

## Entwicklung eines Tools zur Optimierung der Kreislaufführung von Gießereistäuben mittels multikriterieller Entscheidungsanalyse

Simon Gloge

### Angaben zur Veröffentlichung / Publication details:

Gloge, Simon. 2026. "Entwicklung eines Tools zur Optimierung der Kreislaufführung von Gießereistäuben mittels multikriterieller Entscheidungsanalyse." Augsburg: Universität Augsburg.

Universität Augsburg  
Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät  
Institut für Materials Resource Management  
Resource and Chemical Engineering  
Prof. Dr. Daniel Vollprecht

# **Entwicklung eines Tools zur Optimierung der Kreislaufführung von Gießereistäuben mittels multikriterieller Entscheidungsanalyse**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des Grades

Master of Science

Wintersemester 2025/2026

Name: Simon Benedikt Gloge  
Matrikel-Nr.: <censored>  
Studiengang: M. Sc. Wirtschaftsingenieurwesen  
E-Mail: simon.gloge@uni-a.de  
Adresse: <censored>

Erstgutachter: Prof. Dr. Daniel Vollprecht  
Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Jan Paul Lindner

Betreuer: Nico Mumm

Abgabedatum: 30.12.2025

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>I</b>
<b>Danksagung</b> .....	<b>VI</b>
<b>Kurzfassung (Deutsch)</b> .....	<b>VII</b>
<b>Abstract (English)</b> .....	<b>VIII</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Problemstellung .....	1
1.2 Zielsetzung.....	2
<b>2 Theoretische Grundlagen</b> .....	<b>4</b>
2.1 Fachliche Grundlagen: Gießereitechnik und Kreislaufwirtschaft .....	4
2.1.1 Allgemeine Übersicht und Zahlen.....	4
2.1.2 Der Kupolofenprozess.....	4
2.1.3 SiC-Formlinge .....	6
2.1.4 Gießereistäube .....	6
2.2 Grundlagen der Ökobilanzierung .....	7
2.2.1 Die vier Phasen einer LCA.....	7
2.2.2 Normalisierung und Gewichtung zur Aggregation von Scores .....	10
2.3 Grundlagen des Operations Research.....	11
2.3.1 Lineare Programmierung als Optimierungsmethode .....	12
2.3.2 Multikriterielle Entscheidungsanalyse (MCDM).....	15
2.3.3 Multi Objective Decision Making (MODM) .....	16
2.4 Grundlagen der End-User Entwicklung mit Tabellenkalkulationen .....	22
2.4.1 Framework für Tabellenkalkulationsprogramme.....	23
2.4.2 Erheben und Priorisieren von Anforderungen .....	24
2.5 Überblick über bestehende Arbeiten .....	25
2.6 Forschungsfrage.....	26
2.7 Ziel und Abgrenzung der Arbeit.....	26
<b>3 Erstellung und Implementierung des Tools</b> .....	<b>28</b>

3.1	Anforderungsanalyse und -erhebung .....	28
3.1.1	Identifikation von Interessengruppen und Use Cases .....	28
3.1.2	Erhebung und Priorisierung funktionaler und nicht-funktionaler Anforderungen .....	29
3.2	Datenerhebung und -aufbereitung .....	30
3.2.1	Definition der Systemgrenzen .....	30
3.2.2	Erhebung ökonomischer, ökologischer und chemischer Daten .....	31
3.2.3	Gießereistäube – Stoffstrommanagement und Datenerfassung .....	33
3.2.4	Festigkeit der SiC-Formlinge .....	35
3.2.5	Berechnung des aggregierten Ökologie-Scores .....	36
3.3	Mathematische Formulierung des Optimierungsmodells .....	37
3.3.1	Indizes und Mengen .....	37
3.3.2	Parameter .....	37
3.3.3	Entscheidungsvariablen .....	38
3.3.4	Zielfunktionen und Normalisierung .....	38
3.3.5	Nebenbedingungen .....	39
3.4	Konzeptionelle Umsetzung in Excel .....	40
3.4.1	Begründung der Wahl der Plattform .....	40
3.4.2	Architektur und Aufbau .....	40
3.5	Vorgehen in der Entwicklung .....	42
<b>4</b>	<b>Anwendung und Validierung des Tools .....</b>	<b>44</b>
4.1	Vorstellung des Optimierungstools .....	45
4.1.1	Der Aufbau des Tools .....	45
4.1.2	Der User-Workflow .....	45
4.2	Der Referenzfall .....	48
4.3	Einfluss der Spezifikationen .....	53
4.3.1	Einfluss der Basizität .....	53
4.3.2	Einfluss des SiC-Gehalts .....	56

4.3.3	Einfluss des Mangangehalts .....	59
4.4	Einfluss der Staubverfügbarkeit .....	60
4.5	Einfluss der Beseitigungs-/Verwertungsmethode .....	63
4.6	Einfluss der Berechnungsmethode der SiC-Umweltwirkungen .....	65
4.7	Sonderfälle .....	67
4.8	Nachträgliche Bewertung des Kohlenstoffgehalts von Stäuben .....	68
<b>5</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>69</b>
5.1	Beantwortung der Forschungsfrage .....	69
5.2	Kritische Reflexion des Entwicklungsprozesses .....	70
5.3	Kritische Reflexion des Modells und der Datenbasis .....	71
5.4	Ausblick .....	72
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>74</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>76</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>84</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>87</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>88</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>I</b>
A	Arten von Gießereien in Deutschland und ihr Energieverbrauch .....	I
B	Neun Schritte in der Entwicklung eigener Tabellenkalkulationsprogramme nach Raković .....	II
C	Anforderungsliste nach MoSCoW .....	V
D	Die genutzten Rohstoffe und ihre chemische Zusammensetzung .....	IX
E	Ergebnisse der Modellierung der Umweltwirkungen je SiC-Gehalt .....	X
F	Gießereistäube: XRF-Ergebnisse .....	XI
G	Analyse des SiC-Gehalts der Stäube .....	XII
H	Variation der Basizität: Abbildungen für die Änderung der SiC-Zusammensetzung .....	XIII
I	Variation des SiC-Gehalts: Abbildungen für den Trade-off .....	XV

J	Variation des SiC-Gehalts: Abbildungen für Änderung der SiC-Zusammensetzung .....	XVII
K	Variation des Mangengehalts: Abbildungen für Änderung der SiC-Zusammensetzung .....	XIX
L	Variation der Staubverfügbarkeit: Abbildungen zu Staub- und SiC-Mengen...	XXI
M	Variation der Beseitigungs-/Verwertungsmethode: Abbildungen für Änderung der SiC-Zusammensetzung .....	XXIII
N	Anpassung der Berechnungsart der Umweltwirkungen der SiC-Rohstoffe: Abbildungen für Staubmengen und SiC-Cluster .....	XXV
<b>Eidesstattliche Erklärung .....</b>		<b>XXVIII</b>

## **Danksagung**

Die Erstellung dieser Masterarbeit wäre ohne die fachliche und persönliche Unterstützung zahlreicher Personen nicht möglich gewesen. Daher möchte ich mich an dieser Stelle bei allen bedanken, die mich während der Bearbeitungszeit begleitet haben.

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr. Daniel Vollprecht für die fachliche Betreuung. Seine Impulse und die wissenschaftliche Begleitung setzten wichtige Akzente für diese Arbeit.

Ebenso danke ich Nico Mumm herzlich für die intensive Betreuung. Er unterstützte mich in regelmäßigen Jour-fixe-Gesprächen und half mir dabei, die methodischen und inhaltlichen Herausforderungen zu bewältigen.

Für die materialwissenschaftliche Expertise, die besonders den Beginn der Bearbeitung prägte, danke ich Talha Waseem. Seine Wissensweitergabe ermöglichte es mir, ein stabiles Fundament für die Auseinandersetzung mit den stofflichen Eigenschaften der Gießereistäube im SiC-Formling aufzubauen.

Zudem danke ich den beteiligten Gießereien sowie dem herstellenden Unternehmen der SiC-Formlinge. Sie lieferten wertvolle fachliche Beiträge und stellten die notwendigen Daten bereit, die ich für die Erprobung des Excel-Tools sowie die Auswertung benötigte.

Mein Dank gilt ferner meinem guten Freund Michael sowie meiner Freundin. Sie unterstützten mich durch ihr sorgfältiges Korrekturlesen und halfen mir dabei, die Argumentationen in dieser Arbeit zu präzisieren.

Abschließend danke ich meiner Familie und meinen Freunden. Sie hielten mir während des gesamten Studiums den Rücken frei und gaben mir besonders in stressigen Phasen den notwendigen Rückhalt. Ohne diese Unterstützung hätte ich mein Studium und diese Masterarbeit nicht in dieser Form abschließen können.

## **Kurzfassung (Deutsch)**

# ENTWICKLUNG EINES TOOLS ZUR OPTIMIERUNG DER KREISLAUFFÜHRUNG VON GIEßEREISTÄU- BEN MITTELS MULTIKRITERIELLER ENTSCHEI- DUNGSANALYSE

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Entwicklung eines Optimierungsmodells zur automatisierten Rezepturerstellung von SiC-Formlingen für den Kupolofen. Kern des Modells ist ein linearer Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA)-Ansatz, der mittels gewichteter Augmented-Tschebyscheff-Skalarisierung sowie der Min-Max-Methode in Excel/VBA umgesetzt wurde. Ein besonderer Fokus liegt auf der Integration von Gießereistaub und dessen Auswirkungen.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass Recycling primär ökonomische Vorteile bietet, während die ökologischen Effekte ambivalent bleiben. Während der Einsatz von Stäuben konsistent die Kosten senkt, führt er zumeist zu einer höheren Umweltwirkung. Eine Ausnahme bilden Rezepturen mit hohen Anforderungen an den SiC- oder Mangengehalt: Hier ermöglicht der Staub die Substitution von Quarzsand zur Erreichung der Zielbasizität, was sowohl ökonomische als auch ökologische Vorteile generiert.

Die Aussagekraft der Ergebnisse ist durch die begrenzte Datenqualität bezüglich der spezifischen Umweltwirkungen variabler SiC-Gehalte eingeschränkt. Zukünftige Optimierungspotenziale liegen in einer Erweiterung der Systemgrenzen auf den gesamten Kupolofen-Prozess. Insbesondere durch die Anrechnung des Kohlenstoffgehalts im Staub – der im Ofen potenziell als Energieträger fungiert – ist eine signifikante Steigerung der ökologischen Vorteilhaftigkeit des Recyclings zu erwarten.

## **Abstract (English)**

### DEVELOPMENT OF A TOOL FOR OPTIMIZING THE CIRCULATION OF FOUNDRY DUSTS USING MUL- TICRITERIA DECISION ANALYSIS

This paper describes the development of an optimization model for the automated recipe formulation of SiC briquettes used in cupola furnaces. At the core of the model is a linear Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) approach, which is implemented in Excel/VBA using weighted augmented Chebyshev scalarization and the min-max method. A particular focus is placed on the integration of foundry dust and its subsequent impacts.

The results demonstrate that recycling primarily offers economic benefits, while the environmental effects remain ambivalent. While the use of dust consistently reduces costs, it generally leads to a higher environmental impact. An exception is found in recipes with high requirements for SiC or manganese content: in these cases, the dust enables the substitution of silica sand to achieve the target basicity, thereby generating both economic and ecological advantages.

The validity of these findings is constrained by limited data quality regarding the specific environmental impacts of variable SiC contents. Future potential for optimization lies in expanding the system boundaries to encompass the entire cupola furnace process. In particular, by accounting for the carbon content within the dust – which potentially serves as an energy carrier within the furnace – a significant increase in the environmental benefit of recycling is anticipated.

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

Die deutsche Gießerei-Industrie ist eine klassische Mittelstandsbranche. Von den gut 560 Betrieben beschäftigen etwa 93 Prozent maximal 500 Mitarbeitende, wobei in rund 85 Prozent der Fälle die Belegschaftsgröße sogar unter 250 Personen liegt (Deutsche Energie-Agentur GmbH [dena], 2021). Diese Branche ist mit kontinuierlich neuen Herausforderungen und verschärften gesetzlichen Anforderungen konfrontiert. Aufgrund der hohen Energieintensität von Gießereiprozessen (dena, 2021; Eurostat, 2025) optimieren Betriebe ihre Abläufe kontinuierlich unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten (Stefana et al., 2019).

Im Hinblick auf eine ganzheitliche Nachhaltigkeit reichen die Betrachtung direkter Kosten und Emissionen des Energieverbrauchs nicht aus. Zunehmend gewinnt die Kreislaufführung von Ressourcen an Bedeutung. Dies zeichnet sich im Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) ab, das den Zweck verfolgt, „die Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen zu fördern und den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen sicherzustellen“ (§ 1, Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)).

Im Projektverbund ForCYCLE II forschten verschiedene Projektbeteiligte mit dem Ziel, die Ressourceneffizienz der bayerischen Wirtschaft zu steigern. Eines dieser Projekte fokussiert die Aufbereitung und Verwertung von Gießereistäuben. Diese fallen während der Herstellung von Gussteilen an diversen Quellen an, wie in Abbildung 1 rot gekennzeichnet.

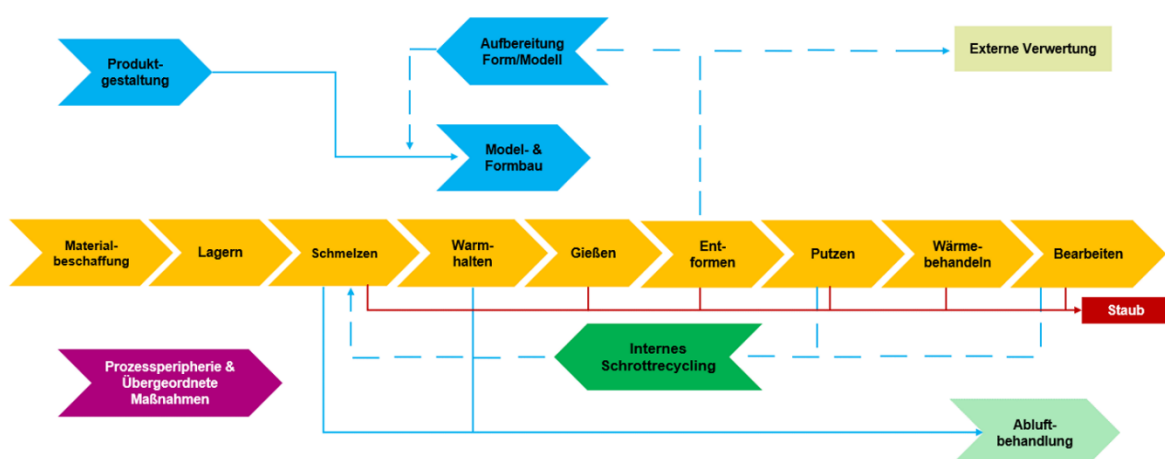


Abbildung 1: Schematischer Gießereiprozess und die Entstehungsorte von Staub. (Quelle: Darstellung im Projektrahmen)

Aktuell verhindern die chemischen und physikalischen Eigenschaften die Nutzung von Gießereistäuben in regulären Recyclingverfahren. Stattdessen enden sie auf Deponien, wodurch hohe Entsorgungskosten entstehen (Christian Strakos, 2023). Das ForCYCLE II Teilprojekt 9 BGMR stellte fest, dass sich diese Stäube in Siliziumkarbid (SiC)-Formlingen recyceln lassen, die anschließend im Kupolofen Einsatz finden (Strakos et al., 2022). Das Ergebnis dieses Projekts war ein Verfahren im Labormaßstab, das die Zugabe von Gießereistäuben in eben diese SiC-Formlinge ermöglicht.

Das Folgeprojekt GiTe überführt dieses Verfahren in den industriellen Maßstab. Dabei sollen  $CO_2$ -arme Rezepturen für Formlinge und ein Tool entwickelt werden, das bei der Rezepturerstellung sowie deren ökonomischer und ökologischer Bewertung unterstützt. In der Praxis erfolgt die Rezepturerstellung derzeit manuell. Dies ist stark durch implizites Wissen charakterisiert und erfolgt als händische Planung mithilfe simpler, nicht automatisierter Excel-Tools. Eine signifikante Herausforderung bildet hierbei die hohe Anzahl potenziell nutzbarer (SiC-)Rohstoffe mit ihren verschiedenartigen chemischen Zusammensetzungen, Preisen und ökologischen Auswirkungen. Angesichts dieser Vielzahl erscheint es impraktikabel, händisch ein Optimum zu bestimmen, das den Trade-off zwischen ökonomischen und ökologischen Auswirkungen berücksichtigt und gleichzeitig die kundenseitigen Spezifikationen erfüllt.

Erschwerend kommt hinzu, dass hinsichtlich der stofflichen Nutzung der Stäube diverse Arbeitshypothesen bestehen, deren Validierung noch aussteht. So steht im Raum, dass die Stäube möglicherweise positive oder negative Einflüsse auf die Festigkeit der Formlinge haben oder sie durch ihre abweichende chemische Zusammensetzung unterschiedlich stark Primärrohstoffe substituieren. Insbesondere bestehen keine gesicherten Erkenntnisse über die tatsächlichen ökonomischen und ökologischen Konsequenzen dieser Substitution.

Aus diesen Unsicherheiten und den genannten Herausforderungen leiten sich die Ziele der vorliegenden Arbeit ab.

### **1.2 Zielsetzung**

Diese Arbeit entwickelt eine Excel-basierte Softwareanwendung zur ökologisch-ökonomischen Optimierung der Rezepturen von SiC-Formlingen für Kupolöfen unter Nutzung von Gießereistäuben. Hierfür findet ein multikriterielles Entscheidungsmodell Anwendung.

Drei Unterziele konkretisieren das übergeordnete Ziel. Zunächst gilt es, systematisch die Anforderungen an das Tool zu analysieren und den Entwicklungsprozess agil zu gestalten. Darauf aufbauend folgt die Implementierung eines mathematischen, multikriteriellen

Optimierungsmodells als Kernkomponente der Software. Abschließend fokussiert das letzte Unterziel die Validierung des Tools sowie die Analyse des ökologisch-ökonomischen Trade-offs. Die Realisierung dieser Ziele schafft Transparenz in der Erstellung und den Ergebnissen der SiC-Formlingsrezepturen. Sie generiert ein Bewusstsein für die einzelnen ökonomischen sowie ökologischen Auswirkungen und ermöglicht dadurch gezieltere Maßnahmen zur Optimierung der Rezepturen.

Um diese Ziele zu erreichen, gliedert sich die Arbeit wie folgt: Kapitel 2 beschreibt die theoretischen Grundlagen, beispielsweise zu Gießereiprozessen, mathematischer Modellierung oder Ökobilanzierung, die als Basis für das Verständnis der Umsetzung dienen. Anschließend zeigt Kapitel 3 die methodische Umsetzung sowie erste Erkenntnisse auf, gefolgt von der Darstellung der Ergebnisse in Kapitel 4 und einer kritischen Diskussion sowie Ausblick in Kapitel 5. Den Abschluss der Arbeit bildet Kapitel 6, das die Erkenntnisse zusammenfasst.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Fachliche Grundlagen: Gießereitechnik und Kreislaufwirtschaft

#### 2.1.1 Allgemeine Übersicht und Zahlen

Die deutsche Gießereiindustrie umfasst circa 560 Betriebe und weist eine mittelständische Struktur auf (dena, 2021). Mit diesen Gießereien produziert Deutschland im Jahr über 3 Mio. Tonnen (t) Gusseisen (The European Foundry Association, 2024) und ist damit der fünftgrößte Produzent weltweit (Wetzel & Phelan, 2021). China produziert in etwa die zehnfache Menge von Deutschland und ist der weltweit größte Produzent (Wetzel & Phelan, 2021).

Aufgrund des hohen Energieeinsatzes als fünftgrößter industrieller Energiekonsument in der EU (Eurostat, 2025) und den damit verbundenen Treibhausgasemissionen ist die Gießereibranche Bestandteil des „Fit for 55“-Programms der EU (Eurostat, 2025). Dieses Programm zielt darauf ab, die Emission von Treibhausgasen der EU bis 2030 im Vergleich zu 1990 um mindestens 55 % zu reduzieren. Gießereiprozesse emittieren Treibhausgase bei der Produktion, entlang der Vorketten und erzeugen diverse Nebenprodukte sowie Abfälle. So fallen weltweit 100 Mio. t Gießereialtsande aus der Herstellung von Formen für die Gussteile an (Ahmad et al., 2022), wobei weltweit lediglich ein Viertel dieser Menge in den Kreislauf zurückfließt (Saetta & Fratta, 2025). Weitere Neben- und Abfallprodukte sind beispielsweise Schlacken oder Gießereistäube. Allein in der EU fallen Gießereistäube in Höhe von 50.000 t durch Kupolöfen und 1,2 Mio. t durch Elektrobogenlichtöfen an (Mombelli et al., 2024). Aufgrund des in 1.2 beschriebenen Hauptziels wird im weiteren Verlauf nur auf den Kupolöfen, dessen Gießereistäube und die SiC-Formlinge eingegangen.

#### 2.1.2 Der Kupolofenprozess

Der Kupolofen ist, wie Anhang A zeigt, in Deutschland mit 62 % für den Großteil der Produktionsmenge sowie des zugehörigen Energieverbrauchs verantwortlich. Der Kupolofen verwertet als Schachtofen primär Alteisen für die sekundäre Stahlgewinnung. Er arbeitet nach dem Prinzip des Gegenstroms, also mit sinkendem Einsatz und aufsteigenden Gasen (Sánchez et al., 2025). Die Einsatzquote für Schrott liegt zwischen 30 % und 95 % (Svehla et al., 2012). Es handelt sich um ein vertikales Schmelzgefäß, in dem durch die Verbrennung von Koks Metall schmilzt, das in Sandformen gegossen wird, in denen die gewünschten Gussbauteile erstarren (Sánchez et al., 2025). Der Kupolofen ist in drei primäre Zonen eingeteilt (Sánchez et al., 2025).

**Erste Zone:** Der Ofen nimmt die Rohmaterialien auf. Die Beschickung erfolgt sequenziell: Koks, Metallschrott sowie kalkhaltige Zuschlagstoffe zur Verschlackung. Diese Beschickung ist in Abbildung 2 im oberen Teil zu erkennen. Auch die SiC-Formlinge sind Teil der Beschickung, wenn sie eingesetzt werden. Diese dienen der Aufsilizierung (Bühning-Polaczek et al., 2014), wobei die Formlinge in 2.1.3 näher beschrieben sind.

**Zweite Zone:** In der Verbrennungszone oxidiert der Koks unter kontrollierter Luftzufuhr. Die freigesetzte thermische Energie schmilzt den Metallschrott.

**Dritte Zone:** Liegt im untersten Teil des Kupolofens, in der sich das geschmolzene Material sammelt. Durch den Dichteunterschied schwimmt die Schlacke oben und das Gusseisen darunter. Das Gusseisen fließt an der Stelle in die Sandformen.

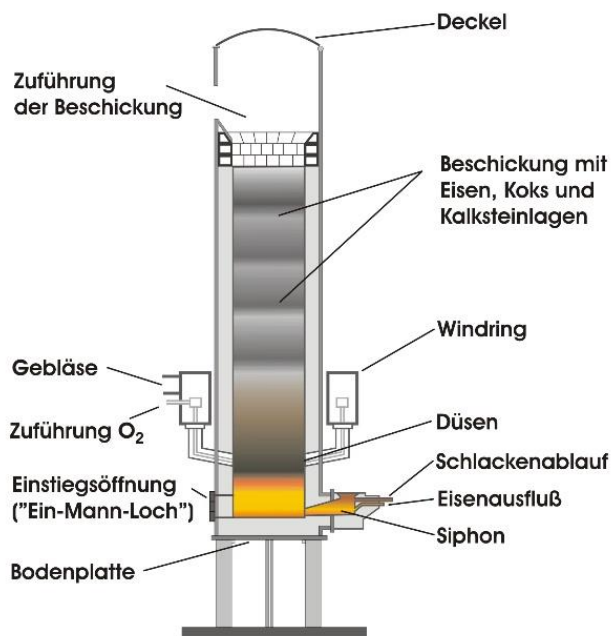


Abbildung 2: Der Kupolofen. (Quelle: Fefi, 2009)

Es gibt zwei verschiedene Arten von Kupolöfen, Kaltwind- und Heißwindkupolöfen, wobei letztere warme Luft in den Kupolofen leiten und dadurch den Koksverbrauch reduzieren und die Wirtschaftlichkeit verbessern (Spur et al., 2014). Im Kupolofen herrschen unterschiedliche Abstichtemperaturen, wobei Forschungen zeigen, dass die maximale Temperatur bei circa 1530 °C liegt (Demin, 2025). Daher ist der Kupolofen mit feuerfestem Material ausgekleidet, eine typische saure Zustellung besteht z. B. zu 98,5 % aus SiO<sub>2</sub> (Foundry Technologies & Engineering GmbH, 2025). Aus dieser Auskleidung ergibt sich eine Anforderung an die SiC-Formlinge, deren Funktionen im Folgenden beschrieben sind.

