

# Recycling von Eisenhüttenschlacken

## – Technisch-ökonomische Analyse und Bewertung –

Christoph Meyer, Matthias G. Wichmann und Thomas S. Spengler

|        |   |     |
|--------|---|-----|
| 1.     | Einleitung.....   | 465 |
| 1.1.   | Ausgangslage und Problemstellung.....   | 465 |
| 1.2.   | Zielsetzung und Vorgehensweise.....   | 467 |
| 2.     | Aufgabe und Rahmenbedingungen einer Recyclingplanung<br>für Eisenhüttenschlacken..... | 467 |
| 2.1.   | Planungsaufgabe.....  | 467 |
| 2.2.   | Einflussgrößen einer Recyclingplanung.....  | 469 |
| 2.2.1. | Technische Einflussgrößen.....  | 469 |
| 2.2.2. | Ökonomische Einflussgrößen.....   | 471 |
| 2.2.3. | Ökologische Einflussgrößen.....   | 472 |
| 2.3.   | Anforderungen an eine Recyclingplanung.....   | 473 |
| 3.     | Bestehende Ansätze zur Recyclingplanung.....  | 474 |
| 4.     | Konzeption eines Ansatzes zur Recyclingplanung<br>für Eisenhüttenschlacken.....       | 475 |
| 4.1.   | Technisch-ökonomische Analyse und Bewertung<br>von Recyclingalternativen.....         | 475 |
| 4.2.   | Erwartete Ergebnisse.....   | 481 |
| 5.     | Zusammenfassung.....  | 481 |
| 6.     | Quellen.....  | 482 |

## 1. Einleitung

### 1.1. Ausgangslage und Problemstellung

Industrielle Primärrohstoffe sind endlich. Die Verknappung von Primärrohstoffen durch steigende Beanspruchung äußert sich zum einen in einer längerfristig irreversiblen Rohstoffverteuerung. Zum anderen wird die mit dem Abbau der Primärrohstoffe einhergehende Belastung des Ökosystems aus Nachhaltigkeitsgründen zunehmend kritisch hinterfragt. [14, S. 3 ff.]

Der Verbrauch an Primärrohstoffen kann durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen reduziert werden. Sekundärrohstoffe lassen sich unter anderem durch das Recycling von Kuppelprodukten, die bei der industriellen Herstellung von Produkten entstehen, gewinnen. [26, S. 32 f.] Eine Industrie, die von vielfältigen Kuppelproduktionszusammenhängen geprägt ist, ist die der Eisen- und Stahlerzeugung. [13, S. 24 f.]

Ein wesentliches Kuppelprodukt der Eisen- und Stahlerzeugung sind Eisenhüttenschlacken, die als Schmelzrückstände in mengenmäßig großem Umfang entstehen. So fielen bei einer Jahreserzeugung von 44 Millionen Tonnen Rohstahl im Jahr 2011 deutschlandweit 14 Millionen Tonnen Eisenhüttenschlacken an. [39, 23, S. 14] Die Produktion einer Tonne Rohstahl ist somit durchschnittlich an die Entstehung von 315 kg Eisenhüttenschlacken gekoppelt. Eisenhüttenschlacken erfüllen bei der Roh-eisen- und Rohstahlerstellung wichtige metallurgische Aufgaben und sind daher verfahrenstechnisch unabdingbar. [31, S. 69 ff.]

Obwohl Eisenhüttenschlacken zwangsläufig entstehen, stellen sie in der Regel keinen Abfall, sondern Nebenprodukte dar und besitzen aufgrund ihrer Eigenschaften ein hohes Potential zur Nutzung als Sekundärrohstoffe. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Eisenhüttenschlacken je nach betrachteter Verfahrensrouten und -stufe der Eisen- und Stahlerzeugung in unterschiedlichen Mengenverhältnissen anfallen und unterschiedliche stoffliche Zusammensetzungen aufweisen. In der Folge eröffnen sich für Eisen und Stahl erzeugende Unternehmen für unterschiedliche Schlacken verschiedene Recyclingalternativen. So werden recycelte Schlacken derzeit beispielsweise zur Herstellung von Straßenbaustoffen, Zementen oder Düngemitteln eingesetzt. [4, S. 40 ff.]

Die Nutzbarkeit einzelner Recyclingalternativen unterliegt dabei einer Vielzahl technischer, ökonomischer und ökologischer Einflussgrößen. Technische Einflussgrößen, wie die erzeugte Menge und stoffliche Zusammensetzung beeinflussen die Einsatzmöglichkeiten von Sekundärrohstoffen aus Eisenhüttenschlacken maßgeblich. [12, S. 9 ff.] Auch ökonomische Größen, wie die jeweiligen Recyclingkosten und die erzielbaren Sekundärrohstoff Erlöse sind im Hinblick auf die Nutzung einer Recyclingalternative relevant. Ökologische Einflussgrößen manifestieren sich in den Auswirkungen gesetzlicher Rahmenbedingungen auf die tatsächliche Nutzbarkeit einer Recyclingalternative und der resultierenden Sekundärrohstoffe. Hier sind beispielsweise das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG), das Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) sowie die im Entwurf vorliegende Ersatzbaustoffverordnung zu nennen. [19, 3, 22]

Die technischen, ökonomischen und ökologischen Einflussgrößen wirken zusammen und können nicht isoliert voneinander betrachtet werden. So unterliegen die chemischen und mechanischen Eigenschaften von Sekundärrohstoffen aus Eisenhüttenschlacken rechtlichen Rahmenbedingungen und beeinflussen den erzielbaren Sekundärrohstoff Erlös.

Die Vielzahl zu berücksichtigender Einflussgrößen und deren Zusammenwirken stellen Eisen und Stahl erzeugende Unternehmen vor die Frage, wie Eisenhüttenschlacken technisch, ökonomisch und ökologisch sinnvoll zu recyceln sind. Die Frage nach der Vorteilhaftigkeit der Nutzung einzelner Recyclingalternativen lässt sich aus Sicht eines

Eisen- und Stahlerzeugers nicht pauschal beantworten. Ansätze zur Entscheidungsunterstützung, die die zu berücksichtigenden Zusammenhänge sowohl mengen- als auch wertbezogen adäquat abbilden, existieren bislang jedoch nicht.

### 1.2. Zielsetzung und Vorgehensweise

Das Ziel dieses Beitrags besteht darin, einen Ansatz für eine Entscheidungsunterstützung aufzuzeigen, die die technischen, ökonomischen und ökologischen Einflussgrößen berücksichtigt. Die Entscheidungsunterstützung zielt dabei konkret auf eine operative Recyclingplanung für Eisenhüttenschlacken ab. Im Fokus der Planung steht die Festlegung, wie stark welche Recyclingalternative aus der Sicht eines Eisen- und Stahlerzeugers unter Beachtung der genannten Einflussgrößen zu nutzen ist. Die Planung basiert dabei auf einer technisch-ökonomischen Analyse und Bewertung in Frage kommender Recyclingalternativen für Eisenhüttenschlacken.

Um dieses Ziel zu erreichen, wird im zweiten Kapitel zunächst auf die Rahmenbedingungen einer Recyclingplanung für Eisenhüttenschlacken eingegangen. Zu Beginn des zweiten Kapitels wird dazu die Planungsaufgabe erläutert. Im Anschluss daran werden die relevanten Einflussgrößen dargestellt. Auf Basis der Einflussgrößen werden am Ende des zweiten Kapitels Anforderungen an eine Recyclingplanung für Eisenhüttenschlacken abgeleitet. Ausgehend von diesen Anforderungen werden im dritten Kapitel bestehende Ansätze für die Recyclingplanung kritisch analysiert. Im Anschluss daran wird im vierten Kapitel ein Ansatz zur Recyclingplanung vorgestellt, der die abgeleiteten Anforderungen erfüllt. Dazu wird auf die technisch-ökonomische Analyse und Bewertung von Recyclingalternativen eingegangen, die dem Ansatz zugrunde liegt. Das vierte Kapitel schließt mit einer Darstellung der erwarteten Ergebnisse, die im Rahmen einer Implementierung des Ansatzes zur Recyclingplanung zu erzielen sind. Den Abschluss des Beitrags bildet eine Zusammenfassung im fünften Kapitel.

## 2. Aufgabe und Rahmenbedingungen einer Recyclingplanung für Eisenhüttenschlacken

### 2.1. Planungsaufgabe

Die Frage nach der Vorteilhaftigkeit der Nutzung einzelner Recyclingalternativen lässt sich aus Sicht eines Eisen- und Stahlherstellers nicht pauschal beantworten. Das Ziel der operativen Recyclingplanung besteht darin, eine Antwort auf diese Frage zu geben, indem die für das Recycling von Eisenhüttenschlacken relevanten Stoff- und Energieströme ex ante für einen Eisen- und Stahlerzeuger festgelegt werden. Die Festlegung umfasst dabei die Stoff- und Energieströme ausgehend von der Schlackenerzeugung über die Nutzung möglicher Recyclingprozesse bis hin zum Absatz der resultierenden Sekundärrohstoffe.

