

**Charakterisierung, Entwicklung und Analyse von
Aufbereitungs- und Verwertungsmethoden für
Gießereistäube sowie Modellierung zur
Quantifizierung ökologischer Nachhaltigkeit**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Dr. rer. nat.

eingereicht an der

Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät

der Universität Augsburg

von

Christian Strakos

Augsburg, Dezember 2022



Erstgutachter: Prof. Dr. Richard Wehrich

Zweitgutachter: PD Dr. Simon Meißner

Tag der mündlichen Prüfung: 03.03.2023

Diese Arbeit wurde zwischen Januar 2020 und Dezember 2022 am Arbeitskreis Chemie der Materialien und der Ressourcen unter der Aufsicht von Herrn Prof. Dr. Richard Wehrich angefertigt.

Folgende Beiträge wurden im Rahmen der Arbeit veröffentlicht:

1. Strakos, C., Vom Gießereistaub zum SiC-Formling. *RECYCLING magazin*, 2021 (Metallrecycling Sonderheft 2021).
2. Strakos, C., Schäfer, H., Bauer, E., Marx, C., Gottlieb, A., & Wehrich, R. Wiederverwertung von Gießereistäuben durch Einarbeitung in SiC-Formlinge. *Müll und Abfall*, 2022(2)
3. Strakos, C., Marx, C. Wambach, K., Gottlieb, A., Rist, T., Wehrich, R., Rückgewinnung von Metallen aus Gießerei-Stäuben sowie Identifizierung und Optimierung (neuer) Verwertungswege – Praxisbeispiele aus Bayern. In: Mineralische Nebenprodukte und Abfälle, Band 9, 2022. ISBN: 978-3-944310-58-9
4. Strakos, C., Rohstoffsicherung- und erhalt durch Aufbereitung und Verwertung von Gießerei-Stäuben – Bayerisches Konsortium für Gießereistaub-Metall-Rückgewinnung – BGMR, Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, Abschlussbericht.
5. Strakos, C., Bauer, E., Marx, C., Wehrich, R., A new approach for quantifying ecological sustainability in waste management by using the method of modelling, *Waste Management and Research*, 02/2023.

Danksagung

Ich möchte allen Personen danken, die mich im Laufe der letzten Jahre unterstützt und diese Arbeit erst möglich gemacht haben.

Als erstes danke ich Prof. Dr. Richard Wehrich für die Möglichkeit die Thematik an seinem Arbeitskreis zu bearbeiten und mich im Rahmen der Promotion zu betreuen. Weiterhin danke ich PD Dr. Simon Meißner für die Übernahme der Aufgabe des Zweitprüfers.

Danke an das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz für die Finanzierung des Projekts sowie allen Kooperationspartnern aus Wissenschaft und Wirtschaft, die sich am Forschungsprojekt beteiligt haben. Ganz besonderer Dank gilt dabei Frau Anita Gottlieb und Herrn Holger Schäfer.

Ein großes Dankeschön an alle Studierenden, die sich im Rahmen von Abschlussarbeiten am Projekt beteiligt und es durch Engagement und Eigeninitiative stets voran gebracht haben. Für beste Laune im Büro sowie inhaltlich wertvolle Gespräche danke ich Clara und Elias.

Flo, Michi, Maria und Max danke ich dafür mit mir gemeinsam den Weg des Studiums gegangen zu sein und mich, wenn nötig, sowohl durch Studium als auch privat durch die ein oder andere Situation mit durchgetragen zu haben. Anna, danke für deine Freundschaft und guten Rat, wann immer ich ihn gebraucht habe. Danke an Herrn Körner, einen Weltklasse-Lehrer, ohne den ich das Chemiestudium nie aufgenommen hätte. Danke an all meine Freunde von Campus Connect, bei denen ich jeden Dienstag wieder auftanken durfte.

Mein größter Dank gilt meinem Vater, ohne den nichts von all dem möglich gewesen wäre, für die bedingungslose Liebe und Unterstützung, die ich mein ganzes Leben erfahren durfte.

Danke.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	v
Inhaltsverzeichnis	vi
Abbildungsverzeichnis	x
Tabellenverzeichnis	xiii
Formelverzeichnis.....	xiv
1. Einleitung.....	1
1.1 Metallurgie im Laufe der Zeit	1
1.2 Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft.....	2
1.3 Der Verbund ForCYCLE II und das Projekt BGMR	3
1.4 Ziele der Arbeit	5
2. Gießereiindustrie, Staubanfall und Entsorgung	7
2.1 Grundlagen des Gussprozesses	7
2.1.1 Technische Einführung	7
2.1.2 Gusserzeugung und Staubentstehung	9
2.2 Grundlagen der Abfallentsorgung und Deponierung	12
2.2.1 Abfallwirtschaftshierarchie des Kreislaufwirtschaftsgesetz.....	12
2.2.2 Gießereistäube im Kontext der Abfallwirtschaftshierarchie.....	13
2.2.3 Staubsammlung und Klassifizierung.....	15
2.2.4 Deponierung und Entsorgung	17
2.3 Der Werkstoff Gusseisen	18
2.3.1 Gusseisen mit Lamellengraphit – GJL.....	19
2.3.2 Gusseisen mit Kugelgraphit – GJS.....	19
2.3.3 Gusseisen mit Vermiculargraphit – GJV	20
2.3.4 Eisen-Kohlenstoff-Diagramm (EKD).....	20
2.4 Impfung und Impfmittel.....	22
3. Der Begriff der Nachhaltigkeit	24
3.1 Historische Entwicklung des Umweltschutzes.....	24
3.2 Definition und Anwendung von Nachhaltigkeit	25

3.3	Kritische Betrachtungen	29
3.3.1	Probleme des Säulenmodells	29
3.3.2	Anforderungen der Kreislaufwirtschaft.....	30
3.4	Kreislaufwirtschaft und Nachhaltigkeit in Gießereien.....	31
3.5	Umwelt – Technosphäre und Ökosphäre	32
4.	Digitalisierung in der Industrie 4.0	35
4.1	Digitalisierung und Industrie 4.0.....	35
4.2	Gießerei 4.0.....	36
4.3	Digitalisierung von Stoffströmen	37
4.3.1	Sankey-Diagramme.....	37
4.3.2	Life Cycle Assessments (LCAs)	37
5.	Parametrisierung von Nachhaltigkeit und Modellierung.....	39
5.1	Parametrisierung von Nachhaltigkeit	39
5.1.1	Operationalisierung von Nachhaltigkeit – Indikatoren	39
5.1.2	Nachhaltigkeitsindikatoren.....	41
5.1.3	Gesamtindikator und Indizes.....	41
5.1.4	Indikatorsystem	41
5.2	Grundlagen der mathematischen Modellierung	43
5.2.1	Modellierungszyklus	43
5.2.2	Anwendungsproblem und Annahmen	44
5.2.3	Modellierung	44
6.	Experimenteller Teil.....	47
6.1	Chemische Analytik.....	47
6.1.1	ICP-OES	47
6.1.2	Elementaranalyse	49
6.2	Grundsatzversuche zur Staubaufbereitung	50
6.2.1	Bioleaching	50
6.2.2	Elektrostatische Trennversuche	52
6.3	Verwertung durch Beimischung zu SiC-Formlingen	53
6.3.1	Der SiC-Formling.....	53
6.3.2	Der SiC-Staub-Formling	54

6.3.3	Substitution von Portlandzement	55
6.3.4	Festigkeitsversuche	58
7.	Auswertung.....	60
7.1	Staubfassung	60
7.1.1	Gießerei A	60
7.1.2	Gießerei B	62
7.1.3	Gießerei C	64
7.1.4	Gießerei D	65
7.1.5	Diskussion der Staubfassung.....	67
7.2	Chemische und physikalische Charakterisierung	68
7.3	Versuche zur Staubaufbereitung	68
7.3.1	Bioleaching	68
7.3.2	Elektrostatische Trennversuche	69
7.4	SiC-Gießereistaub-Formlinge	71
7.4.1	Untersuchung auf Standfestigkeit	71
7.4.1.1	SiC – Gießereistaub – mit und ohne Koksgrus (V 1.0-V 4.0).....	71
7.4.2	Substitution des Bindemittels	74
7.4.3	Druckfestigkeitsversuche.....	80
7.5	Modellierung.....	83
7.5.1	Einteilung der Beseitigungsverfahren	84
7.5.2	Das Modell OpMökol	87
7.5.3	Die Anwendung von OpMökol am Beispiel der Verwertung durch SiC- Staub-Formlinge	93
7.5.4	Zusammenfassung	97
8.	Zusammenfassung und Ausblick	98
	Literaturverzeichnis	103
	Anhang.....	109
Anlage 1	109
Anlage 2	109
Anlage 3	109
Anlage 4	112

Anlage 5	114
Anlage 6	114
Anlage 7	123
Anlage 8	123

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Konzept der Stoffgeschichte (eigene Darstellung in Anlehnung an [10, 11]).....	3
Abbildung 2: Gießereiprozess mit Staubanfall (Eigene Darstellung in Anlehnung an [18]).	9
Abbildung 3: Abfallwirtschaftshierarchie nach § 6 Abs. 1. Dabei ist das obere Ziel stets dem unteren vorzuziehen.....	12
Abbildung 4: Ziel des Forschungsprojekts für die Entsorgung von Gießereistaub im Kontext der Abfallwirtschaftshierarchie (Eigene Darstellung)	14
Abbildung 5: Beispiel einer Staubabsaugung in einen Bigbag (Quelle: Partnergießerei).....	15
Abbildung 6: Eisen-Kohlenstoff-Diagramm (eigene Darstellung in Anlehnung an [29, 35])..	21
Abbildung 7: Allotrope Modifikationen von Eisen sowie daraus resultierende Mischkristalle mit Temperaturangabe [30, 37].....	22
Abbildung 8: Einteilung der Impfmethode.	23
Abbildung 9: Entwicklung des Umweltschutzes in der Industrie (Eigene Darstellung und Erweiterung in Anlehnung an [46]).....	25
Abbildung 10: Säulenmodell der nachhaltigen Entwicklung (Eigene Darstellung in Anlehnung an [51]).....	26
Abbildung 11: 17 Ziele der Vereinten Nationen für eine nachhaltige Entwicklung [55].	28
Abbildung 12: Beispiel für Indikatoren Auswahl zur Erfolgskontrolle der Nachhaltigkeitsziele der BRD (Eigene Darstellung) [56].....	28
Abbildung 13: Modellvorstellung der Nachhaltigkeit als Wirtschaften unter Berücksichtigung der sozialen Bedürfnisse innerhalb der planetaren Grenzen (eigene Darstellung in Anlehnung an [58]).....	30
Abbildung 14: Prinzip eines Rohstoffkreislaufes für eine Gießerei (eigene Darstellung in Anlehnung an [67]).....	32
Abbildung 15: Der gesellschaftliche Stoffwechsel (eigene Darstellung in Anlehnung an [70]).	33
Abbildung 16: Darstellung der Projekt-Thematik im Konzept des gesellschaftlichen Stoffwechsels (eigene Darstellung in Anlehnung an [70]).	34
Abbildung 17: Informationspyramide des Indikatorsystems (eigene Darstellung in Anlehnung an [84]).....	40
Abbildung 18: Verfahrensansätze zur Wahl des Indikatorsystems (eigene Darstellung in Anlehnung an [84]).....	42
Abbildung 19: Schematische Darstellung des Modellierungszyklus (eigene Darstellung in Anlehnung an [88]).....	43
Abbildung 20: Probenranssport zur Plasmafackel in einem ICP.....	48

Abbildung 21: Funktionsweise des Eisenkreislaufs (eigene Darstellung in Anlehnung an [97]).	50
Abbildung 22: Schematischer Aufbau (links) und realer Aufbau (rechts) eines Korona- Walzen-Scheiders.	53
Abbildung 23: Sankey-Diagramm der Anfallstellen und Entsorgung bei Gießerei A im Jahr 2020.	61
Abbildung 24: Sankey-Diagramm des Rohstoffpotenzials der Stäube von Gießerei A im Jahr 2020.	62
Abbildung 25: Sankey-Diagramm der Anfallstellen und Entsorgung bei Gießerei B im Jahr 2020.	63
Abbildung 26: Sankey-Diagramm des Rohstoffpotenzials der Stäube von Gießerei B im Jahr 2020.	64
Abbildung 27: Sankey-Diagramm der Anfallstellen und Entsorgung bei Gießerei C im Jahr 2020.	64
Abbildung 28: Sankey-Diagramm des Rohstoffpotenzials der Stäube von Gießerei C im Jahr 2020.	65
Abbildung 29: Sankey-Diagramm der Anfallstellen und Entsorgung bei Gießerei D im Jahr 2020.	66
Abbildung 30: Sankey-Diagramm des Rohstoffpotenzials der Stäube von Gießerei D im Jahr 2020.	67
Abbildung 31: XRD-Analyse des untersuchten Gießereistaubs.....	69
Abbildung 32: Formlinge mit den Zusammensetzungen V 1.0, 2.0, 3.0 und 4.0 (von links nach rechts).	71
Abbildung 33: Formlinge mit den Zusammensetzungen V 5.0, 5.1, 6.0 und 7.1 (von links nach rechts).	72
Abbildung 34: Formlinge mit den Zusammensetzungen V 8.1, 9.0, 9.1 und 9.2 (von links nach rechts).	72
Abbildung 35: Ausreichende Standfestigkeit nach 60 Minuten für V 1 - V 4.....	74
Abbildung 36: Ergebnisse der Falltests für die SBM-Zement-Mischungen (V 5 - V 9) nach 48 h bzw. 72 h, 144 h, 168 h und 192 h.	75
Abbildung 37: Positiver Falltest des Formlings V 10 nach Trocknung im Ofen.	76
Abbildung 38: Versuch V 1 zur Bestimmung des Abbindeverhaltens. Nach 30 Minuten kam es zur Agglomeration.	77
Abbildung 39: Formlinge der Mischungen V 2 und V 3. Beide konnten nach 15 min voll belastet werden.	77

Abbildung 40: Festigkeitstests der Versuche V 4 - V 7. Alle Formlinge hatten nach 15 Minuten eine ausreichende Standfestigkeit.....	78
Abbildung 41: Festigkeitstests der Versuche V 8 - V 10. V 8 und V 9 konnten nach 15 Minuten belastet werden, während V 10 erst nach 45 min belastet werden konnte.	78
Abbildung 42: Ergebnismatrix der Falltests für die Versuche V 6.1 - V 11.1.	79
Abbildung 43: Untersuchung der Druckfestigkeit der Formlinge F 1 und F 2.	81
Abbildung 44: Untersuchung der Druckfestigkeit der Formlinge F 5 - F 8.	81
Abbildung 45: Lineare Zunahme der Endfestigkeit mit steigendem Anteil an CSA-Zement... ..	82
Abbildung 46: Untersuchung der Druckfestigkeit der Formlinge F 9 und F 10.	83
Abbildung 47: Einteilung der Entsorgungsverfahren im Kontext der Abfallwirtschaftshierarchie.	84
Abbildung 48: Typische Verfahrensschritte in einem VmwV.	85
Abbildung 49: Typische Prozessschritte in einem VmrV.	85
Abbildung 50: Typische Prozessschritte in einem VmsV.	86
Abbildung 51: Typische Prozessschritte in einem VmsB.	86
Abbildung 52: Beziehungen zwischen Verfahrensarten hinsichtlich ihrer ökologischen Bewertung im OpMökol.	87
Abbildung 53: Modellvorstellung zur Entsorgung eines Gießereistaubs im Modell OpMökol.	88
Abbildung 54: Entscheidungsmatrix für das Anwendungsbeispiel.	96
Abbildung 55: Analyse der Stäube von Gießerei B im Jahr 2020.	113
Abbildung 56: Gesamtauswertung der Staubanalyse von Gießerei B aus dem Jahr 2020... ..	113
Abbildung 57: Korngrößenbestimmung durch Siebanalyse von Staub 4d.	114
Abbildung 58: Implementierung von OpMökol in Excel.	123

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einordnungen und Beschreibungen der fünf Deponieklassen.....	17
Tabelle 2: Durchführung des Königswasser-Mikrowellenaufschlusses für die chemische Analytik.	49
Tabelle 3: Durchführung des Flusssäure-Mikrowellenaufschlusses für die chemische Analytik.	49
Tabelle 4: Zusammensetzungen der untersuchten Rezepturen in Gew.-%. Die Basisrezeptur V 1.0 ist aus Gründen der Vertraulichkeit nicht gegeben.....	55
Tabelle 5: Rezepturen bei den Versuchen zur Substitution von Zement durch das SBM.	56
Tabelle 6: Rezepturen der Versuche zur Substitution von Portlandzement durch CSA-Zement.	57
Tabelle 7: Zusammensetzungen der Formlinge, die auf Druckfestigkeit untersucht wurden.	58
Tabelle 8: Ergebnisse des elektrostatischen Trennversuchs für den eisenärmeren Staub.....	70
Tabelle 9: Ergebnisse des elektrostatischen Trennversuchs für den eisenreicheren Staub. ...	70
Tabelle 10: Verwertungspotenzial für einen Gießereistaub mit einem SiO ₂ -Gehalt von 30 %. In der Basisrezeptur sind die exakten Werte aus Gründen der Geheimhaltung nicht genannt.	73
Tabelle 11: Verwertungspotenzial für einen Gießereistaub mit einem SiO ₂ -Gehalt von 50 %. In der Basisrezeptur sind die exakten Werte aus Gründen der Geheimhaltung nicht genannt.	73
Tabelle 12: Maßnahmen und Empfehlungen für einen nachhaltigeren Gießereibetrieb nach [18, 112].	109
Tabelle 13: Verwendete Mikroorganismen für den Zusammenschluss zur Gemeinschaft. ...	109
Tabelle 14: Staubanfall der Gießerei A im Jahr 2020.....	110
Tabelle 15: Analysedaten der Stäube aus dem Jahr 2020 der Gießerei A.	110
Tabelle 16: Staubanfall der Gießerei B im Jahr 2020.....	111
Tabelle 17: Analysedaten der Stäube von Gießerei B im Jahr 2020.	111
Tabelle 18: Staubanfall der Gießerei C im Jahr 2020.....	111
Tabelle 19: Analysedaten der Stäube von Gießerei C aus dem Jahr 2020.	111
Tabelle 20: Staubanfall der Gießerei D im Jahr 2020.....	112
Tabelle 21: Analysedaten der Stäube von Gießerei D im Jahr 2020.	112
Tabelle 22: Einteilung der Belastungskategorien für verschiedene Elemente nach [82].	122
Tabelle 23: Einteilung der Belastungskategorien für das Anwendungsbeispiel.	124

Formelverzeichnis

Formel 1: Gesamtindikator zur Operationalisierung von Nachhaltigkeit [47].....	41
Formel 2: Mathematische Beschreibung einer Entscheidungsvariable [91].....	45
Formel 3: Zielfunktion einer linearen Optimierung [91].	45
Formel 4: Bohr'sche Frequenzbedingung.....	48
Formel 5: Zielfunktion im OpMökol.	89
Formel 6: Verfahrenszuteilung für den angefallenen Staub im OpMökol.	90
Formel 7: Ökologische Bewertung der Einsparungen im OpMökol.	90
Formel 8: Ökologische Bewertung eines Rohstoffs im OpMökol.	92
Formel 9: Berechnung der ökologischen Bewertung ω_j für Eisen.....	94
Formel 10: Berechnung von ω_m für die Verwertung durch SiC-Staub-Formlinge.	94
Formel 11: Berechnung von ω_n für die Entsorgung durch Deponierung.	96
Formel 12: Berechnung der Zielfunktion mit den Werten aus dem Anwendungsbeispiel für die Entsorgung durch Verwertung als SiC-Gießereistaub-Formling.....	96
Formel 13: Berechnung der Zielfunktion mit den Werten aus dem Anwendungsbeispiel für die Entsorgung durch Deponierung.	96

1. Einleitung

1.1 Metallurgie im Laufe der Zeit

Kaum ein Prozess hat die Entwicklung der Menschheit so vorangetrieben, wie die Fähigkeit Metalle in elementarer Form zu gewinnen und zu verarbeiten.

Im Jahr 2017 haben Forscher der Universitäten in Heidelberg, London und Cambridge herausgefunden, dass die ersten Belege zur Kupfergewinnung aus Erzen um 5000 v.Chr. festzumachen sind [1]. Danach war die Reduktion von Kupferoxiden in frühzeitlichen Öfen die erste chemische Art der Gewinnung von reinen Metallen. Einige tausend Jahre später konnte durch Zugabe von Zinn eine Legierung geschaffen werden, welche die Duktilität deutlich erhöht hat und um rund 2400 v.Chr. die Bronzezeit einläutete [2]. Obwohl bereits bekannt und wesentlich zugänglicher, begann die Gewinnung und Verarbeitung von Eisen und die darauffolgende Epoche der Eisenzeit erst 400 Jahre später. Ein Grund hierfür war, dass Eisen, im Gegensatz zu Kupfer, für eine Verarbeitung heißgehämmert werden muss. Auch die erstmalige Gewinnung von Blei und Quecksilber sind in dieser Epoche einzuordnen.

Die genannten Metalle zeigen Gemeinsamkeiten, welche eine so früh datierte Entdeckung und Verarbeitung erklären. Neben den oft gediegen vorkommenden Elementen wie Gold oder Silber, können die Oxide von Kupfer, Eisen, Zinn und Blei bei Temperaturen reduziert werden, die problemlos durch Verbrennung von organischem Material erreicht werden [2]. Des Weiteren führen Verunreinigungen, wie sie zu der Zeit üblich waren, oft zu einer drastischen Schmelzpunktniedrigung. Nur wenige hundert ppm Kohlenstoff senken zum Beispiel den Schmelzpunkt von Eisen um mehrere hundert Grad Celsius [3]. Das ermöglichte unter anderem die Darstellung von Schmiedeeisen. Heute gilt das binäre Eisen-Kohlenstoff Diagramm als eines der bestuntersuchten Systeme überhaupt und bildet die Grundlage der weltweiten Stahlindustrie.

Im 14. Jahrhundert kam es zur Entwicklung der ersten Hochöfen. Diese neue Art von Ofen erzielte höhere Temperaturen und ermöglichte die Darstellung von Roheisen, welches in beliebige Formen gegossen werden konnte. In den darauffolgenden Jahrhunderten konnten die Hochöfen stetig verbessert werden. Angefangen von Rohren, die zusätzliche Luft einleiten, über innere Isolierungen aus Ton, welche die Wärme zurück in den Ofen reflektieren bis hin zu Schmelzprozessen bei denen Erz und Brennstoff kontinuierlich eingespeist werden [4]. Das alles steigerte sowohl die Effizienz als auch die Produktionsmenge erheblich.

Obwohl die Weiterentwicklung des Hochofens bis ins 18. Jahrhundert die Möglichkeit bot, Stahl in großen Mengen zu produzieren, war es doch das Schmiedeeisen, welches

die Ära der industriellen Revolution prägte. Die Produktion von Stahl, welches mit einem Kohlenstoffgehalt von 0,5 bis 2 Gew.-%, zwischen dem von Schmiedeeisen (0,05 – 0,25 Gew.-%) und dem von Roheisen (ca. 4 Gew.-%) liegt, war noch nicht rentabel [4, 5].

Mit der Entwicklung der ersten elektrischen Generatoren Anfang des 20. Jahrhunderts, wurden schnell auch die ersten Öfen elektrisch betrieben. Die damit erzielten Temperaturen ermöglichten die großtechnische Darstellung von Elementen wie Chrom und Mangan, welche in Kombination mit Stahl bestimmte Eigenschaften, wie die Härte, verbessern konnten [4].

Seitdem wurden metallurgische Prozesse laufend weiterentwickelt. Meist mit dem Hauptziel kostengünstiger und in größeren Mengen zu produzieren. Mit dem über die letzten Jahrzehnte gestiegenem Umweltbewusstsein, ist ein neues Ziel in den Fokus gerückt: möglichst „nachhaltig“ zu produzieren. Angetrieben von immer strenger werdenden (Umwelt)Vorschriften, werden Produzenten aller Wirtschaftsbereiche dazu angehalten ihren ökologischen Fußabdruck zu reduzieren und im Sinne einer Kreislaufwirtschaft zu produzieren. Das ist in einem ersten Schritt oft mit höheren Kosten verbunden und führt nicht selten einfach zu einer Verlagerung der Produktion in Länder mit weniger strengen Vorschriften. Ziel muss es daher sein, attraktive Lösungen für die Industrie zu finden. Durch die Entwicklung neuer Verfahren der Rückstandsbehandlung müssen Deponien entlastet werden. So steht sowohl aus ökologischer als auch aus ökonomischer Sicht das übergeordnete Ziel: „[...] die Verschwendung von Abfall zu vermeiden“ [6].

1.2 Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft

Der Wandel von einer Linearwirtschaft hin zu einer Kreislaufwirtschaft wurde politisch mit der Verabschiedung des Kreislaufwirtschaft- und Abfallgesetzes im Jahr 1994 angestoßen. Neben den offensichtlich positiven Einflüssen auf die Umwelt, beschreibt die Ellen-McArthur-Stiftung die Kreislaufwirtschaft weiterhin als Weg zu stabilem Wachstum für entwickelte Volkswirtschaften [7]. Darauf aufbauend wurde im Jahr 2012 das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) verabschiedet. Das Ziel ist die Förderung der Ressourcenschonung sowie der Schutz der Umwelt und Menschen bei der Erzeugung und dem Umgang mit Abfällen.

Im März 2020 wurde der Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft (Circular Economy) von der Europäischen Kommission vorgelegt. Der Plan enthält Vorschläge zur nachhaltigeren Produktgestaltung mit dem Ziel, das Abfallaufkommen zu verringern sowie den Verbraucherschutz zu stärken. Damit ist dieser ein wichtiger Baustein des europäischen Green Deals und Teil der neuen EU-Industriestrategie [8].

Die Kreislaufwirtschaft ist ein Modell, welches den Lebenszyklus von Produkten verlängert, indem bestehende Ressourcen, Rohstoffe, Materialien und Produkte so lange wie möglich wiederverwendet, repariert, aufgearbeitet oder recycelt werden. Dabei kann sowohl in den Prozess der Produktion als auch in den des Verbrauchs beim Konsumenten eingegriffen werden. Gleichzeitig werden dabei Abfälle auf ein Minimum reduziert. Da Materialien und Ressourcen am Ende des Lebenszyklus eines Produkts, sofern möglich, in der Wirtschaft verbleiben, generieren diese auch weiterhin eine Wertschöpfung. Dazu sollte schon beim Design von intelligenten Produkten und Werkstoffen der gesamte Lebenszyklus berücksichtigt werden, damit am Ende der Lebensdauer eine möglichst vollständige Verwertung stattfinden und Rohstoffe zurückgewonnen werden können [9]. **Abbildung 1** zeigt, wie ein Produkt im Kreislauf geführt werden kann und welche Schritte zur Umsetzung berücksichtigt werden müssen. Beginnend mit dem Rohstoff als Ausgangspunkt, den einzelnen Verarbeitungs- und Produktionsschritten bis hin zum fertigen Produkt. Das darauffolgende Ende der Nutzungsphase und die Dissipation sollen durch die RE-Phasen in Form von Reuse, Remanufacturing und Recycling abgelöst werden [10, 11]. Die vier Pfeile stellen Kategorien für Einflussfaktoren auf die Kreislaufführung dar.

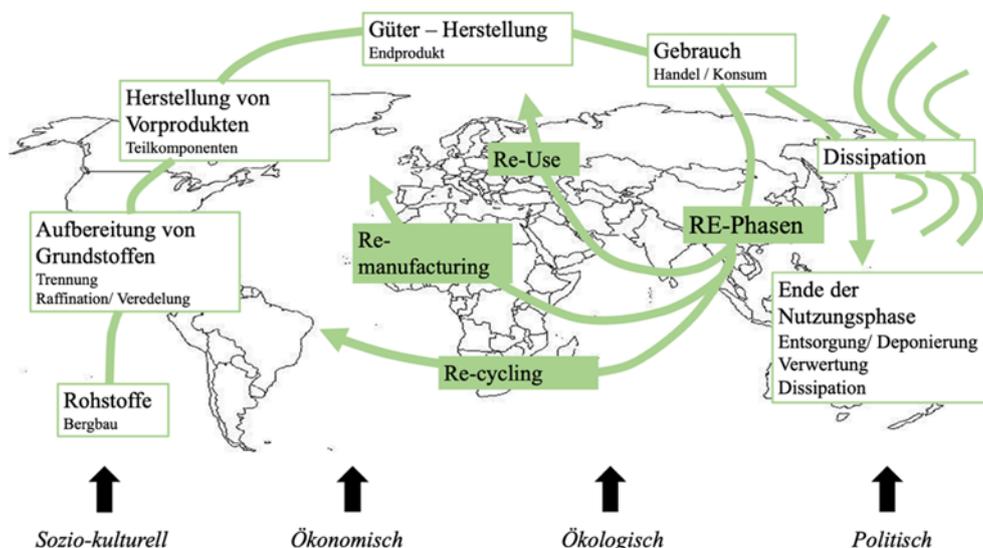


Abbildung 1: Konzept der Stoffgeschichte (eigene Darstellung in Anlehnung an [10, 11]).

Damit die Kreislaufwirtschaft funktioniert, ist eine zukunftsweisende Ressourcenstrategie von großer Bedeutung. Dabei muss die Entstehung, Nutzung sowie Verwendung nach der Nutzung von Ressourcen transparent gehalten werden. Da die Verfügbarkeit von Rohstoffen und Materialien begrenzt ist, sind Stoffkreisläufe, um dem vollständigen Verbrauch entgegenzuwirken, unabdingbar.

1.3 Der Verbund ForCYCLE II und das Projekt BGMR

Der Projektverbund ForCYCLE II besteht aus elf verschiedenen Projekten mit dem übergeordneten Ziel einer Steigerung der Ressourceneffizienz in der bayerischen

Wirtschaft. Im Besonderen gelten Digitalisierung, Substitution und integrierte Produktpolitik als Themenschwerpunkte. Als Teil der integrierten Produktpolitik und Grundlage dieser Arbeit behandelt das Teilprojekt 9 die Rohstoffsicherung und den Erhalt durch Aufbereitung und Verwertung von Gießereistäuben (BGMR). Unter der Federführung der Universität Augsburg handelt es sich beim Projekt um ein Konsortium mit Vertretern aus Wissenschaft und Wirtschaft bei dem Expertisen aus allen relevanten Fachbereichen einfließen.

Als wissenschaftlicher Partner fanden in Kooperation mit der bifa Umweltinstitut GmbH Staubanalysen und Workshops statt. Als Industriepartner lieferten die Kemptener Eisengießerei Adam Hönig AG, die Franken Guss GmbH & Co. KG, die Gießerei HEUNISCH GmbH sowie die Trompeter Guss GmbH & Co. KG regelmäßig Staubproben und halfen dabei theoretische Überlegungen auf ihre Umsetzbarkeit in der Gießerei zu evaluieren. Weitere industrielle Projektpartner mit denen Versuche zur Staubaufbereitung und Wiederverwertung stattfanden waren die AKW Apparate + Verfahren GmbH sowie die GPS SIC Keßl GmbH & Co. KG.

Der Ist-Zustand in den Gießereien und in der Handhabung der Stäube lässt sich wie folgt beschreiben. Bei den Produktionsprozessen der Gießereien fallen unterschiedliche Stäube an, welche teils hohe Anteile an Metallen und Siliziumdioxid enthalten. Diese gehen als Ressource bei den derzeitigen Entsorgungswegen größtenteils verloren. Die anfallenden Stäube können in der Praxis, aufgrund fehlender Kontrollierbarkeit ihrer chemischen und physikalischen Eigenschaften meist nicht durch übliche Verfahren recycelt und müssen daher überwiegend deponiert werden oder enden als Bergversatz. Bei diesen Prozessen fallen teils hohe Entsorgungskosten an, welche die Gießereien vor finanzielle Herausforderungen stellt. Die untertägige Verbringung von Abfällen in Bayern ist rechtlich nicht möglich. Die Stäube müssen daher oft in benachbarte Bundesländer transportiert werden.

Das Hauptziel ist eine ökonomisch und ökologisch sinnvolle Verwertungsmöglichkeit für die Stäube zu finden. Hierfür wurden verschiedene Arbeitspakete und -abläufe festgelegt. In den ersten 12 Monaten wurden die Gießereien besucht, Proben genommen, analysiert und ausgewertet. Parallel dazu fand eine Recherche der Fachliteratur statt, um einen Überblick über den aktuellen Stand der Technik zu erhalten sowie eventuelle neue Entwicklungen auf dem Gebiet des Staub-Recyclings mitzuverfolgen. Es wurden verschiedene Verwertungswege kritisch geprüft und in Workshops mit allen Projektpartnern diskutiert. In den Monaten 13 bis 24 wurde der Fokus auf die Ausarbeitung der konzeptionellen Ideen gesetzt. Hierfür wurden Massenströme digitalisiert und Versuche im Labormaßstab mit dem Ziel der Evaluation einer generellen Umsetzbarkeit durchgeführt. Darauf aufbauend wurden in den Monaten 25-36 positive Ergebnisse der Laborversuche in den

Technikumsmaßstab überführt. Um die Umweltwirkungen verschiedener Methoden vergleichen zu können, wurde eine mathematische Modellierungsfunktion zur Quantifizierung ökologischer Nachhaltigkeit aufgestellt. Mit Monat 36 wurde ein Abschlussbericht an das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, welches das Projekt koordiniert und finanziert hat, übergeben.

1.4 Ziele der Arbeit

In dieser Arbeit soll die komplette Thematik des Abfallprodukts „Gießereistaub“ aufgearbeitet sowie Möglichkeiten und Herausforderungen der Aufbereitung und Verwertung untersucht und evaluiert werden. Dabei wird eine gesamtheitliche Betrachtung vom Gussprozess über den Staubanfall hin zur Entsorgung angestrebt. Dazu zählt neben den technisch-naturwissenschaftlich Aspekten, die den Kern der Arbeit ausmachen, auch eine Analyse der Gießereibranche und der abfallrechtlichen Rahmenbedingungen. Die entwickelten Methoden sowie die Gießereiindustrie selbst sollen in den Kontext der Nachhaltigkeit gestellt werden. Hierfür soll der Begriff der Nachhaltigkeit definiert, parametrisiert und eine Möglichkeit der Quantifizierung gefunden werden.

Das Forschungsdesign beinhaltet dabei zwei wesentliche Punkte. Zum einen sollen mit innovativen Versuchen zur Staubaufbereitung sowie der Modellierung Beiträge zur wissenschaftlichen Grundlagenforschung auf dem Gebiet des Gießereistaub-Recyclings geleistet werden. Zum anderen sollen praktisch anwendbare und konzeptionell ausgearbeitete Methoden den Gießereien und KMUs helfen die Problematik realitätsnah anzugehen. Auch wenn sich diese Punkte generell nicht gegenseitig ausschließen und im Idealfall sogar miteinander verbunden werden können, so ist vor allem der Up-Scaling Prozess oft ein Hürde die schwer zu nehmen ist und an der die Umsetzung von neuen Methoden und Technologien scheitert. Da es sich bei dem Abfallprodukt „Gießereistaub“ um ein Gemenge von Rohstoffen handelt, die im Einkauf nicht teuer sind, dafür aber in großen Mengen anfallen, muss hierfür von Anfang an die Wirtschaftlichkeit im Konzeptdesign verankert werden, um eine industrielle Implementierung überhaupt in Betracht ziehen zu können.

Bei dem Projekt handelt es sich um angewandte Ressourcenforschung. Während reine Grundlagenforschung meist auf wissenschaftliche Neugierde beruht, so beruft sich die angewandte Forschung meist auf eine Dringlichkeit in ihrer Umsetzung. Diese Dringlichkeit wird von Seiten der Gießereien besonders in den letzten Jahren kommuniziert. Unter anderem aufgrund eines eher geringen ökonomischen Potenzials für Verwerter, verfahrenstechnischer Herausforderungen und einer komplexen Rechtsstruktur sind Forschungsbemühungen auf dem Gebiet bisher gering. Mit Blick auf die Klimapolitik, welche ein ressourceneffizientes Wirtschaften impliziert, steigende Entsorgungskosten sowie die schrumpfende Anzahl an Deponien

in Deutschland wird die Notwendigkeit für die Forschung an alternativen Wegen und neuen Entwicklungen deutlich. Hierzu soll diese Arbeit einen Grundstein legen, auf der in Folgeprojekten aufgebaut werden kann.

Aus Gründen der Vertraulichkeit werden gewisse Stellen dieser Arbeit verschlüsselt angegeben. Zu diesem Zweck werden insbesondere bei der Nennung konkreter Zahlenwerte die vier Partnergießereien als Gießerei A bzw. B, C oder D bezeichnet.

2. Gießereiindustrie, Staubanfall und Entsorgung

Wie bereits in Kapitel 1.1 angeschnitten, hat sich die Gießereitechnik über die letzten Jahrzehnte zu einer Technologie mit hoher Anwendungsbreite entwickelt. Deutschlandweit wurden 2020 3,48 Millionen Tonnen Gussprodukte hergestellt und ein Umsatz von 10,18 Milliarden Euro generiert [12]. Circa 91 % aller Unternehmen beschäftigen weniger als 500 Mitarbeiter. Damit ist die Gießerei-Branche ein klassischer Vertreter des Mittelstands. Insgesamt waren 2020 rund 68.000 Mitarbeiter beschäftigt [12].

Auch in Bayern ist die Metallerzeugnisbranche mit den Schwerpunkten Apparate-, Maschinen- und Fahrzeugbau, sowie im Metallhandel und der Baubranche von besonderer Wichtigkeit. 2019 waren in Bayern 111.114 Beschäftigte mit der Herstellung von Metallerzeugnissen tätig [13]. Rund 25.000 Mitarbeiter zählte die Erzeugung von Blankstahl, Kaltprofilen und kaltgezogenem Draht, Erzeugung und Bearbeitung von NE-Metallen sowie Gießereien [13].

Zum besseren Verständnis wird in den folgenden Kapiteln kurz auf die Grundlagen des Gussprozesses eingegangen. Darauf aufbauend wird die Problematik des Staubanfalls erörtert.

2.1 Grundlagen des Gussprozesses

2.1.1 Technische Einführung

Der Metallguss zieht sich heutzutage durch alle Ebenen der Industrie. Gussteile werden sowohl in hohen Stückzahlen, beispielsweise in der Automobilbranche, als auch in hoch technisierten Bereichen wie der Raumfahrt eingesetzt.

Technisch wird die Bauteilherstellung über Guss dem sogenannten Urformen zugeordnet. Die Formgebung passiert bereits im ersten Prozessschritt direkt aus dem Rohstoff, der vorher im Ofen erzeugt wird. Je nach Endprodukt gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen Verfahren, über die Gussprodukte erzeugt werden können [14]. Diese orientieren sich vor allem am zu erzeugenden Endprodukt, wobei viele unterschiedliche Faktoren, wie Gussmaterial, geometrische Komplexität des Endbauteils, Stückzahl und geforderte Qualität eine zentrale Rolle spielen. Jeder dieser Faktoren kann eine andere Gusstechnik erfordern. Um ein grundlegendes Verständnis für den Ablauf eines Gussprozesses zu entwickeln, wird an einem der einfacheren und zudem wirtschaftlich besonders relevanten Verfahren, dem Sandguss, die Prozesskette kurz erläutert.

Klassisch werden beim Sandguss in einem ersten Prozessschritt geeignete Konstruktionszeichnungen erstellt, anhand derer dann im nächsten Schritt ein Modell gebaut werden kann. Hierfür wird heute in der Regel auf CAD-Programme (engl.

computer-aided design) zurückgegriffen, wodurch höhere Produktivitätsraten und genauere Ergebnisse erreicht werden als bei der früher üblichen Handkonstruktion.

Der zweite Prozessschritt ist der eigentliche Bau des Modells. Dieses besteht zumeist aus Holz, Gips, Kunststoffen oder auch Schäumen. Das Modell kann je nach Verfahren zur Herstellung weiterer Gussformen wiederverwendet werden, verbleibt aber manchmal auch in der Form. Aufgrund von Materialschwüden wird das Modell beim Abguss stets etwas größer gebaut [15].

Mit dem Modell kann nun im dritten Schritt die Gussform erzeugt werden. Beim Sandguss wird hierbei ein Abdruck erzeugt, indem das Modell in eine mit Formsand gefüllte Rohform gedrückt wird. Der Sand ist dabei mit einem Bindemittel (z.B. Furan- oder Phenolharz) versehen, so dass er an der Luft oder im Ofen aushärten kann und den Abdruck beibehält. Das Modell kann entnommen und für weitere Formen genutzt werden. Gussverfahren werden in Verfahren mit verllorener und mit mehrfach verwendbarer Form unterteilt. Bei ersteren wird später zur Befreiung des gegossenen Bauteils die Form gebrochen, bei Letzteren wird sie geöffnet und weiterverwendet. Prinzipiell gilt, dass die Gussform im Fall einer gewünschten Mehrfachverwendung als teilbare Form ausgeführt werden muss. Das bedeutet, dass die Form aus zwei oder mehr Teilen bestehen muss. Dies ist vor allem bei einfacheren Geometrien, die eine Entnahme überhaupt erst möglich machen verbreitet. Bei Verfahren für große Stückzahlen wird oft einmalig eine dauerfeste Rohform, also nicht aus Sand, sondern aus Metall erzeugt, die mehrfach ausgegossen werden kann [14].

Im nächsten Prozessschritt wird die Form mit dem flüssigen Metall ausgegossen, das man anschließend innerhalb der Form erstarren lässt.

Zuletzt wird die Form entfernt. Bei Sandformen wird sie dabei vollständig zerstört, um das Bauteil daraus zu befreien. Bei dauerfesten Formen werden die Bauteile mechanisch entnommen, ohne die Form zu schädigen [15]. Hier fällt beim Ausklopfen der Form im realen Prozess schon Staub an. Abhängig von den Verfahren werden oft nur geringe Oberflächengüten erreicht. Häufig ist eine umfangreiche Nachbereitung notwendig, welche üblicherweise über Schleifen und Spanen stattfindet [16]. Darüber hinaus gibt es aber auch die Möglichkeit, die Bauteile über das Strahlen mit metallischen Strahlmitteln vom Restsand zu befreien. Hierfür wird das Strahlmittel über Turbinen beschleunigt und auf das Bauteil geschleudert, von dem durch den Aufprall die Restanhaftungen entfernt werden. Neben dem Guss an sich, ist die Nachreinigung ein Prozessschritt, bei dem große Mengen an Staub freigesetzt werden. Dieser wird in der Regel über eigene Absaugungssysteme der Reinigungskabinen abgesaugt und in Filteranlagen gesammelt. Er unterscheidet sich in seiner Zusammensetzung gravierend von den beim Gießen anfallenden Stäuben [17].

Der Hauptteil des Hochofens, der sogenannte Schacht, schließt von unten an die Gicht an. Je weiter man den Schacht nach unten geht, umso höher ist die Temperatur. Dadurch finden die verschiedenen Prozesse höhenabhängig statt. Im oberen Teil des Schachts wird das Erz lediglich getrocknet, während im unteren Teil Reduktionsprozesse stattfinden [20]. Hier wird das Eisenerz durch Kohlenstoffmonoxid zu elementarem Eisen reduziert.

Die Stelle, an der das flüssige Metall entnommen wird, wird gemeinhin als Abstich bezeichnet.

Gara und Schrimpf (1998) geben unter Berufung auf Firmenangaben einen Gesamtstaubanfall von bis knapp über 30 kg pro Tonne erzeugtem Stahl [20]. Davon entfällt der größte Teil auf die Gichtgasentstaubung, während der in der Halle anfallende Staub nahezu vernachlässigbar ist. Kroll (2015) gibt in neueren Daten lediglich einen Staubanfall von 20 kg pro Tonne erzeugtem Stahl an [21]. Das starke Aufstauben im Prozess hat dabei vor allem mechanische Gründe.

2.1.2.2 Gusserzeugung und Staubentstehung im Kupolofen

Kupolöfen (engl. Cupola Furnace) gehören, wie Hochöfen, zu den sogenannten Schachtöfen und ähneln diesen daher im Aufbau. Im Gegensatz zum BF, dienen im CF häufig Roheisen oder Stahlschrott als Rohstoff [22].

Bei Kupolöfen werden, wie beim Hochofen, Eisenträger und Koks als Brennstoff eingebracht. Zusätzlich wird meist noch Kalk zugegeben, um die Schlackenbildung zu erleichtern, sowie weitere Additive zur Aufsilizierung (siehe Kapitel 6.3.1).

Anders als beim Hochofen kann beim Kupolofen die Gicht entfallen: die Abgase werden am oberen Ende des Schachtes aufgefangen, umgeleitet und am unteren Ende als Warmlufteinblasung wieder in den Prozess eingeführt. Dieses energieeffiziente Verfahren lohnt sich aufgrund des komplexeren Aufbaus meist jedoch nur für große Gießereien. Vor allem kleinere Betriebe nutzen oft sogenannte Kaltwindkupolöfen, bei denen wie beim Hochofen Gichtgase nach oben abgeführt werden. Moderne Kupolöfen sind technisch einfach realisierbar, kostengünstig, deutlich kleiner als Hochöfen und können dennoch über lange Zeiträume exzellente Abgussqualitäten garantieren. Damit sind sie prädestiniert für mittelständische Gießereien [22].

Die Staubentstehung im Kupolofen kommt auf zweierlei Arten zustande: zum einen entsteht, ähnlich dem Hochofen, viel Staub durch den mechanischen Abrieb im Schacht. Zum anderen dampfen durch die hohen Temperaturen aber auch Metalle aus. Die Stäube enthalten entsprechend oft größere Mengen an weichen Metallen mit niedrigem Schmelzpunkt wie z.B. Zinn oder Zink, das vor allem aus verzinkten Schrottteilen ausdampfen kann. Stäube mit hohem Zink-Gehalt haben einen höheren

Materialwert und können gut weiterverkauft werden. Dies trifft allerdings nur auf Kupolöfen zu, die besonders viel Schrott mit verzinkten Teilen schmelzen. Anderweitig anfallende Stäube sind deutlich schwerer zu verwerten.

Mit einer Anfallmenge von ca. 10 kg Staub pro Tonne erzeugtem Gussmaterial liegen Kupolöfen deutlich unter der Staubemission von Hochöfen mit 30 kg Staub pro Tonne erzeugtem Gussmaterial, können aber bei stark verschmutztem Schrott deren Werte durchaus erreichen [22].

2.1.2.3 Gusserzeugung und Staubentstehung im Elektrolichtbogenofen

Elektrolichtbogenöfen (engl. Electric Arc Furnace (EAF)) haben mit der zunehmenden Elektrifizierung der Industrie an Bedeutung gewonnen und andere Ofentypen dabei teilweise vollständig vom Markt verdrängt. Die Erhitzung des fertig aufbereiteten Stahls oder Eisens zum Vergießen erfolgt heute in 90 % der Fälle über EAFs [22]. In dieser Funktion sind EAFs auch bei allen vier Partnergießereien in Betrieb. Eine Aufbereitung von Roherz im EAF ist hingegen eher selten. Häufig werden Eisenbriketts oder auch Stahlschrott, der immer mehr an wirtschaftlicher Bedeutung gewinnt, als Ausgangsmaterial genutzt. Am häufigsten kommen Wechselstrom-EAFs mit drei Elektroden zur Anwendung. Der Hauptteil des Ofens ist das Ofengefäß, in das die Elektroden eingesetzt werden. Diese bestehen aus Graphit, das sowohl temperaturbeständig ist als auch eine gute Hochtemperatur-Leitfähigkeit hat. Der Ofen ist, ebenso wie der Deckel nach außen, mit einem umfassenden Kühlwassersystem ausgestattet und innen feuerfest gedämmt. Zwischen den Elektroden wird durch Anlegen einer elektrischen Spannung ein Lichtbogen erzeugt, der durch das in den Kessel eingebrachte Material wandert. Die Temperaturübertragung in das Ofengefäß erfolgt hauptsächlich über die thermische Abstrahlung dieses Lichtbogens. Der Abstich erfolgt, wie bei den bisher vorgestellten Öfen, am unteren Ende des Kessels. Die entstehenden Abgase und Stäube werden durch ein zusätzliches Loch neben den Elektroden abgesaugt. Hier ist besonders der hohe Anteil an Stickoxiden und Kohlenstoffmonoxid im Abgas zu erwähnen, wobei die Stickoxide auf den Kontakt des Lichtbogens mit Luft zurück zu führen sind [20, S. 43-44].

Die Vorteile des EAF sind sein hoher Wirkungsgrad, seine genaue Schmelzprozesssteuerung sowie eine geringere Emission von Schadstoffen. Nachteilig sind der hohe Preis, ein hoher Stromverbrauch sowie der direkte Energieverlust über Kühlwasser [22]. Stäube, die im EAF entstehen, werden zusammen mit den Abgasen abgesaugt und in Filtern aufgefangen. Die Anfallmenge ist meist geringer als bei den anderen beiden Ofenarten und liegt bei ca. 13 kg pro erzeugter Tonne Stahl [21]. Auch in ihrer Zusammensetzung unterscheiden sich EAF-Stäube von anderen Beiprodukten der Stahlproduktion: sie enthalten höhere Mengen an Zink und auch Blei, welche bei

den hohen Temperaturen besser ausdampfen können und auch durch die Verwendung von verzinktem oder mit Bleifarbe lackiertem Stahlschrott in den für EAF üblichen Ausgangsmaterialien häufiger vorkommen [20]. Dadurch wird die Verwertung häufig schwierig.

Zum besseren Verständnis der Entsorgungsproblematik widmet sich das nächste Kapitel den rechtlichen Grundlagen der Abfallentsorgung und beschreibt den aktuellen Entsorgungsstand in der Gussindustrie.

2.2 Grundlagen der Abfallentsorgung und Deponierung

2.2.1 Abfallwirtschaftshierarchie des Kreislaufwirtschaftsgesetz

Das Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG), legt in § 6 Abs. 1 eine Rangfolge für die Maßnahmen der Vermeidung, der Verwertung und Beseitigung fest (siehe **Abbildung 3**).



Abbildung 3: Abfallwirtschaftshierarchie nach § 6 Abs. 1. Dabei ist das obere Ziel stets dem unteren vorzuziehen.

Die Vermeidung ist in § 3 Abs. 20 KrWG definiert als „Maßnahme, die ergriffen wird, bevor ein Stoff, Material oder Erzeugnis zu Abfall geworden ist, und dazu dient, die Abfallmenge, die schädlichen Auswirkungen des Abfalls auf Mensch und Umwelt oder den Gehalt an schädlichen Stoffen in Materialien und Erzeugnissen zu verringern“.

Nach § 3 Abs. 24 KrWG ist die Vorbereitung zur Wiederverwertung „jedes Verwertungsverfahren der Prüfung, Reinigung oder Reparatur, bei dem Erzeugnisse oder Bestandteile von Erzeugnissen, die zu Abfällen geworden sind, so vorbereitet werden, dass sie ohne weitere Vorbehandlung wieder für denselben Zweck verwendet werden können, für den sie ursprünglich bestimmt waren“.

Recycling dagegen, laut § 3 Abs. 25 KrWG, ist „jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden; es schließt die Aufbereitung organischer Materialien ein, nicht aber die energetische Verwertung und die Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung bestimmt sind“.

