentration: 10 %

Im Falle der Auswertung für den kumulierten Primärenergieaufwand (KEA) liegt die Rückgewinnung von Sekundärzink für beide Datenpunkte über dem Herstellungsaufwand von Primärzink. Damit ist kein Break-Even-Punkt gegeben und die Bestimmung einer Grenzmetailkonzentration nicht möglich. Bei der Bewertung nach der Aggregationsmethode (UEBEL) gibt es ebenfalls keinen Schnittpunkt, nur dass nun die Sekun-

därzinkaufbereitung besser abschneidet als die Primäre. Ohne die Flächenbewertung ergeben sich fast identische Zahlenwerte der Primär- und Sekundärgewinnung, die zu einem Schnittpunkt führen (15 %), der allerdings auf Grund des flachen Kurvenverlaufs nicht punktgenau zu interpretieren ist.

Die Berechnungen hängen an dem unsicheren Datenpunkt der Aufbereitung des Zinkoxids zu Zink. Da nur die umstrittene Verwendung der Fläche zu einer deutlich niedrigeren Grenzkonzentration führen würde, wird unter Einbeziehung der Datenunsicherheiten empfohlen, den Grenzwert für Zink beizubehalten.

Empfehlung: 10 % beibehalten

Zinn

Bestehende Grenzmethallkonzentration: 1,5 %

Eine vergleichende Umweltbewertung war nicht möglich, da eine separate und gezielte Zinnengewinnung aus einer mineralischen Abfallmatrix in Deutschland nicht durchgeführt wird. Jedoch lässt sich konstatieren, dass die Primärgewinnung von Zinn einen sehr hohen Energieverbrauch aufweist, was auch mit entsprechend hohen sonstigen Umweltbelastungen verbunden ist. Ohne die Einspareffekte durch Zinnrückgewinnung nun beziffern zu können, lässt der hohe Energieverbrauch der Primärseite jedoch den Schluss zu, dass ein Zinnrecycling auf jeden Fall vorteilhaft sein wird.

Empfehlung: 1,5 % beibehalten

Zusammenfassende Empfehlung zur Regelung der Grenzkonzentrationen:

Es wird empfohlen:

- Blei: Beibehaltung des existierenden Wertes von 10 %
- Kupfer: Beibehaltung des existierenden Wertes von 1 %
- Nickel: Reduktion des Wertes von 2,5 % auf 1 %.
- Zink: Beibehaltung des existierenden Wertes von 10 %

Für die anderen drei nur qualitativ untersuchten Metalle in mineralischen Abfällen sollten ebenso die vorgeschlagenen Grenzwertkonzentrationen beibehalten werden – auch wenn kein unmittelbarer Anwendungsfall gegeben ist.

Neben den sieben im Anhang der VersatzVO geregelten Metalle könnte diese Liste erweitert werden. Eine Rückgewinnung insbesondere von edlen Metallen findet bereits statt. Dabei regelt der Marktpreis der Metalle die Verwertungsbemühungen. Eine an Metallgehalten in Ausgangsgestein orientierte teilweise konservative Abschätzung würde zu folgendem Vorschlag führen:

Aluminium:	25 % (als Aluminiumoxid oder –hydroxid; nicht Silikat)
Mangan	15 %
Molybdän	0,05 %
Silber	0,01 %

Platin	10 ppm (1 * 10 ⁻³ %)
Palladium	10 ppm (1 * 10 ⁻³ %)
Rhodium	5 ppm (5 * 10 ⁻⁴ %)
Indium	50 ppm (5 * 10 ⁻³ %)

Da der Marktpreis – gerade bei den momentan hohen Rohstoffpreisen – eindeutige Signale zur Verwertung der Metalle in mineralischen Matrices sendet, ist es nicht notwendig, weitere Metalle im Anhang 1 der VersatzVO bzw. DepVerwVO zu regeln.

10.3 Weitere Handlungsempfehlungen

Jenseits der eigentlichen Aufgabenstellung zur Überprüfung der Grenzmittelgehalte zur Metallrückgewinnung aus mineralischen Abfällen, konnte eine Reihe an weiteren Erkenntnissen gewonnen werden, die sich ihrerseits in Handlungsempfehlungen ausdrücken lassen. Diese Empfehlungen werden im Folgenden unterteilt nach Anlagen, Vollzug, methodische Vorgehensweise und weiterem Regelungsbedarf aufgegriffen und vorgestellt.