Zur Darstellung der Recyclingplanung für Eisenhüttenschlacken wird die Struktur aus Schlackenerzeugung, -recycling und Sekundärrohstoffabsatz zunächst in ein Netzwerkmodell überführt. Im Netzwerkmodell stellen die Schlacken erzeugenden Anlagen eines

Eisen- und Stahlerzeugers Quellen dar. Diese Quellen werden über Recyclingprozesse mit Senken verbunden, die die aus Eisenhüttenschlacken produzierten Sekundärrohstoffe aufnehmen. [34, S. 320] Ein Beispiel für die resultierende Netzwerkstruktur aus Quellen, Prozessen und Senken ist in Bild 1 gegeben.

Das Beispielnetzwerk in Bild 1 stellt eine mögliche Netzwerkstruktur für einen Eisen- und Stahlerzeuger dar. So sind exemplarisch Quellen (Hochöfen, Konverter und Elektroöfen), Prozesse und Senken aufgeführt.<sup>1</sup> Die Quellen, Prozesse und Senken unterscheiden sich dabei in Art und Anzahl je nach betrachtetem Eisen- und Stahlerzeuger.

Im Hinblick auf das Netzwerk sieht die Recyclingplanung für Eisenhüttenschlacken vor, dass die Stoff- und Energieströme zwischen Quellen, Prozessen und Senken sowohl mengen- als auch wertmäßig festgelegt werden. Die Festlegung erfolgt innerhalb eines Planungszeitraums von maximal einem Jahr auf der operativen Ebene, welche Lenkungsaufgaben in bestehenden Netzwerkstrukturen adressiert.<sup>2</sup> Bei der Festlegung ist zu berücksichtigen, dass in Abhängigkeit von der konkret betrachteten Netzwerkstruktur technische, ökonomische und ökologische Einflussgrößen unterschiedlich stark auf das Netzwerk einwirken.

Eine Recyclingplanung für Eisenhüttenschlacken setzt voraus, dass die relevanten technischen, ökonomischen und ökologischen Einflussgrößen im Hinblick auf ein Netzwerk bekannt sind. Im Folgenden wird daher näher auf die Einflussgrößen einer operativen Recyclingplanung für Eisenhüttenschlacken eingegangen.

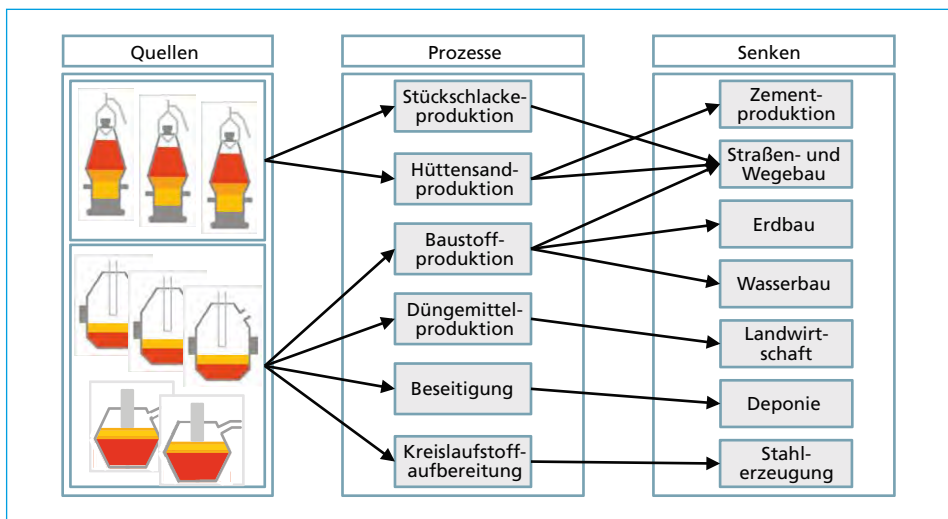


Bild 1: Netzwerkstruktur des Recyclings von Eisenhüttenschlacken

<sup>1</sup> Einzelne Quellen, Prozesse und Senken sind als Black-Box-Modelle zu verstehen, die weitere Elemente enthalten können.

<sup>2</sup> Da es für Eisenhüttenschlacken etablierte Verwertungswege gibt und die Gestaltung des in Bild 1 dargestellten Netzwerkes in der Regel bereits erfolgt ist, wird an dieser Stelle die operative Recyclingplanung fokussiert. Sie umfasst gegenüber der taktischen und strategischen Planung keine Gestaltungsaufgaben, wie beispielsweise Investitionen in neue Recyclingalternativen. [6, S. 29 ff.]

## 2.2. Einflussgrößen einer Recyclingplanung

### 2.2.1. Technische Einflussgrößen

Eisenhüttenschlacken können sich je nach vorliegender Quelle hinsichtlich ihrer Erzeugungsmenge und Qualität unterscheiden. Menge und Qualität hängen dabei von verschiedenen quellspezifischen Einflussgrößen, wie beispielsweise dem jeweiligen Roheisen- oder Rohstahlerzeugungsverfahren, der Prozessführung, der Roheisen- oder Rohstahlerzeugungsmenge und der vorliegenden Einsatzstoffzusammensetzung, ab.<sup>3</sup>

Je nach Qualität und Menge können verschiedene chemisch- und mechanisch-verfahrenstechnische Prozesse zum Recycling der jeweiligen Schlacke eingesetzt werden. In Abhängigkeit von der zu recycelnden Schlacke, der Gestaltung der Recyclingprozesse und dem resultierenden Sekundärrohstoff sind unterschiedliche technische Einflussgrößen zu berücksichtigen.<sup>4</sup> Zur Darstellung relevanter technischer Einflussgrößen für Prozesse des Schlackenrecyclings wird im Folgenden auf einen vereinfachten mechanisch-verfahrenstechnischen Beispielrecyclingprozess zurückgegriffen, der in Bild 2 dargestellt ist.<sup>5</sup>

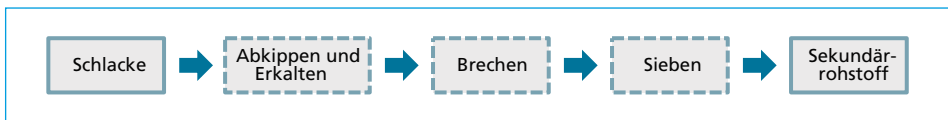


Bild 2: Beispiel für einen mechanisch-verfahrenstechnischen Recyclingprozess

Ausgehend vom Abkippen der schmelzflüssigen Schlacke in ein Schlackenbeet erkalten diese zunächst und erstarrt. Die feste Schlacke wird nachfolgend gebrochen und gesiebt. Das Ziel des Recyclingprozesses ist die Herstellung eines Sekundärrohstoffes für eine bestimmte Senke, beispielsweise den Straßenbau. Ob der Einsatz des erzeugten Sekundärrohstoffes in der gewünschten Senke möglich ist, hängt von der Qualität des Sekundärrohstoffes ab.

Anforderungen an die Qualität eines Sekundärrohstoffes ergeben sich unter anderem aus Normen. Wenn der produzierte Sekundärrohstoff im Straßenbau eingesetzt werden soll, sind beispielsweise die technischen Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau zu berücksichtigen. [36] Diese Bedingungen schreiben unter anderem vor, welche mechanischen Eigenschaften der jeweilige Sekundärrohstoff für den Einsatz in einer bestimmten Senke aufweisen muss. Um diese Anforderungen darzustellen, wird im Folgenden auf die Korngrößenverteilung als mechanische Eigenschaft eingegangen,

<sup>3</sup> Für Detailinformationen zur verfahrenstechnischen Erzeugung, den Charakteristika und der Klassifizierung von Eisenhüttenschlacken siehe Motz/Geiseler [24] und DIN 4301 [5].

<sup>4</sup> Eine Übersicht über mögliche Prozesse ist beispielsweise bei Geiseler [12] zu finden.

<sup>5</sup> Die mechanisch-verfahrenstechnische Aufbereitung durch Zerkleinern und Klassieren wird aus Übersichtlichkeitsgründen stark vereinfacht dargestellt. So enthält die Abbildung nur jeweils einen Brech- und Siebprozess ohne nähere Informationen über die Anlagentechnologie oder -konfiguration. Für nähere Informationen zu mechanisch-verfahrenstechnischen Prozessen siehe Kellerwessel [15] oder Nicolai [25].

die maßgeblich die Einsatzmöglichkeiten eines Sekundärrohstoffes bestimmt. [28, S. 18 ff. und 27, S. 15 f.] Dazu ist in Bild 3 eine exemplarische Korngrößenverteilung für einen Sekundärrohstoff aus Eisenhüttenschlacken nach der Zerkleinerung in einem Brecher gegeben.

