

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt

Lehrstuhl für Rohstoff- und Energietechnologie

Stoffstrommanagement als Instrument zur Steigerung der Ressourceneffizienz der deutschen Eisen- und Stahlindustrie

Josephine I. R. Müller

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Volker Sieber

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang A. Mayer

2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Deike
(Universität Duisburg-Essen)

Die Dissertation wurde am 02.11.2016 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 21.02.2017 angenommen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung und Motivation.....	1
1.2	Zielsetzung und Forschungsfrage.....	2
1.3	Allgemeines Vorgehen und Aufbau der Arbeit	3
2	Untersuchung der Eisen- und Stahlindustrie	5
2.1	Einleitung	5
	2.1.a) Geschichtliches.....	5
	2.1.b) Erzeugungsrouten.....	5
	2.1.c) Produktionsmengen	7
	2.1.d) Bedeutung für Deutschland.....	8
	2.1.e) Die Branche international	8
2.2	Methode: Stoffstrom- und Prozesskettenanalyse.....	13
2.3	Vorgehen beim Anwenden der Methode	14
2.4	Ergebnis: Modell der Prozesskette für die Eisen- und Stahlindustrie	15
3	Auswahl der Stoffströme	18
3.1	Einleitung	18
3.2	Methode: Kategorisierung.....	18
3.3	Modellierung der Stoffströme mit Kategorisierung	20
	3.3.a) Sintererzeugung.....	22
	3.3.b) Roheisenerzeugung	24
	3.3.c) Rohstahlerzeugung	30
	3.3.d) Umformen	36
3.4	Exkurs: Rechtliche Grundlagen zur Verwertung	38
3.5	Ergebnis: Identifizierte Verknüpfungsansätze.....	41
	3.5.a) Sinterabgas.....	42
	3.5.b) Hochofenschlamm	44
	3.5.c) EAF-Staub	45
	3.5.d) Konverterrückstände	45
	3.5.e) Stahlwerksschlacken.....	48
	3.5.f) Abbeizschlamm.....	49
	3.5.g) Auswahl relevanter Rückstände	49

4	Verfahrensvergleich	50
4.1	Einleitung	50
4.2	Methode: Nutzwertanalyse	51
4.3	Vorgehen bei der Anwendung der Nutzwertanalyse	52
	4.3.a) Bewertungskriterien, Zielerreichungs- und Gewichtungsfaktoren ...	52
	4.3.b) Berechnung und Einordnung des Gesamtnutzens	56
4.4	Etablierte und alternative Verfahren zur Verwertung von Stäuben und Schlämmen	58
	4.4.a) Wälzprozess	58
	4.4.b) DK-Prozess	61
	4.4.c) OxyCup-Prozess	63
	4.4.d) RHF-Prozesse: INMETCO-, RedSmelt- und RedIron-Prozess	65
	4.4.e) Primus-Prozess	66
	4.4.f) Plasmadust-/ScanDust-Prozess	68
	4.4.g) Cebedeau-Laugung	69
	4.4.h) TSL-Prozess	72
4.5	Resultat der Nutzwertanalyse der Verfahren für Hochofenschlamm, Konverterrückstände und EAF-Staub	74
	4.5.a) Hochofenschlamm und Konverterrückstände	74
	4.5.b) EAF-Staub	76
4.6	Sensitivitätsanalyse	79
	4.6.a) Sensitivität der Gesamtnutzwerte beim Vergleich der Verfahren für Hochofenschlamm und Konverterrückstände	79
	4.6.b) Sensitivität der Gesamtnutzwerte beim Vergleich der Verfahren für EAF-Staub	80
4.7	Theoretische Metallverluste und -gewinne	82
	4.7.a) Metallverluste	82
	4.7.b) Mögliche Metallgewinne	86
4.8	Ergebnisse des Verfahrensvergleichs.....	89
5	Hemmnisse der Verfahrensetablierung	90
5.1	Einleitung	90
5.2	Methode: Experteninterviews.....	90

5.3	Ergebnisse der Expertenbefragung.....	91
5.3.a)	Gründe für die Deponierung von Rückständen.....	91
5.3.b)	Bekanntheitsgrad von Verwertungsverfahren.....	92
5.3.c)	Bewertung der Verfahren durch die Experten.....	93
5.3.d)	Ansätze zur Etablierung	94
5.3.e)	Allgemeine Probleme zur Etablierung eines Verwertungsverfahrens	95
6	Zusammenfassung der Ergebnisse und Handlungsempfehlungen.....	96
7	Methoden- und Ergebnisdiskussion	100
8	Fazit und Ausblick	107

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wege der Eisen- und Stahlerzeugung, basierend auf (10).....	6
Abbildung 2: Die Rohstahlproduktion in Deutschland in den Jahren 1994 bis 2012 (12) (14) sowie Anzahl an Produktionsanlagen (12) (15)	7
Abbildung 3: Verwendung von Walzstahl in verschiedenen Branchen im Jahr 2008 in Deutschland (13)	8
Abbildung 4: Entwicklung der Stahlproduktion weltweit (19).....	10
Abbildung 5: Import von Eisenerz nach Deutschland im Jahr 2008 (Gesamt 41,9 Mio. t importiertes Eisenerz), Anteil der Bezugsländer in Prozent (22)	11
Abbildung 6: Anteil der Eisenerzimporte der weltweit größten Importeure in den Jahren 2004 (a) und 2012 (b) in Prozent (20)	12
Abbildung 7: Import von Koks kohle nach Deutschland im Jahr 2012 (Gesamt 9,486 Mio. t importierter Koks), Anteil der Bezugsländer in Prozent (23)	12
Abbildung 8: Schematische Prozesskette.....	14
Abbildung 9: Schematischer Aufbau der Prozesskette für die Eisen- und Stahlindustrie ...	14
Abbildung 10: Modellierung der Stoffströme der Grundstoffproduktion der Eisen- und Stahlindustrie.....	17
Abbildung 11: Überblick Recyclingarten	18
Abbildung 12: Darstellung der Recyclingarten an schematischen Prozessketten	19
Abbildung 13: Modellierung der Stoffströme der Grundstoffproduktion der Eisen- und Stahlindustrie mit Kategorisierung der Stoffströme	21
Abbildung 14: Schematische Darstellung einer Sinteranlage (11)	22
Abbildung 15: Stoffflussbild des Teilprozesses Sintererzeugung mit Kategorisierung	23
Abbildung 16: Schematische Darstellung eines Hochofens mit Winderhitzer (44)	25
Abbildung 17: Stoffflussbild des Teilprozesses Roheisenerzeugung mit Kategorisierung....	29
Abbildung 18: Schematische Darstellung eines Sauerstoffblaskonverters (44)	30
Abbildung 19: Darstellung eines Drehstrom-Lichtbogenofens (44)	31
Abbildung 20: Stoffflussbild des Teilprozesses Rohstahlerzeugung mit Kategorisierung.....	32
Abbildung 21: Stoffflussbild des Teilprozesses Umformen mit Kategorisierung	37
Abbildung 22: Die fünfstufige Abfallhierarchie nach Artikel 4 der europäischen Abfallrichtlinie 2008/98/EG (70) (71)	39
Abbildung 23: Verwendung von Stahlwerksschlacke nach der Schlackenstatistik des FEhS für 2011 (54)	48
Abbildung 24: Verfahrensschema des Wälzprozess nach Informationen der Befesa Steel GmbH (43) (103)	59

Abbildung 25: Typische Rohstoffmischung der Einsatzstoffe des DK-Prozesses in Prozent (90).....	61
Abbildung 26: Verfahrensschema des DK-Prozesses in Anlehnung an (105).....	62
Abbildung 27: Schachtofen des OxyCup-Prozesses mit Brikettherstellung und Darstellung eines Agglomeratsteines in Anlehnung an (43) und (108).....	64
Abbildung 28: Verfahrensschema des INMETCO-Prozesses in Anlehnung an (110)	66
Abbildung 29: Verfahrensschema des Primus-Prozesses in Anlehnung an (110).....	67
Abbildung 30: Verfahrensschema des Plasmadust-/ScanDust-Prozesses in Anlehnung an (113).....	69
Abbildung 31: Verfahrensablaufschemata der Cebedeau-Laugung nach (35).....	71
Abbildung 32: Ausmelt-TSL-Ofen (114).....	73
Abbildung 33: Potenziale im Rahmen eines Stoffstrommanagements (1).....	82
Abbildung 34: Bekanntheitsgrad etablierter und alternativer Verfahren zur Verwertung von Hüttenreststoffen.....	92
Abbildung 35: Bekanntheitsgrad etablierter und alternativer Verfahren zur Verwertung von EAF-Staub	93

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zusammensetzung von Sinterstaub in Gew.-%	24
Tabelle 2:	Zusammensetzung von Hochofenschlacke sowie Hüttensand und Hochofenstückschlacke in Gew.-%.....	27
Tabelle 3:	Zusammensetzung von Konverterschlacke in Gew.-%	33
Tabelle 4:	Zusammensetzung von Elektroofenschlacke in Gew.-%.....	35
Tabelle 5:	Zusammensetzung verschiedener Zunder in Gew.-% (38)	36
Tabelle 6:	Grenzwertkonzentrationen der Versatzverordnung, Anlage 1 (36).....	40
Tabelle 7:	Zusammenfassung der identifizierten Verknüpfungsansätze mit Einschätzung der Verwertungspotenziale	41
Tabelle 8:	Vergleich von EOS, LEEP, EPOSint (79) (80) (82)	43
Tabelle 9:	Zusammensetzung von Hochofenschlamm (BF-Schlamm) und Hochofenstaub (BF-Staub) im Vergleich, Angaben in Gew.-%	44
Tabelle 10:	Eisen-, Zink- und Bleigehalt von EAF-Staub in Gew.-%.....	45
Tabelle 11:	Typische Zusammensetzungen von Konverterstaub und -schlamm in Gew.-%.....	47
Tabelle 12:	Verfahren zur Verwertung der identifizierten Rückstände (in Deutschland etablierte Verfahren sind unterstrichen)	50
Tabelle 13:	Vergabe der Zielerreichungsfaktoren (ZF) mit Gewichtung der Kriterien (GF)	54
Tabelle 14:	Bestimmung der Gewichtungsfaktoren nach (98)	55
Tabelle 15:	Variablen zur Berechnung der Gesamtnutzwerte.....	57
Tabelle 16:	Ergebnis der Nutzwertanalyse für Verfahren zur Verwertung von Hochofenschlamm und Konverterrückständen.....	75
Tabelle 17:	Ergebnis der Nutzwertanalyse für Verfahren zur Verwertung von EAF- Staub	77
Tabelle 18:	Sensitivität der Gesamtnutzwerte für die Verfahren zur Verwertung von Hochofenschlamm und Konverterrückständen (NWA = Nutzwertanalyse)	80
Tabelle 19:	Sensitivität der Gesamtnutzwerte für die Verfahren zur Verwertung von EAF-Staub (NWA = Nutzwertanalyse)	81
Tabelle 20:	In Deutschland erzeugte und deponierte Mengen von Hochofenschlamm, Konverterrückständen und EAF-Staub im Jahr 2006 (51)	83
Tabelle 21:	Metallgehalte der Rückstände (37) (38) (42) (43) (45) (51) (88) (90)	83
Tabelle 22:	Berechnete Zink-, Blei- und Eisenverluste	84
Tabelle 23:	Jährliche theoretische Zinkverluste und deren Anteil am Jahresverbrauch von Zink in Deutschland	85

Tabelle 24:	Jährliche theoretische Bleiverluste und deren Anteil am Jahresverbrauch von Blei in Deutschland	85
Tabelle 25:	Jährliche theoretische Eisenverluste und deren Anteil an der Jahresproduktion von Eisen in Deutschland	86
Tabelle 26:	Wertstoffausbringung der Verfahren zur Verwertung von Hochofenschlamm und Konverterrückständen (35) (37) (84) (85).....	87
Tabelle 27:	Theoretische Rückgewinnungsmengen von Zink und Blei aus Hochofenschlamm und Konverterrückständen durch Anwendung verschiedener Verfahren	87
Tabelle 28:	Wertstoffausbringung der Verfahren zur Verwertung von Elektroofenstaub (35) (37) (85)	88
Tabelle 29:	Theoretische Rückgewinnungsmengen von Zink und Eisen aus Elektroofenstaub durch Anwendung verschiedener Verfahren.....	89
Tabelle 30:	Handlungsempfehlungen zur Schaffung und Unterstützung von Open-Loop-Recyclingmöglichkeiten	98
Tabelle 31:	Berechnung der Deponierung von Stäuben und Schlämmen nach (51) und (52).....	133

Zusammenfassung

Die Sicherung von Rohstoffen ist ein wichtiges Thema in der aktuellen Nachhaltigkeitsdebatte. Deutschland ist ein importabhängiges Land, bei dem bedeutende Industrien, wie die Eisen- und Stahlindustrie, sehr stark von der Rohstoffversorgung abhängig sind.

Ziel der vorliegenden Dissertation war es, die Rohstoffnutzung der deutschen Eisen- und Stahlindustrie zu beurteilen und dadurch Ansätze zur Steigerung der Ressourceneffizienz der Branche zu finden. Dazu sollten Möglichkeiten aufgezeigt und bewertet werden, die ein Open-Loop-Recycling, das heißt eine Verknüpfung zu anderen Industrien, schaffen können und dadurch eine verbesserte Rohstoffnutzung ermöglichen. Ein weiteres Ziel war die Anwendung und Bewertung der Methode des Stoffstrommanagements zur Steigerung der Ressourceneffizienz.

Durchgeführt wurde ein Stoffstrommanagement mit einer Stoffstromanalyse für alle Prozesse der Grundstoffproduktion der deutschen Eisen- und Stahlindustrie. Die relevanten Inputs und Outputs der Prozesse wurden in einem Stoffstrommodell dargestellt.

Die Analyse der Stoffströme nach Optimierungspotenzialen erfolgte anhand einer Kategorisierung. Dabei wurden die Stoffströme in Prozessrückläufe, Produktionsrückläufe, Open-Loops und Verknüpfungsansätze eingeteilt. Es zeigte sich, dass in der Eisen- und Stahlindustrie bereits ein hohes Maß an Ressourceneffizienz erreicht ist. Dennoch konnten Stoffströme mit Verknüpfungspotenzial für Open-Loops gefunden werden. Diese waren die Rückstände Hochofenschlamm, Konverterrückstände und Elektroofenstaub (EAF-Staub).

Für diese Rückstände wurden Verfahren recherchiert, die eine bessere Verwertung der Rückstände erlauben. Mittels einer Nutzwertanalyse wurden die in Deutschland etablierten Verfahren mit den recherchierten alternativen Verfahren verglichen. Die Ergebnisse der Nutzwertanalyse wurden mit einer Sensitivitätsanalyse hinterfragt und bestätigt.

Es ergab sich, dass die bereits etablierten Verfahren zur Verwertung von Hochofenschlamm und Konverterrückständen (DK und OxyCup) im Vergleich besser sind als die alternativen Verfahren. Im Gegensatz dazu hat der etablierte Prozess zur Verwertung von EAF-Stäuben – der Wälzprozess – signifikante Nachteile gegenüber den alternativen Verfahren. Hier zeigten sich der INMETCO- und der Primus-Prozess als vorteilhafter. Mit diesen Ergebnissen wurden mögliche Metallgewinne bei Etablierung der alternativen Verfahren berechnet.

Durch Experteninterviews wurden die Ergebnisse nochmals hinterfragt und Hemmnisse zur Verfahrensetablierung aufgedeckt. Obwohl die etablierten und alternativen Verfahren den Experten aus der Eisen- und Stahlindustrie bekannt waren, werden sie oft aus wirtschaftlichen Gründen nicht angewendet. Der Konkurrenz- und Kostendruck in der Branche sei zu hoch. Entsprechende Handlungsempfehlungen für die Politik und die weitere Forschung wurden abgeleitet, um die Verfahren zur Verwertung von Rückständen zur Ressourcenschonung zu etablieren.

Danksagung

Mein Dank gilt **Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Mayer** als Erstprüfer meiner Arbeit. Ohne seinen Einsatz, wäre diese Arbeit sicher nicht zum Ende gekommen.

Gleiches gilt für den Zweitprüfer **Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Deike**. Bei ihm bedanke ich mich für die fachliche Unterstützung und die nette Zusammenarbeit.

Außerdem möchte ich Prof. Dr.-Ing. Martin Faulstich als Initiator des Projektes danken, das den Anstoß für mein Promotionsthema gab. Weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Sieber als Prüfungsvorsitzenden.

Ich bedanke mich bei den Mitarbeitern des Fraunhofer ISI für die fachliche Unterstützung und die Möglichkeit im r^2 -Projekt mitzuarbeiten.

Ich bedanke mich bei meinen ehemaligen Kollegen und den Mitarbeitern des Wissenschaftszentrums für das gegenseitige Stützen, das angenehme Arbeitsklima und die schöne Zeit in Straubing.

Bedanken möchte ich mich auch bei den Studierenden, die mich durch ihre Abschlussarbeiten bei der Promotion unterstützt haben. Besonders hervorzuheben ist Frau Franziska Genghammer.

Von ganzem Herzen danke ich meinen Eltern und meiner Familie, die mich auf meinem Weg begleitet und immer unterstützt haben. Besonderer Dank gilt meinem Partner, mit dem ich das Schicksal des Doktorandendaseins teilte und der mich stets ertrug, motivierte und aufmunterte.

1 Einleitung

Professor Heck vom Institut für angewandtes Stoffstrommanagement der Hochschule Trier beschreibt Stoffstrommanagement als eine intelligente Vernetzung, bei der angepasste Technologien „zu höherer Produktivität, effizienten und nachhaltigen Kooperationen, neuen Investitionen und weniger Umweltbelastung“ führen (1).

1.1 Problemstellung und Motivation

Im großen Themengebiet Nachhaltigkeit und Umweltschutz spielt auch die Sicherung von Rohstoffen eine wichtige Rolle. Bevölkerungswachstum und der Konkurrenzkampf der Staaten um Rohstoffe können zu Rohstoffverknappung und Rohstoffmangel führen. Für eine importabhängige Industrienation wie Deutschland muss eine langfristige Rohstoffversorgung gesichert werden (2). Dies gilt nicht nur für Energierohstoffe, für die bereits Maßnahmen in Form von Substitution durch regenerative Energien vorgenommen werden, sondern auch für mineralische und metallische Rohstoffe. Damit steht auch das deutsche Produzierende Gewerbe vor neuen Herausforderungen.

Die deutsche Politik hat diese Problematik erkannt und im Jahr 2002 die nationale Nachhaltigkeitsstrategie beschlossen. Dazu gehört die Deutsche Rohstoffstrategie, die Hightech-Strategie (3) und das Deutsche Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess) (4). Die diesbezügliche Forschungsförderung umfasst das Programm „Wirtschaftsstrategische Rohstoffe für den Hightech-Standort Deutschland“ im Rahmenprogramm „FONA – Forschung für nachhaltige Entwicklung“. Im Rahmen von FONA wurde die BMBF-Fördermaßnahme „Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – rohstoffintensive Produktionsprozesse“ (kurz r²) finanziert.

Die vorliegende Arbeit baut auf den Ergebnissen des Projektes „Branchen- und technologieübergreifende Ansätze im Strategiebereich Ressourceneffizienz“, das im Rahmen von r² bearbeitet wurde, auf. Dabei wurden durch gezielte Integration und Vernetzung von materiellen Wertschöpfungsketten Ressourceneffizienzpotenziale aufgezeigt. Ziel war die Identifikation von Möglichkeiten der Kooperation zwischen verschiedenen rohstoffintensiven Branchen, des stofflichen und energetischen Verbunds sowie der regionalen und überregionalen Vernetzung.

Zur nationalen Nachhaltigkeitsstrategie gehört auch die Steigerung der Ressourceneffizienz der Industrie. Dabei wird der Erhalt und eine möglichst effiziente Verwertung von Ressourcen angestrebt, was zu Schutz und Schonung von natürlichen Ressourcen beiträgt (5). Ein Weg, Potenziale zur Steigerung der Ressourceneffizienz aufzuzeigen, ist die ganzheitliche Analyse rohstoffintensiver Prozessketten wie die der Eisen- und Stahlindustrie.

Zur Steigerung der Ressourceneffizienz ist eine möglichst hochwertige Verwertung (Abfallhierarchiestufe 3 KrWG §6 (6), siehe Kapitel 3.4) von Outputs im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes anzustreben. Prozessoutputs sollten zur Ressourcenschonung verwertet und nicht deponiert werden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit geben Hinweise zur Steigerung der Ressourceneffizienz in der Eisen- und Stahlindustrie durch eine veränderte Nutzung von Prozessoutputs und das Schließen von Stoffkreisläufen übergreifend über Branchen, Technologien und Wertschöpfungsketten.

1.2 Zielsetzung und Forschungsfrage

Häufig betrachten Ansätze zur Effizienzsteigerung wie die Methoden der Ökobilanzierung und des Stoffstrommanagements nur einen bestimmten Abschnitt einer Prozesskette oder beziehen sich auf nur einen bestimmten Rohstoff. Aufbauend auf solchen partiellen Optimierungen wird hier für eine möglichst effiziente Ressourcennutzung eine Analyse auf der übergeordneten Ebene – der gesamten Prozesskette – vorgenommen. Mögliche Verknüpfungspunkte zur Vernetzung einer Prozesskette ergeben sich dabei aus der Analyse der Stoffströme der einzelnen Prozesse.

Für die Prozesskette der Eisen- und Stahlindustrie existieren bereits Untersuchungen zu Stoffströmen und Optimierungspotenzialen. Die Anwendung des Stoffstrommanagements hat bisher zumeist die Verbesserung von Umwelteinflüssen zum Ziel, wie CO₂-Vermeidung oder Energieeinsparungen. Um Optimierungsansätze hinsichtlich der Verwertung von Rückständen bei einer mehrstufigen Prozesskette zu finden – wie in der vorliegenden Untersuchung – wurde das Stoffstrommanagement noch nicht angewendet.

Hauptziel dieser Arbeit ist es, Möglichkeiten aufzuzeigen, wie die Prozesse der Eisen- und Stahlindustrie mit denen anderer Branchen anhand der Stoffströme verknüpft werden können. Diese Branchenverknüpfungen können auch als Open-Loop-Recycling (siehe Kapitel 3.2) bezeichnet werden. Ein Verfügbarmachen von Rohstoffen für andere Industriezweige schont Primärressourcen, vermeidet Rohstoffverluste und schafft Möglichkeiten zur Kooperation zwischen Unternehmen, was wiederum die Ressourceneffizienz in den beteiligten Branchen steigern kann.

Die Forschungsfragen im Bereich der Ressourceneffizienz der Eisen- und Stahlindustrie lauten daher:

- Wie kann die Ressourceneffizienz der Eisen- und Stahlindustrie in Bezug auf die Rohstoffnutzung eingeschätzt werden?
- Welche Verfahren eignen sich, um weiteres Open-Loop-Recycling in der Branche zu etablieren?
- Wie kann die Ressourceneffizienz der Eisen- und Stahlindustrie durch Open-Loop-Recycling weiter gesteigert werden?

Die bisherige Anwendung des Stoffstrommanagements wird in dieser Arbeit abgewandelt und zur Identifikation von Stoffströmen, bei denen Ressourceneffizienzmaßnahmen angesetzt werden können, genutzt. Ein weiteres Ziel ist es, die Methode des Stoffstrommanagements in der hier angewendeten Form zu diskutieren.

Die entsprechende Forschungsfrage zur Bewertung der Methode des Stoffstrommanagements lautet:

- Kann ein Stoffstrommanagement zum Auffinden von Optimierungspotenzialen hinsichtlich Ressourceneffizienz eingesetzt werden?

1.3 Allgemeines Vorgehen und Aufbau der Arbeit

In der Umwelt- und Nachhaltigkeitsforschung werden oft verschiedene wissenschaftliche Disziplinen miteinander verknüpft. Dabei handelt es sich um transdisziplinäre Forschung. Diese zeichnet sich dadurch aus, dass bestehende Methoden anders angewendet oder stark verändert werden. (7) In der vorliegenden Untersuchung werden durch die Methode des Stoffstrommanagements Ansätze zur Steigerung der Ressourceneffizienz aufgezeigt, wobei weitere Methoden – Nutzwertanalyse und Expertenbefragungen – in die einzelnen Vorgehensschritte einfließen.

Ein Stoffstrommanagement ist nach der Enquete-Kommission zum ‚Schutz des Menschen und der Umwelt‘ des Deutschen Bundestages „das zielorientierte, verantwortliche, ganzheitliche und effiziente Beeinflussen von Stoffsystemen“ (8). Im Rahmen der Stoffstromanalyse wird ein Modell der Eisen- und Stahlindustrie mit Input- und Outputströmen entworfen, welche einem Auswahlverfahren unterworfen werden. Ein derartiges Modell ist besonders gut geeignet Wissensbestände zusammenzuführen, wie es in der transdisziplinären Forschung üblich ist (7). Ein Ziel dieser Forschung ist es, Handlungsempfehlungen aus den Untersuchungsergebnissen abzuleiten (7). In der vorliegenden Untersuchung werden Handlungsempfehlungen aus den Ergebnissen einer Nutzwertanalyse zum Vergleich von Verwertungsverfahren und einer Expertenbefragung erarbeitet.

Die Vorgehensweise beim Stoffstrommanagement ist in der Norm DIN ISO 14040 festgehalten (siehe auch (8)). Die folgende Aufstellung zeigt die Schritte eines Stoffstrommanagements und die entsprechenden Kapitel dieser Arbeit:

1. Zielfestlegung → Kapitel 1
2. Stoffstromanalyse → Kapitel 2
3. Bewertung → Kapitel 3, 4 und 5
4. Entwicklung von Strategien → Kapitel 6

Zunächst erfolgt die Zielfestlegung in der Einleitung der Arbeit, Kapitel 1. Im zweiten Kapitel werden das Vorgehen und die Ergebnisse der Stoffstromanalyse erläutert. Dabei wird das betrachtete Stoffflusssystem – die Eisen- und Stahlindustrie – beschrieben und die Systemgrenzen festgelegt. Im dritten Schritt findet eine erste Bewertung des erstellten Stoffstromsystems statt, indem die Stoffströme kategorisiert werden. Die weitere Bewertung des Systems wird in Kapitel 4 mit dem Vergleich von Verwertungsverfahren anhand einer Nutzwertanalyse durchgeführt. Im Kapitel 5 wird außerdem eine Expertenbefragung ausgewertet, durch die das Stoffstromsystem ebenfalls bewertet wird. Dabei geht es um Hemmnisse, die in der Industrie zur Etablierung von Verwertungsverfahren bestehen. Die Kapitel 2, 3, 4 und 5 sind jeweils in Einleitung, Methodenteil und Ergebnisse untergliedert, da

hier weitere Methoden angewendet werden. Im letzten Schritt eines Stoffstrommanagements sollen Strategien entwickelt werden, wie das Stoffflusssystem gezielt beeinflusst werden kann, um die identifizierten Optimierungsmöglichkeiten ausschöpfen zu können (9). Im Letzten Kapitel 6 werden daher die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und ein Fazit gezogen.

2 Untersuchung der Eisen- und Stahlindustrie

2.1 Einleitung

In diesem einleitenden Kapitel wird zunächst ein kurzer Überblick über Erzeugung und Produktion von Eisen und Stahl sowie zu internationalen Zusammenhängen der deutschen Eisen- und Stahlindustrie gegeben. Anschließend werden Methode und Vorgehensweise beim Erstellen eines Stoffstrommodells für die Industrie erläutert. Das Ergebnis ist die modellierte Prozesskette der Eisen- und Stahlindustrie in Deutschland.

2.1.a) Geschichtliches

Der Beginn der Eisen- und Stahlindustrie geht auf die Zeit 3.000 v. Chr. zurück. Das älteste Verfahren zur Eisenerzeugung ist das sogenannte Rennfeuer. (10) In Rennöfen, Schachtöfen aus Lehm, wurde Eisenerz mithilfe von Holzkohle geschmolzen. Die Sauerstoffzufuhr erfolgte durch einen natürlichen Luftzug. (11) Die Trennung von Eisen und Schlacke erfolgte über das anschließende Schmieden der sogenannten Luppe (10) (11). Die Entwicklung höherer Schächte und zusätzlicher Gebläse verbesserte die Leistung des Ofens und führte zu höheren Temperaturen im unteren Ofenbereich. 1.300 Jahre n. Chr. wurde auf diese Weise erstmals Roheisen in einer Art Hochofen hergestellt und anschließend in einem sogenannten Frischfeuer entkohlt. Die Weiterentwicklung der Eisenerzeugung führte erstmals zur Herstellung von flüssigem Stahl im Jahr 1740. Das heute nicht mehr angewendete Thomas-Verfahren wurde 1877 etabliert. Kurz darauf im Jahr 1878 wurde der erste Elektrolichtbogenofen entwickelt. Das heute ebenso angewendete Oxygenstahlverfahren entstand im Jahr 1952. (10)

Die Verwertung von Schrott wurde schon vor der Erfindung des Elektrolichtbogenofens im Jahr 1856 im Roheisen-Schrott-Verfahren nach Siemens-Martin vorgenommen. Dies zeigt die lange Tradition der Abfallverwertung in der Eisen- und Stahlindustrie.

2.1.b) Erzeugungsrouten

Die wichtigsten heutigen Erzeugungsrouten für Eisen und Stahl sind in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Bei der Erzeugung von Stahl aus primären Rohstoffen wird das Eisenerz zunächst durch Brechen, Klassieren sowie anschließendem Sintern oder Pelletieren aufbereitet. Roheisen kann anschließend über den Hochofen oder in einer Schmelzreduktion erzeugt werden. Bei der Direktreduktion wird dem Erz nur der Sauerstoff entzogen und es entsteht sogenannter Eisenschwamm. Dieses direkt reduzierte Eisen (DRI) enthält noch die Gangart der Erze. Die Schmelzreduktion kombiniert diese Vorgehensweise mit einem anschließenden Schmelzprozess, womit ein hochofenähnliches Roheisen erzeugt werden kann. Direkt- und Schmelzreduktionsprozesse werden derzeit zwar in Deutschland erprobt (COREX- und FINEX-Verfahren), können aber bezogen auf die erzeugte jährliche Menge nicht mit der Hochofen-Route konkurrieren.

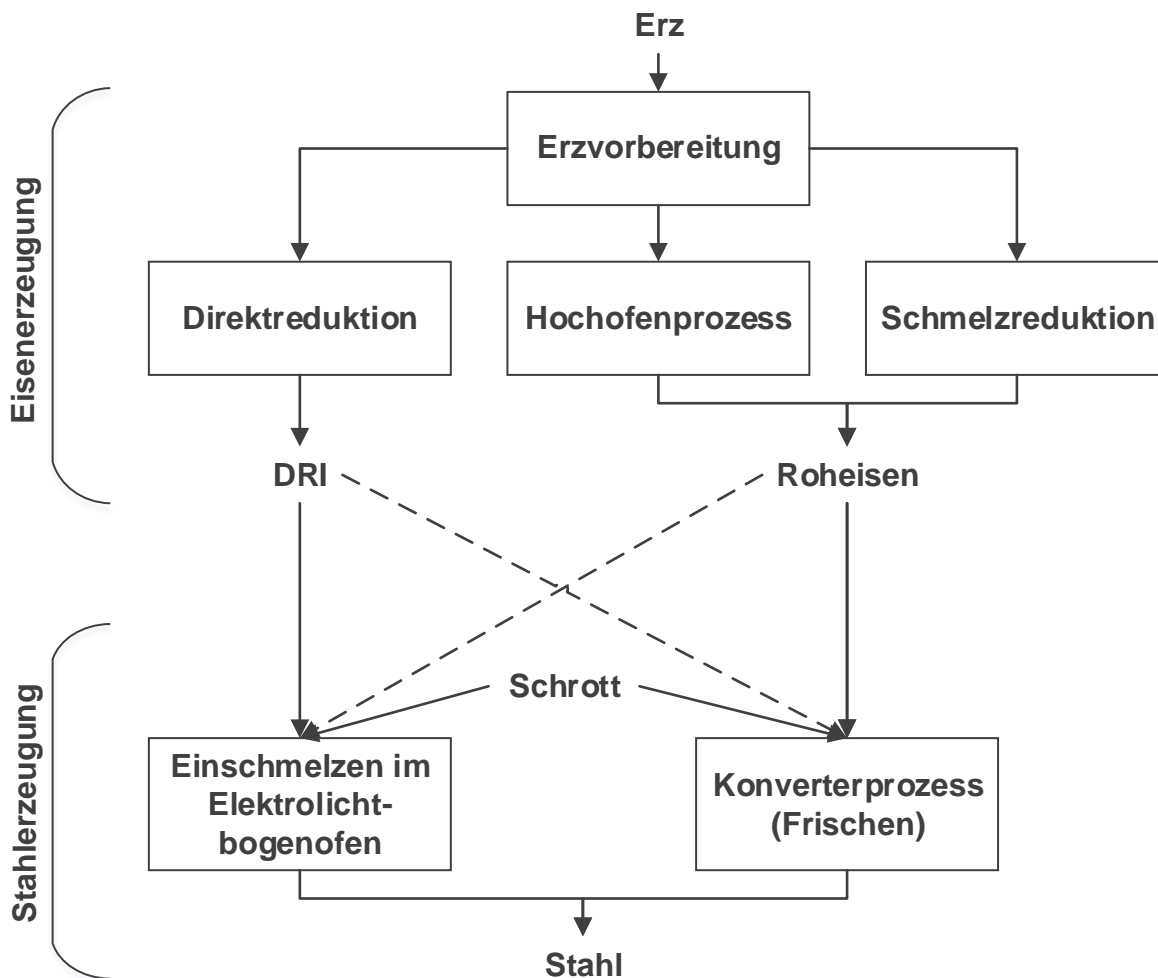


Abbildung 1: Wege der Eisen- und Stahlerzeugung, basierend auf (10)

Bei der Primärstahlerzeugung oder Oxygenstahlroute wird das im Hochofen erzeugte Roheisen in einem Konverter gefrischt, um Kohlenstoff und andere Begleitelemente zu entfernen. Zum Kühlen wird dem Konverter auch Schrott zugegeben. Bei der sekundären Stahlherstellungsart über einen Elektrolichtbogenofen kann Stahl aus bis zu 100 % Schrott erzeugt werden. Der elektrische Lichtbogen im Ofen erzeugt dabei die benötigte Schmelzwärme. In einem solchen Ofen können auch DRI und Roheisen verwertet werden.

Der über die verschiedenen Wege hergestellte Stahl wird anschließend in der Sekundärmetallurgie nachbehandelt, um die gewünschte Zusammensetzung und damit bestimmte Eigenschaften des Stahls zu erreichen. Beim anschließenden Umformen wird der Stahl durch Gießen und Walzen in die gewünschte Form gebracht. Die Fertigungsprozesse der Oxygenstahlroute vom Sintern bis zum Umformen finden sich zumeist an einem Standort. Diese Anlagenkombination wird als integriertes Hüttenwerk bezeichnet.

2.1.c) Produktionsmengen

Abbildung 2 zeigt die gesamte Rohstahlproduktion in Deutschland von 1994 bis 2012 in Millionen Tonnen mit den Anteilen an Elektro- und Oxygenstahl. Zu erkennen ist eine leicht schwankende Produktionsmenge, wobei der Anteil von Elektro Stahl über die Jahre stetig zunahm. Im Krisenjahr 2009 ist ein deutlicher Einbruch der Produktion zu verzeichnen.

Im Jahr 2012 hatte das Oxygenstahlverfahren einen Anteil an der Gesamtstahlerzeugung von 66,6 Prozent gegenüber dem Elektro Stahlverfahren mit 33,4 Prozent (12). Im Krisenjahr 2009 stieg der Anteil der Elektro Stahlherzeugung auf 34,7 Prozent (12). Durch die Zunahme der Elektro Stahlherzeugung ist Schrott mit einer Einsatzquote von 45,2 Prozent im Jahr 2008 auch heute neben Eisenerz der wichtigste Ausgangsrohstoff der Eisen- und Stahlindustrie (13).

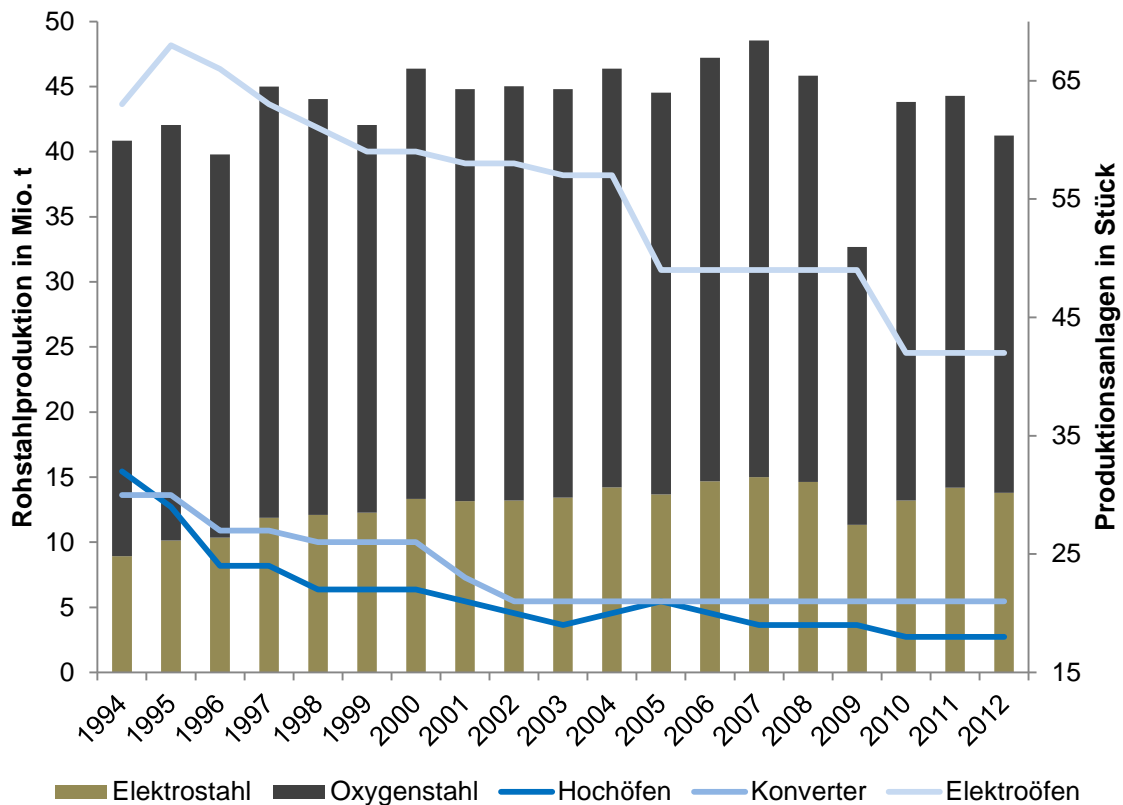


Abbildung 2: Die Rohstahlproduktion in Deutschland in den Jahren 1994 bis 2012 (12) (14) sowie Anzahl an Produktionsanlagen (12) (15)

In Abbildung 2 ist auch aufgetragen wie viele Anlagen in den entsprechenden Jahren in Deutschland vorhanden waren. So hat die Menge an Hochöfen und Konvertern nur leicht abgenommen, während die Zahl der Elektroöfen stärker zurückging. Trotzdem ist die Produktionsmenge relativ gleich geblieben, was auf die gesteigerte Effizienz der Produktion hinweist.

2.1.d) Bedeutung für Deutschland

Die Bedeutung der Eisen- und Stahlindustrie für die deutsche Volkswirtschaft kann durch die Zahl der Beschäftigten oder den Anteil an der gesamtwirtschaftlichen Produktion gemessen werden. Viel entscheidender sind aber die Verflechtungen der Eisen- und Stahlindustrie mit anderen Wertschöpfungsketten verschiedenster Industrien. Da Stahl einen hohen Anteil an den Vorleistungen anderer Industrien hat, können rund 55 % des produzierenden Gewerbes in Deutschland als stahlintensiv bezeichnet werden. Auf die stahlintensiven Branchen entfallen 2 von 3 Arbeitsplätzen der deutschen Industrie. (16)

Der Hauptteil des in Deutschland produzierten Rohstahls wird zu Walzstahl weiterverarbeitet. Eine Datenerhebungen des Stahlinstitutes VDEh in Abbildung 3 zeigt, dass der Walzstahl seit 2000 hauptsächlich in der Stahlumformung und der Herstellung von Metallwaren verwendet wird (16,1 Mio. t). Davon fließen rund 11,3 Mio t wiederum in andere Branchen. Die größte Menge des Walzstahles findet im Straßenfahrzeugbau Verwendung (12,2 Mio. t). (13)

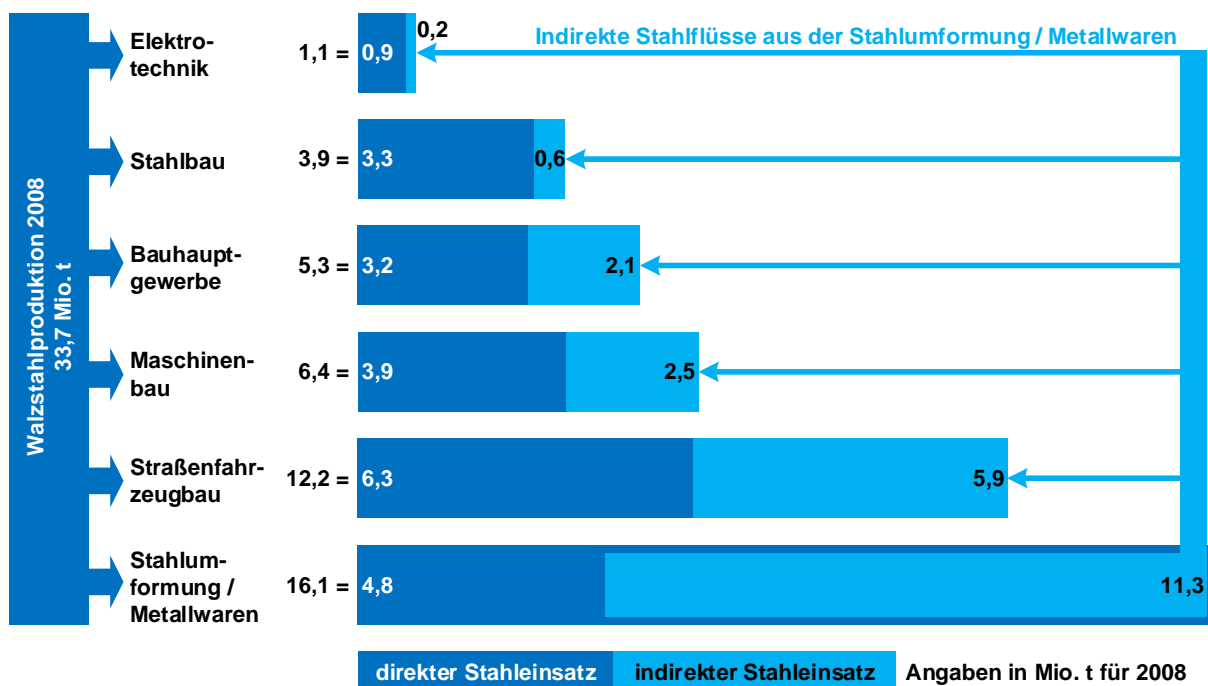


Abbildung 3: Verwendung von Walzstahl in verschiedenen Branchen im Jahr 2008 in Deutschland (13)

Eine tiefere Untersuchung zur Bedeutung der Eisen- und Stahlindustrie für Deutschland findet sich in der Studie „Die volkswirtschaftliche Bedeutung einer Grundstoffindustrie am Beispiel der Stahlindustrie“ des Rheinisch-Westfälischen Instituts für Wirtschaftsforschung (RWI) (17).

2.1.e) Die Branche international

Die Bundesrepublik Deutschland ist der größte Stahlproduzent der Europäischen Union. Weltweit ist die EU nach der Volksrepublik China der größte Stahlproduzent der Welt (12).

Wie Abbildung 4 zeigt, war 1980 der Anteil Chinas an der Weltstahlproduktion bei etwa 5 %, im Jahr 2000 bei 15 % (18). Heute liegt dieser Anteil bei fast 50 % (siehe (19)). Das starke Wirtschaftswachstum der Volksrepublik ist auf die 1987 durchgeführten Wirtschaftsreformen zurückzuführen. Die dadurch ermöglichte Marktöffnung erlaubte den chinesischen Unternehmen den Zugang zu ausländischen Technologien. (18) Abbildung 4 zeigt auch, dass China im Gegensatz zu den anderen aufgeführten Ländern im Krisenjahr 2009 keinen Einbruch der Produktion zu verzeichnen hatte.

2 Untersuchung der Eisen- und Stahlindustrie

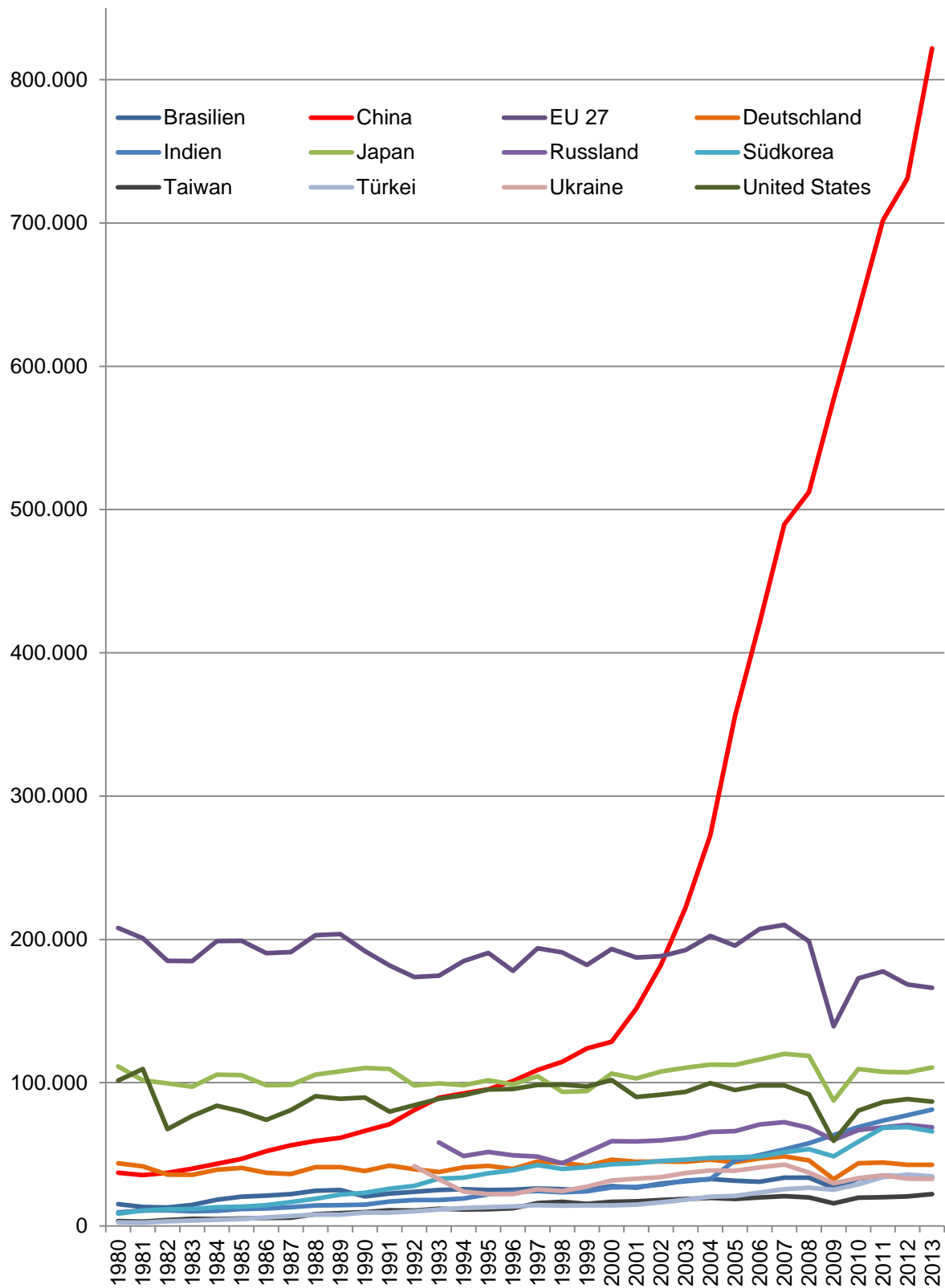


Abbildung 4: Entwicklung der Stahlproduktion weltweit (19)

Im Gegensatz zu Europa und den USA wird der Stahl in China allerdings zu 90 % primär erzeugt (20), was einen höheren Ressourcenbedarf und -verbrauch beinhaltet. Die sekundäre Stahlerzeugung konnte sich bislang in China nicht durchsetzen, da die Stromversorgung teilweise unzuverlässig und die Schrottsammlung und -verwertung nicht etabliert ist (18). In Deutschland dagegen ist die Schrottsammlung etabliert und hat wie bereits in Kapitel 2.1.a) erwähnt eine lange Tradition. Ein Beleg dafür sind auch die 41 schrottverwertenden Elektroöfen in Deutschland (Stand 2009). Nur Italien hat mit 43 Anlagen in der EU-15 (Gesamtanzahl 177) mehr als Deutschland (12).