Verwertung wird in § 3 Abs. 23 KrWG generell definiert als „jedes Verfahren, als dessen Hauptergebnis die Abfälle innerhalb der Anlage oder in der weiteren Wirtschaft einem sinnvollen Zweck zugeführt werden, indem sie entweder andere Materialien ersetzen, die sonst zur Erfüllung einer bestimmten Funktion verwendet worden wären, oder indem die Abfälle so vorbereitet werden, dass sie diese Funktion erfüllen“.

Beseitigung, nach § 3 Abs. 26 KrWG, ist „jedes Verfahren, das keine Verwertung ist, auch wenn das Verfahren zur Nebenfolge hat, dass Stoffe oder Energie zurückgewonnen werden“.

Es lässt sich zusammenfassen, dass Abfallvermeidung über der Abfallentsorgung, welche Abfallverwertung und Abfallbeseitigung umfasst, eingeordnet ist. Vorbereitung zur Wiederverwendung umfasst Verfahren zur Vorbereitung für die Wiederverwendung in dem ursprünglichen Verwendungszweck ohne eine Aufbereitung des Abfalls. Im Gegensatz dazu erfordern Recycling-Verwertungsverfahren eine Aufbereitung des Abfalls um anschließend Verwendung im ursprünglichen Zweck oder in einem neuen Verwendungszweck zu finden.

Nach den Grundpflichten der Kreislaufwirtschaft im KrWG § 7 ist der Erzeuger des Abfalls zu dessen Verwertung verpflichtet, wobei eine Verwertung des Abfalls Vorrang vor der Beseitigung hat. Eine Beseitigung des Abfalls ist nur erlaubt, falls eine Verwertung technisch nicht möglich ist, wirtschaftlich nicht zumutbar ist oder für einen gewonnenen Stoff oder gewonnene Energie kein Markt vorhanden ist oder geschaffen werden kann. Wirtschaftlich unzumutbar ist eine Verwertung, wenn die mit der Verwertung verbundenen Kosten außer Verhältnis zu den Kosten für eine Abfallbeseitigung stehen. Hier gibt es also keine konkreten Zahlenwerte und damit Ermessensspielraum.

2.2.2 Gießereistäube im Kontext der Abfallwirtschaftshierarchie

Das Ziel des Forschungsprojekts lässt sich in den Kontext der Abfallwirtschaftshierarchie setzen (siehe **Abbildung 4**).

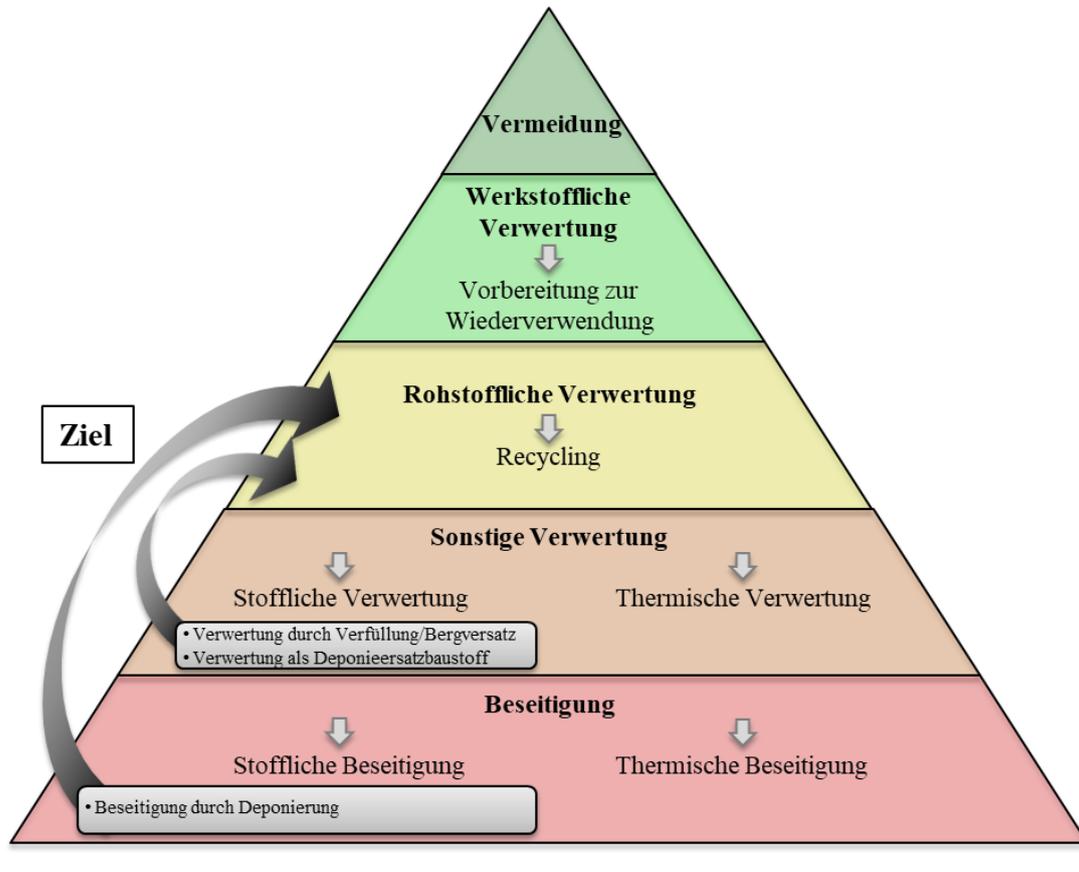


Abbildung 4: Ziel des Forschungsprojekts für die Entsorgung von Gießereistaub im Kontext der Abfallwirtschaftshierarchie (Eigene Darstellung).

Die Rahmenbedingungen, unter denen es zu einer erfolgreichen Rückführung von Gießereistäuben kommen kann, sind vielschichtig und komplex. Neben der eigentlichen technischen Entwicklung müssen ökologische, ökonomische und rechtliche Grundsätze, seien sie politischer oder ideologischer Natur, eingehalten werden. Diese Interdisziplinarität zieht sich durch das gesamte Forschungsprojekt. Aufgaben sollten daher zunächst einfach gehalten werden. Jeder Schritt, der dazu beiträgt, eine Methode zu entwickeln, um vom Ende der Pyramide weiter aufzusteigen oder auch innerhalb einer Ebene ökologische oder ökonomische Vorteile zu generieren und dabei gleichzeitig die entsprechenden Rahmenbedingungen berücksichtigt, ist zunächst erstrebenswert. Auch wenn die Abfallwirtschaftshierarchie als Teil des Kreislaufwirtschaftsgesetzes fest verankert ist, so muss das Ziel eine Verbesserung der realen Situation für die KMUs sein und keine Methodik, die mit einem hierarchischen Aufstieg verbunden wäre, aber in der Anwendung keinen Einsatz finden kann.

Dieses Ziel dient nicht nur der Steigerung der Ressourceneffizienz und einem nachhaltigen Wirtschaften, sondern ist durch die Grundpflichten der Kreislaufwirtschaft gesetzlich gefordert. Die Einschränkung dabei ist, dass die Kosten

einer in der Hierarchie höher angesiedelten Verwertung nur gesetzlich gefordert sind, wenn die damit verbundenen Kosten nicht außer Verhältnis zu den Kosten für eine niedriger angesiedelte Verwertung oder Beseitigung des Abfalls stehen. Diese Grundpflichten verdeutlichen die Relevanz des Forschungsprojekts. Die Ergebnisse des Forschungsprojekts sollten wirtschaftlich sein, damit sich die Entsorgung der Gießereistäube ökologisch verbessern kann.

2.2.3 Staubsammlung und Klassifizierung

Die in der Gussindustrie, insbesondere bei CF und EAF, anfallenden Stäube werden entweder direkt im Ofen abgesaugt oder über die Filteranlagen der Hallen gesammelt. Dort werden sie meist über trockene Filter abgeschieden, aufgesammelt und abgefüllt. Alle vier am Projekt beteiligten Gießereien fangen diese im Filter gesammelten Stäube über sogenannte Bigbags auf (siehe **Abbildung 5**). Zusätzlich werden auch nassabscheidende Entstaubungsanlagen eingesetzt, die bei Stäuben mit hohen Anteilen an Magnesium oder Aluminium, bei denen eine erhöhte Gefahr entzündlicher Staubexplosionen besteht, gesetzlich vorgeschrieben sind [17]. Hier erfolgt die Lagerung meist in Silos und seltener in Bigbags.



Abbildung 5: Beispiel einer Staubabsaugung in einen Bigbag (Quelle: Partnergießerei).

Die gesammelten Stäube werden in den verschiedenen Gießereien teilweise nach Anfallstelle in getrennten Bigbags, teilweise auch zentral gesammelt und stehen dann zur sogenannten Klassifizierung und Entsorgung bereit. Beide Maßnahmen werden gesetzlich durch die Abfallverzeichnisverordnung (AVV) vorgegeben. Bei der Klassifizierung werden die Stäube entsprechend den Vorgaben der jeweiligen

zuständigen Landesbehörde und gemäß des europäischen Abfallverzeichnisses deklariert. Dabei liegt die Nachweispflicht für die Gefährlichkeit der Abfälle beim Unternehmen, durch das der Müll entsteht (§3 Abs. 2 AVV). Die Einstufung als „gefährlicher Abfall“ zieht für Entsorger und Unternehmen einen deutlichen finanziellen Mehraufwand bei der Entsorgung mit sich, auch weil eine Nachweispflicht für besondere Sachkunde (§54 KrWG) besteht.

Die einzeln angefallenen Abfälle erhalten einen sechsstelligen Bewertungsschlüssel und eine Abfallbezeichnung entsprechend der AVV. Der Schlüssel gibt dabei Herkunftsort und Gefährdungspotential an. Als erklärendes Beispiel soll Staub mit dem AVV-Schlüssel 100909* dienen: die ersten beiden Ziffern deklarieren den Staub als Abfall aus thermischen Prozessen. Die dritte und die vierte Ziffer weisen darauf hin, dass es sich um Abfall durch Gießen von Eisen und Stahl handelt. Die letzten beiden Ziffern, sowie der Stern verweisen auf Filterstaub, der gefährliche Abfälle enthält.

Diese AVV-Schlüssel können selbst für ähnliche Prozesse stark variieren. Gießerei A unterscheidet hier allein schon sechs verschiedene Klassifizierungen (siehe Kapitel 7.1.1). Bei genauerer Analyse der AVV fallen im Kontext der Gießereistaubentsorgung zwei Dinge auf: zum einen stellt die AVV grundsätzlich ungefährlichen Abfällen immer gefährliche Abfälle der gleichen Herkunft entgegen (z.B. 100909*: „Filterstaub, der gefährliche Stoffe enthält“ und 100910: „Filterstaub mit Ausnahme desjenigen, der unter 10 09 09 fällt“). Damit wird der Erzeuger von Abfällen besonders in die Pflicht genommen: für gefährliche Abfälle verweist die AVV auf das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG). Das KrWG wiederum verpflichtet Erzeuger, Händler und Entsorger zu besonderer Sorgfalt und legt damit ein engmaschiges Kontrollnetz. Dabei wird insbesondere nach Recycling- und Deponierungsabfällen unterschieden: für Stoffe, die wieder im Stoffkreislauf zugeführt werden, gelten weniger scharfe Regelungen bezüglich Transport und Verkauf [17].

Weiterhin fällt auf, dass aufgrund der Tatsache, dass die Nachweispflicht beim Unternehmen selbst liegt, verschiedene Gießereien Stäube aus ähnlichen Quellen unterschiedlich deklarieren, was sich auch auf die Entsorgungswege auswirkt. Dies stellt eine Hürde für die Entwicklung eines einheitlichen Recyclingsystems für möglichst viele Gießereistäube dar und fordert hohe Bandbreiten für einsetzbare Rohstoffe. Das wirkt sich so auch direkt auf das Forschungsdesign aus. Methoden die auf bestimmte Eigenschaften, z.B. definierte Zusammensetzungen von Stäuben beschränkt sind, eignen sich weniger gut für eine industrielle Umsetzung. Der hohe Durchsatz mit variierenden Rohstoffen und damit auch heterogenen Stäuben in der Gießerei-Industrie muss durch eine entsprechende Flexibilität in der stofflichen Verwertung berücksichtigt werden.

Die Deklaration gemäß AVV allein hat noch keinen Einfluss auf den Entsorgungs- oder eventuellen Verkaufsweg. Hier müssen zusätzlich KrWG und die Deponieverordnung (DepV) berücksichtigt werden, welche im Folgenden knapp vorgestellt werden.

2.2.4 Deponierung und Entsorgung

Deponien machen in Europa den größten Teil der Abfallverbringung aus. Laut Definition ist eine Deponie jede Stelle, an der kontrolliert Abfälle abgelagert werden, wobei sich einzelne Deponien grundsätzlich gravierend unterscheiden in Bezug auf Höhe, Fläche und Absicherung nach außen [23].

In Deutschland werden Deponien in fünf verschiedene Deponieklassen (DK) eingeteilt (§ 2 DepV). **Tabelle 1** fasst die DK und deren Charakterisierungen zusammen.

Tabelle 1: Einordnungen und Beschreibungen der fünf Deponieklassen.

Deponieklasse (DK)	Beschreibung
0	Deponien für Inertabfälle, die oberirdisch liegen und eine geologische Absicherung nach unten haben (§2 Abs. 6 DepV)
I	„Deponien für ehemaligen Hausmüll, Klärschlamm etc., die noch keine Kombinationsdichtung ¹ aufweisen“ [24].
II	„Deponien für ehemaligen Hausmüll, Klärschlamm, heutige Reststoffe etc., die bereits eine Kombinationsabdichtung aufweisen“ [24]. Hierunter fallen Gießereistäube mit sehr geringer Schadstoffbelastung.
III	Oberirdische Verbringung von gefährlichen Abfällen aus der Industrie. Stäube werden teilweise schon hier deponiert, wenn kein besonders Gefahrenpotential von ihnen zu erwarten ist.
IV	Untertagedeponie von gefährlichen, industriellen Abfällen. Sie sind die am besten abgesicherten, damit aber auch teuersten Deponierungsarten. Es gibt weniger als 10 DKIV-Deponien in Deutschland [23].

¹ dreilagige, mindestens 75 cm dicke, mineralische Dichtung aus verdichtetem Lehm oder Ton etc. und einer unmittelbar darauf verlegten Kunststoffdichtungsbahn aus hoch verdichtetem Polyethylen (PEHD), alternativ auch aus drei Lagen Asphaltbeton

Weiterhin ist unter bestimmten Voraussetzungen eine Entsorgung durch Bergversatz möglich [25]. Die grundsätzliche Idee hinter dem Versatz in Bergwerken ist das Auffüllen der Hohlräume, die Bergbau (häufig von Kohle, teilweise auch von anderen Abbaustoffen) hinterlassen hat, um die Stabilität der Abbaustätten weiterhin gewährleisten zu können. Diese Stützwirkung kann mit verschiedensten Abfällen ermöglicht werden, wichtig dabei ist, dass der Rohstoff optimale Eigenschaften für eine langfristige Sicherung des Stollens bietet.

Es gibt entsprechend den Deponieklassen eigene Versatzklassen (VK), die das Verbringen in Bergwerke reglementieren. So ist VK0 analog zu DK0 nur unproblematischen Stoffen zugeordnet [26]. Prinzipiell ist es in Bayern – unabhängig von der VK – derzeit nicht mehr zulässig Abfälle unter Tage zu verbringen.

Unabhängig von der Einstufung in verschiedene DK stellt eine grundsätzliche Knappheit an Deponien in Deutschland ein Problem bei der Entsorgung von Gießereistäuben dar. Zählte man im Jahr 2005 noch 1.948 Deponien, kam man 2019 nur noch auf 1.027 [27].

Nicht zuletzt aufgrund einer veränderten Gesetzeslage, sondern auch aufgrund der geringen Datensicherheit, die Planungen erschwert, ist die Deponierung kein Konzept, das eine dauerhafte Abnahmesicherheit für Gießereistäube gewährleisten kann [28].

2.3 Der Werkstoff Gusseisen

Gusseisen gilt als eines der wichtigsten Werkstoffe in der Gießerei-Industrie. Als Eisenwerkstoff zeichnet sich Gusseisen mit einem Kohlenstoffgehalt von mindestens 2,06 % aus [29]. Es handelt sich damit um eine Fe-C-Legierung. Die Bezeichnung des Werkstoffes ist auf die Art der Herstellung zurückzuführen, da das Gusseisen in Form gegossen wird. Im Vergleich zu Stahl ist Gusseisen hart und spröde, was auf den Kohlenstoffanteil zurückgeführt werden kann. Durch seinen geringen Schmelzpunkt kann Gusseisen nicht geschmiedet, sondern lediglich gegossen werden. Silizium trägt dazu bei die Gießbarkeit zu verbessern [30].

Allgemein wird Gusseisen durch die Erstarrungsformen des Kohlenstoffs unterschieden. Kohlenstoff, der als Zementit (Fe_3C) ausgeschieden wird, verleiht dem Bruchgefüge ein helles metallisches Aussehen. Aus diesem Grund wird der Werkstoff auch weißes Gusseisen genannt. Es entsteht über ein karbidstabilisierendes Element, wie Mangan, wodurch eine Ausscheidung des Kohlenstoffs in chemisch gebundener Form als Carbide stattfindet. Die Fe_3C -Phasen sind hart und spröde, wodurch weißes Gusseisen zwar eine hohe Verschleißbeständigkeit, aber auch eine hohe Sprödebruchanfälligkeit besitzt. Daraus resultierten ein geringes Anwendungspotenzial und eine geringe technische Bedeutung als Werkstoff [29].

Graues Gusseisen wird durch abgeschiedenes Graphit grau eingefärbt. Dieses kann wiederum durch die Form als Gusseisen mit Lamellengraphit (GJL), Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS) und Gusseisen mit Vermiculargraphit (GJV) klassifiziert werden. Die Gefügeausbildung wird maßgeblich von den Abkühlbedingungen bestimmt.

2.3.1 Gusseisen mit Lamellengraphit – GJL

Die Bezeichnung GJL (G= Gusswerkstoff, J= Eisen, L= Lamellar) steht nach der DIN EN 1560 für Gusseisen mit lamellenförmigem Graphit. In einer weiteren Norm, der DIN EN 1561 (Gießereiwesen – Gusseisen und Lamellengraphit) werden die kennzeichnenden Eigenschaften des GJL genormt. Die metallische Matrix von GJL besteht aus Ferrit, Perlit oder beiden Mischkristallen. Dabei besitzt das perlitische Grundgefüge jedoch eine höhere Zugfestigkeit [29, 31]. Nach dem Eisen-Kohlenstoff-Diagramm (siehe Kapitel 2.3.4) erstarrt Gusseisen mit Lamellengraphit nach dem stabilen Fe-C-System. Demnach liegt der Kohlenstoff nicht mit dem Eisen gebunden als Zementit, sondern als Graphit vor. Durch eine hexagonale Kristallisation der Graphitphase, bildet diese dünne und unregelmäßige Lamellen aus. Diese sind weich und schwächen den tragenden Querschnitt. An den Graphitlamellen treten zudem Spannungsspitzen auf. Diese Eigenschaften der Lamellen führen zu einer hohen Kerbempfindlichkeit und geringen Zugfestigkeit der GJL-Werkstoffe [32]. Allerdings ermöglichen die Lamellen die Möglichkeit Schwingungsenergie zu absorbieren, so dass sich der Werkstoff durch ein gutes Dämpfungsverhalten auszeichnet. Weiterhin ist GJL durch eine hohe Sprödigkeit charakterisiert. Die unterschiedlichen Eigenschaften entstehen durch dreidimensionale Verästelungen der Lamellen [30, 32].

2.3.2 Gusseisen mit Kugelgraphit – GJS

GJS (G= Gusswerkstoff, J= Eisen, S= Kugelig) bezeichnet den Werkstoff Gusseisen mit kugelförmigem Graphit. Durch Zugabe von Magnesium wird eine sphärolithische Ausbildung des Graphits erreicht, welches dann in kugelförmiger Form vorliegt [33]. Dies wird als Modularisierungsbehandlung bezeichnet. Grundsätzlich können auch Elemente wie Cer oder Calcium für die sphärolithische Ausbildung des Graphits eingesetzt werden. Durch die Zugabe einer geringen Menge dieser Elemente wird die Schmelze entschwefelt. Der Hauptgrund für die Verwendung von Magnesium ist ein günstiger Preis. Bei der Magnesiumbehandlung werden der Schmelze magnesiumhaltige Vorlegierungen zugegeben. Die DIN EN 1563 (Gießereiwesen-Gusseisen mit Kugelgraphit) und DIN EN 1564 (Gießereiwesen – Ausferritisches Gusseisen mit Kugelgraphit) normen Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS) [34]. Im Fall von GJS unterscheidet man zwischen einem ferritischen-perlitischen, mischkristallverfestigtem ferritischem oder ausferritischem Grundgefüge [29]. Durch die sphärolithische Ausbildung des Graphits wird die Kerbempfindlichkeit im

Vergleich zum Grauguss (GJL) deutlich heruntergesetzt [33]. Gusseisen mit Kugelgraphit gehört zu den duktilen Gusseisenwerkstoffen, hat eine gute Festigkeit und Zähigkeit (vergleichbar mit Stahl) sowie eine gute Zugfestigkeit (ähnlich wie Bau- oder Vergütungsstähle). Die mechanischen Eigenschaften sind folglich besser als die des GJL [30].

2.3.3 Gusseisen mit Vermiculargraphit – GJV

Die Bezeichnung GJV (G= Gusswerkstoff, J= Eisen, V= Vermicular) steht für Gusseisen mit Vermiculargraphit. Diese Form des Gusseisens erstarrt nach dem stabilen Fe-C-System und der Graphit liegt in vermicularer Form. Ähnlich wie bei der Produktion von GJS findet eine Modularisierung statt. Wird so wenig eines kugelgraphitbildendes Zusatzes hinzugegeben, dass sich kein GJS ausbilden kann, tritt Vermiculargraphit auf. Die vermiculare Form entspricht einer Zwischenstufe zwischen lamellarer und kugeligem Graphit, was sich auch in den Eigenschaften widerspiegelt. GJV besitzt, wie auch GJS, eine deutlich bessere Festigkeit als GJL. Dies wirkt sich jedoch negativ auf die Dämpfungseigenschaften aus, wobei diese bei GJV besser als bei GJS sind. Deutlich besser sind die Eigenschaften des GJV in Abhängigkeit von der Temperatur, wie Temperaturleitfähigkeit, -beständigkeit und Gießbarkeit. Das metallische Grundgefüge von GJV kann ferritisch, perlitisch oder eine Kombination beider darstellen [32].

2.3.4 Eisen-Kohlenstoff-Diagramm (EKD)

Die verschiedenen Phasen, die sich abhängig von Temperatur und Kohlenstoff-Gehalt bilden können, werden durch das binäre Eisen-Kohlenstoff-Diagramm abgebildet. Abhängig von der Ausscheidungsform des Kohlenstoffs wird zwischen dem stabilen und metastabilen System differenziert (siehe **Abbildung 6**). Im stabilen Fe-C-System liegt elementarer Kohlenstoff in Form von Graphit vor. Im metastabilen Fe-Fe₃C-System kommt der Kohlenstoff in gebundener Form vor. Der Druck wird als konstant bei Normaldruck angenommen [29, 35].

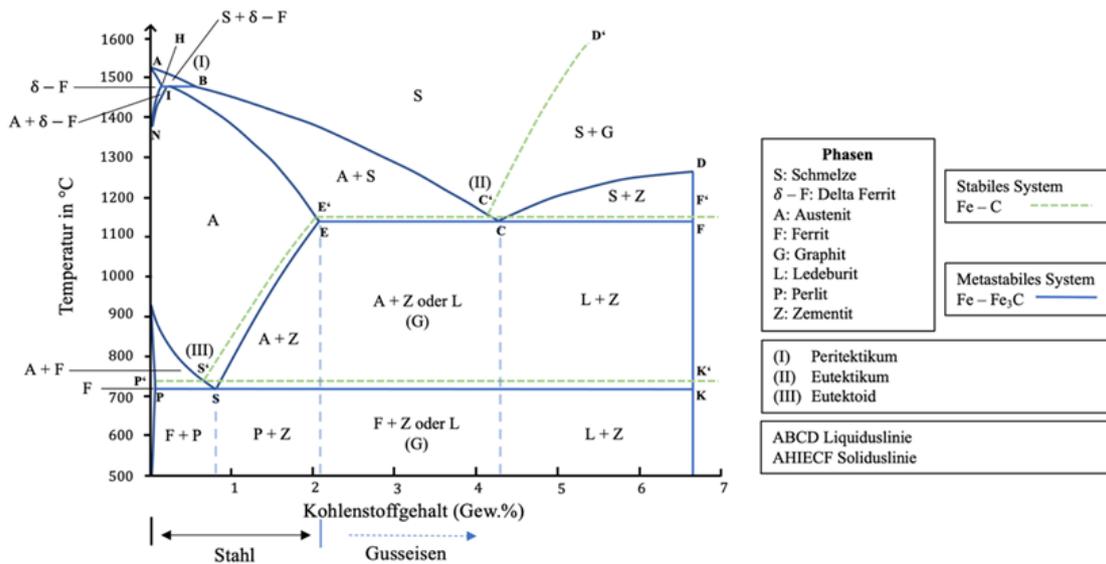


Abbildung 6: Eisen-Kohlenstoff-Diagramm (eigene Darstellung in Anlehnung an [29, 35]).

Von besonderem Interesse ist der eutektische Punkt C, welcher zum Gießen von Grauguss verwendet wird. Die Schmelztemperatur der eutektischen Legierung liegt deutlich unter den Schmelzpunkten der Einzelkomponenten, was vorteilhaft für den Gussprozess ist. Wird eine Schmelze mit eutektischer Zusammensetzung auf die eutektische Temperatur abgekühlt, dann bilden sich eine große Zahl von Keimen. Die daraus gewachsenen Kristalle erreichen nur eine geringe Größe, was zu einem feinen Gefüge führt [32, 36].

Als allotropes Element kommt Eisen im festen Zustand in drei verschiedenen Modifikationen vor. Diese Modifikationen werden α -, γ -, und δ -Eisen genannt. Aus den unterschiedlichen Gitterparametern folgen unterschiedliche Löslichkeiten für Kohlenstoff, welches als Einlagerungselement in die Gitterlücken der Eisenkristalle aufgenommen wird. Den Eisen-Kohlenstoff-Mischkristallen (Fe-C-MK) kommt eine hohe technische Relevanz zu, weshalb diese benannt wurden. Ferrit bezeichnet den α -MK, Austenit den γ -MK und δ -Ferrit den δ -MK (siehe) [30, 34].

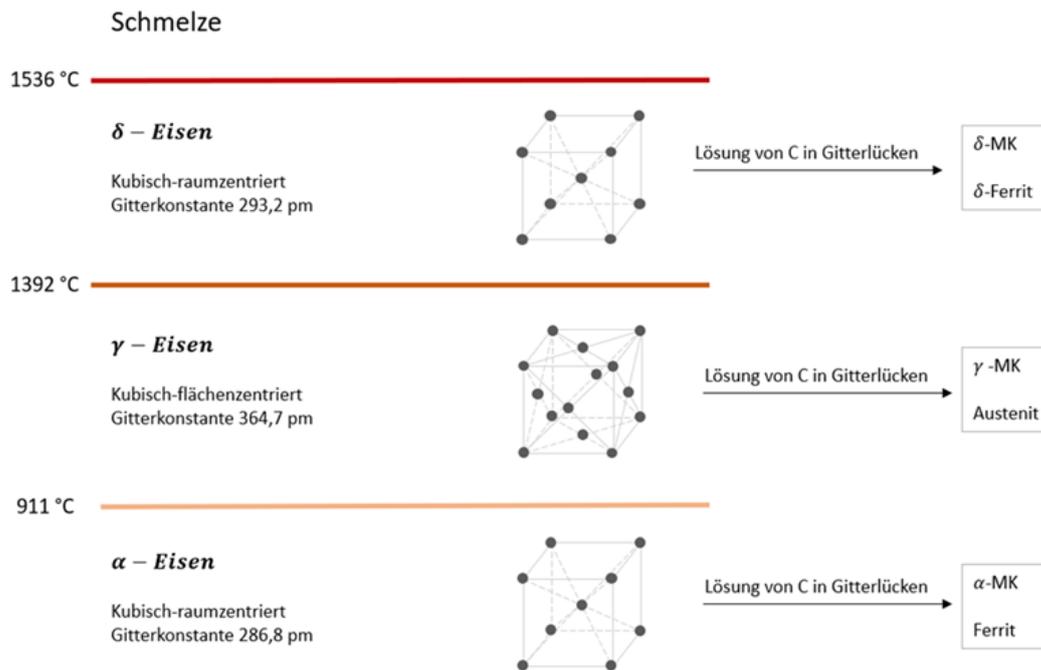


Abbildung 7: Allotrope Modifikationen von Eisen sowie daraus resultierende Mischkristalle mit Temperaturangabe [30, 37].

Im EKD können die Phasen entnommen werden, welche sich im thermodynamischen Gleichgewicht bei gewissen Randbedingungen bilden. Da daraus keine Aussagen über die räumliche Anordnung oder Gestalt der Phasen abgeleitet werden können, werden die Faktoren hinsichtlich der Morphologie unter einem anderen Terminus, dem Gefüge, behandelt. Die Phasen sind dabei die Gefügebausteine und aus freigewachsenen Kristallen aufgebaut, welche als Körner bezeichnet werden und dementsprechend wiederum die Phasenbausteine darstellen. Die Körner sind über Korngrenzen miteinander verbunden und enthalten Fehlernordnungen. Diese Fehlernordnungen stellen Abweichungen der idealen Struktur dar und können ein- bis dreidimensional sein. Das Gefüge von grauen Gusseisenwerkstoffen besteht aus einem metallischen Grundgefüge (auch Matrix genannt) und den Graphitphasen, welche in das Grundgefüge eingelagert sind [30, 38].

2.4 Impfung und Impfmittel

Die Ausbildung von Graphit in grauem Gusseisen ist für die mechanischen Eigenschaften von höchster Bedeutung. Damit kommen der Größe, Verteilung und Morphologie des ausgeschiedenen Graphits hohe Stellenwerte zu. Auch bei gleicher Menge an Graphit kann es hierbei zu deutlichen Abweichungen kommen [39]. Bei Gusseisen ist die homogene Bildung von Keimen aus thermodynamischen Gründen gehemmt [40]. Durch den Einsatz von Impfmitteln sollen Kristallisationskeime für die heterogene Keimbildung erzeugt werden, damit die Ausscheidung von Graphit begünstigt und die Ausbildung einer erhöhten Anzahl von kleineren eutektischen

Metallzellen erreicht werden kann. Es wird eine feinere Gefügestruktur angestrebt [40].

Ein weiterer Zweck der Impfung von Gusseisenschmelzen liegt in der Verhinderung von Weißeinstrahlung [30]. Unter der Weißeinstrahlung versteht man einen Gussfehler, bei welchem sich gewisse Bereiche des Gussprodukts, meist dessen Kanten oder Ecken, durch eine erhöhte Härte im Vergleich zu den restlichen Bereichen auszeichnen. Die Härte ist auf die Ausscheidung von Carbiden anstelle von Graphit zurückzuführen. Die Bildung von Carbiden kann durch die, im praktischen Bereich vorkommende, Unterkühlung der Schmelze auftreten. Bei einer zu hohen Unterkühlung im Erstarrungsprozess wird die Ausscheidung von Zementit begünstigt, welches das Material hart und spröde werden lässt. Durch den Impfmittleinsatz soll die Unterkühlung unter die metastabile eutektische Temperatur verhindert werden [41]. Auch die Auflösung von SiC kann in diesem Sinne verwendet werden und damit die eutektische Gleichgewichtstemperatur reduzieren [42-44].

Bei der Impfung einer Gusseisenschmelze werden grundsätzlich vier verschiedenen Verfahrenstypen unterschieden. Diese können darüber hinaus auch miteinander kombiniert werden. Die Verfahren sind die Vor- oder Zwischenimpfung, Pfannenimpfung, Gießstrahlimpfung und Formimpfung (siehe **Abbildung 8**).

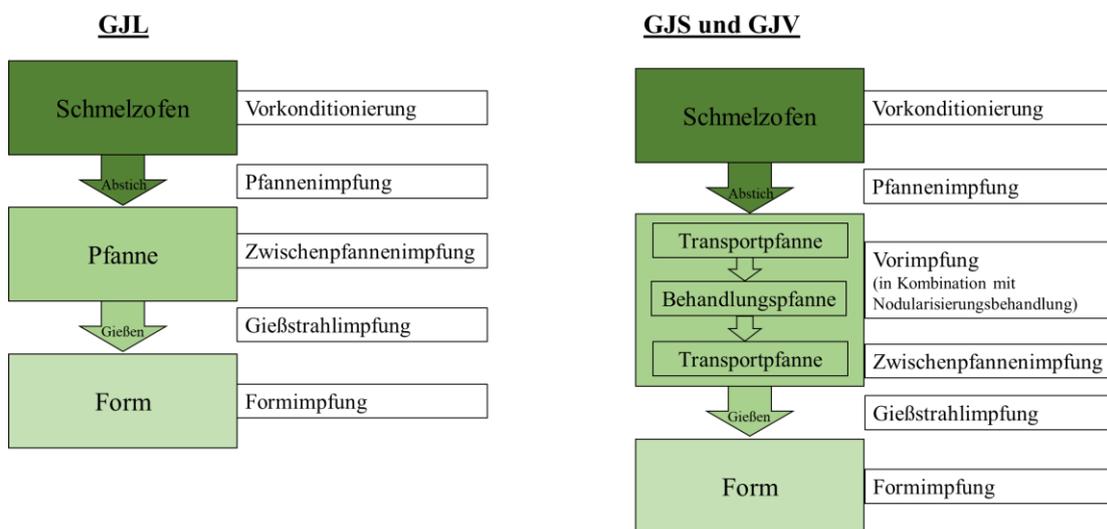


Abbildung 8: Einteilung der Impfmethode.

Die Impfung als wesentlicher Bestandteil des Gießereiprozesses und die Zusammensetzung des Impfmittels bilden einen wichtigen Baustein für die in Kapitel 6.3 beschriebene Verwertungsmethode der SiC-Gießereistaub-Formlinge.

3. Der Begriff der Nachhaltigkeit

Wie bereits in Kapitel 1.3 und 1.4 beschrieben, ist die Nachhaltigkeit ein Grundpfeiler, auf dem das Projekt und der gesamte ForCYCLE II Verbund steht. Kaum ein anderer Begriff ist heutzutage so omnipräsent, wie der der Nachhaltigkeit. Unternehmen wollen nachhaltiger produzieren, Staaten wollen nachhaltiger wirtschaften und Bürger nachhaltiger leben. Um der Bedeutung des Begriffs im Forschungsprojekt gerecht zu werden, soll im Folgenden ein Überblick über die Thematik geschaffen und Nachhaltigkeit im Kontext der Gießerei-Industrie diskutiert werden.

Der Begriff der Nachhaltigkeit hat das Ende des 20. und Anfang des 21. Jh. maßgeblich geprägt und ist heute aktueller denn je. Erstmals von Hans Carl von Carlowitz verwendet, welcher in seinem Werk „*Sylvicultura Oeconomica*“ den Begriff so definiert, dass man der Natur nur so viel entnehmen sollte wie im gleichen Zeitraum wieder nachgebildet wird [45], wird der Begriff heute gemäß des Brundtland-Berichts als ein Zusammenspiel der drei Bereiche Ökologie, Ökonomie und Gesellschaft betrachtet, welche sich in der industriellen Produktion als unternehmerisches Handeln gemäß der sozialen Verantwortung, wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit und Schutz der Umwelt widerspiegeln sollte. Ein zentrales Thema der heutigen Gesellschaft ist der Klimawandel und die damit verbundenen Herausforderungen an Industrie und Gesellschaft zum Klimaschutz. Im Zuge des Kyoto-Protokolls haben sich die teilnehmenden Industrieländer 1997 auf ein völkerrechtlich verbindliches Abkommen zum Schutz des Klimas geeinigt. Die Ziele zur Treibhausgasreduktion führten zu einem Paradigmenwechsel im Umweltschutz und zu zahlreichen Produkt- und Prozessinnovationen. Eine nachhaltige Entwicklung impliziert einen verantwortungsvollen Umgang mit Ressourcen. Die Verfügbarkeit von Rohstoffen und Energie ist eine grundlegende Voraussetzung zur Wettbewerbsfähigkeit. Die Entwicklung von Strategien zur Ressourcensicherung stellt sowohl Wirtschaft als auch Wissenschaft vor eine große Herausforderung [46].

3.1 Historische Entwicklung des Umweltschutzes

Seit den 60er Jahren des 19. Jh. treibt der verbesserte Wissensstand, hinsichtlich möglicher Gefahrenpotentiale, eine vermehrte Auseinandersetzung mit der Umwelt- und Sicherheitsthematik voran [47]. Allerdings beschränkte sich der Umweltschutz lange Zeit auf den Produktionsprozess. Der Additive Umweltschutz konzentrierte sich auf den Schutz von Wasser, Luft und Boden vor den durch den Produktionsprozess generierten Emissionen. Erst durch steigende Rohstoff- und Energiepreise wechselte der Fokus auf ressourcenschonende Produktionsprozesse. In den 90er Jahren wurden die Systemgrenzen des produktionsorientierten Ansatzes über den Produktionsprozess hinweg weiter ausgeweitet. Das heute verbreitete Konzept der Kreislaufwirtschaft betrachtet den gesamten Produktlebenszyklus, von der

Entwicklung über die Herstellung und die Verwendung bis hin zum Recycling oder der Entsorgung des Produktes. In Anbetracht einer nachhaltigen Entwicklung unter Einbezug der ökonomischen, ökologischen sowie sozialen Faktoren steht die Industrie vor einem weiteren Paradigmenwechsel hin zu nachhaltigen Prozessen und Produkten. Im Zuge der voranschreitenden Digitalisierung werden in Zukunft vermehrt branchenübergreifend gesamte Prozessketten und Netzwerke betrachtet [46, 47]. **Abbildung 9** bietet einen zeitlichen Überblick über die Entwicklung des Umweltschutzes in der Industrie.

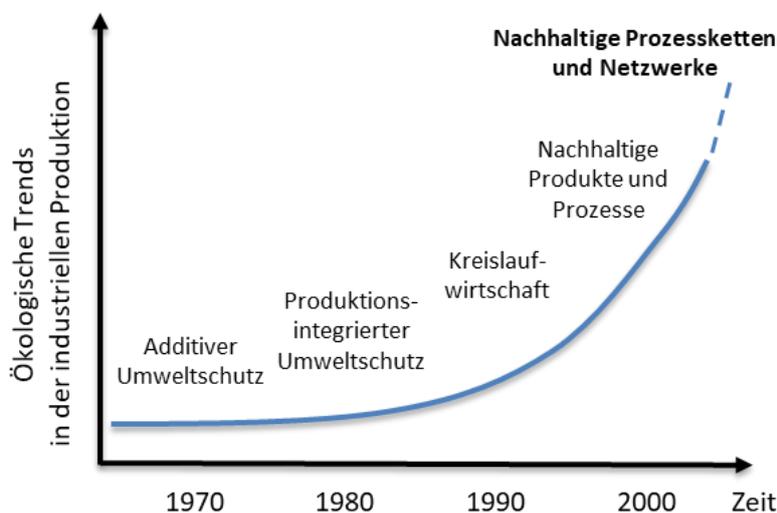


Abbildung 9: Entwicklung des Umweltschutzes in der Industrie (Eigene Darstellung und Erweiterung in Anlehnung an [46]).

3.2 Definition und Anwendung von Nachhaltigkeit

Der „moderne“ Begriff der Nachhaltigkeit wurde durch die Weltkommission für Umwelt und Entwicklung der Vereinten Nationen geprägt. Die Brundtland-Kommission erarbeitete 1987 den Zukunftsbericht „Our Common Future“ in dem eine Entwicklung dann als dauerhaft oder zukunftsfähig angesehen wird, wenn diese den Bedürfnissen der heutigen Generationen gerecht wird, ohne den künftigen Generationen das Potential zur Befriedigung ihrer Bedürfnisse und der Wahl ihres Lebensstils zu verwehren. Demnach ist eine nachhaltige Entwicklung darauf bedacht, die Gesamtleistungsfähigkeit der natürlichen Lebensgrundlage zu erhalten und somit vor allem die menschlichen Grundbedürfnisse nach Nahrung, Wasser und Hygiene der künftigen Generationen zu befriedigen [48]. Diese anthropozentrische Herangehensweise verbindet einen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Fortschritt, welche sowohl ökologischen als auch ökonomischen und sozialen Kriterien zur Erhaltung der menschlichen Existenzgrundlage gerecht wird [47, 49, 50].

Aus diesen Grundbedingungen ergeben sich die drei ineinandergreifenden Bereiche der nachhaltigen Entwicklung, die in der folgenden **Abbildung 10** dargestellt sind.



Abbildung 10: Säulenmodell der nachhaltigen Entwicklung (Eigene Darstellung in Anlehnung an [51]).

Unter den ökonomischen Bedingungen wird generell das ressourceneffiziente Schaffen von Werten zur Verbesserung der allgemeinen Lebensqualität verstanden. Die sozialen Grundbedingungen orientieren sich stark an humanitären Werten wie Chancengleichheit, gesellschaftlichem Zusammenhalt oder der Förderung demokratischer Institutionen. Die ökologische Bedingung zur nachhaltigen Entwicklung beschäftigt sich mit der Berücksichtigung der Tragfähigkeit der Ökosphäre (siehe Kapitel 3.5) im Hinblick auf die Verwendung natürlicher Ressourcen sowie die Verursachung von Emissionen. Je nach Gewichtung der drei Grundpfeiler werden im Allgemeinen zwei Modelle unterschieden: schwache und starke Nachhaltigkeit. Die schwache Nachhaltigkeit impliziert eine Substituierbarkeit zwischen den drei Säulen untereinander und lässt damit mehr Flexibilität zu. Ein übermäßiger Abbau von natürlichen Ressourcen kann demnach immer noch in einer nachhaltigen Entwicklung resultieren, sofern das Resultat durch ein steigendes Kapital kompensiert wird. Im Zentrum steht die Sicherstellung des Gesamtwohlstandes. In der starken Nachhaltigkeit bildet die Aufrechterhaltung der ökologischen Säule die Grundvoraussetzung einer nachhaltigen Entwicklung. Substitutionen können nur zwischen der sozialen und der ökonomischen Säule stattfinden. Hier findet sich der ökozentrische Grundgedanke von Hans Carl von Carlowitz wieder demnach erneuerbare Ressourcen nur in dem Maße genutzt werden

dürfen, in dem sie sich regenerieren. Neben diesen beiden extremen Ansichten existieren auch Mischformen beider Standpunkte, die in die Kategorie der ausgewogenen Nachhaltigkeit fallen [47, 50-53].

Um den Erhalt der Umwelt als Lebensgrundlage, Ressourcenquelle und Absorptionsmedium von Emissionen zu gewährleisten, gelten folgende Kriterien für eine nachhaltige Entwicklung: Die Stabilität erneuerbarer Ressourcen kann nur dann gesichert werden, wenn deren Verbrauchsrate geringer als die Regenerationsrate bleibt. Bei nicht erneuerbaren Ressourcen ist darauf zu achten, dass höchstens so viel abgebaut wird, wie in derselben Zeit kompensiert werden kann. Des Weiteren dürfen verursachte Emissionen die Belastungsschwelle des Gesamtsystems nicht überschreiten. Hierbei gilt es auch langfristige Kombinationswirkungen sowie Akkumulations- und Abbauprozesse in die Betrachtung miteinzubeziehen. Außerdem soll sich das Ausmaß der Veränderung von Ökosystemen unbedingt an deren Fähigkeit zur Anpassung an die gegebenen Umstände orientieren. Großräumige und langfristige Gefährdungen sind generell zu vermeiden [47]. Die zur Erreichung dieser Vorgaben verwendeten Instrumente sind so zu wählen, dass ökonomische, ökologische, sowie soziale Anforderungen gleichermaßen berücksichtigt werden. Die vorgegebenen Ziele müssen so definiert werden, dass eine realistische Erreichung in einem internationalen Rahmen in den angesetzten Fristen möglich ist, ohne die Leistungs- und Aufnahmefähigkeit des Systems zu überfordern. Der Aufwand zur Erreichung der Ziele muss in einem wirtschaftlich, technisch, ökologisch und sozial vertretbaren Rahmen gehalten werden. Die Möglichkeit der Überarbeitung und Anpassung der Maßnahmen und Instrumente an veränderte Bedingungen muss gegeben sein. Außerdem dürfen die Zielsetzungen die internationale Wettbewerbsneutralität nicht beeinträchtigen und müssen gesellschaftlich-kulturellen Ansprüchen und Normen gerecht werden [50].

Die Vereinten Nationen (UN) formulierten politische Zielsetzungen, welche in Form von 17 Zielen, den „Sustainable Development Goals (SDGs)“, das weltweite Streben sowie die Sicherung einer nachhaltigen Entwicklung fördern und sichern sollen. Diese 17 Ziele traten am 1. Januar 2016 in Kraft und sind mit einer Laufzeit bis 2030 datiert [54]. Zu den Zielen gehören unter anderem Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels und seiner Auswirkungen zu ergreifen sowie Landökosysteme zu schützen und ihre nachhaltige Nutzung zu fördern. Für beides spielt der effiziente Einsatz von Ressourcen eine entscheidende Rolle. Alle 17 Ziele sind in **Abbildung 11** gegeben.

ZIELE FÜR NACHHALTIGE ENTWICKLUNG



Abbildung 11: 17 Ziele der Vereinten Nationen für eine nachhaltige Entwicklung [55].

Mit der „Agenda 2030“ werden in Deutschland die von der UN vorgegebenen Ziele in einer deutschen Nachhaltigkeitsstrategie festgehalten. Erstmals 2002 erstellt, wurde die nationale Nachhaltigkeitsstrategie 2016 an die 17 Ziele der UN adaptiert [56]. Um den Erfolg in der Zielerreichung zu quantifizieren, nutzt die BRD 66 Indikatoren (siehe Kapitel 5.1.2), welche sich auf Bereiche der jeweils betrachteten SDGs beziehen. Ein Beispiel hierfür ist in **Abbildung 12** gegeben.

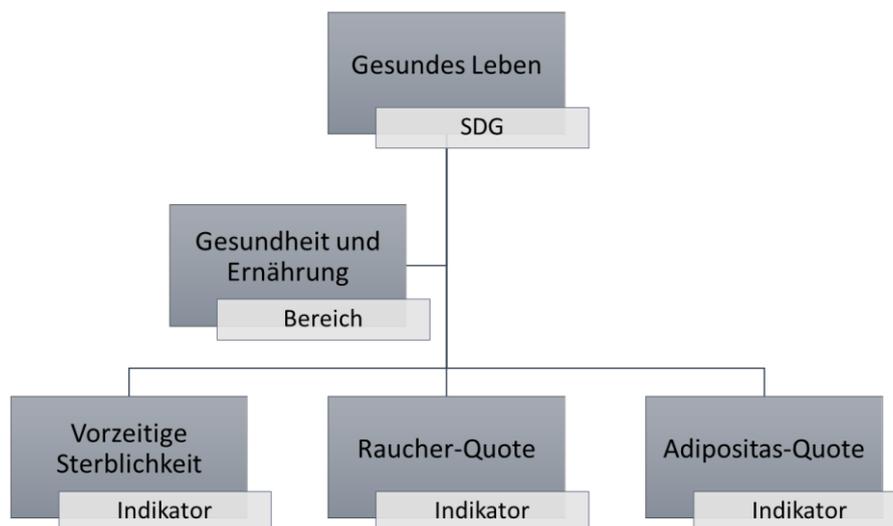


Abbildung 12: Beispiel für Indikatoren Auswahl zur Erfolgskontrolle der Nachhaltigkeitsziele der BRD (Eigene Darstellung) [56].

Die Bundesregierung sieht in der Ressourceneffizienz eine Möglichkeit, um ökonomische und ökologische Ziele zu erreichen. Zu diesem Zweck wurde 2012 das

Deutsche Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess) entwickelt, welches 2020 in seiner zweiten Verlängerung (ProgRess III) vom Bundeskabinett verabschiedet wurde. Gegenstand des Programms ist es, Maßnahmen die einer Steigerung der Ressourceneffizienz entlang der Wertschöpfungskette zu dienen darzulegen und aktuelle Herausforderungen aufzugreifen. Seit ProgRess III wird der Ressourceneffizienz explizit eine Schlüsselrolle in der Erreichung der Klimaschutzziele zugesprochen [57].

3.3 Kritische Betrachtungen

3.3.1 Probleme des Säulenmodells

Das grundlegende Problem bei der staatlichen Implementierung von Nachhaltigkeit nach **Abbildung 10** liegt weniger an fehlendem Knowhow, sondern an der Schwierigkeit soziale, ökologische und ökonomische Interessen, besonders bei Zielkonflikten zwischen Umwelt und Wirtschaft auszubalancieren, wenn man sich auf ein Wirtschaftsmodell bezieht, welches stetigen Wachstum zum Ziel hat. Auch wenn die Existenz planetarer Belastungsgrenzen in vielen Instanzen von Regierungen angekommen sind, so wird mit dem Säulenmodell oft an einer Metaphorik festgehalten, welche nicht beachtet, dass Ressourcen und Senken begrenzt sind. Eine Definition, die sich an den realen Umständen der physischen Welt orientiert, sollte danach ein Wirtschaften sein, welches sich an der Erfüllung sozialer Bedürfnisse orientiert und dabei keine der planetaren Grenzen überschreitet [58]. Damit wird ein Konzept, das auf der Basis von starker Nachhaltigkeit baut, aufgestellt. Eine Modellvorstellung hierfür ist in **Abbildung 13** zu sehen.

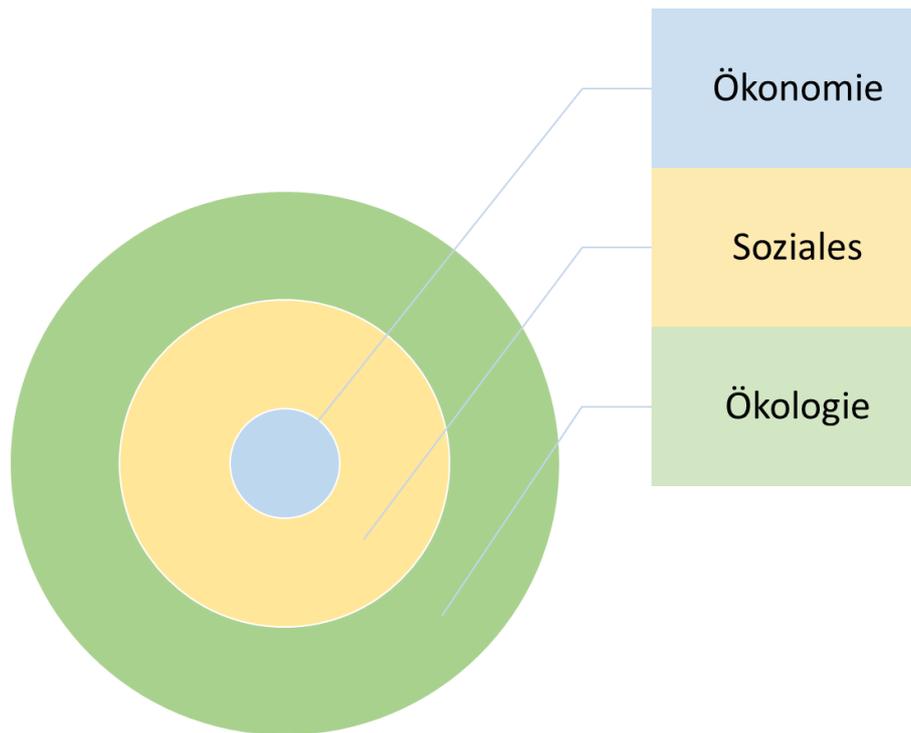


Abbildung 13: Modellvorstellung der Nachhaltigkeit als Wirtschaften unter Berücksichtigung der sozialen Bedürfnisse innerhalb der planetaren Grenzen (eigene Darstellung in Anlehnung an [58]).