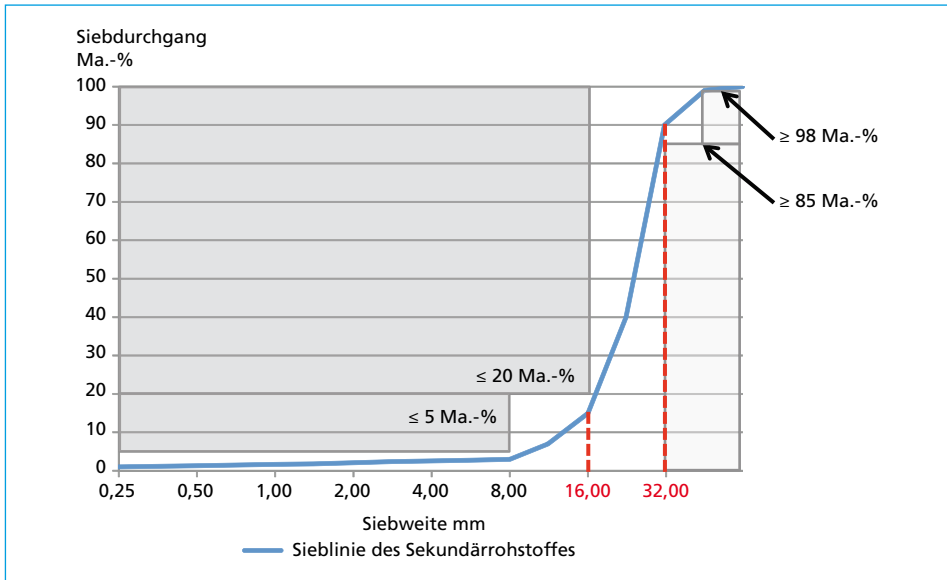


Bild 3: Exemplarische Korngrößenverteilung für einen Sekundärrohstoff aus Eisenhüttenschlacken

Der Sekundärrohstoff in Bild 3 soll für den späteren Einsatz im Straßenbau in einer Korngruppe von 16 bis 32 mm vorliegen. Die dargestellten grauen Flächen ergeben sich aus den mechanischen Anforderungen in den technischen Lieferbedingungen und legen Grenzen für die Sieblinie des Sekundärrohstoffes fest. So dürfen beispielsweise lediglich 5 Ma.-% des Sekundärrohstoffes eine Korngröße von 8 mm unterschreiten.

Da es sich bei den Anforderungen in den Lieferbedingungen nicht um exakte Vorgaben für die Korngrößenverteilung des Sekundärrohstoffes, sondern um Massenanteile für einzelne Korngruppen handelt, existieren Freiheitsgrade in der Produktion des Sekundärrohstoffes. [36] Das Nebeneinander der Anforderungen in Form von technischen Lieferbedingungen und möglicher Freiheitsgrade in der Produktion des Sekundärrohstoffes wirft die Frage auf, von welchen Einflussgrößen die erzeugte Korngrößenverteilung eines Sekundärrohstoffes abhängig ist.

Im Hinblick auf die Korngrößenverteilung lassen sich drei Gruppen von Einflussgrößen identifizieren. Die erste Gruppe bezieht sich auf die Technologie, die zur Produktion des Sekundärrohstoffes eingesetzt wird. So ergeben sich unterschiedliche Korngrößenverteilungen bei Benutzung eines Kegel- oder eines Rotorschleuderbrechers zum Zerkleinern der Schlacke. [15, S. 33 ff. und 27, S. 4 ff.] Die zweite Gruppe betrifft die Anlagenkonfiguration. Die geometrischen Abmessungen einer Anlage, wie der Abstand zwischen Rotor und Prallwand in einem Rotorschleuderbrecher, haben ebenfalls Einfluss auf

die Korngrößenverteilung. Die dritte Gruppe bezieht sich auf den Anlagenbetrieb. So ergeben sich unterschiedliche Korngrößenverteilungen in Abhängigkeit vom jeweiligen Betriebspunkt, dem Aufgabegut sowie der Aufgabemenge einer Anlage. [27, S. 51 ff.]

Aus dem Beispiel wird ersichtlich, dass die Korngrößenverteilung als mechanische Eigenschaft von Sekundärrohstoffen von einer Vielzahl an technischen Einflussgrößen abhängt. Je nach Sekundärrohstoff und gewünschter Senke sind neben der Korngrößenverteilung weitere Einflussgrößen in Bezug auf die späteren Einsatzmöglichkeiten zu berücksichtigen.<sup>6</sup> Diese Abhängigkeiten machen deutlich, dass insgesamt vielfältige technische Einflussgrößen auf das Recycling von Eisenhüttenschlacken wirken.

### 2.2.2. Ökonomische Einflussgrößen

Die ökonomischen Einflussgrößen für das Recycling von Eisenhüttenschlacken lassen sich in zwei Gruppen einteilen. Die erste Gruppe beinhaltet die Kosten, die ausgehend von den Quellen über die Prozesse bis zu den Senken mit dem Recycling von Eisenhüttenschlacken verbunden sind. Die zweite Gruppe enthält die Erlöse, die mit dem Verkauf von Sekundärrohstoffen einhergehen.

Zur Ermittlung der Recyclingkosten werden Kostenrechnungssysteme eingesetzt. Mit einem vorab definierten Kostenrechnungssystem werden Kosten auf Basis der Stoff- und Energieströme zwischen den vorliegenden Quellen, Prozessen und Senken errechnet.<sup>7</sup> Entsprechend der Netzwerkstruktur lassen sich die Kosten zunächst in drei Gruppen klassifizieren. Zur ersten Gruppe zählen Kosten, die in den Quellen sowie zwischen den Quellen und Prozessen anfallen. Dies sind beispielsweise Kosten, die durch die Beeinflussung der Schlackenqualität bei ihrer Erzeugung, oder durch den Transport von Schlacken zum jeweiligen Recyclingprozess entstehen. Die zweite Gruppe enthält die Kosten, die bei der Durchführung des jeweiligen Recyclingprozesses anfallen. Die dritte Gruppe beinhaltet die Kosten, die zwischen den Prozessen und Senken anfallen. Dies umfasst beispielsweise Lager- und Vertriebskosten für Sekundärrohstoffe. Im Hinblick auf die drei genannten Kostengruppen sind des Weiteren verschiedene Kostenarten zu unterscheiden, die von unterschiedlichen Bezugsgrößen abhängig sind. So kann beispielsweise in investitionsabhängige Kosten, Stoffflusskosten, Prozesskosten sowie sonstige relevante Kostenarten unterschieden werden. [35, S. 156 ff.]

Die Erlöse aus dem Verkauf von Sekundärrohstoffen sind hingegen stark von unternehmensexternen Einflussgrößen abhängig. Diese Einflussgrößen werden im Folgenden in zeit- und mengenbezogene Einflussgrößen gegliedert. Zeitbezogene Einflussgrößen ergeben sich durch die Saisonalität, die witterungsbedingt bei der Nachfrage nach Sekundärrohstoffen aus Eisenhüttenschlacken zu berücksichtigen ist. Diese wirkt sich

<sup>6</sup> Zusätzlich werden für den Einsatz in bestimmten Senken auch Eigenschaften wie die Raumbeständigkeit spezifiziert. [36]

<sup>7</sup> Dabei ist zu berücksichtigen, dass unternehmensbezogen unterschiedliche Ausgestaltungen von Kostenrechnungssystemen vorliegen. [8, S. 643 ff.]

unmittelbar auf die erzielbaren Erlöse aus.<sup>8</sup> Mengenbezogene Einflussgrößen ergeben sich durch den regionalen Absatz von Sekundärrohstoffen. Durch das regionale Geschäft ist die Anzahl an potentiellen Senken für Sekundärrohstoffe limitiert. Dies führt dazu, dass der erzielbare Sekundärrohstofflös sich mit dem regionalen Sekundärrohstoffangebot verändert. In Bezug auf das Sekundärrohstoffangebot sind dabei sowohl unternehmensintern produzierte Sekundärrohstoffe aus Eisenhüttenschlacken als auch Substitute zu berücksichtigen, die an dieselben Senken abgesetzt werden können.<sup>9</sup>

Aus dem Nebeneinander von Recyclingkosten und Sekundärrohstofflösungen wird ersichtlich, dass das Recycling von Eisenhüttenschlacken einer Vielzahl ökonomischer Einflussgrößen unterliegt. Diese reichen von unternehmensinternen Einflussgrößen, wie der Ausgestaltung der für das Recycling relevanten Stoff- und Energieströme bis zu unternehmensexternen Einflussgrößen, wie dem Einfluss regionaler Märkte auf die erzielbaren Sekundärrohstofflösungen.

### 2.2.3. Ökologische Einflussgrößen

Um zu gewährleisten, dass das Recycling von Eisenhüttenschlacken ökologisch nachhaltig erfolgt, sind ausgehend von den Quellen über die Prozesse bis zu den Senken vielfältige Regelungen zu beachten. Diese reichen von allgemeinen Grundsätzen im Umgang mit Nebenprodukten bis zu spezifischen Regelungen bezüglich der Eigenschaften von Sekundärrohstoffen aus Eisenhüttenschlacken. [7, S. 28 ff. und 20] Gegenstand der Regelungen ist insbesondere die chemische Zusammensetzung von Sekundärrohstoffen aus Eisenhüttenschlacken. So setzt der Einsatz von Sekundärrohstoffen aus Eisenhüttenschlacken je nach gewünschter Senke die Einhaltung chemischer Grenzwerte voraus. [20] Die hierfür maßgeblichen Grenzwerte sind für zukünftige Regelungen durch Unsicherheit gekennzeichnet, worauf im Folgenden näher anhand des Beispiels der im Entwurf vorliegenden Ersatzbaustoffverordnung eingegangen wird.