Im Gegensatz zum größten Stahlproduzenten China hat Deutschland keine eigenen abbauwürdigen Vorkommen an Eisenerzen. Die Industrie ist daher zu 100 % von Eisenerzimporten abhängig, die hauptsächlich aus Brasilien stammen (21), siehe Abbildung 5.

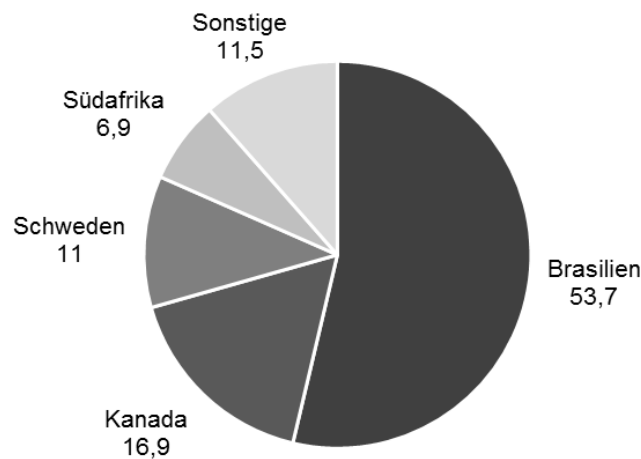


Abbildung 5: Import von Eisenerz nach Deutschland im Jahr 2008 (Gesamt 41,9 Mio. t importiertes Eisenerz), Anteil der Bezugsländer in Prozent (22)

China ist zudem mit 1,3 Mrd. t gefördertem Eisenerz im Jahr 2012 der weltweit größte Eisenerzproduzent (20). Ebenso ist die Volksrepublik auch größter Importeur. Allerdings wird so gut wie kein Eisenerz exportiert (20). In Abbildung 6 ist die Zunahme des Imports gegenüber den anderen Hauptimporteuren von Eisenerz im Vergleich der Jahre 2004 und 2012 dargestellt.

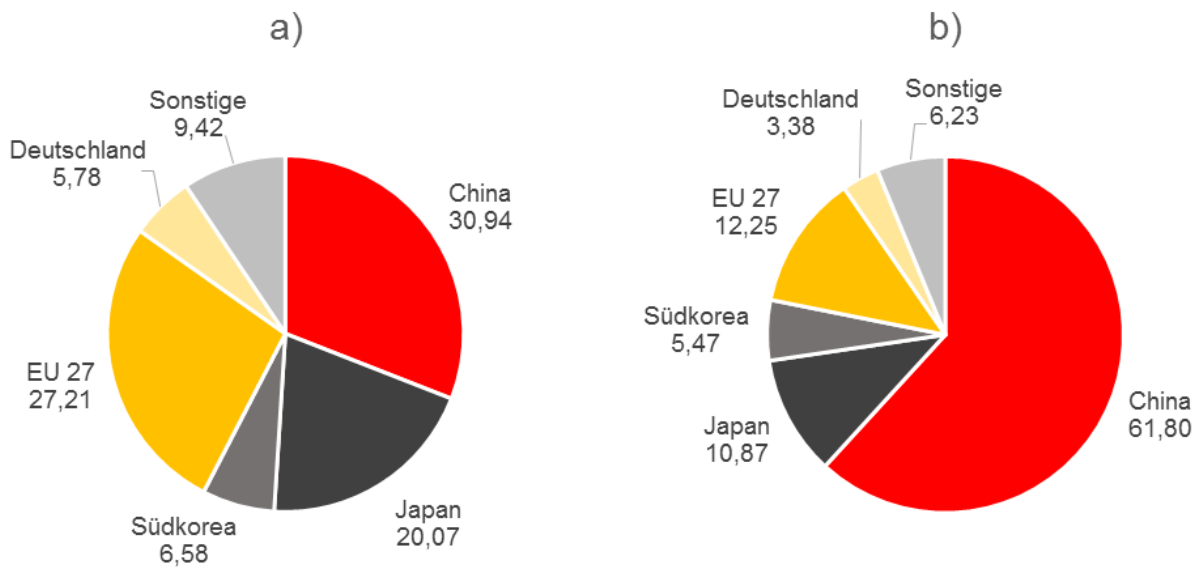


Abbildung 6: Anteil der Eisenerzimporte der weltweit größten Importeure in den Jahren 2004 (a) und 2012 (b) in Prozent (20)

Vor 1999 war die deutsche Eisen- und Stahlindustrie durch einen Vertrag mit der Ruhrkohle AG daran gebunden, ausschließlich Koks und Kohle aus Deutschland einzusetzen (22). Mittlerweile besteht für Koks eine Importabhängigkeit von 91 % (21) (Stand 2013). Der importierte Koks stammt hauptsächlich aus Australien, siehe Abbildung 7.

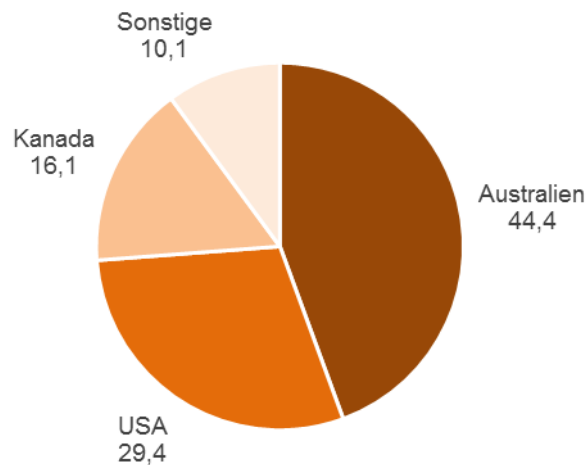


Abbildung 7: Import von Kokskohle nach Deutschland im Jahr 2012 (Gesamt 9,486 Mio. t importierter Koks), Anteil der Bezugsländer in Prozent (23)

Durch den starken Rohstoffverbraucher China und die Abhängigkeit der deutschen Eisen- und Stahlindustrie von Importen zeigt sich, wie wichtig die Schonung und das Zurückgewinnen von Rohstoffen für die deutsche Industrie ist.

2.2 Methode: Stoffstrom- und Prozesskettenanalyse

Die Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages stellte 1994 vier Grundregeln für eine nachhaltig zukunftsverträgliche Entwicklung auf. Eine dieser Regeln betrifft die Nutzung nicht-erneuerbarer Ressourcen. Die Analyse von Stoffströmen wird dabei unter anderem für diese Ressourcen als Methode vorgeschlagen. (8)

In der vorliegenden Arbeit werden die Stoffströme der Eisen- und Stahlindustrie anhand einer Stoffstromanalyse modelliert. Die Stoffstromanalyse ist der erste Schritt des Stoffstrommanagements. Die Enquete-Kommission des 12. Deutschen Bundestages definiert die Stoffstromanalyse als Instrument, das die Flüsse eines Stoffes über dessen Lebensweg quantitativ erfasst (8) (24). Allgemeiner kann die Methode auch als Analyse von Stoff- und Energieströmen innerhalb eines festgelegten Rahmens oder Systems bezeichnet werden (24).

Ein Stoff in einem Stoffstrom ist beispielsweise ein chemisches Element, eine chemische Verbindung, ein Produkt, ein Rohstoff oder ein Abfall (8). Die Stoffströme fließen dabei zwischen Prozessen oder stellen Inputs und Outputs von Prozessen dar (25).

Die Stoffstromanalyse kann verwendet werden, um Verknüpfungsmöglichkeiten mittels Stoffströmen aufzuzeigen und daraus Handlungsalternativen abzuleiten, zum Beispiel zur Verbesserung des Abfallmanagements (24). In diesem Themenbereich sind erst wenige Stoffstromanalysen zu zwischenbetrieblichen Ansätzen vorhanden (1).

Die Methode eignet sich für die vorliegende Untersuchung in besonderem Maße, da die Ziele der Methode mit der Motivation für die Arbeit übereinstimmen: Sicherung und Erhalt von Ressourcen sowie Verringerung der Abfallbelastung (25). Weiterhin dient die Methode zur präzisen Beschreibung eines Systems, dessen Komplexität dadurch reduziert und verständlich präsentiert wird (25).

In dieser Arbeit wird die Methode der Stoffstromanalyse oder auch Materialflussanalyse als Prozesskettenanalyse bezeichnet (26), da dieser Begriff vor allem für betriebsübergreifende Untersuchungen verwendet wird (27).

Prozesse wandeln Inputs in Outputs um (28) und sind als Black Box zu verstehen. Alle Abläufe innerhalb der Box werden nicht betrachtet. (29) Die Prozesse sind Teil einer Prozesskette (Abbildung 8). Für die Untersuchung wird ein Teil der Prozesskette herausgegriffen. Das dadurch betrachtete System bildet den Untersuchungsrahmen. (29) (30) Die festgelegten Systemgrenzen werden in Kapitel 2.3 erläutert.

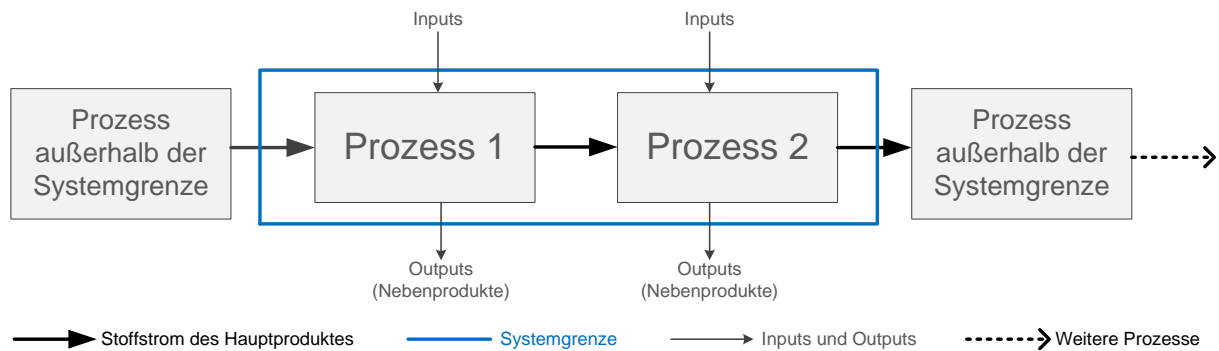


Abbildung 8: Schematische Prozesskette

Abbildung 8 zeigt eine allgemeine Prozesskette entlang des Stoffstroms des Hauptproduktes. Im vorliegenden Fall ist das Hauptprodukt Eisen bzw. Stahl, welche in den einzelnen Prozessen erzeugt sowie be- und verarbeitet werden. Wichtig für die weitere Untersuchung sind die Inputs und Outputs der einzelnen Prozesse.

2.3 Vorgehen beim Anwenden der Methode

Die Prozesskette der Eisen- und Stahlindustrie besteht aus mehreren Teilprozessen (graue Kästen Abbildung 9) (26), die die Stahlherstellung vom Erzabbau bis hin zum Ende der Nutzungsphase eines Produktes beschreiben. Für eine Stoffstromanalyse ist es wichtig, die Komplexität des betrachteten Systems zu verringern indem Einschränkungen vorgenommen werden (25). So erfolgt die Ausweisung der Stoffströme in der vorliegenden Untersuchung durch die Modellierung des ausgewählten Stoffsystems: der Grundstoffproduktion der Eisen- und Stahlindustrie mit den in Deutschland stattfindenden Prozessen. Dies zeigt Abbildung 9, welche sich an Abbildung 8 orientiert. Die Grundstoffproduktion als Systemgrenze umfasst die Teilprozesse Sintererzeugung und Roheisenerzeugung, welche in Sinteranlagen bzw. in Hochöfen stattfindet, sowie die Rohstahlproduktion, die sowohl die Stahlerzeugung in Oxygenstahlkonvertern als auch in Elektrolichtbogenöfen beinhaltet. Der letzte Teilprozess ist das Umformen. Der Erzabbau befindet sich außerhalb der Systemgrenze, da dieser nicht in Deutschland stattfindet. Außerdem liegt die Güterproduktion nicht mehr innerhalb des Systems, da hier starke Materialvermischungen vorgenommen werden.

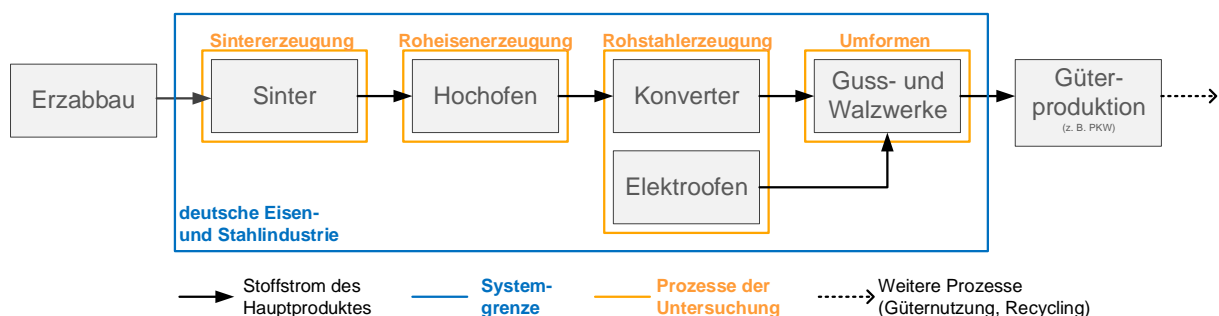


Abbildung 9: Schematischer Aufbau der Prozesskette für die Eisen- und Stahlindustrie

Eine weitere Systemgrenze wird durch die Modellierung des Systems für das Jahr 2008 gezogen. Für dieses Jahr liegen die notwendigen Daten für die Größe der Stoffströme vor. Damit kann ein realistisches Bild der Industrie erstellt werden.

Wie bereits in Kapitel 2.1.b) erwähnt gibt es noch andere Reduktionsverfahren zur Herstellung von Eisen: Direkt- und Schmelzreduktionsverfahren. Diese wurden entwickelt, um der Abhängigkeit von Koks entgegenzuwirken (22). Derzeit spielen diese aber noch eine untergeordnete Rolle in der deutschen Eisen- und Stahlindustrie und werden daher nicht einbezogen.

Nicht alle Inputs und Outputs werden in diesem Vorhaben betrachtet, sondern nur die für die Fragestellung relevanten. So werden biotische Rohstoffe und Energieströme von der Betrachtung ausgeschlossen (vgl. (5)). Außerdem werden Stoffströme, die keine Potenziale für Vernetzung und Ressourceneffizienz aufweisen, nicht involviert. Dazu gehört Wasser, das lediglich im Kühlkreislauf und nicht als Einsatzstoff verwendet wird, genauso wie Feuerfestmaterialien. Auch Dampf und Heißwinde bleiben im Rahmen der Analyse unberücksichtigt, da sie ebenso wie elektrischer Strom (Energierstrom) keinen direkten materiellen Rohstoffcharakter besitzen und nur unzureichend regional und überregional transportiert und damit vernetzt werden können. Wegen des geringen prozessbedingten Rohstoffbedarfs und dem Verbrauch nicht relevanter Rohstoffe wird die Sekundärmetallurgie nach der Rohstahlerzeugung ausgeschlossen. Ebenso wird das Gießen und Schmieden des Rohstahls als Teil der Umformung nicht einbezogen.

2.4 Ergebnis: Modell der Prozesskette für die Eisen- und Stahlindustrie

Die durchgeführte Prozesskettenanalyse für die Eisen- und Stahlindustrie zeigt Abbildung 10. Dabei sind alle Inputs und Outputs der Prozesskette von der Sintererzeugung bis hin zum Umformen aufgezeigt. Diese sogenannten Hauptprozesse sind in fett grau umrahmten Kästen dargestellt. Nebenprozesse in einfachen Kästen sind beispielsweise Verwertungsprozesse oder weisen auf andere Industrien hin, wie zum Beispiel die Bauindustrie. Der Hauptstoffstrom Eisen bzw. Stahl fließt von links nach rechts sowie die Inputs und Outputs von oben nach unten.

Die Breite der Stoffströme ist äquivalent zur jährlich verwendeten oder erzeugten Menge in Tonnen und zeigt die Verhältnisse der deutschen Eisen- und Stahlindustrie für das Jahr 2008. Beispielsweise wurden von der gesamten Eisen- und Stahlindustrie im Jahr 2008 rund 44 Millionen Tonnen Eisenerz verbraucht. Aus den daraus erzeugten rund 29 Millionen Tonnen Sinter, rund 7,3 Millionen Tonnen Stückerz und rund 13,9 Millionen Tonnen Pellets wurden rund 29 Millionen Tonnen Roheisen hergestellt. (14) Aufgrund der Datenlage oder Geheimhaltungsvorgaben mussten einige wenige Stoffströme berechnet oder mittels Annahmen abgeschätzt werden, wie zum Beispiel die Menge des anfallenden Abbeizschlammes. Die genauen Größen der Stoffströme finden sich in Anhang 2.

Wie bereits im Kapitel 2.3 zur Bestimmung der Systemgrenzen festgelegt, stellen Abbildung 10 und Abbildung 13 die Daten aus 2008 dar.

Dem Vorgehen bei einem Stoffstrommanagement folgend (25) wird das modellhafte System im folgenden Kapitel bewertet, um ein effizienteres System durch das Management der Stoffströme zu designen. Dabei wird der Ist-Zustand, der durch die Stoffstromanalyse ermittelt wurde, mit dem Soll-Zustand verglichen (8) (31). In dieser Untersuchung werden die ausgewiesenen Stoffströme auf bereits vorhandene Verknüpfungen zu anderen Prozessen und / oder anderen Prozessketten hin analysiert. Daraus können alternative Nutzungsmöglichkeiten der Ströme identifiziert werden.

2 Untersuchung der Eisen- und Stahlindustrie

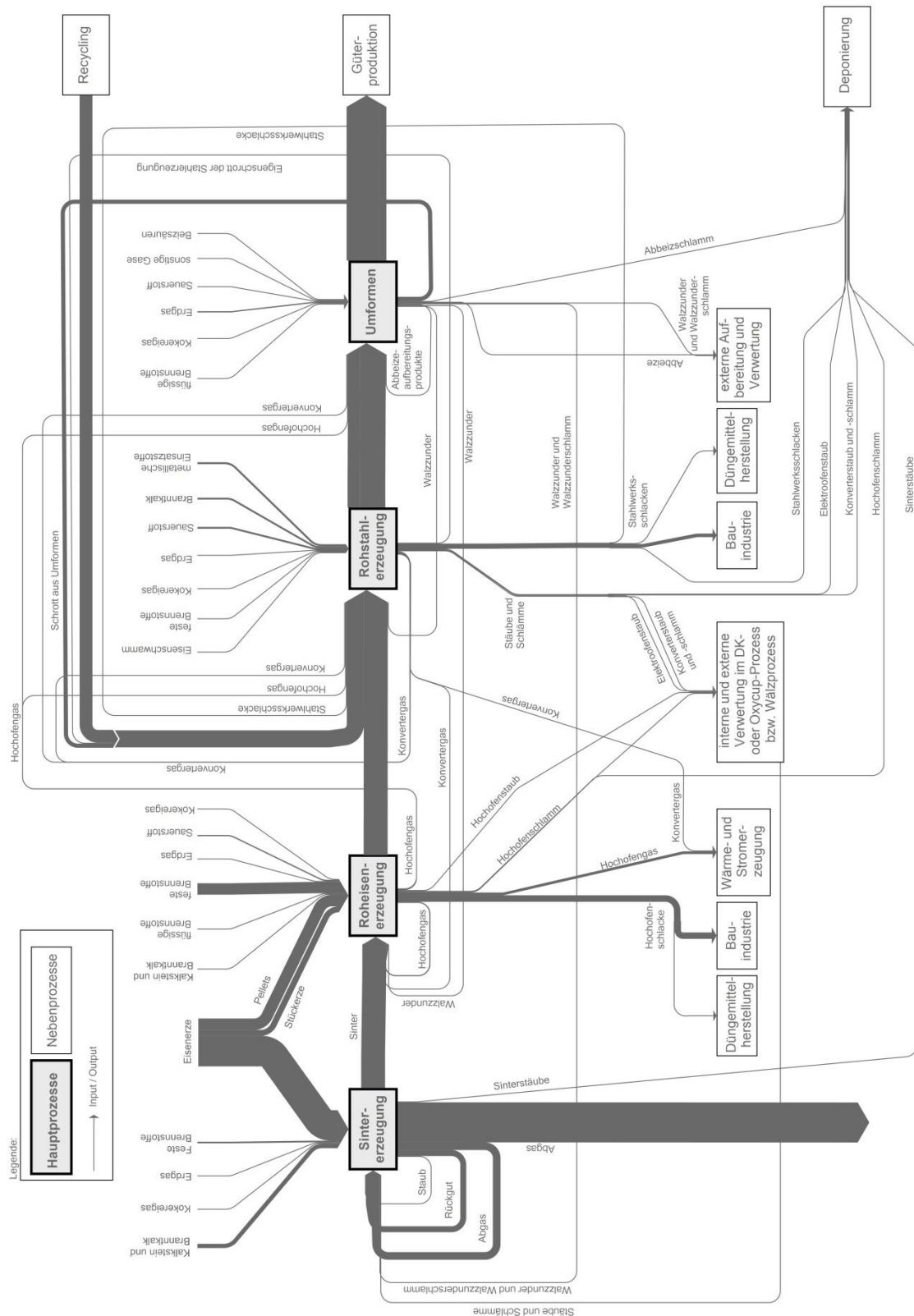


Abbildung 10: Modellierung der Stoffströme der Grundstoffproduktion der Eisen- und Stahlindustrie

3 Auswahl der Stoffströme

3.1 Einleitung

Zum Auffinden möglicher Verknüpfungsansätze der Eisen- und Stahlindustrie mit anderen Industrien werden die Stoffströme des erstellten Modells zunächst kategorisiert. Dadurch werden die Stoffströme für die anschließende Analyse ausgewählt. Einhergehend mit dem Untersuchungsziel werden im Ergebnis des Kapitels 3 ungenutzte Vernetzungs- und Verknüpfungspotenziale aufgezeigt.

3.2 Methode: Kategorisierung

Die Kategorisierung der Stoffströme orientiert sich an bestehenden Begriffen zur Beschreibung von Recyclingprozessen. Dazu wurden auch neue Begriffe definiert (vgl. Abbildung 11).

Nach dem deutschen Umweltbundesamt ist Recycling als Verwertung von Abfall zum ursprünglichen oder anderweitigen Zweck definiert (32). Im Handwörterbuch der Ökobilanzierung stellt Recycling den „Rückfluss von wiederverwertbaren Gütern und Stoffen in die Produktion derselben oder ähnlicher Güter dar“ (33).

Recycling kann vor (pre-consumer) oder nach (post-consumer) der Nutzungsphase eines Gutes stattfinden. Beim Pre-consumer-Recycling werden Rückstände aus der Produktion des Gutes recycelt. Beim Post-consumer-Recycling wird ein Gut nach der Nutzungsphase recycelt. (33)

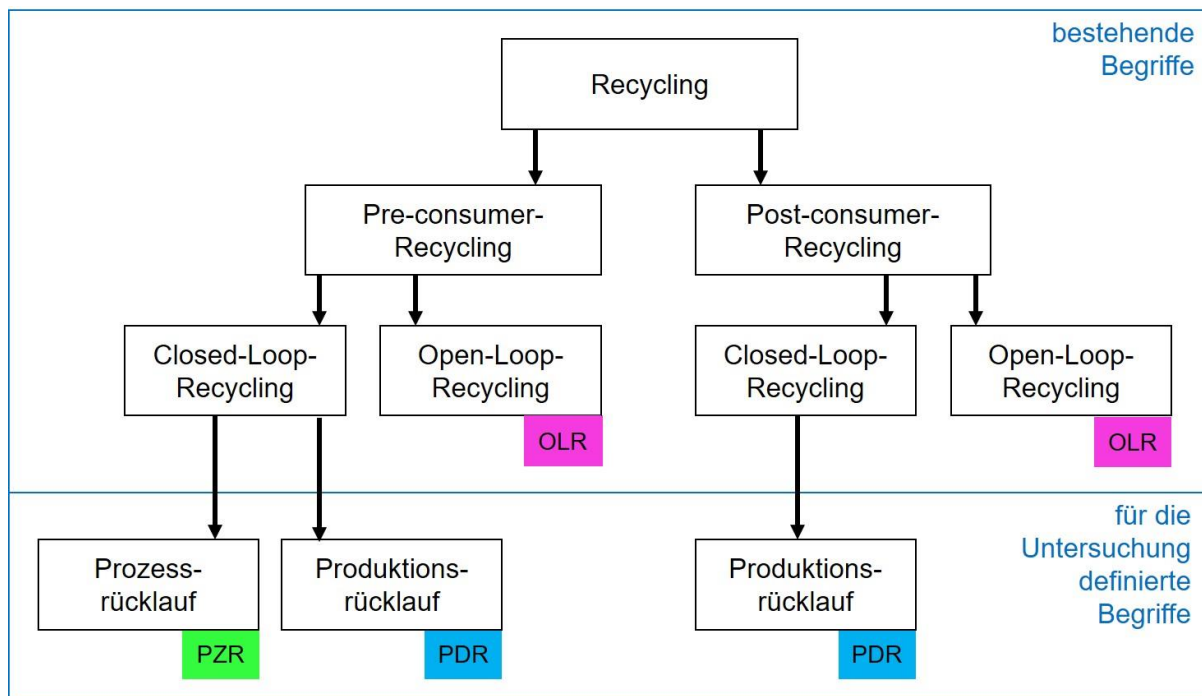


Abbildung 11: Überblick Recyclingarten

Bei beiden beschriebenen Recyclingarten kann das Recycling in einem Closed- oder einem Open-Loop stattfinden. Ein Closed-Loop-Recycling findet beim Pre-consumer-Recycling innerhalb der ursprünglichen Prozesskette statt. Rückstände, die während der Produktion anfallen, werden wieder in den Produktionsprozess eingebracht. Der Stoffstrom verlässt das Produktionssystem also nicht. Post-consumer Closed-Loop-Recycling meint das Recycling eines Gutes nach der Nutzungsphase in den ursprünglichen Herstellungsprozess, also zurück zum gleichen Produkt. (34)

Beim Open-Loop-Recycling verlässt der Stoffstrom, der während der Produktion anfällt (pre-consumer), oder das Gut am Ende der Nutzungsphase (post-consumer) das System und wird extern in einer anderen Industrie verwertet (34). Rückstände dienen in diesem Fall als Rohstoff für eine andere Industrie und nicht zur Herstellung des ursprünglichen Produktes. Ein Beispiel für Open-Loop-Recycling ist der Einsatz von Altkunststoffen als Ersatzreduktionsmittel in der Stahlindustrie (13) (35).

Darüber hinaus wurden im Falle eines Closed-Loop-Recyclings zwei weitere Recyclingarten definiert: Prozessrücklauf und Produktionsrücklauf. Bei einem Prozessrücklauf (PZR) findet das Recycling in dem gleichen Prozess statt, aus dem der Rückstand stammt. Bei einem Produktionsrücklauf (PDR) findet das Recycling in einem anderen Prozess der gleichen Prozesskette statt. Während der Produktion anfallende Rückstände können also in den Prozess, aus dem sie stammen, zurückgeführt werden (PZR) oder in einen anderen Prozess der gleichen Prozesskette (PDR). Alle beschriebenen Recyclingarten sind in Abbildung 12 nochmals an Prozessketten dargestellt.

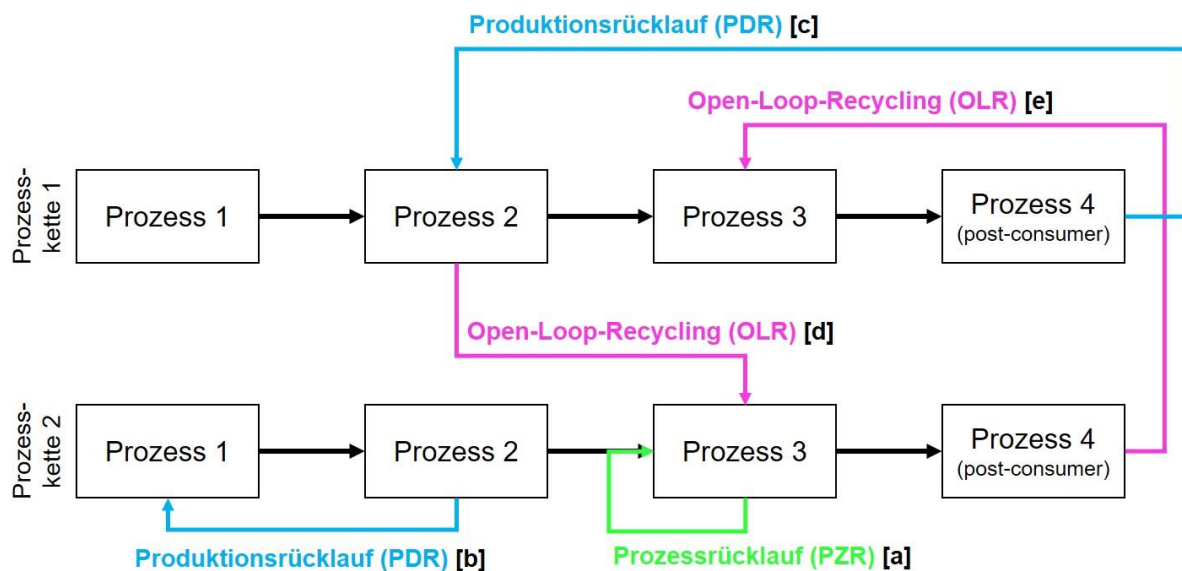


Abbildung 12: Darstellung der Recyclingarten an schematischen Prozessketten

Für die Recyclingarten in Abbildung 12 können folgende Beispiele für [a] bis [e] genannt werden:

[a] Wiedereinsatz von anfallendem Eigenschrott bei der Materialbearbeitung

[b] Verarbeitung von Rückständen aus dem Hochofen in Sinteranlagen

[c] Einsatz von Metallen aus dem Recycling von Siedlungsabfall

[d] Einsatz von zinkhaltigen Rückständen der Stahlindustrie in der Zinkindustrie

[e] Einsatz von Altkunststoffen aus dem Siedlungsabfall im Hochofen

Diejenigen Stoffströme, die nicht in eine der genannten Kategorien eingruppiert werden können, bergen das gesuchte Potenzial, um weitere Open-Loops zu schaffen und werden im Folgenden als Verknüpfungsansätze bezeichnet.

Dazu zählen die Deponierung oder andere Formen der Ablagerung, welche zu einem längerfristigen Verlust der im Stoffstrom enthaltenen Rohstoffe für die Industrie führen. Dazu zählt auch Bergversatz, obwohl dieser nach der Versatzverordnung eine Verwertung darstellt (36) (siehe Kapitel 3.4).

3.3 Modellierung der Stoffströme mit Kategorisierung

Für die Auswahl der relevanten Stoffströme, die ein Verknüpfungspotenzial aufweisen, wurde die im vorherigen Kapitel beschriebene Kategorisierung vorgenommen. Das Ergebnis zeigt Abbildung 13. Die Stoffströme sind in Tonnen bzw. Kubikmetern für Gase quantifiziert. Ihre Breite steht im Verhältnis zueinander. Die genauen Mengenangaben zur Abbildung sowie zu den weiteren Stoffflussbildern in diesem Kapitel befinden sich in Anhang 2.

Die meisten Stoffströme konnten in die Kategorien Prozess- und Produktionsrücklauf (grüne und blaue Stoffströme) eingruppiert werden. Ebenso bestehen einige Open-Loop-Recycling Strategien (magentafarbene Stoffströme), beispielsweise wenn Schlacken in der Bauindustrie verwertet werden. Rot markiert sind die Verknüpfungsansätze. Die Stoffströme in dieser Kategorie weisen eher geringe jährliche anfallende Mengen auf und werden deponiert.

3.3.a) Sintererzeugung

In Sinteranlagen werden feinkörnige Eisenerze agglomeriert und damit stückig gemacht. Durch diese Aufbereitung wird die Reduzierbarkeit der eisenhaltigen Einsatzstoffe verbessert und die anschließende Durchgasung des Hochofens durch die Beschaffenheit des Sintermaterials gewährleistet. Im Jahr 2008 wurden rund 29 Millionen Tonnen Sinter erzeugt (14).

Dem Sinter werden Zuschläge zur Einstellung der gewünschten Schlackenzusammensetzung zugegeben, die im Hochofenprozess zu einer Verringerung des Kalkeinsatzes führen (13). In Abbildung 14 ist eine Sinteranlage schematisch dargestellt.

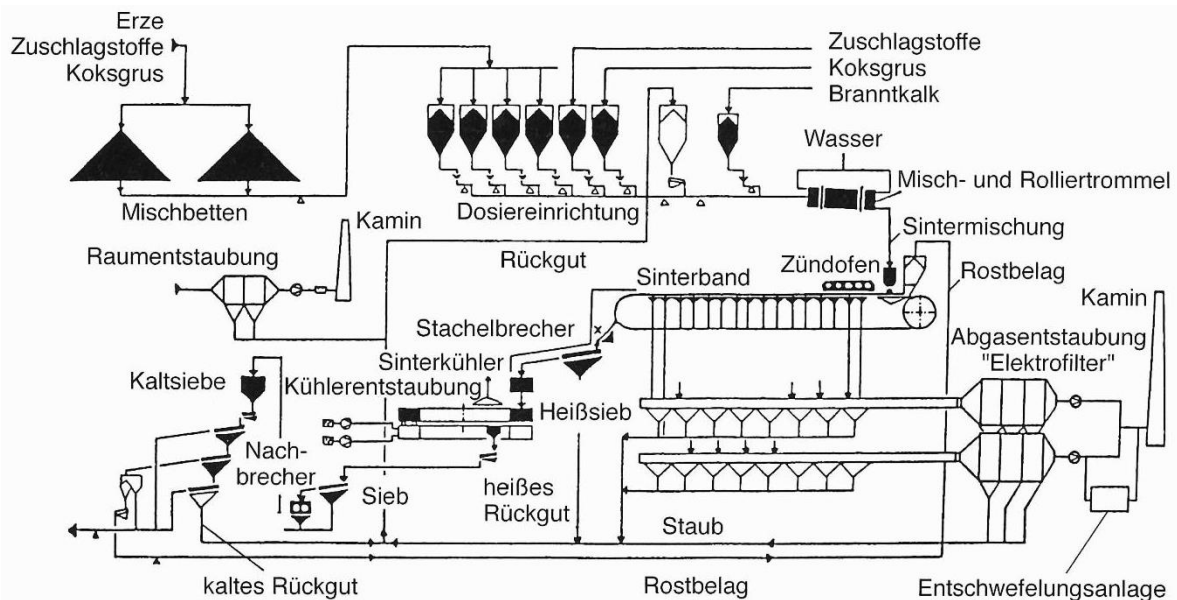
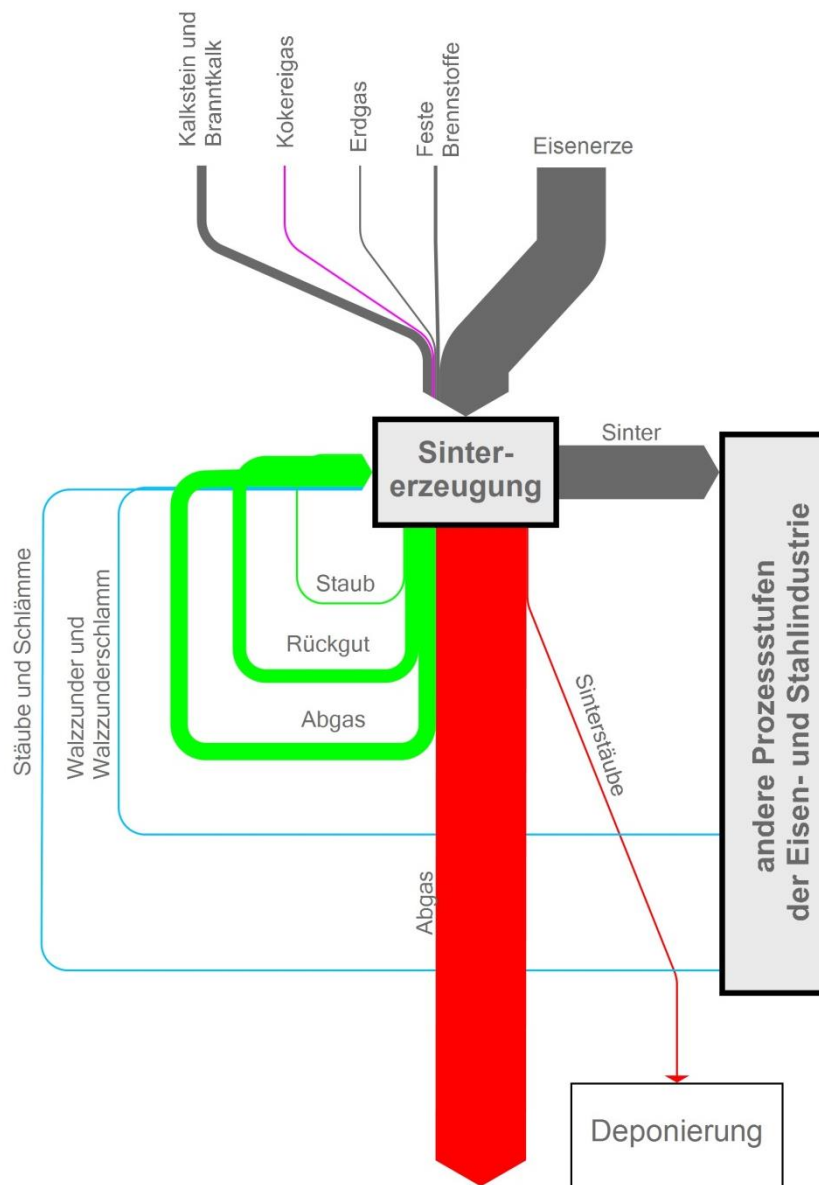


Abbildung 14: Schematische Darstellung einer Sinteranlage (11)

Abbildung 15 zeigt das Stoffstrommodell für den Teilprozess der Sintererzeugung. Die Einsatzstoffe werden auf das Sinterband gegeben und von oben gezündet. Als Zündgas wird Erdgas und auch Kokereigas eingesetzt. Diese Abgasverwertung ist ein Open-Loop-Recycling.

3 Auswahl der Stoffströme



Legende:

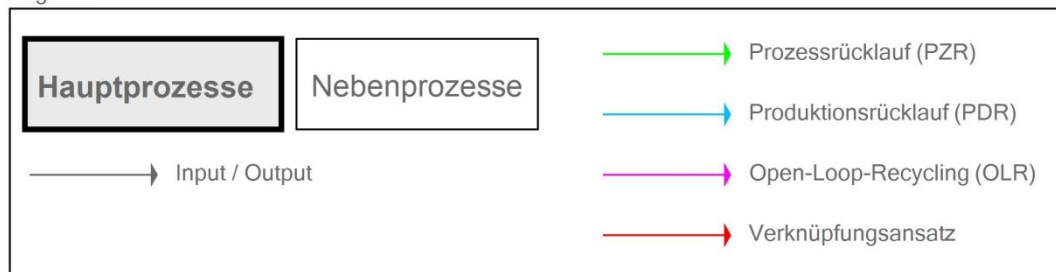


Abbildung 15: Stoffflussbild des Teilprozesses Sintererzeugung mit Kategorisierung

Beim Brechen des Sinterkuchens am Ende des Rostes fallen abgesiebte Feinanteile an, welche als Rückgut bezeichnet und wieder auf das Sinterband aufgegeben werden. Mit

diesem Prozessrücklauf werden jährlich ca. 7 Millionen Tonnen Material in den Sinter zurückgeführt.

Produktionsrückläufe bestehen auch durch den Einsatz von eisenhaltigen Rückständen des Hüttenwerkes, wie Stäube und Schlämme, Walzzunder und Walzzunderschlamm im Sinter. Mit diesen rund 400.000 Tonnen Material wird Eisen zurückgeführt. Allerdings sind Sinteranlagen für die Rückstandsverwertung limitiert, da bestimmte Stoffe in zu großen Mengen negative Auswirkungen auf die Abgase und den anschließenden Hochofenprozess haben (27). Beispielsweise kann sich das am Walzzunderschlamm anhaftende Öl entzünden und durch die starke Hitzeentwicklung Brände in der Abgasreinigung hervorrufen.

Unter dem Sinterrost wird ein Unterdruck erzeugt, der einen Luftstrom von oben nach unten durch die Sintermischung erzeugt. Das dabei entstehende Sinterabgas wird nach der Reinigung abgelassen und der Sinterstaub wird als Prozessrücklauf auf das Sinterband aufgegeben, aber auch zu geringen Teilen deponiert. Die Deponierung des Sinterstaub ist notwendig, wenn der Staub zu viele Alkalien und Schwermetalle (Blei, Zink) enthält, die sich negativ auf den anschließenden Hochofenprozess auswirken (37) (38) (vgl. Tabelle 1). Alkalien sowie Blei und Zink bilden im Hochofen Kreisläufe aus und führen zur Bildung von Ansätzen im oberen, kälteren Bereich des Hochofens. Dies beeinflusst den Betrieb des Hochofens in mehrerer Hinsicht sehr negativ, zum Beispiel wird das Herabsinken der Möllersäule gestört. (27) (37) (39) Genauere Ausführungen zur Beeinflussung des Hochofens durch Begleitelemente und entsprechend negative Auswirkungen finden sich in (39) (40) (41).

Tabelle 1: Zusammensetzung von Sinterstaub in Gew.-%

Untersuchung	Fe	Ca	Si	Pb	Zn
EU 2011 (42)	47	7,7	3,2	3	0,19
EU 1990 (43)	45			0,5	< 0,1
UN ECE 1990 (37)	35 - 56	1,2 - 14	0,6 - 8	0,04 - 10	0,05 - 0,4

Der deponierte Anteil des Sinterstaubes beträgt rund 7.000 Tonnen pro Jahr. Dies entspricht allerdings nur ca. 2 % am gesamten Sinterstaubaufkommen.

Als Verknüpfungsansatz bei der Sintererzeugung kann Sinterstaub und Sinterabgas identifiziert werden. Diese werden in Kapitel 3.5.a) weiter untersucht.

3.3.b) Roheisenerzeugung

Die Herstellung des Roheisens erfolgt in Deutschland aus importierten Eisenerzen im Hochofen, dem Hauptaggregat der Roheisenerzeugung. 2008 wurden rund 29 Millionen

3 Auswahl der Stoffströme

Tonnen Roheisen in Deutschland erzeugt. Weitere wichtige Anlagen im Hochofenprozess sind die Winderhitzer, auch Cowper genannt, zur Erzeugung des Heißwindes. Abbildung 16 zeigt einen typischen Hochofen mit Winderhitzer.

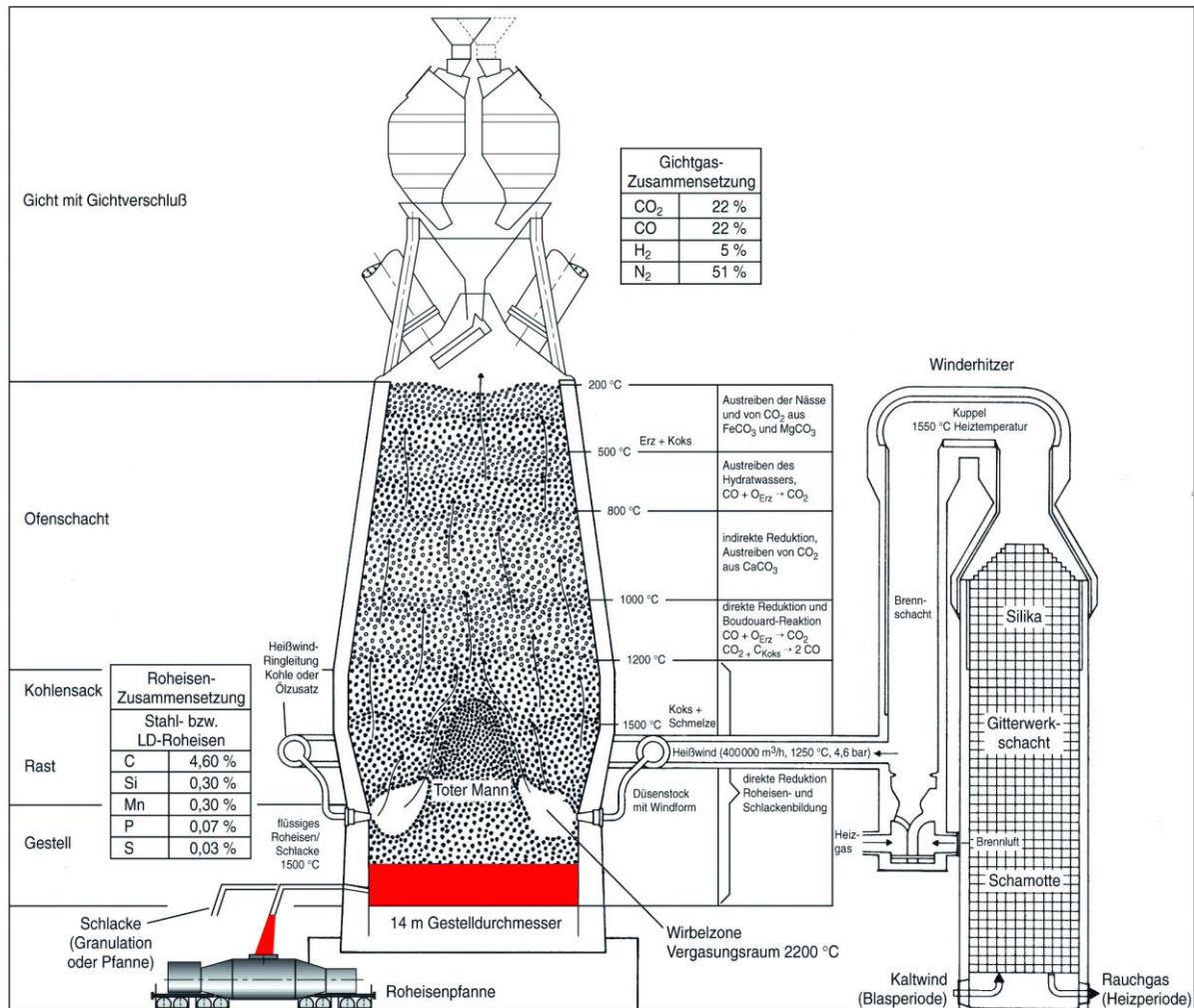


Abbildung 16: Schematische Darstellung eines Hochofens mit Winderhitzer (44)

Ein Hochofen funktioniert nach dem Gegenstromprinzip: Möllerstoffe und Koks werden abwechselnd aufgegeben und sinken nach unten, während der Heißwind von unten nach oben strömt. Der Möller setzt sich aus Eisenträgern – Stückerzen, Pellets und Sinter – sowie aus Zuschlägen zusammen. Die Möllerszusammensetzungen der Hochöfen in Deutschland finden sich in den jährlichen CO₂-Monitoring-Fortschrittsberichten des VDEh (15). Im Jahr 2008 wurden rund 14 Millionen Tonnen feste Brennstoffe wie Kohle und Koks (14) sowie rund 7,3 Millionen Tonnen Eisenerz (13) in den deutschen Hochöfen eingesetzt. Der eingesetzte Sinter entspricht der Sintererzeugung im Jahr 2008 von rund 29 Millionen Tonnen (14). Im Gegensatz dazu werden Pellets eher weniger verwendet (2008: rund 14 Millionen Tonnen) (13).