### 2.1.3 SiC-Formlinge

Der Einsatz von SiC-Formlingen optimiert den Kupolofenprozess in mehrfacher Hinsicht. Einerseits liefern sie Silizium, das als Legierungsmittel für Gusseisen benötigt wird, um Materialeigenschaften wie Festigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Bearbeitbarkeit einzustellen (Stawarz et al., 2017). Andererseits liefern sie Kohlenstoff, der Teile des Koks für die Verbrennung substituiert. Im Vergleich zu anderen Si-Quellen erhöht SiC auch die Keimbildungseigenschaften und erhöht damit die Anzahl eutektischer Zellen und Graphit-Noduli, was sich in einer verbesserten Fließfähigkeit und einer höheren Härte des Graugusses zeigt, bei einer gleichzeitig geringeren Neigung zur Weißerstarrung (Edalati et al., 2005). Nach Aussage der Partnergießereien im Projekt BGMR beträgt die Menge an SiC-Formling ~30 kg je 1000 kg an Gusseisen, also 3 %. Die in 2.1.2 erwähnte feuerfeste Auskleidung erfordert eine präzise Einstellung der Basizität, um Materialschäden zu vermeiden. Die Basizität ist als

$$\text{Basizität} = \frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2} \quad (2-1)$$

definiert (Wehrich, 2022). Die Zusammensetzung der SiC-Formlinge umfasst SiC-Rohstoffe für den SiC-Gehalt, FeMn68 für den Mangan-Gehalt, Zement zur Festigkeitsgebung, Quarzsand und Kalk zur Regulierung der Basizität sowie Wasser (Wehrich, 2022). Die Qualitätsanforderungen an Basizität, Festigkeit sowie SiC- und Mangangehalt definieren die notwendige Zusammensetzung der Formlinge.

### 2.1.4 Gießereistäube

Wie bereits in Abbildung 1 erkenntlich, fällt Gießereistaub an vielen Orten an, vom Schmelzprozess bis hin zur Bearbeitung. Filteranlagen oder Nassentstauber extrahieren die Stäube direkt an der Quelle. Nach der Sammlung in Silos oder Big Bags folgt die Klassifizierung nach Abfallschlüssel, bevor die Entsorgung auf Deponien erfolgt (Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg [LUBW], 1996). Hinsichtlich des Abfallschlüssels sind für Filterstäube AVV 10 09 09\* „Filterstaub, der gefährliche Stoffe enthält“ sowie 10 09 10 „Filterstaub, mit Ausnahme desjenigen, der unter 10 09 09 fällt“ relevant. Abfälle mit dem Schlüssel 10 09 09 dürfen nur in Deponien der Klasse III entsorgt werden (LUBW, 2009). Je nach Gießerei, Art des Gusseisens, Zeitpunkt sowie Anfallstelle variiert die Zusammensetzung des Staubes stark (Strakos et al., 2022).

Im Projekt gibt es daher einige Hypothesen. So hat der Staubeinsatz einen möglichen Einfluss auf den Zementeinsatz, da aufgrund der chemischen und physikalischen Eigenschaften bisher unbestimmte Auswirkungen auf die Festigkeit möglich sind. Aktuelle Hypothesen gehen von einer vorteilhaften oder neutralen Wirkung der Stäube auf die Materialfestigkeit

aus. Zum anderen ist abhängig von der chemischen Zusammensetzung eine Substitution von Primärrohstoffen absehbar. So substituieren quarzhaltige Stäube Quarzsand oder es ist möglich, dass SiC-haltige Stäube primäre SiC-Rohstoffe ersetzen. Eisenhaltige Stäube bieten Potenzial, Alteisen als Sekundärrohstoff im Gießereiprozess zu substituieren. Wie in der Einleitung beschrieben, sind die ökonomischen und ökologischen Auswirkungen des Einsatzes von Gießereistaub in SiC-Formlingen noch nicht quantifiziert.

## **2.2 Grundlagen der Ökobilanzierung**

Die Ökobilanzierung, auch als Life Cycle Assessment (LCA) bekannt, ist eine standardisierte, systemanalytische Methodik zur quantitativen Erfassung und Bewertung der Umweltwirkungen eines Produktsystems. Abhängig von den gewählten Systemgrenzen umfasst dies den gesamten Lebensweg von den Rohstoffen bis hin zum End-of-Life (Hauschild et al., 2018).

Der methodische Rahmen von Ökobilanzen ist durch die Normen der International Organization for Standardization (ISO) definiert. Von Bedeutung sind die Normen DIN EN ISO 14040, die die Grundsätze und Rahmenbedingungen festlegt, sowie die DIN EN ISO 14044, die Anforderungen und Anleitungen spezifiziert (ISO, 2006).

### *2.2.1 Die vier Phasen einer LCA*

Wie in Tabelle 1 dargestellt, gliedert sich eine Ökobilanz gemäß ISO 14040 iterativ in vier aufeinander folgende Phasen. Die folgenden Beschreibungen beziehen sich, soweit nicht anders dargestellt, auf Hauschild et al. (2018). Das Beispiel des „Augsburger Bechers“ verdeutlicht die methodischen Schritte. Hierbei geht es um eine LCA mit dem Vergleich von Einweg- und Mehrweggetränkebechern zur Wahl der am wenigsten umweltschädlichen Produktalternative. Das Beispiel entspricht universitätseigenen Dokumenten sowie Verbücheln et al. (2023).

Die erste Phase der LCA definiert das Ziel sowie den Untersuchungsrahmen. Die funktionelle Einheit (FU) definiert den Nutzen eines Produkts, um verschiedenartige Alternativen vergleichbar zu machen. Im Falle des Augsburger Bechers ist dies die Bereitstellung eines 400-ml-Bechers für den Ausschank einer bestimmten Anzahl an Kaltgetränken [im Grundszenario: 15]. Zudem ist in der ersten Phase die geographische Reichweite definiert, also Herkunft der Rohstoffe, Produktionsort, Standorte für die Nutzung und den End-of-Life des Bechers. Des Weiteren ein zeitlicher Rahmen, insbesondere für den verwendeten Strommix. Essenziell ist es außerdem, die Systemgrenzen zu definieren, in diesem Fall Cradle-to-Grave, also vom Rohstoff bis hin zum End-of-Life.

Die zweite Phase, die Sachbilanz (LCI), bilanziert alle Inputs und Outputs innerhalb der Systemgrenzen. Für den Augsburgener Becher ist dies von der Rohstoffgewinnung über Transport, Produktion, Nutzung bis hin zum End-of-Life. Professionelle Datenbanken für Ökobilanzen wie Ecoinvent kompensieren fehlende Primärdaten und vereinfachen die Analyse. Diese Datensätze bilden die Umweltbelastungen von Rohstoffen und Energieträgern standardisiert ab. Abbildung 3 zeigt beispielhaft die Produktionsinputs und -outputs für den Augsburgener Becher.

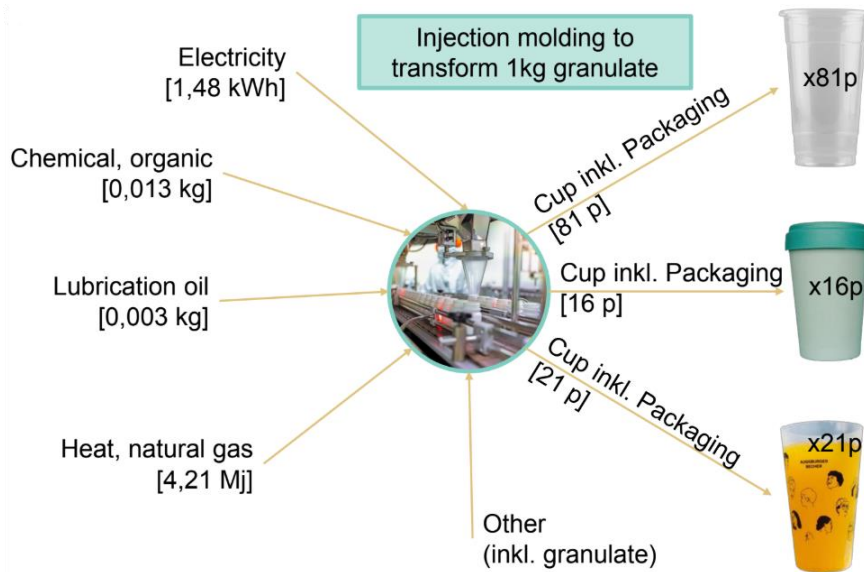


Abbildung 3: LCI-Faktoren in der Produktion des Augsburgener Bechers. (Quelle: PSCM Lehrstuhl, Universität Augsburg)

Abbildung 4 zeigt das Ergebnis des LCI. Es umfasst eine komplexe, multidimensionale Datenmenge an Input- und Outputfaktoren, die jeder Bezugseinheit wie kWh Strom über Emissionsfaktoren Auswirkungen zuweist.

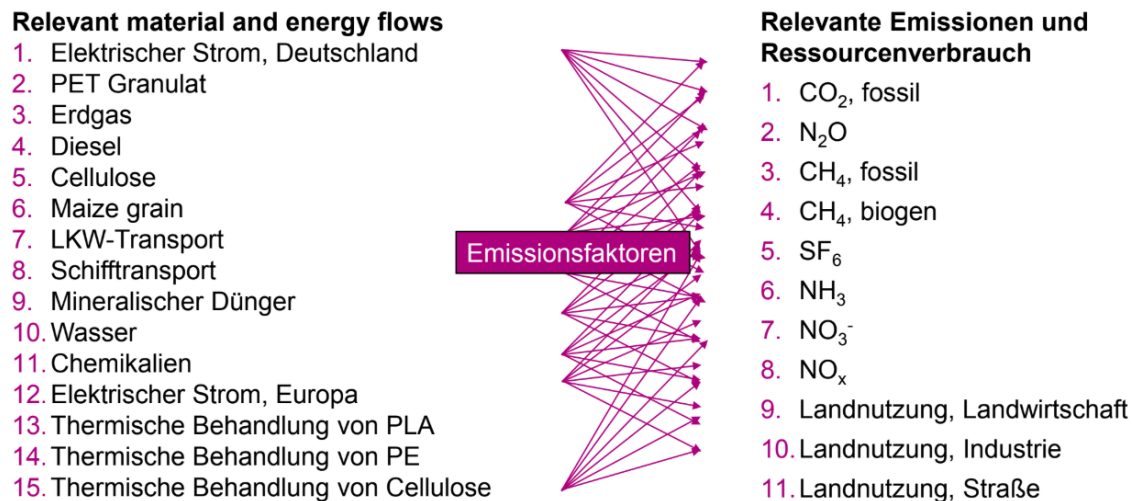


Abbildung 4: Ergebnis der LCI. (Quelle: PSCM Lehrstuhl, Universität Augsburg)

Die Wirkungsabschätzung (LCIA) aggregiert diese Werte zu spezifischen Umweltwirkungskategorien. Verschiedene Bestandteile der LCI zahlen auf diverse Kategorien ein, siehe Abbildung 5. Charakterisierungsfaktoren (CF) setzen die Potenz einer Substanz ins Verhältnis zu einer definierten Referenzsubstanz (ISO, 2006). Es existiert eine Vielzahl dieser Wirkungskategorien wie der Treibhauseffekt (GWP), der die Fähigkeit eines Treibhausgases misst, über einen definierten Zeithorizont Wärme in der Atmosphäre zu absorbieren, relativ zur gleichen Masse von CO<sub>2</sub>. Bei der Auswahl des CF von GWP beträgt der international etablierte Standard-Zeithorizont 100 Jahre (Myhre et al., 2013), basierend auf den Berichten des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Die Wahl des Zeithorizonts (z. B. GWP<sub>100</sub> vs. GWP<sub>20</sub>) ist selbst eine implizite Wertentscheidung, da sie kurzlebige, aber potente Gase wie Methan (CH<sub>4</sub>) signifikant unterschiedlich gewichtet (Myhre et al., 2013). Neben GWP ist der abiotische Ressourcenverbrauch, auch Abiotic Depletion Potential (ADP), betrachtet. Dieser bewertet die Erschöpfung nichterneuerbarer, abiotischer Ressourcen. Er ist unterteilt in ADP-elements, für endliche Ressourcen wie Metalle und Mineralien und ADP-fossil für fossile Energieträger (van Oers et al., 2020). Für ADP-elements dient die Ressource Antimon (Sb) als Referenzsubstanz. Die Ergebnisse sind in Antimon-Äquivalenten (kg Sb-eq) ausgedrückt. Im Gegensatz zum GWP ist ADP methodisch eine stark debattierte Wirkungskategorie, obwohl sie die aktuell verbreitetste LCIA-Methode für abiotischen Ressourcenverbrauch darstellt (Mankaa et al., 2024). Die Berechnung basierend auf Abbauraten und geologischen Reserven beruht auf unsicheren und volatilen techno-ökonomischen Annahmen und blendet die Möglichkeit aus, dass abiotische Ressourcen nicht zwingend verloren, sondern in die Technosphäre integriert und später recyclebar sind und wieder zur Verfügung stehen (van Oers & Guinée, 2016).

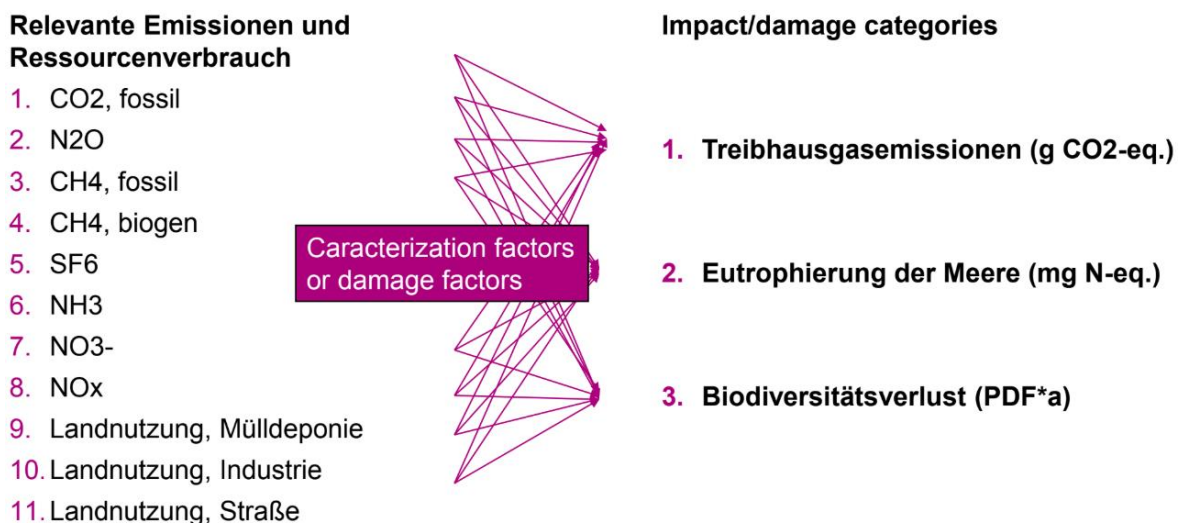


Abbildung 5: LCIA – Aggregation zu Impact Categories. (Quelle: PSCM Lehrstuhl, Universität Augsburg)

In der letzten Phase der LCA erfolgt die Auswertung der in der LCIA ermittelten Ergebnisse. Zu interpretieren sind die Effekte der verschiedenen Umweltwirkungskategorien wie GWP, ADP etc. für verschiedene (Produkt-)Alternativen. Die Werte zu aggregieren ist eine Möglichkeit, diese interpretierbar zu gestalten. Dies ist in 2.2.2 dargestellt.

Tabelle 1: Die vier Phasen einer LCA nach ISO 14040.

Phase	Beschreibung
Ziel und Untersuchungsrahmen	Definition der Zielsetzung, der Systemgrenzen und der funktionellen Einheit.
Sachbilanz (LCI)	Erheben aller relevanten Input- (z. B. Ressourcen, Energie) und Outputflüsse (z. B. Emissionen, Abfälle) des untersuchten Systems.
Wirkungsabschätzung (LCIA)	Umrechnung der langen LCI-Ergebnisse in ein verständliches Profil potenzieller Umweltwirkungen.
Auswertung	Die Analyse der Ergebnisse der LCI und LCIA in Relation zum definierten Ziel, inklusive Sensitivitätsanalysen und Formulierung von Schlussfolgerungen.

### 2.2.2 Normalisierung und Gewichtung zur Aggregation von Scores

Die LCIA resultiert in einem Umweltprofil, das aus einer Reihe von Indikatoren in nicht vergleichbaren Einheiten besteht, wie CO<sub>2</sub>-eq und Sb-eq. Ohne weitere Aggregation erschweren subjektive Zielkonflikte den objektiven Vergleich zwischen Wirkungskategorien wie GWP und ADP.

Um diese Komplexität für vergleichende Bewertungen, die öffentliche Kommunikation etc. handhabbar zu machen, gibt es die Möglichkeit, LCIA-Ergebnisse zu einem einzelnen Score zusammenzufassen. Dies erfolgt mittels zweier Schritte, die die ISO 14044 als optionale Schritte klassifizieren, der Normalisierung und Gewichtung (Roesch et al., 2020).

Die Normalisierung bezieht die Ergebnisse auf eine Referenz und verdeutlicht so deren relative Größenordnung (Roesch et al., 2020). Diese Referenz ist typischerweise die Umweltbelastung in einer definierten Region pro Person und Jahr. Das Ergebnis der Normalisierung ist ein dimensionsloser Wert, also z. B. der GWP-Beitrag des Produkts entspricht 0,12 % der globalen Pro-Kopf-Belastung, der ADP-Beitrag 1,7 %. Die Normalisierung löst somit das Einheitenproblem, gibt jedoch noch keine Aussage über die Wichtigkeit von Wirkungskategorien.

Hierfür erfolgt eine Gewichtung. Die normalisierten Indikatorergebnisse sind mit spezifischen Gewichtungsfaktoren zu multiplizieren und zu einem Single Score aufzuaddieren (Roesch et al., 2020). Die Gewichtungsfaktoren geben entweder die relative Wichtigkeit einer Wirkungskategorie wider, die eine Gesellschaft, Fachkundige oder Politik dieser beimessen, oder stellen den Abstand zu einem Ziel dar oder sind Gewichte entsprechend ihres

ökonomischen Wertes (Ahlroth, 2014). Diese Gewichtungen werten die Ergebnisse explizit und fließen subjektiv in die Bewertung ein (Roesch et al., 2020).

Ein einheitliches Vorgehen eröffnet der Product Environmental Footprint (PEF). Die Methodik wurde von der Europäischen Kommission initiiert, um eine einheitliche, standardisierte LCA-Methode zur Verfügung zu stellen, die konsistente, transparente und vor allem vergleichbare Umweltaussagen über Produkte ermöglicht (European Commission, 2022a). Während die ISO-Normen dem Anwendenden die Wahl der Methodik überlassen, definiert der PEF einen verbindlichen Satz von 16 Wirkungskategorien sowie festgelegte Normalisierungsfaktoren bezogen auf die globale Belastung pro Person und festgelegte Gewichtungsfaktoren (European Commission, 2022a).

Der PEF definiert somit einen neuen Standard. Der Unterschied liegt in einer kollektiven statt individuellen Subjektivität, die die Ergebnisse vergleichbar macht.

### 2.3 Grundlagen des Operations Research

Operations Research (OR) unterstützt Entscheidungsprozesse und löst Entscheidungsprobleme in Organisationen durch wissenschaftlich etablierte mathematische Methoden (Hillier & Lieberman, 2024). Branchen wie die Produktion, die Logistik, das Militär und das Gesundheitswesen nutzen OR (Dekker et al., 2012; Hillier & Lieberman, 2024). Das Kernziel besteht in der Steigerung der Produktivität, die als

$$\text{Produktivität} = \frac{\text{Output}}{\text{Input}} \quad (2-2)$$

definiert ist (Panneerselvam, 2023).

OR transformiert komplexe Realprobleme in idealisierte, mathematische Modelle, um fundierte Lösungen zu generieren (Panneerselvam, 2023). Die Modelloptimierung liefert übertragbare Erkenntnisse für die reale Problemstellung, siehe Abbildung 6.

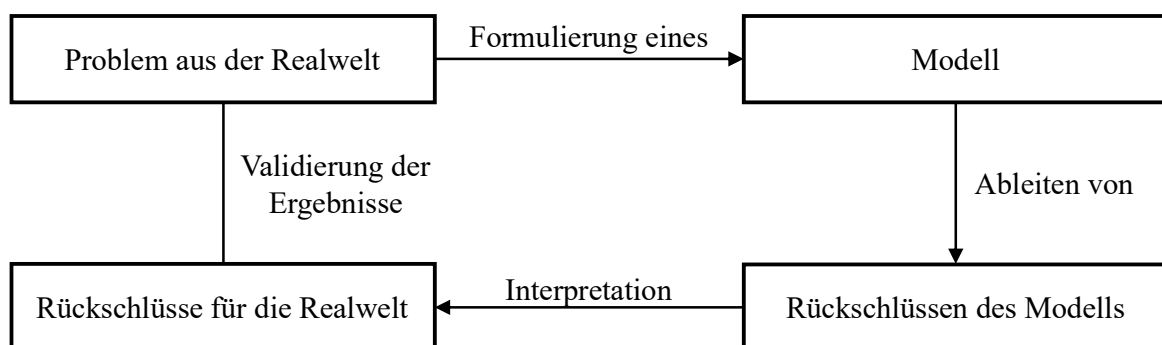


Abbildung 6: Ablauf der Modellerstellung im OR. (Quelle: Übersetzt aus Panneerselvam, 2023)

Der Prozess der Modellbildung umfasst sieben Schritte (Panneerselvam, 2023):

Schritt 1: Identifizieren des realen Entscheidungsproblems.

Schritt 2: Formulieren eines Modells, das das Entscheidungsproblem adäquat abbildet.

2.1: Parameter und Variablen verbal sowie mathematisch definieren.

2.2: Variablen auswählen, die den größten Einfluss haben, um das Modell möglichst einfach zu halten. Variablen in kontrollierbar und nicht kontrollierbar einteilen.

2.3: Beziehungen zwischen den Variablen anhand des vorhandenen Wissens formulieren. Annahmen bzgl. ihres Verhaltens für nicht kontrollierbare Variablen treffen.

2.4: Modell erstellen, indem man die realen Beziehungen als System von symbolischen/mathematischen Beziehungen darstellt.

Schritt 3: Durchführen von Optimierungsmethoden, wie ein System von (Un-)Gleichungen zu lösen oder statistische Analysen durchzuführen, um daraus Rückschlüsse zu treffen.

Schritt 4: Interpretieren dieser Rückschlüsse auf das Realproblem.

Schritt 5: Testen und validieren der Ergebnisse.

Schritt 6: Umsetzen der Ergebnisse.

Schritt 7: Anpassen des Modells, falls nötig.

Für die in Schritt 3 erwähnten Optimierungsmethoden gibt es im OR diverse Techniken.

Die lineare Programmierung (LP) ist die verbreitetste Technik (Kunwar & Sapkota, 2022). Sie setzt eine lineare Zielfunktion sowie lineare Nebenbedingungen voraus. Ein Spezialfall ist die lineare ganzzahlige Programmierung, bei der Entscheidungsvariablen ausschließlich ganzzahlige Werte annehmen (Panneerselvam, 2023). Darüber hinaus bestehen weitere Verfahren wie Heuristiken, Netzpläne oder Entscheidungsbäume (Zimmermann, 2005). Für die vorliegende Arbeit ist nur das kontinuierliche LP relevant.

### *2.3.1 Lineare Programmierung als Optimierungsmethode*

Die lineare Programmierung optimiert eine Zielfunktion und identifiziert stets globale Optima, sofern ein zulässiger Lösungsraum existiert (Hillier & Lieberman, 2024). Ein LP-Modell umfasst die Zielfunktion (ZF), Nebenbedingungen (NB) und Nichtnegativitäts-Bedingungen (NNB). Die Formulierung erfordert Entscheidungsvariablen, Zielfunktionskoeffizienten, Input-Output-Koeffizienten sowie Angaben zur Ressourcenverfügbarkeit (Panneerselvam, 2023). Die Bestandteile eines linearen Optimierungsmodells stellt Tabelle 2 mit einem Beispiel dar.