Da es bislang keine bundeseinheitlichen Regelungen zum Einbau von Sekundärrohstoffen aus Eisenhüttenschlacken gibt, wurde zu Beginn des Jahres 2011 ein Entwurf für eine bundesweit gültige Ersatzbaustoffverordnung vorgelegt. [21] Bei Verabschiedung dieses Entwurfes hätten bundesweit jährlich etwa 2,5 Millionen Tonnen Eisenhüttenschlacken aufgrund von Grenzwertänderungen nicht wie bisher zu Sekundärrohstoffen aufbereitet werden können. Dies entspricht bei einer Schlackenerzeugung von 14 Millionen Tonnen pro Jahr 18 % der Gesamtmenge, die anderweitig recycelt oder beseitigt werden müssten. Insbesondere die Möglichkeit, dass durch die Ersatzbaustoffverordnung ein Zwang zur Beseitigung von Eisenhüttenschlacken, die vorher als Sekundärrohstoff eingesetzt wurden, entstehen könnte, wurde stark kritisiert. [38, 20]

<sup>8</sup> Strukturelle Probleme der Baustoffindustrie, wie der längerfristige Trend zur Verringerung von Bauinvestitionen und Preisdruck aufgrund von Substituten, bedingen niederwertige Erlöse aus dem Verkauf von Sekundärrohstoffen. Dies führt zum Ausschluss des Transportes über weite Strecken. [17, S. 25 ff.]

<sup>9</sup> Mögliche Substitute sind unter anderem Natursteine, Sekundärrohstoffe aus Bauschutt oder Müllverbrennungsschlacken. [17, S. 3 ff.]



Zwischenzeitig wurde zwar ein Nachfolgeentwurf der Ersatzbaustoffverordnung vorgelegt. [22] Dieser räumt jedoch die bisherigen Unsicherheiten nicht aus und ist weiterhin Gegenstand kontroverser Diskussionen. [29, S. 26 f.]

Das Beispiel der Ersatzbaustoffverordnung zeigt, dass die ökologischen Einflussgrößen des Recyclings von Eisenhüttenschlacken sich nicht in statischen Regelungen zum Einsatz von Sekundärrohstoffen erschöpfen. Es ist zusätzlich zu berücksichtigen, dass sich die Regelungen im Zeitverlauf ändern können und Unsicherheiten unterliegen.

### 2.3. Anforderungen an eine Recyclingplanung

Das Ziel der Planung des operativen Recyclings von Eisenhüttenschlacken ist die mengen- und wertmäßige Festlegung der Stoff- und Energieströme zwischen Quellen, Prozessen und Senken. Um diese Festlegung zu ermöglichen, muss das angewendete Planungskonzept Anforderungen erfüllen, die im Folgenden auf Basis der vorgestellten Einflussgrößen abgeleitet werden.

In den verschiedenen Quellen entstehen Eisenhüttenschlacken in unterschiedlichen Mengen und Qualitäten. Je nach Menge und Qualität der jeweiligen Eisenhüttenschlacke ist die Anwendung verschiedener Prozesse zur Sekundärrohstoffproduktion möglich. In der Folge ergibt sich eine Zuordnungsnotwendigkeit von Stoff- und Energieströmen zwischen Quellen und Prozessen.

Zur Produktion von Sekundärrohstoffen aus Eisenhüttenschlacken werden mechanisch- und chemisch-verfahrenstechnische Prozesse eingesetzt. Diese bestimmen die späteren Einsatzmöglichkeiten produzierter Sekundärrohstoffe maßgeblich. In Abhängigkeit von der Eisenhüttenschlacke und den angewendeten Recyclingprozessen können die produzierten Sekundärrohstoffe in verschiedenen Senken verwertet werden. Daraus ergibt sich eine Zuordnungsnotwendigkeit von Stoff- und Energieströmen zwischen Prozessen und Senken.

Bei der Zuordnung von Stoff- und Energieströmen zwischen Quellen und Prozessen sowie zwischen Prozessen und Senken ist es erforderlich, technische, ökonomische und ökologische Einflussgrößen zu berücksichtigen. Aus technischer Sicht sind Einflussgrößen wie die Korngrößenverteilung in die Planung einzubeziehen, welche Auskunft über die Eignung eines Sekundärrohstoffes für den Einsatz in einer bestimmten Senke geben. Hieraus ergibt sich die Anforderung, die zugrundeliegenden mechanisch- und chemisch-verfahrenstechnischen Prozesse hinreichend genau für die operative Planung abzubilden. Die Abbildung der Stoff- und Energieströme in der Planung wird im Folgenden zusammenfassend als Mengengerüst bezeichnet. Aus ökonomischer Sicht sind die mit dem Recycling von Eisenhüttenschlacken verbundenen Kosten und Erlöse in die Planung einzubeziehen. Die Ermittlung der Kosten setzt die Erfassung der für das Schlackenrecycling relevanten Kostenarten sowie deren Zusammenführung in einem Kostenrechnungssystem voraus. Der Einbezug der Sekundärrohstoffenerlöse erfordert die Darstellung des zugehörigen regionalen Absatzes, der zeitbezogen von Schwankungen durch Saisonalitäten und mengenbezogen vom regionalen Sekundärrohstoffangebot

abhängig ist. Hierbei sind sowohl die verfügbaren Sekundärrohstoffe aus Eisenhüttenschlacken als auch mögliche Substitute einzubeziehen. Die erforderliche Abbildung der Recyclingkosten und Sekundärrohstoff Erlöse in der Planung wird im Folgenden zusammenfassend als Wertgerüst bezeichnet. Aus ökologischer Sicht sind Einflussgrößen wie chemische Grenzwerte für Sekundärrohstoffe aus Eisenhüttenschlacken zu berücksichtigen. Diese können Unsicherheiten unterliegen, welche im Rahmen der Planung einzubeziehen sind.

Aus den obigen Zusammenhängen wird ersichtlich, dass für eine Recyclingplanung für Eisenhüttenschlacken innerhalb des dargestellten Netzwerks aus Quellen, Prozessen und Senken eine Vielzahl von Anforderungen zu berücksichtigen ist. Im Folgenden wird eine Auswahl bestehender Ansätze zur Recyclingplanung vor dem Hintergrund der identifizierten Anforderungen kritisch diskutiert.

### 3. Bestehende Ansätze zur Recyclingplanung

Zur Auswahl bestehender Ansätze zur Recyclingplanung wird zunächst die übergeordnete Planungsaufgabe der mengen- und wertmäßigen Festlegung von Stoff- und Energieströmen zwischen Quellen, Prozessen und Senken herangezogen. Die mengen- und wertmäßige Festlegung setzt dabei ein den Anforderungen entsprechendes Mengen- und Wertgerüst voraus. Mengen- und Wertgerüst eines bestehenden Ansatzes umfassen idealerweise die Darstellung der kompletten Netzwerkstruktur aus Quellen, Prozessen und Senken oder bieten zumindest Erweiterungsmöglichkeiten für fehlende Netzwerkbestandteile.

Planungsansätze, welche den skizzierten Rahmen abdecken, sind als technisch-ökonomische Modelle im Bereich des Operations Research zu finden. So gibt es eine Vielzahl von Planungsansätzen zur Festlegung von Stoff- und Energieströmen in Netzwerken bestehend aus Quellen, Prozessen und Senken. Für die operative Planung des Recyclings von Eisenhüttenschlacken sind hierbei Ansätze der Produktionsprogrammplanung vielversprechend, welche auf die Festlegung von Stoff- und Energieströmen in der stoffumwandelnden Industrie abzielen. Ansätze, die einen direkten Bezug zum Recycling von Kuppelprodukten der Eisen- und Stahlerzeugung aufweisen, sind hierbei von besonderem Interesse. Diese Planungsansätze zeichnen sich durch eine der Planungsaufgabe angemessene Kombination von Mengen- und Wertgerüst aus. Dabei werden die Quellen, Prozesse und Senken einer Netzwerkstruktur hinreichend genau im Mengengerüst abgebildet, so dass in Kombination mit der Bewertung im Wertgerüst die Planungsaufgabe erfüllt wird. [30, S. 171 ff. und 11, S. 960 f.]

Im Hinblick auf das Recycling von Kuppelprodukten in der Eisen und Stahl erzeugenden Industrie zeigt sich, dass die hinreichend genaue Modellierung der relevanten Quellen, Prozesse und Senken in der Regel hohe Anforderungen an die Formulierung des Mengengerüsts im Planungsansatz stellt. So liegen in den verfahrenstechnischen Prozessen oftmals komplexe technische Zusammenhänge in Form nichtlinearer Abhängigkeiten vor. Diese Zusammenhänge lassen sich aufgrund der Komplexität realer Netzwerkstrukturen bislang nur schwer in Planungsansätzen berücksichtigen. [10, S. 272 ff.]