Ein an diese Rahmenbedingungen angepasstes Modell wurde 2012 von Kate Raworth vorgestellt [59]. In ihrer „Donut-Ökonomie“ zeichnet sich eine nachhaltige Entwicklung dadurch aus, dass alle Menschen Zugang zu den Ressourcen haben, welche gebraucht werden, um den Anforderungen von sozialen Bedürfnissen gerecht zu werden (z.B. Nahrung, Gesundheit, Bildung) ohne planetare Belastungsgrenzen zu überschreiten. Der ökonomische Handlungsspielraum ist durch die Grenzen gegeben. Amsterdam gilt als erste Stadt, die seit 2020 versucht die Donut-Ökonomie als Entscheidungsgrundlage für die Entwicklung heranzuziehen. Die Vizebürgermeisterin der Stadt, Marieke van Doorninck, sieht das Modell als Chance für Innovationen: „The doughnut does not bring us the answers but a way of looking at it, so that we don’t keep on going on in the same structures as we used to“ [60].

3.3.2 Anforderungen der Kreislaufwirtschaft

Durch das Konzept der Kreislaufwirtschaft ergeben sich offensichtliche Vorteile. Durch Wiederverwendung sowie Abfallvermeidung ergeben sich beispielsweise Kosteneinsparungen und eine Reduktion von Treibhausgasemissionen. Idealerweise werden Produkte innovativer und langlebiger gestaltet, wodurch Kosten bei Produzenten und Verbrauchern sinken und möglicherweise auch die Qualität des Produkts steigt. Durch die Wiederverwendung sinkt die Anzahl verwendeter Rohstoffe sowie die Auswirkungen auf die Umwelt und das Klima [8]. Allerdings erfordert ein effizienter Einsatz von Kreislaufwirtschaft einen kompletten Wirtschaftswandel. Zur Umsetzung werden zunehmend mehr Informationen,

Kooperationen und Koordination entlang der gesamten Wertschöpfungskette notwendig. Alle beteiligten Instanzen (z.B. Rohstoffproduzent, Produktdesigner, Konsument und Abfallunternehmen) müssen im Hinblick auf verbesserte Rohstoffgewinnung, Prozessoptimierung und Recyclingquoten zusammenarbeiten [61]. Informationen zur stofflichen Zusammensetzung, Nutzungsweg und Verbleib im Abfallsystem mit Angaben zu Mengen und Qualität von Produkten sowie enthaltenen Rohstoffen müssen über den gesamten Kreislauf erfasst, koordiniert und kommuniziert werden. Zur Erfassung von Stoff- und Informationsflüssen sowie zur Vernetzung von Industrie, Abfallwirtschaft und den Unternehmen wird Implementierung von Software und Technologie zur digitalen Transformation im Sinne der Industrie 4.0 notwendig sein [62]. Neue Konzepte zur Nutzung, Design und die Strategie der Verlängerung von Gebrauch und Lebensdauer können als produktbezogene Aspekte bei der Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft angesehen werden [63].

Für die Kreislaufwirtschaft ist die Ressourcenschonung und Optimierung von Objektflüssen unabdingbar. Eine Vorbereitung zur Wiederverwertung und Recycling sind hier beliebte Methoden. Denn je weniger Ressourcen ihr Lebensende erreichen, desto weniger Abfälle werden produziert. Demnach hätte ein geschlossener Kreislauf aber unabhängig vom Produkt oder Prozess immer eine bessere Umweltbilanz. Wichtig ist, recycelbare Abfälle differenziert zu analysieren. Bei Glasflaschen ist es beispielsweise aus ökologischer Sicht vorteilhafter, das Altglas als Isolationsmaterial zu nutzen und somit die Vermeidung von ölbasierten Materialien zur Isolation voranzutreiben [64]. Aus diesem Grund sollte stets hinterfragt werden, ob Recycling bzw. eine der Re-Phasen sinnvoll für das betrachtete Produkt ist. Neben dem Konzept der Kreislaufwirtschaft ist ebenfalls ein ganzheitliches Konzept zur Bewertung von Kreisläufen notwendig. In Kapitel 4.3.2 wird mit dem Life Cycle Assessment (LCA) die heutzutage gängigste Methode der Bewertung vorgestellt. Die Lebenszyklusanalyse bietet die Möglichkeit einer umfassenden Systemanalyse der mit den Prozessen verbundenen Umweltwirkungen. Zur Durchführung werden entsprechendes Fachwissen sowie Softwarelizenzen benötigt, was für eine Anwendung innerhalb KMUs eine Herausforderung sein kann. Um eine Einstiegshilfe in ein ökologisch nachhaltiges Denken zu bieten, werden in Kapitel 5 und 7.5 Grundlagen und Wege dargestellt, um Umweltwirkungen von Prozessen vergleichend zu quantifizieren.

3.4 Kreislaufwirtschaft und Nachhaltigkeit in Gießereien

In den Gießereiprozessen werden zunehmend Sekundärrohstoffe in Form von Schrott oder Abfallstoffen (z.B. Späne) eingesetzt. Dies führte zu einer Reduzierung des spezifischen Energieverbrauchs und Emissionen pro Tonne Guss [65]. Im Jahr 1980 wurde pro Tonne flüssigem Stahl ein spezifischer Energieverbrauch von 23 GJ/t

benötigt, während vergleichsweise im Jahr 2004 nur noch 18 GJ/t in einem integrierten Hüttenwerk bei einer Prozesstemperatur von etwa 1500 °C verbraucht wurden. In einem Elektrostahlwerk liegt dieser Wert bei 1,8 GJ/t flüssigem Stahl [66]. In Deutschland werden bei der Herstellung von Gusseisen aktuell bereits bis zu 90 % Schrotteinsätze verwendet [65]. **Abbildung 14** zeigt das Prinzip eines Rohstoffkreislaufes in einer Kreislaufwirtschaft für eine Gießerei.

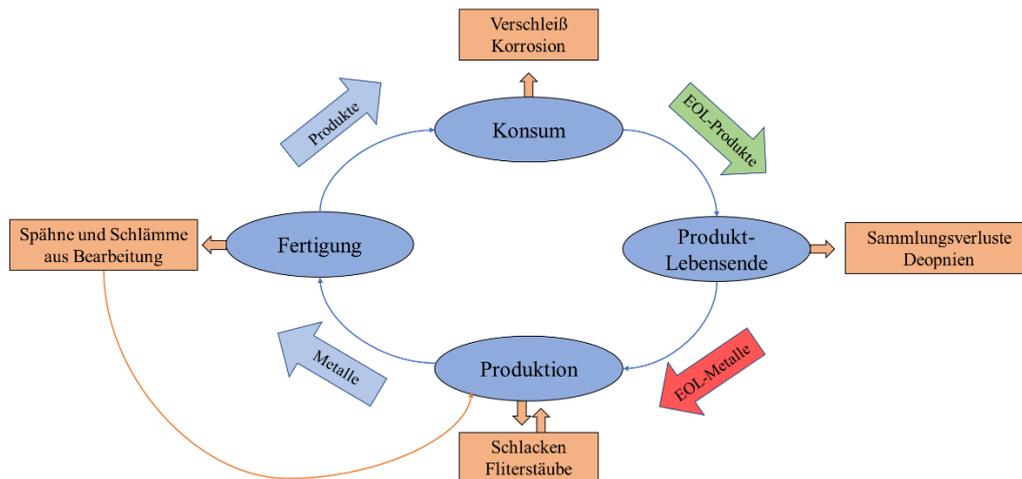


Abbildung 14: Prinzip eines Rohstoffkreislaufes für eine Gießerei (eigene Darstellung in Anlehnung an [67]).

Für deutsche Gießereien ist der internationale Wettbewerb ein erschwerender Faktor. Durch das schnelle Wirtschaftswachstum werden viele Produktionen in andere Teile der Welt ausgelagert, die weniger auf ressourcen- und energieeffiziente Aspekte setzen. Bei der Versorgung mit Primärrohstoffen zur Metallherstellung sind deutsche Gießereien von anderen Ländern sowie deren Export abhängig. Unter Berücksichtigung ökonomischer und ökologischer Aspekte gilt es daher, die Ressourcen die vorhanden sind auch optimal zu verwenden, zu recyceln und wiederzuverwerten.

Putz et al. (2015) stellen zahlreiche Maßnahmen für einen nachhaltigeren Gießereibetrieb vor (siehe Anlage 1). Allgemeine Empfehlungen reichen von der Integration eines Umweltmanagementsystems oder dem Schmelzen von sauberem Schrott bis hin zu spezialisierten Maßnahmen wie dem Sekundärwindbetrieb für Kaltwindkupolöfen oder der Verwendung chemisch gebundener Sandkerne beim Dauerformen.

3.5 Umwelt – Technosphäre und Ökosphäre

Im Zuge von ökologischen Nachhaltigkeitsanalysen durch Berücksichtigung etwaiger Umweltwirkungen, muss auch der Begriff *Umwelt* selbst definiert werden. Als einer der Grundgedanken des in Kapitel 7.5.2 vorgestellten Optimierungsmodells soll im Folgenden der Ansatz einer Betrachtungsweise, die die Umwelt in Technosphäre und

Ökosphäre einteilt, beschrieben werden. Die Technosphäre beschreibt die Gesamtheit der durch die Menschheit vorgebrachten technischen Umgebung. Dieses technische Metasystem ist in die sie umgebende Umwelt, dem globalen ökologischen System, eingebettet und steht in Konkurrenz zu dieser [68]. Der Grund hierfür sind anthropogen verursachte Stoffströme von der Umwelt in die Technosphäre. Diese ermöglichen und erhalten das gesellschaftliche System und gehen von dort zurück in die Umwelt. Die menschliche Gesellschaft nimmt also Stoffe und Energie auf, wandelt diese um und gibt sie anschließend wieder in die Natur ab, analog zu einem biologischen Organismus (siehe **Abbildung 15**). Die Wechselwirkung zwischen Umwelt und gesellschaftlicher Technosphäre lässt sich durch die Übertragung des biologischen Metabolismus-Gedanken auf diesen Zusammenhang beschreiben, also die Gesamtheit aller Prozesse, welche Stoffe und Energie umwandeln sowie diese zu Endprodukten und Abfallstoffen verwandeln. Der größte Unterschied zwischen biologischem Metabolismus und gesellschaftlichen Metabolismus liegt darin, dass die Stoffflüsse des gesellschaftlichen Metabolismus im Gegensatz zum natürlichen nicht geschlossen sind. So werden hochwertige Materialien der Umwelt entnommen und in minderwertigem Zustand als Abfälle wieder an die Umwelt abgegeben [69]. Der Austausch von Material und Energie zwischen gesellschaftlichen Systemen und der Natur wird als „gesellschaftlicher Stoffwechsel“ bezeichnet [70].

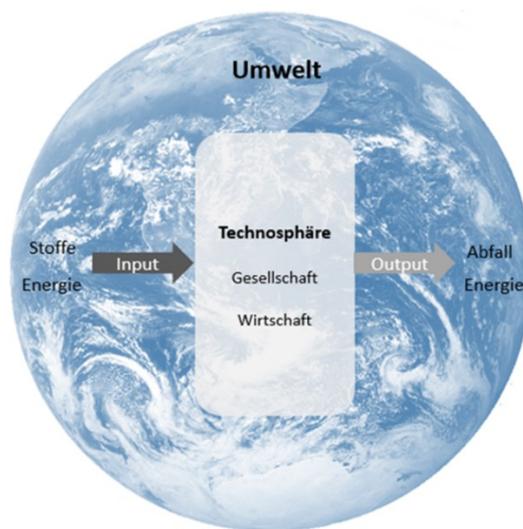


Abbildung 15: Der gesellschaftliche Stoffwechsel (eigene Darstellung in Anlehnung an [70]).

Das Konzept der Technosphäre lässt sich in zahlreiche untergeordnete Einheiten zerlegen, die ihrerseits Input-Ströme erfordern, diese anschließend umwandeln und Output-Ströme generieren.

Die Kooperationsgießereien im Teilprojekt BGMR können als eine Einheit betrachtet werden. Die Granularität ist hierbei beliebig wählbar. So kann sowohl die Gesamtheit der Kooperationsgießereien als auch die einzelne Gießerei oder auch eine

Produktionsmaschine einer einzelnen Gießerei als eine Einheit betrachtet werden (siehe **Abbildung 16**).

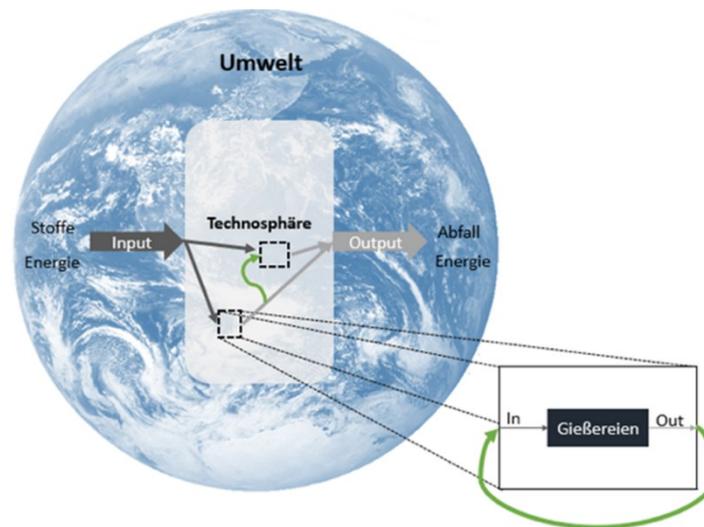


Abbildung 16: Darstellung der Projekt-Thematik im Konzept des gesellschaftlichen Stoffwechsels (eigene Darstellung in Anlehnung an [70]).

Die Staub-Stoffströme sind Output-Ströme, welche hauptsächlich als Abfälle entsorgt werden und somit im Output-Strom der Technosphäre landen. In **Abbildung 16** sind die Ziele des Projektes anhand grüner Pfeile dargestellt. Die Staub-Stoffströme sollen zu einem Input-Strom werden, entweder in den Kooperationspartnerunternehmen selbst oder bei anderen Einheiten. So verbleiben die Ressourcen in der Technosphäre. Eine betriebliche Betrachtung dieser Überlegungen findet sich beispielsweise im Energie- und Stoffstrommanagement. Hier ist ein konkreter Ansatz zur Ermittlung von Methoden zur Verminderung oder Vermeidung der Dissipation von Output-Strömen notwendig. In der Gießerei-Branche sind technische Umsetzungen für ein verbessertes Stoffstrommanagement beispielsweise Apparaturen, die ein direktes Einblasen von Stäuben ermöglichen. Dissipationen werden minimal gehalten, da die Stäube stets im Prozess gehalten werden. Neben der notwendigen Technik ist jedoch ein strenges Monitoring erforderlich, damit sich bestimmte Metalle nicht anreichern. Außerdem entstehen große Mengen an Stäuben bereits vor und nach dem Gießprozess (vgl. **Abbildung 2**), welche hier nicht berücksichtigt werden. Für sämtliche Managementsysteme, die zum Monitoring des eigenen Betriebs und derer Prozesse genutzt werden, sind Schritte in Richtung Digitalisierung notwendig. Unter dem Begriff Industrie 4.0 werden die aktuellen und zukünftigen Bemühungen hinsichtlich einer digitalen und vernetzten Wirtschaft zusammengefasst, deren Entwicklungen auch für das Gießereiwesen von hoher Bedeutung sind.

4. Digitalisierung in der Industrie 4.0

Der Begriff „Industrie 4.0“, die vierte Stufe der industriellen Revolution, beschreibt die digitale Vernetzung von Wertschöpfungs- und Produktionsprozessen in einem Unternehmen entlang der gesamten Produktionskette. Der Fokus liegt auf einer vernetzten Kommunikation und bedarfsorientierten Produktionsprozessen. Zudem sind Themen wie Nachhaltigkeit, Klimaschutz und geschlossene Stoffkreisläufe Aspekte, die bei der Umsetzung berücksichtigt werden [71].

Eine energieeffiziente und nachhaltige Produktion steht auch im Fokus der energieintensiven Gießereiindustrie. Technologische Innovationen sowie die Optimierung der Prozessabläufe sind notwendig, um die Wettbewerbsfähigkeit insbesondere kleinerer bis mittlerer Unternehmen zu sichern. Zur Umsetzung der *Gießerei 4.0* sollen Prozesse anforderungsgerecht optimiert werden, Materialeinsatz ressourcenschonend erfolgen und nachhaltige Energieträger genutzt werden [72]. Ökobilanzen (Life Cycle Assessment) und Sankey-Diagramme sind Methoden zur Analyse und Visualisierung von Material-, Stoff- und Energieströmen und zur Umsetzung der Digitalisierung im Zuge der Industrie 4.0. Die Digitalisierung, Industrie 4.0 und deren Bedeutung für eine Gießerei 4.0 sowie Stoffstromanalysen werden in diesem Kapitel näher erläutert.

4.1 Digitalisierung und Industrie 4.0

Die Entwicklung hin zu einer umfassenden digitalisierten Industrie ist die logische Antwort des Industriesektors auf die Globalisierung der Weltmärkte. Dies führt zur weitreichenden Digitalisierung von Produktionsprozessen, was zu einer Verankerung von digitalen Geschäftsmodellen und ökonomischen Netzwerken in der Unternehmensstruktur führt. Die Nachhaltigkeit rückt dabei zunehmend in den Mittelpunkt von Zukunftskonzepten aller Branchen [73]. Die Digitalisierungslücke zwischen einzelnen Branchen ist dabei oft groß, da die Bereitschaft in der Umsetzung unterschiedlich stark ausfällt. Während Unternehmen die digitale Lösungen entwickeln und vertreiben, also vor allem das Finanzgewerbe, Transport und Logistik oder die Informations- und Kommunikationstechnik, den Wandel hin zu voll digitalen Prozessen unterstützen und selbst voran treiben setzen Unternehmen der Handwerks- und Baubranche und in diesem Zuge auch Gießereien noch oft auf manuelle Abläufe. Die Gründe hierfür können vielfältig sein. Oft stehen keine personellen oder finanziellen Ressourcen für den Aufbau und betreib digitaler Geschäftsmodelle zur Verfügung. Aber auch eine Grundeinstellung, welche manuelle Abläufe schlicht priorisiert kann Grund für eine zurückhaltende Digitalisierung sein [74].

Die Umsetzung der Industrie 4.0 ist komplex, denn mit steigender Anzahl an digitalisierten und vernetzten wirtschaftlichen Abläufen entstehen immer mehr Schnittstellen zwischen den Akteuren. Daher sind einheitliche Normen und Standards für unterschiedliche Sektoren der Industrie, Sicherheit und Datenschutz sowie gesetzliche Rahmenbedingungen unabdingbar. Zur Gestaltung digitaler Unternehmensstrukturen müssen neue datengetriebene Geschäftsmodelle entwickelt sowie Wirtschafts- und Arbeitsformen angepasst werden. Verfügbarkeit, Transparenz und der Zugang zu Daten sind maßgebliche Aspekte zur Definition der Wettbewerbsfähigkeit. Durch das systematische Erfassen und die Auswertung von Daten der Produktionsprozesse durch die Digitalisierung werden Potenziale zur Effizienzsteigerung aufgezeigt. Gleichzeitig bietet die Transparenz digitalisierter Prozesse die Grundlage zur weiteren Automatisierung von Produktionsprozessen. Die Erhebung von Daten mittels datenbasierter Betriebsmodelle dient zusätzlich zur Entscheidungsfindung bei der Umsetzung von Maßnahmen zur Effizienzsteigerung oder bei Veränderungen im Produktionsprozess. Darüber hinaus können die Daten zur vorausschauenden Wartung in Prognoseverfahren und für fortschrittliche Simulationen im Bereich der Forschung und Entwicklung angewendet werden [73].

Die Digitalisierung steht grundlegend dafür, dass digitale Technologien in Prozesse integriert werden, um diese zu verbessern [75]. Die digitale Transformation als Folge der Digitalisierung beschreibt einen daraus resultierenden, vollkommenen Wandel eines Sektors. Digitale Technologien werden eingesetzt, um interne Prozesse zu verändern und neue Geschäftsmodelle einzuführen. Unternehmen werden auf Marktanforderungen des digitalen Zeitalters ausgerichtet [71].

4.2 Gießerei 4.0

Die fortschreitende Digitalisierung wirkt sich auch auf die Gießereibetriebe aus. Im Konzept der Gießerei 4.0 ist ein Aspekt die Umwandlung des Handformens zu einer voll automatisierten Fertigung. Zwar wurden Herstellungsprozesse durch computergestützte Fertigung bereits rationalisiert, doch ist dies noch sehr personal- und somit kostenintensiv. 3D-Drucker können hier Abhilfe schaffen, da sie komplexe Formen schnell und mit geringem Personalaufwand umsetzen können. Ebenso fahrerlose Transportsysteme für den Materialfluss und Roboter für einzelne Fertigungsschritte. Zudem zielt die Digitalisierung darauf ab, Maschinen, Sensoren und Daten zu Produkten bzw. zu deren Produktionen zu dokumentieren und zu verknüpfen. Daraus resultiert neben einer Planungssicherheit für das Unternehmen auch eine Transparenz der gesamten Produktion für Hersteller und Kunden. Im Sinne der ökologischen Nachhaltigkeit ist vor allem die Minimierung von Emissionen ein wichtiger Punkt. Durch die mit der Digitalisierung einhergehende Transparenz ist es einfach möglich, aufzuzeigen, an welchen Produktionsschritten welche Emissionen

auftreten. Auf Software-Ebene können Produktleitsysteme im Fertigungsmanagement zwischen Maschinenebene und ERP (Enterprise-Resource-Planning) vernetzen [76].

4.3 Digitalisierung von Stoffströmen

Stoffstrommodelle bilden Energie- und Materialflüsse ab, die zuvor mittels Analysemethoden ermittelt werden. Verschiedene Stoffströme werden erfasst und analysiert, um deren Potenzial zur systematischen Optimierung im Hinblick auf die Ressourcen- und Materialeffizienz zu ermitteln. Dies lässt sich nur umsetzen, wenn ausreichend Informationen über den Ressourceneinsatz zugänglich sind. Die Analyse kann einzelne Stoffe, Produkte oder auch ganze Unternehmen betrachten. Stoffstromanalysen schließen auch bilanzierende Instrumente wie Ökobilanzen (LCA), Produktlinienanalysen oder Produktökobilanzen ein, da diese zur Bewertung der Daten und Ergebnisse betrieblicher Stoffstromanalysen genutzt werden können [77].

Material-, Stoff- sowie auch Energieströme können graphisch mit Hilfe von Sankey-Diagrammen dargestellt und durch eine Life Cycle Assessment Analyse quantifiziert werden.

4.3.1 Sankey-Diagramme

Sankey-Diagramme werden zur Energie- und Stoffstrommodellierung eingesetzt und dienen als Tool zur Darstellung der Ressourcen- und Energieeffizienz. Durch die Visualisierung von Mengenströmen können Ineffizienzen und Einsparungspotenzial im Umgang mit Ressourcen aufgezeigt werden. Benannt wurden die Diagramme nach dem irischen Ingenieur H. R. Sankey. Dieser benutzte die Diagramme erstmals, um die thermische Effizienz von Dampfmaschinen zu visualisieren [78, 79]. Die Diagramme basieren auf gerichteten und gewichteten Graphen. Die gerichtete Kante wird so dargestellt, dass die Stärke der Kante proportional zu ihrer Gewichtung ist. Die proportionale Darstellung von Informationen ist leicht zu interpretieren, wodurch ein intuitiver Erkenntnisgewinn generiert wird. Wichtig ist zu beachten, dass bei der Erstellung von Sankey-Diagrammen nur extensive Größen ausreichend dargestellt werden, weil die mathematische Operation der Addition nur bei diesen Größen sinnvoll anwendbar ist. Zusätzlich beziehen sich die dargestellten Größen immer auf einen gewissen Zeitraum (bspw. ein Jahr) oder eine funktionale Einheit (bspw. ein Kilogramm Eisen). Die Software e!Sankey der ifu Hamburg GmbH ist ein Programm zur Darstellung und Berechnung von Sankey-Diagrammen, welches im Rahmen dieser Arbeit genutzt wurde (siehe Kapitel 7.1).

4.3.2 Life Cycle Assessments (LCAs)

Ein Life Cycle Assessment (LCA) (Lebenszyklusanalyse), oft auch als Umweltbilanz oder Ökobilanz bezeichnet, ist eine systematische Analyse der potenziellen

Umwelt(aus)wirkungen von Produkten sowie Dienstleistungen und der Energiebilanz während des gesamten Lebenszyklus (“from cradle to grave“) [80]. Die Norm DIN EN ISO 14040 legt das grundsätzliche Prinzip der LCA und dessen Rahmenbedingungen fest. Die DIN EN ISO 14044 beschreibt konkrete Anforderungen. Die Normen DIN EN ISO 14041, DIN EN ISO 14042 und DIN EN ISO 14043 beschreiben die unterschiedlichen Schritte und den Ablauf. Ein Life Cycle Assessment ist eine sehr spezifische Analyse, die eine Grundlage für Nachhaltigkeits- oder Corporate Social Responsibility (CSR)-Strategien innerhalb eines Unternehmens bietet, um Entscheidungen basierend auf gemessenen Werten zu treffen. Die steigende Nachfrage nach verbesserten Umwelteigenschaften und erhöhter Transparenz vonseiten der Kunden und Behörden führt zu einem steigenden Interesse an Ökobilanzen, um Produkte kontinuierlich verbessern und optimieren zu können. Zusätzlich lässt sich auch das Abfallvermeidungspotenzial identifizieren, wodurch effizientere Produktionen umgesetzt werden können [80, 81]. Im Rahmen dieser Arbeit wurden für die Modellierung zur Quantifizierung ökologischer Nachhaltigkeit als Grundlage cradle-to-gate LCA Daten verwendet, um die Umweltwirkungen innerhalb von vier Belastungskategorien auszudrücken (siehe Kapitel 7.5). Diese Daten sind das Ergebnis einer umfassenden Recherche von Nuss und Eckelman (2014), die als Datenbasis auch in einer LCA genutzt werden könnten [82].

5. Parametrisierung von Nachhaltigkeit und Modellierung

Die Lebenszyklusanalyse stellt eine Möglichkeit dar, um Umweltauswirkungen bestimmter Produkte oder Prozesse zu quantifizieren. Sie ist jedoch meist mit einem hohen Aufwand und zusätzlichen Kosten verbunden, da spezielle Kenntnisse und Software notwendig sind. Das stellt besonders KMU vor eine Herausforderung. In diesem Kapitel wird die Theorie zur Entwicklung eines Optimierungsmodells zur verbesserten Führung der Gießereistäube im Hinblick auf das zu verwendende Entsorgungsverfahren betrachtet. Das Modell basiert auf einem Modellierungszyklus-Ansatz und ermöglicht eine erste Bewertung mit wenig Daten. Die Methode ist ein pragmatischerer Weg und kann als erster Schritt zur Umsetzung von ökologischer Nachhaltigkeit betrachtet werden.

5.1 Parametrisierung von Nachhaltigkeit

Zur Bewertung der Umweltauswirkungen von Produkten und Prozessen werden geeignete Instrumente benötigt. Im Laufe der letzten Jahre wurden unterschiedliche Konzepte zur Evaluierung der ökologischen Auswirkungen entwickelt. Durch ein Ökoprofil, in dem Emissionen, Stoff- und Energieströme eines Produktes für dessen gesamte Lebensdauer in einer Sachbilanz zusammengefasst werden, kann eine Ökobilanz zu den Umweltauswirkungen des Produktes für den gesamten Lebenszyklus erstellt werden. Auf Basis der Daten des Ökoprofils und der Ökobilanz kann unter Verwendung bestimmter Rechenverfahren eine Ökoeffizienzanalyse erstellt werden. Diese Methode ermöglicht einen Vergleich und eine Analyse von nachhaltigen Konzepten und trägt zur Entscheidungsfindung bezüglich Strategien und Maßnahmen zur Umweltverbesserung bei [46]. Im Folgenden werden Umwelt- und Nachhaltigkeitsindikatoren sowie Auswahlmethoden, die für das entwickelte Optimierungsmodell relevant sind, genauer erläutert.

5.1.1 Operationalisierung von Nachhaltigkeit – Indikatoren

Die Informations- bzw. Wissenspyramide bildet die Grundlage der Struktur des Erkenntnisprozesses. Daraus geht hervor, wie aus Daten und Informationen Wissen generiert wird. Wenn Daten die Grundlage zur Ermittlung von Indikatoren bilden, spricht man von einem Bottom-Up Ansatz. Alternativ beschreibt ein Top-Down Ansatz die Bestimmung von Indikatoren, für die eine Datengrundlage erst noch geschaffen werden muss (siehe Kapitel 5.1.4).

Indikatoren sind gemessene oder berechnete quantitative Messgrößen. Meist handelt es sich hierbei um numerische Kenn- oder Messgrößen, die Eigenschaften eines Systems beschreiben. In der Regel basieren diese Werte auf durch Messeinrichtungen gewonnene, dimensionale Größen, die durch ein standardisiertes

Maß in einer Referenzeinheit angegeben werden [83]. Oftmals bilden diese einen Teil eines Indikatorsets, ermöglichen valide Aussagen über die zu untersuchenden Variablen und sind ein Instrument für Diagnose und Handel. Hierbei ist wichtig, einen geeigneten Bezugsraum zu definieren und die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit bei der Fragestellung mit einzubeziehen. Indikatoren bilden einen charakteristischen Ausschnitt von statistischen Informationen in Bezug auf ein bestimmtes Anforderungsprofil, folglich beinhalten diese Teilinformationen einer Problemstellung. Dabei kann es sich um einen Parameter selbst oder eine davon abgeleitete Kenngröße handeln, welche den Zustand sowie die Dynamik eines Systems beschreiben [83].

Abbildung 17 zeigt die Informationspyramide, welche das Vorgehen der Operationalisierung anhand von Indikatorsystemen beschreibt. Das Fundament der Pyramide bildet ein breites Spektrum an Basisdaten, die durch Messungen und Monitoring-Programme erhoben werden. In einem nächsten Schritt werden die komplexen Informationen aufgearbeitet und in entsprechende Indikatoren verdichtet. Schlüsselindikatoren sind aggregierte Indikatoren, die jene Informationen beinhalten, welche für den Umgang mit dem spezifischen Problem notwendig sind. Eine Auswahl an aggregierten Indikatoren dient als Instrument zur Bewertung im Sinne der Nachhaltigkeitsaspekte [83, 84].

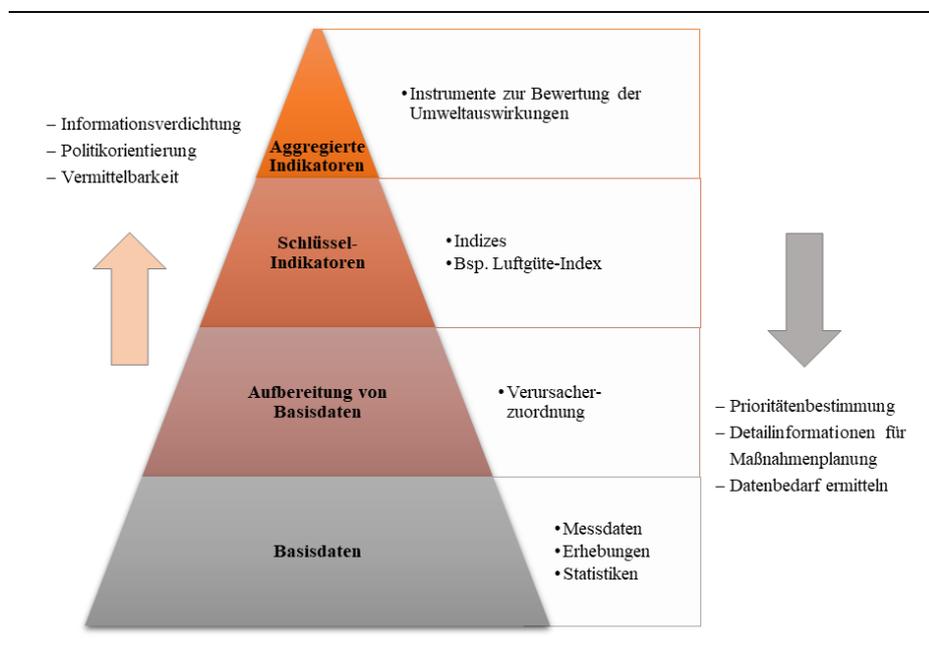


Abbildung 17: Informationspyramide des Indikatorsystems (eigene Darstellung in Anlehnung an [84]).

Die Indikatoren dienen zur Beurteilung der Zielerreichung und spielen eine signifikante Rolle für die Zieldefinition. Dabei treten auch normative Indikatoren mit direkter Verbindung zwischen Informationspyramide und Zielsetzung auf. Diese Indikatoren sind die Grundlage für einen Soll-Ist-Vergleich und ermöglichen eine

schnelle Abbildung von Entscheidungsgrundlagen. Hierbei handelt es sich oftmals um Näherungswerte, die ständig angepasst werden müssen [85].

5.1.2 Nachhaltigkeitsindikatoren

Nachhaltigkeitsindikatoren sind Kennzahlen, messbare und quantifizierbare Größen, die den Zustand der Umwelt beschreiben und die Wirkung von Maßnahmen zeigen sollen. Dieses Konzept soll das gesamte Ausmaß der ökonomischen, gesellschaftlichen und ökologischen Auswirkungen in einem aggregierten Indikator zusammenfassen. Nachhaltigkeitsindikatoren können vielseitig angewendet werden. Es gibt verschiedene Ansätze, diese Indikatoren zu definieren und zu bewerten. Methoden zur Erstellung sind flexibel und passen sich der jeweiligen Anwendung an. Entscheidend sind Nachhaltigkeitskriterien, anhand welcher beurteilt werden kann, ob z.B. ein Produkt oder Prozess einen negativen oder positiven Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung leistet.

Im Rahmen der Agenda 21 wurden Nachhaltigkeitsindikatoren eingeführt, nach denen Messgrößen entwickelt und angewendet werden sollten, mit denen Prozesse bzw. Produkte auf Nachhaltigkeit geprüft werden können (siehe auch [86]). Mit der Verabschiedung der Agenda 2030 im Jahr 2015 und Einführung der 17 SDGs wurde ein Set von 231 global vergleichbaren Indikatoren entwickelt, die die Zielerreichung quantifizieren sollen. Auf europäischer Ebene wurde 2017 ein EU-SDG-Indikatorenset erarbeitet, welches die Fortschritte auf Basis von 101 Indikatoren bemisst. Die deutsche Nachhaltigkeitsstrategie beinhaltet Stand Oktober 2022 75 Indikatoren [87].

5.1.3 Gesamtindikator und Indizes

Gesamtindikatoren, auch Schlüssel- oder Leitindikatoren genannt, fassen wichtige Aspekte für die Bewertung einer Fragestellung zusammen. Hierbei handelt es sich oftmals um aggregierte Indikatoren, die als Grundlage zur Erarbeitung von Zukunftsszenarien, Veranschaulichung von Handlungsalternativen und zur Überwachung der Zielrichtung dienen [83]. Ein Gesamtindikator für Nachhaltigkeit ergibt sich aus der Operationalisierung von Indizes aus einem linearen System gewichteter Nachhaltigkeitsindikatoren, gezeigt durch **Formel 1** [47].

$$\text{Gesamtindikator} = \begin{pmatrix} g_{\text{ökonomisch}} \\ g_{\text{ökologisch}} \\ g_{\text{sozial}} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \eta_{\text{ökonomisch}} \\ \eta_{\text{ökologisch}} \\ \eta_{\text{sozial}} \end{pmatrix} = \vec{G} \times \vec{N}$$

Formel 1: Gesamtindikator zur Operationalisierung von Nachhaltigkeit [47].

5.1.4 Indikatorsystem

Die Auswahl eines Indikatorsystems erfolgt unter Berücksichtigung sektorenspezifischer Zusammenhänge und Datenverfügbarkeit. Die Festlegung eines Indikatorsatzes ist abhängig von der Fragestellung, Zielsetzung und Formulierung der

Indikatoren als grundlegende Kriterien. Zudem müssen empirische Daten vorliegen und zeitlich vergleichbar sein, sodass es letztlich auch die gewählten Indikatoren sind [83]. **Abbildung 18** zeigt zwei Verfahrensansätze zur Auswahl geeigneter Indikatoren.

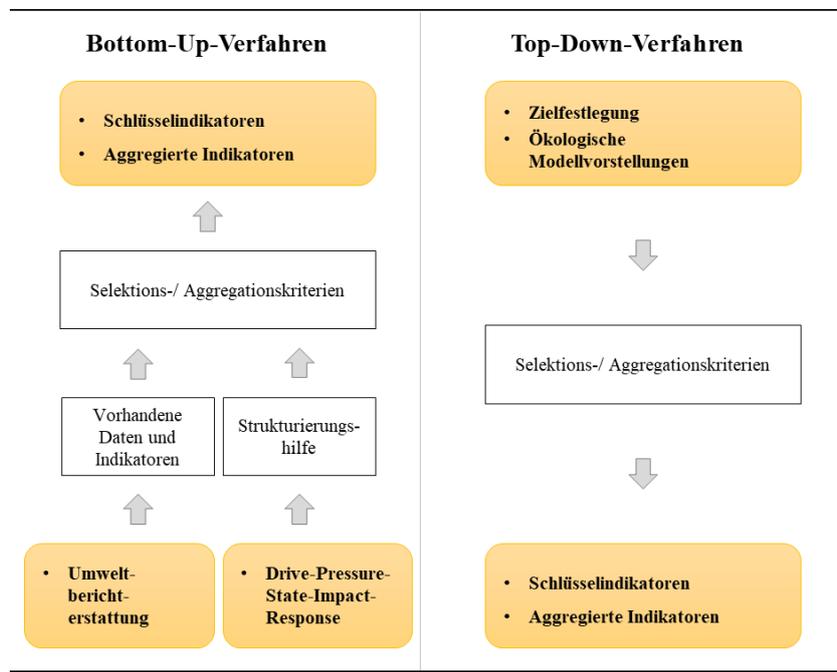


Abbildung 18: Verfahrensansätze zur Wahl des Indikatorsystems (eigene Darstellung in Anlehnung an [84]).

Beim Bottom-Up Verfahren werden vorhandene Basisdaten und etablierte Indikatorsätze verwendet. Ausgehend von diesen können unter Berücksichtigung der Anforderungen und Zielsetzungen entsprechende Indikatoren ausgewählt und aggregiert werden. Beim Top-Down Verfahren wird zuerst die Zieldefinition und Einarbeitung einer Modellvorstellung definiert und basierend auf den erarbeiteten Problemfeldern dann die jeweils benötigten Parameter sowie die zu betrachtenden Indikatoren definiert [84].

Auf politischer Ebene besteht oft die Möglichkeit auf vorhandene Daten aus Umweltberichten oder Expertenbefragungen zurückzugreifen, weshalb die Entwicklung von Indikatoren meist nach der Bottom-Up Methode erfolgt. Ein Vorteil ist, dass die Indikatoren an die vorhanden Daten angepasst werden können und somit eine ausreichende Datenversorgung sichergestellt werden kann. Dafür muss anfänglich viel Zeit in die Entwicklung gesteckt werden. Die Top-Down Methode, bei der Zielkennzahlen ohne Datengrundlage anfänglich definiert werden, kann als pragmatischerer Ansatz betrachtet werden. Indikatoren müssen hier meist laufend an die Daten, die erhoben werden können, angepasst werden. Die Methodik ist in der Regel mit einer höheren Unsicherheit verbunden, da im Gegensatz zur Bottom-Up Methode, die Möglichkeit besteht, dass die Daten, die dem Indikator die

entsprechende Aussagekraft verleihen, nicht in ausreichendem Maß gesammelt werden können. Ein Vorteil ist, dass sich die Indikatorenauswahl direkt an der Zielfestlegung orientiert und in einem ersten Schritt keine breite Datengrundlage benötigt wird, um Fragestellungen zu modellieren. Das prädestiniert die Methode für Forschungsprojekte und ist daher auch das Verfahren, das im Rahmen dieser Arbeit Anwendung gefunden hat.

5.2 Grundlagen der mathematischen Modellierung

Bei der mathematischen Modellierung werden reale Probleme als Modell dargestellt und durch mathematische Operationen gelöst.

5.2.1 Modellierungszyklus

Der Modellierungszyklus kann verwendet werden, um ein reales Problem in einem Modell zu lösen. **Abbildung 19** verdeutlicht das Schema und die Schritte, die dafür durchlaufen werden.

In einem ersten Schritt muss das reale Problem identifiziert und formuliert werden. Dieses wird dann durch Annahmen und Vereinfachungen in ein Modell abstrahiert. Für geeignete Annahmen sollten Eigenschaften des Anwendungsproblems analysiert werden. Aus den Annahmen resultieren dann die Art und Anzahl der Zustandsvariablen. Dieses Modell kann dann in ein mathematisches Modell umgewandelt werden, damit dieses durch geeignete mathematische Methoden gelöst werden kann.

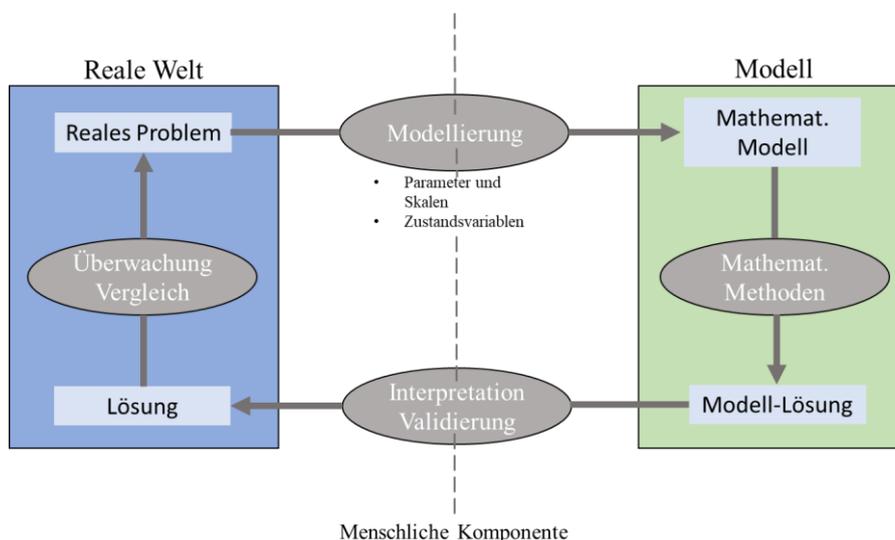


Abbildung 19: Schematische Darstellung des Modellierungszyklus (eigene Darstellung in Anlehnung an [88]).

Die daraus resultierende Lösung des Modells wird in einem nächsten Schritt unter Berücksichtigung der Modellannahmen und Vereinfachungen auf Plausibilität geprüft sowie validiert. Dann kann die Modelllösung zur Lösung des realen Problems

verwendet werden. Weiterhin muss die Funktionalität kontrolliert werden, um das Modell gegebenenfalls anzupassen. In diesem Fall beginnt der iterative Modellierungszyklus wieder von vorne. Außerdem sollte festgelegt werden, unter welchen Umständen ein Zyklus abgebrochen werden soll [88, 89].

5.2.2 Anwendungsproblem und Annahmen

Zu Beginn jeder Modellierung muss das Anwendungsproblem analysiert werden. Basierend darauf werden Fragestellungen formuliert. Da mit einem mathematischen Modell nicht alle Fragen untersucht werden können, ist es notwendig eine möglichst präzise Fragestellung herauszuarbeiten. Danach kann durch vereinfachte Annahmen ein vereinfachtes Problem als Modell aufgestellt werden und der Modellierungszyklus kann beginnen. Durch die Konkretisierung der Fragestellung wird dann oftmals nur noch ein Teilproblem mit den Prozessaspekten, die für die festgelegte Frage relevant sind, berücksichtigt. Häufig ist es nicht nötig, das ganze System bzw. den ganzen Prozess abzubilden und alle Wechselwirkungen zu modellieren. Ausschlaggebend ist das vorhandene Verständnis über den gesamten Prozess und relevante Aspekte. Hierbei hilft das mehrfache Durchlaufen des Modellierungszyklus, beginnend bei einem ganz einfachen hin zu einem komplexeren Modell. Annahmen sind Einschränkungen oder Vereinfachungen als Grundlage der Modellbildung, die Bezug auf eine konkrete Fragestellung nehmen. Es wird unterschieden zwischen Annahmen über die Art der Wechselwirkungen und über die Summe der zu betrachtenden Modellierungsobjekte, beispielsweise Zustände des zu betrachtenden Prozesses. Im Modellierungszyklus werden dann deren qualitative und quantitative Auswirkungen untersucht [89, 90].

5.2.3 Modellierung

Nach der Analyse des Anwendungsproblems wird das Modell formuliert, das den betrachteten Prozess unter den getroffenen Annahmen abbildet. Das mathematische Modell ermöglicht die präzise Beantwortung der formulierten Fragestellung. Dieses besteht aus spezifizierten Parametern und Variablen sowie dessen mathematischen Beziehungen. Aus diesen und der Problemstellung ergibt sich die Aufgabenstellung, bspw. ein Optimierungsproblem oder die Lösung eines Gleichungssystems. Die Vorgehensweise beim Aufstellen eines Modells ist abhängig vom Modelltyp und der Methodologie, welche spezifisch für das jeweilige Problem sind. Unabhängig vom Modelltyp werden zu Beginn Parameter und Variablen spezifiziert. Aus Letzteren ergeben sich dann Zustandsgrößen und gesuchte Größen. Nebenbedingungen werden auf Basis der mathematischen Beziehungen zwischen Parametern und Variablen aufgestellt. Zum Schluss kann eine Zielfunktion und somit die mathematische Aufgabenstellung erstellt werden [89].

5.2.3.1 Parameter und Variablen

Die Parameter, oft auch als Systemparameter bezeichnet, beschreiben Eigenschaften des Systems bzw. des Prozesses. Daher sind diese fest vorgegeben und können durch die Berechnung nicht verändert werden. In diesem Fall hängt die analytische und numerische Lösung von den Parametern ab. Vereinzelt kann das Ziel der Modellierung, aber auch die Untersuchung der Abhängigkeit des Prozesses von einzelnen Parametern sein, dann werden hierzu Berechnungen durchgeführt, beispielsweise kann ein optimaler Parameterwert bezüglich eines konkreten Kriteriums gesucht werden. Modellparameter hingegen beschreiben die Eigenschaften des Modells und dürfen nicht mit Systemparametern gleichgesetzt werden. Um alle Parameter spezifizieren zu können, müssen diese hinsichtlich Bedeutung und physikalischer Dimension (z.B. Länge, Energie etc.) genau beschrieben und der Bereich möglicher Parameter festgelegt werden [89, 91].

5.2.3.2 Entscheidungsvariablen

Entscheidungsvariablen können kontinuierliche Werte zwischen gegebenen Grenzen annehmen. Diese entsprechen dabei dem Lösungsraum in der Entscheidungssituation. Entscheidungsvariablen können beispielweise Produktionsmengen einzelner Produkte sein. Der Entscheidungsträger kann die Variable in den gegebenen Grenzen frei bestimmen, dabei sollte jedoch immer im Sinne einer möglichst optimalen Lösung der Zielfunktion entschieden werden. **Formel 2** zeigt die allgemeine mathematische Bezeichnung für eine Entscheidungsvariable [91].

$$x_j, \text{ sodass } l_j \leq x_j \leq u_j \text{ für alle } j \in 1, \dots, n$$

Formel 2: Mathematische Beschreibung einer Entscheidungsvariable [91].

5.2.3.3 Zielfunktion

Die Zielfunktion ist eine Kombination der Variablen und wird entweder maximiert oder minimiert. **Formel 3** zeigt die allgemeine Form einer Zielfunktion für eine lineare Optimierung [91].

$$\text{Maximiere / Minimiere } Z = \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

Formel 3: Zielfunktion einer linearen Optimierung [91].

In der Praxis sollen oftmals mehrere Ziele berücksichtigt werden, was bei der Zielfunktion einer linearen Optimierung nicht möglich ist. Hier kann jedoch eine (Linear-)Kombination aus mehreren Zielfunktionen aufgestellt werden, nach der dann optimiert wird. Das formale Modell kann nicht immer alle Aspekte mit abbilden, sodass die optimale Lösung ein Vorschlag ist. Dieser kann unter weiteren praktischen

Annahmen, die sich von den zuvor getroffenen unterscheiden, noch modifiziert werden [91].

5.2.3.4 Nebenbedingungen

Die Gesetzmäßigkeiten zwischen Parametern, Zustandsvariablen und den gesuchten Größen müssen ermittelt werden, ebenso wie die Nebenbedingungen der Variablen und der zu definierenden Größen. Dazu wird das Anwendungsgebiet des betrachteten Prozesses analysiert und aus Gesetzmäßigkeiten geschlossen, die dann mathematisch formuliert werden. Danach ist zu prüfen, ob der Prozess ausreichend abgebildet ist und die gesuchten Größen ermittelbar sind. Für das Beispiel einer algebraischen Gleichung würden hier Unbekannte und Gleichungen abgezählt werden. Bei komplizierteren Prozessen ist dies oftmals erst durch eine mathematische Analyse des Modells möglich [89].

6. Experimenteller Teil

Die Grundlage aller durchgeführten Versuche bildet die chemische Analyse der Stäube. In den vier Partnergießereien wurden von insgesamt 24 Anfallstellen Proben genommen und mittels ICP-OES untersucht. Anhand der Zusammensetzung wurden spezifische Proben für Folgeversuche ausgewählt. So konnten sowohl metallreiche als auch metallarme Fraktionen für Versuche berücksichtigt werden. Bei den Versuchen zur Staubaufbereitung handelte es sich um Machbarkeits-Versuche. Im Vordergrund stand die entsprechende Methode auf die komplexe Matrix der Gießereistäube anzuwenden und eventuelle Potenziale im Kontext der Aufbereitung zu identifizieren. Kann die Zusammensetzung des Staubs durch vorherige Aufbereitung entsprechend verändert werden, z.B. durch Abreicherung von Schwermetallen, kommen so eventuell neue Wege der Wiederverwertung in Frage. Wie bereits im Forschungsdesign erläutert (vgl. Kapitel 1.4), standen Up-Scaling und eine industrielle Implementierung hier nicht im Vordergrund. Demgegenüber war das Ziel bei Verwertungsversuchen die reale Problemstellung, mit welcher die Gießereiindustrie konfrontiert ist, anzugehen. Hierfür mussten wesentlich mehr Dinge beachtet werden. Ein Verwertungsprozess muss mit den anfallenden Mengen umgehen, rechtliche Anforderungen erfüllen und ökonomisch tragbar betrieben werden können.