Tabelle 2: Komponenten eines linearen Optimierungsmodells.

Komponente	Erklärung	Beispiel
Entscheidungsvariablen (EV)	Die Werte, die das Modell anpassen darf, um eine optimale Lösung zu finden.	Menge eines Rohstoffs $x_i$
Zielfunktionskoeffizienten	Ein konstanter Wert, der die Veränderung der Zielfunktion pro Entscheidungsvariable definiert.	Kosten eines Rohstoffs $c_i$
Zielfunktion	Die zu minimierende oder maximierende Funktion, die die Qualität einer Zusammensetzung an EV bestimmt	Minimierung der Rohstoffkosten: $\min f = \sum_{i=0}^n c_i x_i$
Input-Output-Koeffizienten	Ein konstanter Wert, der die Menge an Input angibt, die benötigt wird, um eine Einheit des Outputs zu erhalten.	Benötigte Menge an Rohstoffen $a_{ij}$ um eine Einheit $x_i$ herzustellen.
Ressourcenverfügbarkeit	Ein konstanter Wert, der die verfügbare Menge eines Inputs angibt.	Verfügbare Menge eines Rohstoffs $b_i$
Nebenbedingung	(Un-)Gleichungen, die den Lösungsbereich einschränken und den zulässigen Bereich vorgeben.	Die verfügbare Menge jedes Rohstoffs $b_i$ darf nicht überschritten werden: $\sum_{j=1}^n a_{ij} x_i \leq b_i \quad \forall i \in I$
Nichtnegativitätsbedingungen	Die Entscheidungsvariablen dürfen nur positive Werte annehmen.	Es können keine negativen Mengen eines Rohstoffs verwendet werden: $x_i \geq 0 \quad \forall i \in I$

Quelle: Eigene Darstellung nach Hillier und Lieberman (2024) und Panneerselvam (2023)

Für Probleme in der linearen Programmierung gelten vier Annahmen (Panneerselvam, 2023).

**Linearität:** Mathematisch gesehen stellen Addition und Skalarmultiplikation die Funktion dar. Der Input ist also direkt proportional zum Output, es existieren keine Mengenrabatte, Skaleneffekte oder Ähnliches.

**Teilbarkeit:** Die zweite Annahme umfasst, dass die Entscheidungsvariablen Dezimalwerte annehmen dürfen und somit nicht ganzzahlig sein müssen. Für ganzzahlige lineare Probleme gibt es Erweiterungen, die allerdings nicht für diese Arbeit relevant sind.

**Nichtnegativitätsbedingung:** Entscheidungsvariablen müssen positiv sein.

**Additivität:** Die letzte Annahme bedeutet, dass der Output für eine gegebene Kombination von Aktivitätsniveaus die algebraische Summe der Leistung jedes einzelnen Prozesses ist. Der Gesamtwert wie etwa der Gewinn oder Gesamtressourcenverbrauch ist die Summe der einzelnen Bestandteile. Es gibt keine Synergieeffekte oder Wechselwirkungen. Wenn Produkt A einen Gewinn von 15 € und Produkt B einen Gewinn von 20 € liefert, ist der Gesamtgewinn 35 €. Es gibt keinen zusätzlichen Bonus oder Malus, nur weil beide Produkte produziert werden.

Durch die Linearität der Zielfunktion sowie Nebenbedingungen ergibt sich als Lösungsraum ein konvexes Polytop  $P$  und vier mögliche Varianten (Panneerselvam, 2023; Petropoulos et al., 2024).

**Keine zulässige Lösung:** Im ersten Fall gibt es einander widersprechende Nebenbedingungen, sodass keine Lösung alle Bedingungen erfüllt. In diesem Fall ist das Polytop  $P$  eine leere Menge.

**Genau eine optimale Lösung:** Wenn das Polytop  $P$  nicht leer ist, kann es genau eine optimale Lösung geben. Diese eindeutige Lösung befindet sich stets an einem Eckpunkt des Polytops  $P$ .

**Unendlich viele optimale Lösungen:** Der dritte Fall tritt ein, wenn die Zielfunktion parallel zu einer Kante oder einer höherdimensionalen Seite des Polytops  $P$  verläuft. Alle Punkte auf dieser Kante oder Seite, einschließlich ihrer Eckpunkte, sind gleichermaßen optimal.

**Unbeschränktheit:** Wenn das Polytop  $P$  in die Richtung, in die die Zielfunktion optimiert wird, nicht begrenzt ist, liegt der vierte Fall vor. Der Zielfunktionswert verbessert sich entlang einer unbeschränkten Kante von  $P$  beliebig, sodass kein endliches Optimum existiert.

Um die optimale Lösung zu finden, existiert eine Vielzahl von Algorithmen (Hillier & Lieberman, 2024), wobei die am weitesten verbreitete Methode der Simplex-Algorithmus ist (Petropoulos et al., 2024). Dessen Ablauf ist geometrisch einprägsam, weshalb für die folgenden Beschreibungen basierend auf Hillier und Lieberman (2024) zusätzlich Abbildung 7 die grafische Lösung für zwei Entscheidungsvariablen darstellt.

Der Simplex-Algorithmus setzt sich aus zwei Phasen zusammen. In der ersten Phase sucht der Algorithmus zunächst eine zulässige Ecklösung. In Abbildung 7 ist das der Ursprung  $(0,0)$ . In diesem Punkt wird der Wert der Zielfunktion, hier als  $Z$  bezeichnet, zunächst berechnet und anschließend geprüft, ob die benachbarten Eckpunkte die Zielfunktion verbessern. Ist das der Fall, wechselt der Algorithmus zu dem Punkt, der die Zielfunktion maximiert. Er wiederholt diesen Iterationsschritt, bis keine Verbesserung mehr möglich ist und

damit das globale Optimum identifiziert ist. Gemäß Abbildung 7 navigiert der Simplex-Algorithmus bei einer Maximierung der Zielfunktion vom Ursprung  $(0,0)$  mit  $Z = 0$  zum Eckpunkt  $P(0,6)$  mit  $Z = 30$ , da  $Z(0,6) > Z(4,0) > Z(0,0)$ . Von diesem Punkt aus wählt er Punkt  $P(2,6)$ , da  $Z(2,6) > Z(0,6) > Z(0,0)$ . An diesem Punkt  $P(2,6)$  ist das Optimum erreicht, da  $Z(2,6) > Z(0,6) > Z(4,3)$ .

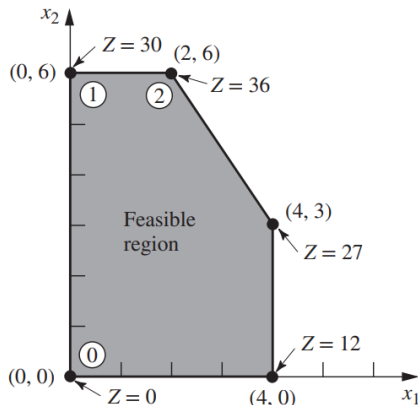


Abbildung 7: Grafische Darstellung des Simplex Lösungsverfahrens. (Quelle: Hillier & Lieberman, 2024)

Ein moderat großes LP mit 10 Produkten sowie 10 Ressourcen hat bereits ungefähr 200.000 Eckpunkte, wobei durch das effiziente Suchverfahren nur  $\sim 20$  der 200.000 Eckpunkte untersucht werden, um die optimale Lösung zu finden (Reeb & Leavengood, 1998).

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass aktuell lediglich das primale Problem thematisiert ist. Dieses kann in ein duales Problem umgeformt werden, das schnellere Lösungszeiten ermöglicht und andere Lösungsverfahren verwendet (Panneerselvam, 2023). Dieses ist nicht näher betrachtet, da dieses Problem für die Umsetzungen nicht relevant ist.

Das LP-Framework limitiert die Optimierung systembedingt auf eine einzelne Zielfunktion, beispielsweise die Kostenminimierung. In vielen realen Entscheidungssituationen wie bei den ökologisch-ökonomischen Problemstellungen, ist diese Beschränkung nicht haltbar. Es sind sowohl Kosten als auch Umweltauswirkungen zu minimieren. Wenn diese multiplen Zielfunktionen sowie die Nebenbedingungen des Systems linear sind, entsteht ein Multi-Objective Linear Program (MOLP), ein Spezialfall des Multi-Criteria Decision Making (MCDM). Diese Methodik ist im Folgenden näher beleuchtet.

### 2.3.2 Multikriterielle Entscheidungsanalyse (MCDM)

MCDM umfasst Methoden zur Entscheidungsfindung, die mehrere Zielfunktionen gleichzeitig berücksichtigen und hierfür passende Optima finden (Taherdoost & Madanchian, 2023). MCDA ist ein alternativer Begriff für MCDM. Die Methoden unterstützen bei der systematischen Entscheidungsfindung. Die Anwendungsgebiete reichen von der Bewertung

erneuerbarer Energien für die Politik über die Auswahl von Transportsystemen bis hin zur Steuerung von Projektportfolios (Pramanik et al., 2021). Die Relevanz von MCDM nimmt stetig zu. Eine vervierfachte Studienanzahl zwischen 2014 und 2025 belegt diesen Trend (Taherdoost & Madanchian, 2023). Dies liegt auch an der verstärkten Nutzung während der Covid-19-Pandemie (Sotoudeh-Anvari, 2022), aber auch der verstärkten Anwendbarkeit für Problemstellungen der Nachhaltigkeit (Kaplinski et al., 2019).

MCDM-Probleme lassen sich in zwei Kategorien unterteilen (Beckmann et al., 1981), in Multi-Attribute Decision Making (MADM) und Multi-Objective Decision Making (MODM). Bei MADM existiert eine endliche Anzahl möglicher Lösungen, die das Optimierungsmodell bewertet und die beste Alternative daraus auswählt. Im Gegensatz dazu nutzt ein MODM-Problem einen kontinuierlichen Entscheidungsraum. Das Optimierungsmodell wählt die Werte der Entscheidungsvariablen unter Einhaltung der Nebenbedingungen frei aus. Diese Unterschiede stellt Abbildung 8 dar. Bei MODM spielen Entscheidungstragende sowie ihre Präferenzen im Vergleich zu MADM-Problemen eine große Rolle (Taherdoost & Madanchian, 2023). Da das zu entwickelnde Tool Rezepturen ohne vordefinierte Alternativen generiert, fokussiert diese Arbeit MODM.

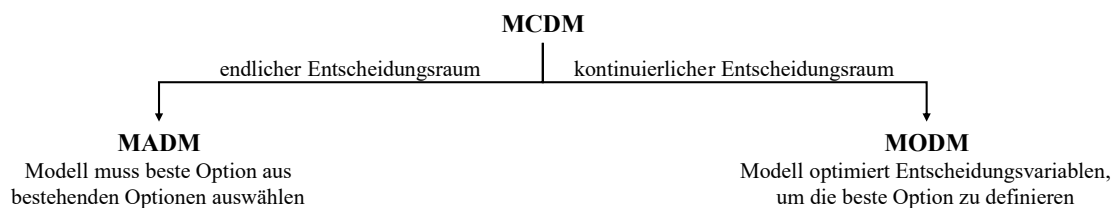


Abbildung 8: Entscheidungsbaum für MCDM-Kategorien.

### 2.3.3 Multi Objective Decision Making (MODM)

#### 2.3.3.1 Pareto-Front

Im MCDM und damit auch im MODM gibt es per Definition widersprüchliche Ziele. Daher gibt es oft nicht eine Lösung, die alle Ziele gleichzeitig optimiert, sondern eine Menge an Pareto-optimalen Kompromissen. Diese basieren auf dem Dominanzkonzept nach Vilfredo Pareto.

Sei  $x = (x_1, x_2, \dots, x_i)^T \in X$  der Vektor der Entscheidungsvariablen im zulässigen Bereich  $X$ . Es seien  $x^1, x^2, \dots, x^n \in X$  spezifische, zulässige Lösungen mit den zugehörigen Zielfunktionswerten  $f(x^1)$  und  $f(x^2)$ . Mathematisch gesehen dominiert eine Lösung  $x^1$  eine andere zulässige Lösung  $x^2$ , wenn  $x^1$  in allen Zielfunktionen  $f_i$  mindestens so gut ist wie  $x^2$  und gleichzeitig in mindestens einer Zielfunktion strikt besser ist. Eine zulässige Lösung  $x^n$  ist demnach Pareto-optimal, wenn sie von keiner anderen Lösung dominiert wird (Nagy et al., 2020). Eine Pareto-optimale Lösung ist somit ein Zustand, in dem die

Verbesserung einer Zielfunktion automatisch eine andere Zielfunktion verschlechtert. Diese Lösung stellt damit einen optimalen Kompromiss dar, der auch oft Trade-off genannt wird (Nagy et al., 2020). Abbildung 9 zeigt ein Minimierungsproblem mit den Pareto-optimalen Punkten A und D. Punkt A dominiert die im Lösungsraum liegenden Punkte B und C. Punkt A dominiert Punkt B, da Punkt A in beiden Zielfunktionen besser ist und Punkt C, da  $f_1(A) < f_1(C)$  und  $f_2(A) = f_2(C)$ . Punkt D dominiert die Punkte B und C nicht, da diese jeweils für die Zielfunktion  $f_1$  bessere Werte erreichen. Punkte A und D dominieren sich nicht gegenseitig, da  $f_1(A) < f_1(D)$  und  $f_2(A) > f_2(D)$ . Alle nicht dominierten Lösungen, also Pareto-optimalen Lösungen, liegen auf der blauen, fett markierten Pareto-Front.

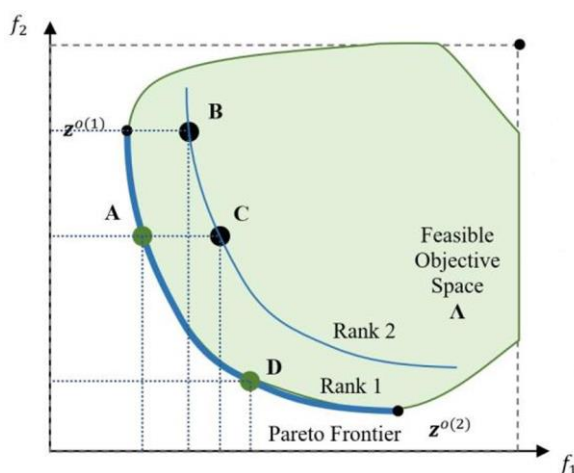


Abbildung 9: Darstellung von Pareto-optimalen Lösungen. (Quelle: Nagy et al., 2020)

Aus mathematischer Perspektive ist jede Pareto-optimale Lösung gleich und stellt eine optimale Lösung des Modells dar (Nagy et al., 2020). Da die Praxis meist eine einzige Lösung erfordert, wählen Entscheidungstragende eine der Pareto-optimalen Lösungen aus (SS&C Technologies, 2006). Diese Personen können beispielsweise angeben, wie wichtig welches Ziel ist oder andere Methoden anwenden, die in 2.3.3.3 dargestellt sind.

### 2.3.3.2 Normalisierung

Verschiedene Ziele basieren auf unterschiedlichen und nicht vergleichbaren Einheiten. Ein vereinfachtes Modell misst beispielsweise das Umweltziel  $f_1$  in CO<sub>2</sub>-Emissionen [kg CO<sub>2</sub>-eq], während die Zielfunktion  $f_2$  die Kosten in Euro quantifiziert. Versucht nun eine Methode, die Zielfunktionen zu aggregieren und direkt miteinander zu vergleichen, ist dies äußerst sensitiv hinsichtlich der Skalierung, also des betrachteten Wertebereichs (SS&C Technologies, 2006). Entspricht der Wertebereich von  $f_1$  zum Beispiel [3.000, 10.000] und der Wertebereich  $f_2$  gleichzeitig [100.000, 500.000] ist das Ergebnis durch den direkten Vergleich hauptsächlich von  $f_2$ , also den Kosten, dominiert. Die um mehrere Potenzen höhere

numerische Größenordnung verursacht diese Dominanz. Die Transformation der Zielfunktionen überführt unterschiedliche Einheiten in dimensionslose Werte eines einheitlichen Maßstabs (Marler & Arora, 2004). Um diesen gemeinsamen Maßstab zu erzeugen, gibt es mehrere Varianten (Marler & Arora, 2004). Eine simple Technik, die Relativierung mithilfe der Minima umzusetzen (Chen et al., 1999; Koski & Silvennoinen, 1987), ist in Formel (2-3) dargestellt.

$$f_i^{norm}(x) = \frac{f_i(x)}{z_i^U}, \quad z_i^U > 0 \quad (2-3)$$

$z^U$  ist der Utopie-Punkt, dessen Komponenten als  $z_i^U = \min_{x \in X} f_i(x)$  die bestmöglichen Werte für jede einzelne Zielfunktion sind. Durch diese Normalisierung sind die Zielfunktionen dimensionslos und besser vergleichbar, da sie relativ zu ihrem Minimum dargestellt sind. Eine Eigenschaft dieser Methode ist, dass weiterhin Probleme mit der Skalierung auftreten, wenn die Wertebereiche stark differenziert sind. Im zuvor verwendeten Wertebereich ergibt sich, dass die ökonomische Zielfunktion  $f_2$  weiterhin um das 1,5-fache überwiegt, wie in Formel (2-4) bis (2-6) dargestellt. Diese Skalenunterschiede ergeben eine implizite Gewichtung im Modell.

$$f_1^{norm}(10.000) = \frac{10.000}{3.000} = \frac{10}{3} \quad (2-4)$$

$$f_2^{norm}(500.000) = \frac{500.000}{100.000} = 5 \quad (2-5)$$

$$\text{Relative Gewichtung} = \frac{5}{10/3} = 1,5 \quad (2-6)$$

Da die Gewichtung rein durch menschliche Vorgabe erfolgen soll, gibt es Alternativen. Eine der robustesten Methoden ist es, stattdessen über den kompletten Wertebereich zu normalisieren, um eine Skalierung von  $[0,1]$  zu erhalten (Marler & Arora, 2004), wie in Formel (2-7) dargestellt.

$$f_i^{norm}(x) = \frac{f_i(x) - z_i^U}{\max_{x \in X} f_i(x) - z_i^U} \quad (2-7)$$

Der hauptsächliche Nachteil dieser Methode tritt ein, wenn die Lösung hinter  $\max_{x \in X} f_i(x)$  ein nicht Pareto-optimales Ergebnis darstellt und somit zu hoch ist. Dadurch wird der Ergebnisraum von  $[0,1]$  mit einer zu großen Skala berechnet und es treten abhängig von der Konstellation erneut Verschiebungen auf, die das Ergebnis verfälschen (Marler & Arora, 2004; SS&C Technologies, 2006). Dieser Nachteil kann ausgeglichen werden, indem man anstelle von  $\max_{x \in X} f_i(x)$  einen Nadir-Punkt  $z^N$  einführt, dessen Komponenten als  $z_i^N = \max_{x \in P} f_i(x)$  die

schlechtesten Werte sind, die man auf der Pareto-Front für jede Zielfunktion findet. Daraus ergibt sich Formel (2-8) (Koski, 1984; Koski & Silvennoinen, 1987; Rao & Freiheit, 1991):

$$f_i^{norm}(x) = \frac{f_i(x) - z_i^U}{z_i^N - z_i^U} \quad (2-8)$$

### 2.3.3.3 MODM-Methoden

Da MODM als Hauptziel hat, die Präferenz des Entscheidenden abzubilden (Marler & Arora, 2004), sind die Methoden danach klassifizierbar, wann diese Person ihre Präferenzen äußert. In Tabelle 3 sind diese vier Klassen dargestellt.

Tabelle 3: Vier Klassifikationen von MODM-Methoden.

Klasse	Zeitpunkt der Präferenzartikulation	Art der Präferenzartikulation	Typisches Ergebnis	Beispielmethoden
Keine Präferenz	Entfällt bzw. vorab (implizit)	Keine expliziten Präferenzen	Eine einzelne „neutrale“ Kompromisslösung	Global Criterion wie TOPSIS, Min-Max Methode
A priori	Vor der Optimierung	Explizite Präferenzen (z. B. Gewichte, Ziele)	Eine einzelne, präferenzoptimale Lösung	Gewichtete Summe, Gewichtete Min-Max Methode, Goal Programming, $\epsilon$ -Constraint Methode
A posteriori	Nach der Optimierung	Keine Präferenzen während der Optimierung	Die gesamte Pareto-Front, aus der Entscheidungstragende wählen müssen	Satisficing Trade-off Methode
Interaktiv	Während der Optimierung	Progressive, adaptive Präferenzen	Eine einzelne, präferenzoptimale Lösung (iterativ gefunden)	Adaptive gewichtete Summen

Quellen: Marler & Arora, 2004; Nagy et al., 2020

Die Anforderungsanalyse (Kapitel 3) legt fest, dass Entscheidungstragende die Zielfunktionen vorab gewichten. Daher werden die A-priori-Methoden detaillierter betrachtet.

Für das Verständnis dieser Methoden ist es wichtig, den Begriff der Skalarisierung einzuführen. Klassische multikriterielle Optimierungsprobleme werden oft durch die Nutzung von Skalarisierung gelöst (Emmerich & Deutz, 2018; Miettinen, 1998). Skalarisierung drückt aus, dass die Zielfunktionen zu einem einzigen gemeinsamen Ziel aggregiert werden oder alternativ als Nebenbedingungen umgeformt werden (Emmerich & Deutz, 2018). Bei der Nutzung solcher Techniken stellen sich zwei Fragen (Emmerich & Deutz, 2018): Resultieren aus der Optimierung des skalarisierten Problems effiziente Punkte? Sind alle effizienten

Punkte auf der Pareto-Front auffindbar, in dem man die Parameter der skalarisierten Zielfunktion oder Nebenbedingungen variiert?

Eine der verbreitetsten A-priori-Methoden ist die „Gewichtete Summen“-Methode, auch Weighted Sum Method (WSM) genannt. Es gibt eine Vielzahl weiterer Methoden, aus denen einige Beispiele in Tabelle 3 aufgeführt sind.

Bei der WSM ist jeder Zielfunktion eine nichtnegative Gewichtung zugeordnet, woraufhin die gewichtete Summe aus diesen minimiert wird (Emmerich & Deutz, 2018). Daraus ergibt sich für die Zielfunktion des multikriteriellen Entscheidungsproblem die Gleichung

$$\min \sum_{i=1}^m \omega_i f_i(x), \quad x \in X \quad (2-9)$$

wobei  $\omega_i$  die Gewichtungsfaktoren darstellen und  $f_i$  die Zielfunktionen. Bezüglich der weiter oben formulierten Fragestellungen bei solchen Techniken zeigen Forschungen auf, dass die WSM effiziente, also Pareto-optimale Punkte findet (Emmerich & Deutz, 2018). Dies ist einzuschränken für nicht konvexe Pareto-Fronten, bei denen Punkte auf der Pareto-Front liegen können, die aufgrund der Linearität der Zielfunktion der WSM nicht detektiert werden (Emmerich & Deutz, 2018). Abbildung 10 illustriert für jeweils unterschiedliche Gewichtungen die Ergebnisse zweier Ziele. Trotz gleichbleibender Gewichtung kann WSM bei der rechten, konkaven Pareto-Front weitere Pareto-optimale Punkte nicht finden. Dies ist aufgrund der linearen Zielfunktion nicht möglich, obwohl eine ausgeglichene Lösung aus  $f_1$  und  $f_2$  auf der Pareto-Front existiert.