Um verwertbare Aussagen im Rahmen einer Planung zu ermöglichen, wird bei der Modellierung des Mengengerüsts von der realen Netzwerkstruktur abstrahiert. So wird beispielsweise auf die Simulation zur Beschreibung des Mengengerüsts zurückgegriffen, wenn die reale Netzwerkstruktur oder einzelne Netzwerkelemente zu komplex für eine analytische Beschreibung sind. Im Hinblick auf bestehende Ansätze ist jedoch anzumerken, dass überwiegend chemisch-verfahrenstechnische Zusammenhänge dargestellt werden. Mechanisch-verfahrenstechnische Prozesse, die anforderungsgemäß abzubilden sind, werden bislang nicht untersucht.<sup>10</sup>

Die Mengengerüste der genannten Ansätze stellen den Ausgangspunkt für die Bewertung im Wertgerüst dar. Die Bewertung erfolgt dabei über die Ermittlung der relevanten Kosten und Erlöse auf Basis der im Mengengerüst betrachteten Stoff- und Energieströme. Mit einer dynamischen Modellierung lassen sich zeit- und mengenbezogen veränderliche Erlöse abbilden. Bestehende Ansätze zeigen jedoch Defizite im Hinblick auf die mengenmäßigen Abhängigkeiten von Sekundärrohstoff Erlösen in Bezug auf mögliche Substitute. Um diese mengenbezogenen Abhängigkeiten darzustellen, ist es erforderlich, Substitutionspotentiale zwischen Sekundärrohstoffen aus Eisenhüttenschlacken und möglichen, in der Regel nicht perfekten, Substituten auszuweisen. [32, S. 51 ff. und 37, S. 130 ff.]

Ökologische Anforderungen, wie die Einhaltung chemischer Grenzwerte, werden bereits in bestehenden Ansätzen einbezogen. So ist es möglich, einzelne Stoffströme im Hinblick auf chemische Grenzwerte zu limitieren. Unsicherheiten bezüglich chemischer Grenzwerte lassen sich ebenfalls mit bestehenden Ansätzen darstellen. [16, S. 310 ff. und 2, S. 161 ff.]

Trotz vieler Übereinstimmungen bestehender Ansätze mit den ermittelten Anforderungen lässt sich zusammenfassend feststellen, dass kein bestehender Ansatz die Anforderungen an eine Recyclingplanung für Eisenhüttenschlacken vollständig erfüllt, so dass im nächsten Kapitel das Konzept eines neuen Ansatzes vorgestellt wird.

## 4. Konzeption eines Ansatzes zur Recyclingplanung für Eisenhüttenschlacken

### 4.1. Technisch-ökonomische Analyse und Bewertung von Recyclingalternativen

Im Folgenden wird ein Ansatz vorgestellt, welcher jede der dargestellten Anforderungen an eine Recyclingplanung für Eisenhüttenschlacken erfüllt. Dieser Ansatz basiert auf einer technisch-ökonomischen Analyse und Bewertung von Recyclingalternativen.

<sup>10</sup> Eine detaillierte Darstellung mechanisch-verfahrenstechnischer Prozesse ist beispielsweise bei Nicolai [25] zu finden. Hier steht jedoch nicht die Festlegung von Stoff- und Energieströmen, sondern die Konfiguration von Anlagen für das Recycling von Bauschutt im Vordergrund.

Für die technisch-ökonomische Analyse und Bewertung ist es zunächst erforderlich, das Mengengerüst einer Recyclingplanung für Eisenhüttenschlacken darzustellen. Zur Formalisierung des Mengengerüsts wird die Aktivitätsanalyse angewendet, die bereits erfolgreich in Planungsansätzen für die Sekundärrohstoffproduktion eingesetzt wurde. [32, S. 51 ff.] Im Rahmen der Aktivitätsanalyse werden für das Recycling von Eisenhüttenschlacken relevante Vorgänge als Aktivitäten dargestellt. Die Beschreibung von Aktivitäten erfolgt mittels Aktivitätsvektoren, welche Informationen zu einer definierten Anzahl von Input- und Output-Objektarten enthalten. Die allgemeine Form eines Aktivitätsvektors ist in Gleichung 1 gegeben.

$$\vec{z}_i = \begin{pmatrix} z_{i,1} \\ \vdots \\ z_{i,m} \\ z_{i,m+1} \\ \vdots \\ z_{i,m+n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ Y_{i,m+1} \\ \vdots \\ Y_{i,m+n} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} X_{i,1} \\ \vdots \\ X_{i,m} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -X_{i,1} \\ \vdots \\ -X_{i,m} \\ Y_{i,m+1} \\ \vdots \\ Y_{i,m+n} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{m+n} \quad (1)$$

Die Komponenten  $z_{i,1}, \dots, z_{i,m}, z_{i,m+1}, \dots, z_{i,m+n}$  von  $\vec{z}_i$  stellen Quantitäten von Objektarten dar. Objektarten werden aktivitätsbezogen in Input- ( $x_{i,1}, \dots, x_{i,m}$ ) und Output-Objektarten ( $y_{i,m+1}, \dots, y_{i,m+n}$ ) unterschieden. Anschaulich gibt ein Aktivitätsvektor darüber Auskunft, wie die Quantitäten der Input- und Output-Objektarten sich bei einer einmaligen Anwendung der Aktivität verändern. Input-Objektarten werden dabei aufgrund ihres Verbrauchs mit negativem, Output-Objektarten hingegen mit positivem Vorzeichen versehen.<sup>11</sup> So beschreibt Gleichung 2 das Zerkleinern von Eisenhüttenschlacke mittels eines Brechers in vereinfachter Form als Aktivität  $\vec{z}_B$ .

$$\vec{z}_B = \begin{pmatrix} - \text{Eisenhüttenschlacke} \\ - \text{Energie} \\ \vdots \\ \text{Brechprodukt} \\ \vdots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} - 100 \text{ t} \\ - 125 \text{ kWh} \\ \vdots \\ 100 \text{ t} \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (2)$$

Die Aktivität gibt darüber Auskunft, dass zur Produktion von 100 Tonnen eines Brechprodukts 100 Tonnen Eisenhüttenschlacken sowie 125 kWh Energie einzusetzen sind. Um das Brechprodukt zu klassieren, wird es entsprechend des Beispielprozesses in Abschnitt 2.2.1 gesiebt. Die resultierende Aktivität  $\vec{z}_s$  ist in Gleichung 3 gegeben.<sup>12</sup>

<sup>11</sup> Die Aktivitätsanalyse geht in ihren Ursprüngen auf Koopmanns [18] zurück und stellt einen etablierten Modellierungsansatz zur Darstellung technischer Zusammenhänge im Rahmen der Produktionswirtschaft dar. [6, S. 39 f.]

<sup>12</sup> Die Trennung in Input- und Output-Objektarten kann in Gleichung 3 nicht erfolgen, sodass sämtliche Objektarten nun mit  $j = 1, \dots, J$  indiziert werden.

$$\vec{z}_S = \begin{pmatrix} \text{Eisenhüttenschlacke} \\ - \text{Energie} \\ \vdots \\ - \text{Brechprodukt} \\ \text{Fraktion a} \\ \text{Fraktion b} \\ \text{Fraktion c} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ - 90 \text{ kWh} \\ \vdots \\ - 100 \text{ t} \\ 20 \text{ t} \\ 55 \text{ t} \\ 25 \text{ t} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Die Aktivität stellt dar, dass 100 Tonnen des Brechprodukts unter Einsatz von 90 kWh Energie in drei Fraktionen klassiert werden, wobei auf die Fraktionen a, b und c jeweils 20, 55 und 25 Tonnen entfallen. Die Objektarten besitzen dabei aktivitätsübergreifend eine feste Zuordnung zu den Komponenten sämtlicher Aktivitätsvektoren, sodass  $\vec{z}_B$  und  $\vec{z}_S$  im Hinblick auf ihre Objektarten identisch sind. Auf Basis dieser formalen Darstellung wird eine flexible Beschreibung von Stoff- und Energieströmen in einer Netzwerkstruktur möglich. [32, S. 51 ff.]

Zur flexiblen Beschreibung werden Kombinationen aus Aktivitäten und deren Aktivitätsniveaus gebildet. Das Aktivitätsniveau beschreibt einen skalaren Wert, der die Wiederholungshäufigkeit der zugehörigen Aktivität  $\vec{z}_i$  angibt. Zur Abbildung von Stoff- und Energieströmen werden Aktivitäten und Aktivitätsniveaus in Techniken zusammengeführt. Die allgemeine Form einer Technik  $\bar{T}$  ist in Gleichung 4 dargestellt. Der Vektor beschreibt dabei eine Kombination der einzelnen in  $\bar{T}$  enthaltenen Aktivitäten.<sup>13</sup>

$$\bar{T} = \{ \vec{z} \in \mathbb{R}^{m+n} \mid \vec{z} = \lambda_1 \cdot \vec{z}_1 + \dots + \lambda_i \cdot \vec{z}_i + \dots + \lambda_l \cdot \vec{z}_l, \lambda_1, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_l \geq 0 \} \quad (4)$$

Um die Verkettung der Beispielaktivitäten  $\vec{z}_B$  und  $\vec{z}_S$  zu erreichen, können die Aktivitätsniveaus der beiden Aktivitäten gekoppelt werden. Da beide Aktivitäten im Hinblick auf das Brechprodukt dieselbe Quantität als Output beziehungsweise Input aufweisen ergibt sich eine Beispieltechnik  $\bar{T}_M$  mit direkter Kopplung der Aktivitätsniveaus zu

$$\bar{T}_M = \{ \vec{z}_M \in \mathbb{R}^{m+n} \mid \vec{z}_M = \lambda_B \cdot \vec{z}_B + \lambda_S \cdot \vec{z}_S, \lambda_B, \lambda_S \geq 0, \lambda_B = \lambda_S \} \quad (5)$$

Wie die beiden Aktivitäten selbst, stellt die direkte Kopplung der Aktivitätsniveaus in  $\bar{T}_M$  eine starke Vereinfachung dar. So wird massebezogen ein vollständiger Durchsatz der Eisenhüttenschlacke bis zur Klassierung in die drei Fraktionen a, b und c angenommen.<sup>14</sup> Die stärkste Vereinfachung besteht jedoch in der Struktur der Technik  $\bar{T}_M$ , da diese mit  $\lambda_B, \lambda_S \geq 0$  einen linearisierbaren Zusammenhang zwischen den Quantitäten der Objektarten Eisenhüttenschlacke und Energie unterstellt. Diese Vereinfachung ist jedoch fehlerbehaftet und daher im Hinblick auf eine Recyclingplanung in einem realen Netzwerk zu vermeiden.<sup>15</sup>

<sup>13</sup> Bei der vorgestellten Technik handelt es sich um die allgemeine Form einer linearen Technik. [6, S. 65 ff.]