Expertisen im Konsortium und darüber hinaus wurden genutzt, um Synergien zu schaffen und Kooperationsversuche durchzuführen. Sofern es zu Kooperationen kam, wird darauf im Text hingewiesen. In den folgenden Kapiteln folgen die theoretischen Grundlagen sowie die Durchführungen der experimentellen Versuche. Die Ergebnisse zu den Versuchen sind in der Auswertung in Kapitel 7 beschrieben.

6.1 Chemische Analytik

Für die chemische Untersuchung der Gießereistäube wurde in den meisten Fällen ein Königswasser-Aufschluss mit anschließender ICP-OES Analyse durchgeführt. Sollte eine andere Analysemethode gewählt worden sein wird im Text ausdrücklich darauf hingewiesen.

6.1.1 ICP-OES

Die Emissionsspektroskopie beruht auf der Grundlage, dass sich ein signifikanter Anteil von Elektronen in Atomen bei Energiezufuhr, z.B. in Form von Wärme in einem energetisch angeregten Zustand E_m befindet. Beim Rückfall in energetisch niedrigere Zustände emittieren diese Teilchen elektromagnetische Strahlung [92]. Die Frequenz entspricht dabei dem Energieinhalt der Differenz beider Niveaus. Dies ist durch die Bohr'sche Frequenzbedingung gegeben (siehe **Formel 4**) [93].

$$\nu = \frac{\Delta E}{h} = \frac{E_m - E_n}{h}; m > n$$

Formel 4: Bohr'sche Frequenzbedingung.

Dabei gibt ν die Frequenz, E_n die Energie im energetisch niedrigeren Zustand und h das Planck'sche Wirkungsquantum an. Da sich die Energieniveaus von Element zu Element unterscheiden, sind die dabei emittierten Linien für jedes Element charakteristisch [94].

Die Verwendung von induktiv gekoppeltem Plasma (ICP) ist eine gängige Methode der Anregung. Das Plasma selbst besteht aus ionisierten Atomen und wird aus einem Inertgas, in der Regel Argon, in einem Hochfrequenzfeld induziert. Das Inertgas selbst dient dabei auch als Trägergas und transportiert die Probe in Form eines Aerosols zur Plasmafackel (siehe **Abbildung 20**).

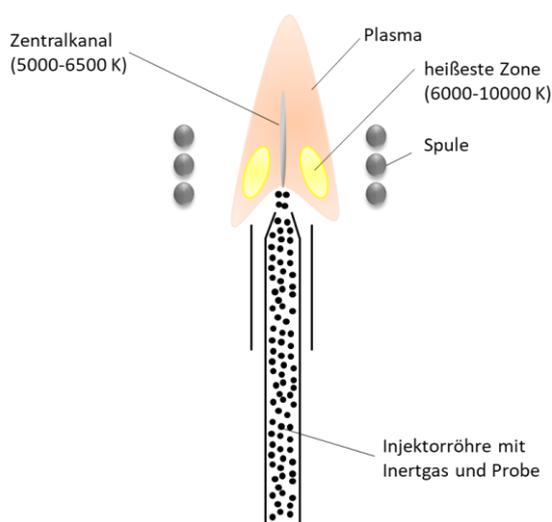


Abbildung 20: Probenantransport zur Plasmafackel in einem ICP.

Bei diesen Temperaturen werden die Probenmoleküle atomisiert und zum Teil auch ionisiert. Sie bewegen sich dabei so schnell, dass es aufgrund des Doppler-Effekts zu Linienverbreiterungen kommen kann. Spektral nah beieinander liegende Elemente könnten daher interferieren.

Für sämtliche Analysen mittels optischer Emissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma mussten die Proben vorher aufgeschlossen werden. Hierfür wurde ein Mikrowellenaufschluss (Gerät: MLS-Ethos) durchgeführt. Als Aufschlusslösung diente Königswasser.

Für jeden Aufschluss wurden ca. 500 mg der zu vermessenden Probe mit 2 ml 65%iger Salpetersäure versetzt und eine Stunde stehen gelassen. Anschließend wurden 2 ml einer 37%igen Salzsäure hinzugegeben und die Lösung weitere 5 Stunden stehen gelassen. Um die Königswasserlösung herzustellen, werden anschließend weitere 4

ml der Salzsäure hinzugegeben und der Mikrowellenbehälter geschlossen. Daraufhin wurde das Programm in **Tabelle 2** gestartet.

Tabelle 2: Durchführung des Königswasser-Mikrowellenaufschlusses für die chemische Analytik.

Schritt	Zeit [min]	Leistung [Watt]	Temperatur [°C]
1	5,5	700	100
2	25	700	190
3	30	1200	190
4	30	0	-

Die aufgeschlossene Lösung wurde anschließend über einen Faltenfilter (Gütegrad: 595,5) filtriert und mit destilliertem Wasser auf 50 mL aufgefüllt. Sofern Rückstand vorhanden war, wurde dieser über Nacht bei 40 °C im Trockenschrank getrocknet. Durch Rückwaage konnte so der Erfolg des Aufschlusses kontrolliert werden.

Da der Siliziumgehalt nicht durch Analyse eines Königswasseraufschlusses bestimmt werden kann, wurde für eine ausgewählte Probe auch ein Flusssäureaufschluss durchgeführt. Hier wurden ca. 200 mg der zu vermessenden Probe mit 5 ml 65%iger Salpetersäure, 3 ml 85%iger Phosphorsäure und 1 ml 48%iger Flusssäure versetzt. Entstehende schwerlösliche Fluoride wurden anschließend mit 5 ml einer 5%igen Borsäurelösung komplexiert. Anschließend wurde das Programm in **Tabelle 3** durchgeführt.

Tabelle 3: Durchführung des Flusssäure-Mikrowellenaufschlusses für die chemische Analytik.

Schritt	Zeit [min]	Leistung [Watt]	Temperatur [°C]
1	3,5	1000	140
2	3,5	1000	200
3	5,0	1000	250
4	15	700	250
5	30	0	-

Die Probe wurde auch hier über eine Faltenfilter (Gütegrad: 595,5) gefiltert und mit destilliertem Wasser auf 50 ml aufgefüllt.

Die Analysen wurden an einem ICP-OES der Firma Perkin Elmer (Modell: Optima 8000) nach DIN EN ISO 11885 durchgeführt. Als Sprühkammer diente ein Crossflow Nebulizer.

6.1.2 Elementaranalyse

Um den durchschnittlichen Kohlenstoffgehalt zu bestimmen, wurden zwei Mischproben erstellt und einer Elementaranalyse unterzogen. Die Ergebnisse

welche zum effektiven Aufschluss beiträgt. Für eine Anwendung sind Arten der Gattung *Acidithiobacillus* am besten erforscht. Eine ökonomische Rentabilität ist unter anderem dadurch gegeben, dass viele Arten chemolithoautotroph sind, ihre Zellmasse also durch die Oxidation des Eisens und CO₂-Fixierung aufbauen und sich somit selbst versorgen.

Die genannten Aspekte machen die Biolaugung auch zunehmend für eine Aufbereitung von Sekundärrohstoffen interessant. Ziel der Versuche war es zu testen, ob und welche Metalle sich aus einem Gießereistaub solubilisieren lassen, um den Feststoff an eben diesen abzureichern. Die Versuche wurden in Kooperation mit dem Arbeitsbereich Geomikrobiologie der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe durchgeführt.

Für die Versuche wurden zwei verschiedene Mikroorganismengemeinschaften (MOGs) verwendet, eine Tailingskultur (TAI) und die Ecometals Standard (EM). In einem ersten Schritt wurden die einzelnen Bakterienstämme kultiviert und zu einer Gemeinschaft zusammengeschlossen (siehe **Tabelle 13** in Anlage 2). Unter Zugabe von 2 % Schwefel an 2 % Gießereistaub wurden die Mikroorganismen in einem 50 ml Schüttelkolben adaptiert und anschließend in drei Versuchen eingesetzt. Alle Versuche fanden bei einem pH-Wert von 1,8 statt. Zu verschiedenen Zeitpunkten wurden Flüssigproben entnommen und der pH-Wert, das Redoxpotential und die Zusammensetzung mittels ICP-OES bestimmt. Die Bestimmung des Redoxpotentials erfolgte mit einer Ag/AgCl Elektrode. Der für den Versuch verwendete Bioreaktor war von der Firma electrolab (Typ: FerMac 200 Series).

Die Kolbenlaugung dauerte 14 Tage. Die verschiedenen Kulturen benötigten unterschiedliche Temperaturen. Für die TAI liegt die Idealtemperatur bei 30 °C, bei der EM beträgt die optimale Temperatur 42 °C. Durch die Arbeit der Gemeinschaften erhöht sich der pH-Wert immer wieder und musste daher regelmäßig durch Zugabe von Schwefelsäure zwischen 1 und 2 gehalten werden. Nach etwa einer Woche befindet sich das Redoxpotential auf einem Höchststand, welcher eine Woche lang anhielt.

Die Biolaugungsexperimente wurden nur mit der TAI-Kultur in temperaturkontrollierten (30 °C) gerührten 2-l-Batch-Bioreaktoren durchgeführt. Die Reaktoren wurden vollständig mit Schikanen versehen und das Rühren erfolgte mit einem Doppelflügelradsystem, bestehend aus einer 6-blättrigen Standard-Rushton-Turbine, in Kombination mit einem 6-blättrigen 45 °-Axialflügelrad, bei einer Drehzahl von 400 U/min. Die Versuche wurden nacheinander mit dem gleichen Konsortium bei 5 % und 10 % (75 g und 150 g) Feststoffbeladung durchgeführt. Parallel fanden unter gleichen Bedingungen Kontrollversuche ohne Bakterien statt, um eventuelle

Unterschiede zwischen chemischer und biologischer Laugung feststellen zu können. Die Ergebnisse der Versuche sind in Kapitel 7.3.1 beschrieben.

6.2.2 Elektrostatische Trennversuche

Elektrostatische Separationssysteme kombinieren das Prinzip von Auf- und Entladung innerhalb eines geschlossenen Systems. Sie bilden eine effektive Möglichkeit zur Trennung von Leiter-/Nichtleiter-Fractionen innerhalb eines Stoffgemisches. Großtechnisch stehen hier vor allem Metall-Kunststoff-Gemische im Vordergrund. Im Kontext der Aufbereitung von Gießereistäuben wäre auch eine erfolgreiche Trennung von leitenden Metall- und nichtleitenden Fractionen interessant, um so metallreiche Fractionen aufzureinigen und potenziell höheren Qualitätsansprüchen zu genügen. Hierfür wurden Versuche beim Penzberger Unternehmen hamos GmbH Recycling- und Separationstechnik durchgeführt. Zum Einsatz kam ein Korona-Walzen-Scheider (Modell: L), dessen Funktionsprinzip im Folgenden erläutert wird.

Das zu trennende Gemisch wird durch Vibration auf eine geerdete und sich rotierende Metallwalze aufgegeben. Über die Walze gelangt das Gemisch in ein durch eine Korona Elektrode erzeugtes elektrisches Feld und wird bei 29.000 Volt elektrostatisch aufgeladen. In diesem Zustand haften die Partikel an der Walze. Um zu verhindern, dass sich die Partikel überlagern und so keinen Kontakt zur Walze haben, wurde die Vibration, also die Fördergeschwindigkeit, möglichst gering eingestellt. Gleichzeitig wurde die Stahlwalze (Länge: 1 m) mit Maximalgeschwindigkeit betrieben. So wurde der Staub langsam auf eine sich schnell rotierende Fläche aufgetragen, um eine möglichst monopartikuläre Schicht zu erhalten.

Sobald das elektrische Feld verlassen wird, geben die Partikel ihre Ladung an die geerdete Walze ab. Metalle (bzw. Leiter) tun das schneller als Nichtmetalle (bzw. Nichtleiter). Daraufhin fallen die Partikel zeitlich versetzt von der Walze ab und können durch entsprechend eingestellte Trennbleche separiert werden. In **Abbildung 22** ist links das Prinzip verdeutlicht und rechts der Realaufbau zu sehen [98].

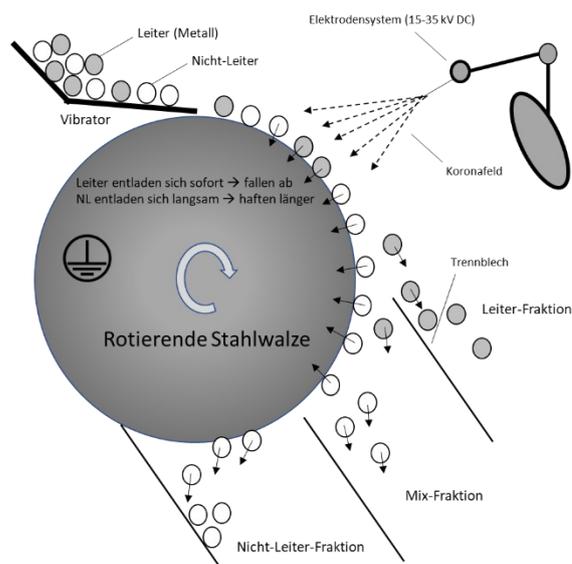


Abbildung 22: Schematischer Aufbau (links) und realer Aufbau (rechts) eines Korona-Walzenscheiders.

Es werden drei Fraktionen unterschieden. Eine Leiter-, eine Mix- und eine Nicht-Leiter-Fraktion. Diese können getrennt voneinander aufgefangen und analysiert bzw. weiterverarbeitet werden. Die Ergebnisse der Versuche sind in Kapitel 7.3.2 beschrieben.

6.3 Verwertung durch Beimischung zu SiC-Formlingen

Aufbauend auf den Grundlagen zum Werkstoff Gusseisen aus Kapitel 2.3, sollen nun der Einsatz der Siliziumkarbid-Formlinge in den Gießereien sowie deren Herstellung beschrieben werden. Daraufhin werden die experimentellen Randbedingungen der Versuche zur Beimischung von Gießereistäuben zu den Formlingen erläutert.

6.3.1 Der SiC-Formling

In Gießereien kommen als Schmelzaggregat unterschiedliche Ofentypen zum Einsatz, welche je nach Bauart und Temperatur unterschiedlich gut geeignet sind, einen bestimmten Rohstoff zu verarbeiten (siehe Kapitel 2.1.2). Während im klassischen Hochofen meist das Eisenerz zu Roheisen verarbeitet wird, dient der Kupolofen der Verarbeitung von Roheisen oder Stahlschrott zu Gusseisen. Hierfür muss der Siliziumgehalt durch Zugabe sogenannter Aufsilizierungsmittel extern erhöht werden. Ein klassischer Vertreter eines dieser Mittel ist Siliziumkarbid.

Siliziumkarbid dient in der Schmelze als Silizium- und Kohlenstoffträger. Als Bestandteil eines Formlings schmilzt es nicht direkt, sondern löst sich langsam auf. Damit ist es lange verfügbar und trägt zur keimwirksamen Vorimpfung bzw. Vorkonditionierung der Gusseisenschmelze bei (siehe Kapitel 2.4) [99]. Für eine

Anwendung in der Gießerei sind drei Parameter entscheidend: die Analytik, die Basizität und die Festigkeit. Die Analytik beschreibt die Zusammensetzung des Formlings. Neben SiC sind Quarz und Wasser Bestandteile des Formlings, welcher weiterhin durch Zement gebunden wird. Die Basizität beschreibt das Verhältnis von Calciumoxid und Magnesiumoxid zu Siliziumdioxid im Formling und wird damit entscheidend durch den Anteil an zugegebenem Quarz bestimmt. Sie muss an die Eigenschaften des Kupolofens angepasst werden. Jeder Kupolofen hat eine feuerfeste Auskleidung, welche auf einen gewissen Basizitätsbereich ausgelegt ist. Generell gilt: Je höher die benötigte Basizität, desto geringer muss der Anteil an SiC im Formling gewählt werden [100]. Für die Produktion, das generelle Handling und den Schmelzvorgang muss außerdem eine ausreichende Festigkeit gegeben sein.

6.3.2 Der SiC-Staub-Formling

In Kooperation mit dem Projektpartner GPS SIC Keßl GmbH wurden verschiedene Testreihen durchgeführt, welche in einem ersten Schritt die generelle Tauglichkeit der Beimischung von Gießereistäuben zu SiC-Formlingen testen und bei Erfolg optimieren sollten. Die Serienproduktion der Formlinge erfolgt über eine Mehrlagenfertigung. Die Maschine wird von oben mit Rohstoffen beschickt, welche dann aus dem Vorratssilo in den Füllwagen gelangen. Anschließend kommt es zu einer Formfüllung mit den Rohstoffen, welche verdichtet und als fertiger Formling auf dem Boden der Produktionshalle abgelegt werden. Am Ende der Halle angekommen, fährt der Fertiger wieder an den Startpunkt und setzt die nächste Lage auf. Das entscheidende Kriterium, welches über die Tauglichkeit einer Serienproduktion entscheidet, ist daher, dass die Formlinge zu diesem Zeitpunkt so fest und formstabil sind, dass sie ihr Eigengewicht tragen können.

Die Herstellung der einzelnen Proben innerhalb der Versuchsreihen erfolgte in Anlehnung an die Serienfertigung. Die verschiedenen Komponenten wurden gewogen, 60 Sekunden trocken gemischt, 90 Sekunden nass gemischt und anschließend in ein Hochtemperatur-Rohr mit einem Durchmesser von 7,5 cm und einer Höhe von 9,0 cm gefüllt. Nach dem Füllen wurde der Formling entformt und bei Raumtemperatur getrocknet. Nach 60 Minuten wurde die Probe mit einem Serien-Formling belastet und auf eine ausreichende Standfestigkeit überprüft. Ausgehend von der firmeninternen Basisrezeptur wurde die Formulierung wie in **Tabelle 4** angegeben angepasst. Die Rezepturen lassen sich in drei Kategorien unterteilen. Die erste Kategorie sind Formlinge mit SiC, Filterstaub mit und ohne Koksgrus (V 1 - V 4), die zweite sind mit Filterstaub und Koksgrus (V 5 - V 7) und die dritte Kategorie Formlinge aus Filterstaub (V 8 - V 9). Von besonderem Interesse sind die Versuche V 1 – V 4, da sie SiC enthalten, welches als Bestandteil der Formlinge in den Gießereien benötigt wird. Bei den Versuchen V 5 – V 9 handelt es sich um Tests, die die

Verdichtbarkeit und Festigkeit des Staubs allein und in Kombination mit Koksgrus untersuchen sollten.

Tabelle 4: Zusammensetzungen der untersuchten Rezepturen in Gew.-%. Die Basisrezeptur V 1.0 ist aus Gründen der Vertraulichkeit nicht gegeben.

Varianten	SiC 90% [%]	Filterstaub Keßl [%]	Filterstaub (Gießerei A) [%]	Koksgrus [%]	Zement [%]	Wasser [%]
V 1.0						
V 2.0	53,00	-	10,00	10,00	14,00	13,00
V 3.0	43,00	-	30,00	0,00	14,00	13,00
V 4.0	23,00	-	50,00	0,00	14,00	13,00
V 5.0	-	-	20,00	53,00	14,00	13,00
V 5.1	-	-	19,00	52,00	15,00	14,00
V 6.0	-	-	36,50	36,50	14,00	13,00
V 7.0	-	-	50,00	23,00	14,00	13,00
V 7.1	-	-	50,00	21,75	14,00	14,25
V 8.0	-	-	70,00	0,00	15,00	15,00
V 8.1	-	-	65,00	0,00	15,00	20,00
V 9.0	-	-	67,00	0,00	15,00	18,00
V 9.1	-	-	65,00	0,00	17,50	17,50
V 9.2	-	-	67,38	0,00	16,13	16,49

Als Rohstoffe kamen 90 %iges SiC, Filterstaub 4a der Gießerei A, Koksgrus, Zement und Wasser zum Einsatz. Beim untersuchten Staub handelt es sich um Staub 4a aus Anlage 3 mit einem Eisen-Gehalt von 85 %. Der Staub fällt in großen Mengen in der Putzerei an und ist aufgrund des hohen Eisengehalts für eine Rückführung besonders interessant. Die Ergebnisse sind in Kapitel 7.4.1 beschrieben.

6.3.3 Substitution von Portlandzement

Die Verwendung eines Bindemittels ist essenziell, um die benötigte Festigkeit zu erreichen. Wie bereits in Kapitel 6.3.1 erwähnt, wird hierfür, aus Gründen wie der einfachen Verarbeitung, dem günstigen Einkaufspreis sowie der hohen Verfügbarkeit, Portlandzement verwendet. Weltweit werden jährlich ca. vier Milliarden Tonnen Portlandzement produziert [101]. Die Herstellung erfolgt durch Vermahlung von Zementklinker und Kalk oder Anhydrit [102]. Die Klinker müssen bei Temperaturen von ca. 1450 °C gebrannt werden, was wiederum mit hohen CO₂-Emissionen verbunden ist [103]. Pro Tonne Alit (C₃S), ein klassischer Klinker, werden rund 580 kg CO₂ produziert. Insgesamt hat die Zementherstellung einen Anteil von ca. 8 % an den globalen Treibhausgasemissionen [101]. Eine Substitution in den Formlingen ist daher aus ökologischer Sicht erstrebenswert. Hierfür wurden zwei Alternativen untersucht: ein organisches, auf Weizenstärke basiertes Bindemittel (folgend: SBM) und eine anorganische Zementalternative, die Calciumsulfoaluminat-Klinker enthält (CSA-Zement).

6.3.3.1 Substitution durch stärkebasiertes Bindemittel

Das untersuchte stärkebasierte Bindemittel Crespotec Compact 6501 XD ist ein Produkt der Crespel & Deiters GmbH & Co. KG und wurde nach Vorversuchen zum Kompaktieren eines Gießerei-Staubs freundlicherweise zur Verfügung gestellt. Dabei handelt es sich um ein modifiziertes, kaltquellendes Bindemittel auf 100 %

Weizenbasis. Die Herstellung erfolgt durch hydrothermische Bearbeitung von Weizenmehl. Ziel der Versuchsreihe war die Überprüfung der Möglichkeit Zement im Formling durch das SBM komplett oder teilweise zu substituieren.

In der ersten Versuchsreihe (V 1 - V 4) wurde Zement vollständig durch das SBM substituiert. Dazu wurden die Mischungen trocken vorgemischt und nach erfolgter Wasserzugabe drei Minuten nachgemischt. Die weiteren Schritte sind identisch mit dem Verfahren aus Kapitel 6.3.2. Zur Überprüfung der Standfestigkeit wurde der Formling nach 60 Minuten mit einem Serienformling belastet. In einer zweiten Versuchsreihe (V 5 - V 9) wurden verschiedene Mischungen getestet, um das Verhalten des SBMs in Kombination mit Zement zu untersuchen. Diese Proben wurden nach 48, 72, 144, 168 und 192 Stunden einem Falltest aus einem Meter unterzogen. Die exakten Rezepturen sind in **Tabelle 5** aufgezeigt.

Tabelle 5: Rezepturen bei den Versuchen zur Substitution von Zement durch das SBM.

Versuch	Stärke		Zement		SiC		Staub		Wasser	
	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]
Stärke										
V 1	2,50	25,00	-	-	71,00	710,00	9,00	90,00	17,50	175,00
V 2	3,00	30,00	-	-	71,00	710,00	8,50	85,00	17,50	175,00
V 3	4,00	40,00	-	-	70,00	700,00	7,50	75,00	18,50	185,00
V 4	5,00	50,00	-	-	69,50	695,00	7,00	70,00	18,50	185,00
Zement-Mischung										
V 5	2,50	100,00	0,00	0,00	71,00	2840,00	9,00	360,00	17,50	700,00
V 6	1,90	76,00	3,50	140,00	68,60	2744,00	9,00	360,00	17,00	680,00
V 7	1,25	50,00	7,00	280,00	66,75	2670,00	9,00	360,00	16,00	640,00
V 8	0,63	25,00	10,50	420,00	64,87	2595,00	9,00	360,00	15,00	600,00
V 9	0,00	0,00	14,00	560,00	63,00	2520,00	9,00	360,00	14,00	560,00

In allen Versuchen ist stets weniger SBM enthalten als in einem Portlandzement gebunden Standard-Formling, da es aus ökonomischer Sicht keinen Sinn machen würde, einen standfesten Formling herstellen zu können, der Anteile von über 5 % an SBM benötigen würde. Da eine Einsparung von Portlandzement im Produktionsprozess aus ökologischer Sicht generell angestrebt wird, wurden auch SBM-Zement-Mischungen getestet. So konnte getestet werden, ob sich in Kombination Synergien ergeben und der Anteil beider Stoffe möglichst gering gehalten werden kann. Die Ergebnisse zu den Versuchen sind in Kapitel 7.4.2.1 beschrieben.

6.3.3.2 Substitution durch CSA-Zement

In Kooperation mit dem ForCYCLE II Projekt HB(Ca)V wurden Möglichkeiten der Substitution von Portlandzement durch CSA-Zement untersucht.

CSA-Zement ist ohne Zusätze in der Regel nur etwa 20 Minuten lang verarbeitbar, bis eine Festigkeitsentwicklung eintritt. Die verkürzten Zeitabläufe erfordern daher einen effizienten Umgang bei der Verwendung des Bindemittels. Zugabe von Additiven wie Wein- oder Citronensäure hemmen den Kristallwachstum an der

Oberfläche, verzögern den Erhärtungsprozess und können die Verarbeitungszeit auf ca. 60 Minuten verlängern [104, 105]. CSA-Zement benötigt weniger Calcium als Portlandzement, sodass die während der Produktion entstehende Menge CO₂ bei der Kalzinierung von Calciumcarbonaten in Kalkstein, Kreide und Marmor geringer ist. Die Einsparungen der Nettoemissionen liegen zwischen 25 bis 35 %. Studien haben zudem gezeigt, dass CSA-Zement auch bei hoher Anforderung der Frühfestigkeit geeignet ist, sowie als Zusatz zu anderem Bindemittel zur Kontrolle von Schrumpfung oder Dehnung. Aktuell sind die Kosten für CSA-Zement jedoch noch höher als für Portlandzement [101].

Für die Versuchsreihe wurde der CSA-Zement „Buzzi Unicem Next Base SR03“ von Dyckerhoff verwendet. Bei diesem Zement handelt es sich um ein hydraulisches Bindemittel auf Calciumsulfoaluminat-Klinker-Basis, der aus einer Mischung von Bauxit, Gips und Kalk bei einer Temperatur von 1350 °C gebrannt und anschließend zu Anhydrit gemahlen wird [106].

Tabelle 6 zeigt die zur Versuchsreihe zugehörigen Rezepturvarianten. Dabei ist Probe V 1 der Grundsatzversuch zur Abschätzung der Verarbeitungsdauer. Als Prüfkriterien werden die für die Serienproduktion relevanten Aspekte der Standfestigkeit nach 60 min und die Endfestigkeit ab 48 h untersucht.

Tabelle 6: Rezepturen der Versuche zur Substitution von Portlandzement durch CSA-Zement.

Versuche CSA-Zement	CSA-Zement		Weinsäure		SBM		Portlandzement		SiC		Staub 4a		Wasser	
	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]
V 1	13,00	130,00	-	-	-	-	-	-	65,00	650,00	9,00	90,00	13,00	130,00
V 2	13,00	260,00	-	-	-	-	-	-	64,00	1280,00	9,00	180,00	14,00	280,00
V 3	10,00	200,00	-	-	-	-	-	-	64,00	1280,00	12,00	240,00	14,00	280,00
V 4	10,00	200,00	-	-	-	-	-	-	64,00	1280,00	11,00	240,00	15,00	300,00
V 5	7,50	150,00	-	-	-	-	-	-	65,25	1305,00	14,25	265,00	13,00	260,00
V 6	5,00	100,00	-	-	-	-	-	-	66,50	1330,00	16,00	290,00	12,50	250,00
V 6.1	-	-	-	-	-	-	5,00	250,00	68,60	3400,00	13,50	725,00	12,90	648,00
V 6.2	5,00	250,00	-	-	-	-	-	-	68,60	3400,00	13,50	725,00	12,90	648,00
V 7	2,50	50,00	-	-	-	-	-	-	67,75	1335,00	17,75	315,00	12,00	240,00
V 8	10,00	200,00	1,00	20,00	-	-	-	-	63,25	1265,00	11,25	225,00	14,50	290,00
V 9	5,00	100,00	1,00	20,00	-	-	-	-	66,75	1335,00	14,75	295,00	12,50	250,00
V 9.1	5,00	250,00	0,05	3,00	-	-	-	-	68,55	3400,00	13,50	725,00	12,90	625,00
V 10	-	-	-	-	-	-	14,00	280,00	62,50	1250,00	10,50	210,00	13,00	260,00
V 11	-	-	-	-	1,90	95,00	3,50	175,00	68,60	3430,00	10,00	450,00	16,00	790,00
V 11.1	3,50	175,00	-	-	1,90	95,00	-	-	68,60	3430,00	10,00	450,00	16,00	790,00

Die Versuche V 1 bis V 3 dienen als Vorversuche zur Bestimmung der Festigkeitsentwicklung. In V 1 wurde das Abbindeverhalten untersucht, dazu wurde im Abstand von fünf Minuten ein Formling hergestellt, zerstört und das Material wieder durchgemischt. In den Versuchen V 2 und V 3 wurde die Festigkeitsentwicklung innerhalb der ersten 60 Minuten getestet, indem die Formlinge mit einem Serienformling im Abstand von fünf Minuten belastet wurden. Aufbauend auf den daraus resultierenden Ergebnissen wurde die Zusammensetzung der Formlinge aus den Versuchen V 4 - V 5 festgelegt. Dabei sollte zum einen der Portlandzementgehalt schrittweise reduziert werden (V 4 - V 7) und zum anderen die Auswirkung der Festigkeiten durch die Zugabe von Weinsäure (V 8 - V 9) getestet werden.

Die Weinsäure wurde als Verzögerer eingesetzt und sollte das Aushärten des Formlings verlangsamen. Da CSA-Zement deutlich schneller aushärtet als Portlandzement und die Bearbeitungszeit minimiert, wurde auch die Möglichkeit der Verwendung eines Verzögerers untersucht.

Die Versuche V 6.1, 6.2, 9.1, 11 und 11.1 zeigen, wie sich die unterschiedlichen Zugaben auf das Festigkeitsverhalten zwischen 48 h und 196 h auswirken. Dazu wurden von jeder Zusammensetzung in Summe sieben Formlinge hergestellt. Fünf dieser Formlinge wurden für Falltests aus 1,5 m Höhe nach zwei, drei, vier, sieben und acht Tagen verwendet. Die weiteren Formlinge wurden für die Bestimmung der Festigkeitswerte genutzt (vgl. Kapitel 6.3.4). Die Ergebnisse und Auswertungen der CSA-Zement-Versuchsreihen sind in Kapitel 7.4.2.2 beschrieben.

6.3.4 Festigkeitsversuche

Nach Zugabe der SiC-Formlinge in den Kupolofen müssen diese bis zu einer Stunde stabil bleiben und dürfen nicht direkt schmelzen. Erst nachdem sich alle verwendeten Zuschlagsstoffe in der Schmelzzone des Ofens befinden, soll der Formling schmelzen und sich mit den anderen Bestandteilen vermischen. Die Festigkeit des Formlings ist daher neben Faktoren wie der Basizität entscheidend. Zudem werden in der Serienproduktion mehrere Formlinge übereinandergestapelt (vgl. Kapitel 5.1) und transportiert. Dabei muss gewährleistet werden, dass der Formling im Verlauf des gesamten Prozesses formstabil bleibt.

Für eine bessere Vergleichbarkeit hinsichtlich der späteren Anwendung der Staub-Formlinge wurden die Druckfestigkeiten verschiedener Rezepturen bestimmt. Basierend auf den vorangehenden Versuchsreihen wurden neben dem Standard SiC-Formling weitere Zusammensetzungen der Formlinge aus verschiedenen Versuchsreihen ausgewählt, um deren Festigkeitsverhalten zu untersuchen. Ein Vergleich der unterschiedlichen Festigkeitsverläufe soll Auskunft über das zu erwartende Verhalten im Schmelzbetrieb geben. In **Tabelle 7** sind alle zu untersuchenden Formlinge und deren Zusammensetzung aufgeführt.

Tabelle 7: Zusammensetzungen der Formlinge, die auf Druckfestigkeit untersucht wurden.

Festigkeitsversuche	CSA-Zement	Weinsäure	SBM	Portlandzement	SiC	Staub 4a	Wasser	Koksgrus
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
F 1 - Standardformling	Basisrezeptur							
F 2 - SiC + Gießereistaub	-	-	-	14,00	53,00	10,00	13,00	10,00
F 3 - SBM (normale Trocknung)	-	-	2,50	-	69,50	9,50	18,50	-
F 4 - SBM (24 h Ofentrocknung)	-	-	2,50	-	69,50	9,50	18,50	-
F 5 - CSA-Zement	10,00	-	-	-	64,00	11,00	15,00	-
F 6 - CSA-Zement	7,50	-	-	-	65,25	14,25	13,00	-
F 7 - CSA-Zement	5,00	-	-	-	66,50	16,00	12,50	-
F 8 - CSA-Zement	2,50	-	-	-	67,75	17,75	12,00	-
F 9 - Portlandement	-	-	-	5,00	68,60	13,50	12,90	-
F 10 - CSA-Zement	5,00	-	-	-	68,60	13,50	12,90	-
F 11 - CSA-Zement	5,00	1,00	-	-	66,75	14,75	12,50	-
F 12 - SBM + Portlandzement	-	-	1,90	3,50	68,60	10,20	15,80	-
F 13 - SBM + CSA-Zement	3,50	-	1,90	-	68,60	10,20	15,80	-

Zunächst wurden die Oberflächen der Formlinge mit der Trennmaschine Metkon Servocut 402 bearbeitet. Für eine gerade, gleichmäßig ebene Oberfläche wurden die Staub-Formlinge mit der Nasstrenn-Schleifmaschine von beiden Seiten geschliffen. Durch eine ebenmäßige Oberfläche wird eine genaue präzise Bestimmung der Druckfestigkeit gewährleistet. Nach der Bearbeitung der Oberflächen der Formlinge wurden Druckfestigkeitsversuche durchgeführt. Diese Versuche erfolgten mit der ZwickRoell Stand-Prüfmaschine Z250, die eine maximale Kraft von 250 kN aufbringt. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 1 mm/min, bei einer Vorkraft von 10 N. Bei einer Verformung von > 80 % beendete die Maschine den Versuch.

7. Auswertung

Aufbauend auf den in den Kapiteln 5 und 6 erläuterten Methoden werden die Ergebnisse in den folgenden Unterkapiteln vorgestellt.

7.1 Stauberfassung

Für die Stauberfassung wurden die Daten der vier Partnergießereien für das Jahr 2020 gesammelt und mittels Sankey-Diagrammen aufgearbeitet. Da es sich dabei um firmeninterne Daten handelt, sind die Ergebnisse so dargestellt, dass sie sich nicht der jeweiligen Gießerei zuordnen lassen. Das Jahr 2020 wurde exemplarisch gewählt, da es sich zum Zeitpunkt der Datenerhebung um die aktuellsten und vollständigsten Datensätze handelte. Im Vordergrund steht die Anwendung der Digitalisierung und Visualisierung in Form von Sankey-Diagrammen und das Potenzial, das in der Datenaufarbeitung steckt. Um Repräsentativität zu gewährleisten, wird in der Diskussion anhand einer Gießerei auf Unterschiede zu den Jahren 2018 und 2019 eingegangen (vgl. Kapitel 7.1.5).

Nachfolgend werden zu jeder der vier Partnergießereien je zwei Diagramme dargestellt. Das erste zeigt die Zusammenhänge zwischen Staubart, Anfallstelle und Entsorgungsart. Zusätzlich werden auch die deklarierten AVV-Schlüssel aller Stäube aufgezeigt. In einer zweiten Darstellung wird das Rohstoffpotenzial der Stäube visualisiert. Hierzu wurden sämtliche Stäube mittels ICP-OES analysiert (Anlage 3). Weiterhin wird in der Darstellung zwischen Eisen, weiteren Metallen und anderen Bestandteilen aufgeschlüsselt. Letztere ergeben sich, da durch den Aufschluss und die Analyse nicht alle Bestandteile identifiziert werden können (z.B. SiO_2). Innerhalb der weiteren Metalle werden die Anteile herausgestellt. Diese Kante wurde aufgrund der geringen Menge überproportional dargestellt und kann folglich nicht mit den restlichen Kanten des Diagramms verglichen werden. Bei einem Vergleich der Sankey-Diagramme der Kooperations-Gießereien ist darauf zu achten, dass die Proportionalitätsfaktoren zwischen den dargestellten Mengen und Kanten unterschiedlich sind.

In Anlage 4 finden sich alle der Staubproblematik zugrundeliegenden Werte und Daten. Ein Vorteil bei der Erstellung der Diagramme ist die Möglichkeit der Verknüpfung mit Excel, wodurch die Werte direkt aus den Tabellen übernommen werden und manuellen Fehlern vorgebeugt werden kann. Die Daten der Anfallstellen und Staubmengen können wiederum als Input des Modells genommen werden (siehe Kapitel 7.5.2).

7.1.1 Gießerei A

Die Staubanfallmenge der Gießerei A beläuft sich auf circa 2.760 t. Die beiden größten Fraktionen aus der Nasswäscher-Abgasreinigung am Kupolofen und aus der

Absaugungsanlage von Eirich bilden jeweils 1000 t des Anfalls, was in Summe ca. 72 % des Gesamtanfalls ausmacht. Eisen-Stäube aus den Strahlanlagen WTS, DT20 und CT3, wie aus der Putzerei wurden gemeinsam erfasst und bilden insgesamt 600 t ab (ca. 22 %). Dabei wurde deren Verteilung auf die genannten Strahlanlagen und Putzereien nur schätzungsweise angegeben. Für den Aluminiumoxid-Staub aus der Strahlanlage ist anzumerken, dass sich die Mengenabschätzung aufgrund fehlender Entsorgung in den letzten Jahren problematisch gestaltet. Die gemeldeten Anfallstellen, AVV-Schlüssel und Entsorgungsmethoden von Gießerei A sind in **Abbildung 23** dargestellt.

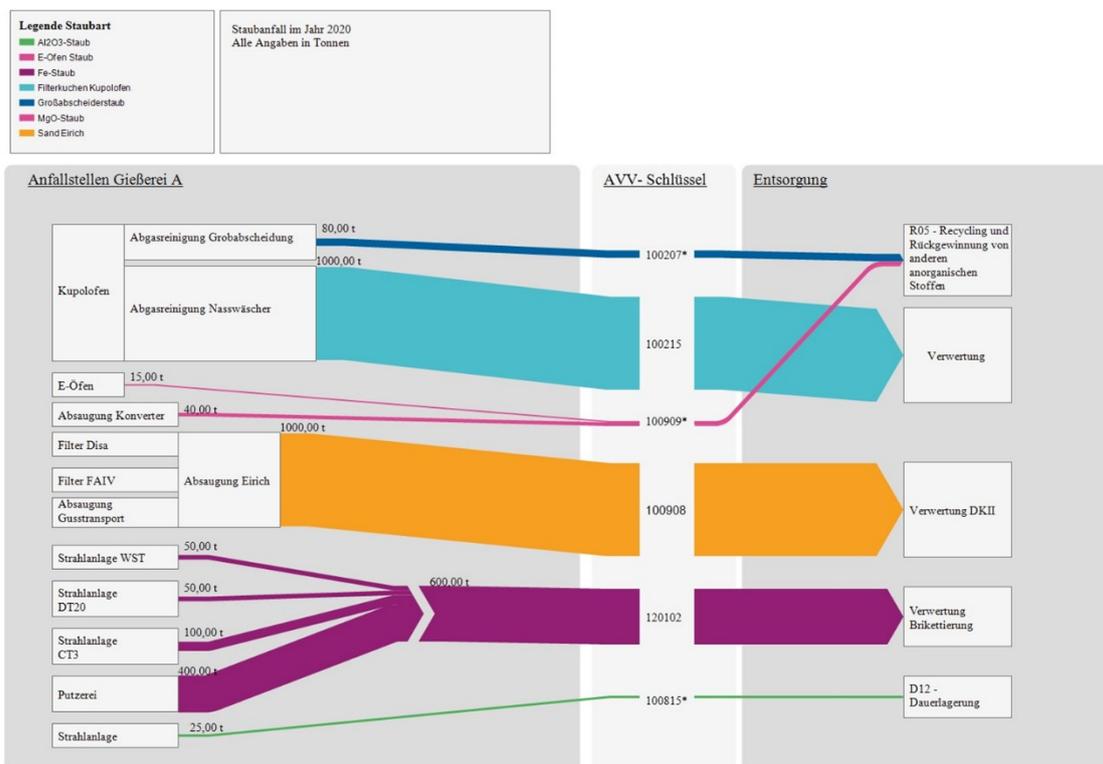


Abbildung 23: Sankey-Diagramm der Anfallstellen und Entsorgung bei Gießerei A im Jahr 2020.

In Anlage 2 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (aktuelle Fassung seit dem 09.10.2020) werden die Begriffe R05 und D12 erläutert. Das Verwertungsverfahren R05 steht dabei für das Recycling und die Rückgewinnung von anderen anorganischen Stoffen. D12 beschreibt ein Beseitigungsverfahren durch Dauerlagerung.

Abbildung 24 stellt die Abschätzung des Rohstoffpotenzials der Stäube von Gießerei A dar. In den 2.760 t Staub sind circa 485,33 t Eisen enthalten, dies entspricht etwa 18 % des gesamten Staubanfalls. Der Anteil weiterer verschiedener Metalle beläuft sich auf 153,59 t und somit auf 6 %.

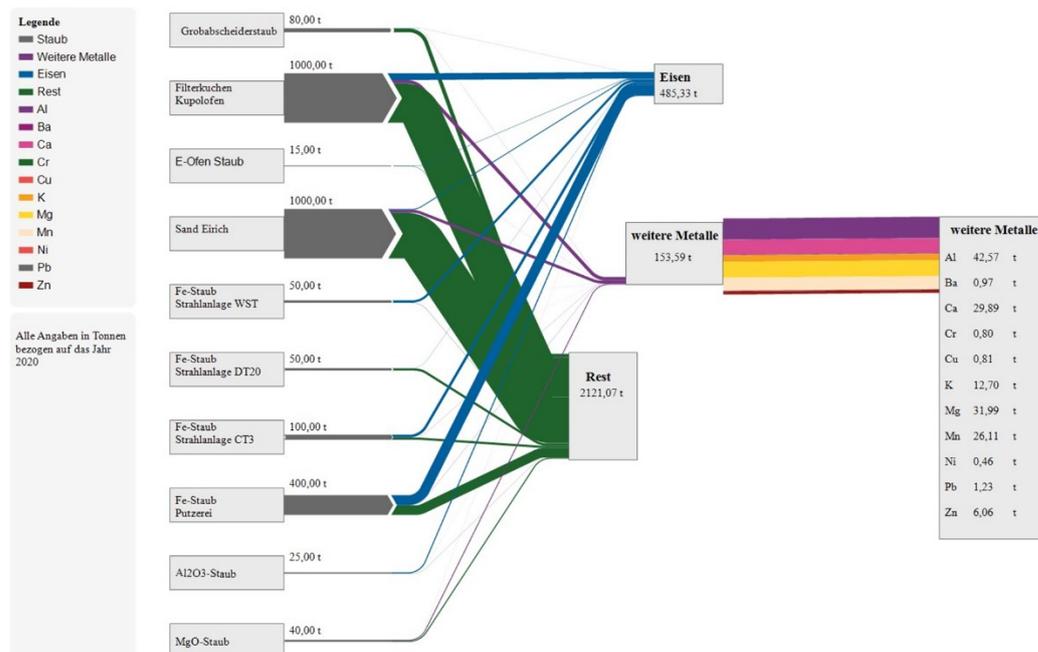


Abbildung 24: Sankey-Diagramm des Rohstoffpotenzials der Stäube von Gießerei A im Jahr 2020.

Innerhalb der weiteren Metalle wird deutlich, dass Al mit 42,57 t (ca. 28 %), Mg mit 31,99 t (ca. 21 %), Ca mit 29,89 t (ca. 19 %) und Mn mit 26,11 t (ca. 17 %) die größten Anteile besitzen (ca. 85 %).

Die restlichen 2.121,07 t (77 % der Gesamtmenge) setzen sich aus anderen Elementen und Verbindungen zusammen, die beim Aufschluss der Stäube und der Analyse nicht erfasst wurden. Hierbei handelt es sich vor allem um Sande.

7.1.2 Gießerei B

Die gemeldeten Abfallstellen, AVV-Schlüssel und Entsorgungsmethoden der Gießerei B werden in **Abbildung 25** dargestellt. Der gesamte Staubanfall von Gießerei B beläuft sich auf 1193,16 t im Jahr 2020. Dabei wurden drei Staubarten angegeben, die Gemische aus verschiedenen Stäuben sind. Hauptanfallstellen sind der Schmelzbetrieb, die Formerei und die Putzerei. Innerhalb der Bereiche wurde nicht weiter unterschieden. Aus diesem Grund konnten die Anteile der verschiedenen Stäube an den Gemischen und deren Anfallstellen innerhalb des Schmelzbetriebs, der Formerei und der Putzerei nicht differenzierter betrachtet werden. Die Formerei verursacht mit 46 % den größten Anteil des Staubanfalls, gefolgt vom Schmelzbetrieb mit ca. 38 % und der Putzerei mit ca. 16 %.

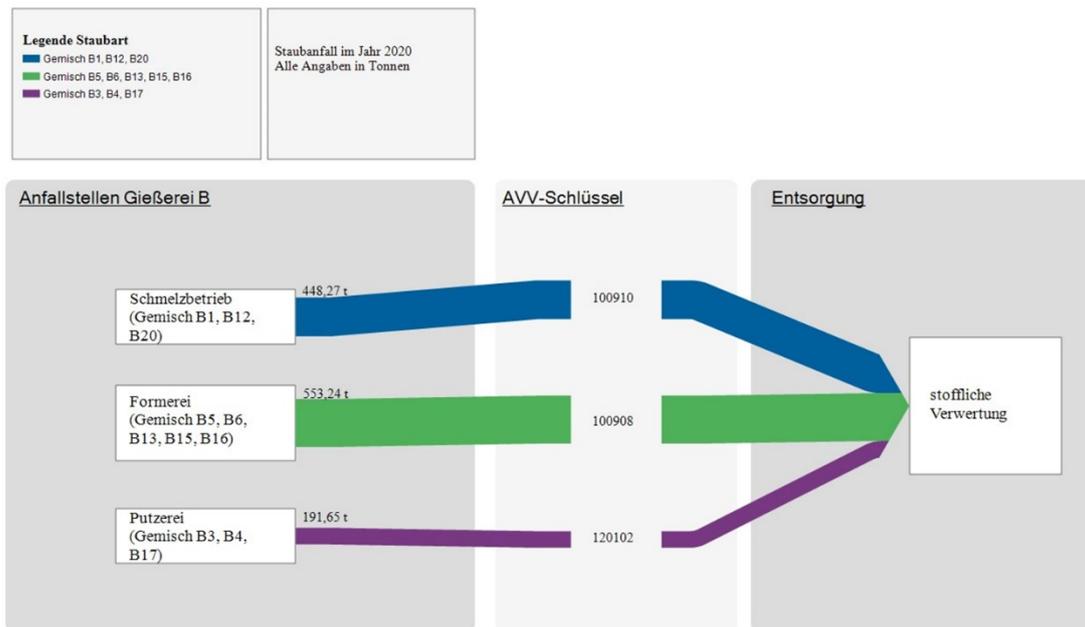


Abbildung 25: Sankey-Diagramm der Anfallstellen und Entsorgung bei Gießerei B im Jahr 2020.

Das Rohstoffpotenzial der Stäube von Gießerei B wird in **Abbildung 26** verdeutlicht. Eisen bildet hier mit 266,52 t etwa 22 % der Gesamtmenge ab. Die Gemische B1, B12, B20 mit 120,39 t sowie B3, B4 und B17 mit 133,96 t weisen einen hohen Eisengehalt auf. Zusätzlich zeigen die Gemische B1 und B12 mit ca. 45,11 t (100,64 kg/t) einen hohen Zinkgehalt.

Beim Staubanfall der Gießerei B besitzen Zn mit 45,48 t, Mn mit 13,95 t, Ca mit 11,95 t und Mg mit 11,76 t die größten Anteile (83,14 t). Bezogen auf die weiteren Metalle entspricht dies ca. 41 % für Zn, 13 % Mn und 11 % Ca und Mg. Somit besitzen diese vier Metalle einen Anteil von etwa 75 % bezogen auf die gesamte Menge der wM.

Die restlichen 816,37 t stellen einen Anteil von etwa 68 % dar, welche wie bei Gießerei A nicht weiter aufgeschlüsselt und analysiert wurden.

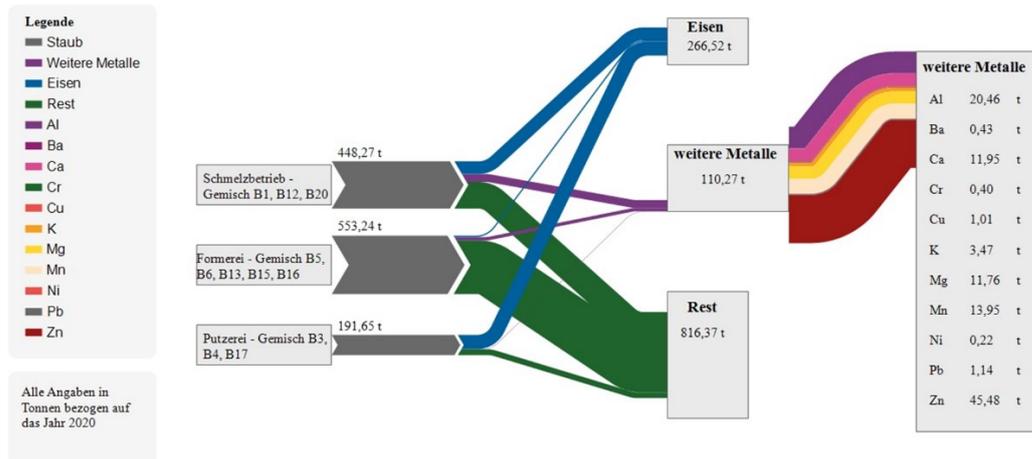


Abbildung 26: Sankey-Diagramm des Rohstoffpotenzials der Stäube von Gießerei B im Jahr 2020.

7.1.3 Gießerei C

Gießerei C meldete für das Jahr 2020 einen Staubanfall von 635,62 t. **Abbildung 27** zeigt die gemeldeten Anfallstellen, AVV-Schlüssel und Entsorgungsmethoden. Der größte Anteil des anfallenden Staubes mit etwa 47 % entsteht hier im Filtersystem der Putzerei. Als mengenmäßig zweitgrößte Anfallstelle wird der E-Ofen genannt, mit ca. 20 % des Staubes. Alle anfallenden Stäube werden von Gießerei C mit dem AVV-Schlüssel 100910 deklariert.