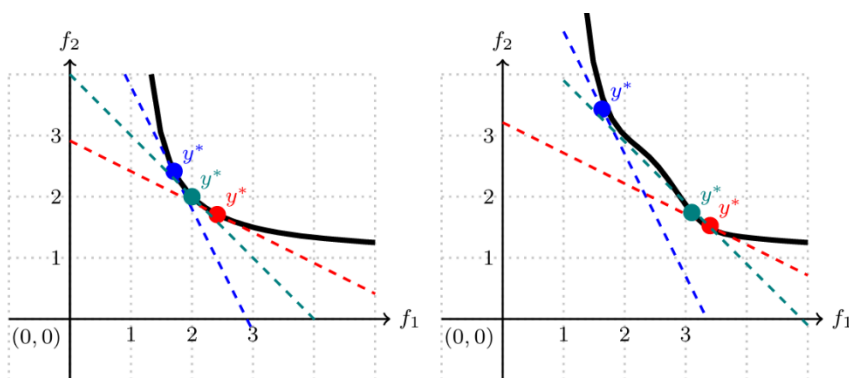


Abbildung 10: Ergebnisse der WSM für verschiedene Gewichtungen bei konvexer und konkaver Pareto-Front. (Quelle: Emmerich & Deutz, 2018)

Eine massive Einschränkung der WSM entsteht, wenn der Simplex-Algorithmus und lineare Zielfunktionen sowie Nebenbedingungen zusammenkommen, da der Simplex-Algorithmus immer einen Eckpunkt und keine anderen Punkte auf der Pareto-Front auswählt (SS&C Technologies, 2006). Diese mathematische Eigenschaft führt zu sprunghaften

Ergebnisänderungen bei kleinsten Gewichtungsänderungen, die der intuitiven Erwartungshaltung der Anwendenden widersprechen (SS&C Technologies, 2006). Zudem sind die Lösungen Eckpunkte der Pareto-Front, die auch Extrempunkte darstellen und somit für Entscheidungstragende nicht intuitiv sind (SS&C Technologies, 2006). Entscheidungstragende erwarten mit der Vergabe einer Gewichtung eine kontinuierliche Änderung des Ergebnisses sowie der Zusammensetzung der Entscheidungsvariablen. In Abbildung 11 stellt der rot schraffierte Bereich den Lösungsraum dar und die grüne Gerade im Lösungsraum die Pareto-optimalen Lösungen. Die beiden anderen Geraden stellen Steigungen  $-\omega_1/\omega_2$  der gewichteten Zielfunktion dar. Anhand der Abbildung ist ersichtlich, dass die Minimierung der skalarisierten Zielfunktion entweder den einen oder den anderen Eckpunkt der Pareto-Front trifft und keine anderen Punkte der Pareto-Front. Theoretisch kann die Steigung  $-\omega_1/\omega_2$  auch genau der Steigung der Pareto-Front entsprechen. In diesem Fall ist zwar jede Lösung mathematisch optimal, der Simplex würde aufgrund seiner Ecklösungscharakteristik, die in 2.3.1 dargestellt ist, den Suchprozess an einem der beiden Eckpunkte beenden. Als Ergebnis existieren in dieser Kombination somit nur die Eckpunkte.

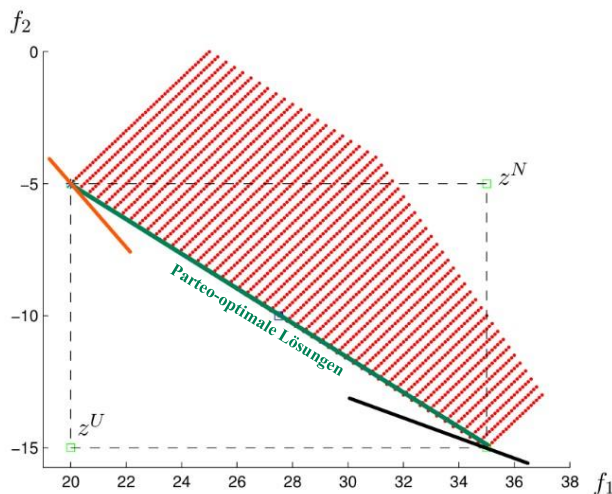


Abbildung 11: Zusammenspiel von Pareto-Front, WSM und Simplex-Algorithmus im linearen Fall. (Quelle: SS&C Technologies, 2006; leicht adaptiert)

Das Quadrieren der Zielfunktion löst das eben beschriebene Problem (SS&C Technologies, 2006), verletzt allerdings die Linearitätsbedingung. Der Simplex Algorithmus ist dadurch nicht mehr anwendbar.

Die gewichtete Min-Max-Methode (WMMM), auch Tschebyscheff-Methode genannt, eliminiert diese methodische Schwäche (Emmerich & Deutz, 2018). Sie ist als

$$\max_i \{\omega_i [f_i(x) - f_i^U]\} \quad (2-10)$$

definiert. Ein häufig genutzter Ansatz, Formel (2-10) praktisch umzusetzen, ist es, einen unbekannt Parameter  $\lambda$  einzuführen (Marler & Arora, 2004):

$$\min_{x \in X, \lambda} \lambda \quad (2-11)$$

Unter den Nebenbedingungen:

$$\omega_i [f_i(x) - f_i^U] \leq \lambda, \quad \forall i \in I \quad (2-12)$$

In Worten drückt das aus, dass WMMM den größten Unterschied zwischen dem Wert jedes Ziels und seinem Utopie-Punkt minimiert, wobei die Gewichtungen jedes Ziels einfließen.

Um erneut auf die weiter oben formulierte Fragestellung bei der Nutzung solcher Techniken zu referenzieren, zeigt sich, dass die WMMM effiziente Lösungen findet, jedoch schwach Pareto-dominierte Lösungen als Ergebnis finden kann (Emmerich & Deutz, 2018). Dies bedeutet, dass keine andere Lösung auffindbar ist, die diese Lösung dominiert, es jedoch andere Lösungen gibt, die in allen Zielfunktionen die gleichen Ergebnisse erreichen (Emmerich & Deutz, 2018). Um ausschließlich Pareto-optimale Punkte zu finden, ergänzt ein zusätzlicher Term die Zielfunktion (Emmerich & Deutz, 2018):

$$\min_{x \in X, \lambda} \lambda + \rho \sum_{i=1}^m f_i(x) - f_i^U \quad (2-13)$$

$\rho$  ist ein sehr kleiner positiver Wert (Odu, 2013), wie beispielsweise 0,0001. Die Optimierung wird weiterhin von  $\lambda$  dominiert. Von allen Punkten mit dem gleichen  $\lambda$  überwiegt nun der Punkt, der die Summe aller Abweichungen minimiert. Somit findet diese Methode einzelne, strikt Pareto-optimale Punkte (Emmerich & Deutz, 2018).

## 2.4 Grundlagen der End-User Entwicklung mit Tabellenkalkulationen

Balzert definiert Software Engineering als systematische Verwendung von Prinzipien und Werkzeugen für umfangreiche Softwaresysteme. Spezifische Anwendungsfälle benötigen oft reduzierte Ansätze. Insbesondere bei der Entwicklung von Decision Support Systemen vermischen sich Kenntnisse der Softwareentwicklung mit spezifischem Domänenwissen. Für Szenarien, die keine tiefgreifenden Programmierkenntnisse verlangen, eignet sich das End User Development (EUD). Dieser Ansatz befähigt Nutzende durch spezifische Methoden und Werkzeuge, Software-Artefakte eigenständig zu erstellen oder zu modifizieren (Karat et al., 2006). Fachkundige passen so Benutzeroberflächen und Funktionalitäten an ihre Anforderungen an.

Tabellenkalkulationsprogramme zählen zu den verbreitetsten Werkzeugen (Taylor et al., 1998), mit Microsoft Excel als bekanntestem Vertreter. Hohe Fehlerkosten durch laienhaft

erstellte Software begründen die Disziplin des End-User Software Engineering (EUSE). Dieses Feld wendet systematische Qualitätsmaßnahmen wie Anforderungsanalysen, Versionierung und Tests auf von Personen ohne Fachkenntnisse entwickelte Anwendungen an, um die Ergebnisqualität zu steigern (Ko et al., 2011). Raković (2019) definiert speziell für Tabellenkalkulationsprogramme ein Framework, um solche von Nutzenden erstellte Programme professionell zu managen.

### 2.4.1 Framework für Tabellenkalkulationsprogramme

Raković (2019) beschreibt neun Schritte, die eine erfolgreiche Entwicklung tabellenbasierter Programme gewährleisten. Diese sind in Abbildung 12 dargestellt. Die Anforderungsdefinition legt zu Beginn die Ziele und Grenzen der Anwendung fest. Darauf folgt die Designphase, die die logische Struktur und das Layout plant. Die Implementierungsphase setzt die Anwendung durch Formeln und Formatierungen um. Eine systematische Testphase stellt danach die Fehlerfreiheit sicher. Eine begleitende Dokumentation sichert die Nachvollziehbarkeit. Das Deployment stellt die Anwendung anschließend bereit.

Bei Anwendungen, die kritische Entscheidungen unterstützen, schließt sich eine Verifikation der Ergebniskorrektheit an. Nach erfolgreicher Prüfung erfolgen die operative Nutzung sowie Backups zum Schutz vor Datenverlust.

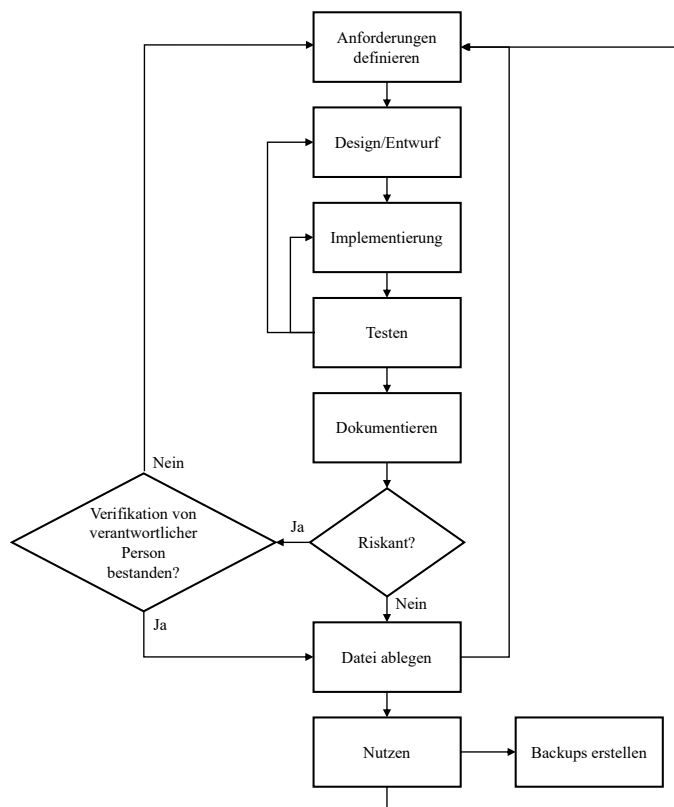


Abbildung 12: Neun Schritte in der Entwicklung eigener Tabellenkalkulationsprogramme. (Quelle: Raković, 2019; übersetzt)

Die Richtlinien von Raković (2019) für jeden dieser neun Schritte sind in Anhang B dargestellt. Dieser Lebenszyklus verbindet sich effektiv mit dem Ansatz des Minimum Viable Product (MVP). Im Gegensatz zu klassischen Vorgehensmodellen, die eine strikte Abarbeitung aller Phasen verlangen (Adenowo & Adenowo, 2013), ermöglicht der MVP-Ansatz das frühzeitige Testen eines minimal funktionsfähigen Kerns unter realen Bedingungen. Nach Lenarduzzi und Taibi dient ein MVP primär dem Validated Learning und der Überprüfung von Hypothesen mit minimalem Aufwand. Frühe Feedbackschleifen passen das System ziel führend an, verbessern das Produkt iterativ und verhindern die Entwicklung eines allumfassenden Konstrukts, das die Zielsetzung verfehlt (Kazakevich & Joiner, 2024; Olsen, 2015).

#### 2.4.2 Erheben und Priorisieren von Anforderungen

Die Konstellation im End-User Development unterscheidet sich signifikant von der klassischen Softwareentwicklung, in der Anforderungen oft streng formal notiert sind, um das Verständnis zwischen Fachbereich und Entwicklung zu sichern (Ko et al., 2011). In der vorliegenden Arbeit übernimmt die verfassende Person die entwickelnde Rolle, agiert im Sinne des EUD somit primär als Fachperson für die Domäne. Die Anforderungen entstehen, analog zur agilen Softwareentwicklung, teilweise emergent während der Implementierung, statt einer rein formalen Vorab-Spezifikation zu folgen (Coplien & Harrison, 2005). Angesichts der begrenzten Ressourcen und der interdisziplinären Komplexität aus Softwareentwicklung, Operations Research und Materialwissenschaft ist eine systematische Priorisierung dieser Anforderungen dennoch essenziell. Die Taxonomie von Alhenawi et al. (2024) systematisiert Priorisierungsmethoden anhand ihrer Rangzuweisung. In Abbildung 13 ist deren Unterscheidung in relative und exakte Methoden dargestellt.

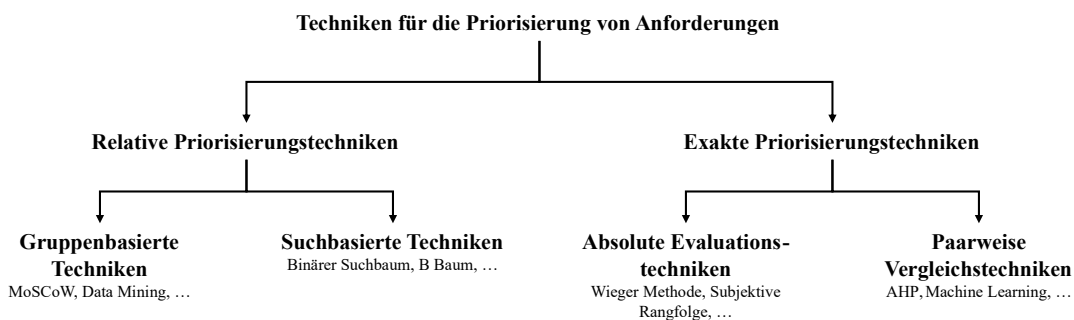


Abbildung 13: Priorisierungsansätze im Anforderungsmanagement. (Quelle: Alhenawi et al., 2024; übersetzt)

Die Kategorie der exakten Priorisierung weist Anforderungen spezifische, quantitative Werte zu. Hierzu zählen paarweise Vergleiche (z. B. Analytic Hierarchy Process), absolute Bewertungstechniken sowie suchbasierte Techniken, die algorithmische Strukturen nutzen.

Diese Methoden liefern zwar präzise Ergebnisse, sind jedoch oft mit einem hohen methodischen Aufwand verbunden.

Im Gegensatz dazu bestimmen relative Verfahren die Wichtigkeit einer Anforderung im Verhältnis zu anderen. Eine Unterkategorie bilden gruppierungsbasierte Techniken, bei denen Anforderungen vordefinierten Clustern zugewiesen werden. Alle Elemente innerhalb eines Clusters weisen die gleiche Priorität auf. Ein prominenter Vertreter dieses Ansatzes ist die MoSCoW-Methode. Solche Verfahren unterstützen das Prinzip des Validated Learning im MVP, da sie eine schnelle Fokussierung auf den funktionalen Kern der Software ermöglichen.

## 2.5 Überblick über bestehende Arbeiten

Drei aktuelle Fallstudien illustrieren die praktische Anwendung der theoretischen Konzepte und analysieren unterschiedliche Modellierungsansätze im vorgestellten Bereich von OR. Stallkamp et al. (2022) analysieren die Gestaltung eines Recycling-Netzwerks für die Kreislaufwirtschaft von Kunststoffen. Die Verfasserinnen adressieren das Problem, ökonomische und ökologische Ziele in einem Multi-Objective Mixed-Integer-Linear-Programming-Modell zu vereinen. Die Methodik nutzt den Utopie-Punkt als zentrales Element, wobei diese idealen Einzelzielwerte die Optimierung leiten. Die Verfasserinnen vergleichen darauf aufbauend zwei Varianten: das hierarchische Lexikographische Goal Programming und das Tschebyscheff-Goal-Programming. Die Ergebnisse zeigen, dass der lexikographische Ansatz dazu neigt, niedrig priorisierte Ziele zugunsten der Hauptziele zu vernachlässigen. Das Tschebyscheff-Modell minimiert den gewichteten Abstand zum Utopie-Punkt und generiert dadurch ausgewogene Lösungen. Die Kernkenntnis ist, dass die explizite mathematische Orientierung am Utopie-Punkt mittels der Tschebyscheff-Metrik hier überlegen ist, da sie extreme Trade-offs vermeidet.

Eine weitere Fallstudie von Wang et al. (2021) widmet sich der globalen Produktionsplanung unter Unsicherheit. Die Herausforderung liegt in der hohen Volatilität der Nachfrage, die rein deterministisches LP unzureichend abbildet. Auch hier bildet der Utopie-Punkt den Anker der Zielfunktion: Die Verfasserinnen entwickeln ein stochastisches Optimierungsmodell, das den Abstand der Lösung zu diesem Idealpunkt minimiert. Die Erweiterung der linearen Programmierung um stochastische Parameter in den Nebenbedingungen zeigt, dass dieser Ansatz auch bei Marktschwankungen robust bleibt. Die Studie belegt, dass die Kombination aus stochastischen Nebenbedingungen und der Minimierung des Abstands zum Utopie-Punkt Risiken effektiver reduziert als klassische deterministische Modelle.

Die dritte Fallstudie von Fararah et al. (2023) betrachtet ein integriertes Modell für das Management fester Abfälle in einer mehrstufigen Lieferkette. Das Ziel ist die simultane Minimierung von Kosten und Umweltbelastungen mittels Weighted Goal Programming (WGP). Die Ziele müssen nicht zwingend dem Utopie-Punkt entsprechen, sondern sind selbst wählbar. Das Modell weist den Zielen spezifische Gewichte zu und integriert die Präferenzen der Entscheidungsverantwortlichen direkt in den Simplex-Algorithmus. Zur Validierung vergleichen die Verfassenden ihr Modell mit bestehenden Standardmodellen. WGP identifiziert durch die Minimierung von Zielabweichungen ausgewogene Kompromisslösungen und nutzt damit seine methodische Stärke. Es liefert Lösungen, die generische Modelle in Pareto-optimalen Bereichen oft übersehen. Während klassische LP-Ansätze oft einseitige Randlösungen generieren, ermöglicht die WGP-Struktur eine simultane Optimierung konfliktärer Ziele, was in komplexen Entsorgungnetzwerken zu robusteren Gesamtergebnissen führt. Zusammenfassend zeigen die drei Fallstudien, dass die Optimierung von MCDM-Problemen auf einen Utopiepunkt bzw. ein Ziel mit Tschebyscheff-Skalarisierung eine geeignete Methode ist, um belastbare, reproduzierbare Optima zu finden.

Es existieren jedoch auch andere Ansätze wie Simheuristiken (Rabbani et al., 2019) oder diskrete MCDM-Methoden wie Analytic Hierarchy Process oder TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution), den Bafail und Abdulaal (2021) nutzen, um Wertstoffsammelsysteme zu wählen.

## **2.6 Forschungsfrage**

Aus den Anforderungen des GiTe Forschungsprojekts sowie den eben eingeführten theoretischen Grundlagen ergeben sich konkrete Forschungsfragen:

Wie können auf Basis einer Analyse der individuellen, prozessrelevanten Eigenschaften unterschiedlicher Gießereistäube und unter Einbeziehung von Nachhaltigkeitsaspekten die Anforderungen an ein Excel-basiertes Tool definiert und umgesetzt werden, das Gießereien eine multifaktorielle, optimierte Entscheidungsunterstützung für das Recycling dieser Stäube in SiC-Formlingen bietet – unter Berücksichtigung technischer, ökologischer und ökonomischer Kriterien.

Inwieweit beeinflussen unterschiedliche Formling-Spezifikationen das ökologisch-ökonomische Einsparpotenzial quantitativ?

## **2.7 Ziel und Abgrenzung der Arbeit**

Dieses Kapitel definiert die primäre Zielsetzung der Arbeit und grenzt den Untersuchungsumfang von nicht betrachteten Aspekten ab.

Diese Arbeit entwickelt ein Excel-basiertes Tool, das Gießereien bei der Erstellung spezifischer Rezepturen für SiC-Formlinge unterstützt. Dabei ist das Recycling von Gießereistäuben zu integrieren und deren ökonomische und ökologische Auswirkungen einzubeziehen. Besondere Beachtung finden die variablen Zusammensetzungen der Stäube und deren Auswirkungen auf den Formling.

Das Tool muss die mit den Stakeholdern definierten Anforderungen erfüllen. Zudem ist es Ziel der Arbeit, zu validieren, ob das Tool reproduzierbare, realistische Ergebnisse erzeugt. Des Weiteren ist ein Ziel, übergeordnete Aussagen hinsichtlich des Einflusses des Recyclings von Gießereistäuben in SiC-Formlingen herauszuarbeiten, also den Trade-off von Ökonomie und Ökologie beim Recycling aufzuzeigen.

Nicht Teil dieser Arbeit ist es dagegen, neue Versuche mit SiC-Formlingen zu erstellen, um die Festigkeit der vom Tool ausgegebenen Rezepturen zu bestätigen. Die Arbeit generiert keine weiteren Festigkeitsdaten, sollte die Datenqualität oder -verfügbarkeit eine Analyse verhindern. Zudem erfolgt keine vollständige Ökobilanzierung. Die Analyse nutzt stattdessen Grundlagen von Ökopol und bifa sowie Daten aus bestehenden Ökobilanzdatenbanken. Die Integration selbstlernender Algorithmen ist nicht vorgesehen.

### 3 Erstellung und Implementierung des Tools

Dieses Kapitel legt dar, wie die Konzeption und Implementierung des Excel-basierten Optimierungstools die Forschungsfragen beantwortet. Es verknüpft die in den vorangegangenen Kapiteln erarbeiteten theoretischen Grundlagen mit der praktischen Anwendung.

Die Untersuchung liefert erste empirische Erkenntnisse, die bereits Teile der Forschungsfrage beantworten. Sie liefern wertvolle Kontextinformationen für das Verständnis der Stoffströme sowie die spätere Interpretation der Ergebnisse und stellen für die Arbeit bereits relevante Ergebnisse dar.

#### 3.1 Anforderungsanalyse und -erhebung

##### 3.1.1 Identifikation von Interessengruppen und Use Cases

Die Analyse identifiziert zunächst die Interessengruppen, die das System beeinflussen oder von dessen Nutzung betroffen sind. Ein Brainstorming ermittelt diese Stakeholder methodisch und integriert die unterschiedlichen Perspektiven des Recyclings von Gießereistäuben in SiC-Formlingen. Tabelle 4 strukturiert die Rollen und Interessen der identifizierten Stakeholder.

Tabelle 4: Identifizierte Interessengruppen des Optimierungstools.

Interessengruppe	Rolle und Interessen
Gießereien	Als Hauptnutzende des Tools entscheiden die Gießereien über die Verwertung ihrer Stäube. Ihr Fokus liegt auf der Gewichtung ökologischer und ökonomischer Entscheidungskriterien, um eine für ihren spezifischen Kontext optimale Verwertungsrouten zu identifizieren.
Lehrstuhl	Für den Lehrstuhl ist das Tool ein Deliverable für das Förderprojekt. Das Interesse liegt in der methodisch sauberen Abbildung der Entscheidungsprozesse und der Sicherung der Projektergebnisse.
Herstellendes Unternehmen der SiC-Formlinge	Diese Unternehmen fungieren als Qualitätsinstanz. Sie müssen in Zusammenarbeit mit den Gießereien sicherstellen, dass die Qualitätsanforderungen der SiC-Formlinge erfüllt sind.
Verbände, Behörden o. Ä.	Stellen in dieser Arbeit keine primäre Interessengruppe dar, da der Fokus auf der Anwendung in den Partnergießereien liegt. Perspektivisch bietet das Tool durch Anpassungen das Potenzial, makroökonomische Analysen (z. B. auf Bundeslandebene) durchzuführen und Recyclingpotenziale überregional zu quantifizieren.

Diese Differenzierung stellt sicher, dass die Entwicklung primär auf die Bedürfnisse der Anwendenden (Gießereien) ausgerichtet ist, ohne die wissenschaftlichen und qualitativen Rahmenbedingungen zu vernachlässigen.

### 3.1.2 Erhebung und Priorisierung funktionaler und nicht-funktionaler Anforderungen

Dieser Arbeitsschritt definiert den für das Tool maßgeblichen Anforderungskatalog. Dieser leitet sowohl die technische Entwicklung des Tools als auch die thematische Schwerpunktsetzung der vorliegenden Arbeit. Ein iterativer Ansatz kombiniert verschiedene Quellen und Methoden für ein ganzheitliches Anforderungsprofil.

Die Untersuchung extrahiert zunächst Anforderungen aus der Bachelorarbeit von Schnur-berger (2024). Interviews mit Fachkundigen des Lehrstuhls sowie der direkte Austausch mit den Gießereien ergänzen diese Basis. Ein digitales Miro-Board erfasst und strukturiert die Ergebnisse und ermöglicht eine kollaborative Bearbeitung. Parallel dazu entsteht ein Prozessmodell nach dem Standard BPMN 2.0 (Business Process Model and Notation). Die Visualisierung des geplanten Workflows hilft, Prozesslücken zu identifizieren und weitere funktionale Anforderungen abzuleiten, die für einen reibungslosen Einsatz des Tools notwendig sind. Ergänzend generieren Brainstorming-Sessions weitere Aspekte, um auch nicht-offensichtliche Anforderungen an die Datenverarbeitung und Benutzerfreundlichkeit abzudecken.