<sup>14</sup> In einem realen System wären beispielsweise Eisenbestandteile in Form von Bären als zusätzliche Output-Objektart zu berücksichtigen.

<sup>15</sup> So hängt beispielsweise der Zerkleinerungsgrad bei einem Rotorschleuderbrecher nichtlinear von der Aufgabemenge und von der Drehzahl des Rotors ab. [27, S. 75 ff.]

Zur Vermeidung dieses Problems zielt der vorliegende Ansatz auf die Simulation mechanisch- und chemisch-verfahrenstechnischer Prozesse zum Recycling von Eisenhüttenschlacken ab. Hierbei wird ausgenutzt, dass für die Durchführung einer Aktivitätsanalyse keine expliziten funktionalen Zusammenhänge zwischen relevanten technischen Einflussgrößen abzubilden sind. Für eine Aktivitätsanalyse ist es ausreichend, untersuchte Prozesse als empirische Produktionspunkte darzustellen. [9, S. 25 ff.] Dies bedeutet konkret, dass eine Momentaufnahme des jeweiligen Prozesses für dessen Abbildung im Mengengerüst des Planungsansatzes herangezogen wird. Die Simulation erlaubt es im Gegensatz zu dem stark vereinfachten Technikbeispiel in Gleichung 5 hinreichend viele dieser Momentaufnahmen in Form von repräsentativen Betriebspunkten für Prozesse zu erzeugen. [33, S. 107 ff.] Das resultierende Vorgehen zur Ermittlung einzelner Aktivitäten ist in Bild 4 illustriert.

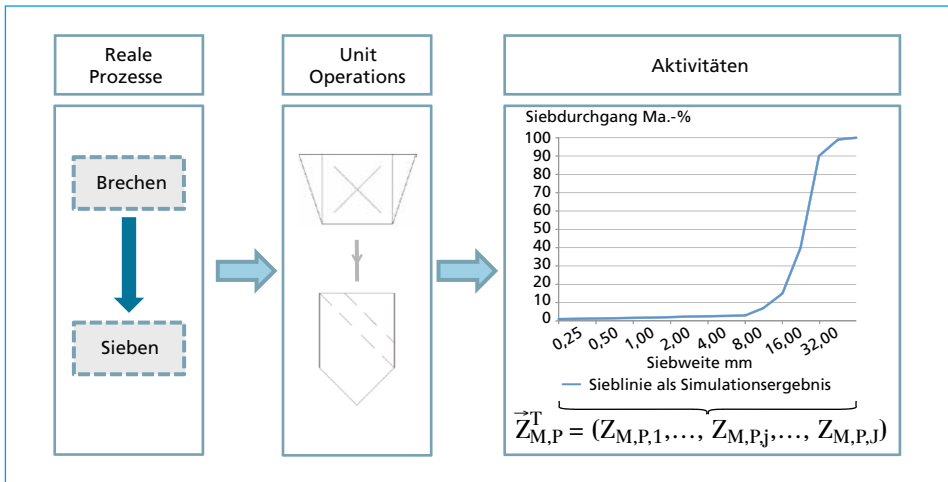


Bild 4: Konzeption des Mengengerüsts

Die realen Brech- und Siebprozesse werden in einer Flowsheeting-Simulation als Unit Operations – dargestellt durch die entsprechenden Fließbildsymbole – modelliert.<sup>16</sup> Auf Basis dieser Unit Operations werden für repräsentative Betriebspunkte der betrachteten Prozesse Aktivitäten abgeleitet.<sup>17</sup> So ist für die Beispielaktivität  $\vec{z}_{M,P}$  im Bild dargestellt, wie Quantitäten einzelner Fraktionen (Objektarten) durch eine Korngrößenverteilung ermittelt werden, die als Simulationsergebnis vorliegt. Dadurch wird es möglich, mechanisch- und chemisch-verfahrenstechnische Recyclingprozesse hinreichend genau im Mengengerüst der technisch-ökonomischen Analyse von Recyclingalternativen für Eisenhüttenschlacken darzustellen.

<sup>16</sup> Zur Simulation lässt sich beispielsweise das Flowsheeting-System *Aspen Plus* einsetzen, das neben chemisch- auch mechanisch-verfahrenstechnische Prozesse beherrscht. [1]

<sup>17</sup> Aus Übersichtlichkeitsgründen werden in Bild 4 keine separaten Aktivitäten für das Brechen und Sieben, sondern der resultierende Aktivitätsvektor  $\vec{z}_M$  analog zur Beispieltechnik  $\vec{T}_M$  dargestellt.

Im Folgenden wird auf die Ergänzung des Mengengerüsts um das Wertgerüst zur Darstellung von Recyclingkosten und Sekundärrohstoff Erlösen eingegangen. Zur Ermittlung der Recyclingkosten wird auf die Aktivitäten im Mengengerüst zurückgegriffen. Da die Aktivitätsvektoren Auskunft über die Quantitäten der einzelnen betrachteten Objektarten geben, können Kostensätze für die Durchführung von Aktivitäten berechnet werden. Hierzu werden zunächst jeder in einer Aktivität enthaltenen Objektart Kosten  $k_{i,j}$  zugeordnet. Auf dieser Grundlage werden die Quantitäten der einzelnen Objektarten für jede Aktivität  $\vec{z}_i$  mit den zugehörigen Kosten zusammengeführt, was in Gleichung 6 dargestellt ist.

$$k_i = \sum_{j=1}^J k_{i,j} \cdot z_{i,j}, i = 1, \dots, I \quad (6)$$

Hierbei ist zu beachten, dass nicht alle Kostenarten einen direkten Bezug zu den Aktivitäten des Mengengerüsts aufweisen. So sind beispielsweise Stoffflusskosten und Prozesskosten innerhalb der betrachteten Netzwerkstruktur von der Durchführung einzelner Aktivitäten abhängig, für investitionsabhängige Kosten gilt dies jedoch nicht. Die Kostenarten, die keinen Bezug zu einzelnen Aktivitäten aufweisen, sind entsprechend separat zu berücksichtigen. [35, S. 156 ff.]

Zusätzlich zu den Recyclingkosten sind im Rahmen der Bewertung von Recyclingalternativen auch die Erlöse aus dem Verkauf von Sekundärrohstoffen zu ermitteln. Zur Ermittlung der Erlöse wird zunächst analog zu der Ermittlung der Recyclingkosten vorgegangen. Dazu werden die Erlöse aus dem Verkauf eines Sekundärrohstoffes mit den Quantitäten der entsprechenden Objektart in einer Verkaufsaktivität zusammengeführt. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass der Erlös aus dem Verkauf von Sekundärrohstoffen nicht statisch, sondern vom regionalen Sekundärrohstoffangebot abhängig ist. Zum Einbezug dieses Zusammenhangs wird im Folgenden auf eine Preisdifferenzierung zurückgegriffen, die in Bild 5 dargestellt ist.