Handlungsempfehlungen bezogen auf die Anlagen

Eine wichtige Erkenntnis des Vorhabens war, dass es relativ wenige Unternehmen gibt, die darauf spezialisiert sind, metallhaltige mineralische Abfälle aufzubereiten. Nur für vier der sieben in der VersatzVO und DepVerwVO geregelten Metalle wurden überhaupt öffentlich zugängliche Recyclinganlagen angetroffen. Oft gibt es genau ein Unternehmen, das auf ein Hauptmetall konzentriert ist. Lediglich bei Zink konnte eine gewisse Konkurrenzsituation festgestellt werden. Für Eisenrückgewinnung aus einer mineralischen Matrix gibt es ein unternehmensinternes Verfahren, das hier nicht berücksichtigt werden konnte. Die Konkurrenzsituation besteht eigentlich eher gegenüber anderen Verwertungs- und Beseitigungsverfahren.

Die Verfahren zur Aufbereitung sind sehr spezifisch und in einem bestimmten Zusammenhang und für bestimmte Abfälle entwickelt. Die Verfahrenstechnik ist meist individuell entwickelt worden und nicht ohne weiteres auf andere Umstände übertragbar.

Die Unternehmen suchen selbstverständlich die Abfälle mit den höchsten Metallgehalten. Bei beschränkten Kapazitäten der Anlagen scheint es keine Konkurrenzsituation zur Verwertung gering metallhaltiger Abfälle (im Grenzbereich der Verordnung) unter Tage und auf Deponien zu geben. Alle angetroffenen Verwertungsanlagen arbeiten mit Metallgehalten weit oberhalb der Grenzwerte nach VersatzVO. Der Metallpreis (und Energiepreis) regelt sehr wirksam den Verwertungsweg.

Daraus ergibt sich die Empfehlung, dass bei dem untersuchten Thema der Marktpreis als wirksamer Mechanismus anerkannt werden sollte, der die Metallverwertung steuert. Dies gilt insbesondere bei den momentan weiter steigenden Preisen des Primärmetalls am Markt. Allerdings könnten bei fallenden Marktpreisen die Grenzkonzentrationen

einen wichtigen Mechanismus darstellen, um dann die Belange Ressourcenschutzes einzufordern. Daher sollten die Grenzkonzentrationen im Anhang 1 der Versatzverordnung und der Deponieverwertungsverordnung nicht gestrichen werden.

Handlungsempfehlungen bezogen auf den Vollzug

Die Überprüfung der Metallgehalte im Vollzug des Anhangs der VersatzVO und der DepVerwVO ist möglich, wird aber kaum gehandhabt. Über die Deklarationsanalysen und die unternehmensinternen Kontrollen zur Bestimmung der Metallgehalte liegen Angaben vor, würden aber einen hohen Aufwand auf Seiten der Überwachungsbehörden erfordern. Das liegt an den sehr heterogenen Metallgehalten in den Abfällen, die daher viele Einzelprüfungen notwendig machen.

Der Ansatz über Abfallart und Abfallschlüsselnummern den Vollzug zu erleichtern, musste verworfen werden, da eine Auswertung der zugänglichen Abfallanalysen zu Angaben mit sehr großer Schwankungsbreite geführt haben. Die Klassifizierung der Abfälle nach der europäischen Abfallliste ist einer Charakterisierung wenig zugänglich.

Eine Empfehlung ist, die Arbeit mit Abfallanalysedatenbanken zu erleichtern. So sollten im Vollzug vermehrt Deklarationsanalysen und einzelne Überwachungsanalysen von den Betreibern eingefordert werden und z.B. in die Datenbank ABANDA des Landes Nordrhein-Westfalen eingespeist werden. Über den leichten Zugriff auf diese Datenbank, könnten dem Vollzug Informationen zur Verfügung gestellt werden, der die Durchführung von Überprüfungen oder in dessen Vorfeld erleichtert.

Darüber hinaus wäre es sinnvoll, eine Liste der Unternehmen, die Metalle aus mineralischen Abfällen wiedergewinnt, an einer geeigneten Stelle im Internet zu veröffentlichen und mit wenigen grundlegenden Informationen aktuell zu halten.

Methodische Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

Bei der Beantwortung der Fragestellung ist insbesondere ein Bewertungsproblem zu lösen, wenn eine Grenzkonzentration für eine metallische Verwertung bestimmt werden soll. So hat sich gezeigt, dass die Berücksichtigung von Fläche großen Einfluss auf das Ergebnis hat. Die energiebezogene Bewertung und die rein emissionsbezogene Bewertung liegen in den Beispielen nahe beieinander.

Weiterhin hat sich gezeigt, dass bei der Analyse der Verwertungssysteme eigentlich allein die Umweltleistung der Aufbereitungsverfahren und die Energiebereitstellung dominieren. Einsatzstoffe, Transporte und andere Schritte sind demgegenüber meist vernachlässigbar. Entgegen der üblichen Vorgehensweise – einer Analyse des gesamten Systems – kann in solchen Fällen eine Beschränkung auf die zentralen Anlagen erfolgen.