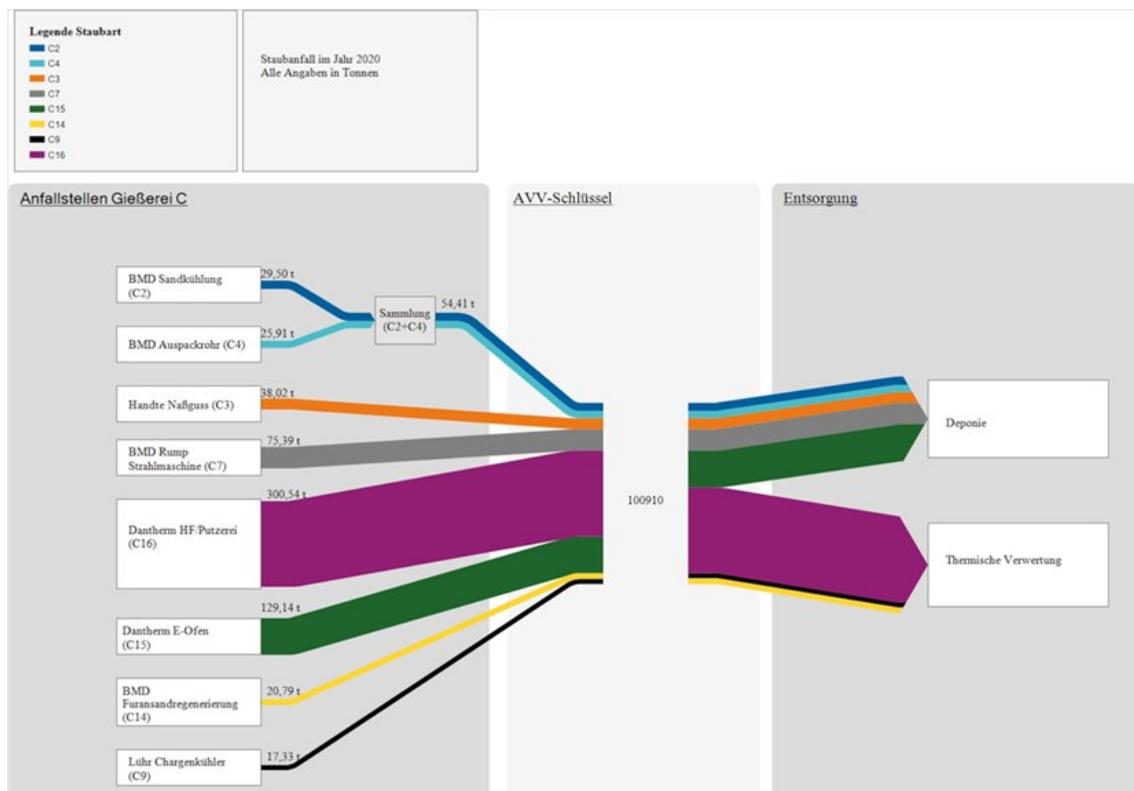


Abbildung 27: Sankey-Diagramm der Anfallstellen und Entsorgung bei Gießerei C im Jahr 2020.

Abbildung 28 zeigt das abgeschätzte Rohstoffpotenzial der Stäube von Gießerei C. Bei den Analyseergebnissen von Staub C7 wurde angemerkt, dass die Magnesiumwerte im Jahresvergleich hohe Abweichungen aufwiesen. Die Proben aus dem Jahr 2019 weisen mit 55,16 t (55,08 g/kg) einen deutlichen höheren Gehalt an Magnesium auf als die Staubproben aus dem Jahr 2020 mit 18,14 t (18,09 g/kg) Magnesium. In der gesamten Menge des Staubes von 635,62 t sind 97,44 t mit ca. 15 % Eisen enthalten. Die weiteren Metalle haben einen Anteil von 34,76 t an der gesamten Staubmenge, also etwa 5 %.

Hier besitzen Mg mit 20,17 t (58 %), Al mit 7,20 t (21 %), Ca mit 3,27 t (9%) und K (5 %) mit 1,58 t die größten Anteile (32,22 t) bezogen auf die Kategorie der weiteren Metalle. Die vier Metalle haben einen Anteil von ca. 93 % bezogen auf die gesamte Menge der wM. Die wM haben einen Anteil von ca. 5 % an der gesamt anfallenden Staubmenge. Zn ist das fünfthäufigste Metall in dieser Kategorie mit einem Anteil von 1,09 t, ca. 3 % der Kategorie der wM und etwa 0,5 % bezogen auf die gesamte Menge Staub von Gießerei C.

Die restlichen 503,42 t (ca. 79 %) wurden nicht analysiert.

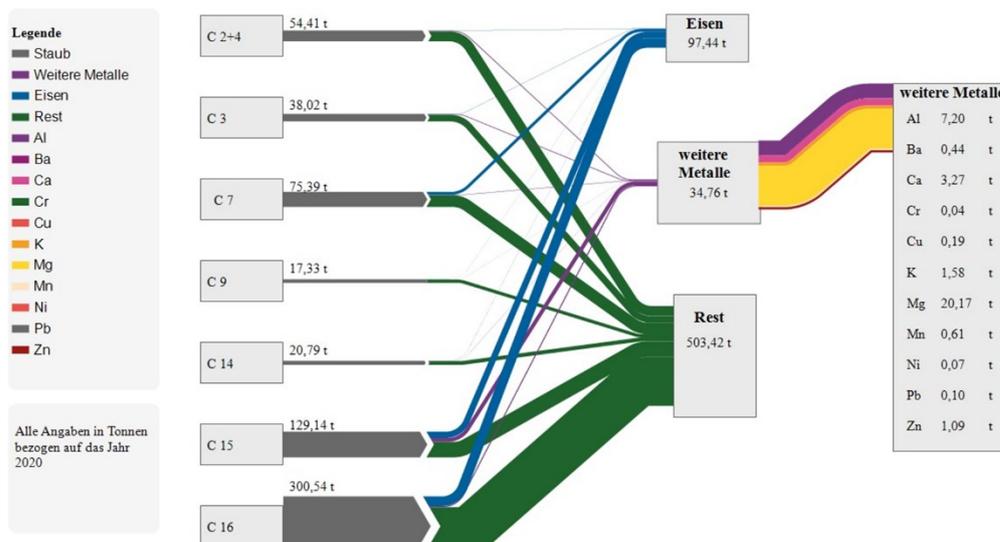


Abbildung 28: Sankey-Diagramm des Rohstoffpotenzials der Stäube von Gießerei C im Jahr 2020.

7.1.4 Gießerei D

Die gemeldeten Anfallstellen, AVV-Schlüssel und Entsorgungsmethoden von Gießerei D sind in **Abbildung 29** dargestellt. Für das Jahr 2020 wurde eine gesamte Staubanfallmenge in Höhe von 540 t gemeldet. Hierbei fielen 300 t (ca. 55 %) auf die Staubaufbereitung, 160 t (ca. 30 %) auf die Putzerei und die restlichen 80 t (ca. 15 %) auf den E-Ofen. Alle Staubarten wurden mit dem AVV-Schlüssel 100910 deklariert.

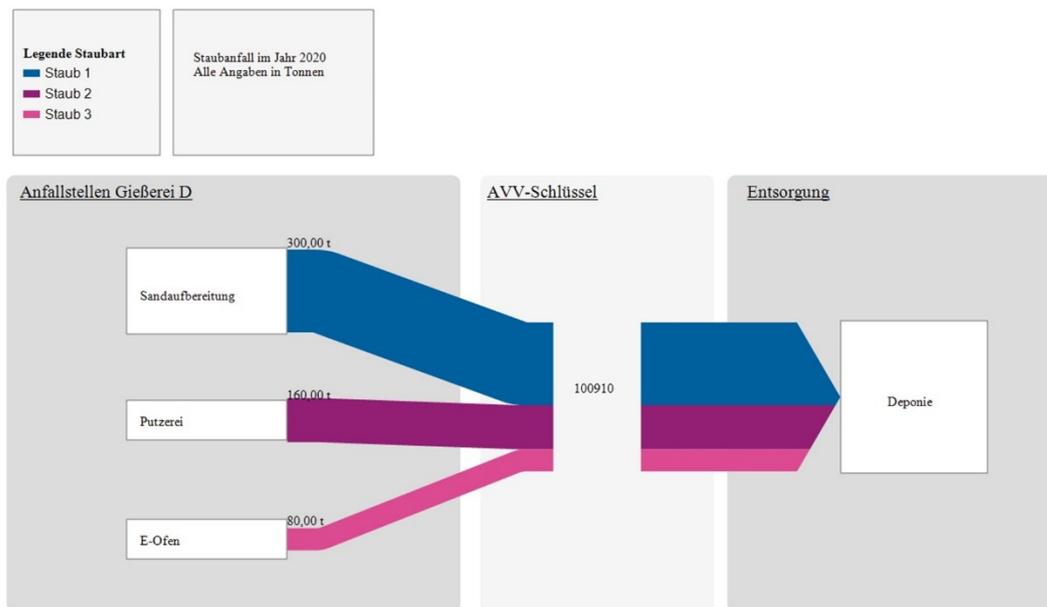


Abbildung 29: Sankey-Diagramm der Anfallstellen und Entsorgung bei Gießerei D im Jahr 2020.

Die abgeschätzten Rohstoffpotenziale der anfallenden Stäube von Gießerei D sind in **Abbildung 30** dargestellt. Von den gesamten 540 t Staub sind etwa 62 t (ca. 11%) Fe-Staub deponiert worden. Der Staub aus dem E-Ofen weist einen erhöhten Zinkgehalt von 15,75 t (196,92 g/kg) auf. Der Anteil der verschiedenen weiteren Metalle beläuft sich auf ca. 38,52 t (ca. 7 %).

Im gesamten Staub der Gießerei D besitzen Zn mit 15,87 t (41 %), Mg mit 5,81 t (ca. 15 %), Ca mit 5,70 t (ca. 15 %) sowie Al mit 4,86 t (ca. 13 %) die größten Anteile bezogen auf die Kategorie der weiteren Metalle (ca. 84 %). Die wM haben einen Anteil von ca. 6 % an der gesamt anfallenden Staubmenge. Zink hat einen Anteil von 3 % bezogen auf die Gesamtmenge Staub.

Die restlichen 439,83 t setzen sich aus nicht aufgeschlossenen und nicht analysierten Elementen und Verbindungen zusammen und bilden 81 % der gesamten Staubanfallmenge.

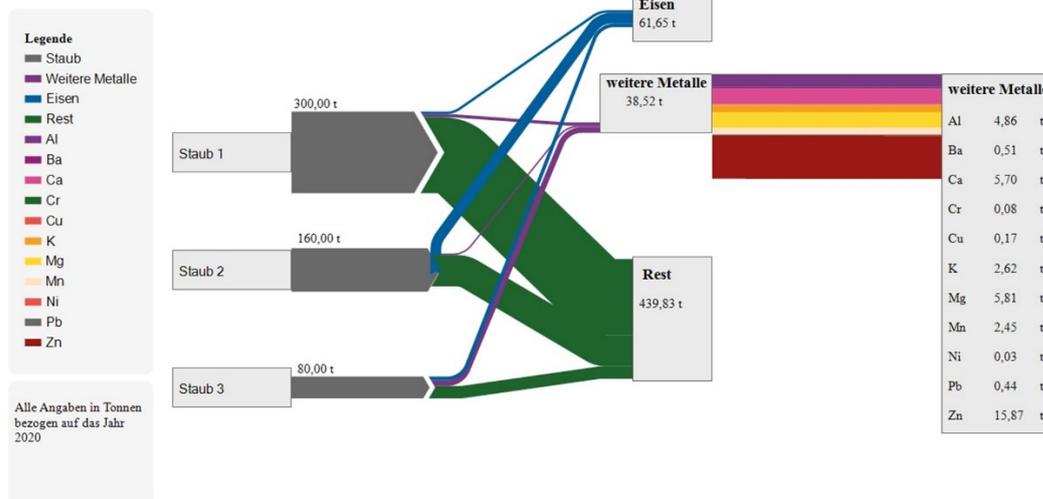


Abbildung 30: Sankey-Diagramm des Rohstoffpotenzials der Stäube von Gießerei D im Jahr 2020.

7.1.5 Diskussion der Stauberfassung

Die Analyse und Visualisierung der Stauberfassung verdeutlicht die Problematik hinter der Gießereistaub-Entsorgung: Jedes Unternehmen hat eine unterschiedliche Arbeitsweise und differenziert sich folglich auch in der Abfallführung, Methodik der Erfassung und in den Angaben des Staubanfalls. Die Gießereien B und D geben als Anfallstellen die Bereiche Schmelzbetrieb und Putzerei an. Die Gießereien C und D ermöglichen wiederum eine tiefere Betrachtungsweise durch prozessabhängige Deklaration der jeweiligen Maschinen, die am Prozess beteiligt sind. Eine unternehmensunabhängige, definierte Art der Erfassung ist hier erstrebenswert. Eine optimierte Abfallführung und potenzielle Synergien können so unternehmensübergreifend leichter identifiziert werden.

Für alle Gießereien zeigt sich, dass die anfallenden Stäube je nach Fraktion oft eisenreich sind. Der Anteil ist stets höher als der anderer Metalle, was grundlegend auf die verwendeten Materialien wie Gusseisen und Stahlguss zurückzuführen ist. Die Betrachtung der Kategorie der wM zeigt, dass in einigen Stäuben größere Mengen an Zink, Aluminium oder Magnesium enthalten sind. Diese Bestandteile können z.B. auf verwendete Aluminium- und Magnesiumgusslegierungen oder Zinkdruckguss zurückgeführt werden.

Eine Betrachtung der Staubanfalldaten der Jahre 2018 und 2019 zeigt außerdem bei allen Unternehmen eine deutliche Abnahme, was wiederum mit der deutlich eingeschränkten Produktion, ausgelöst durch die COVID19-Pandemie, korreliert. In der ganzen Gießerei-Branche kam es aufgrund der wirtschaftlichen Folgen zu Produktionsausfällen und Kurzarbeit. Die von Gießerei C gemeldete Gesamtmenge des Staubanfalls lag im Jahr 2018 bei ca. 1.232 t, 2019 bei ca. 1.002 t und 2020 bei ca. 636 t. Bei einer Erholung des Marktes ist davon auszugehen, dass sich der Wert wieder den Vorjahreswerten angleicht.

Für die Identifizierung einer praktischen Methode der Wiederverwertung zeigen die Ergebnisse der Stauberfassung, dass sich die Methodik an der Heterogenität der Stäube orientieren muss, um für die Gießereien ausreichend große Mengen verarbeiten zu können. Das Auftreten der inhomogenen Stoffströme ist ohne enorme logistische und finanzielle Aufwände nicht vermeidbar und stellt dann ein Problem dar, wenn der Prozess an Bedingungen geknüpft ist, die durch eine exakte chemische Zusammensetzung des Input-Stroms vorgegeben werden.

7.2 Chemische und physikalische Charakterisierung

Von den vier Partnergießereien wurden an 24 Anfallstellen Proben genommen und analysiert. Die Daten waren Grundlage der Digitalisierung und weiterer experimenteller Überlegungen. Sollten in Stoffströmen bestimmte Grenzen an Schwermetallen überschritten werden, konnten diese frühzeitig identifiziert werden. Die Analysen haben gezeigt, dass generell drei verschiedene Arten an Stäuben unterschieden werden können: eisenreiche Fraktionen, quarzreiche Fraktionen und Mischformen. Wenn quarzreiche Fraktionen mit Königswasser aufgeschlossen und analysiert wurden, so war der Gesamtanteil an identifizierten Elementen gering, da SiO_2 gegenüber Königswasser beständig ist. Für die Quantifizierung des Quarzanteils wurde daher ein Flusssäureaufschluss nach Kapitel 6.1.1 einer Mischprobe aus verschiedenen Stäuben durchgeführt, welche einen SiO_2 -Anteil von 65 Gew.-% ergeben hat. Die gesamte Analyse ist in Anlage 3 zu sehen. Von einzelnen Anfallstellen wurden in einer Potenzialanalyse der bifa Umweltinstitut GmbH bereits 2015 Analysen durchgeführt. Diese Daten sind ebenfalls in Anlage 3 zu sehen.

Um den organischen Anteil im Staub zu bestimmen wurde eine Elementaranalyse von zwei Mischproben durchgeführt. Der Mittelwert einer Dreifachbestimmung lag bei beiden Proben zwischen 10 und 11 Gew.-%.

Eine Siebanalyse wurde exemplarisch von Staub 4d durchgeführt und hat ergeben, dass sich die Teilchengröße im Bereich von 75 nm bis 720 nm befindet (siehe Anlage 5).

7.3 Versuche zur Staubaufbereitung

7.3.1 Bioleaching

Aufbauend auf den theoretischen Grundlagen aus Kapitel 6.2.1 wurden drei Biolaugungsversuche durchgeführt. Der erste Versuch fand mit 2 % Feststoffbelastung im Schüttelkolben, der zweite und dritte Versuch mit 5 % bzw. 10 % Feststoffbelastung im Bioreaktor statt. Aus den regelmäßig entnommenen Flüssigproben der chemischen und biologischen Laugung konnten folgende Metalle detektiert werden: Al, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, As, Pb, Mg, Ca, Sr und Ba. Während die gemessenen Werte für Eisen im g/L Bereich lagen, lagen alle anderen

gemessenen Elemente im mg/L Bereich. Aufgrund der hohen Konzentrationsunterschiede und der Überlagerung mit Eisen konnten die Messwerte daher nicht kalibriert und quantifiziert werden. Dennoch lassen die gemessenen Daten folgende qualitative Aussagen zu:

Es ist kein Unterschied zwischen den Ansätzen der biologischen Laugung und der chemischen Laugung zu erkennen. Während bei der Kolbenlaugung mit 2 % Feststoffbelastung Fe^{3+} -Ionen detektiert werden konnten, also mikrobielle Aktivität vorlag (vgl. **Abbildung 21**), konnten in den Versuchen mit 5 % und 10 % Feststoffbelastung fast nur Fe^{2+} -Ionen detektiert werden. Die Mikroorganismen waren also nicht aktiv. Parallele Versuchsansätze mit Pyrit als Positivkontrolle zeigten mikrobielle Aktivität, so dass davon auszugehen ist, dass der Gießereistaub selbst ab einer Feststoffbelastung von 2-5 % hemmend auf die Bakterien wirkt. Ein Grund hierfür könnte ein zu hoher Anteil an elementar vorliegendem Eisen sein, mit dem die Bakterien in der Natur nicht in Berührung kommen und den Kreislauf, der auf Redox-Prozessen beruht, stört. Eine mineralogische Untersuchung mittels XRD konnte diese Vermutung bestätigen (siehe **Abbildung 31**).

Die Aufbereitung mittels Bioleaching am gewählten Gießereistaub war somit nicht erfolgreich.

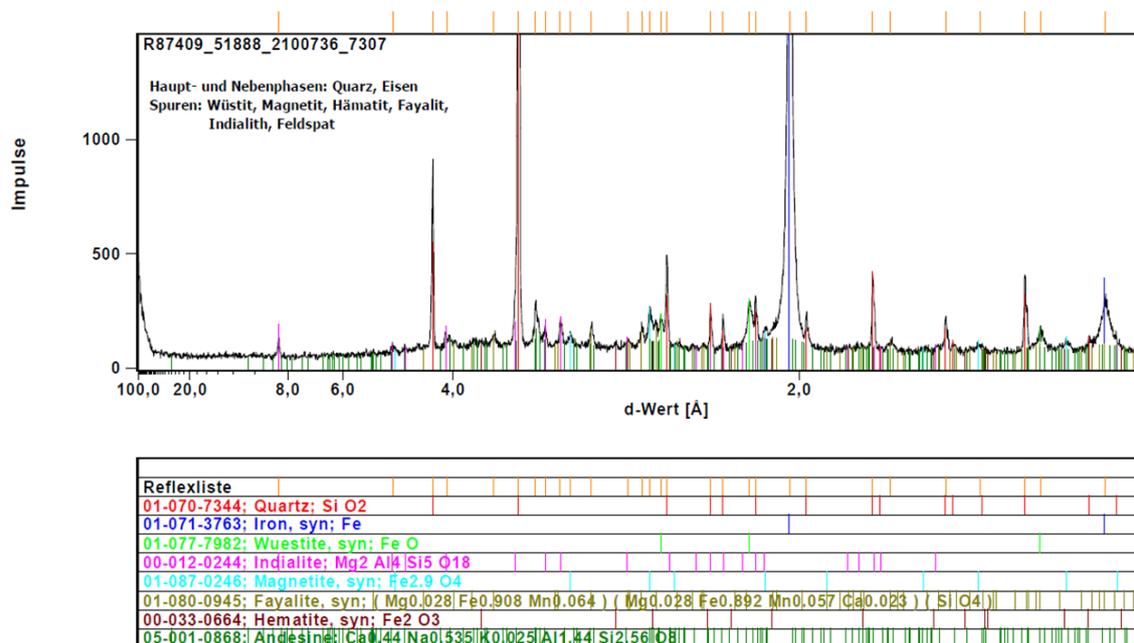


Abbildung 31: XRD-Analyse des untersuchten Gießereistaubs.

7.3.2 Elektrostatistische Trennversuche

Die Versuche wurden nach der in Kapitel 6.2.2 beschriebenen Methodik durchgeführt. Es wurden zwei verschiedene Staubarten untersucht, welche sich vor allem in ihrem

Eisengehalt unterschieden. Die entstandenen Fraktionen wurden nach der in Kapitel 6.1.1 erklärten Methode aufgeschlossen und per ICP-OES untersucht. Um die Effizienz der Methode abzuschätzen, sind fünf Metalle näher betrachtet worden. Bei erfolgreicher Durchführung würden sich diese in der Leiter-Fraktion ansammeln. **Tabelle 8** zeigt die Ergebnisse für den eisenärmeren Gießereistaub.

Tabelle 8: Ergebnisse des elektrostatischen Trennversuchs für den eisenärmeren Staub.

V1: geringer Fe-Gehalt	Edukt	Nicht-Leiter-Fraktion	Leiter-Fraktion	Mix-Fraktion
Anteile in [g]	506	41	291	174
Anteile in [Gew.-%]	100	8	58	34
ICP-Analyse [Gew.-%]				
Cr	0,01	0,01	0,01	0,01
Cu	0,01	0,03	0,01	0,02
Fe	2,17	4,05	1,62	2,51
Mg	0,72	1,30	0,56	0,84
Mn	0,03	0,04	0,02	0,03

Die Auswertung hat ergeben, dass 58 % nach der Aufbereitung in der Leiter-Fraktion gelandet sind. Dagegen sind 8 % in der Nicht-Leiter-Fraktion gelandet. Unerwarteterweise hat eine Anreicherung aller Metalle, außer Chrom, in der Nicht-Leiter-Fraktion stattgefunden. Eine ineffiziente Trennung kann mehrere Gründe haben. Im Fall des Gießereistaubs ist vor allem die geringe Teilchengröße des Staubs (zwischen 80 und 300 µm) zu nennen, welche die Erzeugung monopartikularer Schichten erschwert. Dies führt dazu, dass sich Fraktionen beim Trennungsvorgang mitreißen können und so in der falschen Fraktion landen. Besonders kolloidal verteilter Kohlenstoff in Form von Graphit (Leiter), der im Durchschnitt ca. 10 Gew.-% des Staubs ausmacht, kann sich zwischen Nicht-Leitern sammeln und dafür sorgen, dass Nicht-Leiter in der Leiter-Fraktion landen.

Tabelle 9: Ergebnisse des elektrostatischen Trennversuchs für den eisenreicheren Staub.

V2: hoher Fe-Gehalt	Edukt	Nicht-Leiter-Fraktion	Leiter-Fraktion	Mix-Fraktion
Anteile in [g]	1787	87	927	773
Anteile in [Gew.-%]	100	5	52	43
ICP-Analyse [Gew.-%]				
Cr	0,1	0,05	0,12	0,08
Cu	0,08	0,19	0,1	0,06
Fe	20,22	13,52	21,76	19,87
Mg	0,39	0,64	0,29	0,37
Mn	0,43	0,54	0,37	0,35

Bei der eisenreicheren Probe (siehe **Tabelle 9**) konnte der Eisengehalt von anfänglich 20,2 % auf 13,5 % in der Nicht-Leiter-Fraktion abgereichert werden. Auch der Chrom-Gehalt ist in der Leiter-Fraktion leicht gegenüber den anderen Fraktionen erhöht.

Magnesium, Mangan und Kupfer wurden dagegen wieder in der Nicht-Leiter Fraktion angereichert.

Alles in allem lässt sich festhalten, dass eine elektrostatische Separation von Leiter und Nicht-Leiter-Komponenten in den untersuchten Gießereistäuben nicht möglich ist. Neben den genannten Gründen gibt es auch noch logistische Einflussfaktoren, die einen größeren Einsatz erschweren. Die geringe Fördergeschwindigkeit, welche aufgrund der geringen Teilchengröße notwendig ist, wirkt sich negativ auf die Durchsatzmenge auf. Außerdem müsste aufgrund der enormen Staubentwicklung beim Prozess ein solches System isoliert von anderen betrieben werden.

7.4 SiC-Gießereistaub-Formlinge

Aufbauend auf den theoretischen Grundlagen in Kapitel 6.3 folgen nun die Ergebnisse der verschiedenen Versuchsreihen.

7.4.1 Untersuchung auf Standfestigkeit

In einer ersten Versuchsreihe sollte die generelle Tauglichkeit der Beimischung eines Gießereistaubs in der Herstellung von SiC-Formlingen untersucht werden. Entscheidend hierfür ist eine ausreichende Standfestigkeit nach 60 Minuten. Die Rezepturen sind in **Tabelle 4** gegeben

7.4.1.1 SiC – Gießereistaub – mit und ohne Koksgrus (V 1.0-V 4.0)

In den Rezepturen V 1.0- V4.0 wurde der SiC-Anteil in den Formlingen schrittweise von 53 % auf 23 % gesenkt und durch Staub 4a substituiert. **Abbildung 32** zeigt die Ergebnisse der Versuche.



Abbildung 32: Formlinge mit den Zusammensetzungen V 1.0, 2.0, 3.0 und 4.0 (von links nach rechts).

Alle vier Rezepturen resultierten in stabilen Formlingen. In V 4.0 war das Ausgangsgemisch zu trocken, sodass sich durch weiterer Zugabe von Wasser (40 g) die finale Rezeptur minimal änderte (SiC: 22,5 %, Staub 4a: 49,02 %, Zement: 13,37 %, Wasser: 14,71 %). Die Schlüsselerkenntnis aus den Versuchen ist, dass Staubzugaben bis zu 50 % möglich sind, ohne dass negative Auswirkungen auf die Festigkeit und den Zementverbrauch zu erwarten sind. Zudem sind keine negativen Einflüsse auf eine Serienfertigung zu erwarten. Bei einer Beimischung von mehr als 30 % ist jedoch ein erhöhter Wasserbedarf zu erwarten, um die benötigte Entformbarkeit zu erwarten bzw. ein zu frühes Durchrutschen zu vermeiden.

7.4.1.2 Gießereistaub – Koksgrus

Wird das SiC in den Formlingen vollständig durch Koksgrus substituiert, ist eine stabile Herstellung deutlich erschwert. Nachdem der Formling aus V 5.0 nach dem Entformen zerbrochen ist, wurden für V 5.1 der Zement- und Wasseranteil um je 1 % erhöht. Auch hier war die Festigkeit jedoch ungenügend. Durch Verringerung des Koksgrus-Anteils bei gleichzeitiger Erhöhung des Gießereistaub-Anteils (Verhältnis 1:1), gelang es mit V 6.0 schließlich einen stabilen Formling herzustellen (siehe **Abbildung 33**). Wird der Staub-Anteil bis auf 50 % gesteigert, so muss auch hier der Wasser-Anteil erhöht werden. Der Zement-Anteil konnte jedoch konstant bei 14 % gehalten werden.



Abbildung 33: Formlinge mit den Zusammensetzungen V 5.0, 5.1, 6.0 und 7.1 (von links nach rechts).

7.4.1.3 Gießereistaub

In V 8.0 und V 9.0 sollte untersucht werden, ob Formlinge aus Staub, Wasser und Bindemittel darstellbar sind. Nachdem der Formling bei einem Staub-Anteil von 70 % beim Entformen zunächst zerbrochen ist, wurde in V 8.1 der Wasseranteil um 5 % erhöht. Daraus resultierte ein deformierter Formling. Folglich muss der Wasseranteil für eine stabile Formulierung zwischen 15 und 20 % liegen. Während der Formling in V 9.0 mit einem Wasser-Anteil von 18 % ein noch leicht deformiert war, konnte in V 9.1 ein stabiles Produkt hergestellt werden (siehe **Abbildung 34**). Die Rezeptur konnte in V 9.2 bezüglich des Zement- und Wasser-Anteils noch weiter optimiert werden.



Abbildung 34: Formlinge mit den Zusammensetzungen V 8.1, 9.0, 9.1 und 9.2 (von links nach rechts).

7.4.1.4 Verwertungspotenzial und Zusammenfassung

Die Versuchsreihen haben gezeigt, dass es möglich ist, den Gießereistaub ohne vorherige Behandlung beizumischen und ausreichend standfeste Formlinge zu erhalten. Durch Variation der verschiedenen Bestandteile verändert sich auch die Basizität des Formlings. In den Versuchen wurde stets eine Basizität zwischen 0,7 und

Auswertung

0,8 angestrebt, was für einen sauer ausgekleideten Kupolofen ein gängiger Wertebereich ist. Jedoch können die Rezepturen explizit an die geforderte Basizität angepasst werden. **Tabelle 10** und **Tabelle 11** sollen dieses Verwertungspotenzial je nach Rezeptur und Staub verdeutlichen.

Tabelle 10: Verwertungspotenzial für einen Gießereistaub mit einem SiO₂-Gehalt von 30 %. In der Basisrezeptur sind die exakten Werte aus Gründen der Geheimhaltung nicht genannt.

Komponenten/ Varianten	SiC- Rohstoff [kg]	Quarzsand [kg]	Gießereistaub [kg]	Zement [kg]	Kalk [kg]	Basizität	Bruttomenge Formlinge [t]	Jährliche Staubmenge [t]
Basisrezept						0,75	1300,00	0,00
Substitution von Quarzsand durch Gießereistaub								
Variante 1	742,00	30,00	60,00	130,00	0,00	0,77	1300,00	78,00
Variante 2	742,00	10,00	80,00	130,00	0,00	0,86	1300,00	104,00
Variante 3	742,00	0,00	90,00	130,00	0,00	0,92	1300,00	117,00
Schrittweise Substitution von SiC durch Gießereistaub + Zugabe von Kalk zum Ausgleich der Basizität								
Variante 4	672,00	0,00	145,00	130,00	15,00	0,92	1444,44	209,44
Variante 5	672,00	0,00	160,00	130,00	0,00	0,77	1444,44	231,11
Variante 6	602,00	0,00	220,00	130,00	10,00	0,75	1625,00	357,50
Variante 7	602,00	0,00	230,00	130,00	0,00	0,66	1625,00	373,75
Variante 8	522,00	0,00	280,00	130,00	30,00	0,79	1857,14	520,00
Variante 9	522,00	0,00	310,00	130,00	0,00	0,57	1857,14	575,71

Tabelle 10 zeigt eine Hochrechnung für die Beimischung eines Gießereistaubs mit einem SiO₂-Gehalt von 30 %. In der Basisrezeptur wird Quarzsand zur Anpassung der Basizität hinzugegeben. Die Varianten 1-3 zeigen Rezepturen, in denen der Si-Gehalt konstant ist. Durch unterschiedliche Staubzugaben liegt die Basizität zwischen 0,77 und 0,92. Variante 3 zeigt eine Rezeptur in der jährlich 117 t Staub beigemischt werden können und weiterhin die Zugabe von Quarzsand durch das im Staub enthaltene SiO₂ entfällt. Wird der Staub-Anteil weiter erhöht (Varianten 4-9) kann für eine beispielhaft benötigte Basizität zwischen 0,7 und 0,8 Kalk zum Ausgleich hinzugegeben werden.

Tabelle 11: Verwertungspotenzial für einen Gießereistaub mit einem SiO₂-Gehalt von 50 %. In der Basisrezeptur sind die exakten Werte aus Gründen der Geheimhaltung nicht genannt.

Komponenten/ Varianten	SiC- Rohstoff [kg]	Quarzsand [kg]	Gießereistaub [kg]	Zement [kg]	Kalk [kg]	Basizität	Bruttomenge Formlinge [t]	Jährliche Staubmenge [t]
Basisrezept						0,75	1300,00	0,00
Substitution von Quarzsand durch Gießereistaub								
Variante 1	742,00	20,00	70,00	130,00	0,00	0,71	1300,00	91,00
Variante 2	742,00	10,00	80,00	130,00	0,00	0,74	1300,00	104,00
Variante 3	742,00	0,00	90,00	130,00	0,00	0,76	1300,00	117,00
Schrittweise Substitution von Rohstoff durch Fe-Staub + Zugabe von Kalk zum Ausgleich der Basizität								
Variante 4	672,00	0,00	145,00	130,00	15,00	0,72	1444,44	209,44
Variante 5	672,00	0,00	160,00	130,00	0,00	0,59	1444,44	231,11
Variante 6	602,00	0,00	190,00	130,00	40,00	0,77	1625,00	308,75
Variante 7	602,00	0,00	230,00	130,00	0,00	0,48	1625,00	373,75
Variante 8	522,00	0,00	250,00	130,00	60,00	0,75	1857,14	464,29
Variante 9	522,00	0,00	310,00	130,00	0,00	0,40	1857,14	575,71

In **Tabelle 11** sind die Hochrechnungen für verschiedene Varianten für die Beimischung eines Gießereistaubs mit einem SiO₂-Gehalt von 50 % zu sehen. Der unterschiedlich hohe SiO₂-Anteil im Staub macht sich in der weniger starken Schwankung der Basizität bemerkbar. Auch hier lassen sich mit Variante 3 117 t Staub pro Jahr wiederverwerten und Quarzsand vollständig substituieren, die Basizität der

Formlinge liegt jedoch bei 0,76 und wäre damit beispielsweise für eine Anwendung im Kupolofen von Gießerei A geeignet. Wie Variante 8 zeigt, kann die Basizität durch entsprechende Zugabe von Kalk, auch bei einer jährlichen Verwertungsmenge von über 450 t im hier erfordernten Bereich gehalten werden.

7.4.2 Substitution des Bindemittels

Wie bereits in Kapitel 6.3.3 erwähnt, ist es aufgrund der hohen CO₂-Emissionen bei der Produktion von Portlandzement erstrebenswert, diesen als Bindemittel in der Formlings Produktion zu substituieren. Daher wurden zwei alternative Bindemittel auf ihre Eignung zur Substitution untersucht.

7.4.2.1 SiC-Gießereistaub-Formling + stärkerbasiertes Bindemittel (SBM)

In **Abbildung 35** sind die Ergebnisse der Versuche V 1 – V 4 aus **Tabelle 5** zu sehen. Alle Formlinge wiesen zunächst eine ausreichende Standfestigkeit nach 60 Minuten auf. Die Endfestigkeit wurde durch einen Falltest aus einem Meter Höhe nach 48 h geprüft. Alle vier Formlinge zerbrachen dabei.



Abbildung 35: Ausreichende Standfestigkeit nach 60 Minuten für V 1 - V 4.

Da die Formulierungen aus den Versuchen V 1 – V 4 nicht die benötigte Endfestigkeit garantieren konnten, wurden in einer zweiten Versuchsreihe SBM-Zement-Mischungen getestet. Die Ergebnisse der Falltests verschiedener Zeitintervalle für die Versuche V 5 – V 9 sind in **Abbildung 36** gezeigt.

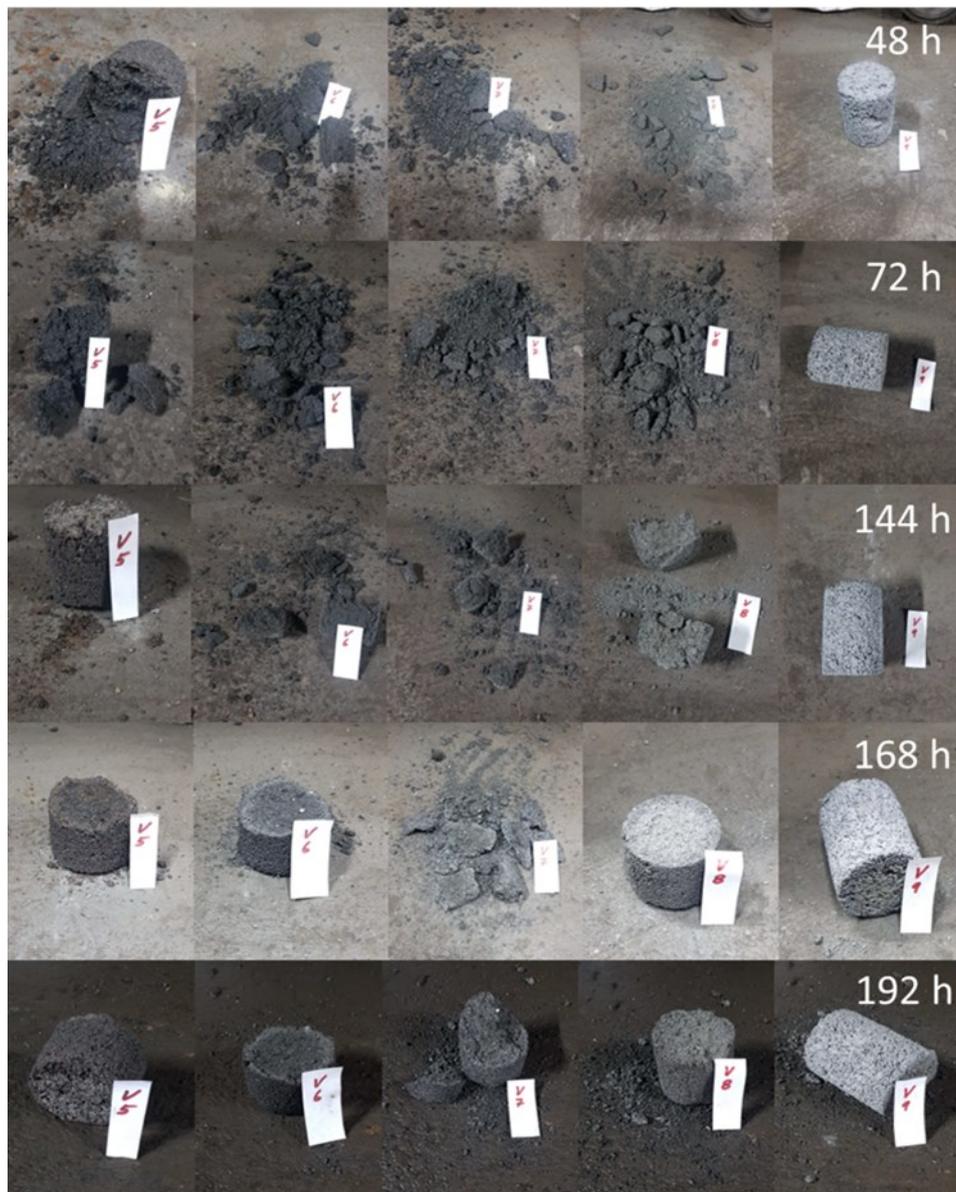


Abbildung 36: Ergebnisse der Falltests für die SBM-Zement-Mischungen (V 5 - V 9) nach 48 h bzw. 72 h, 144 h, 168 h und 192 h.

Die Tests haben gezeigt, dass auch SBM-Zement-Mischungen keine ausreichende Endfestigkeit nach 48 h oder später garantieren konnten. Weiterhin wurde deutlich, dass die Stärke das Abbinden des Zements verzögert hat. Formlinge, die nur durch das SBM oder Zement gebunden waren, zeigten im Vergleich bessere Festigkeiten.

Der Grund hierfür liegt im Erhärtungs-Mechanismus von Portlandzement. Während diesem findet eine Hydratation zwischen den Klinkerphasen und dem Anmachwasser statt, wobei Hydratphasen entstehen. Die wesentlichen Hydratphasen sind Calciumsilicathydrat (CSH), Tetracalciuminathydrat und Calciumaluminatsulfathydrate, hauptsächlich zusammengesetzt aus Trisulfat und Monosulfat. Zu Beginn des Prozesses sind die Kristalle dieser Phasen noch klein und wachsen erst nach ca. 4 Stunden zu größeren CSH-Verbindungen [107, 108]. Mit

wachender Größe sind die Partikel in der Lage, Zwischenräume der Zementpartikel zu überbrücken und es entstehen langfaserige, nadelförmige Strukturen. Die Festigkeit resultiert aus dem Gefüge, welches durch die Hydratationsprodukte aufgebaut wird. Lösliche organische Kohlehydrate wie Glucose, Saccharose oder Cellulose verhindern das Wachstum der Kristalle in den CSH-Phasen des Portlandzements. Je weniger Kristalle sich im Gefüge ausbilden können, desto geringer ist die Endfestigkeit. Literaturwerte zeigen, dass eine Zugabe von $> 1\%$ den Erhärtungsprozess im Portlandzement vollständig unterbinden [109]. Von besonderem Interesse sind diese Moleküle auch als Verzögerer, um die Verarbeitungszeit von schnell aushärtendem Zement bei Bedarf zu erhöhen.

Als entscheidendes Kriterium für eine ausreichende Endfestigkeit für den SBM gebundenen Formling wurde eine komplette Durchtrocknung vermutet. In einem abschließenden Versuch V 10 wurde daher ein Formling mit 2,5 % SBM hergestellt und 24 h bei 105 °C im Ofen getrocknet. Der anschließend durchgeführte Falltest fiel positiv aus (siehe **Abbildung 37**).



Abbildung 37: Positiver Falltest des Formlings V 10 nach Trocknung im Ofen.

7.4.2.2 SiC-Gießereistaub-Formling + Calciumsulfoaluminat-Zement (CSA-Zement)

Da Versuche zum SBM gebunden Formling nicht auf eine erfolgreiche industrielle Umsetzung hinwiesen, wurde ein weiteres mineralisches Bindemittel untersucht. Mithilfe von ökologisch vorteilhafterem CSA-Zement sollte untersucht werden, ob sich Portlandzement teilweise oder ganz substituieren lässt. Die Rezeptoren sind in **Tabelle 6** gezeigt.

In Versuch V 1 wurde das Abbindeverhalten untersucht. Hierfür wurde im Abstand von 5 Minuten ein Formling hergestellt, zerstört und das Material wieder durchgemischt. Nach 30 Minuten war die Mischung so weit abgebunden, sodass sich kein Formling mehr herstellen ließ. Durch das wiederholte Durchmischen kam es zur Bildung von Agglomeraten (siehe **Abbildung 38**).

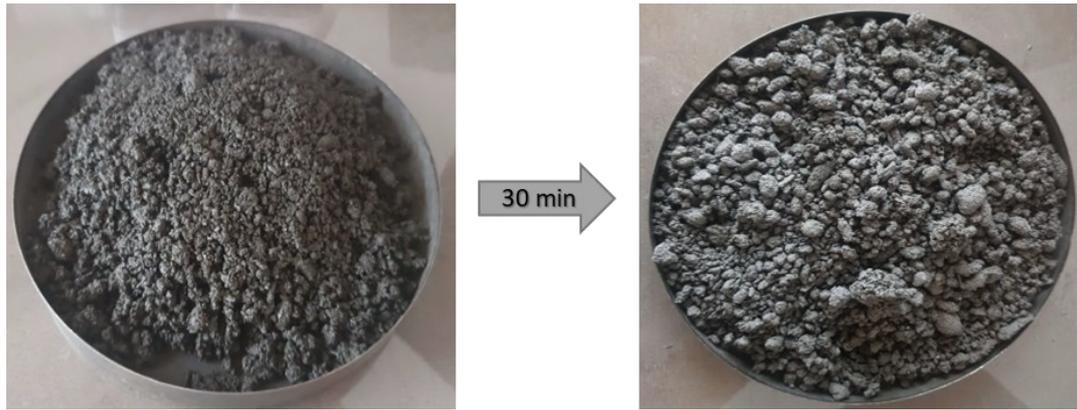


Abbildung 38: Versuch V 1 zur Bestimmung des Abbindeverhaltens. Nach 30 Minuten kam es zur Agglomeration.

Zur Bestimmung der Festigkeit wurden die Mischungen V 2 und V 3 alle 5 Minuten mit einem Serienformling belastet. Bereits nach 15 Minuten waren beide Formlinge so fest, dass sie das Gewicht tragen konnten (siehe **Abbildung 39**)

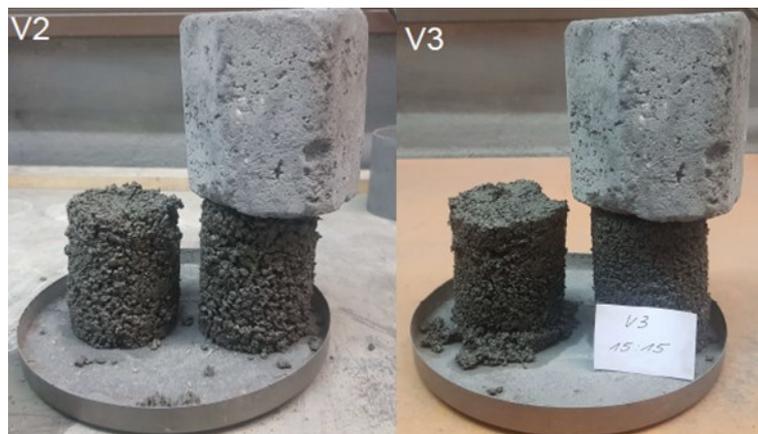


Abbildung 39: Formlinge der Mischungen V 2 und V 3. Beide konnten nach 15 min voll belastet werden.

Darauf aufbauend wurde in den Versuchen V 4 bis V 7 der Gehalt an CSA-Zement sukzessive reduziert und weiterhin die Zugabe von Weinsäure als Verzögerer und deren Einfluss auf die Festigkeiten (V 8 – V 9) untersucht. V 10 war mit Portlandzement gebunden und diente als Referenzprobe. Nach 15 Minuten zeigte selbst eine Reduzierung von 10 % auf 2,5 % CSA-Zement keine negativen Einflüsse (siehe **Abbildung 40**).



Abbildung 40: Festigkeitstests der Versuche V 4 - V 7. Alle Formlinge hatten nach 15 Minuten eine ausreichende Standfestigkeit.

Eine Zugabe von Weinsäure zeigte keinen negativen Einfluss auf die Standfestigkeit (siehe **Abbildung 41**). Auch die Formlinge der Versuche V 8 und V 9 konnten nach 15 Minuten belastet werden. Der Referenzformling V 10, der durch Portlandzement gebunden war, konnte erst nach 45 Minuten belastet werden.



Abbildung 41: Festigkeitstests der Versuche V 8 - V 10. V 8 und V 9 konnten nach 15 Minuten belastet werden, während V 10 erst nach 45 min belastet werden konnte.

In den Versuchen V 6.1, 6.2, 9.1, 11 und 11.1 wurden die Endfestigkeiten nach 48 h, 72 h, 96 h, 168 h und 192 h mittels Falltest aus 1,5 m untersucht. V 6.1 war durch Portlandzement gebunden und diente als Referenzformling. Sofern der Formling nicht komplett zerbrach, wurde der Falltest ein weiteres Mal durchgeführt. **Abbildung 42** zeigt die Ergebnismatrix der Versuche.

Versuchsreihe		Ergebnis Falltest nach				
		48 h	72 h	96 h	168 h	192 h
V 6.1	5 % Portlandzement	Red	Red	Yellow	Light Green	Yellow
V 6.2	5 % CSA-Zement	Dark Green	Dark Green	Dark Green	Dark Green	Dark Green
V 9.1	5 % CSA-Zement + 0,05 % Weinsäure	Red	Light Green	Yellow	Light Green	Light Green
V 11	3,5 % Portlandzement + 1,9 % SBM	Red	Red	Red	Red	Red
V 11.1	3,5 % CSA-Zement + 1,9 % SBM	Red	Red	Red	Red	Red



Abbildung 42: Ergebnismatrix der Falltests für die Versuche V 6.1 - V 11.1.

Die Formulierung mit 5 % CSA-Zement zeigt durchweg die besten Ergebnisse in Bezug auf die Endfestigkeit. Während sich bei der Standfestigkeit nach 60 Minuten keine Unterschiede zwischen dem CSA-Zement gebunden Formling mit und ohne Weinsäure zeigten, erreicht der Formling V 9.1 mit Weinsäure nicht die gleiche Endfestigkeit wie der Formling V 6.2 ohne Weinsäure. Besonders auffällig bei dem Formling aus V 9.1 war eine schlechte Kantenhärte. Als Zuckersäure ist die Weinsäure vermutlich auch in der Lage erste Bindungen in den CSH-Phasen zu verhindern und damit für eine geringere Endfestigkeit zu sorgen. Die Ergebnisse für CSA-Zement und SBM-Mischungen fallen erwartungsgemäß schlecht aus.

Abschließend werden die Ergebnisse im Hinblick auf die entscheidenden Prüfkriterien der Serienproduktion, Standfestigkeit nach maximal 60 Minuten und Festigkeitsentwicklung nach 48 Stunden und länger nochmals übersichtlich zusammengefasst. Durch das schnellere Abbindeverhalten des CSA-Zements lassen sich die Formlinge bereits nach 15 min belasten. Formlinge, die durch Portlandzement gebunden sind, brauchen bei gleicher Menge mindestens 45 Minuten. Der Einsatz von Weinsäure als Verzögerer zeigte keinen negativen Einfluss auf die Standfestigkeit. Durch die bessere Festigkeitsentwicklung des CSA-Zements ließ sich der Gehalt bei ausreichender Standfestigkeit auf 2,5 % reduzieren. Bezogen auf die Endfestigkeit ist eine Reduzierung und Substitution von 14 % Portlandzement auf 5 % CSA-Zement möglich. Die Verwendung des Verzögerers zeigt hier negative Einflüsse. Allerdings wird die für eine Serienproduktion notwendige Verarbeitungszeit auch ohne Zugabe

eines Verzögerers erreicht. Ferner könnten durch die schnellere Festigkeitsentwicklung Produktionszeiten optimiert werden.

7.4.3 Druckfestigkeitsversuche

Die Versuche zur Bestimmung der Druckfestigkeiten dienten zur Quantifizierung und Bestätigung der Ergebnisse der Falltests. Welche absoluten Werte in den Krafteinwirkungen erreicht werden ist dabei weniger interessant als die Abweichungen in den untersuchten Formlinge zueinander. Diese können im Kontext der jeweiligen Formulierung diskutiert und Rückschlüsse zu den Falltests gezogen werden.

Wie in Kapitel 6.3.4 beschrieben, wurden die Oberflächen der Formlinge zunächst mit einer Trennmaschine (Metkon Servocut 402) abgesägt, um die Kraftschlüssigkeit beim Druckfestigkeitsversuch zu gewährleisten. Alle untersuchten Formlinge sind in **Tabelle 7** gezeigt. Die Formlinge F 1 und F 2 wurden in der Serienproduktion von Keßl hergestellt, wohingegen die Formlinge F 3 - F 13 im Labor gefertigt wurden.

Die Proben F 1 und F 2 konnten problemlos bearbeitet werden. Die Stärkeformlinge (F 3 und F 4) waren zu porös und konnten nicht gesägt und untersucht werden. Die Oberflächen der Formlinge mit 5 % - 10 % CSA-Zement (F 5 - F 7) konnten problemlos bearbeitet werden. Die Probe F 8 mit 2,5 % CSA-Zement zerbröckelte beim Sägen und konnte daher auch nicht untersucht werden. Die Proben mit F 9 und F 10 konnten problemlos bearbeitet werden. Die Formlinge F 11 und F 12 waren zu porös und zerbrachen bei der Entnahme aus der Trennmaschine, was auf die Verwendung der Weinsäure bei F 11 und des SBM bei F 12 zurückzuführen ist. Die Probe F 13, ebenfalls gebunden durch das SBM, konnte zwar bearbeitet werden, zeigte jedoch keine vollständig ebene Oberfläche.