Um die Durchgasung des Hochofens zu gewährleisten werden Stückerze sowie durch Sintern oder Pelletieren aufbereitete Erze eingesetzt. Pellets sind aufbereitete Eisenerze, die

direkt am Minenstandort hergestellt werden (11) (27) (45). Auch die Eigenschaften des Kokes sind auf die Durchgasung ausgerichtet. Dieser Einsatzstoff, der als Brennstoff, Aufkohlungs- und Reduktionsmittel sowie als Stützgerüst dient, kann daher nur in geringem Umfang durch Einblaskohle substituiert werden. Bis zum Jahr 2008 wurden als Substitut beispielsweise geringe Mengen Altkunststoffe über die Blasformen in ausgewählten Hochofen eingebracht (22), was einem post-consumer Open-Loop-Recycling von Altkunststoffen entspricht. Auch Kokereigas wird in einem Open-Loop-Recycling im Hochofen verwertet: Das Gas dient dem Aufheizen des Windes in den Winderhitzern.

Produktionsrückläufe bestehen durch die Nutzung des Konvertergases aus der nachgeschalteten Rohstahlerzeugung sowie dem Walzzunder aus dem Umformen, welche im Hochofen eingesetzt werden.

Das mengenmäßig bedeutsamste Nebenprodukt des Hochofenprozesses ist die Schlacke. Die Schlackenbildung dient der Aufnahme der Gangart bzw. der unerwünschten Begleitelemente (vgl. Tabelle 2) der Erze sowie dem Abbinden von Schwefel und Alkalien aus der Kokskohle (46). Im Jahr 2008 wurden in Deutschland knapp 8 Millionen Tonnen Hochofenschlacke erzeugt (47).

3 Auswahl der Stoffströme

Tabelle 2: *Zusammensetzung von Hochofenschlacke sowie Hüttensand und Hochofenstückschlacke in Gew.-%*

Untersuchung	SiO₂	Al₂O₃	CaO	MgO	Fe_{tot}	TiO₂
Hüttensand 2009 (48)	36,1	12,6	42,5	6,9	0,3	0,5
Hüttensand 2007 (49)	36,4	11,8	39,2	8,9	0,48	0,91
Hüttensand FES 2005 (50)	42,7	8,7	31,8	10,4	0,6	0,4
Hochofen- stückschlacke 2009 (48)	36,9	10,8	38,9	8,9	0,5	1,4
Hochofen- stückschlacke FES 2005 (50)	32,4	10,3	40,2	9,9	0,54	0,7
Hochofen- schlacke (46)	37	10,5	40	9,5	0,2	1

Je nachdem wie die Schlacke abgekühlt wird, entsteht Hüttensand, Hochofenschlackschlacke oder Hochofenstückschlacke. Über 80 % der Hochofenschlacke werden als Hüttensand in der Zementindustrie eingesetzt. Zu einem geringen Teil wird Hüttensand auch im Straßenbau eingesetzt. Hochofenstückschlacke findet hauptsächlich in der Baustoffindustrie Verwendung, beispielsweise für Tragschichten oder den Gleisbau. Rund 0,1 % der in Deutschland erzeugten Hochofenschlacke wird als Hüttenkalk in der Düngemittelindustrie verwertet. (47)

Die Abgase des Hochofenprozesses verlassen den Hochofen am Ofenkopf, der Gicht, und werden daher als Gichtgas bezeichnet. Das Gas wird im integrierten Hüttenwerk als Prozessrücklauf zur Erwärmung des Windes in den Winderhitzern des Hochofens oder als Produktionsrücklauf als Brenngas im Hüttenwerk sowie zur Wärme- und Stromerzeugung genutzt (22). Jährlich werden bis zu 5 Millionen m³ Hochofengas erzeugt (14).

Die Gichtgasreinigung erfolgt zweistufig. Zunächst entsteht in der ersten Stufe im Zyklon Hochofenstaub, welcher vollständig in Sinteranlagen als Produktionsrücklauf verwertet wird. Jährlich fallen etwa 270.000 Tonnen Hochofenstaub an (51). Durch die anschließende nasse Reinigung des Hochofengases entstehen jährlich etwa 230.000 Tonnen Hochofenschlamm, der meist nicht über den Hochofen oder die Sinteranlage zurückgeführt werden kann, da dies

den Hochofenbetrieb – wie bereits im vorhergehenden Kapitel 3.3.a) erwähnt – durch die Anteile an Zink, Blei und Alkalien stört. Daher wird ein Teil extern im DK- oder OxyCup-Prozess verwertet (ca. 47 % in 2006 (52)). Dabei wird unter anderem Zink zurückgewonnen und in einem Open-Loop-Recycling in der Zinkindustrie genutzt. Allerdings wurden 53 % des 2006 in Deutschland anfallenden Hochofenschlammes deponiert (51). Dies ist notwendig wenn die Zusammensetzung des Schlammes, zum Beispiel bei einem zu geringen Zinkgehalt, keine externe Verwertung ermöglicht (53).

Abbildung 17 zeigt die Stoffflüsse der Roheisenerzeugung mit entsprechender Kategorisierung. Die Stoffströme für den produzierten Sinter und das Roheisen sind nicht quantifiziert, um die Größenverhältnisse der anderen Stoffströme besser darzustellen.

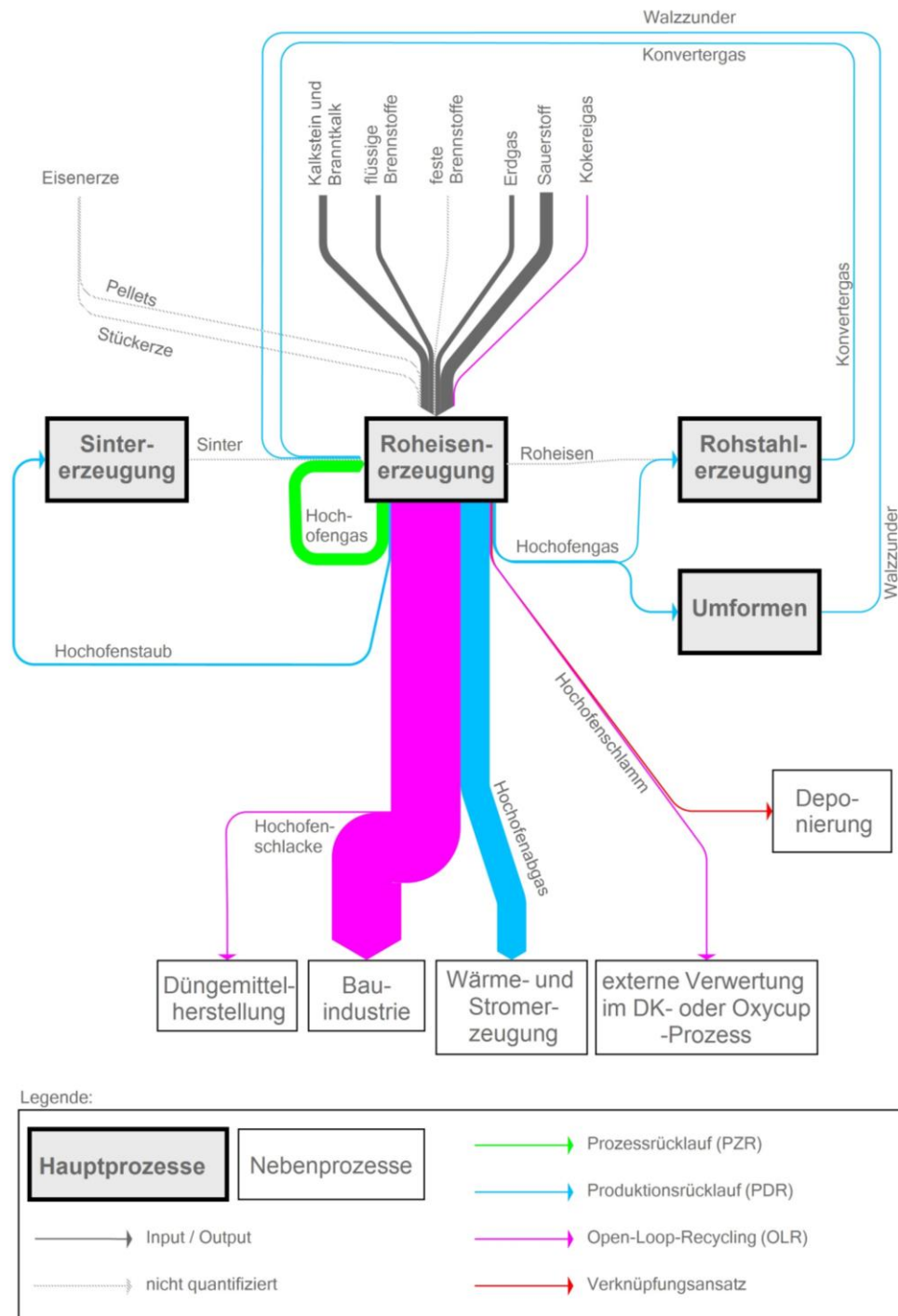


Abbildung 17: Stoffflussbild des Teilprozesses Roheisenerzeugung mit Kategorisierung

Der Stoffstrom des deponierten Hochofenschlammes ist ein weiterer Verknüpfungsansatz und wird in Kapitel 3.5.b) näher beschrieben.

3.3.c) Rohstahlerzeugung

Die Herstellung von Rohstahl erfolgt in Deutschland über zwei gängige Verfahrensrouten, die hier im Teilprozess der Rohstahlerzeugung zusammengefasst sind: Die Stahlherstellung in Oxygenstahlwerken über Konverter und die Stahlherstellung in Elektrolichtbogenöfen.

Das Konverterverfahren wird auch als Sauerstoffblasverfahren bezeichnet, da mittels einer Lanze Sauerstoff in einen Konverter eingeblasen wird (Abbildung 18). Dadurch werden Begleitelemente, wie Kohlenstoff, Silizium und Mangan aus dem Roheisen, das direkt aus dem Hochofen kommt, entfernt. Die Elemente gehen in die Schlacke sowie in das Abgas über und finden sich in den Stäuben der Abgasreinigung wieder. Dieser Oxidationsprozess im Konverter wird auch Frischen genannt. Gegen Überhitzung wird Schrott zur Kühlung in den Konverter chargiert. Schrott sowie das im Hochofen erzeugte Roheisen sind die Eisenträger des Konverterprozesses.

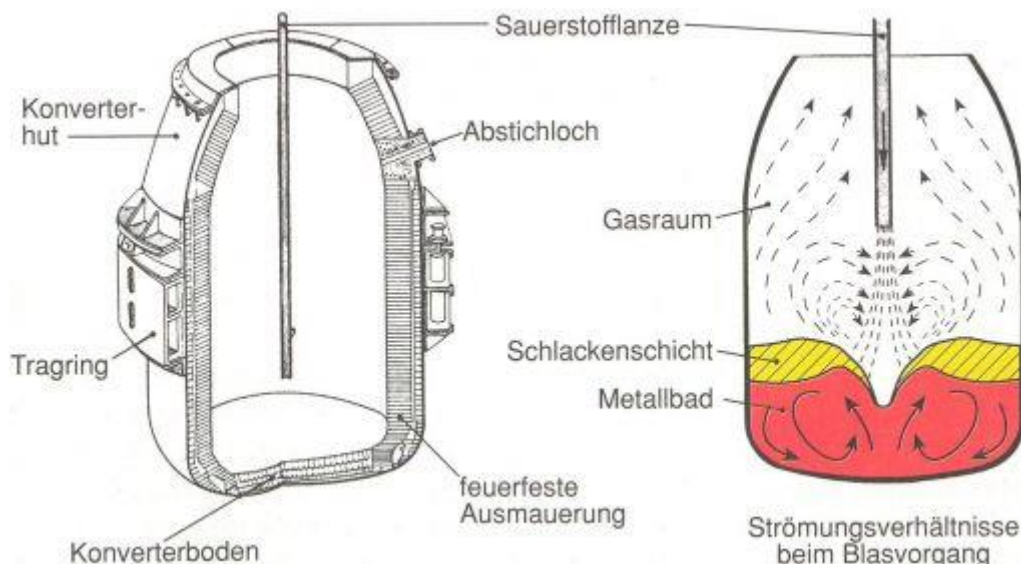


Abbildung 18: Schematische Darstellung eines Sauerstoffblaskonverters (44)

Die Stahlherstellung im Elektrolichtbogenofen basiert fast ausschließlich auf Sekundärrohstoffen. Teilweise wird auch Eisenschwamm (direkt reduziertes Eisen, DRI) verwendet. Eisenträger, Zuschläge und Kohle werden in den Ofen (Abbildung 19) chargiert und mittels eines Lichtbogens geschmolzen. Zusätzlich werden Erdgasbrenner zur Unterstützung des Schmelzvorganges eingesetzt. Auch in diesem Prozess wird gefrischt, um Begleitelemente in die Schlacke zu überführen.

In den beiden Verfahrensrouten der Rohstahlerzeugung werden jährlich über 20 Millionen Tonnen Schrotte aus dem Recycling und Eigenschrotte aus den Prozessen der Eisen- und Stahlindustrie verwertet (14).

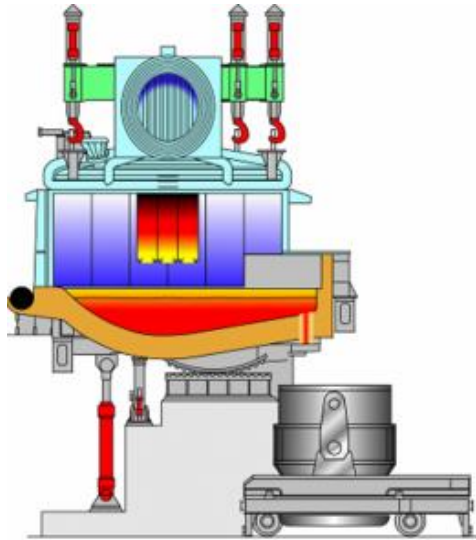


Abbildung 19: Darstellung eines Drehstrom-Lichtbogenofens (44)

Für das Stoffstrommodell mit Kategorisierung in Abbildung 20 erfolgte eine Zusammenfassung der beiden Verfahren. In der Abbildung sind die größten Stoffströme – DRI, Stahl und Schrotte – nicht quantifiziert, um die Größenverhältnisse der restlichen Stoffströme besser darstellen zu können. Zu den Einsatzstoffen der Stahlerzeugung zählen neben Eisenträgern, Brennstoffen und Zuschlägen auch Prozessrückläufe wie Eigenschrotte und Stahlwerksschlacke. Letztere ist Kalk- und Eisenlieferant für die Prozesse der Rohstahlerzeugung (47).

Ein weiterer Prozessrücklauf besteht durch die Nutzung des in Oxygenstahlkonvertern entstehenden Konvertergases, das aufgrund seines CO-Gehaltes energetisch genutzt werden kann. Ein Eisenlieferant ist außerdem der Walzzunder mit ca. 16.500 Tonnen jährlich (53), der aus dem Teilprozess Umformen in einem Produktionsrücklauf in die Rohstahlerzeugung eingebracht wird. Weitere Produktionsrückläufe bestehen durch die Nutzung von Schrotten aus dem Teilprozess Umformen sowie durch die Nutzung von Hochofenabgas (Gichtgas). Dieses Gas aus der Roheisenerzeugung wird in vielen Bereichen des Hüttenwerkes als Energielieferant genutzt, so auch in der Rohstahlerzeugung. Gleiches gilt auch für das Konverterabgas, das als Produktionsrücklauf in der Roheisenerzeugung eingesetzt wird. Die Menge der Gase aus anderen Teilprozessen, die in der Rohstahlerzeugung verwerten werden, ist statistisch geheim. Die hier für das Stoffflussbild verwendete Menge wurde auf Grundlage mehrerer Quellen berechnet, siehe Anhang 2.

Das Konverterabgas wird in mehreren Stufen gereinigt, wobei grobe und feine Fraktionen entstehen. Diese Stäube und Schlämme aus der Primärerzeugung werden zum größten Teil extern im DK-Prozess oder im OxyCup-Prozess verwertet. Die Stäube und Schlämme aus der Abgasreinigung der Sekundärerzeugung in Elektrolichtbogenöfen werden zum größten Teil im Wälzprozess verwertet (siehe Kapitel 4.4). Diese Verfahren zielen auf eine Metallrückgewinnung ab und ermöglichen somit ein Open-Loop-Recycling. Die Rückstände

3 Auswahl der Stoffströme

werden aber auch deponiert, wenn die Konzentrationen der enthaltenen Metalle für eine Rückgewinnung zu gering sind.

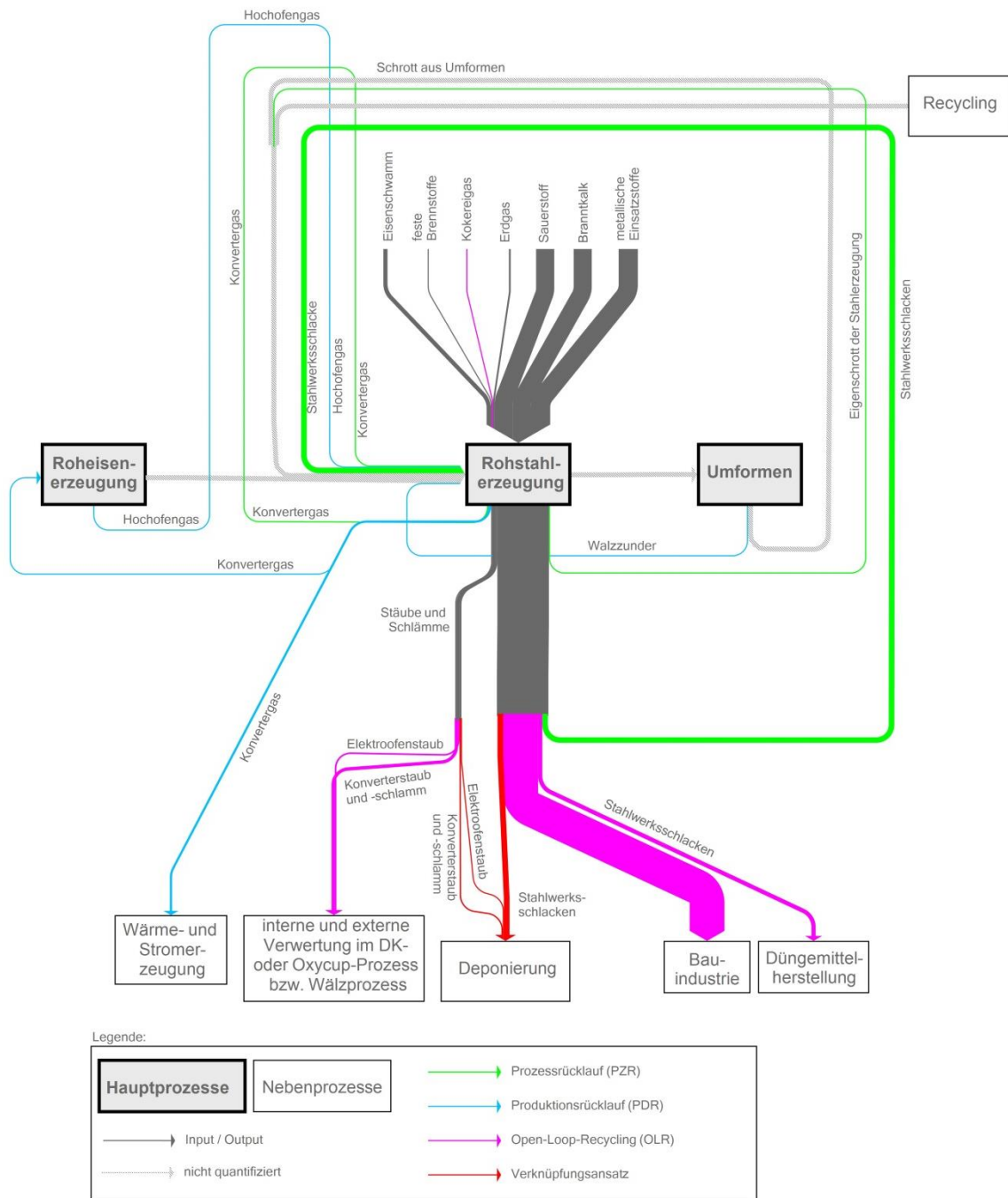


Abbildung 20: Stoffflussbild des Teilprozesses Rohstahlerzeugung mit Kategorisierung

Unter dem Begriff Stahlwerksschlacken werden die anfallenden Schlacken in Oxygen- und Elektrostahlwerken zusammengefasst. Im Jahr 2008 fielen über 6 Millionen Tonnen Stahlwerksschlacke an (54).

Die Schlacken werden größtenteils in einem Open-Loop-Recycling in der Bau- und Düngemittelindustrie verwertet. Bei ungenügender Qualität der Schlacke findet eine Deponierung statt (55). Dies ist beispielsweise der Fall, wenn die Schlacken eine zu feine Körnung aufweisen. Vor allem Schlacken aus der Edelstahlproduktion neigen zu starker Staumentwicklung. Aus diesem Grund und durch den hohen Chromgehalt sind die Verwertungs- und Anwendungsmöglichkeiten eingeschränkt (56) (57). Dies kann auch bei Elektroofenschlacken problematisch sein. Zudem werden Schlacken auch aufgrund von Überangeboten oder zu geringer Nachfrage in der Bauindustrie auf Deponien verbracht (47) (53).

Konverterschlacke wird auch als LD-Schlacke bezeichnet, da der Konverterprozess in Deutschland auf dem Linz-Donawitz-Verfahren basiert. Im Konverterprozess wird durch Einblasen von Sauerstoff kohlenstoffarmer Stahl hergestellt. Dabei oxidieren die Begleitelemente, welche sich in der Schlacke und in den Stäuben und Schlämmen der Abgasreinigung wiederfinden. Die Schlacke dient dabei vorrangig zum Aufnehmen und Abbinden von Silizium, Mangan und Phosphor (58). Die Zusammensetzung der Schlacke (Tabelle 3) sowie die der bei der Abgasreinigung entstehenden Stäube und Schlämme (Tabelle 11 in Kapitel 3.5.d)) ist unter anderem abhängig vom zugegebenen Schrott zur Kühlung des Konverters (37).

Tabelle 3: Zusammensetzung von Konverterschlacke in Gew.-%

Untersuchung	CaO	SiO ₂	Fe _{ges}	MnO, MgO	Al ₂ O ₃
Typische Bandbreiten (10)	50 - 60	14	15 - 25	6	<2
FEhS 2008 Nr. 1 (59)	44,6	22,6	17,8		3,47
FEhS 2008 Nr. 2 (59)	43,3	10,9	19,6		2,71
FEhS 2008 Nr. 3 (59)	48,0	12,9	18,2		2,04
FEhS 2009 (48)	47,7	15,5	18,8	7,3	0,9
FEhS 2012 (60)	50,3	12,6	20,6	6,6	1,6

Die Schlacke enthält in nicht unerheblichen Anteilen metallisches Eisen, welches durch Brechen teilweise zurückgewonnen und ins Stahlwerk zurückgeführt werden kann (58) (61).

Bei höheren Phosphatgehalten ist eine Verwertung der Schlacke in der Düngemittelindustrie möglich (46). Meist enthalten die Schlacken unter 3 Gew.-% P_2O_5 (10). In der Bauindustrie wird die Schlacke hauptsächlich im Straßenbau (58), aber auch für andere Anwendungen wie Wasserbausteine genutzt (46).

Die Elektroofenschlacke ist der Konverterschlacke ähnlich und kann auf den gleichen Wegen verwertet werden. Die Aufgabe der Schlacke ist die Entphosphorung und Entschwefelung der Schmelze und die Bildung der sogenannten Schaumslagge (62). Diese entsteht durch das Einblasen von pulverförmigem Kohlenstoff in die Grenzschicht zwischen Stahl und Schlacke. Es entstehen Gasbläschen aus Kohlenmonoxid. Die Schaumslagge umschließt den Lichtbogen und stabilisiert diesen. Da dadurch Wärme- und Energieverluste verringert werden sowie die Feuerfestzustellung des Ofens vor Wärmestrahlung geschützt wird, steigt auch der Wirkungsgrad des Ofens. Zusätzlich dringt weniger Lärm aus dem Ofen nach außen und die Staubentwicklung wird verringert. (10) (46) (62) Die aus dem Ofen abfließende Elektroofenschlacke besteht zumeist hauptsächlich aus Eisenoxiden (62) (63), siehe Tabelle 4.

Tabelle 4: *Zusammensetzung von Elektroofenschlacke in Gew.-%*

Untersuchung	CaO	SiO₂	Al₂O₃	MgO	Fe_{ges}	Cr₂O₃
Lech- Stahlwerke 2012 (62)	20 - 35	10 - 20	5 - 15	4 - 7	30 - 50	1 - 6
Lech- Stahlwerke 2013 (63)	20 - 25	10 - 15	5 - 10	4 - 6	25 - 35	3 - 8
FEhS 2008 Nr.1 (59)	25	23,2	6,03	3,26	30,2	
FEhS 2008 Nr.2 (59)	25,1	20,5	4,22	8,59	22,8	
FEhS 2009 (48)	23,6	11,7	8,4	4,8	26,4	
FEhS 2012 (60)	27,1	18,4	7,1	11,6	19,0	
FES 2003 Nr.1 (50)	24,3	20,7	4,8	4,2	37,5	2,4
FES 2003 Nr.2 (50)	24,2	20,5	5,9	3,4	36,8	2,2

Die Schlacke aus Elektroöfen ist aufgrund hoher Festigkeit, offener Porosität, geringen Feinanteilen und geeigneten Oberflächeneigenschaften besonders tragfähig und frostbeständig (63). So wird sie hauptsächlich im Straßen- und Wegebau eingesetzt, ist aber auch für Ziegel, Wasserbausteine, Dämmstoffe sowie als Strahlmittel geeignet (64).

Daneben existieren auch alternative Verwertungswege für die Elektroofenschlacke. Zu nennen sind hier die Forschungsprojekte FACTOR SP, SLACON, KLINKEOS und DEWEOS. Kurze Beschreibungen zu den Projekten finden sich in (65). In einem weiteren Projekt wurde die Möglichkeit untersucht mit Konverter- und Elektroofenschlacke Phosphat aus dem Ablauf der biologischen Stufe einer Kläranlage zu entfernen (60), was sich ebenfalls als alternative Verwendungsmöglichkeit anbietet. Alle genannten Alternativen führen wieder zu einem Open-Loop-Recycling der Schlacken.

Für die weitere Untersuchung wurden als Verknüpfungsansätze der Staub aus Elektroöfen (Kapitel 3.5.c)), Konverterrückstände (Kapitel 3.5.d)) und deponierte Schlackenanteile (Kapitel 3.5.e)) identifiziert.

3.3.d) Umformen

Im Teilprozess des Umformens werden die Prozesse des Stranggießens sowie der Warm- und der Kaltumformung zusammengefasst. In der Literatur wird manchmal auch das Schmieden hinzugerechnet, welches hier aber aufgrund des geringen Rohstoffverbrauchs keine Relevanz hat. Abbildung 21 zeigt die Stoffströme des Umformens mit Kategorisierung. Die Stoffströme des umgeformten Stahls sind dabei nicht quantifiziert, um die Größenverhältnisse der restlichen Stoffströme zu verdeutlichen.

Die Öfen der Warmumformung werden mit Erdgas, Erdöl und Kokereigas beheizt (10). Die Nutzung des Kokereigas mit jährlich 400.000 m³ (14) entspricht hier einem Open-Loop-Recycling. Aber auch Produktionsrückläufe wie Hochofen- und Konvertergas aus dem Hüttenwerk werden genutzt. 2008 wurden über 200.000 m³ Hochofengas und 70.000 m³ Konvertergas in der Prozessstufe Umformen verwertet (14). Dagegen betrug der Verbrauch von Erdgas rund 1,5 Millionen m³ (14).

Die sich bildende Oxidschicht auf dem Stahl, der Zunder, wird mit Hilfe von Wasser entfernt und anschließend als Produktionsrücklauf in den Teilprozessen der Sinter-, Roheisen- und Rohstahlerzeugung verwertet oder in einem Open-Loop-Recycling in der Zementindustrie genutzt (53). Vor dem Einsatz im Sinter wird der Walzzunderschlamm entölt, wenn der Ölanteil über 0,3 % liegt, da das Öl Brände in den Elektrofiltern der Sinterabgasentstaubung verursachen kann. (38) Durch den Produktionsrücklauf des Zunders wird das in hohem Prozentsatz enthaltene Eisen (vgl. Tabelle 5) zurückgeführt. Ebenso werden die anfallenden Schrotte des Umformens aus dem Stranggießen und dem Warmwalzen als Produktionsrücklauf in die Rohstahlerzeugung gegeben (37).

Tabelle 5: *Zusammensetzung verschiedener Zunder in Gew.-% (38)*

Untersuchung	Fe_{ges}	SiO₂	Al₂O₃	CaO	MgO
Zunder des Stranggießens	70	1	0,3	0,8	0,1
Walzzunder des Warmwalzens	70	2,6	0,5	3,4	0,3

Bei der Warmumformung werden Flach- und Langprodukte hergestellt. Warmband-Flachprodukte werden entweder als fertige Stahlprodukte zum Beispiel für den Fahrzeugbau genutzt oder in der Kaltumformung weiterverarbeitet. (10)

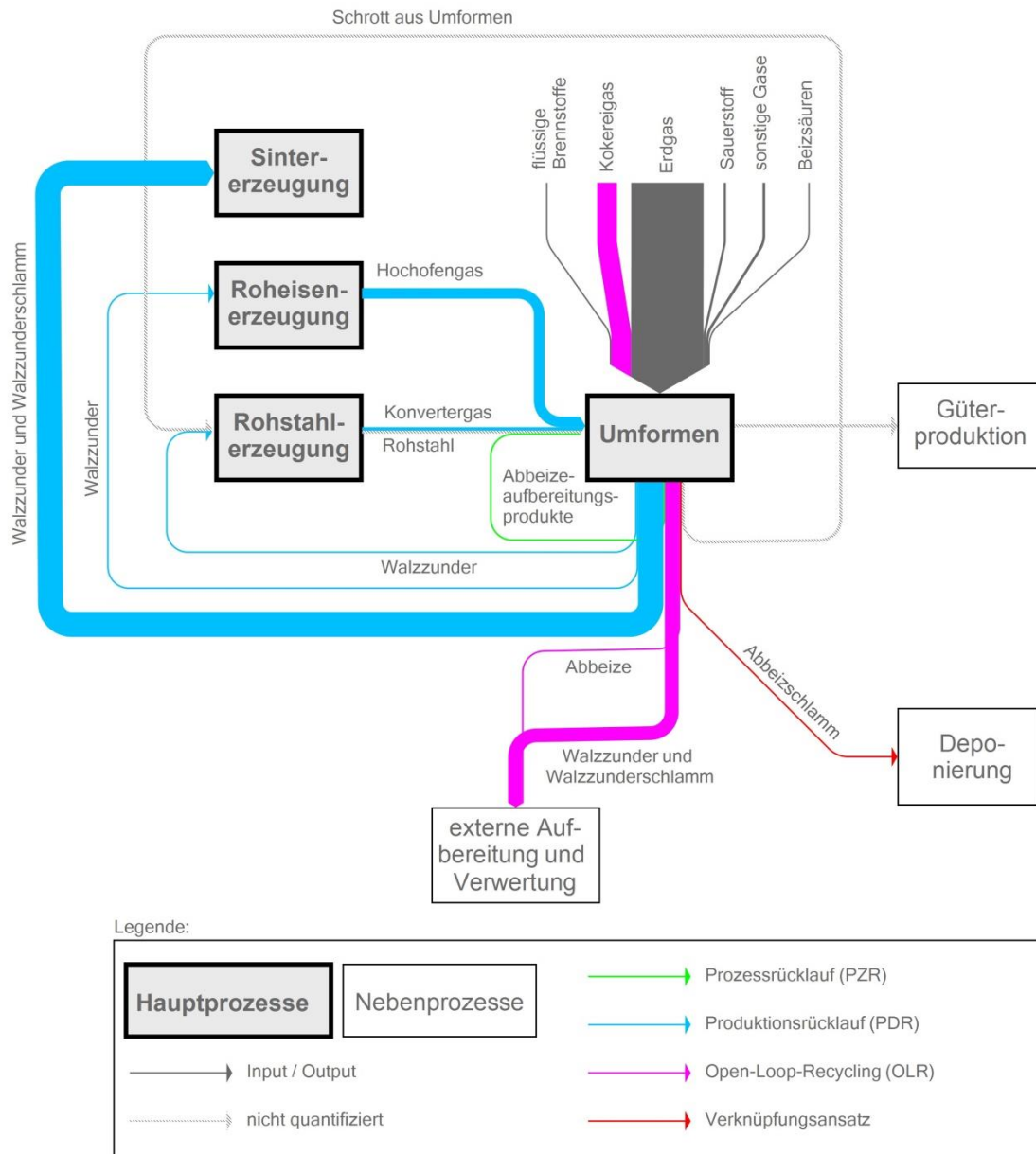


Abbildung 21: Stoffflussbild des Teilprozesses Umformen mit Kategorisierung

Kaltband wird vor allem für Fahrzeuge, Haushaltsgeräte und Verpackungen sowie im Bauwesen genutzt. Bei der Kaltumformung wird der Zunder durch Beizen mit Schwefel- oder Salzsäure entfernt. (10) Die entstehende Abbeize wird zumeist neutralisiert und intern oder extern aufbereitet. Aufbereitungsprodukte wie Säuren können je nach Aufbereitungsverfahren teilweise oder vollständig als Prozessrücklauf zurückgeführt werden. Der entstehende Abbeizschlamm wird allerdings deponiert. (66) (67) (68) Dieser ist auch der Verknüpfungsansatz, der beim Teilprozess des Umformens identifiziert wurde (Kapitel 3.5.f).

3.4 Exkurs: Rechtliche Grundlagen zur Verwertung

Der Umgang mit anfallenden Rückständen hängt nicht nur vom Vorhandensein von Verwertungstechnologien ab, sondern auch von den rechtlichen Grundlagen, die bestimmte Verwertungs- oder Beseitigungswege begünstigen oder einschränken. Daher werden in diesem Exkurs-Kapitel basierend auf den Veröffentlichungen des Umweltbundesamtes (69) kurz die wichtigsten rechtlichen Regelungen zusammengetragen, die die Rückstände der Eisen- und Stahlindustrie tangieren. Dazu gehört das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) mit den entsprechenden Rechtsverordnungen.

„Das Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen“ oder kurz Kreislaufwirtschaftsgesetz ist die Umsetzung der EU-Abfallrahmenrichtlinie in deutsches Recht. Der „Zweck des Gesetzes ist es, die Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen zu fördern und den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen sicherzustellen“ (6).

Nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz sind nicht alle Prozessoutputs als Abfälle zu bezeichnen. Abfall ist jede bewegliche Sache, deren sich der Besitzer entledigen will oder muss. (6) Können Abfälle weiter verwendet werden, sind sie neben dem Hauptprodukt weitere Produkte. Daher werden solche Abfälle als Nebenprodukte bezeichnet (6) (70). Nebenprodukte sind definiert als unbeabsichtigte Prozessoutputs, die neben dem Hauptprodukt anfallen und anschließend verwendet werden (33) (70). Das Hauptprodukt ist dagegen der beabsichtigte Prozessoutput, welches den Hauptnutzen stiftet, hier Eisen und Stahl (33). In dieser Arbeit werden Abfälle und Nebenprodukte zusammen unter dem Begriff Rückstände behandelt (wie auch in (33)), womit jegliche Outputs von Produktionsprozessen gemeint sind.

Wie von der EU-Richtlinie vorgegeben, beinhaltet das Kreislaufwirtschaftsgesetz die fünfstufige Abfallhierarchie (Abbildung 22).

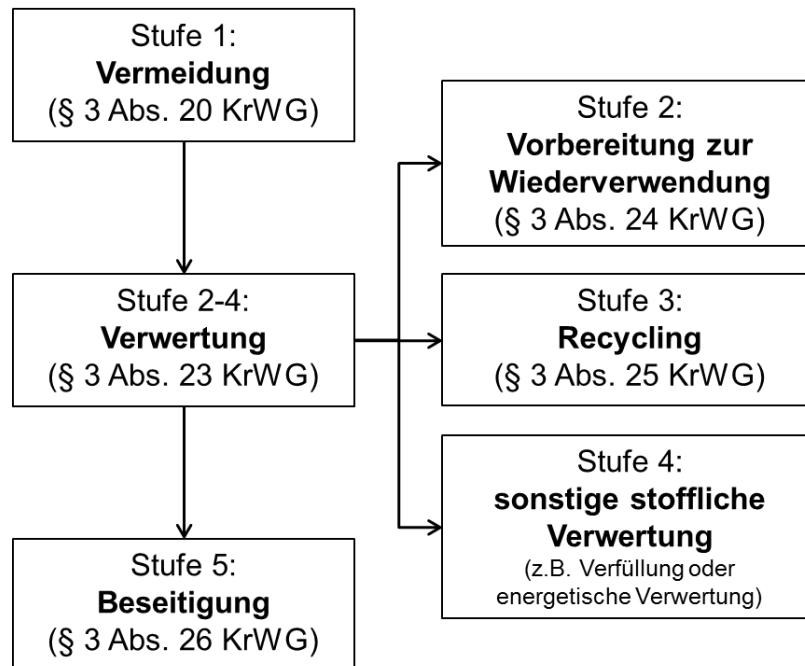


Abbildung 22: Die fünfstufige Abfallhierarchie nach Artikel 4 der europäischen Abfallrichtlinie 2008/98/EG (70) (71)

Im Kreislaufwirtschaftsgesetz ist diese Hierarchie in § 6 KrWG verankert (6):

1. Vermeidung,
2. Vorbereitung zur Wiederverwendung,
3. Recycling,
4. sonstige Verwertung, insbesondere energetische Verwertung und Verfüllung, Beseitigung

In § 7 und § 8 KrWG wird die Hierarchie durch die „Grundpflichten der Kreislaufwirtschaft“ und die „Rangfolge und Hochwertigkeit der Verwertungsmaßnahmen“ konkretisiert. Demnach soll die Maßnahme zur Abfallbewirtschaftung ausgewählt werden, die „den Schutz von Mensch und Umwelt“ nach dem „Vorsorge- und Nachhaltigkeitsprinzip am besten gewährleistet“ (6).

Das Gesetz wird außerdem durch Rechtsverordnungen konkretisiert. Für die Rückstände der Eisen- und Stahlindustrie sind die Deponieverordnung, die Versatzverordnung und die Industrieemissionsrichtlinie von Bedeutung.

Die Deponie- und die Versatzverordnung (DepV und VersatzV) regeln die Ablagerung u. a. von Rückständen der Eisen- und Stahlindustrie über und unter Tage. Die Deponieverordnung nennt beispielsweise die Voraussetzungen zur Ablagerung von Abfällen in Teil 2, § 6 und zum Einsatz als Deponieersatzbaustoff in Teil 3 (72). Hierbei geht es aber vorrangig um die Gefährlichkeit der Abfälle. In der Versatzverordnung ist die Verwertungsmöglichkeit für Rückstände als Bergversatz geregelt. Dabei dienen die Rückstände als Verfüllmaterial von untertägigen Gruben. Da die Rückstände dabei einen Zweck erfüllen, wird diese Art der Ablagerung als Verwertung und nicht als Deponierung

eingestuft. Interessant ist in diesem Zusammenhang § 3 der VersatzV, der regelt, dass die Rückgewinnung von Metallen Vorrang vor dem Versatz hat:

„Abfälle, welche die in Anlage 1 aufgeführten Metallgehalte erreichen, dürfen weder zur Herstellung von Versatzmaterial noch unmittelbar als Versatzmaterial eingesetzt werden, wenn 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.“ (36)

Die folgende Tabelle 6 zeigt die Grenzwerte für „Metalle im Abfall“ in g pro kg und in Prozent.

Tabelle 6: Grenzwertkonzentrationen der Versatzverordnung, Anlage 1 (36)

Metall	Grenzwertkonzentration	
	in g / kg	in %
Zink	≥100	10
Blei	≥ 100	10
Kupfer	≥10	1
Zinn	≥ 15	1,5
Chrom	≥ 150	15
Nickel	≥ 25	2,5
Eisen	≥ 500	50

Des Weiteren ist die Industrieemissionsrichtlinie für die Verwertung von Rückständen der Eisen- und Stahlindustrie relevant. Diese „Richtlinie 2010/75/EU des europäischen Parlamentes und des Rates vom 24. November 2010 über die Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung)“ (73) bestimmt, dass bei der Genehmigung von Industrieanlagen die besten verfügbaren Techniken (BVT) angewendet werden müssen. Für die Eisen- und Stahlindustrie sind die BVT in den BVT-Merkblättern des Umweltbundesamtes (74) zu finden. Genannt sind in diesem Dokument beispielsweise der DK- und der OxyCup-Prozess als beste verfügbare Techniken zur Verwertung von eisenhaltigen Rückständen (74). Auch die BVT-Merkblätter der Nichteisenindustrie (75) sind hier relevant, da diese herangezogen werden, sobald nicht vorrangig Eisen zurückgewonnen werden soll.

3.5 Ergebnis: Identifizierte Verknüpfungsansätze

In diesem Kapitel werden die als Verknüpfungsansätze identifizierten Stoffströme näher erläutert. Eine Übersicht der Verknüpfungsansätze findet sich in Tabelle 7.

Tabelle 7: Zusammenfassung der identifizierten Verknüpfungsansätze mit Einschätzung der Verwertungspotenziale

Identifizierter Stoffstrom	bisheriger Nutzungsgrad	Potenzial zur Verwertung innerhalb der Prozesskette	Potenzial zur Verwertung außerhalb der Prozesskette (OLR)
Sinterstaub	hoch	hoch	gering
Sinterabgas	gering	hoch	gering
Hochofenschlamm	mittel	gering	hoch
Konverterrückstände	hoch	gering	hoch
EAF-Staub	hoch	mittel	hoch
Stahlwerkschlacken	hoch	gering	hoch
Abbeizschlamm	keiner	gering	hoch

In der Tabelle wurden Einschätzungen vorgenommen, wie hoch das Potenzial ist, den betreffenden Stoffstrom innerhalb oder außerhalb der Prozesskette der Eisen- und Stahlindustrie zu verwerten. Das Potenzial zur Verwertung innerhalb der Kette ist hoch, wenn es Möglichkeiten gibt, den Stoffstrom als Prozess- oder Produktionsrücklauf zu verwerten. Das Potenzial zur Verwertung außerhalb der Kette ist hoch, wenn Möglichkeiten für ein Open-Loop-Recycling bestehen.

Die Verwertung von Sinterstaub ist bereits sehr umfassend. Nur ein Anteil von 2 % wird noch deponiert. Zudem ist die Rückführung in die Sinteranlage möglich. Die Verwertungsmöglichkeiten außerhalb der Prozesskette sind eher gering, daher wird der Rückstand nicht weiter betrachtet.

Nur ein kleiner Teil des Sinterabgases wird bisher genutzt, obwohl es einsprechende Verfahren gibt (siehe Kapitel 3.5.a)). Bei wenigen Sinteranlagen in Deutschland ist eine Abgasrückführung implementiert. Da sich solche Anlagen mehr etablieren könnten, ist das Potenzial zur Verwertung des Abgases innerhalb der Prozesskette hoch. Die Nutzung außerhalb der Kette wäre beispielsweise eine Verwertung des im Abgas enthaltenen Kohlenstoffdioxids. Da es dafür bisher nur eine Pilotanlage des Unternehmens Bayer

MaterialScience gibt, ist das Potenzial zur Verwertung außerhalb der Prozesskette mit gering bewertet. Das Sinterabgas ist daher nicht für die weitere Analyse relevant. Zum Verständnis der aktuellen Verwertungsmöglichkeiten erfolgt im nächsten Unterkapitel 3.5.a) eine kurze Erläuterung.

Etwa die Hälfte des in Deutschland anfallenden Hochofenschlamm wird deponiert. Es liegt daher ein mittlerer Nutzungsgrad vor. Die Möglichkeiten, den Schlamm innerhalb der Kette zu verwerten sind gering, da die hohen Schwermetallgehalte eine Verwertung in den Sinteranlagen stören. Das Potenzial zur Verwertung außerhalb der Kette hoch, da die im Schlamm enthaltenen Metalle zurückgewonnen und in einem Open-Loop recycelt werden können. Gleiches gilt für Stäube und Schlämme aus dem Konverter.

Von den in Deutschland anfallenden EAF-Stäuben wird der Großteil extern verwertet. Es besteht aber auch die Möglichkeit den Zinkanteil durch Rückführung in den Ofen zu erhöhen und so die notwendige Zinkkonzentration zur Rückgewinnung in einem Open-Loop-Recycling zu erreichen. Die Rückführung in andere Teilprozesse der Prozesskette der Eisen- und Stahlerzeugung ist schwierig, da EAF-Stäube zu viele Nichteisen-Metalle enthalten.

Deponierte Stahlwerksschlacken könnten ebenso wie verwertete Schlacken in der Bauindustrie genutzt werden. Damit besteht ein hohes externes Verwertungspotenzial. Gleiches gilt für den Abbeizschlamm. Dieser wird derzeit nicht genutzt sondern deponiert. Durch die Rückgewinnung der enthaltenen Metalle könnte aber ein Open-Loop geschaffen werden. Das Potenzial zur Verwertung innerhalb der Prozesskette ist gering, da der Rückstand zu viele störende Begleitelemente enthält.

3.5.a) Sinterabgas

Das Abgas aus Sinteranlagen entsteht durch Kohlenstoffverbrennung und Kalzinierung. Es setzt sich aus Stoffen zusammen, die aus den Einsatzstoffen der Sinteranlage ausgetrieben werden. Die in der Sinteranlage verwerteten Kreislaufstoffe des Stahlwerks haben folglich Einfluss auf die Zusammensetzung des Abgases (76) und auch auf die Abgasreinigung. Beispielsweise vermindert ein hoher Eintrag von Alkalichloriden die Leistung der Abgasreinigung (77).

Die Größe des Abgasstromes einer Sinteranlage ist nur mit größerem Messaufwand zu ermitteln, da die Menge durch das Starten und Anhalten der Sinteranlage stark schwankt. Beim Anfahren und Anhalten der Anlage sind die Emissionen höher als während des stabilen Prozesses (78). Der Prozessrücklauf des Abgases kann aus den bestehenden Sinteranlagen in Deutschland mit Abgasrückführung errechnet werden.

Sinterabgasrückführungen wurden entwickelt, um die Abgasmenge zu reduzieren und so den Aufwand der Abgasreinigung sowie die Schadstofffracht zu verringern. Zudem ergibt sich eine Brennstoffersparnis für den Sinterprozess (37). Derzeit existieren drei gängige Verfahren zum Abgas-Recycling: EOS, LEEP und EPOSint.

Das Emission Optimized Sintering (EOS) Verfahren wurde von der Lurgi Metallurgie GmbH in Deutschland entwickelt und wird derzeit in den Niederlanden angewendet. Bei diesem Verfahren wird das entstehende Sinterabgas über die gesamte Länge des Sinterbandes

abgenommen (77) (79). Nach Literaturangaben beträgt die zurückgeführte Menge 40 - 50 % der gesamten Abgasmenge (80) und die Brennstoffersparnis bei ca. 20 % (80).

Die Hüttenwerke Krupp Mannesmann in Deutschland entwickelten und betreiben den Low Emission and Energy optimized Sintering Process (LEEP) mit dem vorrangigen Ziel Dioxine und Furane zurückzuführen, welche dadurch im Sinter unschädlich gemacht werden, sowie den Energieverbrauch zu senken (81). Die Abnahme des Abgases erfolgt im hinteren Teil des Sinterbandes. (79) Die Brennstoffersparnis liegt nach Literaturangaben bei mindestens 10 % (82).

In Österreich wurde das Verfahren EPOSint (Environmentally Process Optimized Sintering) bei der voestalpin Stahl GmbH in Linz entwickelt und heute noch angewendet. Beim EPOSint-Verfahren wird das Abgas über die Länge des Sinterbandes im dritten Viertel entnommen, wo die Schadstoffanteile des Abgases am höchsten sind (82). Auch die heißen Abgase aus dem Sinterkühler werden zur Sauerstoffversorgung in den Sinterprozess eingebracht (45).

Die nachfolgende Tabelle 8 vergleicht die genannten Arten des Abgasrecyclings anhand verschiedener Kennwerte, die mithilfe einer Simulation berechnet wurden.