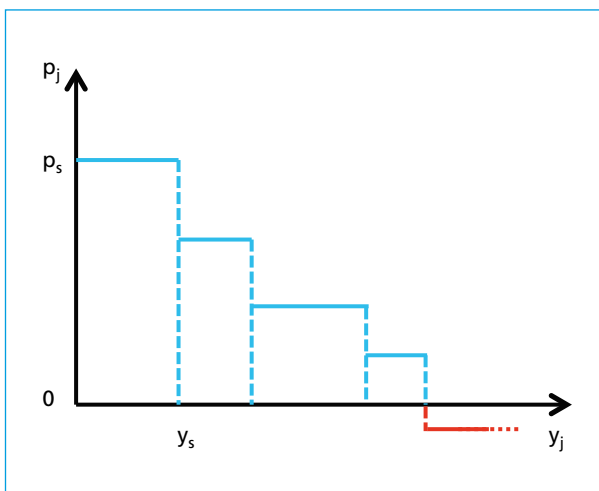


Bild 5:

Exemplarische Preisdifferenzierung

Die Preisdifferenzierung bildet den Effekt ab, dass zunächst höherwertige Senken mit einem Sekundärrohstoff bedient werden und der erzielbare Erlös  $p_j$  mit der Steigerung des Sekundärrohstoffabsatzes  $y_j$  sukzessiv abnimmt. [32, S. 66 ff.] Diese mengenbezogene Abnahme der Erlöse hängt nicht nur vom Absatz der jeweiligen Sekundärrohstoffe aus Eisenhüttenschlacken, sondern auch vom Absatz regional verfügbarer Substitute ab. [37, S. 82 ff.] Die Substitute sind daher in die obige Preisdifferenzierung einzubeziehen. Zum Einbezug der Substitute ist die Preisdifferenzierung so zu gestalten, dass der regionale Absatzmarkt sich in den Preis- ( $p_s$ ) und Mengenniveaus ( $y_s$ ) widerspiegelt. Um die Preis- und Mengenniveaus im Rahmen der Bewertung einer Recyclingalternative sinnvoll festzulegen, bedarf es jedoch der genauen Kenntnis des regionalen Marktes im Hinblick auf mögliche Substitute, deren Preise und deren Mengen. Im Hinblick auf die Preise und Mengen der Substitute ist zu berücksichtigen, dass es sich nicht um perfekte Substitute für Sekundärrohstoffe aus Eisenhüttenschlacken handelt, sodass regional ermittelte Substitutpreise und -mengen nicht direkt im Rahmen der Preisdifferenzierung nutzbar sind. Für die Nutzung der Informationen in der Preisdifferenzierung muss das Substitutionspotential ermittelt werden, das die verschiedenen, regional abgesetzten Sekundärrohstoffe miteinander vergleichbar macht. Ein derartiger Vergleich ist jedoch sehr aufwendig und liegt noch nicht für Sekundärrohstoffe aus Eisenhüttenschlacken vor. [37, S. 130 ff.] Um auch bei fehlenden Informationen über die regionalen Absatzmengen von Sekundärrohstoffen, deren Preise oder Substitutionspotentiale mengenabhängige Erlöse in das Wertgerüst einbeziehen zu können, kann die obige Preisdifferenzierung auf Basis möglicher Preis- und Mengenentwicklungen im Rahmen von Szenarien ausgestaltet werden.

Mit Hilfe der ermittelten Erlöse aus dem Verkauf von Sekundärrohstoffen und den ermittelten Recyclingkosten ist es möglich, das Wertgerüst der technisch-ökonomischen Analyse und Bewertung von Recyclingalternativen für Eisenhüttenschlacken darzustellen. Zusätzlich zur grundsätzlichen Darstellbarkeit der mengen- und wertmäßigen Zusammenhänge im Rahmen der technisch-ökonomischen Analyse und Bewertung sind weitergehende Anforderungen, wie die Betrachtung chemischer Grenzwerte für Eisenhüttenschlacken relevant. So kann beispielsweise der Fall auftreten, dass ein Sekundärrohstoff aus einer Schlacke aufgrund seines Zuordnungswertes nicht in einer bestimmten Senke verwertet werden kann. Dieser Fall lässt sich dadurch darstellen, dass das Aktivitätsniveau der Verkaufsaktivität für diese Kombination aus Sekundärrohstoff und Senke zu 0 gesetzt wird. Gemäß den Anforderungen ist ferner zu berücksichtigen, dass die chemischen Grenzwerte für den Einsatz von Sekundärrohstoffen aus Eisenhüttenschlacken in ihrer zukünftigen Entwicklung unsicher sind. Um diese Unsicherheiten abzubilden, wird auf Szenarien zurückgegriffen, die mögliche zukünftige Entwicklungen der Grenzwerte beinhalten.

Mit Hilfe der vorgestellten technisch-ökonomischen Analyse und Bewertung von Recyclingalternativen für Eisenhüttenschlacken lassen sich die Stoff- und Energieströme zwischen Quellen, Prozessen und Senken festlegen. Die Festlegung erfolgt dabei sowohl mengen- als auch wertbezogen im Sinn der Planungsaufgabe. Im nächsten Abschnitt wird auf die Ergebnisse eingegangen, die nach der Implementierung des Ansatzes für die Recyclingplanung zu erwarten sind.



## 4.2. Erwartete Ergebnisse

Um die Art und den Umfang der Entscheidungsunterstützung durch den Planungsansatz in Bezug auf die übergeordnete Planungsaufgabe zu konkretisieren, werden im Folgenden potentielle Anwendungsbeispiele und -ergebnisse für den Planungsansatz gegeben. Die Beispiele beziehen sich auf die identifizierten technischen, ökonomischen und ökologischen Einflussgrößen des Recyclings von Eisenhüttenschlacken.

In Bezug auf technische Einflussgrößen ermöglicht der Ansatz die Planung der Produktion von Sekundärrohstoffen aus Eisenhüttenschlacken unter Berücksichtigung von Freiheitsgraden. Die Freiheitsgrade bestehen darin, dass zur Darstellung der Produktion von Sekundärrohstoffen verschiedene Aktivitäten eingesetzt werden können. Diese Aktivitäten werden im Rahmen einer Flowsheeting-Simulation abgeleitet. Daher ist es ohne Eingriffe in das reale Produktionssystem möglich, mengen- oder energiebezogene Auswirkungen eines veränderten Anlagenbetriebs einzuplanen.

Bei der Betrachtung ökonomischer Einflussgrößen ermöglicht der Ansatz das Einplanen veränderter Recyclingkosten und Sekundärrohstofflöse. So kann beispielsweise ermittelt werden, welche Mehrkosten im Recyclingnetzwerk aufgrund einer Energiekostenerhöhung einzuplanen sind. Ferner können auf Basis der beschriebenen Preisdifferenzierung Spezifika des jeweiligen regionalen Marktes in die Planung einbezogen werden.

In Bezug auf ökologische Einflussgrößen erlaubt der Ansatz die mengen- und wertbezogene Darstellung von Stoff- und Energieströmen bei unsicherer Entwicklung rechtlicher Rahmenbedingungen. So kann in Szenarien dargestellt werden, welche mengen- und wertmäßigen Auswirkungen im Recyclingnetzwerk aufgrund einer Änderung der chemischen Grenzwerte für den Einsatz von Sekundärrohstoffen aus Eisenhüttenschlacken entstehen.

Die Beispiele für den Umgang mit den technischen, ökonomischen und ökologischen Einflussgrößen des Recyclings von Eisenhüttenschlacken stellen einen Ausschnitt der Festlegung von Stoff- und Energieströmen zwischen Quellen, Prozessen und Senken im Rahmen der übergeordneten Planungsaufgabe dar. Um die praktische Relevanz der Planungsaufgabe und der -ergebnisse zu gewährleisten, wird der Planungsansatz in enger Kooperation mit der Salzgitter Flachstahl GmbH entwickelt, implementiert und validiert.

Weitergehend wird beabsichtigt, den Planungsansatz auf Basis der technisch-ökonomischen Analyse und Bewertung von Recyclingalternativen um eine Entscheidungslogik zu erweitern. Diese Entscheidungslogik soll die Festlegung der Stoff- und Energieströme zwischen Quellen, Prozessen und Senken durch Optimierung im Hinblick auf eine Zielgröße ermöglichen. Als Zielgröße können beispielsweise Deckungsbeiträge von Sekundärrohstoffen aus Eisenhüttenschlacken dienen, die im Rahmen der Optimierung maximiert werden.

## 5. Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wird ein Ansatz für eine Entscheidungsunterstützung des Recyclings von Eisenhüttenschlacken vorgestellt. Die Entscheidungsunterstützung zielt dabei konkret auf eine operative Recyclingplanung für Eisenhüttenschlacken

ab, die die relevanten technischen, ökonomischen und ökologischen Einflussgrößen berücksichtigt. Im Fokus der Planung steht die mengen- und wertbezogene Festlegung der für das Recycling von Eisenhüttenschlacken relevanten Stoff- und Energieströme.

Ausgehend von der Einleitung im ersten Kapitel werden im zweiten Kapitel die Rahmenbedingungen einer Recyclingplanung für Eisenhüttenschlacken adressiert. Dazu wird zunächst die Planungsaufgabe erläutert und abgegrenzt. Daraufhin werden die relevanten technischen, ökonomischen und ökologischen Einflussgrößen dargestellt. Die Darstellung der Einflussgrößen mündet in die Formulierung von Anforderungen an eine Recyclingplanung für Eisenhüttenschlacken am Ende des zweiten Kapitels. Auf Basis dieser Anforderungen werden im dritten Kapitel bestehende Ansätze für die Recyclingplanung von Eisenhüttenschlacken untersucht. Darauf aufbauend wird im vierten Kapitel ein Ansatz zur Recyclingplanung vorgestellt, der die formulierten Anforderungen erfüllt. Der Ansatz basiert auf einer technisch-ökonomischen Analyse und Bewertung von Recyclingalternativen. Anschließend wird auf Ergebnisse eingegangen, die im Rahmen der Implementierung und Anwendung des Ansatzes zur Recyclingplanung zu erwarten sind.