Als Empfehlung lässt sich aussprechen, dass die gewählte Vorgehensweise bei der Ermittlung einer hochwertigen Verwertung sinnvoll eingesetzt werden kann. Es ist jedoch wie bei allen Umweltbewertungsmethoden notwendig, sich an poli-

tisch/gesellschaftlich gewonnenen Umweltqualitätszielen zu orientieren. Diese können aus einem größeren Zusammenhang gewonnen werden und für solche speziellen Fragestellungen wie hier eingesetzt werden. Außerdem wird empfohlen, nach Überprüfung des Gesamtsystems festzustellen, ob Vereinfachungen vorgenommen werden können (z.B. Reduktion des Gesamtsystems auf wesentliche Systembestandteile).

11 Literatur

- Ayres 2002 Ayres R. U., Ayres L. W. and Råde I.: "The Life Cycle of Copper, its Co-Products and Byproducts". MMSD - Mining, Minerals and Sustainable Development, London, 2002.
- B.U.S 2007 Jäger, O.: „Wälzoxidverfahren“; persönliche Mitteilung zu Verfahrensde-
tails vom 16.02.2007, B.U.S Steel Services GmbH, Duisburg.
- B.U.S 2007b Jäger, O.: „EAF-Stäube und Plasmaverfahren“; persönliche Mitteilung zu
Verfahrensdetails vom 02.04.2007, B.U.S Steel Services GmbH, Duis-
burg.
- B.U.S 2007c Ruh, A.: „Verbräuche und Emissionen des Wälzverfahrens“; persönliche
Mitteilung per Email vom 23.08.2007, B.U.S Steel Services GmbH, Duis-
burg.
- BGR 2006 Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: „Rohstoffwirt-
schaftliche Länderstudien – Bundesrepublik Deutschland Rohstoffsitua-
tion 2005“; Band XXXIV, BGR, Hannover, 2006.
- BGR 2007 Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: „Rohstoffwirt-
schaftliche Steckbriefe für Metall- und Nichtmetallrohstoffe“; Veröffentli-
chung als PDF unter:
<<http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/rohstoffpolitik.html>>,
Homepage des BMWi, Stand der Veröffentlichung: Januar 2007.
- Ecoinvent 2007 Frischknecht, R. et al.: "ecoinvent data v1.3"; Final reports ecoinvent
No. 1-16. ISBN 3-905594-38-2, Swiss Centre for Life Cycle Inventories,
Dübendorf (Schweiz), 2007.
- Gara 1998 Gara, S., Schrimpf, S.: „BEHANDLUNG VON RESTSTOFFEN UND
ABFÄLLEN IN DER EISEN- UND STAHLINDUSTRIE“; Monographien,
Band 92; Umweltbundesamt Österreich, Wien, 1998.
- Hilbrans 1999 Hilbrans H., Hinrichs W.: „Stoffmengenflüsse und Energiebedarf beider
Gewinnung ausgewählter mineralischer Rohstoffe; Teilstudie Nickel“ In:
Geologisches Jahrbuch, Vol. Sonderhefte SH 7. Bundesanstalt für Geo-
wissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 1999.
- IFEU 2000 Giegrich et al.: „Bewertung der Umweltverträglichkeit von Entsorgungs-
optionen – Methodenentwicklung und Durchführung einer vereinfachten
Bewertung und deren beispielhafte Überprüfung an vier Abfallarten“; In-
stitut für Energie und Umweltforschung Heidelberg, im Auftrag des Mi-
nisteriums für Umwelt und Verkehr des Landes Baden-Württemberg,
Heidelberg, 2000.
- IPPC 2001 Integrated Pollution Prevention and Control (Hrg.): „Reference Docu-
ment on Best Available Techniques in the Non Ferrous Metals Indus-
tries“; Sevilla, 2001.
- Krauss 1999 Krauss U., Wagner H. and Mori G: „Stoffmengenflüsse und Energiebe-
darf bei der Gewinnung ausgewählter mineralischer Rohstoffe“; Teilstu-
die Kupfer. In: *Geologisches Jahrbuch*, Vol. Sonderhefte SH 9. Bundes-
anstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 1999.
- Liechti 1999 Liechti, J.: „Erfolge und künftige Praxis bei der Entsorgung von Galvani-
kabfällen“; in Oberflächen-Polysurfaces, 04/1999, Petit-Lancy - Schweiz,
1999.
- MMSD 2001 CRU International: „Development of the Minerals Cycle and the Need for
Minerals“; in Mining, Minerals and Sustainable Development, 63/2001,
London, 2001.