Tabelle 8: Vergleich von EOS, LEEP, EPOSint (79) (80) (82)

	Zurückgeführte Abgasmenge (%)	Brennstoffersparnis (kg/t Sinter)	Produktivität im Verhältnis zum konventionellen Sintern (%)
EOS	40 - 50	10,3 - 20	93,4 - 96,6
LEEP	43,7 - 48,4	10 - 14,5	95,7 - 97,2
EPOSint	27,1 - 46,7	11,3 - 17,2	91,5 - 96,4

Das Ergebnis der Untersuchung in (79) stellte heraus, dass keines der verglichenen Verfahren einen wesentlichen Vorteil gegenüber den anderen Verfahren besitzt.

Eine weitere zukünftige Möglichkeit, das Sinterabgas zu nutzen, besteht durch die Anwendung von CCS-Technologien. Beim sogenannten Carbon Capture and Storage (CCS) wird CO₂ aus dem Abgas entfernt und gespeichert. Anschließend können aus dem CO₂ beispielsweise Kunststoffe hergestellt werden (Pilotanlage der Bayer AG). Mit einer neu entwickelten Anlage des Unternehmens können aus CO₂ Kunststoffe hergestellt werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Produktion von Methanol aus CO₂ und Wasserstoff. (83) In beiden Fällen könnte das Abgas in einem Open-Loop recycelt werden.

Da die genannten Technologien zur stofflichen Nutzung des Abgases noch nicht in größerem Maßstab angewendet werden und damit schwer zu vergleichen sind, wird Sinterabgas im Weiteren nicht betrachtet.

3.5.b) Hochofenschlamm

Hochofenschlamm entsteht bei der nassen Reinigung des Hochofengases, nachdem der Hochofenstaub abgeschieden wurde. Der Schlamm enthält den feinkörnigen Anteil des Hochofenstaubes und ist stärker mit Schwermetallen wie Zink und Blei angereichert als Hochofenstaub (vgl. Tabelle 9). Durch die enthaltenen Schwermetalle und Alkalien kann Hochofenschlamm nicht in Sinteranlagen verwertet werden (38). Die Gründe dafür wurden bereits in Kapitel 3.3.a) genannt. Außerdem ist die Verwertung des Hochofenschlammes aufgrund seiner geringen Radioaktivität beschränkt (siehe Gesetzgebung zum Strahlenschutz).

Tabelle 9: Zusammensetzung von Hochofenschlamm (BF-Schlamm) und Hochofenstaub (BF-Staub) im Vergleich, Angaben in Gew.-%

Untersuchung	Fe_{ges}	C_{ges}	Zn	Pb
BF-Schlamm 2011 (42)	20	29	5,2	1,3
BF-Schlamm VDEh 2001 (38)	27	42	0,557	0,4
BF-Schlamm 1990 (43)	30	35	2	0,3
BF-Schlamm 1986/87 (37)	20 - 35	25 - 40	1 - 8	0,5 - 3
BF-Staub 2013 (42)	39	27	0,15	0,01
BF-Staub VDEh 2001 (38)	24 - 44	13 - 44	0,16	0,074
BF-Staub 1990 (43)	35	30	0,2	< 0,1
BF-Staub 1986/87 (37)	20 - 30	30 - 50	0,1 - 0,5	0,05 - 0,2

Im Jahr 2006 fielen in Deutschland 231.000 Tonnen Hochofenschlamm an, etwa die Hälfte davon wurde deponiert (55). Die Verwertung von Hochofenschlamm findet in Deutschland im Open-Loop-Recycling vorwiegend im DK-Prozess der DK Recycling und Roheisen GmbH oder im OxyCup-Prozess statt. Das dabei zurückgewonnene Zink wird der Zinkindustrie zur Verfügung gestellt. Dies entspricht einem Open-Loop-Recycling. Rund 54 % des 2006 in Deutschland angefallenen Hochofenschlammes wurden deponiert, da die Zinkgehalte für die Rückgewinnung zu gering waren (53) (55).

3.5.c) EAF-Staub

Aus den Abgasen von Elektrolichtbogenöfen wurden im Jahr 2006 198.000 Tonnen EAF-Staub gefiltert (55). Der Staub ist durch den Einsatz von Stahlschrott reich an Nichteisen-Metallen, vor allem Zink und Blei, die im Ofen verdampfen und so ins Abgas übergehen. Das Zink stammt hauptsächlich aus der Oberflächenbeschichtung von verzinktem Stahlschrott, aber auch aus zinkhaltigen Anstrichen (84). Tabelle 10 zeigt typische Metallgehalte von EAF-Staub. Wie ersichtlich schwankt der Zinkgehalt je nach Art des eingesetzten Schrottes.

67 % des weltweit produzierten EAF-Staubes werden derzeit deponiert (85), in Deutschland hingegen nur rund 3 % (55). Dies ist notwendig, wenn der Staub für die Rückgewinnung einen zu geringen Zinkgehalt aufweist.

Tabelle 10: Eisen-, Zink- und Bleigehalt von EAF-Staub in Gew.-%

Untersuchung	Fe_{ges}	Zn	Pb
Typische Bandbreiten (86)	20 - 45	14 - 35	2 - 8
Niedriglegierte Stähle (45)	10 - 45	21 - 43	0,4 - 10
Legierte Stähle (45)	17 - 37	2 - 15	0,05 - 3,6
Hochlegierte Stähle (45)	20 - 65	2 - 25	0,2 - 4,5
Krupp Edelstahl (87)	26,6 - 28,6	20,94 - 28,23	0,098 - 0,173
C-Stahl (43)	40	20	2
Cr/Ni-Stahl (43)	40	< 20	< 0,5

In Deutschland wird EAF-Staub überwiegend extern mit Metallrückgewinnung im Wälzprozess verwertet, was einem Open-Loop-Recycling entspricht. Dabei ist eine wirtschaftliche Rückgewinnung ab einem Zinkgehalt von ca. 10 - 18 %, je nach Anlage, möglich (38) (88). Durch eine Staubrückführung in den Elektrolichtbogenöfen kann sowohl das im Staub enthaltene Eisen wiederverwertet, als auch das Zink im Staub aufkonzentriert werden (38) (89). Vor- und Nachteile dieser Methode zeigt (42) auf.

3.5.d) Konverterrückstände

Eisen und andere Metalle verlassen den Konverterprozess über das Abgas. Bei der Reinigung des Konverterabgases fielen in Deutschland im Jahr 2006 562.000 Tonnen Konverterrückstände an (55), davon sind $\frac{3}{4}$ feine Fraktion und $\frac{1}{4}$ grobe Fraktion. Der Großteil der groben Fraktion geht als Produktionsrücklauf in den Hochofen zurück. Nur ca. 5 % werden deponiert. Die feine Fraktion enthält mehr Schwermetalle und wird daher zu

rund 35 % deponiert. (51) (55) Tabelle 11 zeigt typische Zusammensetzungen von Konverterstäuben und Konverterschlämmen. Im Vergleich zu Hochofenschlamm (Tabelle 9) weisen Konverterrückstände höhere Eisengehalte auf, welche wie die hohen Zink- und Bleigehalte aus dem im Konverter eingesetzten Schrott resultieren. Durch die verschiedenen Schrottarten kann die Zusammensetzung der Konverterrückstände stark schwanken.

3 Auswahl der Stoffströme

Tabelle 11: Typische Zusammensetzungen von Konverterstaub und -schlamm in Gew.-%

Untersuchung		Fe _{ges}	Zn	Na ₂ O K ₂ O	Pb
Konverter- rückstände (38)	fein	63,0	0,148	0,38	0,064
	grob	72,0	0,023	0,054	
Konverterstaub Österreich (88)	fein	55,2	4,24		0,89
Konverterstäube (Einsatz DK) (90)	Bsp. 1	65,0	0,9	0,67	
	Bsp. 2	51,1	2,2	1,23	
	Bsp. 3	44,2	11,9	0,58	
Konverterstaub (43)	grob	60	< 2		< 0,3
Konverterstaub 2013 (42)	fein	68	2,3		
Konverterstaub 2013 (42)	grob	60	11		0,37
Konverter- schlämme (Einsatz DK) (90)	Bsp. 1	44,8	1,3	0,24	
	Bsp. 2	48,0	1,1	0,26	
Konverter- schlamm (43)		55	< 0,5		< 0,3

Konverterrückstände können extern mit den gleichen Verfahren verwertet werden wie Hochofenschlamm. Damit besteht auch hier ein Open-Loop-Recycling.

3.5.e) Stahlwerksschlacken

Der Großteil der Stahlwerksschlacken wird in der Bauindustrie, ein kleinerer Teil als Kreislaufstoff oder Düngemittel verwertet (vgl. Abbildung 23). Mehr als 10 % werden deponiert, da entsprechende Verwertungsmöglichkeiten und damit Alternativen zur Deponierung fehlen.

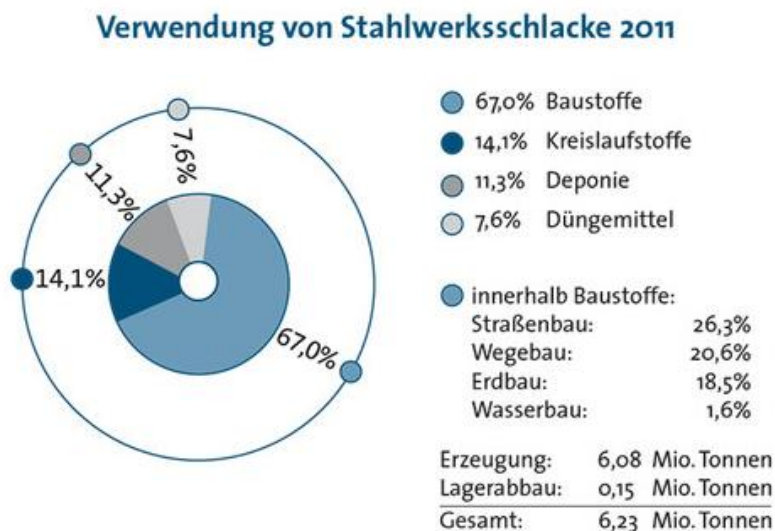


Abbildung 23: Verwendung von Stahlwerksschlacke nach der Schlackenstatistik des FEhS für 2011 (54)

Deponierte Stahlwerksschlacken sind für eine Verwertung entweder zu feinkörnig, unzureichend raumbeständig oder enthalten zu hohe Mengen an Schwermetallen (91).

Feinkörnige Schlacken sind für eine Verwertung in der Bauindustrie von unzureichender Qualität (56). Da hier die Verwertungsmöglichkeiten fehlen wurde im Rahmen des europäischen Förderprogramms „Angewandte Umweltforschung“ die Herstellung von hydrothermal gehärteten Bauprodukten untersucht. Feinkörnige LD-Schlacke soll dabei als Rohstoff für die Produktion von künstlichen Steinen in einer Mischung mit silikatischen Gesteinskörnungen nutzbar gemacht werden (92).

Bei Edelstahlschlacken ergeben sich die Verwertungsprobleme durch den Chromgehalt und die unzureichende Raumbeständigkeit. Die Schlacken zerfallen leicht und können zur Staubentwicklung führen. (57) Die Rückgewinnung von Metallen aus Edelstahlschlacken ist prinzipiell möglich (siehe beispielsweise (56)), wird aber bisher kaum angewendet.

Die jährlich deponierte Menge an Stahlwerksschlacken schwankt, da auch ein Überangebot von Schlacken am Markt zu einer kurzzeitig erhöhten Deponierung führen kann (47).

Die genannten Umstände erschweren die Verwertung des Rückstandes. Daher existieren derzeit keine entsprechenden Verwertungsmöglichkeiten. Die deponierten Stahlwerksschlacken werden daher im Weiteren nicht mehr betrachtet.

3.5.f) Abbeizschlamm

Bei der Walzstahlerzeugung fällt Abbeizschlamm durch die Reinigung der Beize an. Dieser sehr metallhaltige Schlamm wird deponiert. (66) (67) Hier könnte durch Metallrückgewinnung ein Open-Loop entstehen. Allerdings gibt es derzeit keine Aufbereitungs- und Rückgewinnungsverfahren und dadurch keine Alternativen zur Deponierung. Dieser Rückstand wird daher nicht weiter untersucht.

3.5.g) Auswahl relevanter Rückstände

Als relevante Verknüpfungsansätze wurden die Stoffströme des Hochofenschlammes, der EAF-Stäube und der Konverterrückstände identifiziert. Für diese Rückstände besteht ein Potenzial zur Metallrückgewinnung und damit die Möglichkeit für ein Open-Loop-Recycling.

Im folgenden Kapitel 4 wird eine Bewertung von etablierten und alternativen Verfahren durchgeführt, mit denen die identifizierten Rückstände in einem Open-Loop-Recycling verwertet werden können. Der Vergleich der Verfahren erfolgt anhand einer Nutzwertanalyse.

4 Verfahrensvergleich

4.1 Einleitung

Durch entsprechende Verwertungsverfahren können Möglichkeiten für ein Open-Loop-Recycling der identifizierten Rückstände aufgezeigt werden. Daher wurden zu den Verknüpfungsansätzen etablierte und alternative Verwertungsverfahren recherchiert. Etablierte Verfahren werden in Deutschland zur Rückstandsverwertung angewendet. Alternative Verfahren sind oder waren nicht in Deutschland etabliert, aber im Ausland großtechnisch im Einsatz. Ausgeschlossen wurden Verfahren, die nicht zu einem Open-Loop-Recycling beitragen können oder nicht mehr dem Stand der Technik entsprechen. Die recherchierten Verfahren werden in diesem Kapitel beschrieben, bewertet und anhand einer Nutzwertanalyse verglichen. Die Ergebnisse werden anhand einer Sensitivitätsanalyse validiert. Anschließend werden derzeitige theoretische Metallverluste und potenzielle Metallgewinne zur Ermittlung theoretischer Optimierungspotenziale berechnet.

In Tabelle 12 sind die Verwertungsverfahren nach Rückständen aufgelistet. Die derzeit in Deutschland etablierten Verfahren sind unterstrichen.

Tabelle 12: Verfahren zur Verwertung der identifizierten Rückstände
(in Deutschland etablierte Verfahren sind unterstrichen)

Verwertungsverfahren für	
Konverterrückstände und Hochofenschlamm	Elektroofenstaub
	<u>Wälzprozess</u>
<u>DK-Prozess</u>	
<u>OxyCup-Prozess</u>	
RHF-Prozesse (INMETCO)	
Primus-Prozess	
	Plasmadust-/ScanDust- Prozess
	Cebedeau-Laugung
	TSL-Prozess

4.2 Methode: Nutzwertanalyse

Die Nutzwertanalyse ist ein vergleichendes Bewertungsverfahren zur Entscheidungsfindung, um unter den technisch möglichen Varianten die beste auszuwählen (93) (94) (95) (96). Die Standardmethode zur Entscheidungsfindung bei mehreren Alternativen ist die Kosten-Nutzen-Analyse. Diese kann allerdings nur angewendet werden, wenn monetäre Daten vorliegen oder geschätzt werden können. Andernfalls können die Kosten als Aufwand definiert werden. Dabei müssen aber wiederum monetäre Wert geschätzt werden, um die Methode durchzuführen.

Aufgrund der vorliegenden Datenlage zu den Verfahren war die Anwendung einer Kosten-Nutzen-Analyse nicht möglich. Zudem ist eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung hier nicht das Ziel des Verfahrensvergleichs. Die Nutzwertanalyse ist aus der Kosten-Nutzen-Analyse entwickelt worden, um Alternativen auch dann vergleichen zu können, wenn nur qualitative Daten vorliegen und mehrere Entscheidungskriterien einfließen sollen (97).

Bei der Nutzwertanalyse erfolgt eine Bewertung mit mehreren ausgewählten Kriterien anhand von Zielerreichungsfaktoren (ZF), um den Zielerreichungsgrad jeder Option zu ermitteln. Zudem wird durch Gewichtungsfaktoren (GF) der Nutzen jedes Kriteriums als prozentualer Anteil des Gesamtnutzens bewertet. (95) (96)

In der vorliegenden Untersuchung wurden acht Kriterien bestimmt, die im folgenden Kapitel näher erläutert werden.

Die Summen der Zielerreichungsfaktoren multipliziert mit den Gewichtungsfaktoren für jedes Kriterium ergeben den Gesamtnutzen für jede Option. Je größer der Wert des Gesamtnutzens, desto besser ist die Zielerreichung mit der jeweiligen Option erfüllt. (95) Die Optionen werden abschließend entsprechend der Höhe der Gesamtnutzwerte gereiht (98).

Die Methode der Nutzwertanalyse wurde hier gewählt, da sich diese besonders dann anbietet, wenn die Kriterien nicht monetär sowie nicht oder schwer messbar oder qualitativ sind oder mehrere Zielsetzungen bestehen (95) (98).

Es ist in jedem Fall ratsam eine anschließende Sensitivitätsanalyse durchzuführen, um zu testen, ob das Ergebnis robust gegenüber subjektiven Festlegungen ist, wie beispielsweise der Gewichtung (95). Dies wird durch Überprüfung des Vertrauensgrades der Ergebnisse in Kapitel 4.6 vorgenommen.

Ergibt sich aus der Sensitivitätsanalyse eine eindeutig beste Option, kann damit das Modell optimiert werden (95). Kapitel 4.7 zeigt dazu theoretisch mögliche Metallverluste und -gewinne auf.

4.3 Vorgehen bei der Anwendung der Nutzwertanalyse

4.3.a) Bewertungskriterien, Zielerreichungs- und Gewichtungsfaktoren

Für den Vergleich der Verfahren anhand der Nutzwertanalyse wurden acht Kriterien definiert. Je nachdem, inwieweit ein Verfahren ein Kriterium erfüllen kann, wird die Zielerreichung des Kriteriums mit Zielerreichungsfaktoren (ZF) bewertet. In dieser Untersuchung kann die Zielerreichung vollständig ($ZF = 1$), teilweise ($ZF = 0,5$) oder nicht erfüllt sein ($ZF = 0$).

Das Kriterium Rückstandsverwertung bezieht sich auf die Menge an verschiedenen Rückständen, die mit dem jeweiligen Verfahren verwertet werden können. Je mehr verschiedene Rückstände in einem Verfahren verwertet werden können, desto vorteilhafter ist das Verfahren für ein Unternehmen, da nicht mehrere Verwertungsanlagen für verschiedene Rückstände benötigt werden. Daher ist die Zielerreichung nicht erfüllt, wenn nur der betrachtete Rückstand mit dem Verfahren verwertet werden kann ($ZF_{RSV} = 0$). Kann nur ein weiterer Rückstand verwertet werden, wird der ZF auf 0,5 gesetzt ($ZF_{RSV} = 0,5$). Kann zusätzlich zu dem betrachteten Rückstand mehr als ein weiterer Rückstand verwertet werden, so erfüllt das Verfahren die Zielerreichung und wird mit dem Zielerreichungsfaktor eins ($ZF_{RSV} = 1$) bewertet.

Um Open-Loops zu schaffen, sollten möglichst viele Metallfraktionen durch ein Verwertungsverfahren zurückgewonnen werden. Das Kriterium Rückgewinnung bewertet das Verfahren je nach Anzahl der rückgewinnbaren Metallfraktionen. Können mit dem Verfahren mehr als zwei Metallfraktionen zurückgewonnen werden, so ist die Zielerreichung voll erfüllt ($ZF_{RGG} = 1$). $ZF_{RGG} = 0,5$ wird vergeben, wenn zwei Metallfraktionen zurückgewonnen werden können. Wird nur eine Metallfraktion zurückgewonnen, ist die Zielerreichung nicht erfüllt ($ZF_{RGG} = 0$).

Durch das Verwertungsverfahren sollten möglichst wenig nicht verwertbare prozessbedingte Rückstände entstehen, damit durch die Verwertung nicht neue Abfälle erzeugt werden. Der Zielerreichungsfaktor des Kriteriums Nicht verwertbare Rückstände fällt also umso schlechter aus, je höher die Anzahl an nicht verwertbaren Rückständen ist, die während des Verfahrens anfallen. Fällt bei dem Verfahren kein nicht verwertbarer Rückstand an, ist die Zielerreichung erfüllt ($ZF_{NVR} = 1$). Fällt ein nicht verwertbarer Rückstand an, so wird $ZF_{NVR} = 0,5$ vergeben, für mehr als einen gilt $ZF_{NVR} = 0$.

Sind anfallende Rückstände eines Verwertungsverfahrens allerdings verwertbar und können in einer anderen Industrie sogar als Rohstoff dienen, so besteht ein weiteres Open-Loop-Recycling. Im Kriterium weitere Open-Loops wird daher bewertet, welche weiteren Möglichkeiten das Verfahren bietet, Branchen miteinander zu verknüpfen. Dabei ist die Zielerreichung voll erfüllt ($ZF_{WOL} = 1$), wenn mehr als eine neue Verknüpfung von Branchen durch die anfallenden Rückstände des Verfahrens möglich ist. Ist genau eine weitere Verknüpfung möglich wird der $ZF_{WOL} = 0,5$ gesetzt. Die Zielerreichung ist nicht erfüllt ($ZF_{WOL} = 0$), wenn in dem jeweiligen Verfahren kein Rückstand anfällt, der eine weitere Verknüpfung erzeugt.

Für eine möglichst einfache Umsetzung neuer Verfahren in der Industrie, müssen neue Verfahren zur Verwertung einfach in bestehende Prozesse (z.B. ins Hüttenwerk) integrierbar sein. Das Kriterium Integrierbarkeit bewertet daher den Aufwand zur Umsetzung des Verfahrens. Besteht das neue Verfahren beispielsweise aus einer kleineren Anlage, die zu bestehenden Anlagen mit geringen Kosten und Platzbedarf zugeschaltet werden kann, so ist die Zielerreichung erfüllt ($ZF_{INT} = 1$). Mehr Aufwendungen wie höhere Kosten, größere Anlagen oder Umbaumaßnahmen der bestehenden Anlagen schmälern die Bewertung auf $ZF_{INT} = 0,5$. Die Zielerreichung ist nicht erfüllt ($ZF_{INT} = 0$), wenn das Verfahren aus einem eigenen Anlagenkomplex besteht, deren Integration zu bestehenden Anlagen weder finanziell noch räumlich möglich ist.

Mit dem Kriterium Verwertbare Menge wird die Menge an Rückständen einbezogen, die pro Jahr in der Anlage verarbeitet werden kann. Die deponierte Menge bei Hochofenschlamm und Konverterrückständen liegt in Deutschland jeweils bei über 100.000 Tonnen pro Jahr (51), daher ist die Zielerreichung bei mindestens 100.000 Tonnen verwertete Rückstände pro Jahr erfüllt ($ZF_{VWM} = 1$). Als Untergrenze ($ZF_{VWM} = 0$) wurden 50.000 Tonnen pro Jahr gewählt, da ab dieser Menge mehrere gleiche Anlagen zur Bewältigung der anfallenden Mengen notwendig wären. Liegt die verwertbare Menge zwischen 50.000 und 100.000 Tonnen pro Jahr wird die Zielerreichung mit 0,5 ($ZF_{VWM} = 0,5$) bewertet.

Mit dem Kriterium Wertstoffausbringung wird bewertet, wie viel Prozent der enthaltenen Metalle aus den Rückständen ausgebracht werden können. Eine möglichst hohe Wiedergewinnungsrate für Metalle dient einerseits der Ressourcenschonung. Andererseits können Unternehmen die ausgebrachten Metalle gewinnbringend verkaufen, was die Integration des Verfahrens finanziell erleichtert. Die etablierten Verwertungsverfahren für die betrachteten Rückstände erreichen eine Wertstoffausbringung von mindestens 80 %. Die Zielerreichung für dieses Kriterium ist daher nicht erfüllt, wenn die Wertstoffausbringung unter 80 % liegt ($ZF_{WSA} = 0$). Liegt die Wertstoffausbringung über 95 % ist die Zielerreichung voll erfüllt ($ZF_{WSA} = 1$), da die etablierten Verfahren bei mindestens einer Metallfraktion diese Ausbringungsrate erreichen.

Stäube und Schlämme aus der Eisen- und Stahlindustrie werden meist deponiert, wenn die Metallgehalte für eine Rückgewinnung zu gering sind. Daher wird durch das Kriterium Beschränkung der Rückgewinnung bewertet, wie gut das jeweilige Verfahren Rückstände mit geringen Metallkonzentrationen verwerten kann. EAF-Stäube können beispielsweise über 20 % Gewichtsanteil Zink aufweisen, jedoch schwankt der Wert so stark, dass auch weniger als zwei Gew.-% möglich sind (siehe Tabelle 10). Die Rückstände aus Convertern enthalten selten mehr als ein Gew.-% Zink (siehe Tabelle 11), Hochofenschlämme selten mehr als fünf Gew.-% (siehe Tabelle 9). Für das Kriterium wurde daher zur Zielerreichung eine Grenze von zehn Gew.-% festgesetzt. Ist für ein Verfahren also ein Mindest- oder Maximalgehalt an einem Nichteisenmetall notwendig, der zehn Gew.-% übersteigt, ist die Zielerreichung nicht erfüllt ($ZF_{BDR} = 0$). Liegt eine geringe Beschränkung unter zehn Gew.-% vor wird die Zielerreichung mit 0,5 bewertet ($ZF_{BDR} = 0,5$). Liegt keine Beschränkung zu Mindest- oder Maximalgehalten vor, ist die Zielerreichung voll erfüllt ($ZF_{BDR} = 1$).

4 Verfahrensvergleich

In Tabelle 13 sind die Kriterien mit den Zielerreichungsfaktoren zusammengefasst.

Tabelle 13: Vergabe der Zielerreichungsfaktoren (ZF) mit Gewichtung der Kriterien (GF)

Kriterien	Ausprägung der Kriterien	ZF	GF
Rückstands- verwertung	Einsatz von mehr als einem zusätzlichen Rückstand	1	0,1786
	Einsatz von einem zusätzlichen Rückstand	0,5	
	nur betrachtete Rückstände einsetzbar	0	
Rückgewinnung	Rückgewinnung von mehr als zwei Metallfraktionen	1	0,2143
	Rückgewinnung von zwei Metallfraktionen	0,5	
	Rückgewinnung einer Metallfraktion	0	
Nicht verwertbare Rückstände	kein nicht verwertbarer Rückstand	1	0,0357
	ein nicht verwertbarer Rückstand	0,5	
	mehr als ein nicht verwertbarer Rückstand	0	
Weitere Open- Loops	mehr als ein Rückstand, der eine weitere Verknüpfung erzeugt	1	0
	ein Rückstand, der eine weitere Verknüpfung erzeugt	0,5	
	kein Rückstand, der eine weitere Verknüpfung erzeugt	0	
Integrierbarkeit	mit geringen Aufwendungen integrierbar	1	0,1071
	mit Aufwendungen integrierbar	0,5	
	nicht integrierbar	0	
Verwertbare Menge	≥ 100.000 Tonnen pro Jahr	1	0,1607
	50.000 bis 100.000 Tonnen pro Jahr	0,5	
	< 50.000 Tonnen pro Jahr	0	
Wertstoff- ausbringung	> 95 % bei allen Metallfraktionen	1	0,2143
	80 bis 95 % bei allen Metallfraktionen	0,5	
	< 80 % bei mindestens einer Metallfraktion	0	
Beschränkung der Rückgewinnung	Keine Beschränkung	1	0,0893
	Beschränkung des Mindestgehaltes < 10 %	0,5	
	Beschränkung auf Maximalgehalt oder Mindestgehalt ≥ 10 %	0	

Die Kriterien wurden außerdem bezüglich ihrer Bedeutung für das Ziel der Untersuchung unterschiedlich gewichtet. Beispielsweise ist das Kriterium Rückgewinnung nach der Gewichtung von großer Bedeutung für die Untersuchung, da durch die Rückgewinnung von verschiedenen Metallen Open-Loops zu anderen Industrien geschaffen werden können. Zur Bestimmung der Gewichtungsfaktoren (GF) wurde die Gewichtung durch Punktevergabe

4 Verfahrensvergleich

gewählt (98). Die Bewertungskriterien werden dabei in einer Tabelle (Tabelle 14) in Zeilen und Spalten gegenüber gestellt. Wie im unteren Teil von Tabelle 14 erläutert werden die Kriterien gegeneinander abgewogen. Ist das Kriterium in der Zeile wichtiger als das Kriterium in der Spalte so wird eine 2 eingetragen. Eine 0 steht dafür, dass das Kriterium in der Spalte wichtiger ist als das Kriterium in der schneidenden Zeile. Kann keine Entscheidung getroffen werden, welches Kriterium mehr gewichtet werden soll, steht in der Tabelle eine 1. Die entsprechenden Gewichtungsfaktoren für die einzelnen Kriterien ergeben sich aus dem Quotienten der Zeilensumme und der Gesamtzeilensumme aller Kriterien. (98)

Tabelle 14: Bestimmung der Gewichtungsfaktoren nach (98)

	Rückstandsverwertung	Rückgewinnung	Nicht verwertbare Rückstände	Weitere Open-Loops	Integrierbarkeit	Verwertbare Menge	Wertstoffausbringung	Beschränkung der Rückgewinnung	Zeilensumme	Gewichtung in Prozent
Rückstandsverwertung	-	0	2	2	2	1	1	2	10	17,86
Rückgewinnung	2	-	2	2	2	1	1	2	12	21,43
Nicht verwertbare Rückstände	0	0	-	2	0	0	0	0	2	3,57
Weitere Open-Loops	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0
Integrierbarkeit	0	0	2	2	-	1	0	1	6	10,71
Verwertbare Menge	1	1	2	2	1	-	0	2	9	16,07
Wertstoffausbringung	1	1	2	2	2	2	-	2	12	21,43
Beschränkung der Rückgewinnung	0	0	2	2	1	0	0	-	5	8,93
Spaltensumme	4	2	12	14	8	5	2	9	56	100

2 = Kriterium in Zeile ist wichtiger als Kriterium in Spalte

1 = beide Kriterien gleich wichtig

0 = Kriterium in Spalte ist wichtiger als Kriterium in Zeile

Wie in Tabelle 14 ersichtlich, haben die Kriterien Rückgewinnung und Wertstoffausbringung die höchste Gewichtung. Open-Loops können vor allem durch zurückgewonnene Metalle

und eine hohe Ausbringung entstehen. Die Kriterien Rückstandsverwertung und Verwertbare Menge haben ebenfalls hohe Gewichtungsfaktoren. Für eine mögliche Etablierung alternativer Verfahren ist es notwendig, dass die anfallenden Rückstände auch möglichst vollständig verwertet werden können. Das Kriterium Weitere Open-Loops hat in der Bewertung einen Gewichtungsfaktor von Null erhalten und ist somit für das Ergebnis der Nutzwertanalyse unerheblich wird aber im Weiteren zur Information mit aufgeführt.

4.3.b) Berechnung und Einordnung des Gesamtnutzens

Der Gesamtnutzen für jedes Verfahren berechnet sich aus der Summe aller Zielerreichungsfaktoren der Kriterien multipliziert mit den jeweiligen Gewichtungsfaktoren.

$$GNW_v = \sum_k ZF_{k,v} \cdot GF_k$$

Die folgende Tabelle 15 zeigt die Variablen der Berechnung.

4 Verfahrensvergleich

Tabelle 15: Variablen zur Berechnung der Gesamtnutzwerte

Variable	Abkürzung / Variable	Anmerkung
Gesamtnutzwert	GNW_v	Für jedes Verfahren / Prozess
Zielerreichungsfaktor	$ZF_{k,v}$	8 pro Verfahren
Gewichtungsfaktor	GF_k	8 pro ZF
Kriterien:	k	Menge: 8
Rückstandsverwertung	RSV	
Rückgewinnung	RGG	
Nicht verwertbare Rückstände	NVR	
Weitere Open-Loops	WOL	
Integrierbarkeit	INT	
Verwertbare Menge	VWM	
Wertstoffausbringung	WSA	
Beschränkung der Rückgewinnung	BDR	
Verfahren:	v	Menge: 8
DK-Prozess	DK	
OxyCup-Prozess	OX	
INMETCO-Prozess	IP	
Primus-Prozess	PP	
Wälzprozess	WP	
Plasmadust-/ScanDust-Prozess	PS	
Cebedeau-Laugung	CL	
(Ausmelt) TSL-Prozess	AP	

Erklärung für beispielhafte Variablen:

$ZF_{RSV,DK}$ Zielerreichungsfaktor des Kriteriums Rückstandsverwertung für den DK-Prozess

GF_{RSV} Gewichtungsfaktor für das Kriterium Rückstandsverwertung

Berechnungsbeispiel: Gesamtnutzwert für den DK-Prozess

$$\begin{aligned}GNW_{DK} = & Z_{FRSV,DK} \cdot GF_{RSV} \\ & + Z_{FRGG,DK} \cdot GF_{RGG} \\ & + Z_{FNVR,DK} \cdot GF_{NVR} \\ & + Z_{FWOL,DK} \cdot GF_{WOL} \\ & + Z_{FINT,DK} \cdot GF_{INT} \\ & + Z_{FVWM,DK} \cdot GF_{VWM} \\ & + Z_{FWSA,DK} \cdot GF_{WSA} \\ & + Z_{FBDR,DK} \cdot GF_{BDR}\end{aligned}$$

Im obigen Beispiel wird der Gesamtnutzwert für den DK-Prozess berechnet. Dazu wurden alle Zielerreichungsfaktoren, die bei der Bewertung anhand der Kriterien ermittelt wurden, mit den jeweiligen Gewichtungsfaktoren multipliziert. Die Ergebnisse der Berechnungen finden sich in Kapitel 4.5.

Die Zielerreichungsfaktoren aller Kriterien für jedes Verfahren werden im Folgenden bei der Beschreibung der Verfahren erläutert und quantifiziert.

4.4 Etablierte und alternative Verfahren zur Verwertung von Stäuben und Schlämmen

Die Funktionsweise der ausgewählten Verfahren zur Verwertung der identifizierten Rückstände wird in diesem Kapitel dargelegt. Außerdem wird die Zielerreichung der Verfahren in der Nutzwertanalyse für die einzelnen Kriterien quantifiziert.

4.4.a) Wälzprozess

Der etablierte Wälzprozess ist mit einem europäischen Marktanteil über 90 % das meistgenutzte Verfahren zur Verwertung zinkreicher Reststoffe in Europa (99). Weltweit werden 80 % des verwerteten EAF-Staubes mit diesem Verfahren behandelt (85). Seit der Entstehung des Prozesses in den 1930er Jahren wurde das Verfahren kontinuierlich weiterentwickelt. Aktuell wird der Prozess als SDHL-Wälzprozess (1998) bezeichnet, nach den Erfindern Saage, Dittrich, Hasche und Langbein (100).

Beim Wälzprozess werden die Einsatzstoffe – zinkhaltige Rückstände, Schlackenbildner und Koks als Reduktionsmittel sowie Energieträger – pelletiert und in einem leicht geneigten Drehrohfen auf etwa 1.100 °C erhitzt (100) (101). Zink, Blei, Chloride und Alkalien verdampfen dabei, während das Eisen in die Schlacke übergeht (Abbildung 24). Bei der Abgasreinigung wird das sogenannte Wälzoxid abgeschieden, das einen Zinkanteil von über 50 % aufweisen und als Sekundärrohstoff an die Zinkindustrie verkauft werden kann. (100) Die entstehende Wälzschlacke kann in der Bauindustrie verwendet werden, wird allerdings zum Großteil deponiert. Die Schlacke enthält über 30 % Eisen, welches mit der Deponierung verloren geht. (99) (102) Nach Einschätzung von Rütten (85) ist die Weiterentwicklung des

Wälzprozesses begrenzt, sodass zukünftig die strengerer Umwelt- und Deponierungsaufgaben nicht mehr erfüllt werden können. Das Verfahren wird daher an Bedeutung verlieren (99).

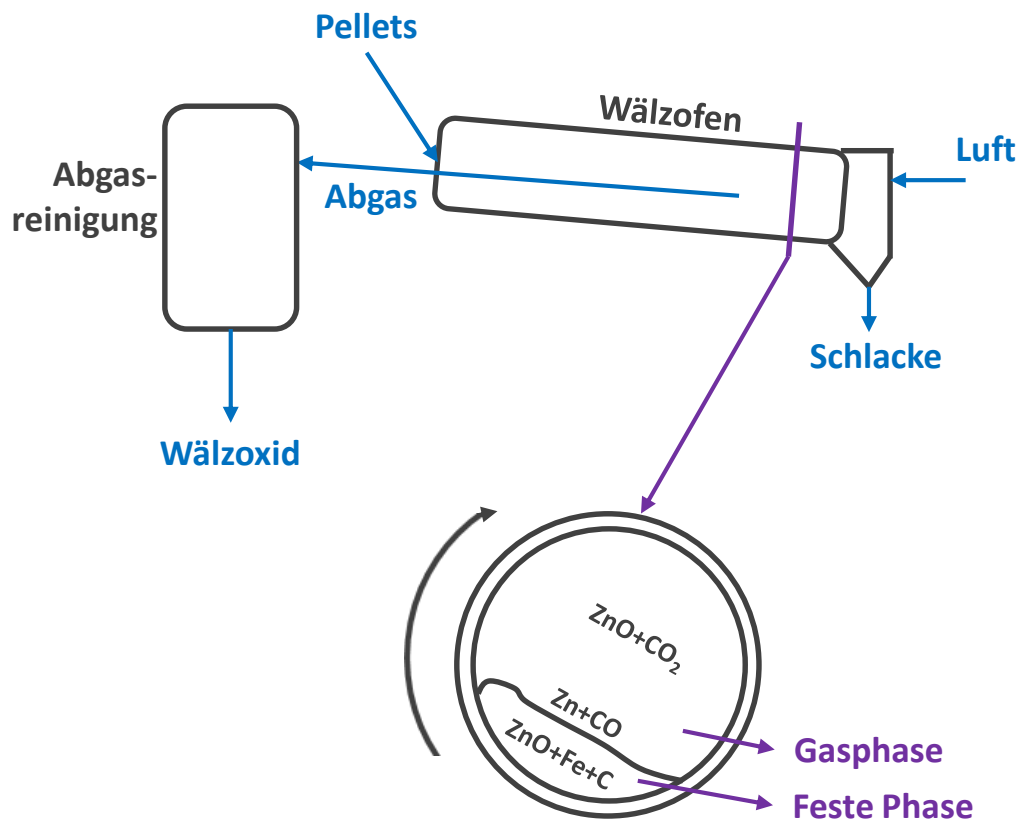


Abbildung 24: Verfahrensschema des Wälzprozess nach Informationen der Befesa Steel GmbH (43) (103)

Mit dem Wälzprozess ist es derzeit möglich, jegliche zink- und bleihaltigen Rückstände aus verschiedenen Industrien zu verwerten. In der Eisen- und Stahlindustrie wird das Verfahren meist aber nur zur Verwertung von EAF-Staub verwendet. Damit ist die Zielerreichung für die Rückstandsverwertung nicht voll erfüllt ($ZF_{RSV} = 0,5$). Zurückgewonnen wird lediglich Zinkoxid, das an Zinkhütten verkauft und dort weiter verarbeitet wird (42) (85). Da hier keine weiteren Metalle extrahiert werden, ist die Zielerreichung für die Rückgewinnung nicht erfüllt ($ZF_{RGG} = 0$). Eisen wird nicht zurückgewonnen, sondern findet sich zu durchschnittlich 37 Gew.-% (102) in der Schlacke wieder. Aufgrund des hohen Eisengehaltes ist die Verwertung der Schlacke meist nicht möglich, weswegen diese als nicht verwertbarer Rückstand deponiert wird (43) ($ZF_{NVR} = 0,5$). Bei geringen Eisengehalten ist es möglich die Schlacke in einem Open-Loop-Recycling im Straßenbau einzusetzen (85). Mit dem moderneren SDHL-Wälzverfahren der Befesa Steel GmbH kann die Schlacke als Wege- und Verfüllmaterial genutzt werden (103). Mit der Verwertung der Schlacke kann also eine

weitere Open-Loop Verknüpfung erzeugt und der Zielerreichungsfaktor ZF_{WOL} mit 0,5 bewertet werden. Vorteilhaft ist die einfache Integration des Prozesses, da als Hauptbestandteil der Anlage nur ein Drehrohrofen benötigt wird (43) (85) ($ZF_{INT} = 1$). Dies zeigt sich auch in der europaweiten Verbreitung des Prozesses. Die verwertbare Menge wird mit $ZF_{VWM} = 0,5$ bewertet, da es sich hier um eine eher kleine Verwertungsanlage handelt. Die Wertstoffausbringung von Zink beträgt im Wälzprozess 85 - 95 % (85) ($ZF_{WSA} = 0,5$). Allerdings ist dazu ein Mindestzinkgehalt der Rückstände von 15 % erforderlich (38) (42) ($ZF_{BDR} = 0$).

4.4.b) DK-Prozess

Der DK-Prozess der DK Recycling und Roheisen GmbH in Duisburg setzt sich aus einer Sinteranlage und zwei Hochöfen zur Roheisenproduktion zusammen. Verwertet werden eisenhaltige Rückstände, die einen hohen Zinkgehalt aufweisen. Dazu gehören neben Rückständen aus anderen Industrien Konverterstäube und -schlämme, Walzzunder sowie Gichtschlämme und -stäube.

Die Einsatzstoffe – Rückstände und Erz – werden als Vorbereitung für den Sinter mit Wasser, Koksgrus und Zuschlägen gemischt. Erze dienen dabei zur Veränderung der Korngrößenverteilung der Sintermischung und als Ausgleich für die schwankende Zusammensetzung der Rückstände. (40) (42) Abbildung 25 zeigt einen typischen Mix der Einsatzstoffe beim DK-Prozess für die Aufgabe in der Sinteranlage. Diese Darstellung ist eher beispielhaft zu sehen, da die Mischung sehr variabel ist. Durch die Zugabe von Sand wird die benötigte Basizität hergestellt. In begrenzter Menge kann Walzzunder ohne eine vorherige Entölung in die Mischung eingebracht werden, was bei konventionellen Sinteranlagen nicht der Fall ist. (104)

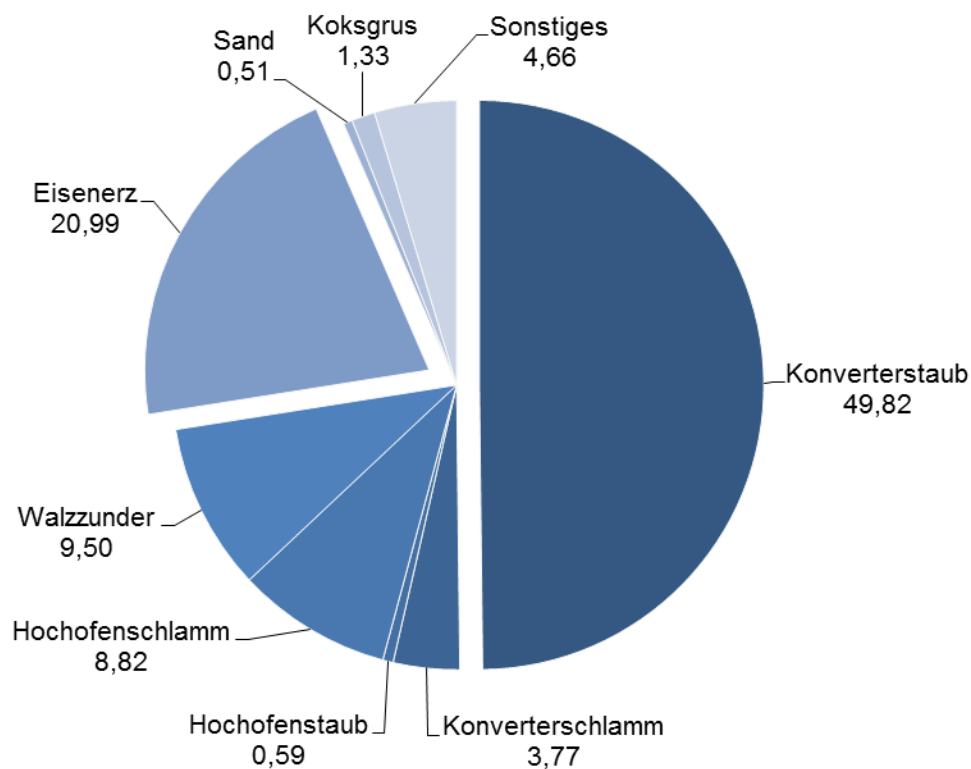


Abbildung 25: Typische Rohstoffmischung der Einsatzstoffe des DK-Prozesses in Prozent (90)

Im Sinterprozess gehen Blei, Alkalien und Chloride in die Gasphase über und finden sich im Sinterstaub wieder. Zink verbleibt im Fertigsinter und geht in großen Anteilen im Hochofen in die Gasphase über, sodass der Gichtschlamm aus der Abgasreinigung des Hochofens als Zinkkonzentrat mit 65 Gew.-% Zink direkt an die Zinkindustrie verkauft werden kann. (42) (43) (104) Eisenträger ist im Hochofen der DK ausschließlich der selbst erzeugte Sinter (40).

Die Hochöfen sind kleiner als in konventionellen integrierten Hüttenwerken. Während einer der Hochöfen betrieben wird, ist der andere auf stand-by. Der Hochofen in Betrieb wird mit einer sauren Schlacke gefahren. Die Gichtgastemperaturen liegen in einem höheren Bereich als bei Hochöfen üblich. (43) Das Roheisen aus dem Hochofen wird teilweise in einem Niederfrequenzinduktionsofen unter Zugabe von Legierungselementen verarbeitet, um gewünschte Roheisenqualitäten zu erreichen (105).

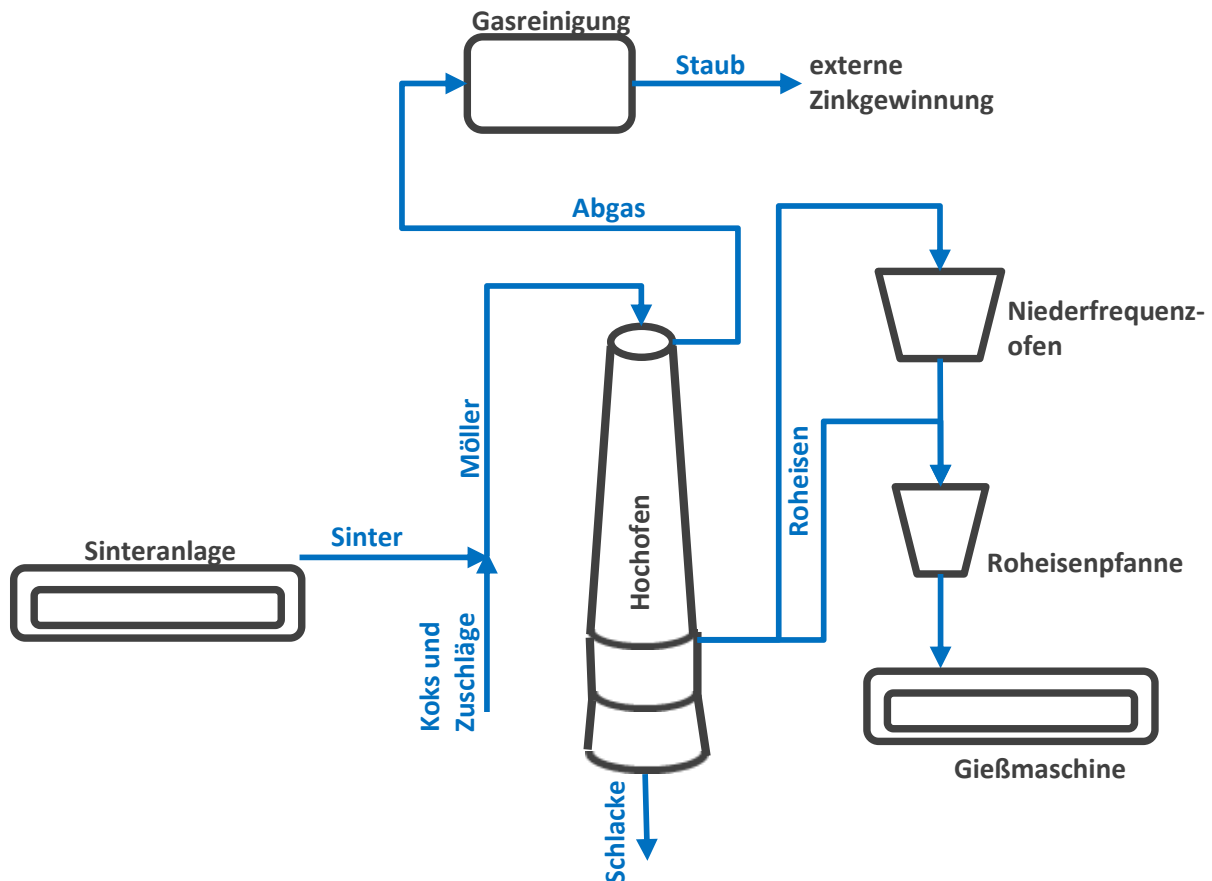


Abbildung 26: Verfahrensschema des DK-Prozesses in Anlehnung an (105)

Da im DK-Prozess mehrere Rückstände der Eisen- und Stahlindustrie verwertet werden können, ist die Zielerreichung für das Kriterium Rückstandverwertung voll erfüllt ($ZF_{RSV} = 1$). Als Produkte entstehen Roheisen und Zink, das durch die Abgasreinigung des Hochofens gewonnen wird. Weitere Metallfraktionen werden nicht zurückgewonnen ($ZF_{RGG} = 0,5$). (90) Im DK-Prozess fallen keine nicht-verwertbaren Rückstände an ($ZF_{NVR} = 1$), da die Schlacke in einem Open-Loop-Recycling in der Bauindustrie verwendet wird ($ZF_{WOL} = 0,5$) (43). Ein Nachteil des Verfahrens ist allerdings die nicht gegebene Integrierbarkeit ($ZF_{INT} = 0$), da für das Verfahren ein eigens zur Verwertung angepasstes Hüttenwerk betrieben werden muss, zu dem die Rückstände transportiert werden (90). Verwertet werden zwischen 300.000 und 450.000 Tonnen Rückstände im Jahr (43) (106) ($ZF_{VWM} = 1$), wobei der gesamte Eisengehalt und fast der gesamte Zinkgehalt ausgebracht werden (84) ($ZF_{WSA} = 1$). Zur Zusammensetzung der Einsatzstoffe gibt es keine Beschränkungen ($ZF_{BDR} = 1$).