Nach der Bearbeitung der Oberflächen der Formlinge wurden Druckfestigkeitsversuche mit den Proben F 1 – F 10 (ohne F 3 und F 4) und F 13 durchgeführt. Diese Versuche wurden mit der ZwickRoell Stand-Prüfmaschine Z250 ausgeführt, die eine maximale Kraft von 250 kN aufwenden kann. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 1 mm/min.

7.4.3.1 Standard-Formling und SiC-Staub-Formling aus Serienproduktion

In **Abbildung 43** ist der Versuchsverlauf des Standard-Formlings (F 1) und eines SiC-Staub-Formlings (F 2) zu sehen. Beide wurden durch einen Mehrlagenfertiger in Serie gefertigt. Beide Formlinge brechen bei ca. 75 kN. Der exakte Zahlenwert ist dabei weniger relevant als das Verhältnis relative Verhältnis zueinander. Da beide Formlinge bei derselben Krafteinwirkung brechen, ist davon auszugehen, dass bezogen auf die Festigkeit, keine negativen Einflüsse in der Anwendung zu erwarten sind.

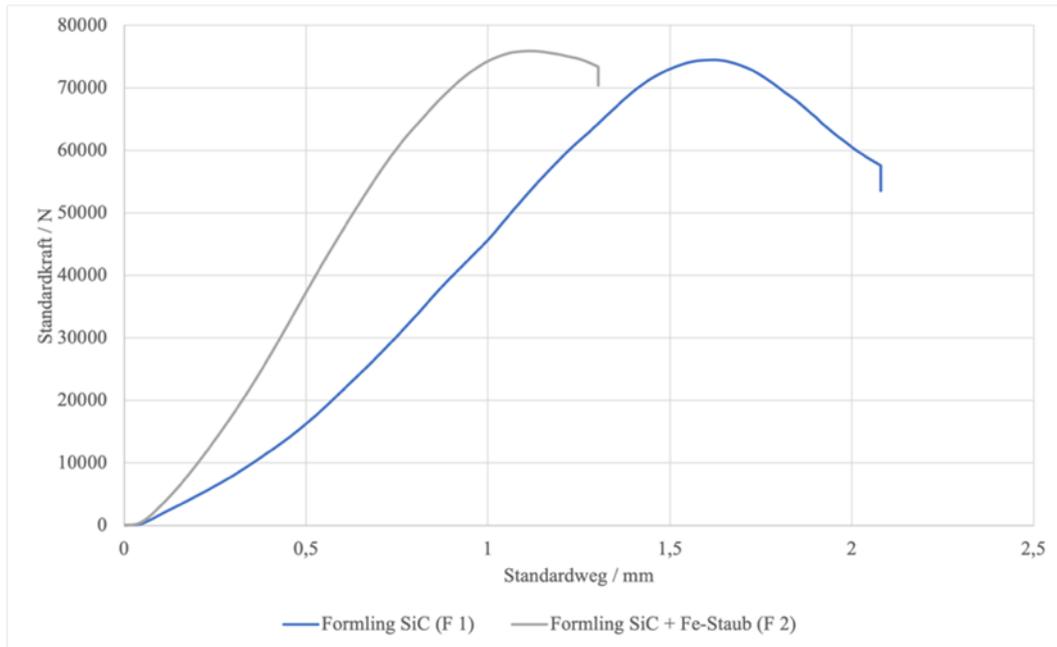


Abbildung 43: Untersuchung der Druckfestigkeit der Formlinge F 1 und F 2.

Durch die Serienproduktion im Mehrlagenfertiger werden die Formlinge stärker verdichtet und brechen erst bei einer deutlich höheren Krafteinwirkung als die Formlinge in den folgenden Kapiteln, welche nach der in Kapitel 6.3.2 beschriebenen Methode hergestellt wurden.

7.4.3.2 SiC-Staub-Formling + CSA-Zement (2,5 % - 10 %)

Die Verläufe der Festigkeitsversuche für SiC-Staub-Formlinge mit verschiedenen Anteilen an CSA-Zement zeigt, dass die Endfestigkeit der Formlinge proportional mit zunehmendem Anteil ebenfalls zunimmt (siehe **Abbildung 44** und **Abbildung 45**).

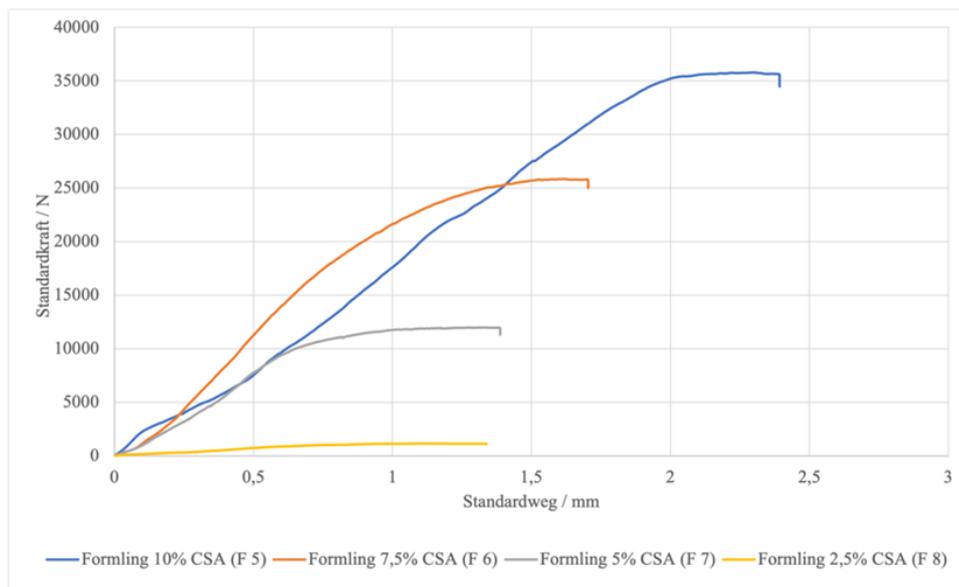


Abbildung 44: Untersuchung der Druckfestigkeit der Formlinge F 5 - F 8.

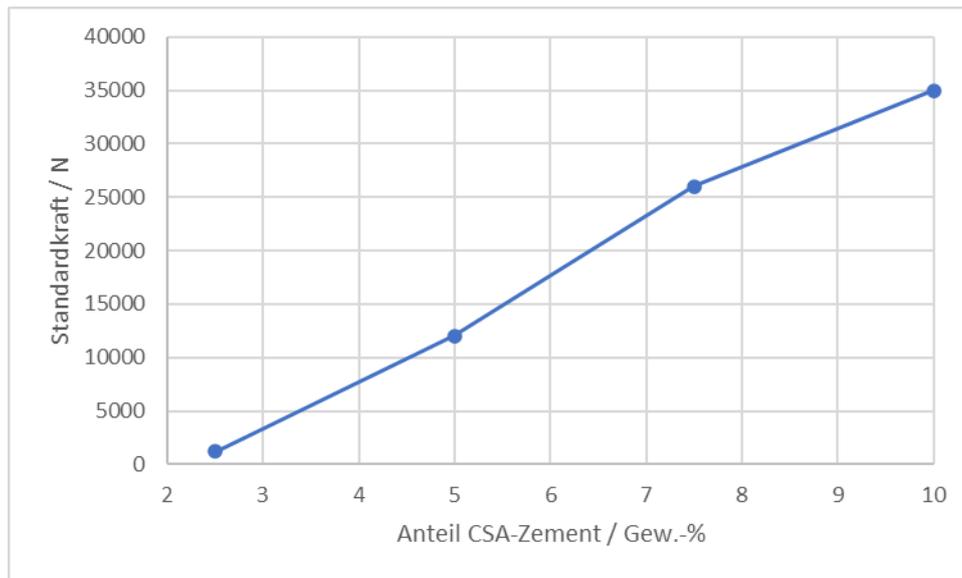


Abbildung 45: Lineare Zunahme der Endfestigkeit mit steigendem Anteil an CSA-Zement.

Ausgehend von den Ergebnissen aus Kapitel 7.4.2.2 und **Abbildung 42** ist ersichtlich, dass bereits 5 % CSA-Zement genug sind, um eine ausreichende Stand- und Endfestigkeit zu erreichen. Eine Formulierung mit 2,5 % CSA-Zement resultiert in einem standfesten Formling, mit einer mangelhaften Endfestigkeit. Die gelbe Kurve in **Abbildung 44** unterstreicht dieses Ergebnis, da der Formling F 8 bereits deutlich früher bricht. Der Bereich der Belastungsgrenze, der in eine hinreichende Endfestigkeit resultiert liegt demnach zwischen dem von F 7 und F 8, also ca. 1.100 und 12.000 N.

7.4.3.3 SiC-Staub-Formling + CSA-Zement (5 %) / Portlandzement (5 %)

In **Abbildung 46** sind die Verläufe zweier Formlinge mit je 5 % CSA-Zement bzw. 5 % Portlandzement zu sehen. Beide erreichen eine ausreichend hohe Endfestigkeit. Der durch CSA-Zement gebundene Formling übertrifft den absoluten Wert des Portlandzement gebundenen Formlings um ca. 2.000 N und belegt damit den subjektiven Eindruck bei der Verarbeitung bezüglich seiner höheren Endfestigkeit. Durch dieses Ergebnis kann der Wertebereich für die Belastungsgrenze, welche in einer ausreichenden Endfestigkeit resultiert auf ca. 1.100 bis 9.000 N verkleinert werden.

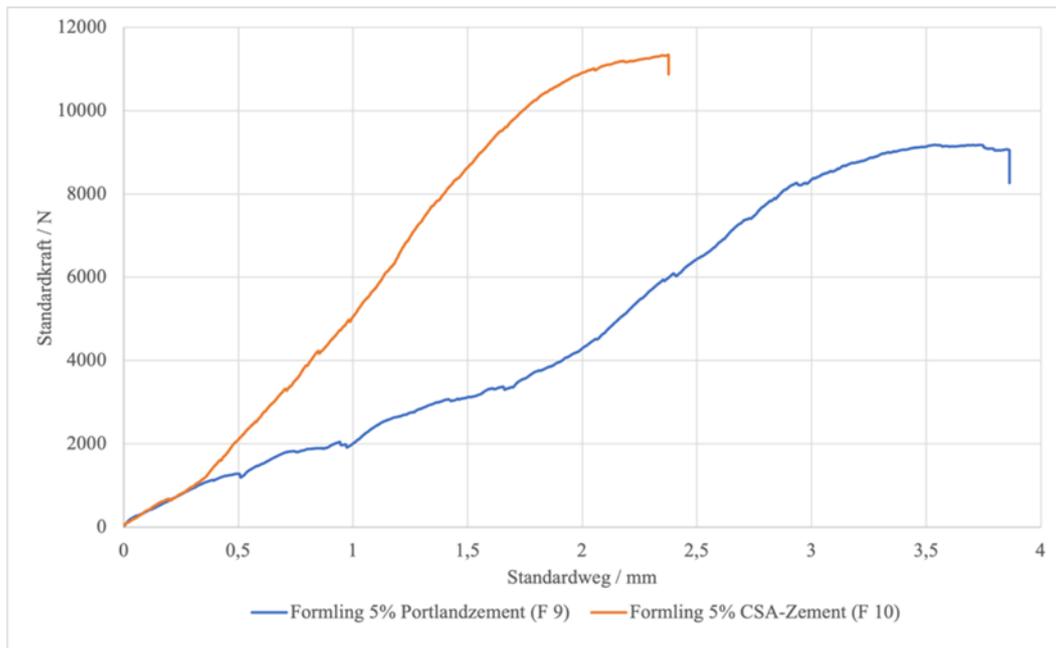


Abbildung 46: Untersuchung der Druckfestigkeit der Formlinge F 9 und F 10.

7.5 Modellierung

Die Beseitigung der Gießereistäube durch die Gießerei verläuft entweder über ein Abfallbehandlungsunternehmen oder ein Entsorgungsunternehmen. Bei Ersterem werden die Gießereistäube einem Aufbereitungsprozess zugeführt und, sofern möglich, in vermarktungsfähige Sekundärrohstoffe aufbereitet. Beim Entsorgungsprozess werden die Stäube nicht weiter verwertet, sondern enden in einer Deponie. Beide Möglichkeiten unterscheiden sich grundlegend in ihren Prozesswegen und damit auch in ihren Umweltwirkungen. Das gilt auch, wenn verschiedene Wege einer Verwertung möglich sind.

Das grundlegende, reale Problem besteht darin, eine Entscheidung bezüglich des Entsorgungsweges zu treffen. Ökonomische und ökologische Gründe sollten in der Entscheidungsfindung dabei beide eine Rolle spielen. Während die ökonomischen durch einen Entsorgungspreis trivial zu interpretieren sind, sind ökologische Gesichtspunkte meist nicht direkt nachvollziehbar und schwerer zu quantifizieren.

Aufbauend auf den Grundlagen in den Kapiteln 3.5 und 5.2 wird im Folgenden das „**Optimierungsmodell zur Minimierung der ökologischen Nachhaltigkeitsbewertung der Gießereistäub-Entsorgung**“ (OpMökol) vorgestellt. Es soll den Ansatz einer ökologischen Bewertung und eine darauf aufbauende Entscheidungsempfehlung darstellen. Der relevante Faktor dabei ist, welches untersuchte Verfahren, die geringsten negativen Gesamtauswirkungen auf die Ökosphäre hat.

7.5.1 Einteilung der Beseitigungsverfahren

In diesem Kapitel sollen grundlegende Verfahrensarten und deren typische Prozessschritte genauer erläutert werden. Die Einstufung eines Verfahrens in eine gewisse Verfahrensart soll sich so auf das Optimierungsmodell auswirken, dass eine hohe Verwertungsgüte in einer besseren ökologischen Bewertung resultiert. Gleichzeitig soll der Aufwand bei der Datenerhebung geringgehalten werden. Für die Einteilung wird das Kreislaufwirtschaftsgesetz und dessen Interpretation im Kontext der Gießereistaub-Entsorgung herangezogen (siehe **Abbildung 47**).

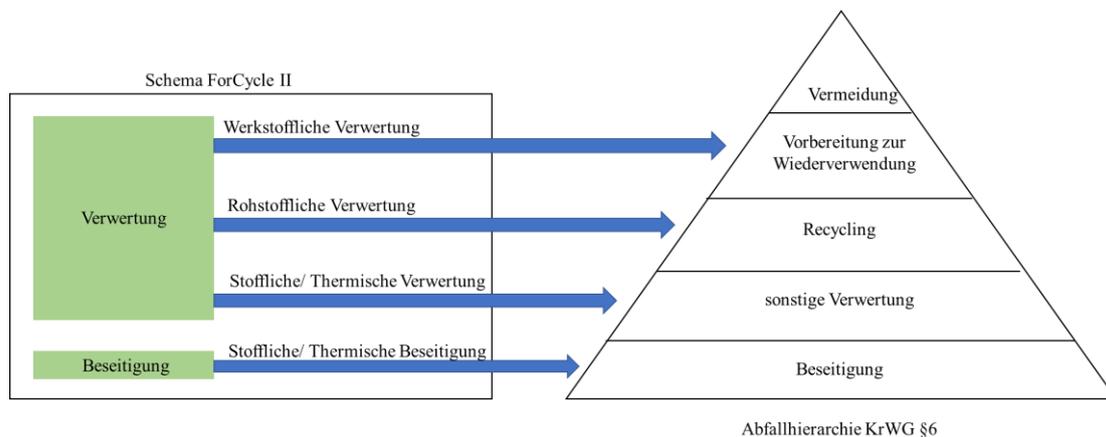


Abbildung 47: Einteilung der Entsorgungsverfahren im Kontext der Abfallwirtschaftshierarchie.

Im Modell werden sowohl die thermische Verwertung als auch die thermische Beseitigung vernachlässigt. Die Einteilung eines Verfahrens erfolgt daher in einer der folgenden vier Kategorien:

- Verfahren mit werkstofflicher Verwertung (**VmwV**)
- Verfahren mit rohstofflicher Verwertung (**VmrV**)
- Verfahren mit stofflicher Verwertung (**VmsV**)
- Verfahren mit stofflicher Beseitigung (**VmsB**)

Für eine nachvollziehbare Einteilung sollen die fundamentalen Prozessschritte, die mit der jeweiligen Verfahrensart verbunden sind genauer erläutert werden.

7.5.1.1 Verfahren mit werkstofflicher Verwertung

Bei einem VmwV wird der Gießereistaub zur Wiederverwendung vorbereitet. Im Sinne des KrWG ist die Wiederverwendung ein Verfahren, „bei dem Erzeugnisse oder Bestandteile, die keine Abfälle sind, wieder für denselben Zweck verwendet werden, für den sie ursprünglich bestimmt waren“. [11, S.9] Bei den Stäuben kann argumentiert werden, dass die Nutzung als Schmelzrohstoff eine Wiederverwendung darstellt, weil der Zweck der metallischen Rohstoffe die Herstellung der Gusseisenschmelze ist. Eine Verwertung der Stäube als Schmelzrohstoff soll dementsprechend in dieser Arbeit als eine Wiederverwendung angesehen werden. Dabei ist zu beachten, dass es zu keiner Aufbereitung kommt und keine anderen

Wirtschaftsentitäten involviert sind. Der Staub wird lediglich vorbereitet, nicht aufbereitet. Der charakteristische Prozess eines VmwV ist der Vorbereitungsprozess w . In **Abbildung 48** sind die typischen Prozessschritte eines VmwV dargestellt.

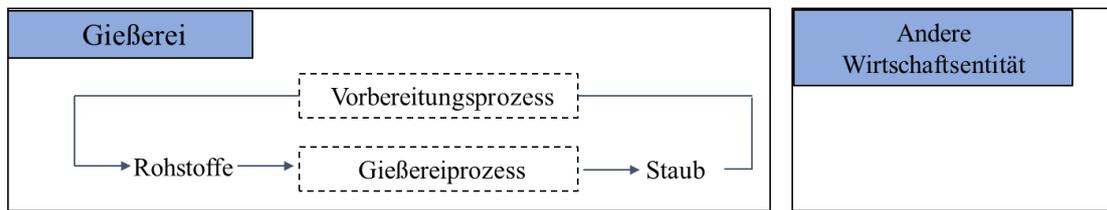


Abbildung 48: Typische Verfahrensschritte in einem VmwV.

Bei dieser Verfahrenart sollte die ökologische Bewertung optimal sein, da durch das Fehlen von Aufbereitungsprozessen nur prozessspezifische Teile der ökologischen Bewertung zu erwarten sind. Durch die vollständige Verwertung des Staubes in seinem ursprünglichen Sinne (als Schmelzrohstoff) erreicht die Verwertungsgüte ϑ zudem das Optimum (vgl. **Abbildung 52**).

7.5.1.2 Verfahren mit rohstofflicher Verwertung

Ein VmrV wird durch eine Aufbereitung, entweder in der Gießerei selbst oder in einer externen Wirtschaftsentität, charakterisiert. Diese Aufbereitung erfolgt im, für VmrV charakteristischen, Aufbereitungsprozess m , aus welchem vermarktungsfähige Sekundärrohstoffe sowie Reststoffe entstehen. Die Reststoffe werden von einem Entsorgungsunternehmen in einem Entsorgungsprozess beseitigt. Die Sekundärrohstoffe gelangen zu einer weiteren Wirtschaftsentität, welche diese als Input-Faktoren in einem Produktionsprozess verwendet (siehe **Abbildung 49**). Bei einer Verkettung mehrerer Wirtschaftsentitäten müsste jeder Prozess einzeln betrachtet und die Bewertungen anschließend aggregiert werden. Bei einem ökonomisch wenig wertvollen Abfall wie Gießereistäuben ist die Beteiligung mehrerer Unternehmen aufgrund steigender Kosten jedoch unrealistisch und in der Anwendung zu vermeiden.

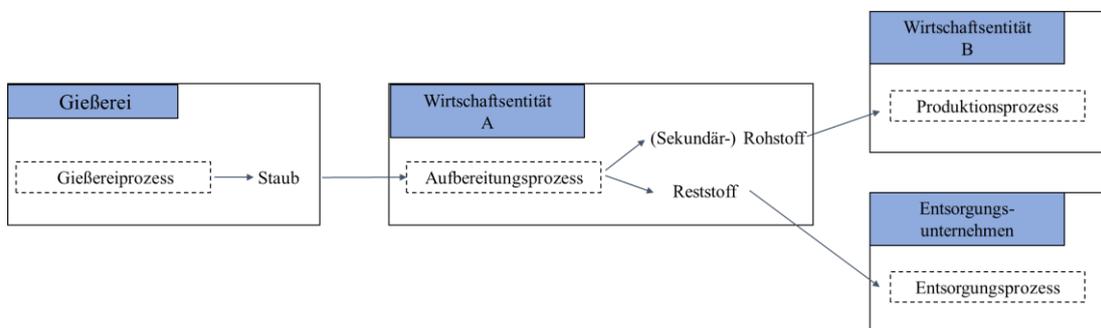


Abbildung 49: Typische Prozessschritte in einem VmrV.

Bei VmrV sind Prozesse notwendig, welche mit nicht vernachlässigbaren Umweltwirkungen verbunden sind. Allerdings kann hierbei eine hohe Verwertungsgüte der Stäube erreicht werden.

7.5.1.3 Verfahren mit stofflicher Verwertung

Ein VmsV führt zu einer stofflichen Verwertung eines Staubs. Dabei entsteht der Staub in einem Gießereiprozess und gelangt zu einem Entsorgungsunternehmen. Dieses führt einen Prozess der stofflichen Verwertung durch. Im Kontext der Gießereistaubentsorgung sind vor allem Verwertung durch Verfüllung bzw. Bergversatz sowie die Verwertung als Deponieersatzbaustoff zu nennen. Solche Prozesse sind mit Umweltwirkungen verbunden, weshalb der prozessspezifische Teil erhoben werden muss. Bei einem VmsV wird der Abfall zwar verwertet, die im Abfall enthaltenden Rohstoffe aber der Wertschöpfungskette entzogen. Aus dieser Eigenschaft ergibt sich, dass bei VmsV kein verwertungsgütlicher Teil zur Belohnung von Rohstoffrückgewinnungen erhoben wird. In **Abbildung 50** sind die typischen Prozessschritte eines VmsV dargestellt.

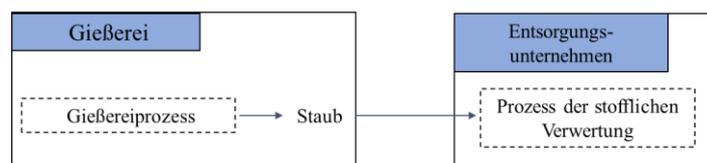


Abbildung 50: Typische Prozessschritte in einem VmsV.

7.5.1.4 Verfahren mit stofflicher Beseitigung

Ein VmsB läuft ähnlich wie ein VmsV ab. Der Gießereistaub gelangt zu einem Entsorgungsunternehmen, bei welchem der Staub einem Prozess der stofflichen Beseitigung, zugeführt wird. Dieser Prozess ist charakteristisch für ein VmsB (siehe **Abbildung 51**). Die Deponierung von Stäuben kann als ein Prozess der stofflichen Beseitigung genannt werden.

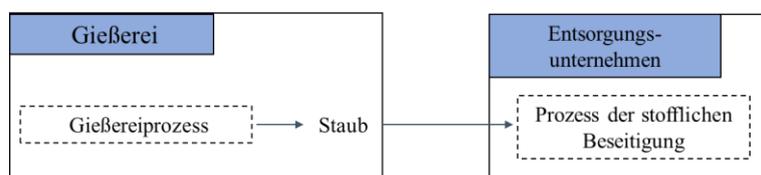


Abbildung 51: Typische Prozessschritte in einem VmsB.

Bei VmsB werden weder Rohstoffe zurückgewonnen noch der Abfall einer sinnvollen Verwendung zugeführt. Aus verwertungsgütlicher Sicht handelt es sich um das schlechteste Verfahren.

7.5.1.5 Ökologische Hierarchie der Verfahrensarten

Eine hierarchische Einteilung der Verfahren, wie sie auch im KrWG geschildert wird, ist zur Abschätzung der ökologischen Nachhaltigkeit dienlich. Danach gilt hier:

$$V_{mwV} < V_{mrV} < V_{msV} < V_{msB}$$

Eine niedrigere Bewertung entspricht einer besseren ökologischen Gesamtbewertung des Verfahrens, da hieraus ein niedrigerer Beitrag zur Zielfunktion von OpMökol beigetragen wird (siehe Kapitel 7.5.2). Hier liegt auch der Ursprung der Namensgebung: „**Optimierungsmodell zur Minimierung der ökologischen Nachhaltigkeitsbewertung der Gießereistaub-Entsorgung**“.

Ein niedrigerer Beitrag zum ökologischen Nachhaltigkeitsindikator entspricht einer besseren ökologischen Gesamtbewertung des Entsorgungsverfahrens. Diese ökologische Gesamtbewertung setzt sich aus zwei Teilen zusammen; dem prozessspezifischen und verwertungsgütlichen Teil. **Abbildung 52** verdeutlicht das Zusammenspiel von ökologischer Bewertung und Verfahrensarten.

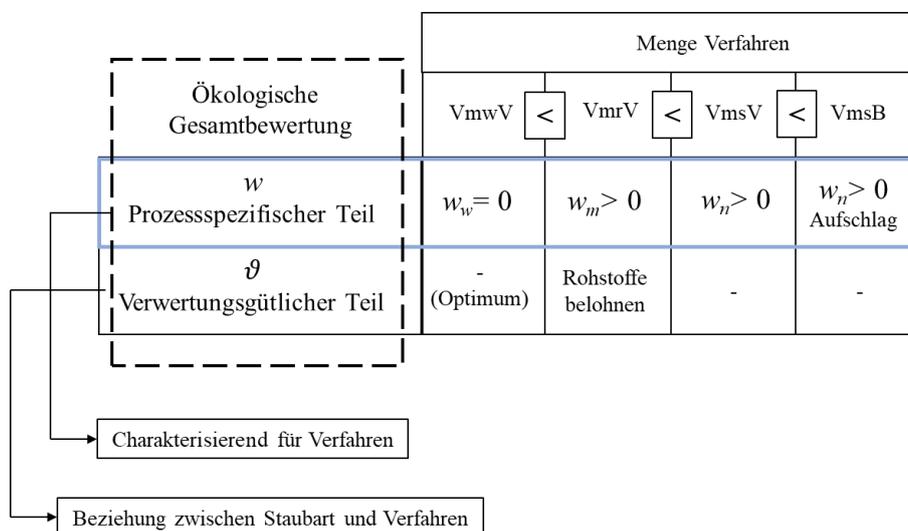


Abbildung 52: Beziehungen zwischen Verfahrensarten hinsichtlich ihrer ökologischen Bewertung im OpMökol.

Der prozessspezifische Teil ist bei V_{mwV} gleich Null. Obwohl ein solches Verfahren die höchstmögliche Verwertungsgüte besitzt, muss diese nicht erfasst werden, weil ein V_{mwV} bereits die beste ökologische Bewertung besitzt. Es bildet keinen Beitrag in der Zielfunktion. Die durch den Prozess rückgewonnen Stoffe werden durch die Verwertungsgüte charakterisiert und sind bei V_{msV} und V_{msB} nicht vorhanden.

7.5.2 Das Modell OpMökol

Aufbauend auf den Grundlagen der Verfahrenseinteilung in Kapitel 7.5.1 wird nun das mathematische Modell vorgestellt. Für die Aufstellung des Modells wurde der Top-Down Ansatz verwendet (vgl. **Abbildung 18**). In einem ersten Schritt müssen durch Vereinfachungen und Annahmen geeignete Modellelemente identifiziert werden. Ein Verwertungsverfahren bzw. Aufbereitungsprozess ist definiert als Gesamtheit der Prozesse, die zur Beseitigung des Abfalls führen und gleichzeitig Sekundärrohstoffe zurückgewinnen. Die Reststoffe aus diesem Prozess müssen durch ein

Deponierungsverfahren beseitigt werden. Das Verfahren der Deponierung führt zu keiner Rückgewinnung von Rohstoffen und ist somit ein reines Entsorgungsverfahren.

Abbildung 53 zeigt die ganzheitliche Modellvorstellung zur ökologischen Gesamtbetrachtung der Entsorgung eines Gießereistaubs.

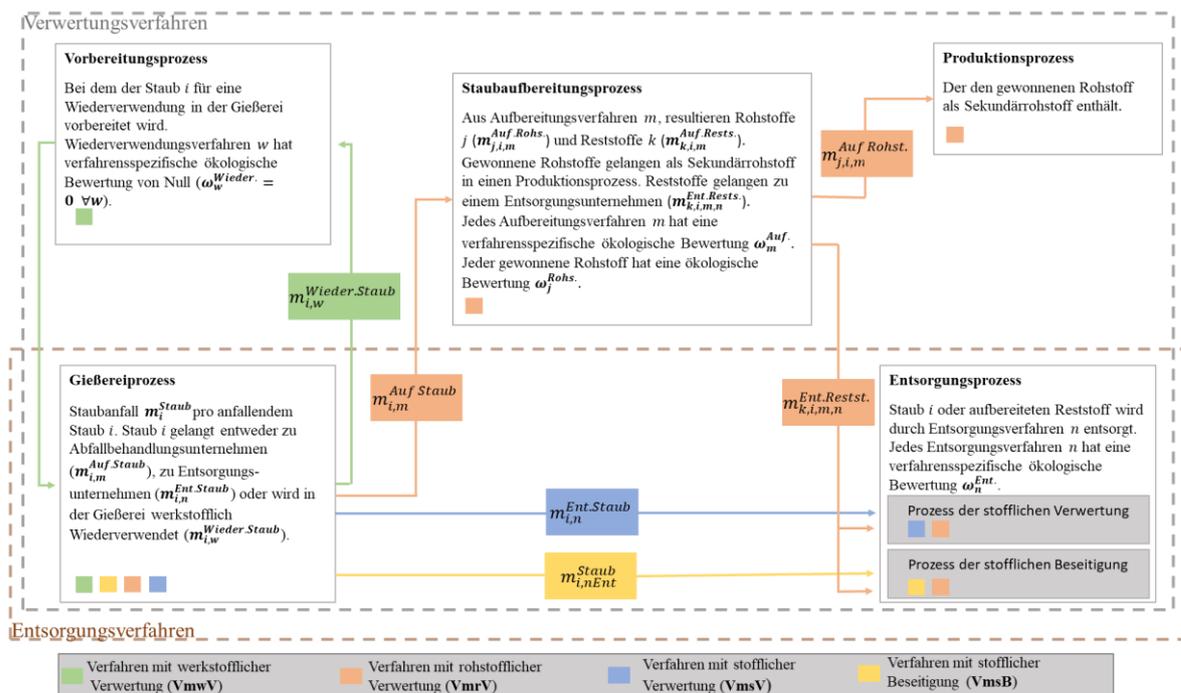


Abbildung 53: Modellvorstellung zur Entsorgung eines Gießereistaubs im Modell OpMökol.

Für die Modellbildung werden die Mengen für Aufbereitungsprozesse, Entsorgungsprozesse, Stäube, Rohstoffe und Reststoffe eingeführt. Die Elemente dieser Mengen bekommen Indizes zugordnet, damit diese eindeutig identifizierbar sind (siehe Anlage 6 [c.]):

- Staub $i \in I$ (als Abfallprodukt des Gießereiprozesses)
- Rohstoff $j \in J$
- Reststoff $k \in K$
- Aufbereitungsprozess $m \in M$
- Entsorgungsprozess $n \in N$
- Wiederverwendungsprozess $w \in W$

Neben den Mengen werden quantitative Daten benötigt, um Informationen über Elemente und/oder deren Beziehungen zueinander zu beschreiben:

- Menge an Staub i , die beim Gießereiprozess anfällt: m_i^{Staub} [ME]
- Rohstoffgewinnungsgrad von Aufbereitungsprozess m mit Staub i : $\eta_{j,i,m}^{Rohst.}$ [%]

- Reststoffgewinnungsgrad von Aufbereitungsprozess m mit Staub i : $\eta_{k,i,m}^{Restst.} [\%]$
- Opportunitätsvariablen beschreiben Beziehungen zwischen Staub i und verwendetem Verfahren (m, n, w) , eventuell auftretendem Reststoff k , sowie Aufbereitungs-, Wiederverwendungs- und Entsorgungsprozess: $y_{i,m}^{Auf.Staub}$; $y_{i,n}^{Ent.Staub}$; $y_{k,i,m,n}^{Ent.Restst.}$; $y_{i,w}^{Wieder.Staub} \in \{0,1\}$

Die Opportunitätsvariablen definieren, ob der Staub nach dem Gießereiprozess, dem Aufbereitungs-, Entsorgungs- oder Wiederwendungsverfahren zugeführt werden kann. Um aus dem Modell eine Verbesserung der ökologischen Nachhaltigkeit ableiten zu können, ist ein Indikator implementiert, welcher den Status der ökologischen Nachhaltigkeit abbildet und quantifiziert. Dieser Indikator setzt sich aus vier Teilen zusammen: der ökologischen Bewertung der Staubaufbereitung, der ökologischen Bewertung der Reststoffentsorgung, der ökologischen Bewertung der Staubentsorgung und der ökologischen Bewertung der Einsparungen (vgl. Anlage 6 [a]).

Der Indikator bildet die zu minimierende Zielfunktion des OpMökol (siehe **Formel 5**).

$$\begin{aligned}
 \text{Minimiere } \eta_{\text{ökologisch}} = & \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M m_{i,m}^{Auf.Staub} * \omega_m^{Auf.} + \\
 & + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N m_{k,i,m,n}^{Ent.Restst.} * \omega_n^{Ent.} \\
 & + \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N m_{i,n}^{Ent.Staub} * \omega_n^{Ent.} - \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M sav_{i,m}^{Verw.V.}
 \end{aligned}$$

Formel 5: Zielfunktion im OpMökol.

Das Modell soll für jeden Gießereistaub ein geeignetes Entsorgungsverfahren identifizieren, dessen Aufbereitungs- oder Entsorgungsprozesse für den spezifischen Staub geeignet sind. Durch die ökologische Bewertung der Aufbereitungs- oder Entsorgungsprozesse werden die Massen der Stäube unterschiedlich gewichtet. Mit der Minimierung der Zielfunktion wird somit das Verfahren für den jeweiligen Staub gewählt, welches den geringsten Beitrag zur Zielfunktion (Formel 5) leistet. Aus dem gewählten Verfahren (vgl. Kapitel Einteilung der Beseitigungsverfahren) ergeben sich dann die zugehörigen Energie- und Stoff- bzw. Materialströme.

$$1 = \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M x_{i,m}^{Auf.Staub} * y_{i,m}^{Auf.Staub} + \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N x_{i,n}^{Ent.Staub} * y_{i,n}^{Ent.Staub}$$

$$+ \sum_{i=1}^I \sum_{w=1}^W x_{i,w}^{Wieder.Staub} * y_{i,w}^{Wieder.Staub} \quad \forall i$$

Formel 6: Verfahrenszuteilung für den angefallenen Staub im OpMökol.

Die Nebenbedingungen (siehe Anlage 6 [b.]) stellen sicher, dass ein anfallender Staub nur in seiner Gesamtmenge entsorgt wird. Jedem Staub wird das für die Staubart am besten geeignete Verfahren zugeteilt. Die binären Entscheidungsvariablen $x_{i,m}$, $x_{i,n}$ und $x_{i,w}$ geben Auskunft darüber, ob Prozess m , n oder w für den Staub i genutzt wird (siehe Anlage 6 [d.]). Aus dem gewählten Verfahren ergeben sich dann die zugehörigen Energie- und Stoff- bzw. Materialströme $m_{i,m}$, $m_{i,n}$ und $m_{i,w}$. Die Opportunitätsvariablen $y_{i,m}$, $y_{i,n}$ und $y_{i,w}$ geben Auskunft darüber, ob das Verfahren für den betrachteten Staub angewendet werden kann. Aus ein Aufbereitungsverfahren resultieren entweder Rohstoffe j oder Reststoffe k . Damit der Anteil der zurückgewonnenen Rohstoffe bzw. Reststoffe berücksichtigt wird, fließen die Verwertungsquoten in Form von $\eta_{j,i,m}^{Rohst.}$ und $\eta_{k,i,m}^{Restst.}$ mit in das Modell ein (siehe Anlage 6 [f.]). In jedem Entsorgungsverfahren setzt sich die ökologische Gesamtbewertung aus dem prozessspezifischen Teil (ω) und verwertungsgütlichen Teil (ϑ) zusammen (vgl. **Abbildung 52**).

Die Erhebung der prozessspezifischen Teile ($\omega_m^{Auf.}$ und $\omega_n^{Ent.}$) der ökologischen Bewertung sind mit einem Aufwand verbunden, da jedes Verfahren mit unterschiedlichen Teilprozessen verbunden ist. Damit der Wert hierzu mit leicht abzuschätzen ist, werden Daten, die einfach zu erheben sind, verwendet. Dies kann z.B. die Summe der notwendigen Logistikkilometer oder der Energiebedarf des energieintensivsten Prozessschrittes des jeweiligen Verfahrens sein. Wie in **Abbildung 52** gezeigt, bekommen VmsB einen Zuschlag auf die prozessspezifischen Teile, um deren ökologischen Nachteil gegenüber VmsV zu berücksichtigen. Der verwertungsgütliche Teil ist lediglich für das Verfahren mit rohstofflicher Verwertung (VmrV) relevant und dient zur Kompensation des prozessspezifischen Teils. Diese Überlegung ist in **Formel 7** zusammengefasst, welche den Teil der ökologischen Bewertung der *Einsparung* (=savings (abk. sav)) in der Gesamtformel des *OpMökol*-Modells (**Formel 5**) bildet.

$$\sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M sav_{i,m}^{Verw.V.} = \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \min \left(m_{i,m}^{Auf.Staub} * \omega_m^{Auf.} + \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N m_{k,i,m,n}^{Ent.Restst.} * \omega_m^{Ent.} ; \sum_{j=1}^J m_{j,i,m}^{Auf.Rohstoff.} * \omega_j^{Rohst.} \right)$$

Formel 7: Ökologische Bewertung der Einsparungen im OpMökol.

Die ökologische Bewertung der Einsparungen beschreibt die geringere Belastung der Ökosphäre durch die Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen bei einer Aufbereitung des Staubes i . Dafür werden die gewonnenen Rohstoffmengen $m_{j,i,m}^{Auf.Rohst.}$ mit einer ökologischen Bewertung der entsprechenden Primärrohstoffe $\omega_j^{Rohst.}$ gewichtet.

Für eine Bewertung sollen verschiedene Indikatoren zur Hand genommen werden. Nuss & Eckelman (2014) haben verschiedene cradle-to-gate Umweltbelastungen unterschiedlicher Elemente über Life Cycle Assessments quantifiziert [82]. Die Datengrundlage einer LCA ist durch ein LCI (life cycle inventory) gegeben. Die Studie von Nuss & Eckelmann (2014) eignet sich gut, da sie eine Kombination aus acht verschiedenen bereits vorhandenen LCI-Datensätzen sowie intensiver Literaturrecherche abbildet [82]. Dabei werden **kumulierter Energiebedarf**, **terrestrisches Versauerungspotenzial**, **Süßwassereutrophierungspotenzial** und **Humantoxizität** als Umweltbelastungen identifiziert und Werte angegeben. Allgemein kann man drei unterschiedliche Arten von Wirkungskategorien unterscheiden: input-bezogene, output-bezogene und toxizitätsbezogene Wirkungskategorien. Die vier gewählten repräsentieren dabei in Summe jede der drei Kategorien. Der kumulierte Energiebedarf ist eine input-bezogene Wirkungskategorie, das Versauerungs- und Eutrophierungspotenzial gehören zu den output-bezogenen Wirkungskategorien und die Humantoxizität zur toxizitätsbezogenen Wirkungskategorie [110]. Diese Daten bilden einen guten Rahmen für den Vergleich ökologischer Belastungen der verschiedenen primären metallischen Rohstoffe. Eine Erweiterung z.B. durch Berücksichtigung des Treibhausgaspotenzials (einer weiteren output-bezogenen Wirkungskategorie) ist möglich.

Unter terrestrischer Versauerung versteht man den Eintrag von säurebildenden Substanzen in den Boden. Die Veränderung des Bodensäuregrades ist mit weitreichenden Folgen verbunden, da viele chemische Gleichgewichte im Boden durch diesen beeinflusst werden. Beispielsweise können toxische Metalle bei starker Versauerung vermehrt ausgewaschen werden und damit Lebewesen und Pflanzen schädigen. Die terrestrische Versauerung wird über die emittierten Schwefeldioxidäquivalente pro kg primär geborgenem Metall angegeben ($\frac{kg\ SO_2-eq}{kg}$).

Bei der Humantoxizität wird der Einfluss auf die menschliche Gesundheit abgeschätzt. Hierfür werden comparative-toxic-units pro kg primär geborgenem Metall angegeben ($\frac{CTUh}{kg}$).

Unter Eutrophierung versteht man die Anreicherung von Nährstoffen in Oberflächengewässern. Jener natürlich ablaufende Prozess kann durch humanen

Stoffeintrag, vor allem von Stickstoff- und Phosphor-Verbindungen, beschleunigt werden. Die Nährstoffanreicherung führt zu vermehrtem Algenwachstum, was sich negativ auf die Artenvielfalt der Gewässer auswirkt. Der Sauerstoffgehalt eutropher Seen sinkt durch die aerobe bakterielle Zersetzung abgestorbener Algen. Das Eutrophierungspotenzial wird über die Masse der Phosphoräquivalente pro kg primär geborgenem Metall angegeben $\left(\frac{\text{kg P-}eq}{\text{kg}}\right)$.

Der kumulierte Energiebedarf stellt die Summe aller benötigten Primärenergien, die zur Herstellung oder Nutzung eines Produkts benötigt werden, dar. In diesem Fall zur Herstellung des Primärrohstoffs. Sie wird in Megajoule-Äquivalenten pro kg angegeben $\left(\frac{\text{MJ-}eq}{\text{kg}}\right)$.

Jeder Rohstoff j bekommt eine ökologische Bewertung $\omega_j^{Rohst.} \in [1,10]$ zugeordnet, welche die Umweltbelastungen des Rohstoffs in der primären Bergung widerspiegeln sollen. Je nachteilhafter die primäre Bergung für die Umwelt ist, desto höher soll die Belohnung der Sekundärgewinnung ausfallen. Da der verwertungsgütliche Teil als negativer Term in die Zielfunktion von OpMökol eingeht und diese minimiert werden soll, führt ein hohes $\omega_j^{Rohst.}$ zu einer höheren Belohnung. Für $\omega_j^{Rohst.}$ gilt demnach

Formel 8:

$$\omega_j^{Rohst.} = \sum_{bk.Rohst.} g_{bk.Rohst.} * \tau_{j,bk.Rohst.} \quad \forall j$$

Formel 8: Ökologische Bewertung eines Rohstoffs im OpMökol.

Die untersuchten Elemente werden in jeder der vier Belastungskategorien in zehn Gruppen eingeteilt, wobei die Elemente, die in der entsprechenden Gruppe die höchsten Werte aufweisen, der höchsten Gruppe zehn zugeteilt werden. Ein Rohstoff wird somit in jeder der vier Belastungskategorien (BK) ein Wert $\tau_j^{bk} \in [1,10]$ zugeteilt. Dieser kann durch einen weiteren Faktor $g_{bk.Rohst.} \in]0,1]$ gewichtet werden.

Ein Rohstoff mit ökologisch maximal ungünstiger Primärbergung hat damit den Wert $\omega_j^{Rohst.} = 10$.

Das Modell ist in Excel implementiert und kann durch die Solver-Funktion gelöst werden (siehe Anlage 7). Weiterhin kann es mit den Sankey-Daten (vgl. Kapitel 7.1) gekoppelt werden, sodass die Daten der Stauberfassung direkt mit dem Modell verknüpft sind.

7.5.3 Die Anwendung von OpMökol am Beispiel der Verwertung durch SiC-Staub-Formlinge

Als die im Projekt entwickelte Methode der Staubverwertung eignet sich die Beimischung zu SiC-Formlingen besonders als Anwendungsbeispiel und soll im Folgenden mit der Entsorgung durch Deponierung verglichen werden. Im Vordergrund steht das Modell in seiner Anwendung und das Potenzial zu präsentieren. Hierfür wurden Daten durch Rücksprache mit der Deponie sowie dem Verwerter der GPS SIC Keßl GmbH % Co. KG möglichst genau abgeschätzt. Jede der vier Umweltbelastungskategorien wurde gleich gewichtet, da kein Fokus auf einer bestimmten Umweltwirkung gelegt wurde.

Beim untersuchten Staub handelt es sich um Staub 4a der Gießerei A (folgend Staub A) mit einem Eisengehalt von 85 %. Da alle anderen Metalle in vernachlässigbar geringen Mengen vorkommen, wird angenommen, dass es sich bei den nicht analysierten Bestandteilen (ca. 15 %) um SiO₂ handelt. Aus der Zusammensetzung des Staubs ergeben sich somit folgende Indizes:

- Staub $i \in I$: Staub von Gießerei A
- Rohstoff $j \in J$: Fe oder SiO₂ mit
 - $\eta_{j=Fe, i=Staub\ A, m=SiC}^{Rohst.} = 0,85$
 - $\eta_{j=SiO_2, i=Staub\ A, m=SiC}^{Rohst.} = 0,15$

Unter der Annahme, dass die gesamte Menge des Rohstoffes (Fe oder SiO₂) im Staub durch die Verwertungsmethode wiedergewonnen werden kann.

- Aufbereitungsprozess $m \in M$: SiC-Staub-Formling
- Entsorgungsprozess $n \in N$: Deponierung

Für das Jahr 2020 wurde eine Staubmenge von 15 t für besagten E-Ofen-Staub gemeldet, daraus resultiert $m_i^{Staub} = 15$.

Für den Rohstoff Fe sind die Werte der vier Belastungskategorien der **Tabelle 22** in Anlage 6 zu entnehmen:

- kumulierter Energiebedarf (KE): $23,1 \frac{MJ-eg}{kg}$ – Gruppe $\tau_{j=Fe, bk.Rohst.=KE} = 4$
- terrestrisches Versauerungspotenzial (Vers.): $5,20E-03 \frac{kg\ SO_2-eg}{kg}$ –
Gruppe $\tau_{j=Fe, bk.Rohst.=Vers.} = 1$
- Süßwassereutrophierungspotenzial (Eutr.): $7,30E-04 \frac{kg\ P-eg}{kg}$ –
Gruppe $\tau_{j=Fe, bk.Rohst.=Eutr.} = 2$

- Humantoxizität (Tox.): $4,10E-07 \frac{CTUh}{kg}$ – Gruppe $\tau_{j=Fe,bk.Rohst.=Tox.} = 1$.

Bei einer Gleichgewichtung aller vier UBKs ($g_{bk.Rohst.} = 0,25$) ergibt sich für $\omega_{j=Fe}^{Rohst.}$ nach **Formel 9** damit folgender Wert:

$$\omega_{j=Fe}^{Rohst.} = 4 * 0,25 + 1 * 0,25 + 2 * 0,25 + 1 * 0,25 = 2.$$

Formel 9: Berechnung der ökologischen Bewertung ω_j für Eisen.

Da für SiO₂ keine Werte in den untersuchten BK bekannt sind wird das Modell für alle möglichen Werte von $\omega_{j=SiO_2}^{Rohst.}$ durchgerechnet. Das gewählte Beispiel basiert auf der Annahme $\omega_{j=SiO_2}^{Rohst.} = 1$.

Die relevanten Belastungskategorien für die Verfahren sind der Energieverbrauch (EVerb.), zurückgelegte Logistikkilometer (LKilo.) und der Wasserverbrauch (WVerb.). Diese wurden in Rücksprache mit den Dienstleistern gewählt, da es möglich war die relevanten Daten zu erheben und die BKs mit entsprechenden Umweltwirkungen verbunden sind. Die Entscheidungsgrundlage für die Gruppenzuordnung ist in Anlage 8, **Tabelle 23** gegeben. Für die Gewichtungsfaktoren werden die Werte $g_{bk=EVerb.} = 0,4$; $g_{bk=LKilo.} = 0,4$ und $g_{bk=WVerb.} = 0,2$ gewählt. Sowohl die Gruppenzuordnung als auch die Gewichtung erfolgten in diesem Beispiel subjektiv und müssten für eine industrielle Implementierung kritisch geprüft und genormt oder deren Einteilung objektiv begründet werden.

Für die Verwertungsmethode der SiC-Staub-Formlinge ergeben sich, durch die Angaben des Verwerters GPS SIC Keßl GmbH & Co. KG, die folgenden Gruppenzuordnungen:

- Energieverbrauch: Gruppe 2 – $\tau_{m=SiC,bk=EVerb.} = 2$
- Logistikkilometer: Gruppe 6 – $\tau_{m=SiC,bk=LKilo.} = 6$
- Wasserverbrauch: Gruppe 4 – $\tau_{m=SiC,bk=WVerb.} = 4$

Die genauen Werte für jede BK sind aus Gründen der Geheimhaltung nicht genannt. Aus den Zuteilungen kann nun nach **Formel 10** die ökologische Bewertung des Aufbereitungsverfahrens $m = SiC\text{-Staub-Formling}$ ermittelt werden:

$$\omega_{m=SiC} = \sum_{bk} g_{bk} * \tau_{m=SiC,bk} = 2 * 0,4 + 6 * 0,4 + 4 * 0,2 = 4$$

Formel 10: Berechnung von ω_m für die Verwertung durch SiC-Staub-Formlinge.

Als zweites Verfahren wird die Deponierung betrachtet. Der verwendete Staub aus dem E-Ofen der Gießerei A ist mit dem AVV-Schlüssel 100909* deklariert. Im Falle der Entsorgung muss dieser zunächst mineralisch aufbereitet werden und wird je nach

Schadstoffbelastung dann einer Deponieklasse (DK) zugeordnet, welche den weiteren Ablauf der Entsorgung vorgibt. Der Staub kann entsprechend seiner Analytik entweder der DK III oder DK IV zugeordnet werden. Die DK III beinhaltet gefährliche Abfälle, die oberirdisch gelagert werden können. In seltenen Fällen kann der Abfall auch als Betonzuschlagstoff verwendet werden. In DK IV fallen Gießereistäube an, die als gefährliche Abfälle deklariert sind und unterhalb der Erdoberfläche eingelagert werden [111].

Der im Anwendungsbeispiel betrachtete Staub A fällt unter die DK IV. Nach der Anlieferung folgt zunächst eine Annahmekontrolle. Dort wird der Staub über eine mineralische Anlage geführt, um mögliche Fremdstoffe durch Windsichter und Magnetabscheider zu entfernen. Anschließend wird das Material in eine Mischanlage weitergeleitet und dort mit anderen Materialien (Strukturkomponenten wie z.B. Bauschutt, Schlämme oder Solen, weitere Stäube und Aschen) in einer definierten Rezeptur vermengt. Sehr stark staubiges Material wird direkt über Silos oder eine BigBag-Entleerungsanlage der Mischanlage zugegeben. Das fertig konditionierte Material wird in 200 t-Chargen gesammelt, beprobt und beim Versatzwerk eingereicht. Nach der Herstellung des Versatzmaterials und einer Freigabe, wird dieses als Abfall mit der AVV 191211* gekennzeichnet und in eine entsprechende Versatzgrube gebracht. Da in Bayern die untertägige Verbringung von Abfällen geologisch nicht möglich ist, wird das Versatzmaterial in ein benachbartes Bundesland transportiert.