Die hohe Anzahl an Anforderungen erfordert eine systematische Priorisierung für die Entwicklungsphase. Die Arbeit nutzt die MoSCoW-Matrix aus 2.4.2, um die Anforderungen im Miro-Board zu clustern. Vier selbst gewählte Definitionen kategorisieren die Anforderungen: Als Must Have gelten essenzielle Pflichtenforderungen, ohne deren Umsetzung das Tool seinen Zweck verfehlt. Die Kategorie Should Have umfasst Anforderungen, die die Funktionalität verbessern, aber bei Nichtumsetzung nicht kritisch sind. Optionale Anforderungen sind als Could Have klassifiziert und lediglich bei verbleibenden Zeitressourcen umzusetzen. Schließlich dient die Kategorie Won't Have der expliziten Abgrenzung von Funktionen, die nicht Teil der aktuellen Aufgabenstellung sind, um den Fokus des Projekts zu wahren.

Um sicherzustellen, dass die priorisierten Anforderungen die Praxisrealität der Gießereien widerspiegeln, erfolgt eine abschließende Feedbackschleife innerhalb des Lehrstuhls. Aufgrund der engen Zusammenarbeit dieser mit den Partnerunternehmen, validieren die Fachkundigen des Lehrstuhls die Relevanz der einzelnen Punkte. Mittels eines Dot-Votings erfolgt eine erneute Gewichtung, wobei die Präferenzen einzelner Personen farblich kodiert werden. Die Liste der initial definierten und priorisierten Anforderungen ist in Anhang C aufzufinden. Der Entwicklungsprozess und dessen Ergebnisse änderten immer wieder Teile der Anforderungen, da die Zwischenergebnisse, wie in 2.4 beschrieben, in einem agilen Entwicklungsumfeld Einfluss auf die weiteren Schritte haben.

## 3.2 Datenerhebung und -aufbereitung

### 3.2.1 Definition der Systemgrenzen

Die Bewertung basiert auf der definierten funktionellen Einheit. In Abstimmung mit den Stakeholdern und analog zum industriellen Standard des herstellenden Unternehmens ist dies die Rezeptur eines SiC-Formlings mit einer fixen Masse von 962 kg. Dieser Wert bezieht sich auf die Trockenmasse unter Exklusion des Wasseranteils.

Grundlegend gilt die Annahme, dass der Gießereiprozess selbst durch das Recycling unberührt bleibt, die Allokation der Stäube ist in Kapitel 3.2.3 behandelt. Die quantitative Analyse der Stoffströme schließt eine Erweiterung der Systemgrenzen auf den Kupolofenprozess zunächst aus. Drei Faktoren deuten darauf hin, dass das Recycling den Hauptprozess nicht signifikant beeinflusst.

**Erstens:** Der Massenanteil der SiC-Formlinge ist mit 3 % an der Gesamtproduktion des Gusseisens gering.

**Zweitens:** Eisen liegt oftmals nicht elementar vor. Gemäß Röntgenfluoreszenzanalyse aus Anhang F liegt der Anteil an  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  bei 1 – 40 %. Selbst unter der konservativen Annahme einer vollständigen stöchiometrischen Umwandlung zu elementarem Eisen, was max. ~28 % elementares Eisen ergibt und einer Einsatzquote von 20 % Gießereistaub errechnet sich eine maximale Eiseneinsparung von 0,168 %. Da die Substitution primär ökologisch gering belastetes Sekundäreisen betrifft, stuft die Arbeit diesen Effekt als vernachlässigbar ein und schließt ihn aus.

**Drittens:** Für Kohlenstoff ergibt sich mit einem Gehalt von 3 – 50 % laut Anhang G unter Annahme eines optimistischen Koksbedarfs von 80 kg pro Tonne Gusseisen (Aries et al., S. 126) und der Annahme eines Kohlenstoffgehalts im Koks von 100 % eine theoretische Einsparung von maximal 3,75 %. Die Formeln dazu sind in Tabelle 5 aufgeführt. Hierbei ist unbekannt, welcher Einfluss zu erwarten ist.

Das entwickelte Tool fokussiert durch Vorgabe des Lehrstuhls und der Gießereien rein die Herstellung der SiC-Formlinge ohne Erweiterung auf den Kupolofen. Um methodische Strenge zu wahren, erfolgt eine Ex-post-Validierung im Ergebnisteil: Der Vergleich des maximalen Einsparungspotenzials des Kohlenstoffs relativ zu den vom Tool erzielten Ökoscores zeigt, welchen Einfluss die Erweiterung der Systemgrenzen hätte.

Als Wirkungskategorien sind GWP und ADP (elements) seitens der Interessengruppen vorgegeben, wobei die modulare Struktur als Anforderung aus Anhang C eine spätere Ergänzung weiterer Kategorien erlaubt.

Die Entscheidungskriterien zur Systemeingrenzung sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Mögliche Einflussfaktoren des Staubreyclings auf den Hauptprozess des Kupolofens.

Parameter	Einflussfaktor	Quantitative Abschätzung	Berechnung	Bewertung
Massenanteil	Verhältnis SiC-Formling zu Guss-eisen	~ 3 %	-	Geringer Gesamt-hebel
Eisensubstitution	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Gehalt in Stäuben (max. 40 %)	Theoretische Fe-Einsparung: ~ 0,17 %	$\frac{3 \% \cdot 28 \% \cdot 20 \%}{1000/1000}$	Vernachlässigbar (Substitution von Sekundäreisen)
Kohlenstoffsubstitution	C-Gehalt in Stäuben (max. 50 %)	Theoretische C-Einsparung: ~ 3,75 %	$\frac{3 \% \cdot 50 \% \cdot 20 \%}{80/1000}$	Vorerst vernachlässigbar (Validierung im Ergebnisteil)

### 3.2.2 Erhebung ökonomischer, ökologischer und chemischer Daten

Um ein Optimum zu berechnen, benötigt das Tool entsprechend Daten, insbesondere zu verfügbaren Rohstoffen und deren Auswirkung auf die Zielfunktionen. Zunächst erfasst die Untersuchung alle potenziellen Rohstoffe für SiC-Formlinge und bestimmt deren relevante Spezifikationen. Die Prüfung bestehender Rezepturen sowie ein Interview mit einer fachkundigen Person am Lehrstuhl legen den Grundstein für infrage kommende Rohstoffe. Ein Großteil der individuellen Spezifikationen dieser Rohstoffe basiert auf Anfragen beim herstellenden Unternehmen der Formlinge, Desk Research bspw. in Ökobilanzdatenbanken oder eigenen Untersuchungen. Tabelle 6 zeigt alle verfügbaren Rohstoffe sowie deren Datenursprung auf. Sie weist auf eigene Berechnungen hin, deren methodischer Ablauf der Textabschnitt im Anschluss an die Tabelle detailliert. Für die Datensätze der Ökobilanzierung folgt die Darstellung einer festen Struktur, beginnend mit der Datenbankversion und dem Systemmodell. Die Modellierung nutzt Ecoinvent 3.10.1 im Cut-off-Ansatz. Dieser definiert rezyklierte Materialien beim Systemeingang als lastenfrei und weist die Umweltlasten der ursprünglichen Primärproduktion zu. Es schließen sich der geografische Bezug sowie die Bewertungsmethode an, wobei die Untersuchung durchgehend den Environmental Footprint 3.1 (EF 3.1) anwendet. Aufgrund fehlender Informationen hinsichtlich der Rohstoffherkunft ist meist eine globale Allokation gewählt. Bei den chemischen Zusammensetzungen sind jeweils die Bestandteile an CaO, MgO, SiO<sub>2</sub>, SiC und Eisen erfasst. Aus Lizenzgründen sind die Parameter der Rohstoffe nur für die chemische Zusammensetzung in Anhang D dargestellt.

Tabelle 6: Identifizierte Rohstoffe und ihr Datenursprung.

Rohstoff	Preis	Umweltwirkung (GWP/ADP)	Chem. Zusammensetzung
20 SiC-Rohstoffe	Jahresdurchschnittswerte	Eigene Berechnungen	Herstellendes Unternehmen
Zement	Herstellendes Unternehmen	Spezifische Ökobilanzierung des liefernden Unternehmens	Herstellendes Unternehmen
Zementsubstitution	Nicht betrachtet, da keine festen Aussagen über Einfluss auf die Festigkeit mgl.		
Eisenmangan (FeMn68)	Herstellendes Unternehmen	Ecoinvent 3.10.1 cut-off: market for ferromanganese, high-coal, 74.5% Mn; global; EF 3.1	Herstellendes Unternehmen
Quarzsand	Herstellendes Unternehmen	Ecoinvent 3.10.1 cut-off: market for silica sand; global; EF 3.1	Herstellendes Unternehmen
Kalkstein	Herstellendes Unternehmen	Ecoinvent 3.10.1 cut-off: market for limestone, crushed, washed; Rest of World (Global - Switzerland); EF 3.1	Herstellendes Unternehmen
Vier betrachtete Gießereistäube	Getroffene Annahmen	Wechselnde Werte, siehe 3.2.3	Projektinterne Analysen

Die ökologische Bewertung der 20 untersuchten SiC-Rohstoffe aus dem Acheson-Prozess, die einen SiC-Gehalt von 50 bis 96 % aufweisen, erfordert eine methodische Anpassung. Da Ökobilanzierungsdatenbanken ausschließlich Datensätze für hochreines Siliziumkarbid führen, fehlen valide Vergleichswerte für den vorliegenden Konzentrationsbereich. Zur Kompensation dieser Datenlücke erstellt das Projektteam des ForCycle-Projekts einen Berechnungsansatz in Excel mithilfe der Paper von Abolpour und Shamsoddini (2022) und Kumar und Gupta (2002) sowie Umweltwirkungen aus Ecoinvent. Dieses Verfahren approximiert die Wirkungsindikatoren GWP und ADP für die spezifischen Rohstoffqualitäten. Generell gilt, dass hochwertigeren SiC-Rohstoffen relativ zu ihrem SiC-Gehalt eine überproportionale Umweltwirkung zugeschrieben ist, obwohl die Funktionen rein optisch ziemlich linear wirken. Da erste Tests des Tools mit den Daten zeigen, wie sensitiv die Ergebnisse auf diese Werte reagieren, erfolgen zwei Anpassungen für die Sensitivitätsanalyse, siehe Anhang E. Bei der ersten Anpassung erfolgt eine absolute Adaption der Umweltwirkungen, während der grundlegende Verlauf der Funktion bestehen bleibt. In der zweiten, relativen Anpassung ist der Verlauf dieser Funktion geändert, sodass hochwertigeren SiC-Rohstoffen weniger überproportionale Umweltwirkungen zugeschrieben sind.

Die Erfassung und Bewertung der Stäube ist in Kapitel 3.2.3 ausgelagert, da diese umfassender ist.

### 3.2.3 Gießereistäube – Stoffstrommanagement und Datenerfassung

Kranert und Cord-Landwehr (2010) definieren Stoffstrommanagement als „das zielorientierte, verantwortliche, ganzheitliche und effiziente Beeinflussen von Stoffströmen oder Stoffsystemen, wobei die Zielvorgaben aus dem ökologischen und ökonomischen Bereich kommen, unter Berücksichtigung von sozialen Aspekten.“

Reduziert man dieses breite Gebiet auf den für diese Arbeit relevanten Bereich des Recyclings von Gießereistäuben in SiC-Formlingen und betrachtet den ökonomischen sowie ökologischen Bereich, ergeben sich folgende Erkenntnisse:

Näher betrachtet sind, wie in 2.1.4 dargestellt, Gießereistäube Abfälle, die zu deponieren sind und somit Kosten & Umweltauswirkungen verursachen. Es gibt Ausnahmen für spezifische Zusammensetzungen. Bei hohem ZnO-Anteil wird bspw. Zink mit dem Wälzprozess aus den Stäuben gewonnen, der ökonomisch und ökologisch vorteilhaft ist (Ruetten, 2006), was Opportunitätskosten durch Alternativnutzung generiert. Dem gegenüber stehen ggf. höhere Kosten im Handling zur SiC-Formlingsherstellung sowie mögliche Deltas bei den Transportkosten zwischen Deponie und herstellenden Unternehmen der SiC-Formlinge. Zudem hat die Substitution von (Primär-)Rohstoffen einen positiven Einfluss. Daraus ergibt sich für die Approximation sowohl der ökonomischen als auch ökologischen Einflüsse:

$$\begin{aligned} \text{Recyclingeffekt} = \\ \text{Deponierung} + \text{Substitution}_{\text{Rohstoffe}} - \text{Mehraufwand}_{\text{SiC-Formling}} \quad (3-1) \\ - \text{Opportunitätskosten}_{\text{Staub}} \pm \Delta \text{Transport} \end{aligned}$$

Im Fokus der Datenerfassung stehen vier spezifische Gießereistäube aus den Partnergießereien, die Stäube A, C, D und G. Hinsichtlich der Datenerhebung gelten für diese Materialien die Parameter wie im vorangegangenen Kapitel definiert. Basierend auf Tabelle 6 beruhen die angesetzten Preise, chemischen Zusammensetzungen sowie die ökologischen Bewertungen auf eigenen Analysen. Das Modell nutzt ökonomische und ökologische Gutschriften. Es weist den Stäuben hierzu negative Preise sowie Umweltwirkungen zu.

Die ökonomische Bewertung nimmt an, dass im Vergleich zur konventionellen Entsorgung keine zusätzlichen Kosten beim herstellenden Unternehmen der SiC-Formlinge oder Handlingkosten innerhalb der Gießereien entstehen. Da die Gießereien keine stoffscharfen Angaben zu Kosten und Zuordnung der einzelnen Stäube bereitstellen, definiert die Arbeit die eingesparten Entsorgungskosten sowie die ökologischen Gutschriften über drei Szenarien. Wie in Tabelle 7 dargestellt, unterscheiden sich die Szenarien hinsichtlich der Entsorgungsart, der Kostenannahmen und der verwendeten Datensätze. Aus Lizenzgründen sind keine spezifischen Werte aufgeführt.

Tabelle 7: Übersicht der definierten Entsorgungsszenarien für ökonomische und ökologische Bewertung.

Szenario	Beschreibung	Eingesparte Kosten (Annahmen)	Eingesparte Umweltwirkungen (Ecoinvent 3.10.1 cut-off)	Datengrundlage Transport
Variante 1 (Standard)	Deponierung in Übertagedeponie mit Zement	- 100 €/t	treatment of blast furnace dust, residual material landfill; global; EF 3.1	Ecoinvent 3.10.1 cut-off: transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5; Europe; EF 3.1 (Delta: 175 vs. 388 km nach Ökopol)
Variante 2	Bergversatz mit Kiesgutschrift	- 150 €/t	Eigener Nachbau mit aktuellen Daten nach Dehoust et al. (2007)	
Variante 3	Deponierung im Untertagebau ohne Zement	- 250 €/t	treatment of hazardous waste, underground deposit; DE; EF 3.1	

Vorliegende XRF-Analysen zeigen die materialtechnische Charakterisierung der Stäube. Da diese je nach Anfallstelle und Kalenderwoche variieren, erfolgt die Auswertung über ein angepasstes Python-Skript. Dieses liest die XRF-Daten aus Excel aus, aggregiert die verschiedenen Kalenderwochen und berechnet Durchschnittswerte, um die chemischen Zusammensetzungen der vier Stäube zu bestimmen, deren Ergebnisse in Anhang F dargestellt sind. Die Analyse zeigt, dass die Stäube eine komplexe Zusammensetzung aus 17 bis 28 Verbindungen aufweisen. Ein signifikantes Merkmal aller untersuchten Proben ist der hohe Gewichtsanteil von  $\text{SiO}_2$  im Bereich von [24,99; 93,35] Prozent, was in einer niedrigen Basizität im Bereich von [0; 0,4] resultiert. Dieser hohe  $\text{SiO}_2$ -Anteil ermöglicht bei der Verwertung die Einsparung von Quarzsand.

Ergänzende Untersuchungen, dargestellt in Anhang G, identifizieren für Staub A aus der Kupolofen-Abgasreinigung SiC-Gehalte im Bereich von [2,45; 5,15] Gewichtsprozent. Der Einsatz dieses Staubes substituiert somit zusätzlich primäre SiC-Rohstoffe. Die Analyse zeigt auch, dass in diesem Staub hohe Mengen an freiem Kohlenstoff verfügbar sind. Wie das Ergebnis dadurch beeinflusst ist, ist analog zum beschriebenen Vorgehen aus 3.2.1 im Ergebnisteil unter 4.8 thematisiert. Des Weiteren beobachtete das Forschungsprojekt eine potenzielle Festigkeitssteigerung, die eine Substitution von Zement ermöglicht. Dieser Aspekt ist in Kapitel 3.2.4 gesondert aufgegriffen.

Die beschriebenen stofflichen Eigenschaften und die daraus resultierenden vielfältigen Einsparpotenziale bei Quarzsand, SiC-Rohstoffen, Kohlenstoff und Zement begründen die Multisubstitutionalität des Gießereistaubs, die das entwickelte Tool zwingend abbilden muss.

### 3.2.4 Festigkeit der SiC-Formlinge

Die Festigkeit stellt analog zu 2.1.3 eine der Qualitätsanforderungen an den SiC-Formling dar. Die Untersuchung der Festigkeit basiert auf der Arbeitshypothese des Forschungsprojekts BMGR bzw. GiTe, dass Gießereistäube aufgrund ihrer spezifischen Zusammensetzung sowie der Partikelgrößenverteilung das Bindemittel Zement teilweise substituieren. Hierbei schreibt der Forschungsansatz den Stäuben potenzielle chemische sowie physikalische Wirkmechanismen zu, die eine Festigkeitssteigerung begünstigen.

Als Datengrundlage für die Modellierung dienen Festigkeitsanalysen von 26 verschiedenen Rezepturen im Labormaßstab, die aus der Bachelorarbeit von Schnurrenberger (2024) sowie ergänzenden Versuchen am Institut stammen. Für die Beurteilung der Festigkeit existieren keine festen, quantifizierten Werte, sondern qualitative Anforderungen: Die Formlinge müssen nach einer Stunde ihr Eigengewicht tragen und nach Aushärtung einen Falltest aus 1,5 m sowie einen Reibungstest gegeneinander ohne Beschädigung bestehen. Zur Quantifizierung dieser Kriterien gilt nach Rücksprache mit Fachkundigen am Lehrstuhl für die untersuchten Laborkörper eine Druckfestigkeit von 3 MPa als hinreichender Indikator für die Erfüllung der qualitativen Standards.

Eine manuelle Validierung der Rohdaten identifiziert zunächst Rezepturen mit Herstellungsfehlern und schließt diese aus der weiteren Betrachtung aus. Die Analyse der verbleibenden maximal 23 validen Versuchsreihen offenbart eine hohe Varianz in der Parameterkonstellation: Simultan variieren die Anteile von SiC, SiC-Staub, Quarzsand, Zement, die vier Gießereistäube, zwei Zementsubstitute, Hüttensand und schwarzer Hüttensand.

Die Analyse der Datenstruktur mittels Large Language Modellen und Interviews mit einer Fachkundigen aus dem Bereich des Deep- und Machine-Learnings einer anderen Fakultät verdeutlichen ein Problem: Die geringe Stichprobengröße bei gleichzeitig hoher Varianz der Einflussgrößen verhindert eine statistisch belastbare Nebenbedingung.

Hinsichtlich des limitierten Rahmens dieser Arbeit verzichtet die Arbeit daher auf eine komplexe mathematische Herleitung und Integration der Festigkeit ins Modell. Stattdessen erfolgt die Festlegung pragmatisch auf Basis industrieller Erfahrungswerte: In Abstimmung mit dem herstellenden Unternehmen ist der Zementgehalt für die Analyse auf konstant 14 Masseprozent fixiert. Laut Einschätzung einer fachkundigen Person gewährleistet dieser Anteil in der großtechnischen Produktion die Einhaltung sämtlicher Festigkeitskriterien unabhängig von der weiteren stofflichen Zusammensetzung.

### 3.2.5 Berechnung des aggregierten Ökologie-Scores

Wie in Kapitel 2.2 dargelegt, führen unterschiedliche Einheiten der Wirkungskategorien zu einer Unvergleichbarkeit, die eine direkte Gegenüberstellung verhindert. Zur Auflösung dieser Diskrepanz und zur Bildung einer vergleichbaren Entscheidungsgrundlage greift das Modell auf die Methodik des PEF in der Version EF 3.1 zurück.

Im ersten Schritt erfolgt die Normalisierung der ermittelten Emissionswerte aus 3.2.2. Hierbei dient beim PEF der globale Jahreskopfverbrauch als Referenzgröße (European Commission, 2022a), um die spezifischen Umweltauswirkungen des Recyclingprozesses in Relation zur durchschnittlichen Umweltbelastung einer Person zu setzen.

Für die anschließende Gewichtung bedarf es einer methodischen Anpassung der Standardwerte. Da der PEF-Standard insgesamt 16 Wirkungskategorien definiert, das vorliegende Modell jedoch spezifisch die zwei Kategorien GWP und ADP (elements) fokussiert, ist eine direkte Übernahme der Gewichtungsfaktoren nicht zielführend. Die Summe der ursprünglichen Faktoren würde deutlich unter 100 Prozent liegen, was die Aussagekraft des aggregierten Scores verfälscht. Das Modell skaliert die Werte daher proportional. Ein Dreisatz adjustiert die initialen Gewichtungsfaktoren für GWP und ADP so, dass ihre Summe 100 Prozent ergibt. Tabelle 8 fasst die verwendeten NF sowie die Überleitung von den initialen zu den im Modell implementierten Gewichtungsfaktoren zusammen.

Tabelle 8: Verwendete Normalisierungs- und Gewichtungsfaktoren.

Wirkungskategorie	Einheit	Normalisierungsfaktor (NF)	Gewichtungsfaktor (PEF-Wert)	Adjustierter Gewichtungsfaktor
Treibhauspotenzial (GWP)	kg CO <sub>2</sub> -eq / Person	7,55E+03	0,2106	0,7361
Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP elements)	kg Sb-eq / Person	6,36E-02	0,0755	0,2638

Die NF sowie Gewichtungsfaktoren sind dem von der EU bereitgestellten EF reference package 3.1 entnommen (European Commission, 2022b), deren NF von Sala et al. (2017) stammen.

Auf Basis dieser Parameter berechnet das Tool den aggregierten Ökologie-Score, kurz Ökoscore. Dieser ergibt sich additiv aus den Produkten des jeweiligen normalisierten Indikatorwerts und dem zugehörigen adjustierten Gewichtungsfaktor. Durch diese Vorgehensweise stellt das Modell sicher, dass die ökologische Bewertung trotz der Reduktion auf zwei Kernindikatoren methodisch konsistent bleibt und die relative Bedeutung von Treibhausgaspotenzial und Ressourcenverbrauch im Kontext der EF 3.1-Methodik korrekt widerspiegelt.

### 3.3 Mathematische Formulierung des Optimierungsmodells

Das entwickelte Entscheidungstool basiert auf einem mathematischen Modell, das die realen Gegebenheiten der SiC-Formling-Herstellung abstrahiert. Wie in Kapitel 2.3 hergeleitet, ist ein LP aufgestellt, das aufgrund des Zielkonflikts zwischen Ökonomie und Ökologie als Multi-Objective Decision Making Problem klassifiziert ist.

Die folgenden Abschnitte definieren formal die Indizes, Parameter, Entscheidungsvariablen sowie die Zielfunktionen und Nebenbedingungen.

#### 3.3.1 Indizes und Mengen

Das Modell betrachtet eine definierte Menge an potenziellen Einsatzstoffen sowie deren chemische und physikalische Eigenschaften.

$I$ : Menge der Rohstoffe mit dem Index  $i = 1, \dots, n$ .

$I_{Staub} \subset I$ : Teilmenge der zu recycelnden Gießereistäube.

$J$ : Menge der qualitätsrelevanten chemischen Komponenten (z. B. SiC).

$K$ : Menge der Zielkategorien, definiert als  $K = \{\text{ökonomisch}, \text{ökologisch}\}$ .