4.4.c) OxyCup-Prozess

Neben dem DK-Prozess ist der OxyCup-Prozess, entwickelt von der ThyssenKrupp Steel AG, eines der wichtigsten Verfahren zur Verwertung von Rückständen aus der Eisen- und Stahlindustrie in Deutschland. In einem zum Schachtofen umgebauten Kupolofen (Abbildung 27) wird dabei Roheisen erzeugt (38) (106). Der Schachtofen ist ein Gegenstromreaktor, in den im unteren Bereich Heißwind eingeblasen wird. Die Temperaturen im Ofen fallen nach oben hin ab. Zink und Alkalien verdampfen und gehen in den Staub der Abgasreinigung über (38) (106). Der mit Zink angereicherte Staub kann, nach Angaben von (106), an die Zinkindustrie verkauft werden. Das Abgas wird nach der Reinigung energetisch genutzt (43).

Konverterstaub, Hochofenschlamm, Walzzunderschlamm und andere Rückstände der Eisen- und Stahlindustrie können mit dem OxyCup-Prozess verwertet werden (38) (106). Diese Einsatzstoffe werden mit Koksgrus und Zuschlägen zu selbstreduzierenden Steinen brikettiert, welche zum Härten einige Tagen trocknen müssen. Anschließend werden die Steine mit metallischen Einsatzstoffen, Zuschlägen und Koks in den Ofen chargiert (38) (43). Die Agglomeratsteine, welche in Abbildung 27 oben dargestellt sind, haben eine Höhe von 35 bis 110 mm (43) und werden zu Beginn zu Eisenschwamm und anschließend zu Roheisen reduziert (106). Dieses Roheisen kann im Hüttenwerk weiter verarbeitet werden (107).

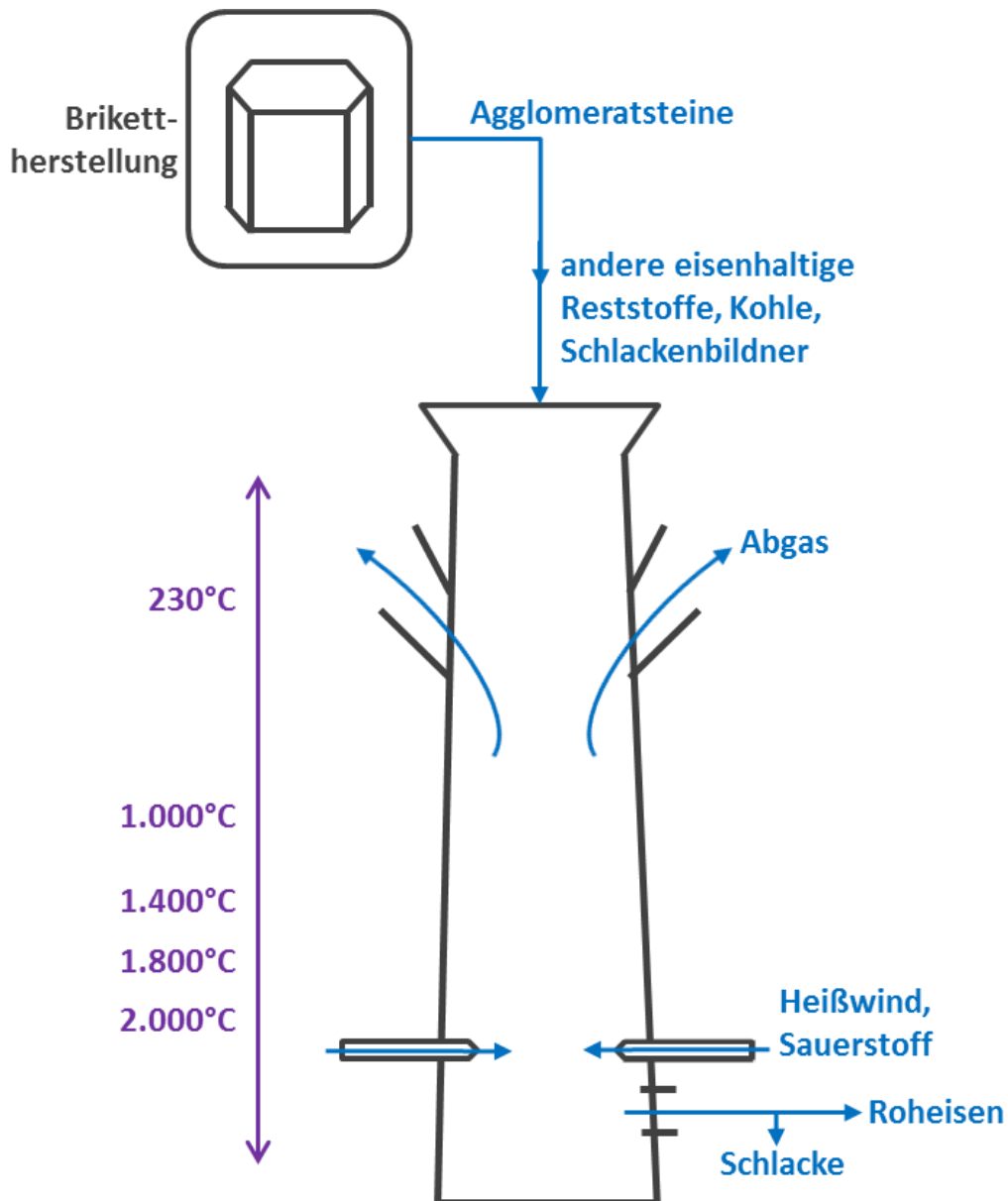


Abbildung 27: Schachtofen des OxyCup-Prozesses mit Brikettherstellung und Darstellung eines Agglomeratsteines in Anlehnung an (43) und (108)

Da wie bereits erwähnt mehrere Rückstände aus der Eisen- und Stahlindustrie – Hochofenschlamm, feiner Konverterstaub und Walzzunder – mit dem OxyCup-Prozess verwertet werden können, ergibt sich eine Zielerreichung von 0,5 ($ZF_{RSV} = 0,5$). Roheisen als Hauptprodukt und Zink aus dem Staub der Abgasreinigung werden erzeugt. Da keine weiteren Metalle zurückgewonnen werden, wird das Kriterium Rückgewinnung mit $ZF_{RGG} = 0,5$ bewertet. Es fallen keine nicht verwertbaren Prozessrückstände an ($ZF_{NVR} = 1$), da die anfallende Schlacke für den Straßen- und Wegebau genutzt werden kann (107), was einem weiteren Open-Loop-Recycling entspricht ($ZF_{WOL} = 0,5$). Die Integration des OxyCup-Prozesses ist im Vergleich finanziell nicht so aufwendig wie andere Verfahren, jedoch wird neben dem Schachtofen eine Brikettfabrik benötigt ($ZF_{INT} = 0,5$). Pro Jahr können mit dem

OxyCup-Prozess 176.000 Tonnen Rückstände verwertet werden (43) (106) ($ZF_{VWM} = 1$). Dabei wird Eisen zu über 99 % und Zink zu über 95 % ausgebracht (85) ($ZF_{WSA} = 1$). Mindest- oder Maximalgehalte für die Zusammensetzung der Einsatzstoffe werden für dieses Verfahren nicht verlangt ($ZF_{BDR} = 1$).

4.4.d) RHF-Prozesse: INMETCO-, RedSmelt- und RedIron-Prozess

Zur Verwertung von Rückständen aus integrierten Hüttenwerken können auch sogenannte RHF-Prozesse mit einem Rotary Hearth Furnace (RHF) eingesetzt werden. Diese Verfahren bestehen im Kern aus einem Drehherd-Ofen, der mit verschiedenen anderen Anlagen kombiniert wird. Die drei bekanntesten Verfahren sind die Direktreduktionsverfahren INMETCO, RedSmelt und RedIron. Anlagen für die beiden letztgenannten Prozesse werden von der PaulWurth S.A. betrieben (90). Von diesem Unternehmen wurde für den RedIron-Prozess im Jahr 2010 in Piombino (Italien) eine Anlage fertiggestellt, die als eine Weiterentwicklung des INMETCO-Prozesses angesehen werden kann. Getestet wurde diese Anlage vor allem zur Verwertung von Konverter- und Hochofenrückständen. (109) Das erste großtechnisch angewendete und in der Literatur am häufigsten beschriebene RHF-Verfahren ist der INMETCO-Prozess, der hier weiter betrachtet und auch für die Nutzwertanalyse herangezogen wird.

Beim INMETCO-Prozess der International Metals Reclamation Company in den USA werden die Rückstände – Walzunderschlamm, Hochofenstaub und -schlamm, Konverterstäube und -schlämme – mit Reduktions- und Bindemitteln zu ungebrannten Grünpellets agglomeriert und anschließend in einen Drehherdofen (Abbildung 28) eingebracht. Radial angeordnete Brenner erzeugen die notwendige Wärme von 1.100°C bis 1.350°C. Das entstehende Abgas strömt gegen die Rotation des Drehherdes, um den Wärmeaustausch des CO-Gases zu verbessern. Außerdem kann die thermische Energie des Abgases so genutzt werden. Zink- und Bleioxide verdampfen und gehen in den Staub des Abgases über. Ein Teil des Abgases wird zurückgeführt zur Vorwärmung der Brennluft genutzt. Das Abgas ist durch die wenig mechanische Staubentwicklung im Ofen stark mit Metallen angereichert. Der Staub aus der Abgasreinigung kann direkt an die Nichteisenmetallindustrie verkauft werden. (35) (37) (110) Diese geringe Staubentwicklung des festen Gutes ermöglicht außerdem die Verwertung von Rückständen mit sehr geringen Zinkgehalten (109) (111).

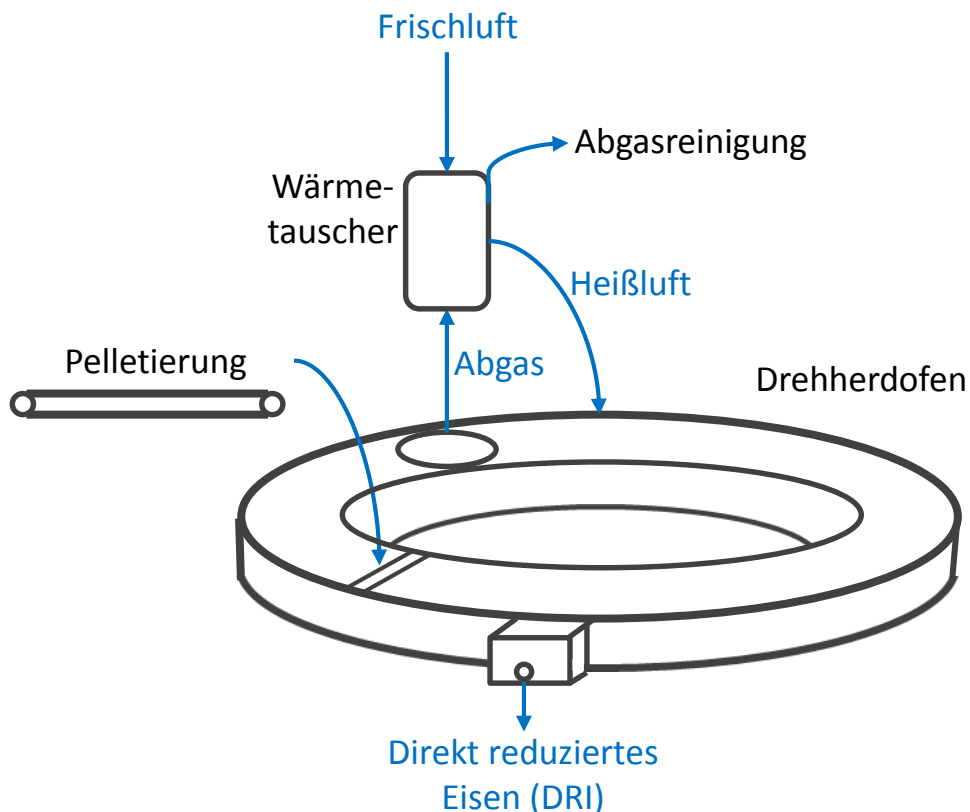


Abbildung 28: Verfahrensschema des INMETCO-Prozesses in Anlehnung an (110)

Da der INMETCO-Prozess mehrere verschiedene metallurgische Rückstände verwerten kann (37), ist hier die Zielerreichung für das Kriterium Rückstandsverwertung voll erfüllt ($ZF_{RSV} = 1$). Zurückgewonnen werden Nichteisen-Metalloxide sowie Eisen in Form von Eisenschwamm ($ZF_{RGG} = 1$). Während des INMETCO-Prozesses fallen keine nicht-verwertbaren Rückstände an ($ZF_{NVR} = 1$), aber auch keine Rückstände, die ein weiteres Open-Loop-Recycling ermöglichen würden ($ZF_{WOL} = 0$). (43) Die Integration des INMETCO-Prozesses ist mit geringem Aufwand möglich, allerdings sollte einen Elektrolichtbogenofen zur Verwertung des Eisenschwamms hinzugefügt werden (110). Damit beträgt der Zielerreichungsfaktor für die Integrierbarkeit 0,5 ($ZF_{INT} = 0,5$). 60.000 Tonnen Rückstände können mit dem INMETCO-Prozess pro Jahr verwertet werden (45) ($ZF_{VWM} = 0,5$), wobei Zink zu 99 % und Eisen zu 98 % ausgebracht wird. Da Blei nur zu 80 % zurückgewonnen wird, beträgt der Zielerreichungsfaktor für die Wertstoffausbringung 0,5 ($ZF_{WSA} = 0,5$). (35) Die Effektivität der Rückgewinnung ist allerdings nicht beschränkt, da auch Rückstände mit sehr geringen Zinkgehalten eingesetzt werden können (43) ($ZF_{BDR} = 1$).

4.4.e) Primus-Prozess

Eine Anlage für den von der Paul Wurth S.A. entwickelten Primus-Prozess ist in Differdange in Luxemburg in Betrieb. Eine weitere Anlage betreibt das Unternehmen Lucchini Steelworks in Piombino, Italien (45). Ursprünglich entwickelt, um EAF-Stäube und öligen Walzschlamm zu verwerten, können mit dem Primus-Prozess heute auch

Gichtschlamm sowie Stahlwerksstäube und -schlämme verwertet werden (110). Die eingesetzten Rückstände werden teilweise pelletiert (43). Die Mischung durchläuft alle Etagen des Etagen-Drehherdofens (Abbildung 29) von oben nach unten, was eine schnelle und gleichmäßige Erhitzung ohne Gefahr von Agglomeraten ermöglicht. Luft wird seitlich in alle Etagen eingeblasen. In den oberen Etagen wird das aufgegebenes Gut zunächst getrocknet. Weiter unten erfolgt dann die weitere Erhitzung mit Entölung bzw. Kalzinierung, während im unteren Bereich des Ofens die Reduktion der Einsatzstoffe erfolgt. (110) Die seitlich aufgegebene Kohle dient als Reduktionsmittel (43). Die Verbrennung der Kohle und des entstehenden CO-Gases liefert die Energie für den Ofen. Eine weitere Energiezufuhr ist nur beim Anfahren des Ofens zur Vorwärmung notwendig. Der Etagenofen erreicht dabei eine Temperatur von 900 °C (Betriebstemperatur) bis maximal 1.100 °C. Dadurch wird Zink nur teilweise mit dem Abgas ausgetragen. (110) Zur Produktion von Roheisen aus dem DRI des Etagenofens und zur Gewinnung des restlichen Zinks wird ein kleiner Elektrolichtbogenofen nachgeschaltet. Aus dessen Abgasen können ebenfalls Metalle zurückgewonnen werden (43). Das aus der Abgasreinigung gewonnene Mischoxid wird direkt weiter verkauft (85).

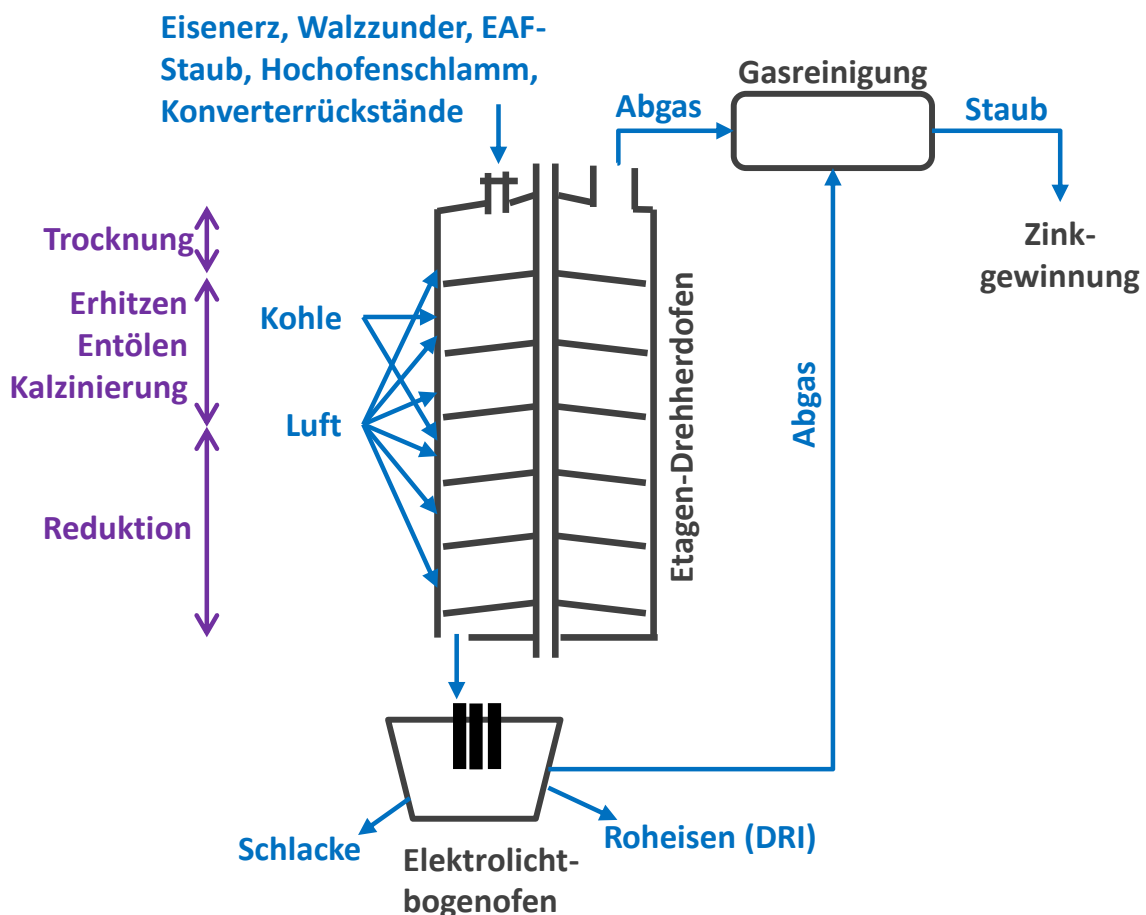


Abbildung 29: Verfahrensschema des Primus-Prozesses in Anlehnung an (110)

Da mit dem Primus-Prozess fast alle Stäube und Schlämme, die bei der Eisen- und Stahlherstellung anfallen, verwertet werden können, ist die Zielerreichung für das Kriterium Rückstandsverwertung voll erfüllt (110) ($ZF_{RSV} = 1$). Roheisen und Zink aus der Abgasreinigung werden produziert bzw. zurückgewonnen. (85) Da keine weiteren Metalle zurückgewonnen werden, wird für das Kriterium Rückgewinnung $ZF_{RGG} = 0,5$ vergeben. Ein Vorteil des Primus-Prozesses ist, dass keine nicht verwertbaren Rückstände anfallen ($ZF_{NVR} = 1$). Die entstehende Schlacke aus dem Elektrolichtbogenofen enthält wenig Eisen, da dieses im Primus-Prozess fast vollständig ausgebracht wird. Die Schlacke ist daher sehr gut für den Straßenbau geeignet (85), was einem weiteren Open-Loop-Recycling entspricht ($ZF_{WOL} = 0,5$). Den Primus-Prozess in bestehende Hüttenwerke zu integrieren, ist allerdings technisch und finanziell aufwendig, da ein Etagenofen und ein zusätzlicher Lichtbogenofen benötigt werden (43). Daher werden 0,5 Punkte für das Kriterium Integrierbarkeit ($ZF_{INT} = 0,5$) vergeben. Etwa 60.000 Tonnen Rückstände können pro Jahr in einer Primus-Anlage verwertet werden (45) ($ZF_{VWM} = 0,5$), wobei 95 % des enthaltenen Zinks und fast 100 % des enthaltenen Eisens zurückgewonnen werden (85) ($ZF_{WSA} = 1$). Allerdings müssen die eingesetzten Rückstände für eine effektive Rückgewinnung einen Mindestzinkgehalt von 5 % aufweisen (112) ($ZF_{BDR} = 0,5$).

4.4.f) Plasmadust-/ScanDust-Prozess

Der Plasma- oder ScanDust-Prozess wurde von dem Unternehmen Befasa ScanDust AB in Schweden entwickelt und wird heute zur Verwertung von EAF-Stäuben angewendet (113).

In diesem Verfahren werden die Rückstände zunächst mit Kohlenstaub und Schlackenbildnern vermischt. Die Mischung wird über die Plasmageneratoren gemeinsam mit dem Plasma in den Ofen eingeblasen. Der koksgefüllte Schachtofen (Abbildung 30) verfügt über drei Plasmageneratoren im unteren Bereich. Das Plasma liefert die Energie für die im Ofen stattfindenden Reduktionsprozesse. Koks dient dabei als Reduktionsmittel. Die Elemente Eisen, Nickel, Chrom, Molybdän sowie die Schlacke sammeln sich unten im Gestell des Ofens und werden abgestochen. Zink, Blei und Cadmium verflüchtigen sich und verlassen den Ofen mit dem Abgasstaub. Die Zinkgewinnung ist allerdings nur beim Einsatz von EAF-Stäuben möglich, da nur diese einen für den Prozess ausreichenden Anteil an Zink enthalten. In diesem Fall weist das zurückgewonnene Zink Hüttenzinkqualität auf. Kann das Zink nicht zurückgewonnen werden, wird ein Mischoxid aus Zink und Blei oder ein Bleioxid gewonnen. Das gereinigte Abgas wird entweder zurückgeführt und als Brenngas zur Plasmaerzeugung eingesetzt oder anderweitig energetisch genutzt. (35) (43) (113)

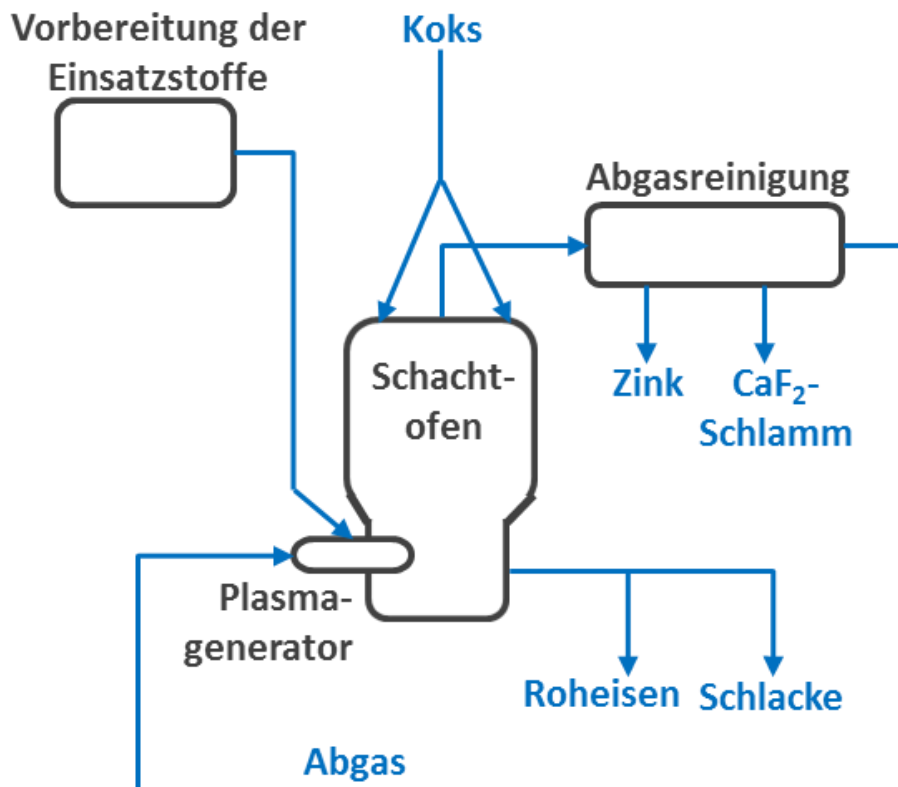


Abbildung 30: Verfahrensschema des Plasmadust-/ScanDust-Prozesses in Anlehnung an (113)

Wie bereits erwähnt kann Zink mit dem Plasmadust-Prozess nur zurückgewonnen werden, wenn EAF-Stäube verwertet werden (35). Die Zielerreichung für die Rückstandsverwertung ist damit nicht erfüllt ($ZF_{RSV} = 0$). Neben Zink und Eisen wird kein weiteres Metall zurückgewonnen (113) ($ZF_{RGG} = 0,5$). Der anfallende CaF_2 -Schlamm aus der Abgasreinigung muss deponiert werden und stellt einen nicht verwertbaren Abfall dar ($ZF_{NVR} = 0,5$). (35) Dagegen findet durch die Verwertung der Schlacke in der Bauindustrie ein weiteres Open-Loop-Recycling statt (113) ($ZF_{WOL} = 0,5$). Die Integrierbarkeit des Prozesses wurde aufgrund der hohen Investitions- und Betriebskosten (111) mit 0,5 ($ZF_{INT} = 0,5$) bewertet. Mit 55.000 Tonnen an verwerteten Rückständen pro Jahr (45) liegt das Verfahren noch im Bereich der mittleren Zielerreichung ($ZF_{VWM} = 0,5$). Die Wertstoffausbringung beträgt über 95 % für Zink und über 98 % für Eisen ($ZF_{WSA} = 1$). Allerdings ist der Bleigehalt der Einsatzstoffe auf maximal 10 % beschränkt, da das Blei sonst in das Roheisen übergeht (35) ($ZF_{BDR} = 0$).

4.4.g) Cebedeau-Laugung

Das Verfahren der Cebedeau-Laugung wurde von der Universität Liege in Belgien in Kooperation mit den Unternehmen Cebedeau in Liege und SERH in Saint Florentin, Frankreich entwickelt (35).

Dieses Verfahren verfolgt einen ganz anderen Ansatz als die bisher beschriebenen Verfahren, da hier eine Lauge zur Abtrennung von Metallen benutzt wird. Es ist der einzige

größentechnisch praktizierte hydrometallurgische Prozess zur Verwertung von Rückständen aus der Eisen- und Stahlindustrie (37). Der Ablauf des Verfahrens ist in Abbildung 31 skizziert.

EAF-Staub wird zunächst mit Natronlauge vermischt und in einen Schwachfeldmagnetabscheider gegeben. Dieser trennt die Mischung in zwei Fraktionen: eine magnetische und eine unmagnetische, die anschließend separat gelaugt werden. Durch Zentrifugieren wird dann eine eisenhaltige Fraktion abgetrennt, die in einem Wäscher gereinigt wird. Hierbei entsteht ein eisenhaltiger Rückstand, der deponiert werden muss. Der Rest der Lauge wird durch Fällung mit Calciumhydroxid gereinigt. In der anschließenden Zementation wird Zinkstaub hinzugegeben, um Blei und Kupfer zu fällen. Der Bleischlamm kann direkt an Metallhütten verkauft werden. Aus der gereinigten Restlauge kann außerdem Zink durch Elektrolyse abgetrennt werden, welches sich zur Herstellung von Zinkfarbe eignet. Die Lauge kann nach der Elektrolyse in den Mischer oder in die Laugung der magnetischen Fraktion zurückgeführt werden. (35) (37) (111)

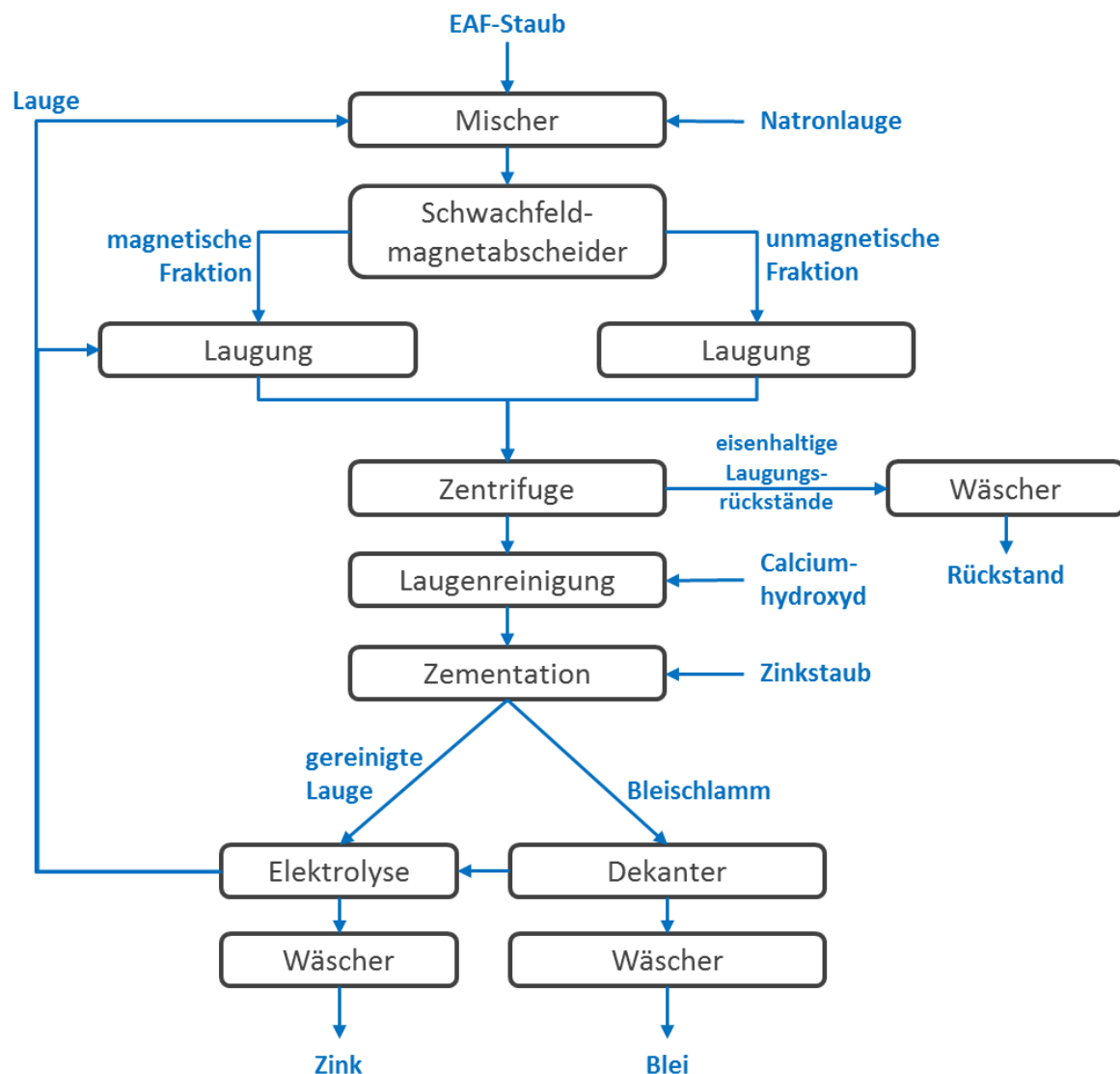


Abbildung 31: Verfahrensablaufschema der Cebedeau-Laugung nach (35)

Die Cebedeau-Laugung wurde zur Verwertung von EAF-Stäuben entwickelt. Da keine anderen Rückstände eingesetzt werden können, ist hier die Zielerreichung nicht erfüllt ($ZF_{RSV} = 0$). Es werden Blei und Zink zurückgewonnen ($ZF_{RGG} = 0,5$). Eisen verbleibt im Laugungsrückstand, welcher als nicht verwertbarer Rückstand deponiert werden muss ($ZF_{NVR} = 0,5$). Andere Rückstände, die beispielsweise ein weiteren Open-Loop ermöglichen würden, fallen nicht an ($ZF_{WOL} = 0$). (35) (37) (111) Wie in Abbildung 31 ersichtlich, besteht der Cebedeau-Prozess aus mehreren Anlagenteilen. Für das Kriterium Integrierbarkeit wurde daher ein Zielerreichungsfaktor von 0,5 vergeben ($ZF_{INT} = 0,5$). Pro Jahr können in einer Anlage der Cebedeau 12.000 Tonnen Rückstände verwertet werden, was nicht mehr im Bereich der Zielerreichung liegt ($ZF_{WVM} = 0$). Die Wertausbringung von Zink beträgt dabei nur 85 % ($ZF_{WSA} = 0,5$). Allerdings ist dazu ein Mindestzinkgehalt von 20 % notwendig. Zusätzlich muss der Rückstand einen Zinkferritanteil aufweisen. (35) Diese starke Beschränkung führt zu einer Bewertung von $ZF_{BDR} = 0$.

4.4.h) TSL-Prozess

Der TSL-Prozess oder Outotec® Ausmelt TSL Process wurde zu Anfang vom Unternehmen Outotec Oyj in Finnland betrieben. Heute wird das Verfahren weltweit an den verschiedenen Unternehmensstandorten zur Produktion von Metallen eingesetzt. TSL steht für Ausmelt Top Submerged Lancing. Anlagen zur Erzeugung von Zink befinden sich derzeit in Südkorea und Japan (Stand 2011) (114) (115). In Deutschland wird eine Anlage zur Gewinnung von Blei aus Altbatterien betrieben (115).

Der Ofen des TSL-Prozesses (Abbildung 32) verfügt über eine Lanze, die unterteilt ist, um Luft, Sauerstoff und Brennstoffe (Fuel, Air & Oxygen) getrennt direkt in die Schmelze einzubringen (111). Brennstoff kann dabei Kohle, Öl oder Erdgas sein. Die Zufuhr kann so gesteuert werden, dass die gewünschte Temperatur von 1.300 °C erreicht und gehalten wird (111) (115). Zur Verwertung von EAF-Stäuben werden diese zusammen mit Kohle und Schlackenbildnern über eine Füllöffnung (Feed Port) in den Ofen eingebracht. In bisherigen Versuchen erfolgte eine Zugabe von anderen zinkhaltigen Rückständen oder Zinkerzen (115). Zink und Blei verdampfen und verlassen den Ofen im Abgasstrom im oberen Bereich des Ofens. Die Schlacke, die an der Abstichöffnung (Furnace Taphole) entnommen wird, kann bei hohen Zinkgehalten in einem weiteren, kleineren TSL-Ofen zur Zinkgewinnung eingebracht werden. (111) (115) Die Gewinnung des Zinks erfolgt anschließend durch einen hydrometallurgischen Prozess mit Natriumcarbonat (115). Die übrige Schlacke kann in der Bauindustrie verwertet werden (115). Das abgeschlossene System dieses Verfahrens führt zu einer sehr effizienten Ausnutzung der zugeführten Energie (114).

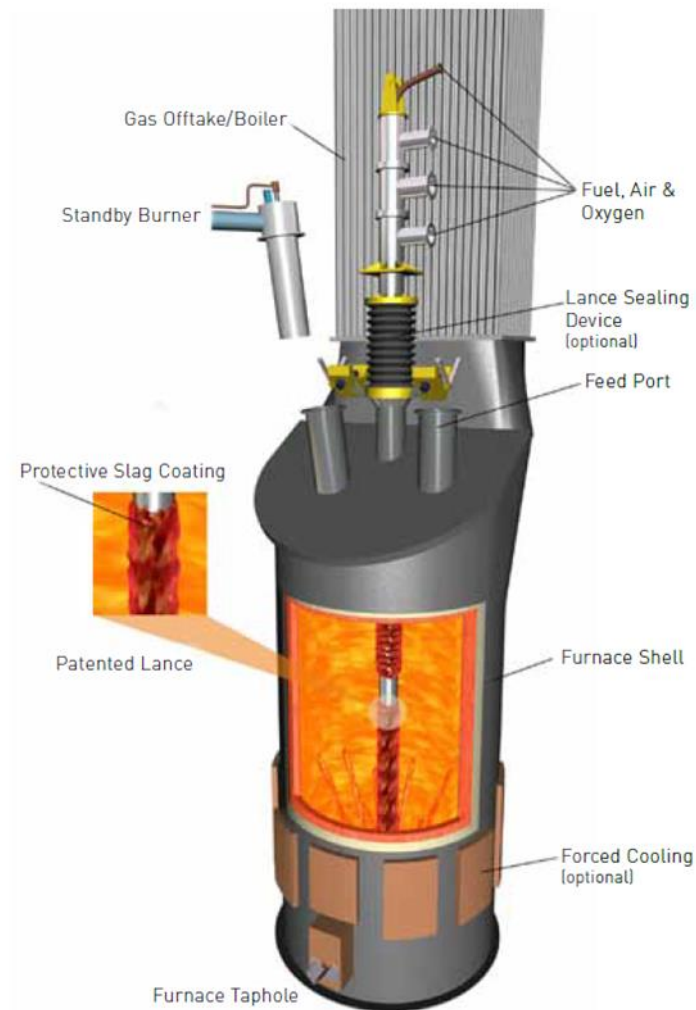


Abbildung 32: Ausmelt-TSL-Ofen (114)

Das Schmelzverfahren mit dem Ausmelt-TSL-Ofen wurde ursprünglich zur Metallproduktion entwickelt und nicht vorrangig zur Verwertung von Rückständen. Zur Zinkproduktion kann aber auch EAF-Staub mit anderen zinkhaltigen Materialien in den Ofen eingebracht werden. Die Rückstandsverwertung beschränkt sich folglich auf den EAF-Staub ($ZF_{RSV} = 0,5$), wobei nur Zink zurückgewonnen wird ($ZF_{RGG} = 0$). (114) Im Prozess fallen keine nicht verwertbaren Rückstände an ($ZF_{NVR} = 1$), da die Schlacke in der Bauindustrie Verwendung findet (115) und damit ein weiteres Open-Loop-Recycling besteht ($ZF_{WOL} = 0,5$). Die Integrierbarkeit des Verfahrens wird mit $ZF_{INT} = 0,5$ eingeschätzt, da es sich um einen größeren Ofen mit zusätzlicher Laugung zur Zinkgewinnung handelt. Pro Jahr können mit diesem Verfahren 50.000 Tonnen EAF-Staub verwertet werden (111) ($ZF_{VWM} = 0,5$). Zur Bewertung der Wertstoffausbringung musste aufgrund fehlender Angaben eine Einschätzung vorgenommen werden. Angenommen wird, dass sich die Ausbringung von Zink ähnlich verhält wie bei der Cebedeau-Laugung, da auch hier die Rückgewinnung mittels Laugung erfolgt ($ZF_{WSA} = 0,5$). Ein Nachteil des Verfahrens ist, dass der Mindestzinkgehalt der Einsatzstoffe bei 15 - 25 % liegen muss, weshalb beispielsweise Zinkerze zudosiert werden (115) ($ZF_{BDR} = 0$).

4.5 Resultat der Nutzwertanalyse der Verfahren für Hochofenschlamm, Konverterrückstände und EAF-Staub

In diesem Kapitel sind die Bewertungsergebnisse aus dem vorherigen Kapitel zusammengefasst. Tabelle 16 und Tabelle 17 zeigen die Gesamtnutzwerte für jedes Verfahren. Der Gesamtnutzwert GNW berechnet sich aus der Summe der Zielerreichungsfaktoren ZF multipliziert mit den Gewichtungsfaktoren GF ist (siehe Kapitel 4.3).

Die Reihung der Gesamtnutzwerte beginnt mit dem Verfahren, dessen Gesamtnutzwert am höchsten ist (95).

4.5.a) Hochofenschlamm und Konverterrückstände

Bei der Nutzwertanalyse für Hochofenschlamm und Konverterrückstände werden der DK-Prozess, der OxyCup-Prozess, der INMETCO- und der Primus-Prozess miteinander verglichen.

Die Bewertung der Verfahren sowie die Gesamtnutzwerte sind in Tabelle 16 dargestellt. Die gleiche Tabelle mit Erklärungen zur Entstehung der Nutzwerte findet sich in Anhang 3. Ebenso können die Zielerreichungsgrade aus den vorhergehenden Kapiteln bei der Beschreibung der Verfahren abgelesen werden.

4 Verfahrensvergleich

Tabelle 16: Ergebnis der Nutzwertanalyse für Verfahren zur Verwertung von Hochofenschlamm und Konverterrückständen

Verfahren	DK-Prozess	OxyCup-Prozess	INMETCO-Prozess	Primus-Prozess
Rückstandsverwertung	1	0,5	1	1
Rückgewinnung	0,5	0,5	1	0,5
Nicht verwertbare Rückstände	1	1	1	1
Weitere Open-Loops	0,5	0,5	0	0,5
Integrierbarkeit	0	0,5	0,5	0,5
Verwertbare Menge	1	1	0,5	0,5
Wertstoffausbringung	1	1	0,5	1
Beschränkung der Rückgewinnung	1	1	1	0,5
Gewichtete Summe (Gesamtnutzwert)	0,786	0,750	0,759	0,714
Rang	1	3	2	4

Die Rangverteilung der Gesamtnutzwerte zeigt den etablierten DK-Prozess mit einem Gesamtnutzwert von 0,786 auf dem ersten Platz, obwohl das Verfahren nur mit hohem Aufwand integriert werden kann.

Der INMETCO-Prozess belegt mit 0,759 errechnetem Gesamtnutzwert Platz zwei. Ein Vorteil des Verfahrens gegenüber den anderen aufgeführten Verfahren liegt darin, dass mehrere verschiedene Metalle aus den eingesetzten Rückständen zurückgewonnen werden können. Der INMETCO-Prozess schneidet bei der Wertstoffausbringung schlechter ab als die anderen Verfahren.

Der etablierte OxyCup-Prozess belegt mit einem Gesamtnutzwert von 0,750 den dritten Rang, was sehr nah an dem Gesamtnutzwert des INMETCO-Prozesses liegt.

Der Primus-Prozess erfüllt mit einem Gesamtnutzwert von 0,714 die Zielerreichung am wenigsten.

Insgesamt liegen die Gesamtnutzwerte der Verfahren in der Nutzwertanalyse sehr nah beieinander. Eine Veränderung der Gewichtung würde wahrscheinlich ein anderes Ergebnis liefern. In Kapitel 4.6 wird mit einer Sensitivitätsanalyse überprüft wie eindeutig die Rangverteilung der Nutzwertanalyse ist.

4.5.b) EAF-Staub

Bei der Nutzwertanalyse für die Verfahren zur Verwertung von EAF-Staub wurde der etablierte Wälzprozess mit fünf alternativen Verfahren verglichen. Die Bewertung mit den Zielerreichungsfaktoren sowie die Ergebniswerte sind in Tabelle 17 dargestellt. In Anhang 3 findet sich die gleiche Tabelle mit Erklärungen zur Entstehung der Nutzwerte. Außerdem können die Zielerreichungsgrade aus den vorhergehenden Kapiteln bei der Beschreibung der Verfahren abgelesen werden.

Die Rangfolge der Ergebniswerte zeigt den INMETCO-Prozess mit dem höchsten Gesamtnutzwert von 0,759 auf Rang eins und den Primus-Prozess mit $GNW = 0,714$ auf Platz zwei. Die Ergebniswerte dieser beiden Verfahren liegen relativ nah beieinander und setzen sich zudem stark von den Gesamtnutzwerten der anderen Verfahren ab. Ein großer Vorteil der beiden Verfahren ist, dass keine Mindest- oder Maximalgehalte der Rückstände notwendig sind, wohingegen die anderen Verfahren die Zielerreichung für das Kriterium Beschränkung der Rückgewinnung nicht erfüllen können ($ZF_{BDR} = 0$).

4 Verfahrensvergleich

Tabelle 17: Ergebnis der Nutzwertanalyse für Verfahren zur Verwertung von EAF-Staub

Verfahren	Primus-Prozess	INMETCO-Prozess	Wälzprozess	Plasmadust-Prozess	Cebedeau-Laugung	TSL-Prozess
Rückstandsverwertung	1	1	0,5	0	0	0,5
Rückgewinnung	0,5	1	0	0,5	0,5	0
Nicht verwertbare Rückstände	1	1	0,5	0,5	0,5	1
Weitere Open-Loops	0,5	0	0,5	0,5	0	0,5
Integrierbarkeit	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0,5
Verwertbare Menge	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0,5
Wertstoffausbringung	1	0,5	0,5	1	0,5	0,5
Beschränkung der Rückgewinnung	0,5	1	0	0	0	0
Gewichtete Summe (Gesamtnutzwert)	0,714	0,759	0,402	0,473	0,286	0,366
Rang	2	1	4	3	6	5

Der etablierte Wälzprozess erreicht in der Nutzwertanalyse mit einem Gesamtnutzwert von 0,402 den vierten Rang, nach dem Plasmadust-Verfahren auf Rang drei mit GNW = 0,473. Aus dem Vergleich der Zielerreichungsfaktoren ist nicht eindeutig zu erkennen, wo der Wälzprozess die gravierendsten Nachteile gegenüber den höherplatzierten Verfahren hat. Eine Rolle könnte die Rückgewinnung spielen, da nur eine Metallfraktion zurückgewonnen wird.

Die hinteren Ränge belegen der TSL-Prozess auf Rang 5 und die Cebedeau-Laugung auf Rang sechs mit Gesamtnutzwerten von 0,366 bzw. 0,286. Diese Verfahren haben in allen

Kriterien eine niedrige Zielerreichung und erreichen dadurch gegenüber den anderen Verfahren einen sehr niedrigen Gesamtnutzwert. Besonders die Cebedeau-Laugung hat durch den Mindestzinkgehalt und die geringe verwertbare Menge große Nachteile.

Im folgenden Kapitel 4.6 wird durch eine Sensitivitätsanalyse geprüft, wie stark sich Gewichtsänderungen für die Kriterien auf die Rangfolge auswirken.