Für die Entsorgungsmethode der Deponierung ergeben sich, nach Angaben des Entsorgungs- und Logistik Unternehmens, welches den Staub A der Gießerei A entsorgt, die folgende Werte (bezogen auf eine Tonne Staub):

- Energieverbrauch: 7 kWh – Gruppe 1 – $\tau_{n=Dep.,bk=EVerb.} = 1$
- Logistikkilometer: 99,8 km + 200 km = 299,8 – Gruppe 7 – $\tau_{n=Dep.,bk=LKilo.} = 7$

Zunächst werden die Stäube von der Gießerei A zur Aufbereitung in ein Unternehmen (99,8 km) und anschließend zum Einsatz als Bergversatz transportiert (200 km).

- Wasserverbrauch: 200 l – Gruppe 10 – $\tau_{n=Dep.,bk=WVerb.} = 10$

Daraus resultiert für die ökologische Bewertung des Entsorgungsverfahrens $n =$ *Deponierung* nach **Formel 11** folgender Wert:

$$\omega_{n=Dep.} = \sum_{bk} g_{bk} * \tau_{n=Dep.,bk} = 1 * 0,4 + 7 * 0,4 + 10 * 0,2 = 5,2$$

Formel 11: Berechnung von ω_n für die Entsorgung durch Deponierung.

Werden die erhaltenen Werte in die zu minimierende Zielfunktion eingesetzt, resultieren folgende Ergebnisse (**Formel 12** und **Formel 13**):

$$\begin{aligned} \eta_{\text{öko,SiC}} &= m_{\text{Staub A,SiC}} * \omega_{\text{SiC}} - \text{sav}_{\text{Staub A,SiC}} = m_{\text{Staub A}} * \chi_{\text{Staub A,SiC}} * \\ & \gamma_{\text{Staub A,SiC}} * (\mathcal{G}_{\text{EA}} * \tau_{\text{SiC,EA}} + \mathcal{G}_{\text{Transport}} * \tau_{\text{SiC,Transport}} + \mathcal{G}_{\text{Wasser}} * \tau_{\text{Wasser,EA}}) - \\ & \min (m_{\text{Staub A,SiC}} * \omega_{\text{SiC}}; m_{\text{Staub A,SiC}} * \eta_{\text{Fe,Staub A,SiC}} * \omega_{\text{Fe}} + m_{\text{Staub A,SiC}} * \\ & \eta_{\text{SiO}_2,\text{Staub A,SiC}} * \omega_{\text{SiO}_2}) \\ &= 15 * 1 * 1 * (0,4 * 2 + 0,4 * 6 + 0,2 * 4) \\ & \quad - \min(15 * 4; 15 * 0,85 * 2 + 15 * 0,15 * 1) = 32,25 \end{aligned}$$

Formel 12: Berechnung der Zielfunktion mit den Werten aus dem Anwendungsbeispiel für die Entsorgung durch Verwertung als SiC-Gießereistaub-Formling.

$$\eta_{\text{öko,Dep.}} = m_{\text{Staub A}} * \chi_{\text{Staub A,Dep.}} * \gamma_{\text{Staub A,Dep.}} * \omega_{\text{Dep.}} = 15 * 1 * 1 * 5,2 = 78$$

Formel 13: Berechnung der Zielfunktion mit den Werten aus dem Anwendungsbeispiel für die Entsorgung durch Deponierung.

Da $32,25 < 78$ empfiehlt das Modell für die ausgewählten Parameter die Entsorgung durch Verwertung als SiC-Gießereistaub-Formling.

Abbildung 54 zeigt die Entscheidungsmatrix für alle möglichen Werte $\omega_{n=Dep.}$ und $\omega_{j=SiO_2}^{Rohst.}$ im Intervall von 1 bis 10, bei gleichbleibenden Werten für $\omega_{m=SiC}$ und $\omega_{j=Fe}^{Rohst.}$. Mit Hilfe der Matrix kann abgeschätzt werden, welches Verfahren die bestmögliche Lösung des Problems darstellt, abhängig von der ökologischen Bewertung des betrachteten Gießereistaubs, der darin enthaltenen Rohstoffe und der Deponierung als Entsorgungs-Verfahren.

$\omega_{n=Dep.}$ $\omega_{j=SiO_2}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Deponierung [$\eta_{\text{öko.}}=15$]	Deponierung [$\eta_{\text{öko.}}=15$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=32,25$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=32,25$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=32,25$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=32,25$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=32,25$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=32,25$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=32,25$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=32,25$]
2	Deponierung [$\eta_{\text{öko.}}=15$]	Deponierung [$\eta_{\text{öko.}}=15$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=30$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=30$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=30$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=30$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=30$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=30$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=30$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=30$]
3	Deponierung [$\eta_{\text{öko.}}=15$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=27,75$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=27,75$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=27,75$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=27,75$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=27,75$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=27,75$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=27,75$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=27,75$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=27,75$]
4	Deponierung [$\eta_{\text{öko.}}=15$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=25,5$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=25,5$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=25,5$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=25,5$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=25,5$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=25,5$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=25,5$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=25,5$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=25,5$]
5	Deponierung [$\eta_{\text{öko.}}=15$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=23,25$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=23,25$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=23,25$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=23,25$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=23,25$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=23,25$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=23,25$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=23,25$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=23,25$]
6	Deponierung [$\eta_{\text{öko.}}=15$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=21$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=21$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=21$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=21$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=21$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=21$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=21$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=21$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=21$]
7	Deponierung [$\eta_{\text{öko.}}=15$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=18,75$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=18,75$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=18,75$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=18,75$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=18,75$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=18,75$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=18,75$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=18,75$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=18,75$]
8	Deponierung [$\eta_{\text{öko.}}=15$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=16,5$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=16,5$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=16,5$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=16,5$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=16,5$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=16,5$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=16,5$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=16,5$]	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=16,5$]
9	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=14,25$]									
10	SiC-Formling [$\eta_{\text{öko.}}=12$]									

Abbildung 54: Entscheidungsmatrix für das Anwendungsbeispiel.

Je nach ökologischer Bewertung der betrachteten Rohstoffe (ω_j) und Verfahren (ω_m und ω_n), ergibt sich anhand der entsprechenden Werte für $\eta_{ökologisch}$ eine Handlungsempfehlung.

7.5.4 Zusammenfassung

Stehen mehrere Methoden zur Verfügung, um einen Staub zu entsorgen, so ist es an der Gießerei als Entscheidungsträger festzulegen, welches Verfahren gewählt wird. Während die ökonomischen Gründe für einen bestimmten Weg meist offensichtlich sind, sind die ökologischen Folgen der Entscheidung meist nicht direkt erkennbar. Mit dem *OpMökol* steht für die Entscheidungsfindung im Unternehmen ein datenbasiertes Werkzeug zur Verfügung. Es kombiniert ausgewählte Indikatoren zu ökologischen Auswirkungen mit Bezug auf Einsparungen, die durch die Wiederverwertung eines bestimmten Elements erreicht werden und bildet diese in einer zu minimierenden Zielfunktion ab.

Das Anwendungsbeispiel sowie die Ergebnisse der experimentellen Versuchsreihen haben gezeigt, dass eine Verwertung der Gießereistäube umsetzbar, wirtschaftlich sinnvoll ist und ökologische Vorteile bietet.

In einem nächsten Schritt wäre es möglich das Modell mit Hilfe einer Optimierungssoftware (z.B. IBM ILog Cplex Optimization Studio) in Form eines Algorithmus zu implementieren. Dabei kann weiterhin das Excel-Sheet (vgl. Anlage 7) als Datenbasis genutzt und mit der Software verknüpft werden. Die Anwendung des Modells wird dadurch weiter vereinfacht und die Zugänglichkeit attraktiver für Unternehmen. Ziel sollte es sein, dem Anwender eine leicht verständliche Benutzeroberfläche zu bieten, die eine Optimierung der gegebenen Fragestellung mit minimalem Aufwand ermöglicht.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Die grundlegende Problematik der Gießereistaub-Entsorgung ist auf den ersten Blick einfach zu erläutern: Es existiert ein Abfall, der potenziell wiederverwertbare Stoffe enthält, die bei der aktuellen Entsorgung verloren gehen und dessen Entsorgung zunehmend teurer wird. Die Komplexität der Thematik wird wiederum erst offensichtlich, wenn die Suche nach umfassenden Lösungsstrategien in den Kontext der technischen, rechtlichen, ökonomischen und ökologischen Rahmenbedingungen gesetzt werden. Intuitive Methoden der Wiederverwertung scheitern letztlich an mindestens einer dieser Hürden. Die Findung von technisch und rechtlich umsetzbaren, ökonomisch rentablen und ökologisch vorteilhafteren Entsorgungswegen ist damit eine durchaus ambitionierte Aufgabe, die es erfordert interdisziplinär zu denken und die Grundlagen ebendieser Randgebiete und deren Auswirkungen auf die Thematik miteinzubeziehen.

Nachdem die Forschungsfrage dieser Arbeit mit der Entwicklung von Methoden zur Aufbereitung und Wiederverwertung von Gießereistäuben eine in sich geschlossene Thematik ist, wurde im Projektverlauf schnell deutlich, dass das Forschungsdesign an die konkreten Anforderungen der Teilbereiche angepasst werden musste. Bei der Anwendung von Methoden zur Aufbereitung stand die Grundlagenforschung im Labormaßstab im Vordergrund. Gießereistäube sind ein Gemenge verschiedener Elemente und Verbindungen weshalb auch die Anwendung und Ergebnisse gut erforschter Methoden in dieser komplexen Matrix nur schwer zu prognostizieren sind.

Die Anwendung von Korona-Walzen-Scheidern als elektrostatischer Separatoren, die großtechnisch zur Trennung von Metallgemischen eingesetzt werden ist eine etablierte Methode, die sich im Kontext der Gießereistäube nicht bewährt hat. Die geringe Teilchengröße sowie fein verteilter Kohlenstoff sorgen für eine ineffiziente Trennung. Dadurch haben sich Nicht-Leiter in der Leiter-Fraktion und Leiter in der Nicht-Leiter-Fraktion angesammelt. Des Weiteren kam es während der Versuche zu einem sehr starken Aufstauben, was entweder die Nutzung geschlossener Apparaturen oder ein Absaugen notwendig machen würde. In Summe ist das Anwendungspotenzial als sehr gering einzustufen. Als weitere Methode der Staubaufbereitung wurde die Abreicherung des Gießereistaubs an Schwermetallen mithilfe von Bioleaching untersucht. Die drei durchgeführten Versuche haben ergeben, dass die untersuchten Mikroorganismen bereits ab einer Feststoffbelastung von 2 bis 5 % in ihrer Aktivität eingeschränkt waren. Eine mineralogische Untersuchung des Staubs hat elementares Eisen als Hauptbestandteil identifiziert, was die hemmende Wirkung auf die Bakterien erklären würde. Da Eisen in vielen Staubfraktionen ein Hauptbestandteil ist und sich eine vorherige Abtrennung aus

ökonomischer und ökologischer Sicht nicht lohnen würde, ist auch dieser Methodik in einer hochskalierten Anwendung nur ein geringes Potenzial zuzuschreiben.

Selbst bei erfolgreicher Behandlung resultieren Aufbereitungsmethoden letztlich immer noch in einem Produkt, für das eine Anwendung gefunden werden muss. Nicht selten müssen hierfür dann wieder Prozesse durchlaufen werden, um eine Wiederverwertung zu ermöglichen. Eine ökonomische Rentabilität ist daher schwer zu realisieren. Die Forschung an einer Verwertungsmethode hat sich daher in einem ersten Schritt nicht mit der Frage der Staubeigenschaften und der Suche nach geeigneten Anwendungsfeldern beschäftigt, sondern mit einer Bedarfsanalyse in der Gießereibranche selbst. Eine Gießerei braucht je nach Spezialisierung viele verschiedene Rohstoffe für den Betrieb. Zur Herstellung von Gusseisen aus Roheisen und Stahlschrott in Kupolöfen muss die Schmelze an Kohlenstoff und Silizium angereichert werden. Praktisch passiert das z.B. durch Zugabe von Siliziumkarbid. Dabei variieren die Zusammensetzungen der Formlinge von Gießerei zu Gießerei und müssen an die individuellen Bedürfnisse des Ofens angepasst werden. In Kooperation mit der GPS SIC Keßl GmbH & Co. KG konnten das Herstellungsverfahren der Formlinge adaptiert und die Beimischung von Gießereistäuben ermöglicht werden. Eine erste Versuchsreihe hat gezeigt, dass eine Beimischung von bis zu knapp 50 % möglich ist, ohne an der benötigten Standfestigkeit einzubüßen. Ein weiterer relevanter Parameter ist die Basizität des Formlings, welche sich auch durch den Gießereistaub beeinflussen lässt. Je nach Anfallstelle sind verschieden hohe Anteile an SiO_2 im Staub enthalten. Dieser kann genutzt werden, um Quarzsand, welcher in der Standard-Formulierung als Additiv hinzugegebene werden muss, komplett zu substituieren. Bei einer jährlichen Produktionsmenge von 1.300 t Formlinge könnten je nach Rezeptur mehrere hundert Tonnen Staub wiederverwertet und mehrere Tonnen Quarzsand eingespart werden (vgl. **Tabelle 10** und **Tabelle 11**). In der Standard-Formulierung sorgt die Zugabe von Portlandzement für das Aushärten des Formlings. Da die Produktion von Portlandzement mit hohen CO_2 -Emissionen verbunden ist, ist eine Substitution erstrebenswert. Um die Herstellung der SiC-Gießereistaub-Formlinge ökologisch weiter zu optimieren, wurden daher zwei Alternative Bindemittel untersucht. Ein auf Weizenstärke basiertes Bindemittel, das komplett aus nachwachsenden Rohstoffen besteht, konnte dabei in verschiedenen Rezepturen nicht für die erforderliche Endfestigkeit sorgen. Eine Zement-Alternative auf Basis von Calciumsulfoaluminat hat dagegen selbst Portlandzement sowohl in der Aushärtungszeit als auch in der benötigten Menge für eine ausreichende Endfestigkeit übertroffen. Die Herstellung von CSA-Zement ist mit deutlich weniger Treibhausgasemissionen verbunden und stellt damit eine praktikable und ökologisch vorteilhaftere Alternative dar. Im Durchschnitt ist ein 25 kg Sack CSA-Zement etwa dreimal teurer als die gleiche Menge Portlandzement. Bei größeren Abnahmemengen

und dem insgesamt geringeren Verbrauch könnten sich die Gesamtausgaben jedoch annähern.

Die state-of-the-art Methode, um Umweltwirkungen von Prozessen zu quantifizieren sind Life Cycle Assessments. LCAs ermöglichen die Analyse des gesamten Lebenszyklus und bilden oft die Grundlage für Nachhaltigkeits- und Corporate Social Responsibility (CSR)-Strategien innerhalb eines Unternehmens. Die Durchführung erfolgt in der Regel durch lizenzierte Software für die wiederum Datensätze erworben werden müssen. Eine Anwendung ist somit sowohl mit Investitionskosten für entsprechende Programme als auch mit laufenden Kosten für geschultes Personal und Lizenzen verbunden. Für KMUs sind das Hürden, die oft nicht genommen werden können. Um den Gießereibetrieben abseits von LCAs eine Möglichkeit zu bieten, Entsorgungswege auf einer ökologischen Ebene miteinander zu vergleichen, wurde ein entsprechendes Modell entwickelt. Einem Top-Down Ansatz folgend wurde eine zu minimierende Zielgrößen $\eta_{\text{ökol}}$ definiert, welche durch die charakteristischen Prozesse (prozessspezifischer Teil) und die potenziell zurückgewonnen Stoffe (verwertungsgütlicher Teil) charakterisiert wird. Auf der Basis einer umfassenden Recherche von Nuss & Eckelman (2014) wurden cradle-to-gate Daten für verschiedene Metalle genutzt, um diese innerhalb der vier Belastungskategorien kumulierter Energiebedarf, terrestrisches Versauerungspotenzial, Süßwassereutrophierungspotenzial und Humantoxizität einzustufen [82]. In jeder Kategorie hat jedes Metall einen Wert zwischen 1 und 10 zugeordnet bekommen, wobei 1 den geringsten Beitrag und 10 den höchsten Beitrag in der betrachteten Kategorie abbildet. Das Modell wurde am Beispiel der Verwertung durch Beimischung zu SiC-Formlingen im Vergleich zur Deponierung angewendet. Als Abfallprodukt wurde ein Staub mit einer Zusammensetzung von 85 % Eisen und 15 % SiO₂ gewählt. Da für die ökologische Bewertung ω_j von SiO₂ keine cradle-to-gate Daten zur Verfügung standen wurde der Verbindung mit dem Wert 1 die bestmögliche Bewertung zugeteilt. Als beispielhafte prozessspezifische Parameter wurden der Energieverbrauch, Logistikkilometer und der Wasserverbrauch gewählt. Die Daten wurden bei den Betrieben erhoben und jeder Kategorie ebenfalls ein Wert zwischen 1 und 10 zugeordnet. Für die angegebenen Daten und getroffenen Annahmen hat das Modell die Entsorgung durch Wiederverwertung gegenüber der Deponierung empfohlen.

Wie jedes Modell basiert auch dieses auf Annahmen. Weiterhin kommt es bei der Quantifizierung durch Aggregation unvermeidbar zu Informationsverlusten. Aus diesen und weiteren Gründen ist das Modell keinesfalls als Substitut für ein LCA zu betrachten. Vielmehr soll es die Möglichkeit eines Einstiegs in ein ökologisch nachhaltiges Denken für KMUs, die sich mit der Thematik eventuell noch nicht befasst

haben, bieten. So kann z.B. eine Vorauswahl getroffen und favorisierte Prozesse anschließend um ein LCA ergänzt werden. Das Modell ist in Excel implementiert und kann durch eine Optimierungssoftware z.B. IBM ILog Cplex Optimization Studio erweitert werden, welches wiederum mit Excel gekoppelt werden kann. Die Benutzeroberfläche für den Gießereimitarbeiter würde sich dann auf eine einfache Parametereingabe in Excel beschränken und das Ergebnis ausformuliert übermittelt werden.

Als Teil des Verbunds ForCYCLE II wurde das Projekt drei Jahre vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz finanziert. Mit ForCYCLE Technikum startete im Oktober 2022 ein neuer Verbund, welcher fünf Fachprojekte in den Bereichen der integrierten Produktpolitik und der Recyclingbaustoffe fördert. Die vielversprechenden Ergebnisse dieser Arbeit haben dazu geführt, dass eines dieser geförderten Projekte die Fortsetzung der Thematik des Gießereistaubrecyclings ist. Mit dem Projekt „Gießereistaubrecycling in Technikum und Anwendung – Ressourcenschutz, Substitution und Digitalisierung in Richtung 100% Effizienz“ werden die Ergebnisse dieser Arbeit aufgegriffen und die Potenziale weiter ausgearbeitet. Der Fokus soll auf dem Up-Scaling und der Ausarbeitung weiterer Rezepturen für SiC-Gießereistaub-Formlinge, sowie der Digitalisierung und Implementierung in den Gießereien liegen. Durch Erstellung einer Datenbank kann es dann ermöglicht werden, Rezepturen digital auf die Bedürfnisse der Gießereien anzupassen sowie Bedarfs- und Produktionsprognosen zu erstellen. Das Modell kann weiter optimiert, digitalisiert und anhand verschiedener Entsorgungswege durchgerechnet werden. Durch Schmelzversuche in den Gießereien kann die erfolgreiche Anwendung und Serienproduktion validiert werden. Damit ist der Forschungsausblick für die nächsten drei Jahre und das Potenzial für eine industrielle Anwendung darüber hinaus als außerordentlich gut einzustufen.

So wie die effiziente Nutzung von Ressourcen nur ein Puzzleteil in der Förderung einer nachhaltigen Entwicklung ist, so ist die in dieser Arbeit behandelte Thematik auch nur ein Puzzleteil hin zu höherer Ressourceneffizienz. Um die Auswirkungen von scheinbar kleinen Optimierungen nachvollziehen zu können, ist es notwendig mit einer gewissen Weitsicht auf die Themengebiete zu schauen. Negative Entwicklungen werden zu oft erst ernst genommen, wenn deren Folgen akute Konsequenzen für die individuelle Person hat. Ein Gegensteuern ist dann aber umso schwieriger. Der schonende Umgang mit Ressourcen, Recycling und viele andere verwandte Bereiche sind nicht zuletzt auch präventive Maßnahmen, deren Auswirkungen sich oft nicht durch direkte positive Rückkopplung, sondern der Vermeidung von zukünftigen negativen Auswirkungen charakterisieren. Das kann zu einer Verschleierung der Bedeutung solcher Maßnahmen führen. Doch genau darin liegt einer der

Kerngedanken der heutzutage so sehr geforderten Nachhaltigkeit. Der Schutz des Potenzials natürlicher Lebensgrundlagen zum Erhalt der Gesamtleistungsfähigkeit zugunsten zukünftiger Generationen. Damit ist einem nachhaltigem Leben eine gewisse Selbstlosigkeit nicht abzusprechen.

Literaturverzeichnis

1. Radivojević M, Rehren T, Farid S, Pernicka E, Camurcuoğlu D. (2017) Repealing the Çatalhöyük extractive metallurgy: The green, the fire and the 'slag'. *Journal of Archaeological Science*.86:101-22.
2. Habashi F. Metallurgy, History of. In: Buschow KHJ, editor. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*; Elsevier; 2001. p. 5537-41.
3. Okamoto H. (1992) The C-Fe (carbon-iron) system. *Journal of Phase Equilibria*.13(5):543-65.
4. Forrester R. (2013) How change happens: A theory of philosophy of history, social change and cultural evolution. *Social Change and Cultural Evolution* (October 8, 2013):41-7.
5. Camp JM, Francis CB. *The making, shaping and treating of steel*: Carnegie Steel Company; 1920.
6. Gregurek D, Peng Z, Mackey PJ, Wenzl C. (2015) Metallurgy: Energy and Environmental Issues. *Journal of Metals*.67(5):1064-5.
7. MacArthur E. (2013) *Towards the circular economy, economic and business rationale for an accelerated transition*. Ellen MacArthur Foundation: Cowes, UK:21-34.
8. *Kreislaufwirtschaft: Definition und Vorteile*: Europäisches Parlament; 2015 [<https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/economy/20151201STO05603/kreislaufwirtschaft-definition-und-vorteile>]. abgerufen am: 12.01.2022
9. Pufé I. *Nachhaltigkeit (3., überarbeitete und erweiterte Auflage)*. Konstanz. München: UVK Verlagsgesellschaft mbH & UVK/Lucius; 2017.
10. Böschen S, Reller A, Soentgen J. (2004) *Stoffgeschichten—eine neue Perspektive für transdisziplinäre Umweltforschung*.
11. Reller A, Fendt J, Böckenholt C. (2017) *Ressourcenstrategie für Bayern*.
12. *Die deutsche Gießerei-Industrie 2019/2020 Konjunktur*. Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie e. V.; 2020.
13. *Die bayerische M+E Industrie 2019 in Zahlen*. Bayerischer Unternehmensverband Metall und Elektro e. V. ; 2020. p. 27.
14. Warnecke H-J, Westkämper E. *Einführung in die Fertigungstechnik*: Springer-Verlag; 2006.
15. Awiszus B, Bast J, Hänel T, Kusch M. *Grundlagen der Fertigungstechnik*: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG; 2012.
16. Klocke F. *Gießen. Fertigungsverfahren 5*: Springer; 2018. p. 5-38.
17. *Untersuchung von Eisen- und NE-Metallgießereien Branchengutachten*. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg; 1996.
18. Putz M, Cherkaskyy M, Esche A, Fanghänel C, Schlegel A. *Energieeffizienzpotenzial in der Planung am Beispiel der Gießerei-Industrie*. 2015.
19. Roos E, Maile K, Seidenfuß M. *Werkstoffkunde für Ingenieure: Grundlagen, Anwendung, Prüfung*: Springer-Verlag; 2011.
20. Gara S, Schrimpf S. *Behandlung von Reststoffen und Abfällen in der Eisen- und Stahlindustrie*: Umweltbundesamt; 1998.
21. Kroll J. (2015) *Stahlnebenprodukte: Schlacken, Stäube und Schlämme mit hohem Wiederverwertungspotenzial*. *EU-Recycling*.01/2015:16.

22. Bührig-Polaczek A, Walter M, Spur G. Handbuch Urformen: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG; 2013.
23. Kranert M, Cord-Landwehr K. Einführung in die Abfallwirtschaft; 2010.
24. Lottner U, Himmelhan C, Bleckmann F. Abfall - Vermeiden, trennen, verwerten oder beseitigen. Bayerische Landesamt für Umwelt; 2012.
25. Abfallbehandlung - Thermische Verwertung: Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz; 2021 [https://www.stmuv.bayern.de/themen/abfallwirtschaft/haushalts_gewerbeabfaelle/thermische_verwertung/index.htm]. abgerufen am: 06.07.2021
26. Tabasaran O. Abfallwirtschaft, Abfalltechnik, Sonderabfälle: Ernst & Sohn; 1997.
27. Breitkopf A. Anzahl der Mülldeponien in Deutschland bis 2019: Statista; 2021 [<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/263063/umfrage/anzahl-der-deponien-in-deutschland/>]. abgerufen am: 06.07.2021
28. Hintergrundpapier der Deutschen Gießerei-Industrie: Deponierung von Altsand – droht Deutschland ein neuer Entsorgungsnotstand? : Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie e. V.; 2016 [<https://docplayer.org/47521688-Hintergrundpapier-der-deutschen-giesserei-industrie-deponierung-von-altsand-droht-deutschland-ein-neuer-entsorgungsnotstand.html>]. abgerufen am: 06.07.2021
29. Roos E, Maile K, Seidenfuß M. Werkstoffkunde für Ingenieure: Grundlagen, Anwendung, Prüfung: Springer-Verlag; 2017.
30. Berns H, Theisen W. Eisenwerkstoffe-Stahl und Gusseisen: Springer; 2008.
31. KE-Werksnorm angelehnt an DIN EN-1561 Gusseisen mit Lamellengraphit (Grauguss): Kemptener Eisengießerei Adam Hönig AG; 2006 [https://www.ke-ag.de/wp-content/uploads/2017/11/Werkstofftabelle_GJL.pdf]. abgerufen am: 21.06.2022
32. Bargel H-J, Schulze G. Werkstoffkunde: Springer-Verlag; 2013.
33. Hornbogen E, Eggeler G, Werner E. Werkstoffe: Aufbau und Eigenschaften von Keramik-, Metall-, Polymer- und Verbundwerkstoffen: Springer-Verlag; 2019.
34. Herfurth K. (2007) Gusseisen - kleine Werkstoffkunde eines viel genutzten Eisenwerkstoffs. KONSTRUIEREN UND GIESSEN.32(1):2.
35. Schlegel J. Stahl – der Werkstoff. Die Welt des Stahls: Springer; 2021. p. 11-65.
36. Schreiter W. Chemische Thermodynamik. De Gruyter; 2018.
37. Drexler A. Charakterisierung von elektrochemisch präparierten Deckschichten auf Vanadium, Eisen-Vanadium und Eisen-Chrom-Vanadium-Legierungen mit Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS): Dissertation, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf; 2006.
38. Wüller E, Bührig-Polaczek A, Deike R. Einfluss von Legierungselementen auf die Gefügeausbildung und mechanische Eigenschaften von Gusseisen mit Kugelgraphit: Fachgruppe Metallurgie; 2015.
39. Laska R, Felsch C. Werkstoffkunde für Ingenieure: Springer-Verlag; 2013.
40. Dommaschk C. (2003) Beitrag zur Gefügebeeinflussung erstarrender Metallschmelzen durch vibration.
41. Borse S, Mangulkar Y. (2014) Review on grey cast iron inoculation. Int J Innov Res Sci Eng Technol.3:30-6.

42. Aigner M. Einfluss ausgewählter Impfmittel auf die Graphitausscheidung in verschleißfesten Gusseisen-Legierungen [Masterarbeit]: Technische Universität Graz; 2017.
43. Koch M, Soulas K, editors. Inoculation of grey and ductile iron. 7th International Ankiros Foundry Congress, Istanbul, Turkey; 2014.
44. Hasse S. Kantenhärte, Weißeinstrahlung. Gießerei-Lexikon 2022.
45. Von Carlowitz HC. Sylvicultura Oeconomica, oder hauswirthliche Nachricht und naturmässige Anweisung zur wilden Baumzucht... zugleich eine gründliche Nachricht von den in Sächss. Landen gefundenen Turff, dessen Beschaffenheit, nutzen, etc: Johann Friedrich Braun; 1713.
46. Stiehl C, Hirth T. (2012) Vom additiven Umweltschutz zur nachhaltigen Produktion. Chemie Ingenieur Technik.7(84):963-8.
47. Hungerbühler K, Ranke J, Mettier T. Chemische produkte und prozesse: Grundkonzepte zum umweltorientierten design: Springer-Verlag; 1999.
48. Hauff V, Brundtland GH. (1987) Unsere gemeinsame Zukunft:[der Brundtland-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung].
49. Koch L, Monßen M. Kooperative Umweltpolitik und nachhaltige Innovationen: das Beispiel der chemischen Industrie: Springer-Verlag; 2006.
50. Brandt C. (2002) Die chemische Industrie auf dem Weg in eine grüne Zukunft? Sustainable Development und Responsible Care. Chemie in unserer Zeit.36(4):214-24.
51. Mayer K. Nachhaltigkeit: 111 Fragen und Antworten: Nachschlagewerk zur Umsetzung von CSR im Unternehmen: Springer-Verlag; 2017.
52. Steurer R. (2001) Paradigmen der Nachhaltigkeit. Zeitschrift für Umweltpolitik und Umweltrecht.24(4):537-66.
53. Von Hauff M. Nachhaltige Entwicklung. Nachhaltige Entwicklung: De Gruyter Oldenbourg; 2021.
54. The future we want: UN; 2012 [<https://sustainabledevelopment.un.org/futurewewant.html>]. abgerufen am: 17.10.2021
55. Mäntele CM. Ziele für nachhaltige Entwicklung: Engagement Global gGmbH; [<https://17ziele.de/>]. abgerufen am: 26.07.2021
56. Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland; 2016.
57. Deutsches Ressourceneffizienzprogramm III – 2020 bis 2023 Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit; 2020.
58. Bachmann G. Die Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie 2016–Stand und Perspektiven. Die Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie Wegweiser für eine Politik der Nachhaltigkeit2017.
59. Raworth K. A safe and just space for humanity: can we live within the doughnut?: Oxfam; 2012.
60. Boffey D. Amsterdam to embrace 'doughnut' model to mend post-coronavirus economy. The Guardian. 2020.
61. Wilts H, von Gries N. (2017) Der schwere Weg zur Kreislaufwirtschaft. GWP–Gesellschaft Wirtschaft Politik.66(1):13-4.

62. Wilts H, Berg H. Digitale Kreislaufwirtschaft: Die Digitale Transformation als Wegbereiter ressourcenschonender Stoffkreisläufe. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie; 2018.
63. Neher A. Kreislaufwirtschaft für Unternehmen: ein fließsystemorientierter Ansatz: Springer-Verlag; 2013.
64. Haupt M, Kägi T, Hellweg S. (2018) Modular life cycle assessment of municipal solid waste management. *Waste management*.79:815-27.
65. Deike R. (2020) Bedeutung der Gießerei-Industrie in einer Circular Economy. *GIESSEREI*:26-31.
66. Dötsch E. Induktives Schmelzen und Warmhalten: Grundlagen-Anlagenaufbau-Verfahrenstechnik: Oldenbourg Industrieverlag; 2011.
67. Martens H, Goldmann D. Recycling mineralischer Baustoffe und Verwertung von Schlacken und Aschen. *Recyclingtechnik*: Springer; 2016. p. 355-76.
68. Boeing N. (2008) Die offene Technosphäre. *MIT Technology Review*.
69. Simonis UE. Von der Natur lernen? Über drei Bedingungen zukunftsfähiger Wirtschaftsentwicklung. *Natur als Vorbild: was können wir von der Natur zur Lösung unserer Probleme lernen?: Idstein: Schulz-Kirchner*; 1993. p. 115-33.
70. Schmidt-Bleek F. Nutzen wir die Erde richtig?: Von der Notwendigkeit einer neuen industriellen Revolution. Frankfurt; 2008.
71. Obermaier R. Handbuch Industrie 4.0 und Digitale Transformation: betriebswirtschaftliche, technische und rechtliche Herausforderungen: Springer; 2019.
72. Scharf S. Giesserei 4.0: Innovatives Technologiekonzept für die smarte und nachhaltige Prozessgestaltung2019.
73. Falter W, Keller A, Nickel J, Meincke H. Chemie 4.0. Wachstum durch Innovation in einer Welt im Umbruch. Deloitte; 2018.
74. techconsult. Digitalisierungsindex Mittelstand 2020/2021: Der digitale Statusquo des deutschen Mittelstands. 2020.
75. Deckert R. Digitalisierung und Industrie 4.0: Springer; 2019.
76. Nawrocki J, Rohland B. (2020) Einstieg in die Digitalisierung der Gießerei. *GIESSEREI PRAXIS*.05-06/2020.
77. Walther G. Nachhaltige Wertschöpfungsnetzwerke: Überbetriebliche Planung und Steuerung von Stoffströmen entlang des Produktlebenszyklus: Springer-Verlag; 2010.
78. Schmidt M. Der Einsatz von sankey-diagrammen im stoffstrommanagement. *Beiträge der Hochschule Pforzheim*; 2006.
79. Schmidt M. (2008) The Sankey diagram in energy and material flow management: part II: methodology and current applications. *Journal of industrial ecology*.12(2):173-85.
80. Hauschild MZ, Rosenbaum RK, Olsen SI. Life cycle assessment: Springer; 2018.
81. Klöpffer W, Grahl B. Life cycle assessment (LCA): a guide to best practice: John Wiley & Sons; 2014.
82. Nuss P, Eckelman MJ. (2014) Life cycle assessment of metals: a scientific synthesis. *PloS one*.9(7):e101298.
83. Morosini M, Schneider C, Röhm M, Grünert A, Ballschmiter K. (2002) Umweltindikatoren, Grundlagen, Methodik, Relevanz. Bd.1:57.

84. Weber-Blaschke G, Frieß H, Peichl L, Faulstich M. (2002) Aktuelle Entwicklungen bei Umweltindikatorensystemen. *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung*.14(3):187-93.
85. Schäfer D, Seibel S, Radermacher W. *Umweltindikatoren und Umweltziele. Umweltziele und Indikatoren*: Springer; 2004. p. 163-82.
86. Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung im Juni 1992 in Rio de Janeiro: Dokumente; Agenda 21: UN; 1992.
87. Nachhaltigkeitsindikatoren: Statistisches Bundesamt; 2022 [https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Nachhaltigkeitsindikatoren/_inhalt.html]. abgerufen am: 11.08.2022
88. Perrenet J, Zwaneveld B. (2012) The many faces of the mathematical modeling cycle. *Journal of Mathematical modelling and Application*.1(6):3-21.
89. Haußer F, Luchko Y. *Methodik der mathematischen Modellierung. Mathematische Modellierung mit MATLAB®*: Springer; 2011. p. 51-78.
90. Eck C, Garcke H, Knabner P. *Mathematische Modellierung*: Springer; 2008.
91. Suhl L, Mellouli T. *Optimierungssysteme: Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen*: Springer-Verlag; 2009.
92. Swart C. Analyse römischer Ziegel mit ICP-OES/-MS: Methodenvergleich zwischen RFA und ICP 2005.
93. Bohr N. (1922) Der Bau der Atome und die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Elemente. *Zeitschrift für Physik*.9(1):1-67.
94. Skoog DA, Holler FJ, Crouch SR. *Principles of instrumental analysis*: Cengage learning; 2017.
95. Hedrich S, Schippers A. (2014) Geobiotechnische Metallgewinnung. *BIOspektrum*.20(1):103-4.
96. Dott W, Michael S. (2016) Möglichkeiten und Grenzen von Bioleaching- und Bioakkumulationsverfahren für die Rückgewinnung von Metallen und Phosphor.
97. Auerbach R, Bokelmann K, Stauber R, Schnell S, Ratering S, Werner A, et al. (2018) Bioleaching zum Recycling von Sekundärrohstoffen. *Chemie in unserer Zeit*.52(5):330-40.
98. Köhnlechner R, Sander S. (2009) Praktischer Einsatz elektrostatischer Separatoren in der Sekundärrohstoffindustrie. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*.154(4):136-9.
99. Hasse S. *Carborund. Giesserei-Lexikon*2022.
100. Franke S. *Kupolofenauskleidung*. Scheele & Schön GmbH; 2022.
101. Hanein T, Galvez-Martos J-L, Bannerman MN. (2018) Carbon footprint of calcium sulfoaluminate clinker production. *Journal of Cleaner Production*.172:2278-87.
102. Huntzinger DN, Eatmon TD. (2009) A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. *Journal of cleaner production*.17(7):668-75.
103. Yamashita M, Tanaka H. (2012) Low-temperature burnt Portland cement clinker using mineralizer. *Cement Science and Concrete Technology*.65(1):82-7.
104. Unicem B. *Buzzi Unicem next - Hydraulisches Bindemittel auf Basis von Calcium-Sulfo-Aluminat-Klinker* [<https://www.buzziunicem.com/documents/90625/242146/Next+Manual+-+DEU.pdf/6756cd57-a374-496b-e9a8-1ba66c2e4370>]. abgerufen am: 16.07.2022

105. Cody A, Lee H, Cody R, Spry P. (2004) The effects of chemical environment on the nucleation, growth, and stability of ettringite $[Ca_3Al(OH)_6]_2(SO_4)_3 \cdot 26H_2O$. *Cement and Concrete Research*.34(5):869-81.
106. Unicem B. Buzzi Unicem Next base - Hydraulisches Bindemittel auf Basis von Calciumsulfoaluminat-Klinker: Dyckerhoff GmbH; [<https://www.dyckerhoff.com/documents/209745/254067/Next+base+%E2%80%93+Produktdatenblatt.pdf/341cd527-4178-fa44-1d03-6bcbd616c6d8>]. abgerufen am: 16.07.2022
107. Haist M. Calcium-Silikat-Hydrat-Unverzichtbarer Bestandteil von Beton: KIT Scientific Publishing; 2018.
108. Richardson IG. (2008) The calcium silicate hydrates. *Cement and concrete research*.38(2):137-58.
109. Heinz D, Urbonas L. (2008) Teilprojekt 16: Holzbeton. Technische Universität München, München.
110. Umweltbundesamt. DIE ÖKOBILANZ (FORTSETZUNG) Ecodesignkit: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB); 2015 [[https://www.ecodesignkit.de/methoden/b2-analyse-und-bewertungsmethoden/b21-die-oekobilanz/die-oekobilanz-fortsetzung/#:~:text=a.m.-,Versauerungspotenzial%20\(AP\),Industrieanlagen\)%20und%20aus%20der%20Landwirtschaft.](https://www.ecodesignkit.de/methoden/b2-analyse-und-bewertungsmethoden/b21-die-oekobilanz/die-oekobilanz-fortsetzung/#:~:text=a.m.-,Versauerungspotenzial%20(AP),Industrieanlagen)%20und%20aus%20der%20Landwirtschaft.)]. abgerufen am: 04.09.2022
111. Abfallsteckbrief "1009 Eisen- und Stahlgießereien": Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW); 2009 [https://www.abfallbewertung.org/ipa/reppen.php?report=ipa&char_id=1009_Eisen&lang_id=de&avv=&synon=&kapitel=7>active=]. abgerufen am: 08.08.2022
112. Wolff H. Innovative Techniken: Beste verfügbare Techniken (BVT) in ausgewählten industriellen Bereichen Teilvorhaben 3: Gießereien Vol. 3. Umweltbundesamt; 2014.

Anhang

Anlage 1

Tabelle 12: Maßnahmen und Empfehlungen für einen nachhaltigeren Gießereibetrieb nach [18, 112].

Anlage	Maßnahmen und Empfehlungen	BVT			
Induktionsöfen	<ul style="list-style-type: none"> Schmelzen von sauberem Schrott Optimieren des Einsatzmaterials, des Chargiervorgangs und des Betriebes Neukauf: Mittelfrequenzstrom-Ofen, sowie Änderung des gesamten Leistungsstroms Nutzung der Abwärme Dichten und Fassen der Abzugshauben um die Abgase maximal abzusaugen Nutzung einer trockenen Rauchgasreinigung Einhalten der Staubemissionen unter 0.2 kg/t geschmolzenen Eisens 	5.2	Materialmanagement	<ul style="list-style-type: none"> Minimierung des Rohstoffverbrauchs Verbesserung der Nutzung der Rohstoffe Recycling Kontrolle interner Materialflüsse 	4.1
			Nachbearbeiten der Gussstücke	<ul style="list-style-type: none"> Abgase sollten gesammelt und trocken oder nass (Wäsche) behandelt werden Emissionswerte von Staub sollen 5-20 mg/Nm³ nicht überschreiten 	4.5
Kupolöfen	<ul style="list-style-type: none"> Sekundärwindbetrieb für Kaltwindkupolöfen Sauerstoffangereichertes Gebläse (Gehalt in der Luft um 1 % - 4 % erhöhen) geringe Anfahrzeiten für Heißwindkupolöfen mit kontinuierlicher Luftzufuhr Verwenden von Koks in kontrollierter Qualität Reinigen der Ofenabgase Nachverbrennen der Gicht des Kaltwindkupolofens, wenn das Abgas autotherm brennt Nutzung der Abwärme separate Verbrennungskammer bei Heißwindöfen Dioxin- und Furan-Emissionen < 0,1 ng/TEQNm³ Nasswäschesystem beim Schmelzen mit Thomasschlacke 	5.2	Lärminderung	<ul style="list-style-type: none"> Entwickeln und Einführen einer Lärminderungsstrategie mit allgemeinen und Quellspezifische Maßnahmen Nutzung geschlossener Systeme für Starklärbereiche wie das Rütteln/Auspacken 	4.5
			Abwasser	<ul style="list-style-type: none"> getrenntes Halten und Abführen verschiedener Abwässer entsprechend ihrer Zusammensetzung und Schmutzfracht Sammeln von Oberflächenwassers und Nutzung von Olabscheidern im Sammelsystem, bevor es in das zentrale Abwassersystem abgeleitet wird Behandlung der verschiedenen Abwässer Maximieren der internen Wiederverwendung des Prozesswassers Mehrfachnutzung von behandeltem Abwasser 	4.6
Grünsandformen	<ul style="list-style-type: none"> Mixen unter Normalluft Mixen im Vakuum unter Beachtung, dass die Sandkapazität mind. 60 t/h beträgt 	5.4	Emissionensminderung	<ul style="list-style-type: none"> Rohstoffe sollten nur abgedeckt gelagert werden, ist dies nicht möglich, sollten Sprays, Binder, Vorratsmanagementtechniken, Windschutzeinrichtungen genutzt werden Absaugen des Schmelz- und Gießbereiches zur Säuberung der Luft Geschlossene Türen Ordnung und Sauberkeit Kontrolle und Management auf mögliche diffuse Emissionen im Wasser 	4.5
Formen mit chem. gebund. Sand und Kern	<ul style="list-style-type: none"> Anwendung verschiedener Bindertypen unter Beachtung der Prozesskontrolle, Erfassen des Abgases und Minderung der Emissionen möglich 	5.4	Umweltmanagement	<ul style="list-style-type: none"> Umweltmanagementsystem integrieren Definition von Umweltrichtlinien Planen und umsetzen umweltschonenderer Maßnahmen 	4.1
Dauerformen	<ul style="list-style-type: none"> Verwendung der chemisch gebundenen Sandkerne beim Kokillenguss und Niederdruckguss nach technischen Möglichkeiten Beschichtung mit Trennmittel und Kühlung der Sandform durch Kühlwasser in Form von Sprühnebel beim Hochdruckkokillenguss (HPDC) 	5.5			

Anlage 2

Tabelle 13: Verwendete Mikroorganismen für den Zusammenschluss zur Gemeinschaft.

Ecometals Standard (EM)			
Leptospirillum ferriphilum	Sulfobacillus benefaciens	Acidithiobacillus caldus	Sulfobacillus thermosulfidooxidans
Tailingskultur (TAI)			
Leptospirillum ferrooxidans	Ferropasma acidophilum	Acidithiobacillus ferrooxidans	Acidithiobacillus thiooxidans

Anlage 3

Die Proben der Stäube der Gießereien wurden zum Ende des Jahres 2020 genommen. Die Analyse zum Aufschluss der enthaltenen Metalle fand im folgenden Jahr 2021 statt.

Gießerei A

Staubanfall

Tabelle 14: Staubaanfall der Gießerei A im Jahr 2020.

	Anfallstelle	Staubname	Menge [t/a]	Stand der Daten	Gesamt [t/a]
Staub 1 a	Kupolofen Abgasreinigung Grobabscheider	Grobabscheiderstaub	80,00	2020	2760,00
Staub 1 b	Kupolofen Abgasreinigung Nasswäscher	Filterkuchen Kupolofen	1000,00	2020	
Staub 2	Filterstaub E-Ofen	E-Ofen Staub	15,00	2020	
Staub 3	Absaugung Eirich	Sand Eirich	1000,00	2020	
Staub 3a	Filter Disa	Staub Disa	n.b.	2020	
Staub 3b	Filter FAIV	Staub FA IV	n.b.	2020	
Staub 3c	Absaugung Gusstransport	Staub Gusstransport Bau 326	n.b.	2020	
Staub 4a	Strahlanlage WST	FE Stäube	600,00	2020	
Staub 4b	Strahlanlage DT20	FE Stäube		2020	
Staub 4c	Strahlanlage CT3	FE Stäube		2020	
Staub 4d	Putzerei	FE Stäube		2020	
Staub 5	Absaugung Konverter	MgO-Staub		40,00	
Staub 6	Strahlanlage	AIO-Staub	25,00	2020	

Analyse und Vergleich mit früheren Daten falls vorhanden:

Tabelle 15: Analysedaten der Stäube aus dem Jahr 2020 der Gießerei A.

Probennummer	21052114					21052115					21052116				
	Staub 1a					Staub 1b					Staub 2				
Probenbezeichnung	Kupolofen 7					Kupolofen Abgasreinigung					Filterstaub E-Ofen				
Element	2015	2019	2021	Durchschnitt	Std.	2015	2019	2021	Durchschnitt	Std.	2015	2019	2021	Durchschnitt	Std.
	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[%]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[%]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[%]
Al	6,91		5,52	6,22	15,81			6,16	6,16		2,51		3,09	2,80	
Ba	0,45		0,30	0,38	28,23			0,26	0,26				0,11	0,09	
Ca	43,02		8,35	25,68	95,45			19,39	19,39		2,15		2,62	2,39	
Cr	0,25		0,09	0,17	67,34			0,09	0,09		0,16		0,19	0,17	
Cu	0,28		0,10	0,19	68,34			0,18	0,18		0,44		0,73	0,58	
Fe	300,0		16,4	158,19	126,77			133,1	133,13		510,0		499,3	504,66	
K	1,64		2,19	1,91	20,21			9,01	9,01				0,77	0,69	
Mg	1,87		1,92	1,89	1,85			5,38	5,38		34,04		27,24	30,64	
Mn	2,32		1,85	2,09	15,82			21,98	21,98		29,15		46,79	37,97	
Ni	0,09		0,04	0,07	48,98			0,03	0,03		0,27		0,22	0,25	
Pb	0,63		0,10	0,37	102,05			1,17	1,17		0,81		0,46	0,64	
Zn	14,60		6,49	10,54	54,39			5,17	5,17		6,61		3,33	4,97	

Probennummer	21052117					21053101					21053102				
	Staub 3					Staub 3a					Staub 3b				
Probenbezeichnung	Absaugung Eirich					Filter Disa					Filter FA IV				
Element	2015	2019	2021	Durchschnitt	Std.	2015	2019	2021	Durchschnitt	Std.	2015	2019	2021	Durchschnitt	Std.
	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[%]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[%]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[%]
Al	27,82		34,57	31,20				39,31	39,31				62,55	62,55	
Ba	0,28		0,65	0,47				0,69	0,69				1,17	1,17	
Ca	7,64		9,01	8,33				23,94	23,94				14,03	14,03	
Cr	0,03		0,10	0,06				0,04	0,04				0,04	0,04	
Cu	0,21		0,13	0,17				0,05	0,05				0,07	0,07	
Fe	16,3		17,1	16,71				16,8	16,78				22,6	22,65	
K	0,92		2,86	1,89				1,29	1,29				3,95	3,95	
Mg	7,27		8,40	7,84				14,75	14,75				16,12	16,12	
Mn	0,36		0,69	0,52				0,38	0,38				0,41	0,41	
Ni	0,00		0,10	0,05				0,02	0,02				0,02	0,02	
Pb	0,09		0,04	0,06				0,05	0,05				0,04	0,04	
Zn	0,07		0,28	0,17				0,14	0,14				0,17	0,17	

Probennummer	21053103					21052118					21053104				
	Staub 3c					Staub 4a					Staub 4b				
Probenbezeichnung	Absaugung Gusstransport					Strahlanlage WST					Strahlanlage DT 20				
Element	2015	2019	2021	Durchschnitt	Std.	2015	2019	2021	Durchschnitt	Std.	2015	2019	2021	Durchschnitt	Std.
	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[%]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[%]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[%]
Al			22,85	22,85				0,97	1,35				5,84	5,84	
Ba			0,76	0,76				0,05	0,08				0,13	0,13	
Ca			5,37	5,37				1,00	0,99				2,15	2,15	
Cr			0,03	0,03				0,94	1,30				0,16	0,16	
Cu			0,05	0,05				0,70	1,17				0,15	0,15	
Fe			16,2	16,21				850,0	898,6				60,7	60,69	
K			1,45	1,45				0,95	0,29				0,95	0,95	
Mg			7,08	7,08				0,61	1,51				1,83	1,83	
Mn			0,30	0,30				4,20	4,47				0,95	0,95	
Ni			0,01	0,01				0,44	0,82				0,08	0,08	
Pb			0,02	0,02				0,02	0,04				0,01	0,01	
Zn			0,06	0,06				0,13	0,16				0,06	0,06	

Probennummer	21053105					21052119				
	Staub 4c					Staub 4d				
Probenbezeichnung	Strahlanlage CT3					Putzerei				
Element	2015	2019	2021	Durchschnitt	Std.	2015	2019	2021	Durchschnitt	Std.
	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[%]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[%]
Al			7,78	7,78				1,70	0,31	
Ba			0,22	0,22				0,08	0,04	
Ca			2,53	2,53				0,93	0,64	
Cr			0,91	0,91				1,10	1,01	
Cu			0,70	0,70				0,93	0,81	
Fe			529,7	529,70				850,0	506,7	
K			0,46	0,46				0,26	0,40	
Mg			4,64	4,64				1,20	0,69	
Mn			4,27	4,27				4,50	4,23	
Ni			0,44	0,44				0,59	0,54	
Pb			0,02	0,02				0,44	0,82	
Zn			0,11	0,11				0,09	0,05	

Probennummer	21053106					21052120				
	Staub 5					Staub 6				
Probenbezeichnung	Absaugung Konverter					Strahlanlage				
Element	2015	2019	2021	Durchschnitt	Std.	2015	2019	2021	Durchschnitt	Std.
	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[%]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[%]
Al			1,46	1,46				29,20	1,34	
Ba			0,17	0,17				0,00	0,00	
Ca			0,90	0,90				1,09	1,43	
Cr			0,04	0,04				0,37	1,39	
Cu			0,08	0,08				1,84	1,19	
Fe			16,9	16,89				835,0	879,7	
K			9,00	9,00				0,00	0,38	
Mg			417,34	417,34				0,64	1,64	
Mn			2,13	2,13				3,28	4,74	
Ni			0,02	0,02				0,33	0,82	
Pb			0,05	0,05				0,15	0,06	
Zn			0,35	0,35				0,40	0,13	

Gießerei B

Staubanfall

Tabelle 16: Staubanfall der Gießerei B im Jahr 2020.