#### 3.3.2 Parameter

Die Parameter repräsentieren die exogenen Daten, die dem Modell als Input übergeben werden. Diese lassen sich in ökonomisch-ökologische Faktoren und technisch-physikalische Restriktionen unterteilen.

##### Ökonomische und ökologische Parameter

$c_i$ : Kosten des Rohstoffs  $i$  in [€/kg].

$e_i$ : Spezifische Umweltwirkung des Rohstoffs  $i$ . Dieser Wert stellt eine bereits aggregierte Kennzahl dar, siehe 3.2.5 Berechnung des aggregierten Ökologie-Scores.

##### Physikalische und chemische Parameter

$a_{ij}$ : Massenanteil der chemischen Komponente  $j \in J$  im Rohstoff  $i \in I$  (z. B. SiC-Gehalt).

$Avail_i$ : Binärer Verfügbarkeitsparameter, wobei gilt:

$Avail_i = 1$ : Der Rohstoff ist aktuell verfügbar.

$Avail_i = 0$ : Der Rohstoff ist nicht verfügbar und kann nicht genutzt werden.

$M_{Gesamt}$ : Die fixierte Gesamtmasse einer Charge, definiert als 962 kg.

##### Restriktionsparameter

$LB_j, UB_j$ : Unter- (*Lower Bound*) und Obergrenze (*Upper Bound*) für den Anteil der Komponente  $j \in J$  in der Gesamtmischung, wobei:

$LB_{Bas}, UB_{Bas}$ : Unter- und Obergrenze für die Basizität der Mischung.

$LB_{Staub}, UB_{Staub}$ : Grenzen für den Staubeinsatz.

$LB_{Zement}, UB_{Zement}$ : Grenzen für den Bindemittelanteil (Zement).

### MCDM-spezifische Parameter

$\omega_k$ : Gewichtungsfaktor für die Zielkategorie  $k \in K$ , festgelegt durch Entscheidungstragende.

$\rho$ : Augmentierungsfaktor für die Tschebyscheff-Funktion, gesetzt auf einen hinreichend kleinen Wert (z. B. 0,0001), um die Auswahl schwach Pareto-optimaler Lösungen zu vermeiden.

#### 3.3.3 Entscheidungsvariablen

Die zentralen Entscheidungsvariablen des Modells bestimmen die stoffliche Zusammensetzung der Rezeptur. Zusätzlich wird eine Hilfsvariable für den Lösungsalgorithmus eingeführt.

$x_i$ : Die einzusetzende Masse des Rohstoffs  $i \in I$  in [kg], wobei  $x_i \geq 0$  (Nichtnegativitätsbedingung) gilt.

$\lambda$ : Kontinuierliche Hilfsvariable, die in der Min-Max-Formulierung die maximale gewichtete Abweichung vom Utopie-Punkt repräsentiert.

#### 3.3.4 Zielfunktionen und Normalisierung

Das Optimierungsproblem verfolgt zwei Hauptziele: die Minimierung der Kosten ( $f_{\text{ökonomisch}}$ ) und die Minimierung der Umweltlast ( $f_{\text{ökologisch}}$ ).

$$f_{\text{ökonomisch}}(x) = \sum_{i \in I} c_i \cdot x_i \quad (3-2)$$

$$f_{\text{ökologisch}}(x) = \sum_{i \in I} e_i \cdot x_i \quad (3-3)$$

Die unterschiedlichen Einheiten (€ vs. Umweltpunkte) und Größenordnungen verhindern eine direkte Aggregation. Daher normalisiert das Modell die Werte. Um die dafür notwendigen Referenzpunkte – den Utopie-Punkt ( $z^U$ ) und den Nadir-Punkt ( $z^N$ ) – zu bestimmen, ist ein leicht vereinfachtes Verfahren angewendet.

Hierbei optimiert das Modell zunächst jede Zielfunktion einzeln. Im ersten Schritt erfolgt die Bestimmung der ökonomischen Grenzen über das Minimieren von  $f_{\text{ökonomisch}}$ , das den Bestwert  $z_{\text{ökonomisch}}^U$  liefert. Die dabei entstehende Umweltwirkung definiert den schlechtesten akzeptierten Wert  $z_{\text{ökologisch}}^N$ .

Im zweiten Schritt erfolgt die Bestimmung der ökonomischen Grenzen über das Minimieren von  $f_{\text{ökologisch}}$ , das den Bestwert  $z_{\text{ökologisch}}^U$  liefert. Die resultierenden Kosten definieren  $z_{\text{ökonomisch}}^N$ .

Die Arbeit berechnet die normalisierte Funktion  $\bar{f}_k(x)$  nach Formel (2-8):

$$\bar{f}_k(x) = \frac{f_k(x) - z_k^U}{z_k^N - z_k^U} \quad \forall k \in K \quad (3-4)$$

Die Augmented Weighted Tchebycheff Methode bildet im dritten Schritt die Optimierungsmethode zur Adressierung des Zielkonflikts von ökonomisch und ökologisch.

Das finale Optimierungsmodell lautet:

$$\min \quad \lambda + \rho \sum_{k \in K} \bar{f}_k(x) \quad (3-5)$$

Unter der Nebenbedingung:

$$\omega_k \cdot \bar{f}_k(x) \leq \lambda \quad \forall k \in K \quad (3-6)$$

Der Augmentation-Term der Tchebycheff-Skalarisierung verwendet eine ungewichtete Summe der normalisierten Zielfunktionen. Diese Modifikation regularisiert das Modell und stellt sicher, dass es stets streng Pareto-effiziente Lösungen identifiziert. Dies gilt insbesondere für extreme Gewichtungen von 0 oder 1. Dort fungiert der Term bei Indifferenz des Hauptterms als neutrale Entscheidungseinheit. Aufgrund des hinreichend kleinen Faktors  $\rho$  bleibt der Einfluss auf die globale Präferenzordnung vernachlässigbar, während die Robustheit der Lösungsfindung auf flachen Abschnitten der Pareto-Front steigt.

### 3.3.5 Nebenbedingungen

Der zulässige Lösungsraum ist durch technologische Restriktionen begrenzt, die sicherstellen, dass die resultierenden SiC-Formlinge die Qualitätsanforderungen der Gießerei erfüllen.

#### **Massenbilanz und Verfügbarkeit**

Die Summe aller Einzelkomponenten muss exakt der vorgegebenen Chargengröße entsprechen. Zudem darf ein Rohstoff nur verwendet sein, wenn er als verfügbar gekennzeichnet ist.

$$\sum_{i \in I} x_i = M_{Gesamt} \quad (3-7)$$

$$x_i \leq M_{Gesamt} \cdot Avail_i \quad \forall i \in I \quad (3-8)$$

#### **Chemische Zusammensetzung**

##### Mindest- und Höchstgehalte

Für kritische Bestandteile wie z. B. SiC oder FeMn68 sind gewisse Gehalte einzuhalten.

Diese prozentualen Anforderungen sind linearisiert über die Gesamtmasse dargestellt:

$$\sum_{i \in I} a_{ij} \cdot x_i \geq LB_j \cdot M_{Gesamt} \quad \forall j \in J \quad (3-9)$$

$$\sum_{i \in I} a_{ij} \cdot x_i \leq UB_j \cdot M_{Gesamt} \quad \forall j \in J \quad (3-10)$$

### Basizität

Da die Basizität  $B = \frac{CaO+MgO}{SiO_2}$  nichtlinear ist, ist diese in lineare Ungleichungen umgeformt:

$$\sum_{i \in I} (a_{i,CaO} + a_{i,MgO}) \cdot x_i - LB_{Bas} \cdot \sum_{i \in I} a_{i,SiO_2} \cdot x_i \geq 0 \quad (3-11)$$

$$\sum_{i \in I} (a_{i,CaO} + a_{i,MgO}) \cdot x_i - UB_{Bas} \cdot \sum_{i \in I} a_{i,SiO_2} \cdot x_i \leq 0 \quad (3-12)$$

### Spezifische Mengenrestriktionen

Um die Verwertung der Stäube bei Bedarf einzuschränken und die Bindung der Briketts sicherzustellen, gelten explizite Grenzen für Zement und die Summe der Gießereistäube:

$$LB_{Zement} \leq x_{Zement} \leq UB_{Zement} \quad (3-13)$$

$$LB_{Staub} \leq \sum_{i \in I_{Staub}} x_i \leq UB_{Staub} \quad (3-14)$$

## **3.4 Konzeptionelle Umsetzung in Excel**

### *3.4.1 Begründung der Wahl der Plattform*

Die Arbeit wählt Microsoft Excel in der Version 2510 als Basisplattform, da dies den Rahmenbedingungen und Anforderungen der Partnergießereien entspricht. Da die Anwendenden mit dieser Software vertraut sind, sinken die Einstiegshürden, was die Akzeptanz im betrieblichen Alltag erhöht. Excel-Standardfunktionen decken die Komplexität des Optimierungsproblems nicht vollständig ab. Daher kommen VBA (Visual Basic for Applications) und das Solver-Add-In zum Einsatz.

Das Excel Solver-Add-In bildet das zentrale Element der Problemlösung und nutzt den Simplex-Algorithmus zur Berechnung des mathematischen Modells aus Kapitel 3.3. Um die Lücke zwischen der reinen Berechnung und einer nutzerfreundlichen Anwendung zu schließen, dient VBA als Skriptsprache. Sie ermöglicht die Steuerung der Benutzeroberfläche (UI), automatisiert den Optimierungsprozess und reduziert durch geführte Abläufe die Fehleranfälligkeit im Vergleich zu einer manuellen Bedienung.

### *3.4.2 Architektur und Aufbau*

Die Systemarchitektur des Tools folgt einem modularen Ansatz, der eine klare Trennung zwischen UI, Datenhaltung und der Verarbeitungslogik vorsieht. Diese Struktur gewährleistet Wartbarkeit und Datensicherheit. Um die Integrität der Anwendung zu schützen, operiert das Tool mit verschiedenen Arbeitsblättern, von denen jene, die reine Berechnungslogiken oder Stammdaten enthalten, für die Anwendenden ausgeblendet sind. Ein Passwortschutz verhindert unabsichtliche Änderungen an kritischen Formeln oder der Struktur. Da das Tool

primär als Einzelplatzlösung konzipiert ist, liegt der Fokus der Datensicherheit auf der Vermeidung von Eingabefehlern und der Prozessstabilität.

Die Interaktion mit den Nutzenden erfolgt über VBA-gestützte UserForms. Diese grafischen Schnittstellen leiten die anwendende Person visuell durch den Prozess und abstrahieren die Komplexität der dahinterliegenden Tabellenblätter. Ein wesentlicher Aspekt dieser Formulare ist die Validierung der Eingabedaten. Da es sich teilweise um manuelle Eingabeprozesse handelt, stellen implementierte Restriktionen sicher, dass beispielsweise Gehaltswerte nur im logisch zulässigen Bereich zwischen 0 und 1 liegen oder ein Minimum nicht über dem Maximum liegt. Ergänzend unterstützen z. B. klare visuell erscheinende Benennungshinweise in Tabellenzellen die korrekte Datenerfassung.

Im Hintergrund agieren VBA-Module als Steuerungseinheit. Der Code übernimmt die Aufgabe, die Eingabedaten an die korrekten Stellen im Modell zu übertragen, den Prozess der MCDM zu initiieren und den Excel Solver zu steuern. Dies bedeutet, dass VBA die Parameter der Zielfunktion und der Nebenbedingungen setzt, den Solver zur Berechnung startet und die Ergebnisse extrahiert und speichert. Das Tool visualisiert die Berechnungsergebnisse in einem Dashboard. Die visuelle Aufbereitung orientiert sich an den Grundsätzen der International Business Communication Standards (IBCS), um eine klare Darstellung zu gewährleisten. Das Dashboard fokussiert sich auf zwei zentrale Ergebnistabellen der Rezepturen sowie Balkendiagramme, die einen direkten Vergleich der Szenarien – Produktion mit und ohne Nutzung von Gießereistäuben – ermöglichen. Der Prozess und die UI sind in Kapitel 4 aufgezeigt. Abbildung 14 visualisiert die Architektur und den Datenfluss innerhalb des Tools.

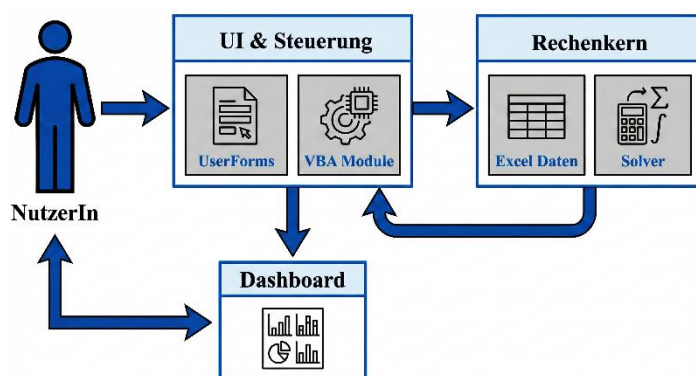


Abbildung 14: Darstellung des Zusammenspiels von anwendender Person und Excel.

Quelle: Eigene Darstellung mit Gemini 3 Pro Image

### 3.5 Vorgehen in der Entwicklung

Die Entwicklung des Tools folgt einem agilen, iterativen Vorgehensmodell statt eines starren linearen Ablaufs. Dieser Ansatz ermöglicht es, flexibel auf neue Erkenntnisse während der Implementierung und auf Rückmeldungen aus der Praxis zu reagieren. Large Language Modelle von Google (Gemini 2.5 Pro und Gemini 3 Pro) dienen als Hilfsmittel für die Codegenerierung und die Strukturierung der Methodik.

Zu Beginn des Prozesses steht die Definition des MVPs. Der Umfang dieses ersten funktionsfähigen Prototyps leitet sich, in enger Abstimmung mit der wissenschaftlichen Betreuung am Lehrstuhl, aus dem Anforderungskatalog aus 3.1.2 ab. Die Validierung erfolgt in dieser frühen Phase durch regelmäßige Feedbackschleifen mit der Betreuung am Lehrstuhl. Diese internen Reviews dienen der Verfeinerung der Funktionen bis zur Freigabe für eine externe Begutachtung.

Im weiteren Verlauf bindet der Entwicklungsprozess externe Fachexpertise ein. Hierzu zählen Projektbeteiligte wie das bifa Umweltinstitut sowie die kooperierenden Gießereien. Trotz terminlicher Herausforderungen liefert diese Phase essenzielle Impulse. In Vorstellungsrunden und Feedback-Sessions bestätigen die Partnerunternehmen die Ausrichtung des Tools und fordern Anpassungen zur Steigerung der Praxistauglichkeit. Eine signifikante Erkenntnis aus der realen Anwendung ist die Notwendigkeit, statt ursprünglich drei SiC-Rohstoffe aus den Laborversuchen mindestens 20 verschiedene SiC-Rohstoffe verarbeiten zu können.

Diese neuen Anforderungen und die Erweiterung des MVPs führen zu iterativen Weiterentwicklungszyklen. Zentrale Meilensteine bilden der „Proof of Concept“ sowie der anschließende Aufbau der UserForms. Der „Proof of Concept“ bestätigt die Realisierbarkeit der Ergebnisse. Technisch erfordert die Skalierung auf mehr Rohstoffe eine Stabilisierung des Codes durch variable Bereichsdefinitionen. Eine entscheidende Änderung in der mathematischen Modellierung war die Umstellung der Berechnungsmethode. Die Arbeit linearisiert das Modell, da der ursprüngliche GRG-Nichtlinear-Algorithmus keine zuverlässigen globalen Optima liefert. Dies ermöglicht den Wechsel zum robusten Simplex-Algorithmus. Parallel kommt statt der Aggregationsmethode WSM die WMMM zum Einsatz, um mathematisch fundiertere und akzeptiertere Ergebnisse zu erzielen, siehe 2.3.3.3. Den Abschluss der Entwicklung bildet die Finalisierung des Ergebnisdashboards. Abbildung 15 verdeutlicht den iterativen Charakter des Entwicklungsprozesses.

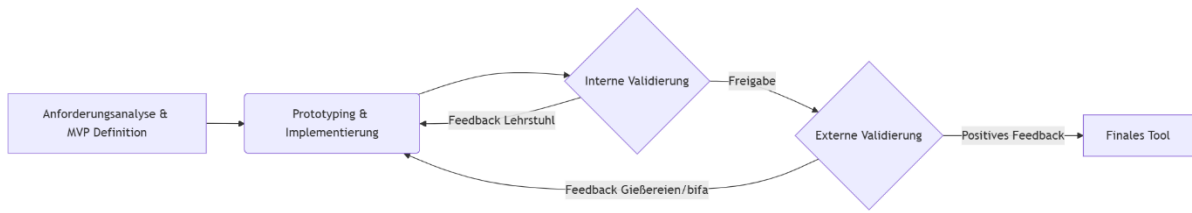


Abbildung 15: Darstellung des Entwicklungsprozesses.

Quelle: Eigene Darstellung mit [www.mermaid.live](http://www.mermaid.live)

## 4 Anwendung und Validierung des Tools

Dieses Kapitel stellt das entwickelte Optimierungstool vor und erläutert dessen Anwendung. Daran anknüpfend analysiert die Arbeit die Berechnungsergebnisse für verschiedene Spezifikationen von SiC-Formlingen. Ein besonderer Fokus liegt auf der Sensitivitätsanalyse bezüglich der in der Datenbank hinterlegten Preise und Umweltwirkungen der Rohstoffe.

Ein definierter Referenzfall bildet die Grundlage der Untersuchung. Durch die isolierte Variation der Basizität sowie der Anteile von SiC und Mangan (Mn) im Referenzfall zeigt die Auswertung auf, wie sich diese Parameter auf den Ökoscore und die Kostenstruktur auswirken. Darüber hinaus untersucht das Kapitel, inwiefern sich die Ergebnisse verändern, wenn das Modell den Einsatz auf einzelne Stäube beschränkt, anstatt eine Mischung aller Stäube zuzulassen.

Ergänzend vergleicht die Arbeit verschiedene Szenarien anhand des Referenzfalls. Dies umfasst zunächst die zwei alternativen Berechnungsmethoden für die Umweltwirkungen der SiC-Rohstoffe aus 3.2.2. Anschließend folgt die Gegenüberstellung der relevanten Entsorgungs- bzw. Verwertungswege, namentlich der Obertagedeponierung, der Untertagedeponierung und des Bergversatzes. Abschließend berücksichtigt die Arbeit ausgewählte Spezialfälle.

In Tabelle 9 sind die fiktiven Spezifikationen aufgeführt, mit denen das Tool die grundlegenden Ergebnisse für die Vergleiche berechnet hat.

Tabelle 9: Mit dem Tool getestete fiktive Spezifikationen für SiC-Formlinge.

Benennung	Basizität	SiC-Gehalt	FeMn68-Gehalt	Zement-Gehalt
HighSiC_HighBa_NoMn	0,90	0,70	0,000	0,14
HighSiC_MidBa_NoMn	0,81	0,70	0,000	0,14
HighSiC_LowBa_NoMn	0,70	0,70	0,000	0,14
MidSiC_HighBa_NoMn	0,90	0,58	0,000	0,14
MidSiC_HighBa_WithMn	0,90	0,58	0,135	0,14
MidSiC_MidBa_NoMn	0,81	0,58	0,000	0,14
MidSiC_MidBa_WithMn	0,81	0,58	0,135	0,14
MidSiC_LowBa_NoMn	0,70	0,58	0,000	0,14
MidSiC_LowBa_WithMn	0,70	0,58	0,135	0,14
LowSiC_HighBa_NoMn	0,90	0,50	0,000	0,14
LowSiC_HighBa_WithMn	0,90	0,50	0,135	0,14
LowSiC_MidBa_NoMn	0,81	0,50	0,000	0,14
LowSiC_MidBa_WithMn	0,81	0,50	0,135	0,14
LowSiC_LowBa_NoMn	0,70	0,50	0,000	0,14
LowSiC_LowBa_WithMn	0,70	0,50	0,135	0,14

Erster Hinweis: Die Achsen der Grafiken sind verändert, starten also nicht im Nullpunkt. Anderenfalls wären aufgrund geringer Abweichung keine Unterschiede erkennbar.

Zweiter Hinweis: Der Ökoscore stellt den Jahreskopfverbrauch dar, siehe 3.2.5. Ein höherer Ökoscore ist somit negativ und entspricht höheren Umweltwirkungen.

Dritter Hinweis: Die ab Kapitel 4.2 dargelegten Ergebnisse sind eng an die verwendeten Rohstoffparameter gebunden. Da Faktoren wie Marktpreise, chemische Zusammensetzungen oder Entsorgungswege variieren, beeinflussen sie unmittelbar die Resultate des MCDA-Modells. Gießereien müssen die abgeleiteten Erkenntnisse stets vor dem Hintergrund ihrer spezifischen Rahmenbedingungen validieren.

## 4.1 Vorstellung des Optimierungstools

### 4.1.1 Der Aufbau des Tools

Das Tool gliedert sich in verschiedene Blätter für die Bedienung, Berechnung sowie Datenhaltung und -speicherung, siehe Tabelle 10. Obwohl die Blätter „Fiktive Spezifika“ sowie „Batching 1“ und „Batching 2“ keine explizite Anforderung darstellen, ermöglichen sie die übergeordnete Analyse.

Tabelle 10: Blätter des Excel-Tools und ihre Funktion.

Blattname	Funktion
Welcome Page	Erklärungen rund um das Tool, eine Art Anleitung.
UI	Die Benutzeroberfläche, über die sämtliche Parameter einzustellen sind und VBA für einen Lauf auszulösen ist. In 4.1.2 detailliert dargestellt.
Datenbank	Excel Tabelle mit allen gesammelten Daten und Datenquellen aus 3.2.
LCA-Score-Aggregation	Ausgeblendetes Blatt, das die Normalisierungs- und Gewichtungsfaktoren für den Ökoscore enthält.
Rechner	Ausgeblendetes Blatt, mit benannten Zellen, Bereichen, Formeln usw., auf dessen Basis der Solver die Berechnungen durchführt.
Ergebnis	Ausgeblendetes Blatt. Hier speichert der VBA-Code die Ergebnisse manueller Läufe aus dem „UI“-Blatt und die graphische Darstellung auf dem „UI“-Blatt referenziert darauf.
Fiktive Spezifika	Ausgeblendetes Blatt. Nicht für den Endanwendenden gedacht, sondern für das Abarbeiten einer ganzen Reihe an Spezifikationen im Rahmen dieser Arbeit, um die Analysen von Kapitel 4.2 bis 4.7 zu ermöglichen.
Batching 1 & 2	Ausgeblendetes Blatt. Abspeichern der Ergebnisse (Kosten, Ökoscore, Rezepturen) aus „Fiktive Spezifika“.

### 4.1.2 Der User-Workflow

Der Prozess startet auf der Benutzeroberfläche, also dem Blatt „UI“. Die Schaltfläche „Neue Optimierung starten“ löst den VBA-Code aus. Zunächst ruft der Code eine UserForm auf, die die Korrektheit der hinterlegten Daten prüft. Zwei Schaltflächen ermöglichen die Wahl zwischen der manuellen Datenbankpflege und der Datenbestätigung. Sind die Daten korrekt, erscheint die nächste UserForm mit der Abfrage der nötigen Abbildungen.

Abbildung 16 zeigt diese UserForm, die die wichtigen Parameter wie die Basizität sowie den SiC- sowie Zementgehalt für das mathematische Modell bereitstellt. Bis auf die Werte Basizität, SiC- und FeMn68-Gehalt sind alle Nebenbedingungen deaktivierbar. Mit

Bestätigung über die Schaltfläche „Werte übernehmen“ speichert VBA die Werte im Blatt „Rechner“.

Komponente	Aktiv?	Min	Max
Basizitaet	Ja (fix)	0,81	0,81
SIC	Ja (fix)	0,58	0,58
FeMn68	Ja (fix)	0	0
Gesamtanteil an Binder	Ja	0,14	0,14
Zement	Ja	0,14	0,14
Hüttensand	Nein	0	0
Schwarzer Hüttensand	Nein	0	0
Quarzsand	Nein	0	0
Kalkstein	Nein	0	0

Abbildung 16: UserForm für die Abfrage der Nebenbedingungen.

Daraufhin folgt die nächste UserForm aus Abbildung 17, die die gewählte Gewichtung aus dem Slider im „Rechner“-Blatt einspeichert. Durch Auslösen der Schaltfläche „Werte übernehmen“ erscheint eine letzte UserForm, um zu prüfen, ob alle Nebenbedingungen und die Gewichtung korrekt eingelesen sind. Mit Bestätigung dieser löst der VBA-Code die Berechnung im Excel Solver aus und liefert die optimalen Werte sowie dazugehörigen Rezepturen im Dashboard des Blatts „UI“.