4.6 Sensitivitätsanalyse

Aus den Resultaten der Nutzwertanalyse werden in dieser Arbeit Handlungsempfehlungen abgeleitet (Kapitel 6). Dazu ist es wichtig den Vertrauensgrad der errechneten Gesamtnutzwerte und der daraus abgeleiteten Rangfolge der Verfahren zu bestimmen. Gerade bei einer qualitativen Bewertung zum Vergleichen von Optionen empfiehlt es sich zu überprüfen, wie sensitiv die Gesamtnutzwerte auf Veränderungen von Eingangsparametern reagieren (96). Eine entsprechende Sensitivitätsanalyse sollte immer an eine Nutzwertanalyse angeschlossen werden, um die Auswirkungen der Eingangsgrößen auf Ergebnisse (Ausgangsgrößen) zu evaluieren. Dabei wird die Robustheit der Ergebnisse gegenüber subjektiven Einschätzungen wie der Gewichtung überprüft und somit die Objektivität der Nutzwertanalyse gesteigert. (95) (98)

Die Sensitivitätsanalyse wird im Folgenden durch drei Maßnahmen vorgenommen:

- Keine Gewichtung für alle Kriterien
- Ausschluss des Kriteriums Rückgewinnung
- Ausschluss des Kriteriums Wertstoffausbringung

Durch das Entfernen der Gewichtung bei der Berechnung der Gesamtnutzwerte wird die subjektive Komponente der Gewichtung ausgeschlossen. Weiterhin werden die Kriterien Rückgewinnung und Wertstoffausbringung, die mit jeweils 21,43 % am höchsten gewichtet sind, zur Überprüfung der Robustheit der Ergebnisse herangezogen.

Letztendlich kann damit festgestellt werden, wie eindeutig sich eine Option als am besten darstellt (95) (98).

4.6.a) Sensitivität der Gesamtnutzwerte beim Vergleich der Verfahren für Hochofenschlamm und Konverterrückstände

In Tabelle 18 sind die Gesamtnutzwerte bei Ausschluss der Gewichtung sowie ausgewählter Kriterien dargestellt. Die letzte Zeile der Tabelle zeigt die ursprünglichen Gesamtnutzwerte der Nutzwertanalyse zum Vergleich.

Die Werte in der ersten Zeile der Tabelle zeigen die Gesamtnutzwerte, die man erhält ohne die Gewichtung für alle Kriterien einzuberechnen. In diesem Fall sind die Gesamtnutzwerte des DK- und des OxyCup-Prozesses höher als die der alternativen Verfahren INMETCO und Primus. Der DK-Prozess stellt sich also wiederum als vorteilhaftestes Verfahren dar.

Setzt man den Gewichtungsfaktor des Kriteriums Rückgewinnung auf null, wie die Tabelle in der zweiten Zeile zeigt, ist der DK-Prozess mit einem Gesamtnutzwert von 0,679 wieder auf dem ersten Rang. Die weitere Rangfolge in diesem Fall weicht völlig von der ursprünglichen Nutzwertanalyse ab.

Tabelle 18: Sensitivität der Gesamtnutzwerte für die Verfahren zur Verwertung von Hochofenschlamm und Konverterrückständen (NWA = Nutzwertanalyse)

Verfahren	DK-Prozess	OxyCup-Prozess	INMETCO-Prozess	Primus-Prozess
Keine Gewichtung	0,750	0,750	0,688	0,688
Rang	1	1	2	2
Rückgewinnung GF = 0	0,679	0,643	0,545	0,607
Rang	1	2	4	3
Wertstoffausbringung GF = 0	0,571	0,536	0,652	0,500
Rang	2	3	1	4
Ursprüngliche Resultate der NWA	0,786	0,750	0,759	0,714
Rang	1	3	2	4

In der dritten Zeile von Tabelle 18 wurde das Kriterium Wertstoffausbringung mit Null gewichtet und damit nicht einberechnet. In diesem Fall ist der DK-Prozess mit einem Gesamtnutzwert von 0,571 nicht auf dem ersten Rang. Hier zeigt sich der INMETCO-Prozess auf dem ersten Rang (GNW = 0,652). Dies bestätigt wie bereits in der ursprünglichen Nutzwertanalyse die Bedeutung des INMETCO-Prozesses als zweitbestes Verfahren.

Die Sensitivitätsanalyse der Nutzwertanalyse für die Verfahren zur Verwertung von Hochofenschlamm und Konverterrückständen bestätigt den ersten Rang des DK-Prozesses. Nicht eindeutig sind die weiteren Platzierungen. Es kann nicht eindeutig der OxyCup-Prozess als zweitbestes Verfahren herausgestellt werden. Daher werden in Kapitel 4.7 der INMETCO- und der Primus-Prozess zur Berechnung von möglichen Metallgewinnen herangezogen und mit dem Ist-Zustand mit DK- und OxyCup-Prozess verglichen.

4.6.b) Sensitivität der Gesamtnutzwerte beim Vergleich der Verfahren für EAF-Staub

Die Sensitivitätsanalyse für die Gesamtnutzwerte der Verwertungsverfahren für EAF-Staub zeigt Tabelle 19. Die letzte Zeile zeigt zum Vergleich das Ergebnis der ursprünglichen Nutzwertanalyse.

In der ersten Zeile der Tabelle wurde keine Gewichtung bei der Berechnung der Gesamtnutzwerte vorgenommen. In diesem Fall sind der Primus- und der INMETCO-Prozess mit Gesamtnutzwerten von jeweils 0,688 auf dem ersten Platz. Für die restlichen Verfahren unterscheiden sich die Gesamtnutzwerte mit 0,438 nicht. Einzig für die Cebedeau-Laugung fällt das Ergebnis im Vergleich mit einem Gesamtnutzwert von 0,250 sehr gering aus.

Werden die Kriterien Rückgewinnung und Wertstoffausbringung nicht gewichtet, ist die Rangfolge der Gesamtnutzwerte fast gleich, wie die Tabelle in den Zeilen zwei und drei

zeigt. Dabei sind wiederum der Primus- und der INMETCO-Prozess auf den ersten beiden Rängen. Der Wälzprozess belegt in beiden Fällen den dritten Rang. Für den Plasmadust-Prozess und das TSL-Verfahren sind die Gesamtnutzwerte ohne Einberechnung der Kriterien Rückgewinnung und Wertstoffausbringung jeweils gleich: 0,366 ohne Gewichtung des Kriteriums Rückgewinnung und 0,259 ohne Gewichtung des Kriteriums Wertstoffausbringung. Beide Verfahren belegen in beiden Fällen den vierten Platz.

Tabelle 19: Sensitivität der Gesamtnutzwerte für die Verfahren zur Verwertung von EAF-Staub (NWA = Nutzwertanalyse)

Verfahren	Primus-Prozess	INMETCO-Prozess	Wälzprozess	Plasmadust-Prozess	Cebedeau-Laugung	TSL-Verfahren von Ausmelt
Keine Gewichtung	0,688	0,688	0,438	0,438	0,250	0,438
Rang	1	1	2	2	3	2
Rückgewinnung GF = 0	0,607	0,545	0,402	0,366	0,179	0,366
Rang	1	2	3	4	5	4
Wertstoffausbringung GF = 0	0,500	0,652	0,295	0,259	0,179	0,259
Rang	2	1	3	4	5	4
Ursprüngliche Werte der NWA	0,714	0,759	0,402	0,473	0,286	0,366
Rang	2	1	4	3	6	5

Die Sensitivitätsanalyse bestätigt die Vorteilhaftigkeit des INMETCO- und Primus-Prozesses gegenüber den anderen Verfahren gemessen an den Kriterien. Die Rangfolge der restlichen Verfahren kann mit der Sensitivitätsanalyse weder bestätigt noch widerlegt werden. Eindeutig zeigt sich nur wie ungeeignet die Cebedeau-Laugung im Vergleich mit den anderen Verfahren zur Verwertung von EAF-Staub ist. Wie in der ursprünglichen Nutzwertanalyse mit einem Gesamtnutzwert von 0,286 belegt die Cebedeau-Laugung auch bei der Berechnung der Gesamtnutzwerte ohne Gewichtung und ohne die Kriterien Rückgewinnung und Wertstoffausbringung immer den letzten Platz.

Im folgenden Kapitel 4.7 werden der INMETCO- und der Primus-Prozess, deren Vorteilhaftigkeit mit der Sensitivitätsanalyse bestätigt werden konnte, dem etablierten Wälzprozess gegenübergestellt, um mögliche Metallgewinne zu berechnen.

4.7 Theoretische Metallverluste und -gewinne

In diesem Kapitel werden Metallverluste berechnet, die aufgrund der derzeitigen Rückstandsverwertung jährlich in Deutschland anfallen. Ebenso werden mit den in der Nutzwertanalyse identifizierten Verfahren mögliche Metallrückgewinnungsmengen berechnet. Dies dient der Veranschaulichung von nicht genutzten Potenzialen. Zu beachten ist hier, dass es sich jeweils nur um theoretische Potenziale handelt. Durch eine Vielzahl von Restriktionen lassen sich aber nur machbare Potenziale nutzen, vgl. Abbildung 33.

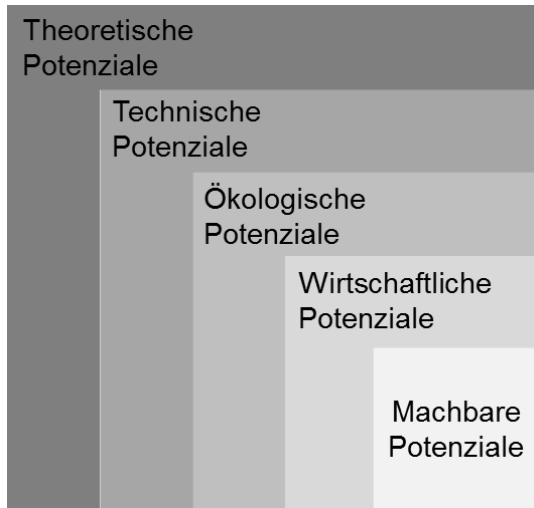


Abbildung 33: Potenziale im Rahmen eines Stoffstrommanagements (1)

Das folgende Kapitel 4.7.a) zeigt die Metallverluste, die durch den derzeitigen Umgang mit den betrachteten Rückständen entstehen. Kapitel 4.7.b) zeigt die möglichen Metallgewinne durch die Etablierung der Verfahren, die durch Nutzwert- und Sensitivitätsanalyse als beste Optionen identifiziert wurden. Die Berechnung basiert auf Literaturangaben.

4.7.a) Metallverluste

Aus den drei ausgewählten Rückständen werden heute bereits Rohstoffe zurückgewonnen, aber durch Deponierung entstehen auch Rohstoffverluste. In diesem Kapitel soll kurz erläutert werden, wie hoch diese Verluste pro Jahr in Deutschland sind.

Tabelle 20 zeigt Werte aus dem Jahr 2006. In diesem Jahr fielen in der gesamten deutschen Eisen- und Stahlindustrie 231.000 Tonnen Hochofenschlamm an. Davon wurde etwas mehr als die Hälfte, 124.000 Tonnen, deponiert. Von den 562.000 Tonnen Konverterrückständen wurden 157.000 Tonnen deponiert. Der deponierte Anteil von EAF-Staub ist mit 3 % sehr gering und beträgt insgesamt 5.700 Tonnen.

4 Verfahrensvergleich

Tabelle 20: In Deutschland erzeugte und deponierte Mengen von Hochofenschlamm, Konverterrückständen und EAF-Staub im Jahr 2006 (51)

Rückstand	Erzeugte Menge in t	Deponierte Menge in %	Deponierte Menge in t
Hochofenschlamm	231.000	54	124.000
Konverterrückstände	562.000	28	157.000
EAF-Staub	198.000	3	5.700

Wird die Zusammensetzung der Rückstände betrachtet, können die Metallverluste durch die Deponierung ermittelt werden. Die in den deponierten Rückständen enthaltenen Metalle gehen der Metallindustrie längerfristig verloren. In diesem Kapitel werden beispielhaft die Verluste für Zink und Blei berechnet.

Tabelle 21 zeigt die Spanne der Zink- und Bleigehalte der drei Rückstände in Gewichtsprozent.

Tabelle 21: Metallgehalte der Rückstände (37) (38) (42) (43) (45) (51) (88) (90)

Rückstand	Zinkgehalt in Gew.-%	Bleigehalt in Gew.-%	Eisengehalt in Gew.-%
Hochofenschlamm	0,5 - 8	0,3 - 1,3	20 - 30
Konverterrückstände	0,023 - 11,9	0,064 - 0,89	44 - 72
EAF-Staub	2 - 43	0,05 - 10	10 - 65

Die Spannen der Metallgehalte sind bei Konverterrückständen und EAF-Staub sehr groß, da bei den Prozessen, die diese Rückstände erzeugen, Schrotte verschiedenster Zusammensetzung eingesetzt werden. Beim Elektroofenprozess können bis zu 100 % Schrott eingesetzt werden, daher schwanken die Metallgehalte hier am stärksten.

Für die Berechnung der jährlichen Verluste durch die Deponierung wurde für Zink nicht die gesamte Spanne angesetzt, da nur die Rückstände deponiert werden, deren Zinkgehalte sehr niedrig sind. Nur bei entsprechenden Zinkgehalten lohnt sich die Rückgewinnung aus Sicht der Unternehmen. Für Hochofenschlämme und Konverterrückstände wurde angenommen, dass die Rückstände ab einem Zinkgehalt von weniger als 2 Gew.-% deponiert werden. Für EAF-Staub wurde diese Grenze auf unter 15 Gew.-% gesetzt, da der

etablierte Wälzprozess einen Zinkmindestgehalt von 15 % voraussetzt. Eine ähnliche Beschränkung wurde für den Bleigehalt vorgenommen. Wird die Zusammensetzung der Rückstände (siehe Tabelle 9, Tabelle 10 und Tabelle 11) betrachtet, korrelieren niedrige Zinkgehalte mit niedrigen Bleigehalten. Für die Berechnung der Verluste wurde die Grenze daher auf 4 Gew.-% gesetzt (vgl. Tabelle 10). Für den Eisengehalt ist keine Korrelation mit niedrigen Zink- oder Bleigehalten zu erkennen. Daher wird hier mit der ganzen Spanne des Metallgehaltes gerechnet.

Tabelle 22 zeigt die für die Berechnung zugrunde gelegten Spannen der Metallgehalte und die Metallverluste durch die Deponierung der Rückstände. Die Verluste von Eisen wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit in Kilotonnen (kt = 1.000 t) angegeben. Die Angaben sind gerundet.

Tabelle 22: Berechnete Zink-, Blei- und Eisenverluste

Rückstand	Deponierte Menge in t	Zinkgehalt in Gew.-%	Bleigehalt in Gew.-%	Eisengehalt in Gew.-%	Jährliche gerundete Verluste durch Deponierung in t, Eisen in kt		
					Zink in t	Blei In t	Eisen In kt
Hochfenschlamm	124.000	0,5 - 2	0,3 - 1,3	20 - 30	620 - 2.500	370 - 1.600	24,9 - 37,3
Konverterrückstände	157.000	0,023 - 2	0,064 - 0,89	44 - 72	36 - 3.140	100 - 1.400	69 - 113
EAF-Staub	5.700	2 - 15	0,05 - 4	10 - 65	114 - 860	2,9 - 230	0,57 - 3,73

Werden nun die theoretischen Verluste über alle Rückstände summiert, ergibt sich ein Gesamtzinkverlust von 772,4 bis 6.493 Tonnen pro Jahr, siehe Tabelle 23. Die Bedeutung dieser Verluste wird deutlich, wenn diese Menge ins Verhältnis zum jährlichen Zinkverbrauch in Deutschland gesetzt wird. Würden die Metalle aus den Rückständen zurück gewonnen und nicht deponiert werden, könnten damit maximal 1,37 % des jährlichen Verbrauchs abgedeckt werden.

4 Verfahrensvergleich

Tabelle 23: Jährliche theoretische Zinkverluste und deren Anteil am Jahresverbrauch von Zink in Deutschland

	von	bis
Zinkverluste aus Hochofenschlamm	621,4 t	2.486 t
Zinkverluste aus Konverterrückständen	36,2 t	3.146 t
Zinkverluste aus EAF-Staub	114,8 t	861 t
Gesamt	772,4 t	6.493 t
Zinkverbrauch Deutschlands 2012 (23)	474.000 t	
Anteil am Jahresverbrauch 2012	0,16 %	1,37 %

Werden die Bleiverluste betrachtet, fallen diese deutlich geringer aus als die Zinkverluste, da in den Rückständen im Vergleich weniger Blei enthalten ist. Durch die Rückgewinnung von Blei aus den deponierten Rückständen könnten bis zu 0,86 % des jährlichen Bleiverbrauchs Deutschlands gedeckt werden, siehe Tabelle 24.

Tabelle 24: Jährliche theoretische Bleiverluste und deren Anteil am Jahresverbrauch von Blei in Deutschland

	von	bis
Bleiverluste aus Hochofenschlamm	372,8 t	1.615 t
Bleiverluste aus Konverterrückständen	100,6 t	1.400 t
Bleiverluste aus EAF-Staub	2,9 t	230 t
Gesamt	476,3 t	3.245 t
Bleiverbrauch Deutschlands 2012 (23)	377.000 t	
Anteil am Jahresverbrauch 2012	0,126 %	0,86 %

Die Eisenverluste sind höher als die Zink- und Bleiverluste. Allerdings werden Eisen und Stahl auch in größeren Mengen produziert und benötigt. So ist der Anteil an der Roheisenproduktion, den man mit dem zurückgewonnenen Eisen decken könnte, mit bis zu 0,57 % eher gering.

4 Verfahrensvergleich

Tabelle 25: *Jährliche theoretische Eisenverluste und deren Anteil an der Jahresproduktion von Eisen in Deutschland*

	von	bis
Eisenverluste aus Hochofenschlamm	24.855 t	37.283 t
Eisenverluste aus Konverterrückständen	69.206 t	113.246 t
Eisenverluste aus EAF-Staub	574 t	3.732 t
Gesamt	94.635 t	154.261 t
Roheisenproduktion im Jahr 2012	27.050.000 t	
Anteil an der Roheisenproduktion 2012	0,35 %	0,57 %

Im folgenden Kapitel werden für die Verfahren, die sich bei der Nutzwert- und Sensitivitätsanalyse als vorteilhafteste herauskristallisiert haben, theoretisch mögliche Metallgewinne berechnet.

4.7.b) Mögliche Metallgewinne

Entsprechend den Ergebnissen der vorangegangenen Analysen werden zur Verwertung von Hochofenschlamm und Konverterrückständen die etablierten Verfahren DK-Prozess und OxyCup-Prozess zur Berechnung von möglichen Metallgewinnen herangezogen. Für die Verwertung von EAF-Staub sind der Wälzprozess, der Primus-Prozess und der INMETCO-Prozess für die Berechnung relevant.

Für die Berechnung werden die jeweiligen Wertstoffausbringungsraten der Verfahren herangezogen. Im Ergebnis kann gezeigt werden, welche Mengen der verschiedenen Metalle durch die Anwendung eines Verfahrens oder durch die Kombination mehrerer Verfahren theoretisch zurückgewonnen werden können. Die zuvor berechneten Metallverluste dienen als maximal rückgewinnbare Menge.

Hochofenschlamm und Konverterrückstände

Bei der Analyse stellte sich der DK-Prozess als vorteilhafteste Option gemessen an den Kriterien heraus. Allerdings hat dieses Verfahren den Nachteil, dass es nicht integrierbar ist und damit die Rückstände zum Werk der DK Recycling und Roheisen GmbH transportiert werden müssten. Die alternativen Verfahren OxyCup-, INMETCO- und Primus-Prozess sind dagegen in ein bestehendes Werk integrierbar, haben allerdings den Nachteil von geringeren Ausbringungsmengen. Während die Ausbringung beim DK-Prozess für Zink und Eisen 100 % beträgt (Tabelle 26), erreichen die alternativen Verfahren diese Werte nicht. Der Primus-Prozess wird hier nicht für einen Vergleich herangezogen, da dieses Verfahren nur

den letzten Rang erreichte und außerdem als einziges eine Beschränkung des Zinkgehaltes für den Einsatz von Rückständen von 5 % aufweist.

Tabelle 26: Wertstoffausbringung der Verfahren zur Verwertung von Hochofenschlamm und Konverterrückständen (35) (37) (84) (85)

Wertstoffausbringungs-raten in Prozent	DK-Prozess	OxyCup-Prozess	INMETCO-Prozess
Zink	100	95	99
Eisen	100	99	98

Tabelle 27 zeigt die theoretisch rückgewinnbaren Metallmengen aus Hochofenschlamm und Konverterrückständen. Die erste Spalte beinhaltet zum Vergleich die zuvor in Kapitel 4.7.a) berechneten Metallverluste.

Würden alle Rückstände mit dem DK-Prozess verwertet werden, könnten die berechneten Metallverluste vollständig vermieden werden, wie die zweite Spalte von Tabelle 27 zeigt. Wie aber bereits erwähnt ist dies aus logistischen und damit auch finanziellen Gründen kaum möglich.

Tabelle 27: Theoretische Rückgewinnungsmengen von Zink und Blei aus Hochofenschlamm und Konverterrückständen durch Anwendung verschiedener Verfahren

	Berechnete Verluste aus Kapitel 4.7.a)		Rückgewinnung in t							
			Anwendung DK-Prozess		Anwendung OxyCup-Prozess		Anwendung INMETCO-Prozess		Kombination von DK- und OxyCup-Prozess	
			von	bis	von	bis	von	bis	von	bis
Zink	658	5.631	658	5.631	625	5.350	651	5.575	641	5.490
Eisen	94.061	150.529	94.061	150.529	93.121	149.024	92.180	147.159	93.591	149.777

Mit dem INMETCO-Prozess könnten größere Mengen an Metallen zurückgewonnen werden als mit dem etablierten OxyCup-Prozess. Beispielsweise können mit dem OxyCup-Prozess mindestens 625 Tonnen Zink, mit dem INMETCO-Prozess hingegen 651 Tonnen Zink zurückgewonnen werden. Allerdings ist der Unterschied der Verfahren bei der

Rückgewinnung von Zink und Eisen nicht so groß, dass sich der Aufwand zur Etablierung des neuen Verfahrens lohnen würde. Am vorteilhaftesten scheint letztendlich eine Kombination von DK- und OxyCup-Prozess zu sein, wie die letzte Spalte von Tabelle 27 zeigt. Mit dieser Verfahrenskombination, bei der jedes Verfahren jeweils die Hälfte der deponierten Rückstände verwertet, können mindestens 641 Tonnen Zink und 93.591 Tonnen Eisen zurückgewonnen werden. Damit kann zwar weniger Zink, als bei alleiniger Anwendung des INMETCO-Prozesses gewonnen werden, dafür aber mehr Eisen.

EAF-Staub

Die Nutzwertanalyse für die Verfahren zur Verwertung von EAF-Staub ergab, dass der Primus- und der INMETCO-Prozess einem höheren Rang zugeordnet wurden als der etablierte Wälzprozess. Die Sensitivitätsanalyse bestätigte dieses Ergebnis. Tabelle 28 zeigt die Wertstoffausbringungsraten der genannten Prozesse, mit denen die theoretisch rückgewinnbaren Mengen in Tabelle 29 berechnet wurden.

Tabelle 28: Wertstoffausbringung der Verfahren zur Verwertung von Elektroofenstaub (35) (37) (85)

Wertstoffaus- bringungsrate in Prozent	Wälzprozess	Primus- Prozess	INMETCO- Prozess
Zink	85-95	95	99
Eisen	50-75	99	98

Im Vergleich (Tabelle 29) zeigt sich, dass mit Primus- und INMETCO-Prozess mehr Eisen und Zink aus EAF-Stäuben zurückgewonnen werden könnten, als mit dem Wälzprozess. Die minimalen und maximalen Zinkgewinnungsmengen unterscheiden sich allerdings nur geringfügig.

Tabelle 29: Theoretische Rückgewinnungsmengen von Zink und Eisen aus Elektroofenstaub durch Anwendung verschiedener Verfahren

	Berechnete Verluste aus Kapitel 4.7.a)		Rückgewinnung in t					
			Anwendung Wälzprozess		Anwendung Primus-Prozess		Anwendung INMETCO-Prozess	
	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis
Zink	115	861	98	818	109	818	114	853
Eisen	574	3.732	287	2.799	568	3.695	563	3.658

Der rechnerische Vergleich zeigt, dass die Metallrückgewinnungsmengen des Primus- und des INMETCO-Prozesses ähnlich sind. Allerdings können mit diesen alternativen Verfahren mindestens 109 Tonnen bzw. 114 Tonnen Zink zurückgewonnen werden, im Gegensatz zum Wälzprozess mit 98 Tonnen Zink. Die Rückgewinnung von Eisen fällt beim Primus- und INMETCO-Prozess gegenüber dem Wälzprozess sogar noch höher aus. Im besten Fall können die gesamten Metallverluste von 3.732 Tonnen Eisen pro Jahr mit den beiden alternativen Verfahren zurückgewonnen werden (3.695 Tonnen bzw. 3.658 Tonnen Zink), während mit dem Wälzprozess nur maximal 2.799 Tonnen Zink gewonnen werden können.

Diese Prozesse haben zudem gegenüber dem etablierten Wälzprozess weitere Vorteile. So führt die Eisenrückgewinnung des Primus-Prozesses dazu, dass die entstehende Prozessschlacke sehr metallarm ist und dadurch gut im Baubereich verwertet werden kann. Im Wälzprozess muss die Schlacke dagegen teilweise deponiert werden, wodurch das enthaltene Eisen verloren geht.

4.8 Ergebnisse des Verfahrensvergleichs

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die betrachteten alternativen Verfahren Primus und INMETCO zur Verwertung von Hochofenschlamm und Konverterrückständen keine höheren Metallrückgewinnungsraten erreichen können als die etablierten Verfahren DK und OxyCup. Allerdings ist der DK-Prozess kaum in bestehende Prozesse der Eisen- und Stahlindustrie zu integrieren. Für eine gesteigerte Metallrückgewinnung scheint daher eine Kombination von DK- und OxyCup-Prozess sinnvoll. Zur Verwertung von Elektroofenstaub erreichen die alternativen Verfahren Primus und INMETCO höhere Metallrückgewinnungsraten als der etablierte Wälzprozess.

5 Hemmnisse der Verfahrensetablierung

5.1 Einleitung

Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass eine Etablierung von alternativen Verfahren zu einer effektiveren Rückstandsverwertung führen könnte. Die Situation in der Realität stellt sich aber meist anders dar. Verschiedene Hemmnisse führen dazu, dass die Unternehmen effizientere Verfahren oder Maßnahmen nicht umsetzen können. Welche Hemmnisse zur Verfahrensetablierung bei der Rückstandsverwertung bestehen, wurde durch eine Expertenbefragung untersucht. An dieser nahmen vier integrierte Hüttenwerke und fünf Elektrostahlwerke teil. Mit den Interviews sollte herausgefunden werden, warum einige Rückstände der Eisen- und Stahlindustrie abgelagert werden und welche entsprechenden Verwertungsmöglichkeiten den Stahlwerken bekannt sind. Zum anderen sollte erfragt werden, mit welchen Ansätzen eine Etablierung von Verwertungsverfahren in der Industrie möglich wäre und welche Voraussetzungen dafür geschaffen werden müssten.

In Kapitel 5.3 werden die Ergebnisse der Befragung zusammengefasst. Zunächst wird die Frage beantwortet, warum der derzeitige Umgang mit den anfallenden Rückständen – Hochofenschlamm, Konverterrückstände und Elektroofenstaub – gängige Praxis ist. Als zweites wird der Bekanntheitsgrad von etablierten und alternativen Verwertungstechnologien für die genannten Rückstände analysiert. Hierbei ist vor allem die Meinung der befragten Experten zu den ihnen bekannten Verwertungsverfahren interessant und warum diese nicht genutzt werden. Letztendlich sollen Hemmnisse und Fördermöglichkeiten zur Nutzung von Verwertungstechnologien für die genannten Rückstände herausgearbeitet werden, um so Ansätze für ein Open-Loop-Recycling zu finden.

Die Interviews wurden im Rahmen einer Masterarbeit „Ansätze zur Etablierung von Verwertungstechnologien in der deutschen Eisen- und Stahlindustrie für derzeit noch abgelagerte Stäube und Schlämme“ von F. Genghammer (116) durchgeführt. Mit freundlicher Genehmigung der Studentin wurden die erhobenen Daten genutzt, um Hemmnisse der Verfahrensetablierung aufzudecken. Aus Datenschutzgründen ist die Arbeit nicht veröffentlicht.

5.2 Methode: Experteninterviews

Die Methode der Experteninterviews eignete sich für die Untersuchung im Besonderen, da Expertenwissen und keine persönlichen Daten abgefragt werden sollten. Die Methode stammt aus den Sozialwissenschaften. Anders als in diesem Fachbereich, werden beim Experteninterview keine sozialen Themen wie zum Beispiel menschliche Verhaltensweisen untersucht. Die Abfrage ist faktenbasiert und ergründet den Kenntnisstand und die fachliche Meinung der Experten. (117) Die Durchführung der Interviews orientierte sich an (118) (119) (120). Durch die qualitative Methode der leitfadengestützten, nichtstandardisierten Interviews wurden keine statistischen Ergebnisse erfasst (118).

Als Experten wurden Mitarbeiter von Stahlwerken kontaktiert, die für die Entsorgung von Rückständen in ihrem Unternehmen zuständig sind. Dazu dienten die Mitgliederliste und die

Standortübersicht der Stahlwerke in Deutschland von der Wirtschaftsvereinigung Stahl. Die Liste umfasst 21 Stahlwerke von denen 13 zufällig ausgewählt und angefragt wurden. Letztendlich wurden insgesamt neun Experten aus vier integrierten Hüttenwerken und fünf Elektrostahlwerken befragt.

Für die Befragungen wurde ein Interviewleitfaden erstellt. Mit einem Experteninterview als Leitfadenterview wird sichergestellt, dass alle wichtigen Aspekte zum Sachverhalt abgefragt werden. Der Leitfaden beinhaltet vorgegebene Themen anhand einer Frageliste. Fragewortlaut und Antwortmöglichkeiten sind nicht vorgegeben. Die Reihenfolge der Fragen ist nicht unbedingt fix, da die interviewten Experten teilweise selbst zu einem anderen relevanten Thema wechseln. Diese Flexibilität ist für Experteninterviews besonders wichtig, da unbekanntes Wissen erfragt wird. Dadurch hat der Interviewer die Möglichkeit auf die Antworten der Experten zu reagieren. (118)

Der Interviewleitfaden enthielt Fragen, um Gründe für die Ablagerung von Rückständen wie Hochofenstaub und -schlamm, Elektroofenstaub sowie Konverterrückständen zu finden. Außerdem wurde der Bekanntheitsgrad der in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren abgefragt. Weiterhin sollten die Experten erklären, wie ihrer Meinung nach die Verwertungsverfahren etabliert werden könnten, welche Anreize es geben müsste und wie offen die Unternehmen für Kooperationen zum Beispiel bei der Anschaffung einer Verwertungsanlage sind.

Die Interviews wurden telefonisch mit Protokollierung durchgeführt. Eine Aufzeichnung lehnten die meisten Experten ab. Anschließend erfolgte eine Transkription mit Anonymisierung der befragten Experten.

Die Auswertung der Interviews erfolgte mit der Methode der qualitativen Inhaltsanalyse. Dabei werden die protokollierten Interviews so aufbereitet, dass die relevanten Informationen extrahiert werden. (118) Im vorliegenden Fall geschah dies getrennt nach integrierten Hüttenwerken und Elektrostahlwerken. Die Informationen wurden anschließend tabellarisch dargestellt. Dadurch konnten die verschiedenen Aussagen gegenübergestellt werden, um Unterschiede und Ähnlichkeiten zu erfassen. (116)

Die Methode der Experteninterviews ist bei jeder Anwendung anders, da Strukturierung und Offenheit variieren. Die Vorgehensweise stützt sich vor allem auf die jeweiligen Forschungsfragen und die Ziele der Untersuchung. (119)

5.3 Ergebnisse der Expertenbefragung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Experteninterviews zusammengefasst und interpretiert. Ein Abdruck der Interviewprotokollierung kann aus Datenschutzgründen in dieser Arbeit nicht erfolgen.

5.3.a) Gründe für die Deponierung von Rückständen

Mehrere der befragten Experten aus den integrierten Hüttenwerken gaben an, dass für die derzeitig deponierten Rückstände keine Möglichkeit besteht, diese zu verwerten und kein entsprechender Markt vorhanden sei. Ebenso sei eine interne Rückführung aufgrund der

Inhaltsstoffe der Rückstände meist nicht möglich. Dies gelte vor allem für Konverterrückstände und Hochofenschlamm. Ein wichtiger Aspekt für die Verwertung von Rückständen sei zudem die Wirtschaftlichkeit, da die für das Werk günstigste Möglichkeit der Entsorgung gewählt wird.

Auch bei der Deponierung von EAF-Staub spiele die Zusammensetzung des Rückstandes eine große Rolle. So werde bei zu geringen Zink- und Bleigehalten die günstigere Variante der Ablagerung gewählt, da der finanzielle und energetische Aufwand für die Rückgewinnung zu hoch wäre.

Die Aussagen der Experten zeigen, dass bei der Verwertung von Rückständen hauptsächlich wirtschaftliche Aspekte eine Rolle spielen. So ist die Deponierung von Rückständen die wirtschaftlichste Variante. Daher müssten alternative Verwertungsverfahren finanziell lohnender sein.

5.3.b) Bekanntheitsgrad von Verwertungsverfahren

Abbildung 34 zeigt, wie die Experten auf die Fragen zu bestimmten Verwertungsverfahren für Hüttenreststoffe reagiert haben. Zu erkennen ist, dass allen befragten Experten die etablierten Verfahren DK- und OxyCup-Prozess bekannt sind. Aber auch die in Deutschland nicht etablierten Verfahren INMETCO und Primus sind drei von vier Experten geläufig. Die Hälfte der Experten kennt auch den RedIron-Prozess, als einen der RHF Prozesse (siehe Kapitel 4.4.d)).

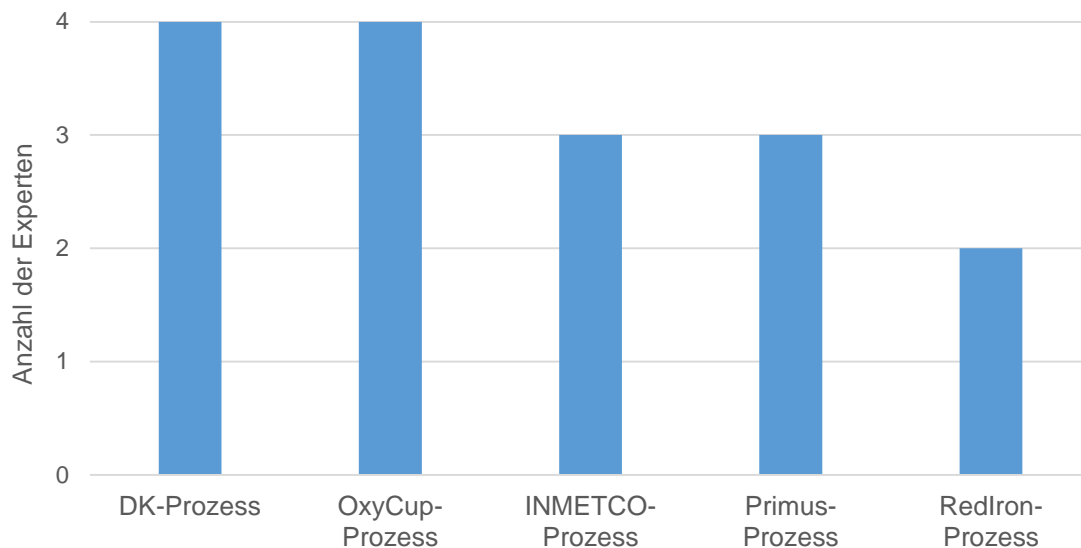


Abbildung 34: *Bekanntheitsgrad etablierter und alternativer Verfahren zur Verwertung von Hüttenreststoffen*

Auch bei den Verwertungsverfahren für Elektroofenstaub ist allen Experten der etablierte Wälzprozess bekannt (vgl. Abbildung 35). Allerdings kennen jeweils nur zwei der fünf

befragten Experten den Primus- und den ScanDust-Prozess. Der INMETCO-Prozess ist nur einem Experten geläufig.

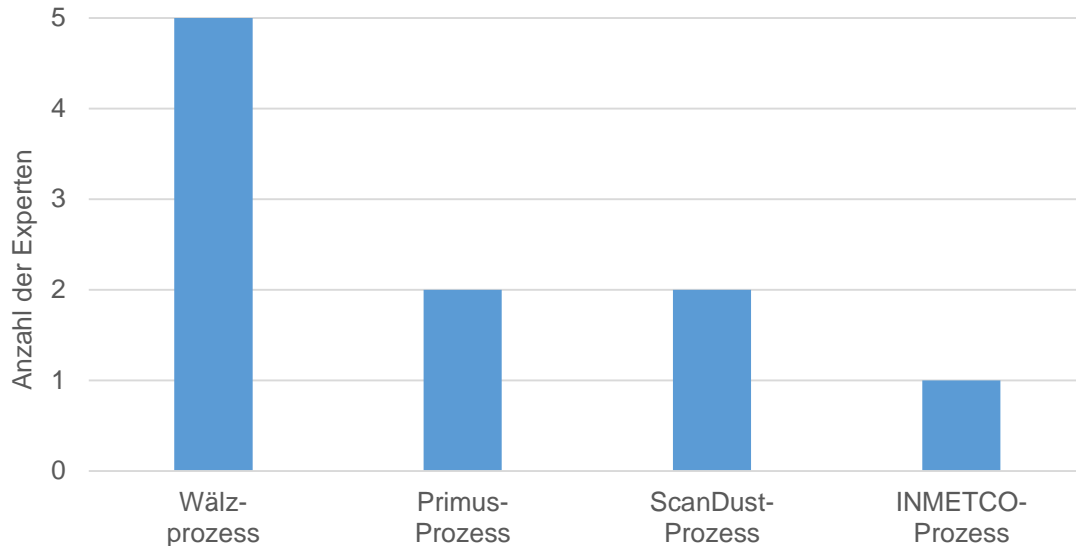


Abbildung 35: Bekanntheitsgrad etablierter und alternativer Verfahren zur Verwertung von EAF-Staub

Aus diesen Ergebnissen kann der Schluss gezogen werden, dass integrierte Hüttenwerke sich insgesamt mehr mit möglichen Verwertungsverfahren für Rückstände beschäftigen, im Gegensatz zu Elektrostahlwerken (116). Dies könnte damit zusammenhängen, dass Hüttenwerke insgesamt mit vielen verschiedenen Rückständen in größeren Mengen umgehen müssen als Elektrostahlwerke. Zudem verfügen Hüttenwerke über viele verschiedene Prozesse, die eine Verwertung von Rückständen ermöglichen (Produktionsrücklauf). Die Elektrostahlproduktion benötigt weniger Teilprozesse, sodass keine Produktionsrückläufe stattfinden können. Die Elektrostahlwerke geben die anfallenden Rückstände daher eher an externe Verwerter ab und beschäftigen sich so weniger mit den anschließend angewendeten Verwertungsverfahren.

5.3.c) Bewertung der Verfahren durch die Experten

Für die vorliegende Arbeit ist von besonderem Interesse, welche Meinung die Experten zu den vorgestellten Verwertungsverfahren haben und ob sich darin Gründe finden lassen, warum trotz vorhandener etablierter und alternativer Verfahren die Rückstände teilweise nicht verwertet werden.

Zunächst sollen hier die Aussagen der Hüttenwerke zusammengefasst werden. Wie bereits im letzten Kapitel festgestellt, ist das Wissen zu Verwertungsverfahren bei den Hüttenwerken umfangreicher. Dadurch konnten hier mehr Aussagen zu den Verwertungsverfahren gewonnen werden.

Einer der Experten führt die relativ geringe Verwertungsrate von Gichtschlamm auf den geringen Eisengehalt des Rückstandes zurück. Alternative Verfahren wären nur bei hohen Eisengehalten sinnvoll. Allerdings äußert der Experte auch, dass die Eisengewinnung derzeit

nicht von Interesse ist, da der Rohstoff Eisen zurzeit nicht wertvoll genug ist. Speziell zu den in Deutschland etablierten Verfahren zur Verwertung von Hüttenreststoffen sagt dieser Experte, dass diese Technologien (DK- und OxyCup-Prozess) derzeit zu teuer wären.

Auch ein anderer Experte meint, dass die alternativen Verwertungsverfahren für Hüttenreststoffe nicht wirtschaftlich sind, weil die Innovations- und Betriebskosten die Gewinne durch die extrahierten Rohstoffe übersteigen würden. Ein weiterer Experte machte diese Aussagen bezogen auf den OxyCup-Prozess. Bei diesem Verfahren würden angeblich technische Probleme bestehen.

Eine Aussage zum DK-Prozess trafen zwei Experten: Die DK Recycling und Roheisen GmbH hätte derzeit zu wenig Kapazitäten für Gichtschlämme und verlange außerdem Zuzahlungen. Nur ein Experte äußerte sich zu INMETCO- und Primus-Prozess: Diese Verfahren wären derzeit nicht wirtschaftlich. Zwei Experten äußerten sich zum RedIron-Prozess, welcher nach Ihren Kenntnisständen zu hohe Investitionskosten ohne ausreichenden Kapitalrückfluss verursachen würde. Zudem wäre die Verwertung im Sinter besser.

Einer der befragten Experten eines Elektrostahlwerkes bestätigte die in dieser Arbeit bereits genannten Nachteile des Wälzprozess, dass die eisenhaltige Schlacke als weiterer Abfall deponiert werden muss und dass das enthaltene Eisen nicht zurückgewonnen wird. Dies würde wiederum daran liegen, dass Eisen derzeit als Rohstoff zu wenig wert ist. Die Aussagen zu den Verfahren Primus, INMETCO und ScanDust waren einheitlich: Diese Verfahren wären derzeit nicht wirtschaftlich. Nur der ScanDust-Prozess wäre bei der Verwertung von Edelstahlstäuben wirtschaftlich.

Auch bei der Einschätzung der Verfahren seitens der Experten ist die Wirtschaftlichkeit der wichtigste Aspekt. Unternehmen müssen wirtschaftlich agieren, um konkurrenzfähig zu sein. Ein alternatives Verwertungsverfahren wird sich nicht allein durch die Vorteile der Ressourceneffizienz durchsetzen können.

5.3.d) Ansätze zur Etablierung

Als letztes wurde durch die Befragungen untersucht, unter welchen Voraussetzungen die Stahlwerke die derzeit noch deponierten Rückstände anders verwerten würden.

Nach den Aussagen der Experten ist auch hier, wie bereits bei der Beurteilung der Verfahren durch die Experten, die Wirtschaftlichkeit eines Verfahrens die wichtigste Voraussetzung. Um Investitions- und Betriebskosten eines Verfahrens verringern zu können, müssten die Rohstoffpreise entsprechend hoch sein, damit sich die Anschaffung einer eigenen Verwertungsanlage lohnt. Eisen, Zink und Blei wären derzeit nicht wertvoll genug oder sind nicht ausreichend in den deponierten Rückständen vorhanden.

Ein anderer Kostenaspekt sind Transportkosten zu Verwertungsanlagen, wenn keine eigene Anlage am Standort angeschafft werden kann.

Zwei der Experten sprechen die gesetzliche Lage an, die die Verwertung der Rückstände in Baustoffen verhindert. Zudem würden sich Gesetze für Immissionsschutz, Gewässerschutz

und Kreislaufwirtschaft teilweise widersprechen. Beispielsweise soll auf der einen Seite eine möglichst hohe Verwertungsrate erreicht werden, wohingegen auf der anderen Seite starke Einschränkungen für die Inhaltsstoffe der Rückstände gesetzlich vorliegen. Die Experten merken an, dass anstatt Auflagen und Verboten Förderungen oder Differenzkostenerstattungen eingeführt werden sollten, um die Etablierung von Verfahren bei den Stahlwerken und Kooperationen der Unternehmen bei der Verwertung zu unterstützen.

Dies lässt den Schluss zu, dass für die Unternehmen vor allem finanzielle Anreize geschaffen werden müssen, um alternative Verfahren zu etablieren.

5.3.e) Allgemeine Probleme zur Etablierung eines Verwertungsverfahrens

In diesem Abschnitt sollen kurz allgemeine Probleme der Verfahrensetablierung zusammengefasst werden, die von den Experten unaufgefordert angesprochen wurden.

Zum einen existieren auf dem weltweiten Stahlmarkt Überkapazitäten. Durch das Überangebot stehen die Unternehmen in großer Konkurrenz zueinander. Eine Investition wie eine zusätzliche Anlage lohnt sich daher nur bei schneller Amortisation.

Zum anderen müsste ein Verwertungsverfahren individuell an das jeweilige Unternehmen angepasst werden. Die Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse unterscheiden sich in jedem Unternehmen und auch die Rückstände sind je nach Betrieb anders zusammengesetzt.

Diese Aussagen zeigen, dass die Konkurrenzsituation in der Eisen- und Stahlbranche besonders stark ausgeprägt ist, was den Kostendruck erhöht und die Etablierung alternativer Verfahren noch schwieriger macht. Zusätzlich hat jedes Unternehmen individuelle Ansprüche, die es bei der Etablierung zu berücksichtigen gilt.

6 Zusammenfassung der Ergebnisse und Handlungsempfehlungen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und entsprechende Handlungsempfehlungen formuliert.

Die Bedeutung der Eisen- und Stahlindustrie für Deutschland wurde in Kapitel 2.1 dargelegt. Die Rohstoffversorgung dieser Industrie spielt eine wichtige Rolle für die Gesamtwirtschaft Deutschlands und sollte daher für die Zukunft gesichert werden.

Die Methode des Stoffstrommanagements wurde in dieser Arbeit zum Auffinden von Open-Loop-Recyclingmöglichkeiten und damit zur Identifizierung von Optionen zur Steigerung der Ressourceneffizienz in der Eisen- und Stahlindustrie verwendet. Durch ein Stoffstrommanagement sollen Stoffflüsse so beeinflusst werden, dass ein bestimmtes Ziel erreicht werden kann.

Dazu wurde in Kapitel 2 ein Modell der Prozesskette der Eisen- und Stahlindustrie entwickelt. In der anschließenden Analyse dieses Modells in Kapitel 3 zeigte sich die starke Vernetzung der Stoffströme innerhalb der Industrie aber auch nach außen.

Die erste Forschungsfrage

Wie kann die Ressourceneffizienz der Eisen- und Stahlindustrie in Bezug auf die Rohstoffnutzung eingeschätzt werden?

kann mit dieser Übersicht zu allen Stoffströmen der Eisen- und Stahlindustrie beantwortet werden. Die bereits vorhandene starke Vernetzung weist auf eine effiziente Rohstoffnutzung hin, bei der wenig Material verschwendet wird. Die derzeitige Ressourceneffizienz der Eisen- und Stahlindustrie ist demnach bereits hoch.

Trotzdem konnten Verknüpfungsansätze identifiziert werden. Es wurden Stoffströme aufgezeigt, bei denen Rohstoffe durch Ablagerung für die gesamtdeutsche Industrie verloren gehen. Als Verknüpfungsansätze wurden die Stoffströme von Hochofenschlamm, Konverterrückständen und EAF-Staub, die teilweise noch deponiert werden, identifiziert.

Für die Verwertung dieser Rückstände existieren einige Verfahren, die in Deutschland nicht angewendet werden. Diese und die derzeit in Deutschland etablierten Verfahren sind in Kapitel 4 beschrieben und verglichen worden.

Mit der Nutzwertanalyse konnte die zweite Forschungsfrage

Welche Verfahren eignen sich, um weiteres Open-Loop-Recycling in der Branche zu etablieren?

beantwortet werden. Dabei stellte sich heraus, dass für Hochofenschlamm und Konverterrückstände die bereits etablierten Verfahren am besten zur Verwertung dieser Rückstände geeignet sind. Das Ergebnis der Analyse für EAF-Staub zeigte allerdings, dass der etablierte Wälzprozess einige Nachteile mit sich bringt. Das Ergebnis der Nutzwertanalyse wies den Primus- oder den INMETCO-Prozess als bessere Verfahren zur Verwertung des EAF-Staubes aus.

Um die dritte Forschungsfrage

Wie kann die Ressourceneffizienz der Eisen- und Stahlindustrie durch Open-Loop-Recycling weiter gesteigert werden?

zu beantworten, wurde berechnet, welche Metallverluste durch die Anwendung der alternativen Verfahren vermieden werden können. Im Ergebnis zeigte sich, dass mithilfe eines Open-Loop-Recyclings unter Anwendung des Primus- oder INMETCO-Prozesses eine Steigerung der Ressourceneffizienz in der Eisen- und Stahlindustrie möglich ist.