## 6. Quellen

- [1] Aspen Technology, Inc.: Perform Solids Modeling within the Same Platform, <http://www.aspen-tech.com/products/solids-aspen-plus.aspx> (Abruf: 01.06.2013)
- [2] Bartusch, H.: Ein Beitrag zur operativen Produktionsplanung metallurgischer Prozesse, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2012
- [3] BBodSchG: Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz – BBodSchG), 1998
- [4] Das, B.; Prakash, S.; Reddy, P. S. R.; Misra, V. N.: An overview of utilization of slag and sludge from steel industries. In: Resources, Conservation and Recycling, Jg. 2007, Heft 50, 2006, S. 40-57
- [5] DIN 4301: Eisenhüttenschlacke und Metallhüttenschlacke im Bauwesen, 2009
- [6] Dyckhoff, H.; Spengler, T.: Produktionswirtschaft – Eine Einführung, 3. Auflage, Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2010
- [7] Endemann, G.: KrWG, AwSV und MantelV – Auswirkungen auf die Stahlindustrie und ihre Nebenprodukte. In: Heußen, M.; Motz, H. (Hrsg.): Schlacken aus der Metallurgie – Band 2 – Ressourceneffizienz und Stand der Technik, Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2012, S. 21-31
- [8] Ewert, R.; Wagenhofer, A.: Interne Unternehmensrechnung, 7. Auflage, Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2007
- [9] Fandel, G.: Produktion 1 – Produktions- und Kostentheorie, 7. Auflage, Springer-Verlag, Berlin et al. 2007
- [10] French, M. L.; LaForge, R. L.: Closed-loop supply chains in process industries: An empirical study of producer re-use issues. In: Journal of Operations Management, 24. Jg., Heft 3, 2006, S. 271-286
- [11] Fröhling, M.; Schwaderer, F.; Bartusch, H.; Rentz O.: Integrated Planning of Transportation and Recycling for multiple Plants based on Process Simulation. In: European Journal of Operational Research, Jg. 2010, Heft 207, 2010, S. 958-970

- [12] Geiseler, J.: Eisenhüttenschlacken – Nebenprodukte der Stahlindustrie. In: FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e. V. (Hrsg.): Schriftenreihe der Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken, Heft 6, 1999, S. 9-39
- [13] Hähre, S.: Stoffstrommanagement in der Metallindustrie – Zur Gestaltung und techno-ökonomischen Bewertung industrieller Recyclingkonzepte, In: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 16, Nr. 115, Düsseldorf: VDI Verlag, 2000
- [14] Huthmacher, K. E.: Forschung sichert nachhaltige Rohstoffversorgung. In: Heußén, M.; Motz, H. (Hrsg.): Schlacken aus der Metallurgie – Band 2 – Ressourceneffizienz und Stand der Technik, Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2012, S. 3-12
- [15] Kellerwessel, H. (1991): Aufbereitung disperser Feststoffe – Mineralische Rohstoffe, Sekundärrohstoffe, Abfälle, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1991
- [16] Klingelhöfer, H. E.: Betriebliche Entsorgung und Produktion – Abfallpolitische Rahmenbedingungen und ihre Integration in die Produktionstheorie und die Produktionsprogrammplanung, Gabler, Wiesbaden, 1999
- [17] Knappe, F.; Dehoust, G.; Petschow, U.; Jakubowski, G.: Steigerung von Akzeptanz und Einsatz mineralischer Sekundärrohstoffe unter Berücksichtigung schutzgutbezogener und anwendungsbezogener Anforderungen, des potenziellen, volkswirtschaftlichen Nutzens sowie branchenbezogener, ökonomischer Anreizinstrumente. In: Umweltbundesamt-Texte, Jg. 2012, Heft 28
- [18] Koopmans, T.: Analysis of Production as an Efficient Combination of Activities. In: Koopmans, T. (Hrsg.): Activity Analysis of Production and Allocation, John Wiley & Sons, Chapman & Hall, London/New York, 1951, S. 33-97
- [19] KrWG: Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG) 2012
- [20] LAGA: Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft (LAGA) 20 – Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen – Technische Regeln, 2003
- [21] MantelV-E: Verordnung zur Festlegung von Anforderungen für das Einbringen und das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser, an den Einbau von Ersatzbaustoffen und für die Verwendung von Boden und bodenähnlichem Material, Arbeitsentwurf: Stand 06.01.2011
- [22] MantelV-E: Verordnung zur Festlegung von Anforderungen für das Einbringen und das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser, an den Einbau von Ersatzbaustoffen und für die Verwendung von Boden und bodenähnlichem Material, Entwurf: Stand 31.10.2012
- [23] Merkel, T.: Erzeugung und Nutzung von Produkten aus Eisenhüttenschlacke 2011. In: FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e. V. (Hrsg.): Report des Forschungsinstituts, 19. Jg., Nr. 1, 2012, S. 14
- [24] Motz, H.; Geiseler, J.: Products of steel slags an opportunity to save natural resources. In: Waste Management, Jg. 2001, Heft 21, S. 285-293
- [25] Nicolai, M.: Zur Konfiguration von verfahrenstechnischen Anlagen für das wirtschaftliche Recycling von Bauschutt, Dissertation, Universität Karlsruhe. 1994
- [26] Riebel, P.: Die Kuppelproduktion – Betriebs- und Marktprobleme, Westdeutscher Verlag, Köln/Opladen, 1955
- [27] Rychel, R.: Modellierung des Betriebsverhaltens von Rotorschleuderbrechern, Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2001
- [28] Schicht, E.; Guldan, D.: Welcher Brecher darf es bei der Schlackenaufbereitung sein? In: Steinbruch und Sandgrube, Jg. 2011, Heft 2, 2011, S. 18-21
- [29] Schlupeck, B.: Baustoffrecycling – Länder fordern grundlegende Änderungen des 2. Arbeitsentwurfs zur Mantelverordnung. In: RECYCLING magazin, 68. Jg., Heft 5, 2013, S. 26-27
- [30] Schultmann, F.: Stoffstrombasiertes Produktionsmanagement – Betriebswirtschaftliche Planung und Steuerung industrieller Kreislaufwirtschaftssysteme, Berlin: Erich Schmidt Verlag, 2003

- [31] Senk, D. G.; Hüttenmeister, D.: Stahl und Schlacke – Ein Bund fürs Leben, in: Heußen, M.; Motz, H. (Hrsg.): Schlacken aus der Metallurgie – Band 2 – Ressourceneffizienz und Stand der Technik. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2012, S. 69-74
- [32] Spengler, T.: Industrielle Demontage- und Recyclingkonzepte – Betriebswirtschaftliche Planungsmodelle zur ökonomischen Umsetzung abfallrechtlicher Rücknahme- und Verwertungspflichten, Berlin: Erich Schmidt Verlag, 1994
- [33] Spengler, T.: Industrielles Stoffstrommanagement – Betriebswirtschaftliche Planung und Steuerung von Stoff- und Energieströmen in Produktionsunternehmen. Berlin: Erich Schmidt Verlag, 1998
- [34] Spengler, T.; Püchert, H.; Penkuhn T., Rentz, O.: Environmental integrated production and recycling management. In: European Journal of Operational Research, Jg. 1997, Heft 97, 1997, S. 308-326
- [35] Spengler, T.; Hähre, S.; Sieverdingbeck, A.; Rentz, O.: Stoffflußbasierte Umweltkostenrechnung zur Bewertung industrieller Kreislaufwirtschaftskonzepte – Dargestellt am Beispiel der Eisen- und Stahlindustrie. In: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 68. Jg., Heft 2, 1998, S. 147-174
- [36] TL Gestein-StB: Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau. 2007
- [37] Valdivia Mercado, S.: Ökonomische Substitutionspotentiale für natürliche Rohstoffe durch Sekundärrohstoffe, dargestellt am Beispiel der Entwicklung regionaler Konzepte zum Bauschuttrecycling, Peter Lang, Frankfurt am Main et al., 1995
- [38] Wirtschaftsvereinigung Stahl: Geplante Ersatzbaustoffverordnung führt zu schwerwiegenden Auswirkungen auf die Stahlindustrie, 2011, [http://www.stahl-online.de/medien\\_lounge/medien-informationen/110608\\_PM\\_EBV\\_final.pdf](http://www.stahl-online.de/medien_lounge/medien-informationen/110608_PM_EBV_final.pdf) (Abruf: 01.06.2013)
- [39] Wirtschaftsvereinigung Stahl: Stahlerzeugung in Deutschland, 2012, [http://www.stahl-online.de/Deutsch/Linke\\_Navigation/Stahl\\_in\\_Zahlen/\\_Dokumente/Stahlerzeugung\\_in\\_Deutschland\\_2\\_05022013.pdf](http://www.stahl-online.de/Deutsch/Linke_Navigation/Stahl_in_Zahlen/_Dokumente/Stahlerzeugung_in_Deutschland_2_05022013.pdf) (Abruf: 01.06.2013)

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

**Aschen • Schlacken • Stäube**

**– aus Abfallverbrennung und Metallurgie –**

Karl J. Thomé-Kozmiensky.

– Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2013

ISBN 978-3-935317-99-3

ISBN 978-3-935317-99-3 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky  
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2013

Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky,  
Dr.-Ing. Stephanie Thiel, M.Sc. Elisabeth Thomé-Kozmiensky

Erfassung und Layout: Ginette Teske, Ina Böhme, Petra Dittmann, Cordula Müller,  
Fabian Thiel, Martin Schubert

Druck: Mediengruppe Universal Grafische Betriebe München GmbH, München

Foto auf dem Buchdeckel: Dipl.-Ing. Daniel Böni, KEZO Kehrrechtverwertung Zürcher  
Oberland

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.