Abbildung 17: UserForm für die Abfrage der Gewichtung.

Abbildung 18 und Abbildung 19 zeigen die zwei Säulendiagramme, aus denen das Dashboard hauptsächlich besteht. Ergänzend dazu stellt das Dashboard die Rezeptur mit konkreten Mengenangaben sowie den spezifischen Impacts der einzelnen Rohstoffe auf das Ergebnis in Tabellen dar, siehe Abbildung 20. Es erfolgt eine bedingte Formatierung, um direkt optisch darzustellen, welche Rohstoffe besonders stark zum Endergebnis beitragen.

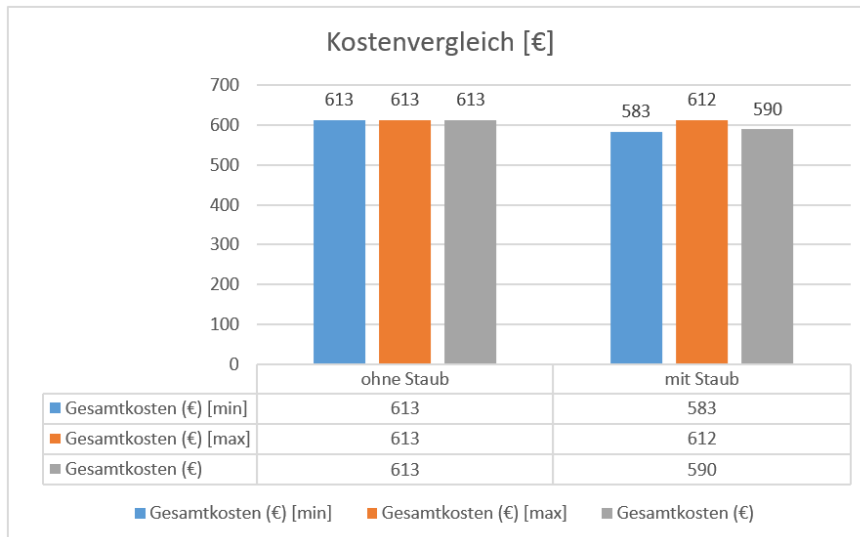


Abbildung 18: Grafik im Dashboard für die Darstellung des Kostenvergleich.

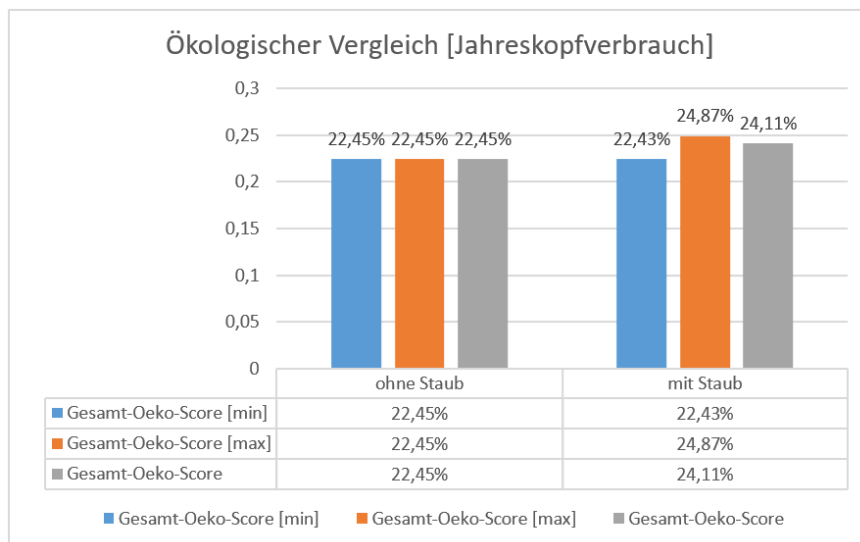


Abbildung 19: Grafik im Dashboard für die Darstellung des Ökoscores.

Mit Staub						
Bestandteil	Menge [kg]	Kosten [€]	Gewichtete Umweltauswirkung / Jahreskopfverbrauch	CO2 eq / Jahreskopfverbrauch	Sb eq / Jahreskopfverbrauch	
SIC 6	438,65	385	15,83%	21,08%	1,21%	
SIC 15	202,35	184	7,69%	10,23%	0,60%	
SIC 37	18,33	16	0,66%	0,88%	0,05%	
Zement	134,68	22	0,70%	0,93%	0,03%	
Giessereistaub A	167,99	-17	-0,77%	-0,89%	-0,44%	
<b>Summe</b>	<b>962,00</b>	<b>590</b>	<b>24,11%</b>	<b>32,23%</b>	<b>1,44%</b>	

Abbildung 20: Tabelle im Dashboard für die Darstellung der Rezeptur mit Staub.

## 4.2 Der Referenzfall

Dieses Kapitel analysiert die Modellergebnisse anhand des Referenzfalls. Die Analyse betrachtet ökonomische und ökologische Auswirkungen des Staubeinsatzes sowie die resultierenden Stoffströme. Die Basis bildet eine Kriterienkonfiguration, die reale Anforderungen des Projektgeschäfts abbildet. Tabelle 11 fasst diese Spezifikation zusammen.

Tabelle 11: Spezifikation des Referenzfalls.

Parameter	Werte	Begründung
SiC-Gehalt	Gewählt: 0,50; 0,58; 0,70 Wertebereich: [0,5;0,7]	Es treten alle Varianten im Wertebereich auf, keine Kenntnis über Anteile an der Produktion. Abbildung daher über alles gemittelt für Überblick über den Gesamteinfluss.
Basizität	Gewählt: 0,81 Wertebereich: [0,7;0,9]	SiC-Rohstoffe werden nur quartalsweise auf SiO <sub>2</sub> Gehalte untersucht und daher die Basizität auf einen mittleren Wert eingestellt.
FeMn68-Gehalt	Gewählt: 0 Werte: 0 & 0,135	Nutzen nur vereinzelt Gießereien.
Szenarien	1. Entsorgungs-/Verwertungsweg Gewählt: Obertagedeponierung Werte: Obertage, Untertage, Bergversatz 2. SiC-Emissionswerte Gewählt: Basis Werte: Basis, absolute Anpassung, relative Anpassung	1. Annahmen, da keine Antwort der Gießereien 2. Siehe Kapitel 3.2.2
Staubverfügbarkeit	Gewählt: Alle Stäube Werte: Alle Stäube, Nur Staub A, Nur Staub C, Nur Staub D, Nur Staub G	Variabilität für das Tool, damit es frei aus allen auswählen kann. Ist ein Staub superior, verwendet das Tool ohnehin nur einen Staub.

### Ökonomische und ökologische Auswirkungen

Die Zielgrößen Kosten und Ökoscore differieren je nach Staubeinsatz. Abbildung 21 illustriert diese Zusammenhänge. Ohne die Nutzung von Gießereistäuben bleiben die Kosten unabhängig von der Gewichtung konstant bei ca. 627 €, während der Ökoscore bei etwa 23,62 % des Jahresverbrauchs einer Person liegt.

Der Einsatz von Gießereistäuben senkt die Kosten gewichtungsabhängig auf 600 € bis 625 € und ist demnach immer günstiger als ohne Staub. Bei einer rein ökonomischen Optimierung (Gewichtung 0) erzielt der Staubeinsatz die maximale absolute Einsparung von 27 €, was einer Kostenreduktion von 4,3 % im Vergleich zu ohne Staub entspricht. Der ökonomische

Vorteil steigert jedoch die ökologischen Auswirkungen: Der Ökoscore steigt von 23,62 % auf 25,69 %, was einer Steigerung von 8,8 % entspricht. Bei dieser Gewichtung steigt der Ökoscore und damit die Umweltwirkungen überproportional zu den ökonomischen Einsparungen an.

Mit steigender ökologischer Gewichtung sinken die Umweltwirkungen ebenfalls konvex, insbesondere im Gewichtungsbereich zwischen 0 und 0,2. Danach ist die Funktion linear abnehmend. Der Break-Even-Punkt liegt bei einer Gewichtung von circa 0,96. Ab diesem Schwellenwert übertrifft die Rezeptur mit Staub die Referenz ohne Staub in beiden Zieldimensionen. Es ist somit möglich, bei hoher ökologischer Priorisierung sowohl die Kosten als auch die Umweltwirkungen simultan zu senken. Bei einer rein ökologischen Optimierung (Gewichtung 1) belaufen sich diese Vorteile auf eine Kostensenkung von 2 € (- 0,32 %) und eine Verbesserung des Ökoscores um 0,11 Prozentpunkte (- 0,47 %).

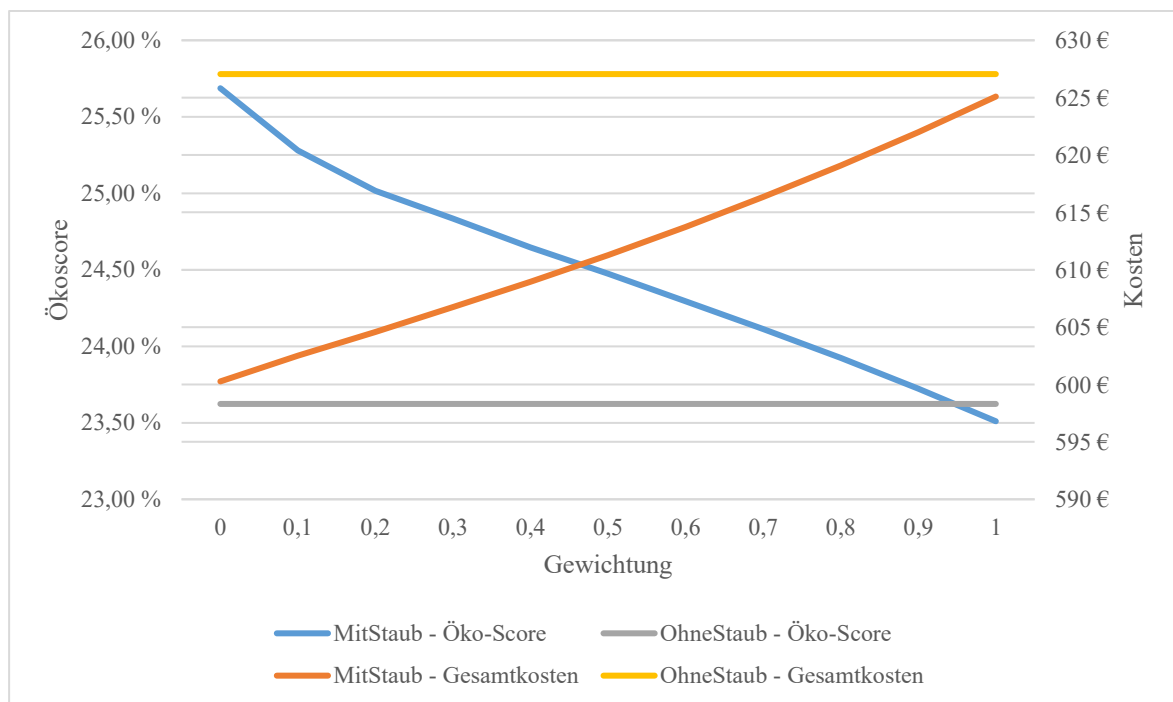


Abbildung 21: Ökonomisch und ökologische Auswirkungen des Referenzfalls.

### Analyse der Trade-Offs

Die Trade-Off-Analyse in Abbildung 22 verdeutlicht das Verhältnis zwischen Kosten und ökologischem Nutzen. Bei ökonomischer Priorisierung verläuft die Kurve konvex, was einen abnehmenden Grenznutzen signalisiert. Während generell höhere Kosten mit einem niedrigeren (besseren) Ökoscore korrelieren, ist die Steigung nicht konstant. Im unteren Gewichtungsbereich führt ein moderater Mitteleinsatz zu einer stärkeren Verbesserung des Ökoscores. So sinkt der Score im Intervall von 0 auf 0,2 um 0,68 Prozentpunkte bei Kosten

von 4,32 €. Im Bereich 0,8 bis 1 flacht die Kurve ab: Eine weitere Verbesserung um 0,41 Prozentpunkte erfordert hier einen höheren Mitteleinsatz von 6,01 €. Jeder zusätzlich investierte Euro bewirkt in der oberen Hälfte der Priorisierung mit Fokus auf Ökologie folglich eine geringere ökologische Entlastung als zu Beginn.

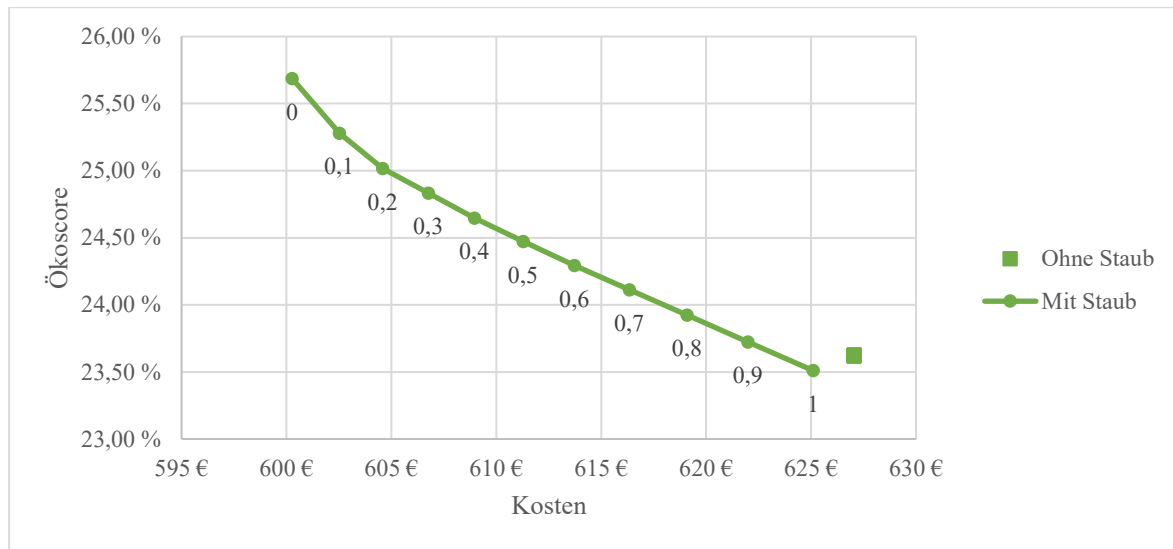


Abbildung 22: Trade-Off Grafik des Referenzfalls.

### Stoffstromanalyse: Staubeinsatz und SiC-Rohstoffe

Ein Blick auf die stoffliche Zusammensetzung der Rezepturen in Abbildung 23 offenbart die Dominanz der Stäube A und G. Andere Staubfraktionen wählt das Tool im Referenzfall nicht aus. Unter rein ökonomischen Gesichtspunkten (Gewichtung 0) kommen 188 kg Staub A und 11 kg Staub G zum Einsatz. Mit steigender ökologischer Gewichtung verringert das Modell zunehmend Staub A durch andere Komponenten, dessen Menge reduziert sich pro Gewichtungsschritt um ca. 16 bis 23 kg. Im Gegensatz dazu steigt der Einsatz von Staub G von 11 kg auf 16 kg an, bis er bei maximaler ökologischer Gewichtung als alleinige Staubkomponente verbleibt. Die geringe Basizität durch den Anteil von ca. 93 % SiO<sub>2</sub> begründet die Präferenz für Staub G, da dieser Quarzsand substituiert. Der anfänglich hohe Einsatz von Staub A erklärt sich dadurch, dass er als einziger Staub SiC enthält. Dieser SiC-Ersatz scheint ein ökonomischer statt ökologischer Treiber zu sein, da der Staub reduziert wird, je wichtiger die Ökologie wird. Dies gilt, da den einzelnen Stäuben außerhalb ihrer chemischen Zusammensetzung und daraus resultierenden Substitutionswirkungen jeweils die gleichen ökonomischen und ökologischen Gutschriften zugeschrieben sind.

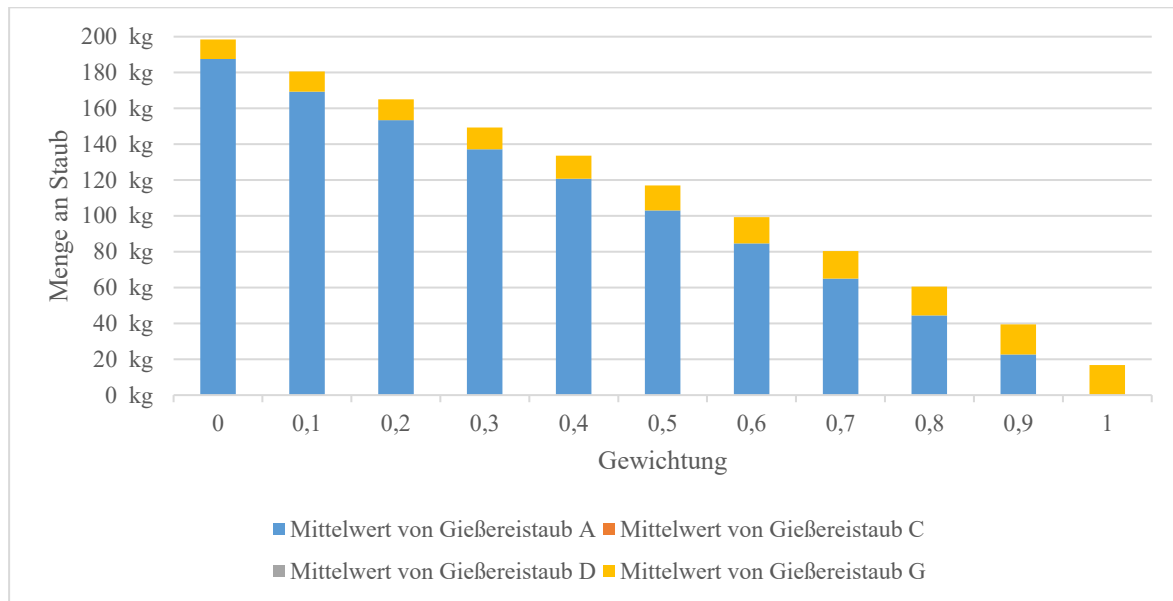


Abbildung 23: Staubeinsatz im Referenzfall.

Abschließend stellt sich die Frage, welche SiC-Rohstoffe in den Rezepturen vorkommen. Hierfür erfolgt eine Aggregation der SiC-Rohstoffe, die in Tabelle 12 dargestellt sind.

Tabelle 12: Cluster der SiC-Rohstoffe.

Cluster	Zuordnung/Anforderung
SiC_high	SiC-Gehalt > 85 %
SiC_mid	85 % > SiC-Gehalt > 75 %
SiC_low	SiC-Gehalt < 75 %

Abbildung 24 zeigt deutlich, wie sich die Anteile der primären SiC-Rohstoffe korrespondierend zum Staubeinsatz verändern. Ohne Staubeinsatz nutzt das Modell ein konstantes Verhältnis aus SiC\_low (218 kg) und SiC\_high (593 kg). SiC\_mid findet hier keine Verwendung. Sobald Stäube einfließen, verschiebt sich dieses Gefüge. Bei ökonomischer Optimierung setzt das Tool ausschließlich auf SiC\_high. Im Gewichtungsbereich von 0,2 bis 0,4 steigt der Anteil von SiC\_mid deutlich an, bevor er bei rein ökologischer Optimierung vollständig entfällt. SiC\_low zeigt eine starke Abhängigkeit von der ökologischen Gewichtung: Es tritt erst ab einem Wert von 0,5 signifikant in Erscheinung und erreicht bei einer rein ökologischen Gewichtung von 1 nahezu das Einsatzniveau des Referenzfalls ohne Staub.

Dass sich das Verhältnis im Vergleich zum staubfreien Fall dennoch zugunsten von SiC\_high verschiebt, liegt nicht an physischen Restriktionen wie dem Restvolumen im Formling. Da Staub G den Quarzsand zur Steuerung der Basizität nahezu 1:1 substituiert, ist der Grund vielmehr in der ökologischen Bilanzierung zu finden: Die nichtlinearen Umweltwirkungen der primären SiC-Rohstoffe, siehe 3.2.2, interagieren mit den Gutschriften für

die vermiedene Deponierung. Durch die Gutschriften und die Substitution von Quarzsand als Primärrohstoff sind im Fall mit Staub andere Rezepturen ökologisch vorteilhaft.

Dieses Phänomen erklärt auch das Paradoxon bei Staub A, dessen SiC-Substitution primär ökonomisch, aber nicht ökologisch vorteilhaft wirkt. Die Ursache liegt in den unterschiedlichen Funktionsverläufen: Die Preisfunktion der SiC-Rohstoffe verläuft bis zu einem SiC-Gehalt von 95 % linear, wodurch die Deponiekosteneinsparungen ohne ökonomische Nachteile durch die Rohstoffpreise voll wirksam werden. Im Gegensatz dazu steigen die Umweltwirkungen der SiC-Rohstoffe nichtlinear an. Die ökologischen Gutschriften für die vermiedene Deponierung und der geringe SiC-Gehalt in Staub A reichen hier nicht aus, um die überproportional steigenden Umweltlasten der hochwertigen SiC-Primärrohstoffe zu kompensieren.

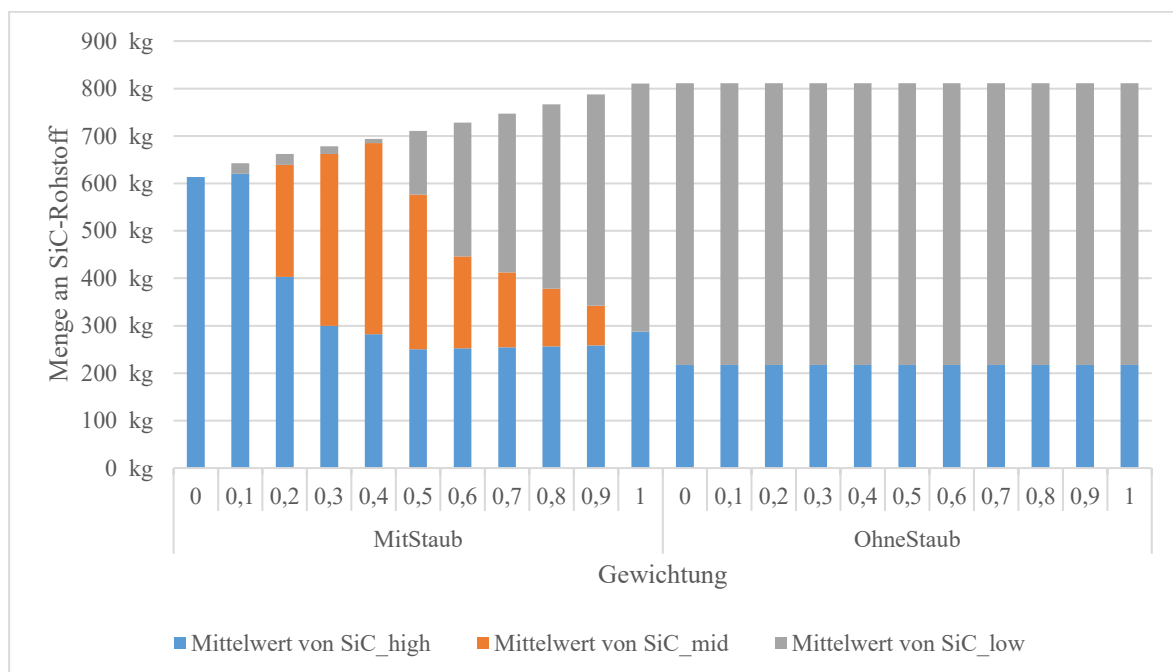


Abbildung 24: SiC-Einsatz im Referenzfall.

Zusammenfassend demonstriert der Referenzfall, dass durch den Staubeinsatz Pareto-Verbesserungen realisierbar sind, bei denen sowohl ökonomische als auch ökologische Ziele besser als im Status quo ohne Staub sind. Diese Unterschiede sind in beiden Zielfunktionen marginal.

Generell ist der Staubeinsatz ökonomisch getrieben, da absolut und relativ gesehen deutlich höhere ökonomische Einsparungen (4,3 %) als ökologische Einsparungen (0,47 %) möglich sind.

### 4.3 Einfluss der Spezifikationen

Dieses Kapitel analysiert die isolierte Variation der Basizität sowie der SiC- und FeMn68-Gehalte. Alle weiteren Spezifikationen entsprechen dem Referenzfall aus Tabelle 11.