Weiterhin wurden zur Beantwortung der dritten Forschungsfrage Experteninterviews (Kapitel 5) durchgeführt. Mit den Interviews wurden nicht nur die bisherigen Ergebnisse der Arbeit hinterfragt, sondern auch Möglichkeiten und Hemmnisse der Etablierung alternativer Verfahren aufgezeigt.

Die Interviews gaben Aufschluss über Gründe der Deponierung von Rückständen, den Bekanntheitsgrad der Verfahren und die Meinung der Experten zu den etablierten und alternativen Verwertungsverfahren. Im Ergebnis muss ein alternatives Verwertungsverfahren, aufgrund des hohen Konkurrenzdrucks in der Branche, wirtschaftlich für die Unternehmen sein. Diese Wirtschaftlichkeit könnte auch durch finanzielle Anreize geschaffen werden. Die Situation der einzelnen Unternehmen in der Branche konnte anhand der Expertenaussagen verstanden werden, sodass die Voraussetzungen für mehr Open-Loop-Recycling erkannt wurden und in die Handlungsempfehlungen einfließen.

Die aus den Ergebnissen abgeleiteten Handlungsempfehlungen zur Schaffung und Unterstützung von Open-Loop-Recyclingmöglichkeiten sind in Tabelle 30 zusammengefasst.

Tabelle 30: Handlungsempfehlungen zur Schaffung und Unterstützung von Open-Loop-Recyclingmöglichkeiten

Verwertung von Hochofenschlamm und Konverterrückständen	Verwertung von EAF-Stäuben
<ul style="list-style-type: none"> • Stärkere Nutzung von DK und OxyCup • Transportkostenanalyse für DK • Investitionskostenrechnung für OxyCup • Standortanalyse für gemeinsam genutzte Anlage • Szenarien zur Finanzierung von Anlagen (in Abhängigkeit von steigenden Rohstoffpreisen, staatliche Förderung usw.) 	<ul style="list-style-type: none"> • Investitionskostenrechnung für Primus und/oder INMETCO • Weitere Forschung zur Verbesserung des Wälzprozesses • Szenarien zur Finanzierung von Anlagen (in Abhängigkeit von steigenden Rohstoffpreisen, staatliche Förderung usw.)
Standortanalyse für gemeinsam benutzte Anlage zur Verwertung von Rückständen aus Primär- und Sekundärstahlerzeugung (Primus, INMETCO)	
Weitere Forschung zu neuen Verwertungsverfahren	

Zur Verwertung von Hochofenschlamm und Konverterrückständen stellten sich die etablierten Verfahren als am vorteilhaftesten heraus. Daher sollten der DK- und der OxyCup-Prozess von den ansässigen Unternehmen mehr genutzt werden. Wie sich in den Experteninterviews zeigte, sind die Kosten dabei das größte Hemmnis. Die Anschaffung einer eigenen Verwertungsanlage für den OxyCup-Prozess oder die Transportkosten zur Verwertung der Rückstände im DK-Prozess übersteigen die derzeitigen Ausgaben für Deponierung oder sonstige Ablagerung. Zur Etablierung des OxyCup-Prozesses sollte eine umfassende Investitionskostenrechnung mit Amortisationsrechnung durchgeführt werden, um feststellen zu können, ab wann sich eine eigene Verwertungsanlage für ein Unternehmen lohnt. Dabei könnten bereits Einschätzungen zu notwendigen Förderungen seitens des Staates vorgenommen werden. Zur Nutzung des DK-Prozesses müsste eine Transportkostenanalyse durchgeführt werden, wobei die Kapazitäten des Prozesses evtl. nicht ausreichen. Es wird eine GIS-basierte Standortanalyse für eine von mehreren Unternehmen genutzte Anlage (OxyCup oder DK) vorgeschlagen. Neben der Untersuchung, welche Rückstände der Kooperationspartner in welchem Verfahren am effektivsten verwertet werden können, muss die gemeinsame Finanzierung einer solchen Anlage berechnet werden. Weiterhin sollte eine Förderung zur Verwertung von Seiten des Staates überlegt werden. Dazu sollten Szenarien entworfen werden, die zur Beratung der Politik Fördervolumen unter verschiedenen Voraussetzungen berechnen. Zu berücksichtigen sind

dabei auch steigende Rohstoffkosten und damit einhergehende höhere Erlöse der Rohstoffrückgewinnung.

Für die Verwertung von EAF-Stäuben stellte sich das etablierte Verfahren – der Wälzprozess – nicht als vorteilhaftestes Verfahren für die Ressourceneffizienz heraus. Stattdessen sollte die Etablierung des Primus- oder INMETCO-Prozesses vorangetrieben werden. Auch hier wird eine Investitionskostenrechnung für eine eigene oder eine gemeinschaftlich genutzte Anlage vorgeschlagen. Die oben beschriebene Szenarioanalyse wird hier ebenfalls empfohlen. Ein anderer Ansatz sollte in Richtung Forschungsförderung verfolgt werden. Der Wälzprozess ist in den letzten Jahren immer wieder verbessert worden. Die weitere Forschung an diesem Prozess könnte die derzeitigen Nachteile beheben. Hier sollte vor allem die Wertstoffausbringung des Prozesses verbessert und Rohstoffrückgewinnung aus der Wälzschlacke forciert werden.

Sinnvoll wäre auch eine Standortanalyse für eine Anlage, die sowohl Rückstände aus der Primär- als auch aus der Sekundärerzeugung verwerten kann. Dies trifft auf den Primus- und den INMETCO-Prozess zu. Diese Verfahren lagen in der Nutzwertanalyse der Verfahren zur Verwertung von Hochofenschlamm und Konverterrückständen zwar hinter den etablierten Verfahren, durch eine Kooperation von mehreren Unternehmen könnte sich eine Investition in diese Verfahren aber lohnen und die Ressourceneffizienz der Anlage insgesamt gesteigert werden.

Darüber hinaus wird empfohlen weitere Forschung an allen beschriebenen Verfahren zu betreiben, um die Wirtschaftlichkeit dieser zu gewährleisten oder weitere Verfahren zu entwickeln.

Die letzte Forschungsfrage

Kann ein Stoffstrommanagement zum Auffinden von Optimierungspotenzialen hinsichtlich Ressourceneffizienz eingesetzt werden?

kann mit einem Ja beantwortet werden. Diese Arbeit zeigt, wie mithilfe eines Stoffstrommanagements Optimierungspotenziale einer Branche durch Identifikation und Analyse von Stoffströmen herausgearbeitet werden können. Eine Einschätzung des Stoffstrommanagements hinsichtlich den Zielen der Arbeit wird im nächsten Kapitel bei der Methoden- und Ergebnisdiskussion vorgenommen.

7 Methoden- und Ergebnisdiskussion

Zu Beginn der Arbeit konnte durch Recherchen (z. B. (15) und (89)) und die Erstellung des Stoffstrommodells (Kapitel 2) festgestellt werden, dass in der Eisen- und Stahlindustrie bereits ein hohes Maß an Ressourceneffizienz erreicht ist. Dies resultiert aus den gesetzlich geregelten Einschränkungen der Deponierung und den Bemühungen der Unternehmen zu CO₂-Einsparungen (siehe CO₂-Monitoring-Fortschrittsberichte der deutschen Stahlindustrie, z. B. (15)). Die Möglichkeiten, die Verwertung durch Verbote zu regeln, sind aber anscheinend ausgeschöpft.

Das Stoffstrommanagement ist eine vielfach verwendete Methode zur Bewertung der ökologischen Einflüsse von Prozessen und Stoffen. Sie wird von der Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages „Zum Schutz des Menschen und der Umwelt“ als Methode zur Steigerung der Ressourceneffizienz empfohlen (8). Meist wird eine Verminderung von umweltschädlichen Einflüssen durch zum Beispiel Schwermetalle, anorganische Schadstoffe, Chlororganika oder aromatische Kohlenwasserstoffe (9) angestrebt. Die Methode wird auch zur Bewertung und Steigerung der Ressourceneffizienz eingesetzt. Dabei kann es das Ziel sein, Möglichkeiten für eine Steigerung von Energie- oder Rohstoffeffizienz aufzuzeigen oder Prozesse und Prozesssysteme effizienter zu gestalten. In jedem Fall werden Sachverhalte untersucht, die nach einer konkreten Entscheidung verlangen (9).

Ressourceneffizienz ist ein viel verwendeter Begriff, der aber unterschiedlich definiert wird. Ökobilanzen, aus denen das Stoffstrommanagement hervorgegangen ist, sind ebenfalls Methoden zur Bewertung der Ressourceneffizienz. Dabei werden die Prozesse nach ökologischen Kriterien und Umwelteinflüssen bewertet. Folgt man nicht der Definition der Enquete-Kommission (9), kann Ressourceneffizienz auch als Verhältnis von Nutzen und Aufwand beschrieben werden. Diese Definition betrachtet allerdings nur Materialinnovationen zur Steigerung der Ressourceneffizienz. (121)

Von der Bundesregierung wurde der Begriff Ressourcenproduktivität eingeführt. Dieser beschreibt das Verhältnis des Bruttoinlandsproduktes zum Verbrauch nicht-erneuerbarer Ressourcen. Der Indikator misst die Effizienz einer Volkswirtschaft im Hinblick auf den Umgang mit nicht erneuerbaren Rohstoffen. (122) Das statistische Bundesamt pflegt hierzu die Daten für Deutschland. Im Zuge der Ressourcenproduktivität wurden weitere Rohstoffindikatoren definiert, die auch auf Produkte oder Dienstleistungen anwendbar sind. Zu diesen Indikatoren gehören beispielsweise der Energieindikator KEA (kumulierter Energieaufwand) und der Ressourcenindikator KRA (kumulierter Ressourcenaufwand).

Im Zuge eines Projektes des IFEU-Instituts wurde ein gewichteter Indikator als Weiterentwicklung der Rohstoffproduktivität definiert, der nachvollziehbarer und praktikabler sein sollte. Der Indikator misst die Umwelteinwirkungsbelastung und nennt sich daher UEBEL. Gemessen wird die Belastung auf ein Schutzgut. Ein UEBEL sind dabei 250 Mio. t CO₂-Äquivalent pro Jahr. Die Umrechnung kann wie in einer Ökobilanz auch auf andere Äquivalenzen zum Beispiel für umweltrelevante Gase erfolgen. (122) Ein anderer Indikator zur Messung der Ressourcenproduktivität ist der Material-Input pro Serviceeinheit (MIPS).

Dieser Indikator gibt an, wie viele Ressourcen für ein Produkt oder eine Dienstleistung eingesetzt werden. Der Kehrwert von MIPS ist die Ressourcenproduktivität. Bei diesem Konzept werden alle Ressourcenverbräuche bei Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Produktes auf die Ressourcenverbräuche aus der Natur heruntergerechnet. (123)

Für die Bewertung der Ressourceneffizienz von Prozessen und Prozesssystemen sind diese Rohstoffindikatoren prinzipiell anwendbar, jedoch bedarf es wie bei einer Ökobilanz einer recht umfassenden Datenlage oder einer Menge an Annahmen und Schätzungen. Zudem beschreiben die Indikatoren Umwelteinwirkungen, was hier nicht im Fokus stand.

Vom BMBF wurde das Projekt ESSENZ zur Messung von Ressourceneffizienz gefördert. Durchgeführt wurde das Vorhaben an der TU Berlin vom Fachgebiet Sustainable Engineering in Kooperation mit mehreren Unternehmen. Im Projekt wurde Ressourceneffizienz als Verhältnis von Wertschöpfung und Rohstoffverbrauch definiert. Es wurde ein Indikatorenset zur Bewertung von Ressourceneffizienz entwickelt. Die Anwendbarkeit in verschiedenen Bereichen und vor allem in der unternehmerischen Praxis stand dabei im Vordergrund. In dieser Arbeit war dieses Set allerdings nicht adäquat, da die Evaluation zum Beispiel Umweltverschmutzung und Ressourcenverfügbarkeit beinhaltet.

Ein Indikator, der die Wirtschaftlichkeit mit einbezieht, ist das Life Cycle Costing (LCC). Ähnlich wie bei einer Ökobilanz werden Stoffflüsse betrachtet, dann allerdings mit Kosten bewertet. Durch die Betrachtung der Kosten können Optimierungspotenziale gefunden werden, die letztendlich zum Beispiel durch Materialeinsparungen ebenfalls die Ressourceneffizienz erhöhen können. (124)

Im Allgemeinen hat Ressourceneffizienz aber wenig mit Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zu tun, sondern mit gesellschaftlichen und ökologischen Zielen. Letztendlich spielen aber auch diese Aspekte in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Unternehmen hinein, wenn zum Beispiel durch eine Rohstoffknappheit hohe Kosten in der Materialbeschaffung entstehen.

Dass die Definition von Ressourceneffizienz nicht einheitlich ist, erschwert es in der Praxis häufig, Prozesse und Produkte zu bewerten. Der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) hat dazu Richtlinien erstellt, die Unternehmen helfen sollen, ihre Prozesse, Produkte oder das gesamte Unternehmen hinsichtlich Ressourceneffizienz zu bewerten (125).

Als Fazit ist festzustellen, dass es möglich gewesen wäre, Indikatoren zur Messung von Ressourceneffizienz anzuwenden. Allerdings hätten damit keine Optimierungsansätze gefunden werden können. Die Methode des Stoffstrommanagements ist im Bereich der Ressourceneffizienz für das hier gesetzte Ziel adäquat.

Wie bereits erwähnt werden Stoffstrommodelle in den meisten Fällen für ein bestimmtes chemisches Element erstellt, um den Lebensweg beispielsweise eines Metalls nachzuvollziehen. Zahlreiche Beispiele finden sich in (8) und (9). Ein Beispiel für ein Stoffstrommodell des europäischen Kupferkreislaufes findet sich in (126). Eine derartige Untersuchung war für die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit allerdings nicht sinnvoll. Es sollten alle relevanten Stoffströme für eine Verbesserung der Ressourceneffizienz erfasst werden. Durch die Methode der Stoffstromanalyse und die Visualisierung der Stoffströme

konnte ein umfassender Überblick über die Prozesse der Eisen- und Stahlindustrie und deren Vernetzung erstellt werden.

Zum Auffinden der relevanten Stoffströme hätte grundsätzlich auch die Recherche nach deponierten Mengen der Industrie ausgereicht. Die umfassende Stoffstromanalyse lieferte jedoch einen besseren Überblick und ein Gesamtverständnis für die Prozesse der Eisen- und Stahlindustrie. Dadurch konnten auch Verwertungsmöglichkeiten innerhalb des Prozesssystems erkannt werden, die einer externen Verwertung vorzuziehen sind.

Ziel war es das erstellte Stoffstrommodell hinsichtlich Ressourceneffizienz zu optimieren. Die Methode des Stoffstrommanagements mit entsprechender Stoffstromanalyse eignet sich genau für solche Fragestellungen. Es „soll nicht nur die Analyse bestehender Stoffströme, sondern vor allem die Entwicklung alternativer Stoffströme ermöglichen“ (9). Diese Entwicklung geht über eine einfache Analyse hinaus. Es müssen weitere Methoden für die Optimierung eines Stoffstrommodells angewendet werden (9). In der vorliegenden Arbeit wurde eine Kategorisierung der Stoffströme vorgenommen. Dies dient als Entscheidungsgrundlage. Ein Stoffstrommanagement zeigt dazu verschiedene Optionen auf (9). Die ermittelten und bewerteten Verfahren in dieser Arbeit stellen diese Optionen dar. Die Entscheidungsfindung wurde durch eine Nutzwertanalyse unterstützt.

Für das betrachtete System wurde keine Bilanzierung vorgenommen, da bestimmte Stoffströme von der Modellierung ausgeschlossen wurden. Empfehlung für eine Stoffstromanalyse ist es, nur die Informationen zu suchen und zu verwenden, die zur Beantwortung der zur Analyse gestellten Fragen notwendig sind (9). Das Ausschließen von Stoffströmen ist in der Stoffstromanalyse demnach eine gängige Praxis. Es stellte auch keine Nachteile für die vorliegende Analyse oder die Ergebnisse dar. Die Visualisierung zeigt, dass die Stoffströme der Eisen- und Stahlindustrie vielfach intern und extern vernetzt sind und nur wenige Rückstände nicht ressourceneffizient verwertet werden. So konnte sich diese Arbeit auf wenige Stoffströme zur Untersuchung beschränken.

Die Kategorisierung der Stoffströme war eine selbst erstellte Methode für das Auffinden der relevanten Stoffströme. Bei der Durchführung eines Stoffstrommanagements sollen Kriterien für die Relevanz von Stoffströmen ausgewählt und angewendet werden (9). Meistens sind diese Indikatoren ökologischer Natur, wie zum Beispiel die Menge der Emissionen. Die in dieser Arbeit verwendete Kategorisierung definiert die Indikatoren als Eigenschaften der Stoffströme. Diese Vorgehensweise ist bisher nicht in der Literatur zu finden. Für zukünftige Anwendungen der Stoffstromanalyse kann die Kategorisierung aber von Nutzen sein.

Zum Vergleich von Varianten bieten sich auch Dialektische und Formalisierte Methoden an. Dialektische Methoden wägen Vor- und Nachteile der Varianten ab (127). Für die vorliegende Untersuchung sollten die Varianten aber bewertet werden, um die Verwertung des Reststoffes einschätzen zu können. Zu den Formalisierten Methoden gehört die hier angewendete Nutzwertanalyse (127). Für die vorliegende Datenlage und die Ziele des Verfahrensvergleichs bedurfte es einer Methode, die ohne quantitative oder monetäre Daten auskommt. Für derartige Vergleiche bieten sich ebenso die Kosten-Nutzen-Analyse, die Methode der Präferenzmatrix, die ABC-Analyse sowie das Pareto-Diagramm an (98).

Monetäre Vergleichsverfahren wie die Kapitalwertmethode wurden von vornherein aufgrund der nicht vorhandenen monetären Daten ausgeschlossen.

Die Kosten-Nutzen-Analyse ist eines der bekanntesten Verfahren der Wirtschaftlichkeitsanalyse. Eine zentrale Frage, die mit der Methode beantwortet werden soll, ist welche Vorhaben aus einer Anzahl von Alternativen ausgewählt und umgesetzt werden sollen. Gemessen wird, welchen Beitrag eine Alternative zur Wohlfahrt der Gesellschaft leisten kann. (128) Im Ergebnis steht die Alternative, die das günstigste Verhältnis aus Kosten und Nutzen ausweist (129). Es werden drei Arten der Kosten-Nutzen-Analyse unterschieden: die absolute, die relative und die zeitbezogene Kosten-Nutzen-Analyse. Bei der absoluten Analyse werden die Kosten zu einem fixierten Punkt, der das Ziel definiert, in Beziehung gesetzt. Die am häufigsten verwendete relative Form vergleicht mindestens zwei Alternativen monetär. Eine zeitbezogene Kosten-Nutzen-Analyse wird verwendet, wenn in der nahen Zukunft eine Investition getätigt und der Wirkungsgrad dieser bewertet werden soll. (98) In der Praxis wird die Methode auch zum Vergleich von Alternativen herangezogen, die beispielsweise die Zukunft eines Unternehmens beeinflussen. Der Vorteil dieser Methode liegt in der einheitlichen Bewertung, wenn monetäre Werte sowohl für die Kosten als auch für den Nutzen angelegt werden. Dies ermöglicht eine hohe Transparenz. Das bedeutet, aber auch, dass eine monetäre Bewertung für Kosten und Nutzen vorliegen oder geschätzt werden muss. Gerade für Umwelt- oder Ressourceneffizienzthemen ist dies oft schwierig. (129)

Für den in der vorliegenden Arbeit angestrebten Vergleich wurde die Methode ausgeschlossen, da sie über die Ziele der Untersuchung hinausgeht. Zudem ist es in diesem Fall schwierig, Kosten oder Aufwendungen den einzelnen Verfahren zuzuordnen. Die Datenlage war hierzu nicht ausreichend und hätte zu Abschätzungen geführt, die für zu willkürlich und subjektiv empfunden wurden.

Die Methode der Präferenzmatrix oder auch Paarvergleich genannt, wurde in dieser Arbeit als Teil der Nutzwertanalyse bei der Bestimmung der Gewichtungsfaktoren angewendet (siehe Tabelle 14). Bei einem Paarvergleich werden immer zwei der Varianten mit den Kriterien besser oder schlechter miteinander verglichen (127) und so systematisch Prioritäten aggregiert (98). Es besteht die Möglichkeit eine Gewichtung einzuführen (127). Bei Anwendung dieser Methode in der vorliegenden Arbeit hätte für jedes Kriterium eine Präferenzmatrix aufgestellt werden müssen. Außerdem ist eine Abstufung der Bewertung (zum Beispiel: sehr gut, gut, schlecht, sehr schlecht) nicht möglich.

Die ABC-Analyse ist eine Methode, um sogenannte Komplexe wie Tätigkeiten oder Materialgruppen zu sortieren. Sie dient dem Setzen von Prioritäten bei innerbetrieblichen Entscheidungsprozessen. Die Alternativen werden nach Aufwand und Nutzen so sortiert, dass über das weitere Vorgehen entschieden werden kann. Die Methode wird zum Beispiel zur Auswahl von Lieferanten oder Produkten verwendet. Die Sortierung der Alternativen soll die Tätigkeitsschwerpunkte auf solche konzentrieren, die eine hohe wirtschaftliche Bedeutung aufweisen. So können zum Beispiel Bauteile in die Kategorien A, B oder C einsortiert werden. In die Kategorie A werden sehr wichtige Alternativen mit hohem Umsatz

oder hohem Ergebniswert einsortiert. Die Alternativen der Kategorie B sind auch wichtig bei mittlerer Zielerreichung. Weniger wichtig oder wenig umsatzrelevant sind die Alternativen der Kategorie C. (130) Für den in dieser Arbeit durchgeführten Vergleich von Verwertungsverfahren war diese Methode eher ungeeignet. Für jedes Kriterium hätte eine eigene ABC-Analyse durchgeführt werden müssen. Das Verfahren, das bei den Kriterien häufiger die Kategorie A aufweist, wäre dann das Vorteilhafteste gewesen. Der Vergleich wäre dann aber nicht so eindeutig und weniger transparent ausgefallen. Zudem hätte keine Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden können.

Die Nutzwertanalyse war letztendlich die einzige Methode, mit der die wenigen qualitativ vorhandenen Daten für einen Vergleich genutzt werden konnten. Die Nutzwertanalyse dient sowohl der Entscheidungsvorbereitung als auch der Entscheidungsfindung (131). Sie wird zum nicht-monetären Vergleich komplexer Alternativen herangezogen. Praktisch ist die Nutzwertanalyse vor allem, wenn mehrere Ziele und damit mehrere Kriterien in die Bewertung eingehen sollen. (97) Zusammen mit der Sensitivitätsanalyse ist diese Vorgehensweise sehr aussagekräftig. Allerdings kann das Ergebnis durch die selbst definierten Kriterien sehr subjektiv ausfallen. Bemängelt wurde dies schon kurz nach Erfindung der Methode. Begründer der Nutzwertanalyse ist Cristof Zangemeister, der das Verfahren im deutschsprachigen Raum 1970 bekannt machte. Einige Jahre später wurden Abhandlungen zur Kritik an der Nutzwertanalyse verfasst, die sich wie bereits erwähnt auf die Subjektivität der Methode fokussieren.

Im Folgenden werden zwei dieser Kritikschriften, die die Methode besonders drastisch beurteilen, herangezogen (131) (132). Aufgrund ihrer einfachen Anwendung wird die Nutzwertanalyse oft bei politischen Entscheidungen herangezogen. Bemängelt wird dazu, dass im Vorfeld Kriterien bereits so gelegt werden können, damit das gewünschte Ergebnis entsteht. Die Methode wird daher in der Literatur sogar als Zahlenritual diskreditiert. (132) Hierzu ist anzumerken, dass die vorliegende Arbeit weder durch unternehmerische noch wirtschaftliche Ziele geleitet wurde. Im Allgemeinen werden die Ziele wissenschaftlicher Untersuchungen objektiv an der Forschungsfrage orientiert. Die Nutzung der vermeintlich subjektiven Kriterien hat außerdem den Vorteil, die Bewertung genau auf das Untersuchungsziel ausrichten zu können. Ziele von verschiedenen Interessengruppen können damit in die Bewertung einfließen. Beispielsweise nützt es für die Ressourceneffizienz nichts, wenn eine hundertprozentige Rohstoffrückgewinnung erreicht, das Verfahren aber nicht in bestehende Anlagen integriert werden kann. Die Auswirkung der Gewichtung wurde in dieser Arbeit durch eine Sensitivitätsanalyse dargestellt. So kann auch der Kritikpunkt der subjektiven Gewichtung (132) widerlegt werden. Zudem wurde die Punktevergabe der Zielerreichung genau definiert. Einige Nutzwertanalysen führen nämlich nicht nur durch die gewählten Kriterien, sondern vor allem auch durch die ungenügend beschriebenen Grenzen der Zielerreichung zu sehr subjektiven Ergebnissen (132). Natürlich hätte mit einer besseren Datenlage ein objektiveres Ergebnis erzielt werden können. Dann wäre die Wahl der Vergleichsmethode wahrscheinlich nicht auf die Nutzwertanalyse gefallen. Trotzdem konnte ein verwendbares Ergebnis erzielt und Handlungsempfehlungen daraus abgeleitet werden.

Ziel eines Stoffstrommanagements ist es oft auch, Kosteneffizienz zu erreichen, da die Umsetzbarkeit der erarbeiteten Handlungsempfehlungen angestrebt wird (9). Nach Hanusch hat die Nutzwertanalyse bei der monetären Bewertung ihre Schwächen (128). Diese war hier aufgrund der nicht vorhandenen Daten nicht möglich. Wären monetäre Daten vorhanden gewesen, wäre die Entscheidung auf eine andere Vergleichsmethode, wie zum Beispiel die beschriebene ABC-Analyse oder die Kosten-Nutzen-Analyse gefallen.

Die anschließend durchgeführte Expertenbefragung ist eine Methode, die gerade für fachliche Fragen verwendet wird. Auch dieses Vorgehen soll im Folgenden diskutiert werden. Die Experteninterviews gaben einen tieferen Einblick in die Handlungsweisen der Unternehmen bei der Verwertung von Rückständen. Die Möglichkeit, die Interviews zu einem früheren Zeitpunkt der Untersuchung durchzuführen und dabei konkrete Daten abzufragen, wurde ausgeschlossen. Dies wäre an der Geheimhaltung der unternehmerischen Daten gescheitert. Die befragten Experten der Hüttenwerke waren sehr interessiert an den Verwertungsverfahren und hatten teilweise schon selbst Erfahrungen mit den ihnen bekannten Verwertungsprozessen. Es ist also durchaus Interesse an einer effizienteren Verwertung vorhanden, solange diese wirtschaftlich ist und keinen Wettbewerbsnachteil birgt.

Obwohl die Methode der Experteninterviews hier nicht im Sinne der Sozialwissenschaften angewendet wurde, ergeben sich soziale Komponenten. So ist nicht sicher, inwieweit die Experten die Wahrheit sagen. Dies kann zum einen aus Datenschutz erfolgen. Wie bereits erwähnt waren die Experten nur ungern bereit zu einer Veröffentlichung der Masterarbeit oder gar zu einer Aufnahme der Interviews. Zum anderen könnte ein Experte absichtlich falsche Informationen herausgeben. Dies ist aber aufgrund der Länge des Interviews und den ähnlichen Fragen kaum möglich. (117) Letztendlich kann mit den Aussagen der Experten ein einfaches Bild der Situation in der Branche gezeichnet werden. Auch wenn dieses mit Vorsicht zu genießen ist, spricht nichts dagegen entsprechende Schlussfolgerungen aus den Aussagen zu ziehen, zumal die Experten wissen, dass es auch darum geht, ihre Situation zu verbessern. (117) Zur Erfassung von Fakten und Sachinformationen ist die Kontaktaufnahme in die betreffenden Unternehmen essentiell und auf gesprochener Ebene sind Experteninterviews die einzig passende Methode (119). Eine andere Möglichkeit zur Aufnahme entsprechender Daten wäre die Erstellung eines Fragebogens gewesen. Die Experten hätten dann mehr Zeit gehabt, die Fragen zu beantworten. Allerdings ging es hier u.a. darum, Meinungen zu erfahren. Diese sind in einem Gespräch besser zu erfassen. Außerdem wäre der Fragebogen sehr lang geworden und es hätte mit Text geantwortet werden müssen. Dies wäre nicht passend für eine Befragung mit Fragebogen (133), da die Rücklaufquote meist negativ beeinflusst wird.

Durch die Ergebnisse der Experteninterviews konnten die Handlungsempfehlungen im Ergebnis dieser Arbeit konkretisiert werden. Diese geben Hinweise auf weitere Forschungsansätze und -lücken. Wichtig ist dabei die Zusammenarbeit mit einem konkreten Unternehmen, um die Verwertungsverfahren auf die spezifischen Bedürfnisse des Unternehmens anpassen zu können.

Ein weiterführendes Ziel, das zu Beginn der Arbeit in Betracht gezogen wurde, war es, Ansätze zur Verwertung im Sinne eines funktionalen Recyclings aufzuzeigen. Nach dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) (134) ist funktionales Recycling die Rückführung von Rückständen in Prozesse der Grundstoffproduktion, wobei die Eigenschaften der enthaltenen Elemente genutzt werden und so der Lebenskreislauf eines Elementes geschlossen wird. Im Falle der Eisen- und Stahlindustrie wäre hier also das Ziel gewesen, jeden Rückstand, der Eisen enthält, wieder in die Prozesse der Eisen- und Stahlindustrie einzubringen. Ohne funktionales Recycling gehen die Metalle der Grundstoffproduktion verloren und die ursprüngliche Funktion wird nicht genutzt. Die zu Beginn der Arbeit definierten Stoffströme Prozessrücklauf (PZR) und Produktionsrücklauf (PDR) sind der Definition nach funktionales Recycling, nicht jedoch das Open-Loop-Recycling als Hauptziel dieser Arbeit. Das funktionale Recycling kann aber anhand der hier gewonnenen Ergebnisse kritisiert werden. Beispielsweise ist es möglich, Metalle aus Schlacken zu entfernen. Dadurch könnten aber Probleme beim Verwerten der übrigbleibenden Schlacke entstehen, die dann nicht mehr die gleichen Eigenschaften aufweist. Für die Bauindustrie sind Schlacken ein wichtiges Baumaterial. Würden diese als Baustoff wegfallen, müssten primäre Rohstoffe dafür abgebaut werden. Darüber hinaus würde sich evtl. keine Verwertungsmöglichkeit für die von Metallen „gereinigte“ Schlacke finden lassen und diese müsste deponiert werden. Das funktionale Recycling steht also in diesem Fall eventuell anderen Nachhaltigkeitszielen – z. B. der Schonung von Primärressourcen und der Vermeidung von Deponierungen – entgegen.

Das funktionale Recycling ist eine sogenannte End-of-Pipe-Lösung, bei der Metalle aus Rückständen zurückgewonnen werden. Man kann jedoch bei der Sekundärstahlerzeugung auch versuchen am Anfang anzusetzen und die Metalle vor dem Einschmelzen des Schrotts zu gewinnen. Im Projekt „Entzinkung von Stahlschrotten“ im Projektverbund r² – „Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – rohstoffintensive Produktionsprozesse“ wurde eine Anlage zur Zinkrückgewinnung von Stahlschrotten entwickelt, die direkt an einen Zinkhüttenprozess gekoppelt ist. Das Verfahren der sauren Entzinkung ermöglicht ein abfallfreies Zinkrecycling. Weitere Informationen dazu finden sich auf www.r-zwei-innovation.de/de/546.php

Auch pyrometallurgisch ist die Zinkentfernung bei Schrotten möglich und wurde auch schon erprobt. Allerdings ist eine vollständige Zinkentfernung auch hier aus wirtschaftlichen und technischen Gründen nicht möglich. Dadurch verbleibt immer eine Restmenge an Zink auf den Schrotten und führt dazu, dass in der Eisen- und Stahlindustrie nach wie vor End-of-Pipe-Lösungen wie der DK-Prozess benötigt werden. Die Ressourceneffizienz ist mit der Entzinkung von Stahlschrotten also (noch) nicht zu steigern. (84)

Ein weiterer Nachteil von vorgeschalteten Prozessen ist, dass diese die Zusammensetzung des Schrottes verändern, was die Prozesse der Eisen- und Stahlindustrie stören kann. Evtl. müsste also die Branche ihre Prozesse anpassen. Aufwand und Kosten für derartige Maßnahmen müssten mit denen für nachgeschaltete Lösungen verglichen werden.

8 Fazit und Ausblick

Diverse Verknüpfungsmöglichkeiten der Eisen- und Stahlindustrie mit anderen Industrien (Open-Loops) können durch Anwendung bestimmter Verfahren geschaffen werden. Neben dieser Hauptintention der Arbeit ergaben sich im Laufe der Untersuchung weitere wertvolle Ergebnisse. So ermöglichte die Methode der Stoffstromanalyse und die Darstellung der Prozesse der Eisen- und Stahlindustrie mit den dazugehörigen Stoffströmen eine komplexe Übersicht über die Industrie. Die Verknüpfungen der Prozesse durch Stoffströme innerhalb der Industrie geben Aufschluss über das Ausmaß der bereits erreichten Ressourceneffizienz in der Eisen- und Stahlindustrie.

Die Methode des Stoffstrommanagements bzw. der Stoffstromanalyse hat sich dabei als sehr nützlich erwiesen. Für die Feststellung der Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich der Rückstandsverwertung ist die Methode allerdings zu aufwendig. In dieser Arbeit liegt der Vorteil aber darin, dass anhand der Visualisierung auch Ansätze und Schlüsse für andere Untersuchungen gezogen werden können. Die Methode kann also positiv bewertet werden. Für zukünftige Untersuchungen, die ein komplexes System betrachten, ist es ratsam, derartige Modelle und Ansichten zu erstellen, um ein Verständnis für das gesamte System zu bekommen.

Ein weiteres wichtiges Fazit dieser Arbeit kann für die Umsetzung von Innovationen in der Eisen- und Stahlindustrie gezogen werden. Der wichtigste Punkt ist dabei die Wirtschaftlichkeit. Die Branche steht Nachhaltigkeit und Ressourcenschutz nicht gleichgültig gegenüber, allerdings zwingt der Konkurrenzdruck die Unternehmen dazu, nur Investitionen zu tätigen, die sich schnell amortisieren.

Auch der Bekanntheitsgrad von Innovationen spielt eine wichtige Rolle. Die meisten Unternehmen beschäftigen sich mit Verwertungsverfahren, wenn diese bekannt sind. Einige Unternehmen haben bereits versucht, verschiedene Verfahren in ihre Prozesse zu integrieren. Wichtig ist, dass bei der Integration auf die individuellen Bedürfnisse der Unternehmen eingegangen wird. Hier ist auch der Datenschutz zu beachten. Nach der Expertenbefragung scheinen die Unternehmen der Eisen- und Stahlindustrie ungern Aussagen machen zu wollen, selbst wenn diese unschädlich für sie sind. Somit könnte die Ermittlung von Daten zu einem Unternehmen erschwert werden.

Letztendlich ist die Eisen- und Stahlindustrie, wie auch schon in der Vergangenheit, offen für Innovationen, neue Verfahren und Kooperationen. Allerdings resultiert diese Bereitschaft aus den Zwängen durch Gesetzgebung und Konkurrenzdruck. Die Schonung und Rückgewinnung von Rohstoffen ist momentan nur interessant, wenn es den eigenen Prozessen nützt, beispielsweise durch die Rückführung eines Rückstandes und die resultierende Einsparung von Einsatzmaterialien.

Im Bereich der Verwertungsverfahren wird auch weiterhin geforscht. Neben der sukzessiven Verbesserung der hier betrachteten Verfahren, wie zum Beispiel dem Wälzprozess, werden weitere alternative Verfahren entwickelt. In den USA wird derzeit der 2^SDR-Prozess im Technikumsmaßstab erprobt. Es handelt sich um ein zweistufiges Verfahren, bei dem

zunächst in einem Klinkerprozess Verunreinigungen wie Halogene entfernt werden. Daran folgt ein Reduktionsprozess in einem Top Blown Rotary Converter (TBRC). Das Verfahren eignet sich zur Verwertung von Elektroofenstaub und zinkreichen LD-Stäuben. Ein Vorteil gegenüber dem Wälzprozess liegt in der Rückgewinnung von Eisen. (102)

Als weiteres neues Verfahren soll hier der RecoDust-Prozess genannt werden. Dieses Verfahren wird derzeit an der Montanuniversität Leoben in Österreich getestet. Ziel ist die Verwertung besonders zinkarmer Stäube aus der Primärstahlerzeugung. Für das Verfahren sind keine festen Reduktionsmittel und auch keine Anlage zur Agglomeration notwendig. Im ersten Prozessschritt werden die Stäube verschlackt. Flüchtige Elemente verlassen den Reaktor mit dem Abgasstrom und gehen in die Nachverbrennung. Durch die Abgasreinigung wird Zinkoxid gewonnen. Neben der Schlacke, die als Baustoff verwertet werden kann, entsteht eine eisenreiche Fraktion für den direkten Einsatz in Hüttenwerken. (135)

Langfristig müssen sich die Unternehmen der Eisen- und Stahlindustrie auf weitere gesetzliche Beschränkungen zum Umweltschutz und zur Ressourcenschonung einstellen. Neue Verwertungsverfahren für ein Open-Loop-Recycling könnten sich dann leichter etablieren. Dieser Prozess würde sich durch die Verteuerung von Rohstoffen wie Zink und Blei beschleunigen, da sich die Amortisationszeit einer Verwertungsanlage durch den Verkauf der zurückgewonnenen Metalle verkürzt.

Literaturverzeichnis

- (1) Heck, P.; Bemmann, U. (Hrsg.) (2002): Praxishandbuch Stoffstrommanagement 2002/2003, Strategien – Umsetzung – Anwendung in Unternehmen/Kommunen/Behörden. Köln: Deutscher Wirtschaftsdienst, 400 Seiten, ISBN 3-87156-481-8
- (2) Goldmann, D. et al. (2014): Internationale Entwicklungen zur Effizienzsteigerung bei Rohstoffnutzung und Recycling – Benchmark, Wettbewerb und Kooperationspotenziale. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe Band 7, Neuruppin: TK Verlag, S. 17-35, ISBN 978-3-944310-09-1
- (3) Bundesministerium für Bildung und Forschung: Wirtschaftsstrategische Rohstoffe für den Hightech-Standort Deutschland. Online im Internet: http://www.fona.de/mediathek/pdf/Wirtschaftsstrategische_Rohstoffe_barrierefrei_neu.pdf
- (4) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes). Online im Internet: http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/progress_broschuer_de_bf.pdf
- (5) Technische Universität Clausthal & Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2013): ENTIRE – Entwicklung der internationalen Diskussion zur Steigerung der Ressourceneffizienz. Berlin, Clausthal-Zellerfeld, Hannover
- (6) Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG). Ausfertigungsdatum: 24.02.2012, zuletzt geändert 22.5.2013
- (7) Bergmann, M. et al. (2010): Methoden transdisziplinärer Forschung, Ein Überblick mit Anwendungsbeispielen. Frankfurt/New York: Campus Verlag, 295 Seiten, ISBN 978-3-593-39197-7
- (8) Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des Deutschen Bundestages (Hrsg.) (1994): Die Industriegesellschaft gestalten, Perspektiven für einen nachhaltigen Umgang mit Stoff- und Materialströmen. Bonn: Economica Verlag, 765 Seiten, ISBN 3-87081-364-4
- (9) Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des Deutschen Bundestages (Hrsg.) (1995): Umweltverträgliches Stoffstrommanagement, Band I: Konzepte. Bonn: Economica Verlag, ISBN 3-87081-494-2
- (10) Lüngen, H. B. et al. (2006): Eisen und Stahl. In: Dittmeyer, R.; Keim, W.; Kreysa, G.; Oberholz, A. (Hrsg.): Chemische Technik, Prozesse und Produkte Band 6a. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, S. 203-404, ISBN 3-527-30430-4

- (11) Degner, M. et al. (2007): *Stahlfibel*. Düsseldorf: Verlag Stahleisen, Herausgegeben vom Stahlinstitut VDEh, 184 Seiten, ISBN 978-3-514-00741-3
- (12) Wirtschaftsvereinigung Stahl; Stahlinstitut VDEh (2013): *Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie 2010/2011*. Düsseldorf: Verlag Stahleisen, 481 Seiten, ISBN 978-3-514-00805-2
- (13) Ghenda, J. T. (2009): 8. CO₂-Monitoring-Fortschrittsbericht der Stahlindustrie in Deutschland – Berichtsjahr 2009. Düsseldorf, 80 Seiten.
- (14) Wirtschaftsvereinigung Stahl; Stahlinstitut VDEh (2010): *Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie 2010/2011*. Düsseldorf: Verlag Stahleisen, 481 Seiten, ISBN 978-3-514-00776-5
- (15) Ghenda, J. T. (2011): 10. CO₂-Monitoring-Fortschrittsbericht der Stahlindustrie in Deutschland – Berichtsjahr 2010. Düsseldorf, 96 Seiten
- (16) Roterling J. et al. (2012): *Die Stahlindustrie in Deutschland „Rückgrat des Industriestandorts Deutschland“*. Booz & Company, 22 Seiten
- (17) Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung – RWI (Hrsg.) (2011): *Die volkswirtschaftliche Bedeutung einer Grundstoffindustrie am Beispiel der Stahlindustrie. Hintergrundstudie im Rahmen der Kommunikationsinitiative Stahl*. Essen, 43 Seiten
- (18) Holloway, J.; Roberts, I.; Rush, A. (2010): *China's Steel Industry*. In: Reserve Bank of Australia, December Quarter, S. 19-26
- (19) World Steel Association (Hrsg.) (o.J.): *Crude steel production, annual data 1980-2013*. Online im Internet: <https://www.worldsteel.org/statistics/statistics-archive/steel-archive.html>, Stand 31.12.2015
- (20) World Steel Association (2014): *Steel Statistical Yearbook 2014*. Brussels, 121 Seiten
- (21) Wirtschaftsvereinigung Stahl (2014): *Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland*. Düsseldorf, 15 Seiten
- (22) Lungen, B.; Peters, M.; Schmöle, P. (2010): *Eisenerzeugung*. In: *Stahl und Eisen*, Jg. 130, Nr. 4, S. 36 - 64
- (23) Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe – BGR (Hrsg.) (2014): *Deutschland – Rohstoffsituation 2013*. Hannover, 157 Seiten, ISBN: 978-3-943566-14-7
- (24) Friege, H.; Engelhardt, C.; Hanseling, K. O. (Hrsg.) (1998): *Das Management von Stoffströmen, Geteilte Verantwortung – Nutzen für alle*. Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag, 237 Seiten, ISBN 3-540-63659-5
- (25) Brunner, P. H.; Rechberger, H. (2014): *Practical Handbook of Material Flow Analysis*. Washington, D.C.: Lewis Publishers, 318 Seiten, ISBN 0-203-59141-0

- (26) Kohler, N.; Holliger, M.; Lützkendorf, T. (1992): Methodische Grundlagen für Energie- und Stoffflussanalysen. BEW Projekt: „Energie- und Stoffbilanzen von Bauteilen und Gebäuden“
- (27) Hähre, S. (2000): Stoffstrommanagement in der Metallindustrie. Zur Gestaltung und techno-ökonomischen Bewertung industrieller Recyclingkonzepte. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 16, Nr. 115. Düsseldorf: VDI Verlag, 211 Seiten, ISBN 3-18-311516-6
- (28) Kosmol, J. (2012): Glossar zum Ressourcenschutz. Herausgegeben vom Umweltbundesamt. Online im Internet: <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/glossar-ressourcenschutz>
- (29) Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (2003): ÖWAV-Regelblatt 514, Die Anwendung der Stoffflussanalyse in der Abfallwirtschaft. Wien: Selbstverlag des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes, 93 Seiten
- (30) United States Environmental Protection Agency – EPA (Hrsg.) (1993): Life-Cycle Assessment: Inventory Guidelines and Principles. Cincinnati, 108 Seiten, EPA/600/R-921245, February 1993
- (31) Weber-Blaschke, G; Faulstich, M. (2003): Stoffstrommanagement: Grundlagen und Anwendung. In: Hösel, G.; Bilitewski, B.; Schenkel, W.; Schnurer, H. (Hrsg.): Müll-Handbuch, Kennzeichen 1406, MuA Lfg. 6/03. Berlin: Erich Schmidt Verlag, 36 S
- (32) Umweltbundesamt (Hrsg.) (2012): Glossar zum Ressourcenschutz. Dessau-Roßlau, 42 Seiten
- (33) Schaltegger, S.; Kubat, R. (1995): Das Handbuch der Ökobilanzierung, Begriffe und Definitionen. WWZ-Studie Nr. 45, ISBN 3-909162-06-1
- (34) United States Environmental Protection Agency – EPA (Hrsg.) (1993): Life Cycle Design Guidance Manual, Environmental Requirements and The Product System. Cincinnati, 181 Seiten, EPA/600/R-92/226, January 1993
- (35) Rentz, O. et al. (1996): Stoffstrommanagement in der Eisen- und Stahlindustrie. Berlin: Erich Schmidt Verlag, 500 Seiten, ISBN 3-503-03980-5
- (36) Verordnung über den Versatz von Abfällen unter Tage (Versatzverordnung – VersatzV) vom 24. Juli 2002 (BGBl. I S. 2833), zuletzt geändert durch Artikel 5 Absatz 25 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212)
- (37) Gara, S.; Schrimpf, S. (1998): Behandlung von Reststoffen und Abfällen in der Eisen- und Stahlindustrie, Band 92, ISBN 3-85457-394-4
- (38) Endemann, G. (2006): Dust, scale and sludge generation and utilisation in German steelworks. In: Stahl und Eisen, Jg. 126, Nr. 9, S. 25 - 32
- (39) Deike, R.; Hillmann, C. (1999): Das Verhalten von Zink beim Recycling von eisenhaltigen Stäuben und Schlämmen. In: Stahl und Eisen, Jg. 199, Nr. 2, S. 53 - 58
- (40) Rentz, O. et al. (1996): Stoffstrommanagement in der Eisen- und Stahlindustrie. Berlin: Erich Schmidt Verlag, 500 Seiten, ISBN 3-503-03980-5

- (41) Müller, J. (2014): Ressourceneffizienz in der Eisen- und Stahlindustrie. In: Tagungsband zur 12. DepoTech-Konferenz: Abfallwirtschaft, Abfallverwertung und Recycling, Deponietechnik und Altlasten, 4.-7. November 2014 in Leoben, S. 341-346, ISBN 978-3-200-03797-7
- (42) Bartusch, H. et al. (2013): Erhöhung der Energie- und Ressourceneffizienz und Reduzierung der Treibhausgasemissionen in der Eisen-, Stahl- und Zinkindustrie (ERESTRE). Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2013, 161 Seiten, ISBN 978-3-86644-857-5
- (43) Harp, G. (2009): Eisenhaltige Kreislaufstoffe als sekundäre Rohstoffe in Europa. In: Stahl und Eisen, Jg. 129, Nr. 3, S. 55 - 62
- (44) Wirtschaftsvereinigung Stahl (Hrsg.) (2015): o. T. Online im Internet: www.stahl-online.de. Stand: 31.12.2015
- (45) Remus, R. et al. (2013): Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production, Industrial Emissions Directive 2010/75/EU Integrated Pollution Prevention and Control. 597 Seiten, ISBN 978-92-79-26475-7
- (46) Senk, D. G.; Hüttenmeister, D. (2012): Stahl und Schlacke – Ein Bund fürs Leben. In: Heußén, M.; Motz, H. (Hrsg.): Schlacken aus der Metallurgie, Band 2 – Ressourceneffizienz und Stand der Technik. Neuruppin: TK Verlag, S. 69-74, ISBN 978-3-935317-86-3
- (47) Merkel, T. (2009): Erzeugung und Nutzung von Eisenhüttenschlacken im Jahr 2008. In: Report des FEhS-Instituts, Jg. 16, Nr. 1, S. 8
- (48) Drissen, P. (2009): Art und Kornform staubförmiger Partikel aus der Aufbereitung von Eisenhüttenschlacken. In: Report des FEhS-Instituts, Jg. 16, Nr. 2, S. 5-8
- (49) Ehrenberg, A. (2007): Hüttensand, Potenziale, europäische Normung und aktuelle Entwicklung. In: Hochofenzement (HOZ) Seminar, 26. April 2007, Duisburg
- (50) Heindl, A. et al. (2005): EU 9 „Entwicklung von nachhaltigen Entscheidungskriterien zur sicheren Ablagerung und Verwertung von Eisenhüttenschlacken“, Schlussbericht, Forschungs- und Entwicklungszentrum für Sondertechnologien
- (51) Wirtschaftsvereinigung Stahl, Stahlinstitut VDEh (Hrsg.) (2007): Ressourceneffizienz – Gute Argumente für Stahl. Düsseldorf
- (52) Wirtschaftsvereinigung Stahl (Hrsg.) (2006): Kreislaufwirtschaft in der Stahlindustrie. Online im Internet: http://195.210.48.207/forschung_und_technik/energie_und_umwelttechnik/kreislaufwirtschaft.asp. Stand: 18.01.2012
- (53) Drissen, P. (2011): Aufkommen und Nutzung von Stäuben, Schlämmen und Walzzunder. In: Report des FEhS-Instituts, Jg. 18, Nr. 1, S. 1-3
- (54) Institut für Baustoffforschung – FEhS (Hrsg.) (o.J.): Statistik. Online im Internet: www.fehs.de/eisenhuettenschlacken/statistik