Anfallstelle	Staub 1	Staub 2	Staub 3	Gesamt
	Schmelzbetrieb	Formerei	Putzerei	
Staubname	Gemisch EQ 1, EQ 12B, EQ 20	Gemisch EQ 5, EQ 6, EQ 13, EQ 15, EQ 16	Gemisch EQ 3, EQ 4, EQ 17	
Menge [t/a]	448,27	553,24	191,65	1193,16
Entsorgung/Verwertung	Verwertung	Verwertung	Verwertung	
AVV-Schlüssel	100910	100908	120102	
Bekanntes Aufbereitungsverfahren				
Stand der Daten	2020	2020	2020	

Analyse und Vergleich mit früheren Daten falls vorhanden:

Tabelle 17: Analysedaten der Stäube von Gießerei B im Jahr 2020.

Probenbezeichnung	21052111 Sandaufbereitung					21052112 Formerei					21052113 Putzerei				
	Probe 1					Probe 2					Probe 3				
	2015	2019	2021	Durchschnitt	Std.	2015	2019	2021	Durchschnitt	Std.	2015	2019	2021	Durchschnitt	Std.
Element	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[%]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[%]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[%]
Al	9,88	4,70	3,21	5,93	61,78	22,81	38,00	32,98	31,26	24,75	3,99	3,70	4,07	3,82	4,96
Ba	0,33	0,44	0,39	0,39	20,52	0,28	0,40	0,34	0,34	24,61	0,27	0,02	0,07	0,12	110,96
Ca	29,21	37,00	11,52	25,91	50,39	9,81	17,00	11,68	12,83	29,08	2,32	1,90	1,69	1,97	16,30
Cr	0,24	0,30	0,36	0,30	20,29	0,29	0,10	0,04	0,14	93,17	1,28	1,40	1,13	1,27	10,53
Cu	1,13	1,70	1,48	1,44	20,01	0,30	0,03	0,05	0,13	115,96	1,61	1,90	1,67	1,73	8,90
Fe	160,0	230,0	268,6	219,52	25,07	19,0	30,0	22,0	23,7	24,0	620,0	710,0	699,0	676,3	7,3
K	7,66	2,90	4,26	5,04	61,94	4,00	2,50	2,72	3,07	26,39	0,00	0,32	0,29	0,20	88,99
Mg	2,83	2,00	13,34	6,09	103,37	6,50	9,90	9,98	8,79	22,60	1,26	0,93	1,33	1,17	18,15
Mn	32,33	31,00	29,73	31,02	4,19	0,78	0,57	0,29	0,55	45,45	5,50	5,80	2,42	4,57	40,98
Ni	0,07	0,12	0,29	0,16	72,27	0,03	0,04		0,04	26,76	0,61	0,63	0,49	0,58	12,94
Pb	7,23	2,60	2,53	4,12	65,34	0,00			0,00		0,05	0,02	0,03	0,03	0,00
Zn	7,64	100,00	100,64	69,43	77,07	0,20	0,15	0,50	0,28	67,30	0,26	0,20	0,46	0,31	44,22

Gießerei C

Staubanfall:

Tabelle 18: Staubanfall der Gießerei C im Jahr 2020.

Anfallstelle	Staub 1	Staub 2	Staub 3	Staub 4
	BMD Sandkühlung	Handl. Naßguss	BMD Auspackrohr	BMD Rump Strahlmaschine
Staubname	C 2	C 3	C 4	C 7
Menge [t/a]	29,50	38,02	24,91	75,39
Entsorgung/Verwertung	Deponie	Deponie	Deponie	Deponie
AVV-Schlüssel	10 09 10	10 09 10	10 09 10	10 09 10
Stand der Daten	2020	2020	2020	2020

Staub 5	Staub 6	Staub 7	Staub 8	Gesamt
Dantherm E-Ofen	Lühr Chargenkühler	BMD Furan sandregenerierung	Dantherm HF/ Putzerei	
C 15	C 9	C 14	C 16	
129,14	17,33	20,79	300,54	635,62
Deponie	Thermische Verwertung	Thermische Verwertung	Thermische Verwertung	
10 09 10	10 09 10	10 09 10	10 09 10	
2020	2020	2020	2020	

Analyse und Vergleich mit früheren Daten falls vorhanden:

Tabelle 19: Analysedaten der Stäube von Gießerei C aus dem Jahr 2020.

Probennr.:	21052104					21052105					21052106				
	GUT-Anlage 9					Sandregulierung / 14					E-Ofen 15				
	2015	2019	2021	Durchschnitt	Std.	2015	2019	2021	Durchschnitt	Std.	2015	2019	2021	Durchschnitt	Std.
Element	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[%]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[%]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[%]
Al	2,60	2,40	4,48	3,16	36,36	3,54	5,40	9,20	6,05	47,72	3,88	5,80	5,30	4,93	22,49
Ba	0,08	0,06	0,00	0,05	88,19	0,10	0,20	0,28	0,19	46,08	2,26	1,80	1,54	1,87	19,56
Ca	1,32	1,10	1,98	1,47	31,32	1,29	1,50	2,75	1,85	42,72	5,78	8,00	9,34	7,71	23,34
Cr	0,09	0,03	0,05	0,06	52,71	0,07	0,05	0,07	0,06	24,02	0,13	0,14	0,10	0,12	17,51
Cu	0,27	0,04	0,11	0,14	85,56	0,25	0,08	0,23	0,19	51,54	0,75	0,86	0,55	0,72	21,90
Fe	9,3	6,7	13,4	9,8	34,3	8,5	8,6	17,7	11,6	45,8	270,0	270,0	244,1	261,4	5,7
K	2,41	1,00	1,52	1,64	43,33	2,01	1,80	2,53	2,05	22,75	1,15	2,00	2,78	1,97	40,87
Mg	0,00	3,10	5,93	3,01	98,54	0,00	11,00	12,85	7,95	87,38	73,47	130,00	120,00	107,82	27,98
Mn	0,09	0,05	0,11	0,08	37,52	0,09	0,09	0,17	0,12	41,73	8,12	7,80	3,13	6,35	43,95
Ni	0,05	0,04	0,08	0,05	35,09	0,05	0,13	0,14	0,11	46,78	0,10	0,11	0,09	0,10	12,13
Pb	0,19	0,00	0,04	0,08	0,00	0,00	0,00	0,06	0,02	0,00	1,21	1,10	0,65	0,99	0,00
Zn	0,00	0,04	0,31	0,12	144,27	0,00	0,05	0,88	0,31	158,89	5,24	9,60	7,30	7,38	29,56

Probennr.:	21052107				
Probenbezeichnung	C 16				
	Putzerei 16				
	2015	2019	2021	Durchschnitt	Std.
Element				[g/kg]	[%]
Al	3,27	5,30	6,80	5,12	34,55
Ba	0,24	0,19	0,43	0,29	44,05
Ca	1,72	2,40	1,94	2,02	17,22
Cr	0,14	0,17	0,07	0,13	41,27
Cu	0,47	0,69	0,22	0,46	50,86
Fe	120,0	230,0	161,1	170,4	32,6
K	1,76	1,90	1,45	1,70	13,61
Mg	0,98	12,00	6,63	6,54	84,32
Mn	0,98	1,10	0,44	0,84	41,83
Ni	0,06	0,19	0,09	0,12	50,49
Pb	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00
Zn	0,06	0,09	0,36	0,17	98,73

Gießerei D

Tabelle 20: Staubanfall der Gießerei D im Jahr 2020.

	Staub 1	Staub 2	Staub 3	Gesamt
Anfallstelle	Sandaufbereitung	Putzerei	E-Ofen	
Menge [t/a]	300,00	160,00	80,00	540,00
AVV-Schlüssel	10 09 10	10 09 10	10 09 10	
Stand der Daten	2020	2020	2020	

Analyse und Vergleich mit früheren Daten falls vorhanden:

Tabelle 21: Analysedaten der Stäube von Gießerei D im Jahr 2020.

Probennummer:	21052108					21052109					21052110				
	Putzerei					Sandaufbereitung					E-Ofen				
Probenbezeichnung	2015	2019	2021	Durchschnitt	Std.	2015	2019	2021	Durchschnitt	Std.	2015	2019	2021	Durchschnitt	Std.
Element				[g/kg]	[%]				[g/kg]	[%]				[g/kg]	[%]
Al	20,70	10,00	9,05	13,25	57,10	47,00	34,00	9,80	30,27	62,36	5,13	7,90	5,66	6,30	22,81
Ba	0,49	0,17	1,64	0,77	100,93	0,48	0,36	0,61	0,48	26,09	0,58	0,86	0,76	0,73	19,37
Ca	2,93	2,70	5,74	3,79	44,70	11,08	12,00	13,89	12,32	11,61	4,83	9,90	7,66	7,46	34,04
Cr	0,31	0,03	0,22	0,19	78,70	0,09	0,08	0,08	0,08	8,99	0,37	0,26	0,20	0,28	30,83
Cu	0,51	0,04	0,28	0,27	87,52	3,71	0,03	0,04	1,28	167,91	1,72	1,40	1,44	1,52	11,47
Fe	290,0	19,0	245,2	267,60	54,28	27,8	26,0	30,9	28,2	8,7	120,0	150,0	164,5	144,8	15,7
K	2,48	1,20	7,69	3,79	90,68	2,42	2,20	3,74	2,79	29,82	2,76	3,20	3,36	3,11	9,98
Mg	2,65	1,60	5,53	3,26	62,39	8,64	7,50	10,29	8,81	15,92	58,00	81,00	22,93	53,98	54,18
Mn	4,09	0,14	3,60	2,61	82,49	0,55	0,34	0,32	0,40	31,19	40,05	26,00	22,25	29,43	31,88
Ni	0,12	0,00	0,07	0,06	95,83	0,08	0,05	0,05	0,06	29,58	0,09	0,09	0,07	0,08	14,06
Pb	0,03	0,00	0,03	0,02	87,16	0,06	0,02	0,04	0,04	47,26	31,94	5,00	5,29	14,08	0,00
Zn	0,13	0,06	0,17	0,12	46,73	2,54	0,20	0,29	1,01	131,07	120,00	76,00	196,92	130,97	46,73

Anlage 4

Analyse und Berechnungen der Staubmengen zur Erstellung der Sankey-Diagramme am Beispiel von Gießerei B.

Schmelzbetrieb (Gemisch B1, B12, B20)		
Menge 2020	448,27 t	AVV 10 09 10
	[kg/t]	[t]
Al	3,21	1,44
Ba	0,44	0,20
Ca	11,52	5,16
Cr	0,36	0,16
Cu	1,48	0,66
Fe	268,6	120,39
K	4,26	1,91
Mg	13,34	5,98
Mn	29,73	13,33
Ni	0,29	0,13
Pb	2,53	1,14
Zn	100,64	45,11

Mal Menge 2020, Durch 1000

Analyse	
Weitere Metalle [t]	75,22
Eisen [t]	120,39
Rest [t]	252,66

Formerei (Gemisch B5, B6, B13, B15, B16)		
Menge 2020	553,24 t	AVV 100908
	[kg/t]	[t]
Al	32,98	18,24
Ba	0,40	0,22
Ca	11,68	6,46
Cr	0,04	0,02
Cu	0,05	0,03
Fe	22,0	12,17
K	2,72	1,50
Mg	9,98	5,52
Mn	0,29	0,16
Ni	0,00	0,00
Pb	0,00	0,00
Zn	0,50	0,28

Mal Menge 2020, Durch 1000

Analyse	
Weitere Metalle [t]	32,44
Eisen [t]	12,17
Rest [t]	508,64

Putzerei (Gemisch B3, B4, B17)			
Menge 2020	191,65	t	AVV
			120102
	[kg/t]		[t]
Al	4,07	Mal Menge 2020, Durch 1000	0,78
Ba	0,07		0,01
Ca	1,69		0,32
Cr	1,13		0,22
Cu	1,67		0,32
Fe	699,0		133,96
K	0,29		0,05
Mg	1,33		0,25
Mn	2,42		0,46
Ni	0,49		0,09
Pb	0,03		0,01
Zn	0,46		0,09

Analyse	
Weitere Metalle [t]	2,61
Eisen [t]	133,96
Rest [t]	55,08

Abbildung 55: Analyse der Stäube von Gießerei B im Jahr 2020.

Für jede Anfallstelle werden die Werte für die Rohstoffe aus den Kategorien weitere Metalle, Eisen und Rest berechnet. Weitere Metalle setzen sich aus der Summe aller analysierten Metalle abzüglich des Wertes für Eisen zusammen ($\sum \text{Metalle} - \text{Eisen}$). Der Wert für Eisen kann aus der Tabelle abgelesen werden. Die Menge für den Rest ergibt sich dann durch Subtraktion von Eisen und weiteren Metallen von der gesamten Staubmenge ($\text{Rest} = \text{Gesamtmenge 2020} - (\text{weitere Metalle} + \text{Eisen})$).

Für die Gesamtanalyse wird schließlich für jede Kategorie die Summe der Werte aus den einzelnen Anfallstellen berechnet.

Gesamtauswertung B	
Gesamt [t]	1193,16
Weitere Metalle [t]	110,27
Eisen [t]	266,52
Rest [t]	816,37

Analyse weitere Metalle	
	[t]
Al	20,46
Ba	0,43
Ca	11,95
Cr	0,40
Cu	1,01
K	3,47
Mg	11,76
Mn	13,95
Ni	0,22
Pb	1,14
Zn	45,48

Abbildung 56: Gesamtauswertung der Staubanalyse von Gießerei B aus dem Jahr 2020.

Alle hier erläuterten Berechnungen wurden mit Hilfe von Microsoft Excel durchgeführt. Bei der Erstellung der Sankey-Diagramme kann das Programm direkt mit Excel verknüpft werden, sodass die Werte zu den jeweiligen Stoffströmen direkt aus den Excel-Tabellen entnommen werden.

Anlage 5

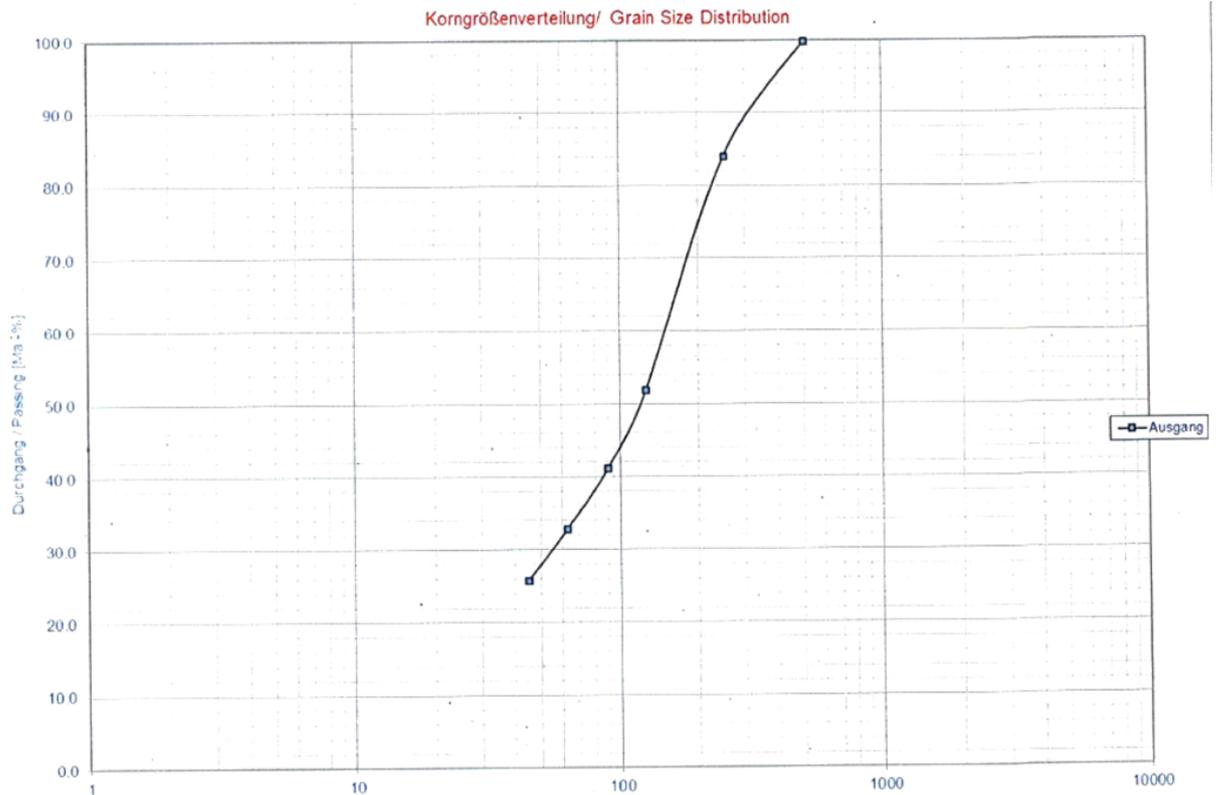


Abbildung 57: Korngrößenbestimmung durch Siebanalyse von Staub 4d.

Anlage 6

[a.] Zielfunktion

[a]

Minimiere $\eta_{\text{ökologisch}} =$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M m_{i,m}^{\text{Auf.Staub}} * \omega_m^{\text{Auf.}} + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N m_{k,i,m,n}^{\text{Ent.Restst.}} * \omega_n^{\text{Ent.}}$$

$$+ \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N m_{i,n}^{\text{Ent.Staub}} * \omega_n^{\text{Ent.}} - \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M sav_{i,m}^{\text{Verw.V.}}$$

Ziel ist es, die ökologische Nachhaltigkeitsbewertung $\eta_{\text{ökologisch}}$ für die Aufbereitung, Wiederverwendung, sowie Entsorgung der Gießereistäube zu minimieren. Dazu wird für jeden anfallenden Staub i die ökologisch optimale Aufbereitungs-, Wiederverwendungs- oder Entsorgungsart gewählt (durch $x_{i,m}^{\text{Auf.Staub}}$, $x_{i,n}^{\text{Ent.Staub}}$, $x_{i,w}^{\text{Wieder.Staub}}$).

Ökologische Bewertung der Staub-Aufbereitung ist die Summe der Menge $m_{i,m}^{Auf.Staub}$ der verschiedenen Stäube i , die mittels der Aufbereitungsverfahren m aufbereitet werden unter Berücksichtigung der jeweiligen ökologischen Bewertung $\omega_m^{Auf.}$ des angewendeten Verfahrens m .

Ökologische Bewertung der Reststoff-Entsorgung ist die Summe der Mengen $m_{k,i,m,n}^{Ent.Restst.}$ an verschiedenen Reststoffen k , die durch die Aufbereitung der unterschiedlichen Stäube i mittels der Aufbereitungsverfahren m anfallen und durch ein Entsorgungsverfahren n entsorgt werden unter Berücksichtigung der jeweiligen ökologischen Bewertung $\omega_n^{Ent.}$ des angewendeten Verfahrens n .

Ökologische Bewertung der Staub-Entsorgung ist die Summe der Mengen $m_{i,n}^{Ent.Staub}$ der verschiedenen Stäube i , die direkt ohne Aufbereitung durch Entsorgungsverfahren n entsorgt werden unter Berücksichtigung der ökologischen Bewertung $\omega_n^{Ent.}$ des angewendeten Entsorgungsverfahrens n .

Die ökologische Gesamtbewertung der Aufbereitung des Staubes setzt sich zusammen aus der ökologischen Bewertung der Staub-Aufbereitung und der ökologischen Bewertung der Reststoff-Entsorgung. Bei der Staub-Aufbereitung entstehen dabei zusätzlich zu entsorgende Reststoffe.

Die Ökologische Bewertung der Einsparungen bei der Aufbereitung, beschreibt die geringere Belastung der Umwelt (Ökosphäre) durch die Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen. Dafür werden die gewonnenen Rohstoffmengen $m_{j,i,m}^{Auf.Rohst.}$ mit einer ökologischen Bewertung der entsprechenden Primärrohstoffe $\omega_j^{Rohst.}$ gewichtet. Die ökologischen Bewertungen $\omega_j^{Rohst.}$, $\omega_n^{Ent.}$ und $\omega_m^{Auf.}$ basieren auf geschätzten Parametern. Aus diesen werden Gruppen abgeleitet, in welche die Verfahren (bzw. der Rohstoff) eingeordnet werden können. Diesen Gruppen wird eine Zahl zwischen 1 und 10 zugeordnet, welche dann gewichtet und aufsummiert werden.

Dabei bilden diese Werte der Bewertung $\omega_n^{Ent.}$ und $\omega_m^{Auf.}$ den Prozessaufwand ab, wobei $\omega_j^{Rohst.}$ die Belastung der Umwelt bei der Primärproduktion von Rohstoffen abbildet. Dabei werden die Umweltbelastungskategorien zur Einteilung der ökologischen Bewertung herangezogen.

(siehe auch Formel [i.] Einsparungen)

[b.] Nebenbedingungen (Materialfluss)

$$[b.1] m_{i,m}^{Auf.Staub} = m_i^{Staub} * x_{i,m}^{Auf.Staub} * y_{i,m}^{Auf.Staub} \quad \forall i, m$$

$$[b.2] m_{i,n}^{Ent.Staub} = m_i^{Staub} * x_{i,n}^{Ent.Staub} * y_{i,n}^{Ent.Staub} \quad \forall i, n$$

$$[b.3] m_{i,w}^{Wieder.Staub} = m_i^{Staub} * x_{i,w}^{Wieder.Staub} * y_{i,w}^{Wieder.Staub} \quad \forall i, w$$

[b.4]

$$1 = \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M x_{i,m}^{Auf.Staub} * y_{i,m}^{Auf.Staub} + \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N x_{i,n}^{Ent.Staub} * y_{i,n}^{Ent.Staub} + \sum_{i=1}^I \sum_{w=1}^W x_{i,w}^{Wieder.Staub} * y_{i,w}^{Wieder.Staub} \quad \forall i, m, n, w$$

Die Mengen m_i^{Staub} jedes Staubes i , die bei dem Gießereiprozess anfällt, wird entweder vollständig mittels einem der (für den Staub i möglichen) Aufbereitungsverfahren m aufbereitet, vollständig durch eines der (für den Staub i möglichen) Entsorgungsverfahren n entsorgt oder durch eines der (für den Staub i möglichen) Wiederverwertungsverfahren w verwertet.

$$[b.5] m_{j,i,m}^{Auf.Rohst.} = \eta_{j,i,m}^{Rohst.} * m_{i,m}^{Auf.Staub.} \quad \forall j, i, m$$

Die Menge $m_{j,i,m}^{Auf.Rohst.}$ jedes Rohstoffes j , die aus der Aufbereitung des Staubes i mittels Aufbereitungsverfahren m gewonnen wird, ergibt sich aus dem Produkt der Menge $m_{i,m}^{Auf.Staub.}$ und des Staubes i , die aufbereitet wird und dem jeweiligen Rohstoffgewinnungsgrad $\eta_{j,i,m}^{Rohst.}$.

$$[b.6] m_{k,i,m}^{Auf.Restst.} = \eta_{k,i,m}^{Restst.} * m_{i,m}^{Auf.Staub} \quad \forall k, i, m$$

Die Menge $m_{k,i,m}^{Auf.Restst.}$ jedes Reststoffes k , die aus der Aufbereitung des Staubes i mittels Aufbereitungsverfahren m gewonnen wird, ergibt sich aus dem Produkt der Menge $m_{i,m}^{Auf.Staub.}$ und des Staubes i , die aufbereitet wird und dem jeweiligen Reststoffgewinnungsgrad $\eta_{k,i,m}^{Restst.}$.

$$[b.7] m_{k,i,m,n}^{Ent.Restst.} = m_{k,i,m}^{Auf.Restst.} * x_{k,i,m,n}^{Ent.Restst.} * y_{k,i,m,n}^{Ent.Restst.} \quad \forall k, i, m, n$$

mit

$$[b.8] 1 = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_{k,i,m,n}^{Ent.Restst.} * y_{k,i,m,n}^{Ent.Restst.} \quad \forall k, i, m, n$$

Die Menge $m_{k,i,m,n}^{Ent.Restst.}$ jedes Reststoffes k , die bei der Aufbereitung des Staubes i mittels Aufbereitungsverfahren m anfällt, wird vollständig durch eines der (für den Reststoff k möglichen) Entsorgungsverfahren n entsorgt.

[c.] Indizes

[c.1] Staub (der beim Gießereiprozess anfällt)

$$i \in \{1, 2, \dots, I\}$$

[c.2] Rohstoff (der durch ein Aufbereitungsverfahren aus dem Staub gewonnen wird)

$$j \in \{1, 2, \dots, J\}$$

[c.3] Reststoff (der durch ein Aufbereitungsverfahren aus einem Staub anfällt)

$$k \in \{1, 2, \dots, K\}$$

[c.4] Aufbereitungsverfahren (für die Aufbereitung eines Staubes)

$$m \in \{1, 2, \dots, M\}$$

[c.5] Entsorgung (für die Entsorgung eines Staubes)

$$n \in \{1, 2, \dots, N\}$$

[c.6] Wiederverwendungsprozesse (für die Wiederverwendung eines Staubes)

$$w \in \{1, 2, \dots, W\}$$

[c.7] Umweltbelastungen (für die verschiedenen Verfahren)

$$ubk \in \{1, 2, \dots, UBK\}$$

[d.] Binäre Entscheidungsvariablen

[d.1] Binärvariable gibt an, ob Staub i mittels Aufbereitungsverfahren m aufbereitet, wird.

$$x_{i,m}^{Auf.Staub} \in \{0, 1\}$$

$$x_{i,m}^{Auf.Staub} = \begin{cases} 1, & \text{wenn Staub } i \text{ mittels Aufbereitungsverfahren } m \text{ aufbereitet wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

[d.2] Binärvariable gibt an, dass Staub i durch Entsorgungsverfahren n entsorgt wird.

$$x_{i,n}^{Ent.Staub} \in \{0,1\}$$

$$x_{i,n}^{Ent.Staub} = \begin{cases} 1, & \text{wenn Staub } i \text{ durch Entsorgungsverfahren } n \text{ entsorgt wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

[d.3] Binärvariable gibt an, dass Reststoff k , der aus Aufbereitung des Staubes i mittels Aufbereitungsverfahren m resultiert, durch Entsorgungsverfahren n entsorgt wird.

$$x_{k,i,m,n}^{Ent.Restst.} \in \{0,1\}$$

$$x_{k,i,m,n}^{Ent.Restst.} = \begin{cases} 1, & \text{wenn Reststoff } k \text{ durch Entsorgungsverfahren } n \text{ entsorgt wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

[d.4] Binärvariable gibt an, dass ein Staub i mittels Wiederverwendungsprozess w wiederverwendet wird.

$$x_{i,w}^{Wieder.Staub.} \in \{0,1\}$$

$$x_{i,w}^{Wieder.Staub.} = \begin{cases} 1, & \text{wenn Staub } i \text{ Wiederverwendungsverfahren } w \text{ wiederverwendet wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

[e.] Variablen

[e.1] $m_{i,m}^{Staub}$ [ME] Menge an Staub i , die bei dem Gießereiprozess anfällt.

[e.2] $m_{i,m}^{Auf.Staub}$ [ME] Menge an Staub i , die mittels Aufbereitungsverfahren m aufbereitet wird.

[e.3] $m_{i,n}^{Ent.Staub}$ [ME] Menge an Staub i , die durch Entsorgungsverfahren n entsorgt wird.

[e.4] $m_{i,w}^{Wieder.Staub}$ [ME] Menge an Staub i , die durch Wiederverwendungsverfahren w wieder verwendet wird.

[e.5] $m_{j,i,m}^{Auf.Rohst.}$ [ME] Menge an Rohstoff j , die aus der Aufbereitung des Staubes i mittels Aufbereitungsverfahren m resultiert.

[e.6] $m_{k,i,m}^{Auf.Restst.}$ [ME] Menge an Reststoff k , die aus der Aufbereitung des Staubes i mittels Aufbereitungsverfahren m resultiert

[e.7] $m_{k,i,m,n}^{Ent.Restst.}$ [ME] Menge an Reststoff k , die aus der Aufbereitung des Staubes i mittels Aufbereitungsverfahren m resultiert und durch Entsorgungsverfahren n entsorgt wird.

[f.] Verwertungsquoten

[f.1] $\eta_{j,i,m}^{Rohst.}$ [%] Rohstoffgewinnungsgrad, als prozentualer Anteil von $m_{i,m}$ der mittels Aufbereitungsverfahren m zu Rohstoff aufbereitet wird.

[f.2] $\eta_{k,i,m}^{Restst.}$ [%] Reststoffgewinnungsgrad, als prozentualer Anteil von $m_{i,m}$ der durch Aufbereitungsverfahren m an Reststoff k anfällt.

[g.] Prozessgesteuerte ökologische Parameter

[g.1] $\omega_m^{Auf.}$ [1,10] Ökologische Bewertung des Aufbereitungsverfahrens m , wobei ein geringerer Wert einer besseren ökologischen Bewertung entspricht.

mit

$$\omega_m^{Auf.} = \sum_{bk} g_{bk} * \tau_{m,bk} \quad \forall m$$

[g.2] $\omega_n^{Ent.}$ [1,10] Ökologische Bewertung des Entsorgungsverfahrens n , wobei ein geringerer Wert einer besseren ökologischen Bewertung entspricht.

mit

$$\omega_n^{Ent.} = \sum_{bk} g_{bk} * \tau_{n,bk} \quad \forall n$$

[g.3] $\omega_j^{Rohst.} [1,10]$ Ökologische Bewertung des Aufbereitungsverfahrens j , wobei ein geringerer Wert einer besseren ökologischen Bewertung entspricht.

mit

$$\omega_j^{Rohst.} = \sum_{bk..Rohst.} g_{bk.Rohst.} * \tau_{j,bk.Rohst.} \quad \forall j$$

$$\sum_{bk=1}^{BK} g_{bk} = \alpha = 1$$

Der Wert für α setzt sich aus der Summe der Gewichtungen der Belastungskategorien zusammen.

Je größer der Wert für α , desto stärker wird der Rückgewinnungsterm in der Teilformel Einsparung gewichtet. Damit werden m -Verfahren (Verwertungsverfahren) mit steigendem α verstärkt gegenüber n -Verfahren (Entsorgungsverfahren) bevorzugt.

[h.] Opportunitätsvariablen

[h.1] Opportunitätsvariable gibt an, dass Staub i mittels Aufbereitungsverfahren m aufbereitet werden kann.

$$y_{i,m}^{Auf.Staub} \in \{0,1\}$$

$$y_{i,m}^{Auf.Staub} = \begin{cases} 1, & \text{wenn Staub } i \text{ mittels Aufbereitungsverfahren } m \text{ aufbereitet werden kann} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

[h.2] Opportunitätsvariable gibt an, dass Staub i durch Entsorgungsverfahren n entsorgt werden kann.

$$y_{i,n}^{Ent.Staub} \in \{0,1\}$$

$$y_{i,n}^{Ent.Staub} = \begin{cases} 1, & \text{wenn Staub } i \text{ mittels Entsorgungsverfahren } n \text{ entsorgt werden kann} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

[h.3] Opportunitätsvariable gibt an, dass Reststoff k , der aus Aufbereitung des Staubes i mittels Aufbereitungsverfahren m resultiert, durch Entsorgungsverfahren n entsorgt werden kann.

$$y_{k,i,m,n}^{Ent.Restst.} \in \{0,1\}$$

$$y_{k,i,m,n}^{Ent.Restst.} = \begin{cases} 1, & \text{wenn Reststoff } k \text{ (resultierend aus Aufbereitung von Staub } i \text{ mittels Aufbereitungs-} \\ & \text{verfahren } m) \text{ durch Entsorgungsverfahren } n \text{ entsorgt werden kann.} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

[h.4] Opportunitätsvariable gibt an, dass Staub i durch Wiederverwendungsverfahren w wiederverwendet werden kann.

$$y_{i,w}^{Wieder.Staub} \in \{0,1\}$$

$$y_{i,w}^{Wieder.Staub} = \begin{cases} 1, & \text{wenn Staub } i \text{ mittels Wiederverwendungsverfahren } w \text{ wiederverwendet werden kann} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

[i.] Einsparungen

Einsparungen beschreiben die geringere Belastung der Umwelt (Ökosphäre) durch die Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen bei der Aufbereitung.

$$\sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M sav_{i,m}^{Verw.V.} = \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \min \left(m_{i,m}^{Auf.Staub} * \omega_m^{Auf.} + \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N m_{k,i,m,n}^{Ent.Restst.} * \omega_m^{Ent.} ; \sum_{j=1}^J m_{j,i,m}^{Auf.Rohstoff.} * \omega_j^{Rohst.} \right)$$

Gewonnene Rohstoffmenge $m_{j,i,m}^{Auf.Rohst.}$ wird ökologische wird bewertet durch Gewichtung mit entsprechendem Primärrohstoff $\omega_j^{Rohst.}$.

Die ökologischen Bewertungen $\omega_j^{Rohst.}$, $\omega_n^{Ent.}$ und $\omega_m^{Auf.}$ basieren auf Belastungskategorien, aus welchen Gruppen abgeleitet werden, in welche die Verfahren (bzw. der Rohstoff) eingeordnet werden können. Diesen Gruppen wird eine Zahl zwischen 1 und 10 zugeordnet, welche dann gewichtet und aufsummiert werden.

Die Parameter der Bewertungen $\omega_n^{Ent.}$ und $\omega_m^{Auf.}$ sollen den Prozess-Aufwand abbilden. Der Parameter von $\omega_j^{Rohst.}$ die Belastung der Umwelt bei der Primärproduktion des Rohstoffs.

Beispiel:

Belastungskategorie 1: Logistikkilometer, Gewichtung 30 %

- Gruppe 1: 0-30 km
- Gruppe 2: 30-60 km
- (...)
- Gruppe 10: >300 km

Belastungskategorie 2: Energieverbrauch, Gewichtung 70 %

- Gruppe 1: bis 100 kWh/kg
- Gruppe 2: 100-200 kWh/kg
- (...)
- Gruppe 10: >1000 kWh/kg

Verfahren 1: 45 km, 220 kWh/kg

$$\rightarrow \omega_m^{Auf.} = 0,3 * 2 + 0,7 * 3$$

Verfahren 2: 470 km, 21 kWh/kg

$$\rightarrow \omega_m^{Auf.} = 0,3 * 10 + 0,7 * 1$$

Tabelle 22: Einteilung der Belastungskategorien für verschiedene Elemente nach [82].

τ_j^{bk}	BK Kumulierter Energiebedarf		BK terrestrisches Versauerungspotenzial		BK Süßwasserentrophierungspotenzial		BK Humantoxizität	
	Element	MJ-eq/kg	Element	kg SO ₂ -eq/kg	Element	kg P-eq/kg	Element	CTU/kg
10	Gd	914	Ir	3.10E+03	Pb	1.50E+02	Pb	2.70E-03
	Bi	697	Os	2.40E+03	Ps	5.10E+01	Hg	1.10E-01
	Db	683	Jr	2.20E+03	Bz	3.50E+01	Pt	9.20E-02
	Cf	516	Rf	1.70E+03	Tb	2.80E+01	Ta	3.90E-02
	Te	455	Bh	3.90E+02	Pf	1.90E+01	Ir	5.90E-02
9	Iv	376	Au	1.20E+02	Ce	1.00E+01	Pd	1.80E-02
	Nd	344	Sc	3.80E+01	Ba	9.10E+00	Os	1.70E-02
	Sr	321	Bz	1.10E+01	Ag	3.60E+00	Ba	1.60E-02
	Y	295	Am	3.30E+00	Se	2.10E+00	As	6.90E-03
	Ce	252	Tl	4.40E+00	Te	8.90E-01	Ge	2.90E-03
8	Pr	243	Lu	3.80E+00	Mo	5.40E-01	Te	1.80E-03
	La	215	Tm	2.80E+00	Lu	3.50E-01	In	1.70E-03
	Au	208	Te	2.50E+00	Ge	2.60E-01	Sc	1.20E-03
	Hg	159	Ga	1.90E+00	Tm	2.50E-01	Mn	9.90E-04
	Nb	122	Ta	1.70E+00	Sb	2.40E-01	Sb	4.20E-04
7	Ir	169	Eu	1.70E+00	In	1.50E-01	Lu	4.20E-04
	Sb	141	Ni	1.50E+00	Eu	1.50E-01	Tl	3.10E-04
	W	133	Tb	1.30E+00	Ta	1.50E-01	Tm	3.10E-04
	Al	131	In	1.20E+00	Cu	1.30E-01	Cu	2.70E-04
	Cb	128	Hs	9.60E-01	Tb	1.20E-01	Es	1.90E-04
6	Li	125	Hf	7.70E-01	Ho	8.80E-02	Tb	1.40E-04
	Mo	117	Yb	5.30E-01	Hf	7.10E-02	Ta	1.20E-04
	Ti	115	Be	5.20E-01	Ga	6.10E-02	Se	1.10E-04
	Ni	111	Ga	4.50E-01	Se	5.50E-02	Ho	1.10E-04
	Sc	97,2	Sn	4.10E-01	Yb	4.90E-02	Zn	5.90E-05
5	Os	85	Cu	3.90E-01	Be	3.10E-02	Yb	5.90E-05
	Pd	72,7	Bi	3.80E-01	Sm	2.30E-02	Ga	5.00E-05
	Se	65,5	W	2.90E-01	Dy	2.30E-02	Hf	4.80E-05
	Cu	53,7	Sm	2.50E-01	Bi	2.20E-02	As	3.50E-05

5	31	Cd	53	Dy	2.50E-01	Er	1.90E-02	W	3.40E-03
	32	Zn	52.9	Se	2.30E-01	Gd	1.80E-02	Cy	3.10E-03
	33	Sr	48.8	Sb	2.20E-01	Ni	1.40E-02	Sm	2.80E-03
	34	Ru	41.1	Er	2.10E-01	Sa	1.20E-02	Dy	2.80E-03
	35	Cy	40.2	Gd	2.00E-01	Tl	1.00E-02	Ni	2.30E-03
36	Mn	23.7	Mo	1.60E-01	As	9.20E-03	Er	2.30E-03	
4	37	Fe	23.1	V	1.40E-01	Pr	7.50E-03	Gd	2.20E-03
	38	Zr	19.9	Co	8.90E-02	Nd	6.80E-03	Be	2.10E-03
	39	Pb	18.9	Pv	8.10E-02	Li	6.10E-03	Bb	1.70E-03
	40	Mg	18.8	Hg	7.70E-02	Y	5.90E-03	Cd	1.40E-03
	41	Lu	17.6	Nd	7.50E-02	Zn	5.10E-03	Pb	9.90E-06
3	42	Tm	12.7	V	6.40E-02	Ce	5.00E-03	Pr	9.10E-06
	43	Rf	9.04	Ce	5.50E-02	La	4.30E-03	Nd	8.30E-06
	44	Eu	7.75	Nb	5.30E-02	Co	4.00E-03	Sm	8.10E-06
	45	Tb	5.82	La	4.70E-02	Al	3.70E-03	Y	7.10E-06
	46	Ca	5.8	Zn	3.90E-02	Nb	3.70E-03	Nb	6.40E-06
2	47	Tl	5.16	Li	3.80E-02	Cd	2.70E-03	Ce	6.10E-06
	48	As	5	Ti	3.60E-02	Pb	2.20E-03	Al	5.40E-06
	49	Ho	4.4	Al	3.40E-02	Ti	2.10E-03	La	5.20E-06
	50	Ta	4.36	Pb	2.80E-02	Sr	1.80E-03	Co	3.80E-06
	51	Ba	4	Cd	2.20E-02	Cr	1.10E-03	Li	3.70E-06
1	52	Hf	3.51	Sr	1.90E-02	Fe	7.30E-04	Ti	2.70E-06
	53	Ag	3.28	Cr	1.70E-02	Mn	6.70E-04	Sr	1.80E-06
	54	Ga	3.03	Mu	9.40E-03	Zr	5.90E-04	Mg	1.20E-06
	55	Ge	2.89	As	8.20E-03	Hg	4.40E-04	Fe	4.10E-07
	56	Yb	2.45	Zr	5.80E-03	Mg	1.90E-04	Zr	3.40E-07
57	Be	1.72	Fe	5.20E-03	Ba	1.80E-04	Mn	3.30E-07	
58	In	1.72	Mg	2.30E-03	Ca	1.40E-05	Ba	8.30E-08	
59	Dy	1.37	Ca	8.30E-04	W	9.30E-06	Cs	1.30E-08	
60	Sm	1.16	Ba	8.20E-04	V	4.30E-07	V	4.40E-09	

Anlage 7

ZIELFUNKTION

Ökologisch

$x_{LM}^{Auf.Staub}$

$xM[i][m]$ $i \downarrow, m \rightarrow$ $1:Fe-Staub$ $1:SiC$

NB $i \downarrow$ $1:Fe-Staub$ 1

$x_{LN}^{Ent.Staub}$

$xN[i][n]$ $i \downarrow, n \rightarrow$ $1:Fe-Staub$ $1:Deponie$

1

Wähle

Bitte Daten eingeben:

m_i^{Staub}

$m[i]$ $i \downarrow$ $1:Fe-Staub$

θ_{bk}

$gBK[bk]$ $bk \downarrow$

1:EA	0,4
2:Transport	0,4
3:Wasser	0,2

$\tau_{m,bk}$

$tauM[bk][m]$ $bk \downarrow, m \rightarrow$ $1:SiC$

1:EA	2
2:Transport	6
3:Wasser	4

$\tau_{n,bk}$

$tauN[bk][n]$ $bk \downarrow, n \rightarrow$ $1:Deponie$

1:EA	1
2:Transport	7
3:Wasser	10

$\theta_{bk.Rohst.}$

$gBKR[bkRoh]$ $bkRoh. \downarrow$

1:KEB	0,25
2:Versauerung	0,25
3:Eutrophierung	0,25
4:Humantox.	0,25

$\tau_{j,bk.Rohst.}$

$tau[jbkRoh][j]$ $bkRoh. \downarrow, j \rightarrow$ $1:Eisen$ $2:SiC$

1:KEB	4	1
2:Versauerung	1	1
3:Eutrophierung	2	1
4:Humantox.	1	1

$\eta_{j,j,m}^{Rohst.}$

$etaM1[i][j]$ $i \downarrow, j \rightarrow$ $1:Eisen$ $2:SiC$

1:Fe-Staub	0,85	0,15
------------	------	------

$y_{LM}^{Auf.Staub}$

$yM[i][m]$ $i \downarrow, m \rightarrow$ $1:SiC$

1:Fe-Staub	1
------------	---

$y_{LN}^{Ent.Staub}$

$yN[i][n]$ $i \downarrow, n \rightarrow$ $1:Deponie$

1:Fe-Staub	1
------------	---

Bitte freilassen, nur zu Kalkulationszwecken

$m_{LM}^{Auf.Staub}$

$m_{LM}^{Auf.Staub} = m_i^{Staub} = x_{LM}^{Auf.Staub} = y_{LM}^{Auf.Staub}$

$mM[i][m]$ $i \downarrow, m \rightarrow$ $1:SiC$

$m_{LN}^{Ent.Staub}$

$m_{LN}^{Ent.Staub} = m_i^{Staub} = x_{LN}^{Ent.Staub} = y_{LN}^{Ent.Staub}$

$mN[i][n]$ $i \downarrow, n \rightarrow$ $1:Deponie$

$\omega_{m}^{Auf.}$

$\omega_m^{Auf.} = \sum_{bk} \theta_{bk} * \tau_{m,bk}$

$OmM[m]$ $m \downarrow$ $1:SiC$

$\omega_{m}^{Ent.}$

$\omega_m^{Ent.} = \sum_{bk} \theta_{bk} * \tau_{n,bk}$

$OmN[n]$ $n \downarrow$ $1:Deponie$

$\omega_j^{Rohst.}$

$\omega_j^{Rohst.} = \sum_{bk.Rohst.} \theta_{bk.Rohst.} * \tau_{j,bk.Rohst.}$

$OmJ[j]$ $j \downarrow$

1:Eisen	2
2:SiC	1

$m_{j,LM}^{Auf.Rohst.}$

$m_{j,LM}^{Auf.Rohst.} = \eta_{j,j,m}^{Rohst.} * m_{LM}^{Auf.Staub.}$

$mjmSiC[i][j]$ $i \downarrow, j \rightarrow$ $1:Eisen$ $2:SiC$

1:Fe-Staub	12,75	2,25
------------	-------	------

$sav[i][m]$

$sav[i][m] = \sum_{n=1}^N s_{i,j,m}^{Verw.} = \sum_{i=1}^M \sum_{m=1}^M min(m_{LM}^{Auf.Staub} + \omega_m^{Auf.} + \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N m_{k,LM,n}^{Ent.Rohst.} * \omega_m^{Ent.}; \sum_{j=1}^J m_{j,LM}^{Auf.Rohstoff.} + \omega_j^{Rohst.})$

$sav[i][m]$ $i \downarrow, m \rightarrow$ $1:SiC$

Abbildung 58: Implementierung von OpMökol in Excel.

Anlage 8

Einteilung der Belastungskategorien für die möglichen Verfahren:

Tabelle 23: Einteilung der Belastungskategorien für das Anwendungsbeispiel.

Logistikkilometer	
Gruppe 1	0-30 km
Gruppe 2	30-60 km
Gruppe 3	60-90 km
Gruppe 4	90-120 km
Gruppe 5	120-150 km
Gruppe 6	150-180 km
Gruppe 7	180-210 km
Gruppe 8	210-240 km
Gruppe 9	240-270 km
Gruppe 10	> 270 km

Energieverbrauch		
Gruppe 1	bis 10 kWh	pro kg oder pro t
Gruppe 2	10 - 20 kWh	
Gruppe 3	20 - 30 kWh	
Gruppe 4	30 - 40 kWh	
Gruppe 5	40 - 50 kWh	
Gruppe 6	50 - 60 kWh	
Gruppe 7	60 - 70 kWh	
Gruppe 8	70 - 80 kWh	
Gruppe 9	80 - 90 kWh	
Gruppe 10	> 90 kWh	

Wasserverbrauch		
Gruppe 1	bis 20 l	pro kg oder pro t
Gruppe 2	20 - 40 l	
Gruppe 3	40 - 60 l	
Gruppe 4	60 - 80 l	
Gruppe 5	80 - 100 l	
Gruppe 6	100 - 120 l	
Gruppe 7	120 - 140 l	
Gruppe 8	140 - 160 l	
Gruppe 9	160 - 180 l	
Gruppe 10	> 180 l	

Zur **Lösung** des mathematischen Modells für das **Anwendungsbeispiel** ergeben sich folgende Werte:

$$m_i^{Staub} = 15 \text{ (Menge an Staub aus E-Ofen Gießerei A; vgl. **Abbildung 23**)}$$

$$y_{i,m=SiC}^{Auf.Staub} = 1$$

$$x_{i,m=SiC}^{Auf.Staub} = 1$$

$$\rightarrow m_{i,m=SiC}^{Auf.Staub} = m_i^{Staub} * x_{i,m}^{Auf.Staub} * y_{i,m}^{Auf.Staub} = 15$$

$$y_{i,n=Dep.}^{Ent.Staub} = 1$$

$$x_{i,n=Dep.}^{Ent.Staub} = 0$$

$$m_{i,n=Dep.}^{Ent.Staub} = m_i^{Staub} * x_{i,n}^{Ent.Staub} * y_{i,n}^{Ent.Staub} = 0$$

$$\omega_{m=SiC}^{Auf.} = \sum_{bk} g_{bk} * \tau_{m,bk} = 4$$

$$\omega_{n=Dep.}^{Ent.} = \sum_{bk} g_{bk} * \tau_{n,bk} = 5,2$$

$$\omega_{j=Fe}^{Rohst.} = \sum_{bk..Rohst.} g_{bk.Rohst.} * \tau_{j,bk.Rohst.} = 2$$

$$\omega_{j=SiO_2}^{Rohst.} = \sum_{bk..Rohst.} g_{bk.Rohst.} * \tau_{j,bk.Rohst.} = 1$$

$$\eta_{j=Fe,i=Staub A,m=SiC}^{Rohst.} = 0,85$$

$$\eta_{j=SiO_2,i=Staub A,m=SiC}^{Rohst.} = 0,15$$

$$m_{j=Fe,i=Staub A,m=SiC}^{Auf.Rohst.} = \eta_{j=Fe,i=Staub A,m=SiC}^{Rohst.} * m_{i=Staub A,m=SiC}^{Auf.Staub.} = 12,75$$

$$m_{j=SiO_2,i=Staub A,m=SiC}^{Auf.Rohst.} = \eta_{j=SiO_2,i=Staub A,m=SiC}^{Rohst.} * m_{i=Staub A,m=SiC}^{Auf.Staub.} = 2,35$$

Formel für $m = SiC$ -Beimischung als einzig mögliches Verfahren. Da hierbei nur ein Verfahren im Modell implementiert ist ($m = SiC$), muss dieses auch gewählt werden (also ergibt sich zwingend aus den Nebenbedingungen $x_{i=Staub A,m=SiC} = 1$)

$$\begin{aligned} \eta_{\text{öko},SiC} &= m_{i,SiC} * \omega_{SiC} - sav_{i,SiC} = m_i * x_{i,SiC} * y_{i,SiC} * (g_{EA} * \tau_{SiC,EA} + \\ &g_{Transport} * \tau_{SiC,Transport} + g_{Wasser} * \tau_{Wasser,EA}) - \min (m_{i,SiC} * \omega_{SiC}; m_{i,SiC} * \\ &\eta_{Fe,i,SiC} * \omega_{Fe} + m_{i,SiC} * \eta_{SiO_2,i,SiC} * \omega_{SiO_2}) \\ &= 15 * 1 * 1 * (0,4 * 2 + 0,4 * 6 + 0,2 * 4) \\ &\quad - \min(15 * 4; 15 * 0,85 * 2 + 15 * 0,15 * 1) = 32.25 \end{aligned}$$

Formel für $n = Dep.$ als einzig mögliches Verfahren. Da hierbei nur ein Verfahren im Modell implementiert ist ($n = Dep.$), muss dieses auch gewählt werden (also ergibt sich zwingend aus den Nebenbedingungen $x_{i=Staub A,n=Dep.} = 1$)

$$\begin{aligned} \eta_{\text{öko},Deponierung} &= m_i * x_{i,Deponierung} * y_{i,Deponierung} * \omega_{Deponierung} \\ &= 15 * 1 * 1 * 5,2 = 78 \end{aligned}$$

Die Formel des *OpMökol* wählt die Entscheidungsvariablen der beiden zu vergleichenden Verfahren so, dass die Zielfunktion minimiert wird.