- MMSD 2002 Ayres, R. U., Ayres L. W., Råde, I.: „The Life Cycle of Copper, its Co-Products and By-Products“; in Mining, Minerals and Sustainable Development, 24/2002, London, 2002.
- NA 2005 Norddeutsche Affinerie: „Menschen und Umwelt 2005 – Umwelterklärung der Norddeutschen Affinerie AG“; Norddeutsche Affinerie, Hamburg, 2005.
- NA 2006 Norddeutsche Affinerie: „Aktualisierte Umwelterklärung 2006 der Norddeutschen Affinerie AG für die Standorte Hamburg und Lünen“; Norddeutsche Affinerie, Hamburg, 2006.
- NA 2007 Hinrichs-Petersen, K., Kullick, T.: „Primär- und Sekundärkupferherstellung“; Persönliche Mitteilungen zu Verfahrensdetails der Norddeutschen Affinerie, Hamburg, 13.03.2007.
- NEOSYS 2001 Liechti, J., Lang, C., Kunze, A.: „Verwertung versus Deponierung von Metallhydroxidschlamm“; Studienbericht Nr.: 91.4014 im Auftrag des BUWAL (Schweiz), NEOSYS AG, Gerlafingen - Schweiz, 2001.
- NHA 2000 Carluß, V.: „Stoffkreislaufschließung bei abtragenden Verfahren in Prozesslösungen, Teilvorhaben 18: Verfahrensentwicklung zur vollständigen stofflichen Verwertung kupfer-, nickel-, kobalt-, zink-, zinn- und bleihaltiger Abfälle“; Nickelhütte Aue GmbH, Abschlussbericht des BMBF-Verbundvorhabens, Förderkennzeichen: 01 RK 9647/2, Aue, 2000.
- NHA 2007 Kramer, H.: „Energieverbräuche der Nickelhütte Aue“; Persönliche Mitteilungen, Aue, 12.04.2007.
- Rentz 1997 Rentz, O., Hähre, S., Jochum, R., Spengler, T.: „Report on Best Available Techniques (BAT) in the Electric Steelmaking Industry“; Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung (DFIU), Universität Karlsruhe; Forschungsprojekt Nr.: 109 05 006 im Auftrag des UBA, Karlsruhe, 1997.
- Rentz 1999 Rentz, O., Hähre, Jochum, R., Geldermann, J., S., Krippner, M., Hähre, S., Schultmann, F.: „Exemplarische Untersuchung zum Stand der praktischen Umsetzung des integrierten Umweltschutzes in der Metallindustrie und Entwicklung von generellen Anforderungen“; Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung (DFIU), Universität Karlsruhe; Forschungsprojekt Nr.: 296 94 006 im Auftrag des UBA, Karlsruhe, 1999.
- Rentz 1999b Rentz, O., Krippner, M., Hähre, S., Schultmann, F.: „Report on Best Available Techniques (BAT) in the Copper Production“; Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung (DFIU), Universität Karlsruhe; Forschungsprojekt Nr.: 109 05 006 im Auftrag des UBA, Karlsruhe, 1999.
- Rentz 1999c Rentz, O., Hähre, S., Schultmann, F.: „Report on Best Available Techniques (BAT) in German Zinc and Lead Production“; Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung (DFIU), Universität Karlsruhe; Forschungsprojekt Nr.: 109 05 006 im Auftrag des UBA, Karlsruhe, 1999.
- Ruhrzink 2007 Ruhr-Zink GmbH: „Produktion.“. Firmeninformationen zu Wälzoxidverarbeitung; < <http://www.ruhrzink.de>>, Internet vom 19.03.2007

- ThyssenKrupp 2007 ThyssenKrupp: „Recyclingwunder: Ein neuer Schachtofen wandelt Reststoffe in hochwertiges Roheisen um“. Firmeninformationen; <<http://www.thyssenkrupp.de/de/engagement/schachtofen.html>>, Internet vom 22.02.2007
- USGS 2007 U.S. Geological Survey: „Mineral Commodities – Data sheets“; Jährliche Veröffentlichung zu mineralischen Rohstoffen unter <<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs>>, Internet vom 13.02.2007
- VDI-Entwurf 2006 Verein Deutscher Ingenieure: „VDI-Richtlinie Emissionsminderung Sekundärkupferhütten – VDI 2102, Blatt 1, Vorentwurf 08“; Beuth-Verlag, Berlin, Stand: 19.09.2006.
- Xiao 2003 Xiao X., Songwen X., Xueyi G., Kelong H. and Ryoichi Y.: „LCA Case Study of Zinc Hydro and Pyro-Metallurgical Process in China“; In: *International Journal for Life Cycle Assessment*, Online first, pp. 1 - 5, Eco-med-Verlag, Landsberg, 2003.