- (55) Ameling, D.; Endemann, G. (2007): Ressourceneffizienz – Gute Argumente für Stahl. Herausgegeben von Stahlinstitut VDEh and Wirtschaftsvereinigung Stahl mit Stahl-Zentrum
- (56) Weitkämper, L.; Wotruba, H. (2008): Rückgewinnung von Metallen aus metallurgischen Schlacken. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe Band 1, Neuruppin: TK Verlag, S. 133-141, ISBN 978-3-935317-36-8
- (57) Adamczyk, B. et al. (2008): Verwertung von Edelstahlschlacken – Gewinnung von Chrom aus Schlacken als Rohstoffbasis. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe Band 1, Neuruppin: TK Verlag, S. 143-160, ISBN 978-3-935317-36-8
- (58) Jöbstl, R. (2013): Anforderungen an die umweltfreundliche Entsorgung von Stahlwerksschlacken am Beispiel der LD-Schlacken. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Aschen, Schlacken, Stäube aus Abfallverbrennung und Metallurgie. Neuruppin: TK Verlag, S. 523-539, ISBN 978-3-935317-99-3
- (59) Drissen, P. (2008): Stahlwerksschlacken als wasserdurchlässiges Bettungs- und Fugenmaterial für Pflasterflächen. In: Report des FEhS-Instituts, Jg. 15b, Nr. 2, S. 1-5
- (60) Rustige, H. (2012): Entphosphorung von Abwässern im Festbett auf Basis von Elektroofen- und Konverterschlacke – Ein Pilotprojekt. In: Heußén, M.; Motz, H. (Hrsg.): Schlacken aus der Metallurgie, Band 2 – Ressourceneffizienz und Stand der Technik. Neuruppin: TK Verlag, S. 139-150, ISBN 978-3-935317-86-3
- (61) Kessler, K.; Möller, J.; Still, G. (2011): Technische Möglichkeiten der Rückgewinnung – Bedarfsgerechte Herstellung von Produkten aus Eisenhüttenschlacken. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Versteyl, A. (Hrsg.): Schlacken aus der Metallurgie – Rohstoffpotential und Recycling. Neuruppin: TK Verlag, S. 103-118, ISBN 978-3-935317-71-9
- (62) Markus, H. P.; Hofmeister, H.; Heußén, M. (2012): Schlackenconditionierung im Elektrolichtbogenofen: Metallurgie und Effizienz. In: Heußén, M.; Motz, H. (Hrsg.): Schlacken aus der Metallurgie, Band 2 – Ressourceneffizienz und Stand der Technik. Neuruppin: TK Verlag, S. 105-126, ISBN 978-3-935317-86-3
- (63) Heußén, M.; Markus, P. (2013): Ressourcenmanagement eines Elektrostahlwerks. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Aschen, Schlacken, Stäube aus Abfallverbrennung und Metallurgie. Neuruppin: TK Verlag, S. 485-505, ISBN 978-3-935317-99-3
- (64) Geißler, G.; Ciocea, A.; Mooser, A. (2013): Verwertung von Elektroofenschlacke. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe Band 6, Neuruppin: TK Verlag, S. 635-647, ISBN 978-3-935317-97-9
- (65) Mudersbach; D.; Motz, H. (2012): Zukunftstechnologien für Energie- und Bauwirtschaft – am Beispiel der Schlacken aus der Elektrostahlerzeugung. In: Heußén, M.; Motz, H. (Hrsg.): Schlacken aus der Metallurgie, Band 2 –

- Ressourceneffizienz und Stand der Technik. Neuruppin: TK Verlag, S. 151-167, ISBN 978-3-935317-86-3
- (66) Rögener, F. et al. (2007): Nachhaltige Prozessführung beim Beizen von nichtrostenden Stählen. In: Galvanotechnik, Jg. 98, Nr. 12, S. 2921-2928
- (67) Lehmann, U. (2006): Umweltschonende Kreislaufführung von Säuren für die Edelstahlbeizung. In: ThyssenKrupp techforum, Jg. 2006, Nr. 1, S. 27-30
- (68) Rögener, F.; Reichardt, T. (2009): Behandlung von stark sauren Beizabwässern aus der Stahlindustrie mittels Nanofiltration. In: F & S Filtrieren und Separieren, Jg. 23, Nr. 4, S. 194-199
- (69) Umweltbundesamt (o.J.) (Hrsg.): Abfallrecht. Online im Internet: <http://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfallwirtschaft/abfallrecht>. Stand: 31.12.2015
- (70) Kropp, O. (2012): Das neue Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG). Kissing: WEKA MEDIA, 208 Seiten, ISBN 978-3-8111-7824-3
- (71) Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien, Amtsblatt der Europäischen Union vom 22.11.2008
- (72) Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung – DepV) vom 27. April 2009 (BGBl. I S. 900), zuletzt geändert durch Artikel 2 der Verordnung vom 4. März 2016 (BGBl. I S. 382)
- (73) Richtlinie 2010/75/EU des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 24. November 2010 über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung) (Neufassung), Amtsblatt der Europäischen Union vom 17.12.2010
- (74) Umweltbundesamt (Hrsg.) (2012): Merkblatt über die Besten Verfügbare Techniken in der Eisen- und Stahlerzeugung nach der Industrie-Emissionen-Richtlinie 2010/75/EU. Dessau-Roßlau, 604 Seiten
- (75) European Commission (Hrsg.) (2014): Best Available Techniques (BAT) Reference Documents for the Non-Ferrous Metals Industries. Final Draft (Oktober 2014)
- (76) Görner, K.; Hübner, K. (Hrsg.) (2002): Gewässerschutz und Abwasserbehandlung. Berlin: Springer, 556 Seiten, ISBN 9783540420255
- (77) Schlebusch, W. et al. (1998): Sintern und Pelletieren von Eisenerzen im technisch-wirtschaftlichen Vergleich. In: Stahl und Eisen, Jg. 118, Nr. 6, 115-121
- (78) Wisse, A. M. (2014): Installation von Gewebefiltern an der Sinteranlage von Tata Steel in IJmuiden. In: Stahl und Eisen, Jg. 134, Nr. 3, 41-50
- (79) Vanderheyden, B. et al. (2010) Modelling pollutants' formation and behaviour during sintering of iron ore. EUR 24221 EN. ISBN 978-92-79-14595-7, ISSN 1018-5593

- (80) Bandopadhyay, A.; Goswami, M.; Kumar, S. (2005): Improvement of environmental performance of integrated steel sector through process integration & optimisation measures and innovative waste management practices. Konferenz Emomami-2005, IATES, Bhubaneswar, S. 249-265
- (81) Delwig, C. et al. (2007): Developments in sinter technology, Entwicklungen bei der Sintertechnik. In: Stahl und Eisen, Jg. 127, Nr. 6/7, S. 51-66
- (82) Bastürk, S. et al. (2009): Technologien und Trends zur Abgasreinigung an Sinteranlagen. In: Stahl und Eisen, Jg. 129, Nr. 5, S. 51-59
- (83) Birat, J. P. (2010): Global Technology Roadmap for CCS in Industry, Steel Sectoral Report. Maizières-lès-Metz
- (84) Stubbe, G. et al. (2008): Schließung von Stoffkreisläufen beim Einsatz von verzinktem Schrott im Oxygenstahlwerk. In: Stahl und Eisen, Jg. 128, Nr. 2, S. 55-60
- (85) Rütten, J. T. (2009): Ist der Wälzprozess für EAF-Staub noch zeitgemäß? Stand der Technik und Herausforderungen. In: Vernetzung von Zink und Stahl. Konferenz vom 21. bis 23.1.2009, Leoben
- (86) Rütten, J. T. (2008): Application of the Waelz Technology on Resource Recycling of steel mill dust, 42. Metallurgisches Seminar, Duisburg
- (87) Tavernier, H. et al. (2004): Foaming of the slag and recycling of stainless steel dusts by injection into the electric arc furnace for stainless steels. EUR 20926 EN, ISBN 92-894-6825-4
- (88) Gock, E. et al. (2013): Verwertung von deponierten eisenreichen Filterstäuben der Stahlindustrie durch Pelletierung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe Band 6, Neuruppin: TK Verlag, S. 583-605, ISBN 978-3-935317-97-9
- (89) Dahlmann, P. (2010): Wege zur Effizienzsteigerung in der Stahlindustrie. Düsseldorf
- (90) Hillmann, C.; Sassen, K.-J. (2006): Solutions for dust and sludges from the BOF process. In: Stahl und Eisen, Jg. 126, Nr. 11, S. 149-156
- (91) Bialucha, R.; Merkel, T.; Motz, H. (2014): Technische und ökologische Rahmenbedingungen bei der Verwendung von Stahlwerksschlacke. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Mineralische Nebenprodukte und Abfälle – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen. Neuruppin: TK Verlag, S. 133-149, ISBN 978-3-944310-11-3
- (92) Aycil, H.; Schlütter, F.; Kropp, J. (2009): Neue Verwertungswege für Stahlwerksschlacken: Entwicklung von hydrothermal gehärteten Bauprodukten. Konferenz 17. ibausil, 23. September 2009, Weimar
- (93) Frey, R. I. (1993): Wirtschaft, Staat und Wohlfahrt. Eine Einführung in die Nationalökonomie. Basel: Helbing & Lichtenhahn, ISBN 978-3-719012731

- (94) Bechmann, A. (1987): Nutzwertanalyse, Bewertungstheorie und Planung. Bern/Stuttgart: Verlag Paul Haupt, 360 Seiten, ISBN 3-258-02694-7
- (95) Graubner, C.-A.; Hüske, K. (2003): Nachhaltigkeit im Bauwesen. Berlin: Ernst & Sohn Verlag, 391 Seiten, ISBN 3-433-01512-0
- (96) Breiing, A.; Knosala, R. (1997): Bewerten technischer Systeme – Theoretische und methodische Grundlagen bewertungstechnischer Entscheidungshilfen. Heidelberg: Springer Verlag Berlin, Seiten, ISBN 978-3-642-63908-1
- (97) Hoffmeister, W. (2007): Investitionsrechnung und Nutzwertanalyse. Eine entscheidungsorientierte Darstellung mit vielen Beispielen und Übungen. Oetzberg: BMV-Berliner Wissenschafts-Verlag, 336 Seiten, ISBN 978-3-8305-1503-6
- (98) Kranefeld, A.; Stausberg, M. (2009): Nutzwertanalyse. Kissing: WEKA-Media, 132 Seiten, ISBN 978-3-8276-8492-9
- (99) Pichler, C. et al. (2013): Rückgewinnung von Wertmetallen aus Stahlwerksstäuben durch ein reduziertes Metallbad. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Aschen, Schlacken, Stäube aus Abfallverbrennung und Metallurgie. Neuruppin: TK Verlag, S. 587-598, ISBN 978-3-935317-99-3
- (100) von Billerbeck, E.; Ruh, A.; Kim, D.-S. (2014): Verarbeitung von Filterstäuben aus der Elektrostahlerzeugung im Wälzprozess. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Mineralische Nebenprodukte und Abfälle – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen. Neuruppin: TK Verlag, 2014, S. 387-398, ISBN 978-3-944310-11-3
- (101) Antrekowitsch, J. (2015): Stahlwerksstaubrecycling im 21. Jahrhundert – aktuelle Entwicklungen und zukünftige Herausforderungen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe Band 8, Neuruppin: TK Verlag, S. 363-370, ISBN 978-3-944310-20-6
- (102) Pichler, C.; Antrekowitsch, J. (2014): Alternative Verfahren zur Aufarbeitung von Stäuben aus der Stahlindustrie. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Mineralische Nebenprodukte und Abfälle – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen. Neuruppin: TK Verlag, 2014, S. 399-410, ISBN 978-3-944310-11-3
- (103) Befesa (o.J.) (Hrsg.): Das SDHL-Wälzverfahren. Online im Internet: www.befesa-steel.com. Stand: 08.11.2015
- (104) Sassen, K.-J.; Hollmann, C. (2015): Verwertung eisenhaltiger Reststoffe zu Roheisen und Zinkkonzentrat . In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe Band 8, Neuruppin: TK Verlag, S. S. 431-446, ISBN 978-3-944310-20-6
- (105) DK Recycling und Roheisen GmbH (Hrsg.) (2015): DK-Prozess. Online im Internet: www.dk-duisburg.de/de/prozess/ueberblick.html, Stand: 13.05.2015

- (106) Bender, W. et al. (2008): Resource efficiency in the steel industry in Germany – status 2008. In: Stahl und Eisen, Sonderheft “Steel 2008: Smart Solutions”, S. 133-140
- (107) Fisch, T.; Schmöle, P.; Senk, G. (2015): Aus Kreislaufstoffen werden Produkte. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 2 – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen. Neuruppin: TK Verlag, S. 417-430, ISBN 978-3-944310-21-3
- (108) Küttner GmbH & Co. KG (Hrsg.) (o.J.): OXYCUP® –Roheisenerzeugung nach dem Zero-Waste-Prinzip. Online im Internet: www.kuettner.de. Stand: 17.11.2015
- (109) Guglielmini, A. et al. (2011): RedIron: The Best Available Cost-effective Solution for Recycling Iron-bearing Wastes from Integrated Iron and Steel Plants. AISTech 2011 Proceedings – Volume 1
- (110) Chatterjee, A. (2012): Sponge iron production by direct reduction of iron oxide, Second edition. New Delhi: PHI Learning Private Limited, 374 Seiten, ISBN 978-81-203-4659-8
- (111) Suharno, B. (1996): Verwertung von Stäuben und Einschmelzen von feinkörnigem Eisenschwamm im HTM (High-Turbulence-Mixer)-Verfahren. Dissertation der RWTH Aachen
- (112) Paul Wurth S. A. (Hrsg.) (2010): Recycling Technologies. RedSmelt™/ RedIron™/ Primus®/ i-Meltor™/ PLD. 4 Seiten
- (113) Befasa ScanDust AB (Hrsg.) (o.J.): Scandust. Online im Internet: www.scandust.se/scandust.htm. Stand: 13.03.2014
- (114) Outotec (Hrsg.) (2011): Ausmelt Melting and Converting. Brochure Outotec Ausmelt TSL Process. Online im Internet: www.outotec.com/en/About-us/Ourtechnologies/Smelting/Ausmelt-smelting-and-converting/
- (115) Hughes, S. et al. (2008): Ausmelt Technology for Lead and Zinc Processing. International Symposium on Lead and Zinc Processing: Lead & Zinc 2008, 25-29, Februar 2008, Johannesburg
- (116) Genghammer, F. (2015): Ansätze zur Etablierung von Verwertungstechnologien in der deutschen Eisen- und Stahlindustrie für derzeit noch abgelagerte Stäube und Schlämme. Nichtveröffentlichte Studienarbeit, Technische Universität München, Straubing
- (117) Meuser, M.; Nagel, U. (1991): ExpertInneninterviews – vielfach erprobt, wenig bedacht. Ein Beitrag zur qualitativen Methodendiskussion. In: Garz, D.; Kraimer, K. (Hrsg.): Qualitative empirische Sozialforschung: Konzepte, Methoden, Analysen. Opladen: Westdeutscher Verlag, S. 441-471, ISBN 3-531-12289-4

- (118) Gläser, J.; Laudel, G. (2010): Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 347 Seiten, ISBN 978-3-531-17238-5
- (119) Kruse, J. (2014): Qualitative Interviewforschung: Ein integrativer Ansatz. Weinheim und Basel: Beltz Juventa, 310 Seiten, ISBN 978-3779929017
- (120) Mieg, H.; Näf, M. (2005): Experteninterviews in den Umwelt- und Planungswissenschaften. Eine Einführung und Anleitung. (2. Auflage), Zürich: Institut für Mensch-Umwelt-Systeme (HES), ETH Zürich, 51 Seiten
- (121) o. A. (2015): Leitfaden zur Bewertung von Ressourceneffizienz in Projekten der BMBF-Fördermaßnahme MatRessource. 61 Seiten.
- (122) Umweltbundesamt (Hrsg.) (2012): Indikatoren / Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion. Forschungskennzahl 205 93 368, UBA-FB 001563, Dessau-Roßlau, 248 Seiten, ISSN 1862-4804
- (123) Ritthoff, M.; Rohn, H.; Liedtke, C. (2002): MIPS berechnen – Ressourcenproduktivität von Produkten und Dienstleistungen. Wuppertal Spezial 27, ISBN 3-929944-56-1
- (124) Hunkeler, D; Lichtenvort, K.; Rebitzer, G. (Hrsg.) (2008): Environmental life cycle costing. Boca Raton: Taylor & Francis, 191 Seiten, ISBN 978-1-420-05470-5
- (125) Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.) (o.J.): VDI-Richtlinien. Online im Internet: www.vdi.de/technik/richtlinien/
- (126) Glöser, S. et al. (2014): Dynamische Stoffstrommodellierung von Industriemetallen am Beispiel eines globalen und Europäischen Kupfermodells. 3. Symposium Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovationen, Nürnberg (Germany), 5./6. Februar 2014
- (127) Müller-Herbers, S. (2007): Methoden zur Beurteilung von Varianten. Arbeitspapier der Universität Stuttgart, Fakultät Architektur und Stadtplanung, Institut für Grundlagen der Planung
- (128) Hanusch, H. (2011): Nutzen-Kosten-Analyse. München: Verlag Vahlen, 217 Seiten, ISBN 978-380063412-5
- (129) Warnecke, H. J. et al. (2003): Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure. München/Wien: Carl Hanser Verlag, 211 Seiten, ISBN 3-446-12667-8
- (130) Cords, J. (1992): ABC-Analyse. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 93 Seiten, ISBN 978-3-409-03632-0
- (131) Eberle, D. (1981): Fallbeispiele zur Weiterentwicklung der Standardversion der Nutzwertanalyse. Beiträge der Akademie für Raumforschung und Landesplanung, Band 51. Hannover: Hermann Schroedel Verlag, 86 Seiten, ISBN 3-507-91714-9
- (132) Eekhoff, J.; Heidemann, C.; Strassert, G. (1981): Kritik der Nutzwertanalyse. IfR Diskussionspapier Nr. 11, 58 Seiten

- (133) Berger-Grabner, D. (2013): Wissenschaftliches Arbeiten in den Wirtschafts- und Sozialwissenschaften: Hilfreiche Tipps und Praktische Beispiele. Wiesbaden: Springer Gabler, 256 Seiten, ISBN 978-3834932549
- (134) United Nations Environment Programme (Hrsg.) (2011) Recycling Rates of Metals – A Status Report. 45 Seiten, ISBN 978-92-807-3161-3
- (135) Geier, B.; Raupenstrauch, H.; Reiter, W.; Pilz, K. (2014): Verwertung zinkhaltiger Stäube der metallurgischen Industrie. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Jg. 2014, Nr. 66, S. 398-402
- (136) Deutsches Institut für Normung (Hrsg.) (2006): DIN EN ISO 14044:2006-10, Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen
- (137) Deutsches Institut für Normung (Hrsg.) (2006): DIN EN ISO 14040-10, Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen
- (138) Vogt, R. et al. (2006): Beitrag der Abfallwirtschaft zur nachhaltigen Entwicklung in Deutschland - Industrieabfälle, FKZ 205 33 312. Heidelberg
- (139) Umweltbundesamt (Hrsg.) (2011): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2011 – Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2009. Dessau-Roßlau, ISSN 1862-4359
- (140) Taube, K. (1998): Stahlerzeugung kompakt – Grundlagen der Eisen- und Stahlmetallurgie. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg, 231 Seiten, ISBN 3-528-03863-2
- (141) Vogt, R. et al. (2006): Beitrag der Abfallwirtschaft zur nachhaltigen Entwicklung in Deutschland – Industrieabfälle. Förderkennzeichen (UFOPLAN) 205 33 312, Heidelberg
- (142) Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie e. V. (Hrsg.) (o.J.): Kalk. Online im Internet: www.kalk.de. Stand: 26.12.2015
- (143) Umweltbundesamt (Hrsg.) (2012): Analyse und Fortentwicklung der Verwertungsquoten für Wertstoffe, Sammel- und Verwertungsquoten für Verpackungen und stoffgleiche Nichtverpackungen als Lenkungsinstrument zur Ressourcenschonung. Dessau-Roßlau, ISSN 1862-4804

Anhang 1: Glossar (alphabetisch)

Abfall, Abfälle	„Abfälle (...) sind alle Stoffe oder Gegenstände, derer sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss.“ (6)
Abstich, abstechen	Öffnung des Hochofens durch einen Einstich, sodass das Roheisen und Schlacke abfließen können.
Basizität	Größe zur Einteilung von metallurgischen Schlacken in sauer und basisch. Wird durch das Verhältnis von CaO und SiO ₂ in der Schlacke bestimmt.
Black Box	Geschlossenes System, dessen Inneres nicht betrachtet wird.
Beize	Säure oder Lauge zur Oberflächenbehandlung des Stahls zur Entfernung des Zunders.
Closed-Loop-Recycling	Das Recycling eines Rückstandes findet innerhalb der Prozesskette statt, in der der Rückstand entstanden ist. (34)
COREX	Schmelzreduktionsverfahren zur Roheisenherstellung, das ohne Koks arbeitet, der Prozess arbeitet mit stückigem Erz (10)
Dekanter	Separator von Stoffen mit unterschiedlichen Dichten
Deponie	„Deponien (...) sind Beseitigungsanlagen zur Ablagerung von Abfällen oberhalb der Erdoberfläche (oberirdische Deponien) oder unterhalb der Erdoberfläche (Untertagedeponien).“ (6)
End-of-Pipe-Lösungen	Maßnahmen am Ende der Nutzungsdauer eines Produktes ohne die Einbeziehung der Herstellung und Nutzung des Produktes (29)
Energierohstoff	„Rohstoff, in dem Energie, chemisch oder physikalisch (z. B. mechanisch, thermisch) gespeichert ist und der damit energetisch genutzt werden kann. Hierzu zählen fossile Energieträger, energetisch nutzbare biotische Rohstoffe und Kernbrennstoffe.“ (32)
FINEX	Schmelzreduktionsverfahren zur Roheisenherstellung, das ohne Koks arbeitet; Weiterentwicklung des COREX-Verfahrens; der Prozess arbeitet mit Feinerzen (10)

Feuerfestmaterial, Feuerfestzustellung	Feuerfestes Material / Keramik, mit dem Prozessöfen, Rinnen usw. in der Metallurgie ausgekleidet sind.
Frischen	Entfernung unerwünschter Elemente aus dem Roheisen mittels Einblasen von Sauerstoff.
Gangart	Mineralien, die in der Schmelze vom Eisen getrennt werden.
Gestell	Bereich des Hochofens unterhalb der Blasformen, in dem sich das Roheisen und die Schlacke sammeln (10)
Gicht	Oberer Bereich des Hochofens, durch den dieser beschickt wird, ohne dass das Gichtgas entweichen kann (10)
Grünpellets	Siehe Pellets
Hauptprodukt	„Aus der Produktion hauptsächlich beabsichtigter Output auf der entsprechenden Prozessstufe, welcher den Hauptnutzen stiftet.“ (33)
(integriertes) Hüttenwerk	Anlagenkombination der Oxygenstahlroute bestehend aus Sinteranlage(n), Hochofen/Hochöfen, Konverter(n), Sekundärmetallurgie, Gießanlagen und Umformanlagen
Kalzinierung	Zersetzung und Entwässerung von Stoffen durch Erhitzen
Kreislaufwirtschaft	„Vermeidung und Verwertung von Abfällen“ (32)
Lebensweg, Produktlebensweg	„Aufeinander folgende und miteinander verbundene Stufen eines Produktsystems von der Rohstoffgewinnung oder Rohstoffherzeugung bis zur stofflichen oder energetischen Verwertung oder endgültigen Beseitigung des Produktes“ (137)
Linz-Donawitz-Verfahren	Frischeprozess zur Herstellung von Stahl aus Roheisen, bei dem unerwünschte Begleitelemente ausgetrieben werden.
Luppe	Schmiedbares Schmelzprodukt, ähnlich dem heutigen Eisenschwamm
Material	„Sammelbegriff für Stoffe und Stoffgemische“ (32)
Möller	Mischung der in den Hochofen einzubringenden Stoffe: Eisenträger und Zuschläge.

Nebenprodukt	„Nicht beabsichtigter Output aus einem Prozess. Nebenprodukte liefern keinen Beitrag zur Erfüllung dessen Funktion und sind oft mit dem Haupt- resp. Kuppelprodukt materiell vermischt oder verschmolzen (stoffliche Verunreinigungen).“ (33)
Ökobilanz	„Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges“ (137)
Open-Loop-Recycling	Das Recycling eines Rückstandes findet außerhalb der Prozesskette statt, in der der Rückstand entstanden ist. Der Rückstand verlässt also das System. Ein Open-Loop-Recycling kann pre-consumer oder post-consumer stattfinden. (34)
Oyj	Finnische Bezeichnung für eine Aktiengesellschaft
Pellets	Kügelchen geformt aus Feinerzen von 10 bis 15 mm Durchmesser (44)
post-consumer	Nach der Nutzungsphase eines Gutes
pre-consumer	Vor der der Nutzungsphase eines Gutes
Primärressource, primärer Rohstoff	„Rohstoff, der durch Entnahme aus der Natur gewonnen wird“ (32)
Produkt	„Unmittelbar angestrebtes Ergebnis eines Prozesses. Hierzu zählen bearbeitete Rohstoffe, Halb- und Fertigwaren, Energie sowie Dienstleistungen“ (32)
Produktsystem, System, Stoffsystem	„Gesamtheit der mit einem Produkt über seinen gesamten Lebensweg in Verbindung stehenden Prozesse sowie der zugehörigen stofflichen und energetischen Flüsse“ (32) (136)
Prozess	„Satz von in Wechselbeziehung oder Wechselwirkung stehenden Tätigkeiten, der Eingaben (Input) in Ergebnisse (Output) umwandelt“ (32)
Prozesskettenanalyse	„Unter einer Prozesskettenanalyse wird (...) die ökologische Untersuchung einer Abfolge direkter und indirekter Produktionsschritte im Sinne von Teilprozessen verstanden, die innerhalb des Bilanzrahmens Betrieb ablaufen.“ (26)

Recycling	<p>„Jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfallmaterialien zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden. Es schließt die Aufbereitung organischer Materialien ein, aber nicht die energetische Verwertung und die Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung bestimmt sind.“ (71)</p> <p>„Recycling stellt den Rückfluss von wiederverwertbaren Gütern und Stoffen in die Produktion derselben oder ähnlicher Güter dar. Diese Güter und Stoffe haben bereits zu einer bestimmten Funktion beigetragen.“ (33)</p>
Ressource	<p>„Mittel, das in einem Prozess genutzt wird oder genutzt werden kann. Eine Ressource kann materieller oder immaterieller Art sein.“ (32)</p>
Ressourcen-effizienz	<p>„Verhältnis eines bestimmten Nutzens oder Ergebnisses zum dafür nötigen Ressourceneinsatz. (...) Die Steigerung der Ressourcen-effizienz ist (...) eine Strategie zur relativen oder absoluten Senkung der Ressourceninanspruchnahme.“ (32)</p>
Rohstoff	<p>„Stoff oder Stoffgemisch in un- oder gering bearbeitetem Zustand, der / das in einen Produktionsprozess eingehen kann.“ (32)</p>
Schlacke	<p>„Sammelphase für die nicht reduzierte Gangart der Beschickung“ (10)</p>
Siemens-Martin-Verfahren	<p>Schrottschmelzverfahren als „allothermer, mit Starkgas oder Öl befeuerter, im Regeneratormodus betriebener Herdofenprozess“ (10)</p>
Stoff	<p>„Chemisches Element oder eine chemische Verbindung“ (32)</p>
Stoffgemisch	<p>„Ein Gemisch aus zwei oder mehreren Stoffen“ (32)</p>
Stoffstrom	<p>„Gerichtete Bewegung von Stoffen und Stoffgemischen“ (32)</p>
Stoffstromanalyse	<p>„Systemanalytisches Verfahren zur Erfassung von Stoffströmen, die auf ein bestimmtes Bezugssystem zurückzuführen sind“ (32)</p>
Stoffstrom-management	<p>„das zielorientierte, verantwortliche, ganzheitliche und effiziente Beeinflussen von Stoffsystemen“ (8)</p>

System	Zusammenstellung von Prozessen, die gemeinsam eine bestimmte Funktion erfüllen (30)
Systemgrenzen	Eingrenzung des betrachteten Systems (30)
Transkription	Übertragung von Aufzeichnungen in einen vollständigen Text.
Wertstoff- ausbringung	gibt an, welcher Anteil der Wertstoffe im Aufgabegut in einem beliebigen Produkt ausgebracht wird (143)
Zementation	Fällungsprozess zur Abscheidung von Metallen aus einer Salzlösung.
Zunder	Oxidschicht, die beim Umformen auf dem Stahl entsteht.

Abkürzungen

AP	Ausmelt TSL-Prozess
BDR	Beschränkung der Rückgewinnung
BF	Hochofen (Blast furnace)
BMBF	Bundeministerium für Bildung und Forschung
Bsp.	Beispiel
BVT	beste verfügbare Technik
CCS	Carbon Capture and Storage
CL	Cebedeau-Laugung
DIN	Deutsches Institut für Normung
DK	DK-Prozess
DRI	direkt reduziertes Eisen (direkt reduced iron), auch: Eisenschwamm
EAF	Elektrolichtbogenofen (Electronic Arc Furnace)
EOS	Emission Optimized Sintering
EPOSINT	Environmentally Process Optimized Sintering
FES	Forschungs- und Entwicklungszentrum für Sondertechnologien
FONA	Forschung für Nachhaltige Entwicklung
Gew.-%	Gewichtsprozent
GF	Gewichtungsfaktor
GIS	Geoinformationssystem
GNW	Gesamtnutzwert
INT	Integrierbarkeit
IP	INMETCO-Prozess
ISO	Internationale Organisation für Normung
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KRA	Kumulierter Rohstoffaufwand
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
Kt	Kilotonne = 1.000 Tonnen
LCC	Life Cycle Costing
LD	Linz-Donawitz(-Verfahren)
LEEP	Low Emission and Energy optimized Sintering Process

Abkürzungen

Mio.	Million
Mrd.	Milliarde
MIPS	Materialinput pro Serviceeinheit
NVR	Nicht verwertbare Rückstände
OLR	Open-Loop-Recycling
OX	OxyCup-Prozess
PDR	Produktionsrücklauf
PP	Primus-Prozess
PS	Plasmadust- / ScanDust-Prozess
PZR	Prozessrücklauf
r ²	Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – rohstoffintensive Produktionsprozesse
RGG	Rückgewinnung
RHF	Rotary Hearth Furnace
RSV	Rückstandsverwertung
RWI	Rheinisch-Westfälische Institut für Wirtschaftsforschung
SDHL	Saage, Dittrich, Hasche, Langbein (Erfinder des Prozesses)
TSL	Top Submerged Lancing
Uebel	Umwelteinwirkungsbelastung
UNEP	United Nations Environment Programme
VDEh	Verein Deutscher Eisenhüttenleute, heute Stahlinstitut VDEh
vgl.	vergleich(e)
VWM	Verwertbare Menge
WOL	Weitere Open-Loops
WP	Wälzprozess
WSA	Wertstoffausbringung
ZF	Zielerreichungsfaktor

Anhang 2: Datentabellen zu den Modellierten Stoffströmen der Grundstoffproduktion

Die Datentabellen in diesem Anhang geben die Werte der Stoffströme in den folgenden Abbildungen wieder:

Abbildung 10: Modellierung der Stoffströme der Grundstoffproduktion der Eisen- und Stahlindustrie

Abbildung 13: Modellierung der Stoffströme der Grundstoffproduktion der Eisen- und Stahlindustrie mit Kategorisierung der Stoffströme

Abbildung 15: Stoffflussbild des Teilprozesses Sintererzeugung mit Kategorisierung

Abbildung 17: Stoffflussbild des Teilprozesses Roheisenerzeugung mit Kategorisierung

Abbildung 20: Stoffflussbild des Teilprozesses Rohstahlerzeugung mit Kategorisierung

Abbildung 21: Stoffflussbild des Teilprozesses Umformen mit Kategorisierung

Stoffströme des Teilprozesses Sintererzeugung	Jahr	Menge in t bzw. tsd. m³	Quelle
Vorbemerkungen			
verwendetes Eisenerz der Eisen- und Stahlindustrie	2008	44.316.000	(14)
Roheisenproduktion	2008	29.111.000	(14)
Menge Walzzunder und Walzzunderschlamm	2010	828.772	berechnet mit (43)
Erzeugter Sinter	2008	28.970.000	(14)
Inputs			
Eisenerz	2008	37.048.439	berechnet mit (13)
feste Brennstoffe (Koks, Koksgrus, Steinkohle)	2008	1.919.000	(14)
Kokereigas	2008	59.000	(14) in tsd m ³
Erdgas		16.000	(14) in tsd m ³
Kalkstein	2008	4.541.174	(139)
Branntkalk	2008	601.142	berechnet mit (14) und (139)
Gesamtkalkeinsatz	2008	5.142.316	aufsummiert
Walzzunder und Walzzunderschlamm	2010	513.839	berechnet mit (52) und (53)
Gesamtstäube in Sintermischung	2006	846.470	berechnet mit (51) und (52)
davon eigene Stäube zurück	2006	453.662	berechnet mit (51) und (52)
Stäube und Schlämme aus anderen Stufen	2006	392.808	berechnet mit (51) und (52)
Rückgut	2010	7.242.500	Berechnet mit (37) und (140)
Outputs			
Sinterstaub grob	2006	430.000	(51)
Sinterstaub fein	2006	31.000	(51)
Stäube zur Deponierung	2006	7.338	berechnet mit (51) und (52)
Rückgut	2008	7.242.500	berechnet mit (140)
Sinterabgas	2008	57.940.000	berechnet mit (45)
Sinterabgas zurück in Sinteranlage	2009	9.320.640	berechnet mit (82)
Sinterabgas zur Aufbereitung	2009	48.619.360	berechnet

Stoffströme des Teilprozesses Roheisenerzeugung	Jahr	Menge in t bzw. tsd. m³	Quelle
Vorbemerkungen			
verwendetes Eisenerz der Eisen- und Stahlindustrie	2008	44.316.000	(14)
Roheisenproduktion	2008	29.111.000	(14)
Walzzunderaufkommen	2010	828.772	berechnet mit (43)
Inputs			
Sinter	2008	28.970.000	(14)
Eisenerz (Stückerz)	2008	7.267.561	berechnet mit (13)
Pellets	2008	13.883.547	berechnet mit (13)
Kalkstein	2008	790.216	(139)
Branntkalk	2008	126.633	berechnet mit (139) und (142)
Gesamtkalkeinsatz	2008	916.849	Kalkstein und Branntkalk aufsummiert
flüssige Brennstoffe (Schweröl)	2008	565.000	(14)
feste Brennstoffe (Steinkohle und - briketts, Koks, Koksgrus)	2008	13.833.000	(14)
Hochofengas (Winderhitzung)	2008	1.347.000	(14)
Kokereigas	2008	89.000	(14)
Erdgas	2008	573.000	(14)
Konvertergas	2008	52.000	(14)
Sauerstoff	2008	1.480.000	(14)
Walzzunder	2010	16.575	berechnet mit (52) und (53)
Outputs			
Hochofenstaub	2006	276.000	(51)
Hochofenschlamm	2006	231.000	(51)
Hochofenstaub in Sinter	2006	276.000	(37)
Hochofenschlamm zur externen Verwertung (DK, OxyCup)	2006	106.722	berechnet mit (51) und (52)
Hochofenschlamm zur Deponierung	2006	124.278	berechnet mit (51) und (52)
Hochofengas	2008	4.881.000	(13) und (14)
Hochofengas zur Wärme- und Stromerzeugung	2008	3.309.000	berechnet mit (14)
Hochofenschlacke	2008	7.920.000	(47)
Hochofenschlacke als Hüttensand in Zementindustrie	2008	6.430.000	(47)

Fortsetzung Stoffströme des Teilprozesses Roheisenerzeugung	Jahr	Menge in t bzw. tsd. m³	Quelle
Hochofenschlacke als Hüttensand in Straßenbau	2008	130.000	(47), (54)
Hochofenstückschlacke in Straßenbau und andere Baustoffe	2008	1.220.000	(47)
Hochofenschlacke in Bauindustrie		7.780.000	Hochofenschlacke für den Straßenbau und für Baustoffe aufsummiert
Hochofenschlacke für Düngemittel (Hüttenkalk)	2008	10.000	(47)
Hochofenschlacke in Eigenverbrauch und Zwischenlager	2008	130.000	(47)

Stoffströme des Teilprozesses Rohstahlerzeugung	Jahr	Menge in t bzw. tsd. m³	Quelle
Vorbemerkungen			
Produktion Oxygenstahl	2008	31.193.000	(14)
Produktion Elektrostahl	2008	14.639.000	(14)
Walzzunderaufkommen	2010	828.772	berechnet mit (43)
Inputs			
Eisenschwamm, DRI	2008	515.544	berechnet mit (20) und (23)
Brannkalk Oxygenstahlverfahren	2008	1.559.650	berechnet mit (142)
Brannkalk Elektrostahlverfahren	2008	658.755	berechnet mit (142)
Gesamt-Brannkalk-Einsatz	2008	2.218.405	aufsummiert
feste Brennstoffe (Steinkohle und -briketts, Koks)	2008	67.000	(14)
Hochofengas	-	9.000	statistisch geheim nach (14), stellvertretender Wert (Annahme)
Kokereigas	2008	60.000	(14)
Konvertergas	-	9.000	statistisch geheim nach (14), stellvertretender Wert (Annahme)
Erdgas	2008	215.000	(14)
Sauerstoff	2008	2.223.000	(14)
Stäube und Schlämme aus anderen Stufen	2006	90.050	berechnet mit (51) und (52)
Walzzunder	2010	16.575	berechnet mit (52) und (53)
Schrott in Konverter	2008	5.509.000	(14)
Schrott in Elektroöfen	2008	15.200.000	(14)
Stahlwerksschlacken (aus Elektroöfen und Konvertern)	2008	680.400	(54)
metallische Einsatzstoffe (Fe- Legierungen, Legierungsmetalle, Eisenerz, Mangenerz u.a.)	2002	2.352.000	(14)
Eigenschrott	2008	43.917	berechnet mit (37)
Schrott aus Umformen	2008	5.075.138	berechnet (Eigenschrotte des Umformens)
Schrott aus Recycling	2008	15.589.946	berechnet
Gesamtschrotteinsatz	2008	20.709.000	Berechnet aus (14)
Outputs			
Konverterstaub und -schlamm grob	2006	137.000	(51)
Konverterstaub und -schlamm fein	2006	425.000	(51)
Konverterstaub und -schlamm in externe Verwertung	2006	404.714	berechnet mit (51) und (52)
Konverterstaub und -schlamm zur Deponierung	2006	157.286	berechnet mit (51) und (52)
Elektroofenstaub (EAF-Staub)	2006	198.000	(27), (51)

Fortsetzung Stoffströme des Teilprozesses Rohstahlerzeugung	Jahr	Menge in t bzw. tsd. m³	Quelle
Elektroofenstaub (EAF-Staub) in externe Verwertung	2006	192.258	berechnet mit (51) und (52)
Elektroofenstaub (EAF-Staub) zur Deponierung	2006	5.742	berechnet mit (51) und (52)
Konvertergas	2008	398.000	(13)
Konvertergas zur Wärme- und Stromerzeugung für das Hüttenwerk sowie Fackel	2008	267.000	berechnet aus (14)
Stahlwerksschlacke	2008	6.300.000	(54)
Stahlwerksschlacke in Baustoffe (Straßenbau, Wegebau, Erdbau, Wasserbau)	2008	4.265.100	(27), (54)
Stahlwerksschlacke als Düngemittel	2008	510.300	(54)
Stahlwerksschlacke auf Deponie	2008	699.300	(54)

Stoffströme des Teilprozesses Umformen	Jahr	Menge in t bzw. tsd. m³	Quelle
Inputs			
flüssige Brennstoffe	2006	19.000	(14)
Hochofengas	2004	216.000	(14)
Kokereigas	2008	404.000	(14)
Erdgas	2008	1.479.000	(14)
Konvertergas	2008	70.000	(14)
Sauerstoff	2008	49.000	(14)
sonstige Gase	2004	55.000	(14)
Beizsäuren	-	20.000	nicht quantifizierbar nach (11), (138), Annahme: ähnlich Abbeize
Outputs			
Walzstahl	2008	39.805.000	(14)
andere Stähle	2008	8.527.000	(14)
Walzzunder	2008	645.482	berechnet mit (43)
Walzzunder in Hochöfen	2010	16.575	berechnet mit (52) und (53)
Walzzunder in Stahlwerke	2010	16.575	berechnet mit (52) und (53)
Walzzunderschlamm	2008	183.290	berechnet mit (43)
Walzzunder und Walzzunderschlamm in Sinter	2010	513.839	berechnet mit (52) und (53)
Walzzunder und Walzzunderschlamm in externe Verwertung (z. B. Zementindustrie)	2008	281.782	berechnet mit (52)
Abbeize	2003	18.068	berechnet mit (141)
Rückführung der Abbeize-Aufbereitungsprodukte	2003	10.118	(141)
Abbeize in Behandlungsanlagen	2003	7.950	(141)
Abbeizschlamm	-	6.000	nicht quantifizierbar, stellvertretender, geschätzter Wert
Eigenschrott Strangguss	2008	696.588	berechnet mit (37)
Eigenschrott Warm- und Kaltwalzen	2008	4.378.550	berechnet mit (37)
Schrott aus Umformen (in Rohstahlerzeugung)	2008	5.075.138	berechnet

Tabelle 31: Berechnung der Deponierung von Stäuben und Schlämmen nach (51) und (52)

in t	Sinterstaub grob	Sinterstaub fein	Hochofen- staub	Hochofen- schlamm	Konverter- staub / -schlamm grob	Konverter- staub / -schlamm fein	Elektroofen- staub	Gießhallen- staub	Übrige
Anfall 2006	430.000	31.000	276.000	231.000	137.000	425.000	198.000	38.000	35.000
davon deponiert in %	1,00	9,80	0,00	53,80	5,30	35,30	2,90	8,40	26,80
davon deponiert in t	4.300	3.038	0	124.278	7.261	150.025	5.742	3.192	9.380
Gesamtstäube und -schlämme gesamte				1.801.000					
Deponierung				307.216					
Deponierung Sinter	7.338								
Deponierung Hochofen			124.278						
Deponierung Stahlerzeugung									163.028

Anhang 3: Die Nutzwertanalysen in Worten

Tabelle 16: Ergebnis der Nutzwertanalyse für Verfahren zur Verwertung von Hochofenschlamm und Konverterrückständen in Worten (Tabelle 16)

Verfahren	DK-Prozess		OxyCup-Verfahren		Inmetco / RedIron		Primus-Prozess	
Rückstands- verwertung	Hochofenstäube und - schlämme, Walzzunder, Konverter- rückstände, sonstige eisenhaltige Sekundär- rohstoffe	1	Hochofen- schlamm, Walzzunder, Konverterstaub	0,5	verschiedene Metallurgie- reststoffe	1	ölicher Walzzunder- schlamm, Hochofen- schlamm, EAF-Staub	1
Rückgewinnung	Roheisen, Zink	0,5	Roheisen, Zink	0,5	Zink- und Bleioxid, Eisenschwamm	1	Eisen und Zinkoxid	0,5
Nicht verwertbare Rückstände	keine	1	keine	1	keine	1	keine	1
Weitere Open- Loops	Schlacke als Baustoff	0,5	Schlacke für Wasser- bausteine	0,5	keine	0	Schlacken- verwertung im Straßenbau	0,5
Integrierbarkeit	eigenes Hüttenwerk, nicht integrierbar	0	Schachtofen + Brikettfabrik	0,5	größere Anlage	0,5	Etagenofen und kleiner Lichtbogenofen	0,5
Verwertbare Menge	zwischen 340.000 t/a und 430.000 t/a	1	176.000 t/a	1	60.000 t/a	0,5	60.000 t/a	0,5
Wertstoff- ausbringung	100 % Eisen > 100 % Zink	1	> 95 % Zink > 99 % Eisen	1	99 % Zink, 80 % Blei, 98 % Eisen	0,5	> 95 % Zink > 99 % Eisen	1
Beschränkung der Rückgewinnung	keine Beschränkung	1	keine Beschränkung	1	keine Beschränkung	1	Mindestzink- gehalt: 5 %	0,5
Gewichtete Summe (Gesamt- nutzwert)		0,786		0,750		0,759		0,714
Rang		1		3		2		4

Anhang 3: Die Nutzwertanalysen in Worten

Tabelle 17: Ergebnis der Nutzwertanalyse für Verfahren zur Verwertung von EAF-Staub in Worten (Tabelle 17)

Verfahren	Primus-Prozess	Inmetco / RedIron Prozess	Wälzprozess	Plasmadust / Scandust Verfahren	Cebedeau-Laugung	TSL-Verfahren von Ausmelt						
Rückstands- verwertung	öliger Walzzunderschlamm, Hochofenschlamm, EAF-Staub	1	verschiedene Metallurgiereststoffe	1	EAF-Staub, zinkhaltige Einsatzstoffe aus anderen Industrien	0,5	derzeit nur EAF-Stäube	0	nur für EAF-Staub	0,0	Zinkhaltige Einsatzmaterialien	0,5
Rück- gewinnung	Eisen und Zinkoxid	0,5	Zink- und Bleioxid, Eisenschwamm	1	Zink (Wälzoxid)	0	Hüttenzink, Roheisen	0,5	Zink, Bleischlamm	0,5	Zink	0
Nicht verwertbare Rückstände	keine	1	keine	1	Schlacke enthält sehr viel Eisen, daher meist Deponierung	0,5	Deponierung CaF ₂ -Schlamm	0,5	Eisenhaltiger Laugenrückstand wird deponiert	0,5	keine	1
Weitere Open-Loops	Schlackenverwertung im Straßenbau	0,5	keine	0	Schlackenverwertung im Straßenbau	0,5	Schlackenverwertung in Bauindustrie	0,5	keine	0	Schlackenverwertung in Baumaterialien	0,5
Integrier- barkeit	Etagenofen und kleiner Lichtbogenofen	0,5	mittlere Anlage + evtl. EAF	0,5	Drehrohr- ofen	1	Schachtofen mit plasma-beheiztem Koksbett	0,5	viele kleinere Anlagenteile	0,5	größere Anlage und zusätzliche Laugung	0,5
Verwertbare Menge	60.000 t/a	0,5	60.000 t/a	0,5	Annahme: mittelgroße Anlage	0,5	55.000 t/a	0,5	12.000 t/a	0	50.000	0,5
Wertstoff- ausbringung	> 95 % Zink > 99 % Eisen	1	99 % Zink, 80 % Blei, 98 % Eisen	0,5	85 - 95 % Zink 50 - 75 % Eisen	0,5	>95 % Zink >95 % Blei >98 % Eisen (Ni und Mo: 95 %, Cr: 85 %)	1	85 % Zink	0,5	Annahme: ähnlich Cebedeau-Laugung	0,5
Beschrän- kung der Rück- gewinnung	Zinkmindest- gehalt: 5 %	0,5	keine	1	Zinkmin- destgehalt: >15 %	0	Bleimaximal- gehalt: 10 %	0	Zinkmindest- gehalt: 20 % mit Zink- ferritanteilen	0	Zinkmin- destgehalt: 15-25 %	0
gewichtete Summe (Gesamt- nutzwert)		0,714		0,759		0,402		0,473		0,286		0,366
Rang		2		1		4		3		6		5