#### 4.3.1 Einfluss der Basizität

Die Analyse betrachtet die Basizitäten 0,7 und 0,9 im Vergleich zum Referenzfall mit 0,81.

#### **Ökonomische und ökologische Auswirkungen sowie Trade-Off**

Abbildung 25 verdeutlicht, dass die Variation der Basizität nur geringfügige absolute und relative Abweichungen zum Referenzfall bewirkt. Die einzelnen Datenpunkte repräsentieren die elf Gewichtungsstufen zwischen 0 und 1.

Im Szenario ohne Staubeinsatz resultiert eine höhere Basizität in einem vorteilhafteren Ökoscore, bei gleichzeitig geringeren Kosten, wobei die Basizitäten 0,81 und 0,9 nahezu keine Unterschiede zeigen. Die Integration von Stäuben liefert bei ausgeglichener oder ökologischer Gewichtung ein analoges Ergebnis. Die höhere Basizität dominiert oder zeigt die gleichen Werte der anderen Kurve. Ein abweichendes Verhalten tritt lediglich bei ökonomischer Fokussierung auf. Bei einem Ökoscore von 25,50 % weist die niedrigste Basizität von 0,7 die kleinsten Kosten auf, konträr zur Situation ohne Staub. Da der Grenznutzen zusätzlicher Investitionen mit steigender Basizität zunimmt, verstärkt sich die Konvexität der Funktionen und ändert die Vorteilhaftigkeit rasch. Zusammenfassend beeinflusst die Basizität das Ergebnis sowohl absolut als auch relativ nur geringfügig. Für die Basizität mit 0,81 (Referenz) gilt, dass diese über ein breites Band sowohl mit als auch ohne Staub ideale Ergebnisse oder Werte sehr nah an diesen erreicht.

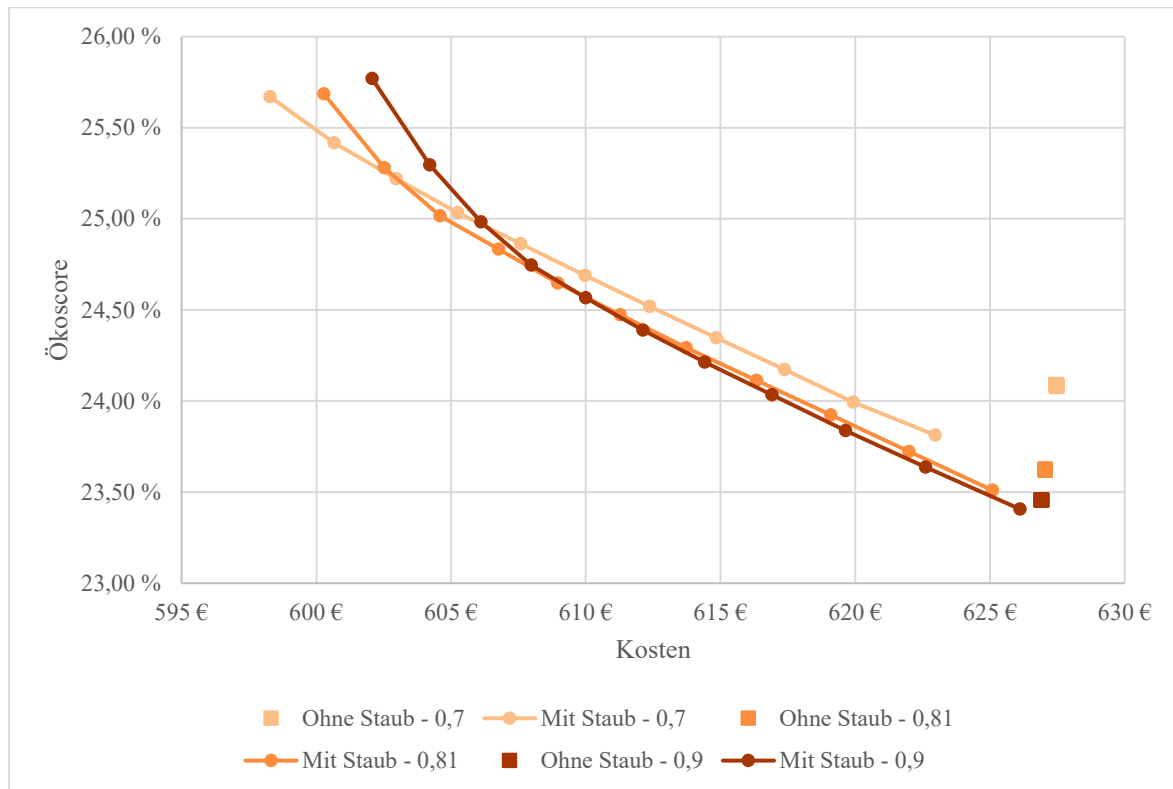


Abbildung 25: Trade-off bei Variierung der Basizität im Referenzfall.

### Stoffstromanalyse: Staubeinsatz und SiC-Rohstoffe

Abbildung 26 zeigt auf, dass die Basizität wenig an der Staubezusammensetzung zum Referenzfall ändert. Mit Ausnahme der Gewichtung 0 gilt, dass mehr Staub im Formling vorhanden ist, je geringer die Basizität ist. Dies resultiert aus dem verstärkten Einsatz von Staub G, der die geringste Basizität aufweist sowie dass Stäube generell eine kleinere Basizität als die Zielbasizität aufweisen und somit vorteilhafter sind. Das deckt sich damit, dass eine höhere Basizität bei gleichem Preis oftmals ökologisch besser ist und Stäube aufgrund der Modellierung der SiC-Umweltwirkungen eher ökonomisch als ökologisch positiv wirken. Dies bestätigt auch der Einsatz der SiC-Rohstoffe in Anhang H. Mit sinkender Basizität wählt das Tool – auch ohne Staubeinsatz – qualitativ hochwertigere SiC-Rohstoffe aus. Dies kann zwei Gründe haben: entweder entsteht dadurch Freiraum für Rohstoffe mit geringer Basizität wie Quarzsand oder die chemische Zusammensetzung der hochwertigeren SiC-Rohstoffe ist für niedrige Basizitäten besser geeignet.

Das konträre Verhalten bei ökonomischem Fokus aus Abbildung 25 in etwa im Bereich 600 bis 605 € ist auf zwei Gründe zurückzuführen: Dieser Bereich liegt im Gewichtungsbereich mit Fokus auf Ökonomie, bei dem das System versucht, mehr Staub zu nutzen. Da die Stäube geringere Basizitäten und somit höhere SiO<sub>2</sub>-Bestandteile haben, ist es für das MCDM-Modell bei einer geringeren Zielbasizität einfacher, mehr Staub einzufügen, um Kosten zu

sparen. Dies bestätigt auch, wieso Staub D mit der höchsten Basizität der Stäube nur bei einer hohen Basizität von 0,9 und starker ökonomischer Gewichtung bis 0,2 vorkommt und dann rapide abnimmt. Das Modell muss von Staub A auf Staub D wechseln, um den Staubanteil für den ökonomischen Vorteil zu erhöhen und gleichzeitig die Basizität aufgrund der hohen Zielbasizität nicht noch stärker zu reduzieren. Der Ökoscore ist betroffen, obwohl der Staubeinsatz bei einer Basizität von 0,9 im Vergleich zu 0,81 nur geringfügig sinkt. Da im direkten Vergleich Staub D Staub A ersetzt, ist das großteils ökonomische und ökologische Delta aus dem fehlenden SiC von Staub A. Diese Hypothese gilt es für zukünftige Arbeiten empirisch zu validieren.

Nichtsdestotrotz bleibt die Aussage bestehen, dass die SiC-Substitution keinen absoluten positiven Effekt auf den Ökoscore hat, da die Menge an Staub A kontinuierlich abnimmt und bei rein ökologischer Gewichtung keinerlei Staub A im Formling ist.

Mit steigender ökologischer Gewichtung und weniger Staubmengen ist es dem MCDM-Modell möglich, Staub D wieder vollständig durch Staub A zu ersetzen und somit wechselt die Dominanz zugunsten höherer Basizitäten zurück.

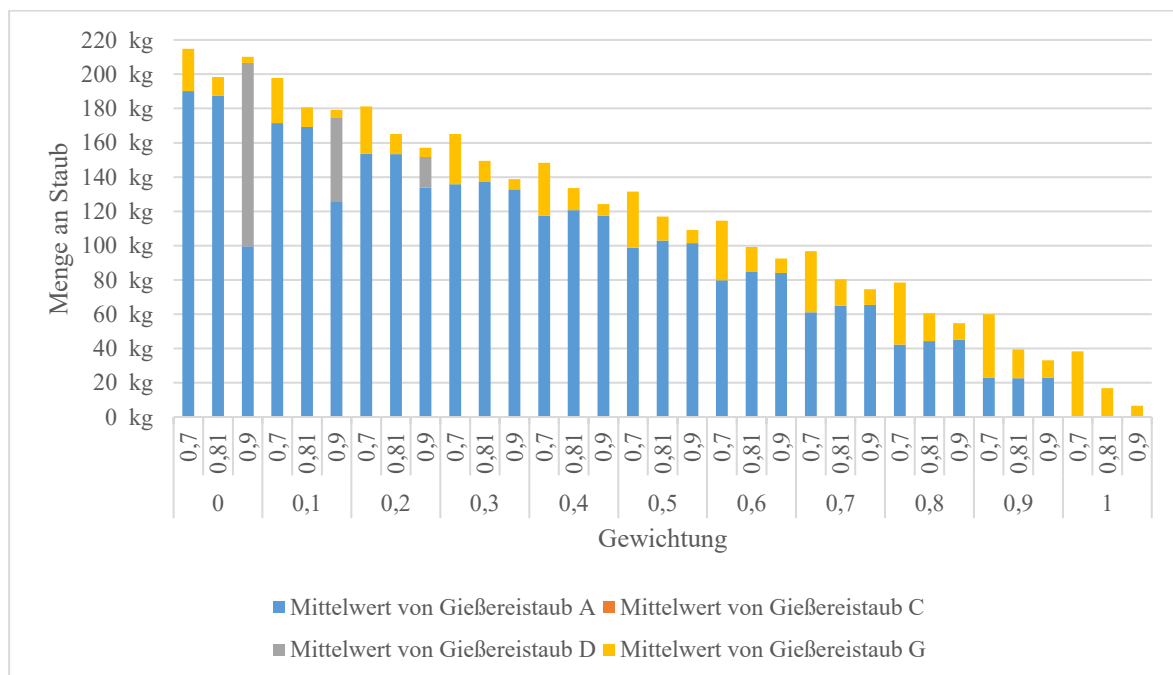


Abbildung 26: Staubeinsatz bei Variierung der Basizität im Referenzfall.

Zusammenfassend bedeutet das: Höhere Basizitäten dominieren meist die niedrigeren Basizitäten, wobei bei stark ökonomischer Gewichtung dieses Verhältnis aufgrund der vorliegenden geringen Basizitäten der Stäube umgedreht ist.

Der Einsatz von SiC\_low bis SiC\_high folgt grundlegend dem gleichen Charakter wie im Referenzfall gepaart mit der neuen Erkenntnis, dass hochwertigere SiC-Rohstoffe im

Formling sind, je geringer die Basizität ausfällt. Dennoch folgt der Wechsel von SiC\_high auf SiC\_mid auf SiC\_low demselben Muster.

#### 4.3.2 Einfluss des SiC-Gehalts

Die Analyse vergleicht die SiC-Gehalte 0,5, 0,58 sowie 0,7. Der Referenzfall nutzt den Mittelwert, wenn alle drei SiC-Gehalte simultan ausgewählt sind. Daher beschränkt sich die Betrachtung auf diese drei Fälle, ohne den Referenzfall zu integrieren, da dieser lediglich den Mittelwert daraus darstellt. Leichte Abweichungen sind Rundungsfehler aufgrund der teils kleinen Zahlen und Abstände.

#### Ökonomische und ökologische Auswirkungen sowie Trade-Off

Abbildung 27 visualisiert den starken Einfluss sowohl auf die ökonomischen als auch ökologischen Auswirkungen sowie die Konvexität des Trade-offs. In Anhang I sind die Graphen isoliert dargestellt, da insbesondere die Grafik für einen SiC-Gehalt von 0,7 in der gesammelten Darstellung schwer zu interpretieren ist.

Generell besteht der Zusammenhang, dass ein geringerer SiC-Gehalt automatisch mit einem kleineren Ökoscore als auch geringeren Kosten einhergeht, unabhängig ob mit oder ohne Staub. Folglich fungiert der SiC-Gehalt als Treiber für Kosten und Umweltwirkungen. Tabelle 13 zeigt, dass ohne Staub der Preis vom SiC-Gehalt 0,5 auf 0,7 um 39 % steigt, der SiC-Gehalt um 40 % und die Umweltwirkungen um 75 %. Dies zeigt erneut, dass hochwertigere SiC-Rohstoffe anteilig höhere Umweltwirkungen aber einen linearen Preisverlauf aufweisen.

Tabelle 13: Ergebnisse der Zielfunktionen abhängig vom SiC-Gehalt.

SiC-Gehalt	Wertebereiche [mit Staub]	Ergebnis [ohne Staub]	Maximale, relative Einsparungen
0,5	Ökonomisch [€]: [495, 531] Ökologisch [%]: [21,01, 17,61]	Ökonomisch [€]: 531 Ökologisch [%]: 17,61	Ökonomisch: 6,78 % Ökologisch: 0 %
0,58	Ökonomisch [€]: [583, 612] Ökologisch [%]: [24,87, 22,43]	Ökonomisch [€]: 613 Ökologisch [%]: 22,45	Ökonomisch: 4,89 % Ökologisch: 0,09 %
0,7	Ökonomisch [€]: [723, 732] Ökologisch [%]: [31,18, 30,49]	Ökonomisch [€]: 737 Ökologisch [%]: 30,81	Ökonomisch: 1,9 % Ökologisch: 1,04 %

Tabelle 13 verdeutlicht das höhere ökonomische Potenzial der Stäube bei geringem SiC-Gehalt, wobei keinerlei ökologischer Vorteil mehr mit dem Staubeinsatz einhergeht.

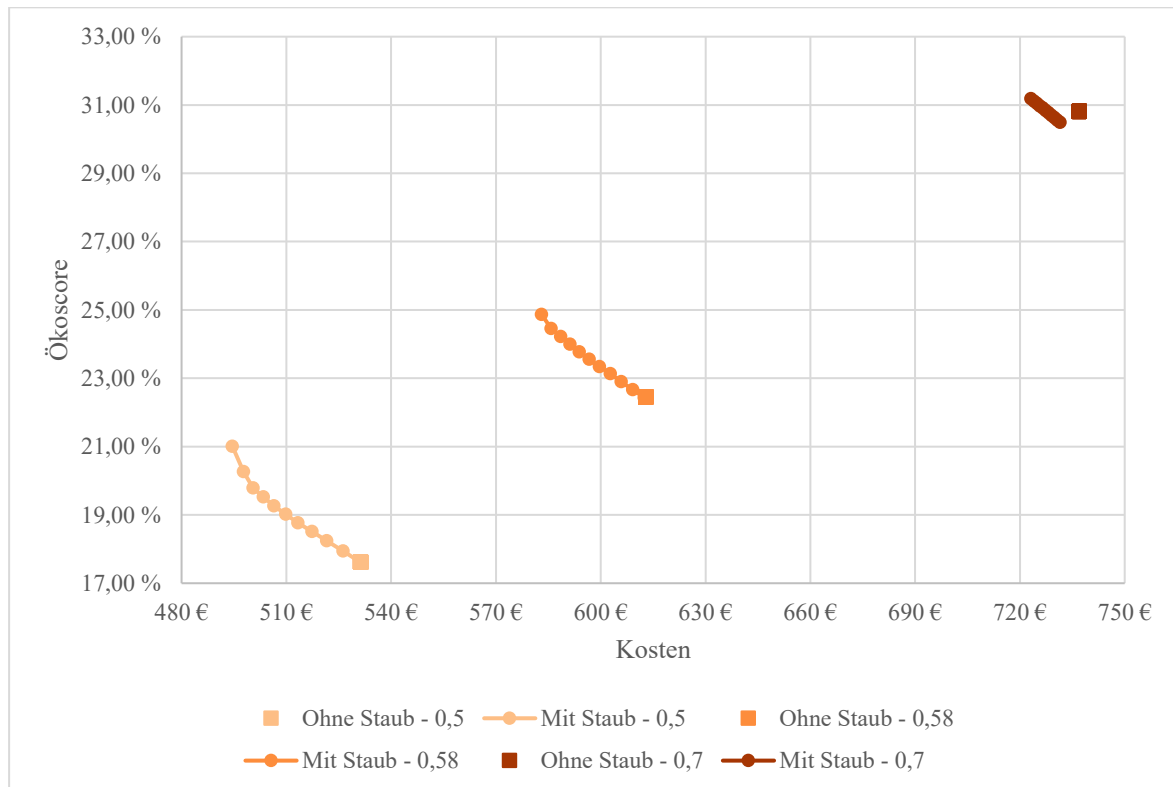


Abbildung 27: Trade-off bei Variierung des SiC-Gehalts im Referenzfall.

Dies spiegelt auch die (schwache) Pareto-Optimalität (siehe Anhang I) gegenüber den Fällen ohne Staub wider. Während diese für SiC-Gehalte von 0,5 und 0,58 erst ziemlich genau bei einer vollen ökologischen Gewichtung oder gar nicht auftreten, ist dies bei einem SiC-Gehalt von 0,7 bereits bei einer Gewichtung zwischen 0,5 bis 0,6 der Fall. Allerdings ist in diesem Fall der Wirkungsbereich sowohl ökonomisch als auch ökologisch geringer (siehe Tabelle 13), sodass keine starken Auswirkungen durch den Staubeinsatz möglich sind.

Der SiC-Gehalt verändert den Funktionsverlauf. Die Trade-off Kurve ist für den kleinsten SiC-Gehalt am stärksten konvex, nimmt dann für einen SiC-Gehalt von 0,58 etwas ab und ist im Fall eines SiC-Gehalts von 0,7 über Teile des Bereichs linear oder sogar konkav. Daraus folgt: Der Grenznutzen pro investiertem Euro sinkt mit steigendem SiC-Gehalt.

### Stoffstromanalyse: Staubeinsatz und SiC-Rohstoffe

Abbildung 28 zeigt deutlich, dass ein geringerer SiC-Gehalt deutlich höheren Staubeinsatz ermöglicht. Im Fall reiner ökonomischer Gewichtung enthält die Rezeptur bei 0,5 SiC-Gehalt 273 kg Staub, wohingegen bei einem SiC-Gehalt von 0,7 nur 103 kg enthalten sind. Mit steigender ökologischer Gewichtung nimmt die Staubmenge wie im Referenzfall konstant ab, wobei gilt, dass die reduzierte Menge bei kleinerem SiC-Gehalt höher ist. Auffällig ist die Verwendung von Staub G, der ausschließlich bei einem SiC-Gehalt von 0,7 auftritt. Zusammen mit der Grafik zur SiC-Zusammensetzung in Anhang J ermöglicht das den

Rückschluss, dass hochwertigere SiC-Rohstoffe eine höhere Basizität aufweisen und demnach Staub G als Substitution für Quarzsand fungiert. Dieser Rückschluss ist möglich, da das Modell bei vollständiger Staubverfügbarkeit auf Quarzsand verzichtet. Im aktuellen Modell ist der einzige Vorteil von Staub G gegenüber Staub A dessen deutlich höherer SiO<sub>2</sub>-Anteil, wodurch nur dessen Beitrag zur Basizität den verstärkten Einsatz erklärt.

Bei einer sehr hohen ökologischen Gewichtung von 0,9 oder 1 ist erkenntlich, dass der Staubeinsatz sogar für den höchsten SiC-Gehalt am größten ist und bei voller ökologischer Gewichtung nur dort relevante Mengen an Staub zum Einsatz kommen. Dies erklärt auch, warum der Break-Even bzw. Pareto-Optimalität-Punkt bei einem SiC-Gehalt von 0,7 früher ist. Durch den Einsatz von Staub G substituiert dieser Quarzsand 1:1 bzw. sogar stärker und spart ökonomisch und ökologisch Primärrohstoff sowie Deponierung ein. Bei geringerem SiC-Gehalt steuert das Tool die Basizität durch die gezielte Kombination verschiedener SiC-Rohstoffe, insbesondere bei hoher ökologischer Gewichtung. Für den hohen SiC-Gehalt fehlt allerdings die Flexibilität die Basizität darüber zu steuern, da nur ein kleiner Teil der SiC-Rohstoffe in Betracht kommen, um so hohe Gehalte zu erreichen.

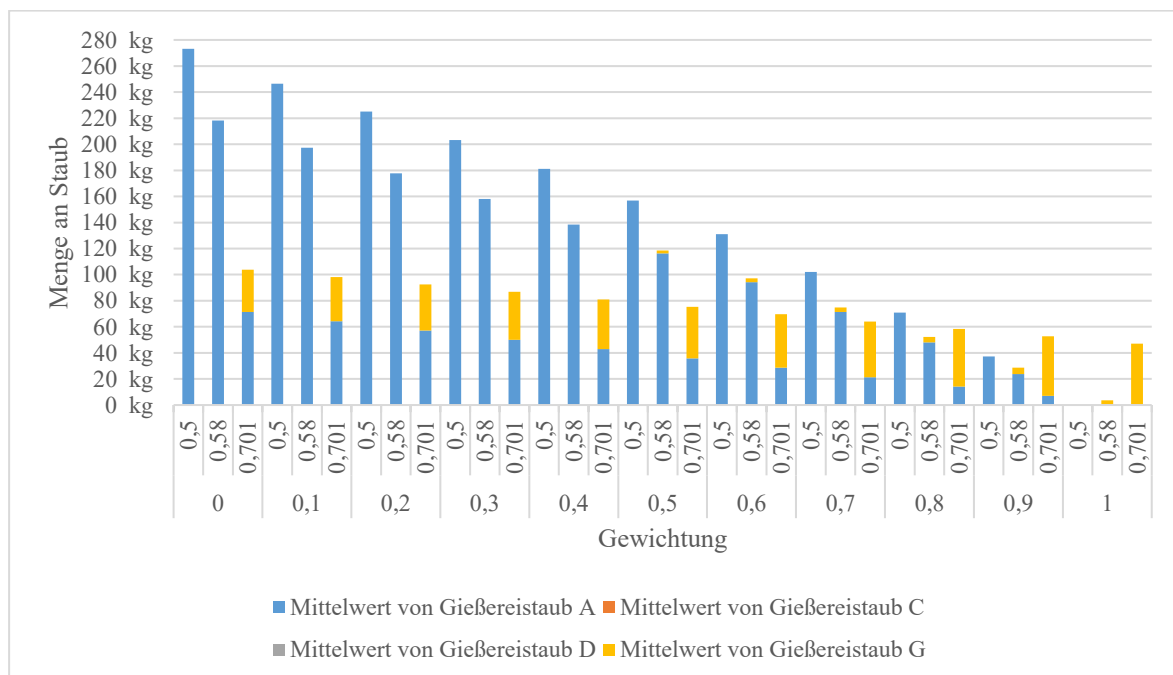


Abbildung 28: Staubeinsatz bei Variierung des SiC-Gehalts für den Referenzfall.

Die SiC-Zusammensetzung aus Anhang J legt dar, dass bei rein ökonomischer Optimierung nur SiC\_high in der Rezeptur ist, mit entsprechend niedrigeren Mengen bei kleineren SiC-Anteilen. Dies ermöglicht eine verstärkte Integration der Stäube, was deren ökonomische Vorteilhaftigkeit steigert. Je größer die ökologische Gewichtung und geringer die Anforderung an den SiC-Gehalt ist, desto stärker wechselt das System wie bekannt von SiC\_high

auf SiC\_mid auf SiC\_low. Hierbei ist hervorzuheben, dass dies für hohe SiC-Anteile nicht gilt und hier dauerhaft und ausschließlich eine ähnliche Menge an SiC\_high vorkommt. Drei Faktoren bedingen die frühere ökologische Wirkung der Stäube bei hohem SiC-Gehalt: die Nutzung hochwertiger Siliziumkarbids, die geringe Flexibilität bei dessen Reduktion sowie deren nichtlinearen Umweltwirkungen sorgen für grundlegend hohe Umweltwirkungen. Staub G substituiert bei hohem SiC-Gehalt notwendigen Quarzsand und sorgt mit seinen zusätzlichen Gutschriften für eine frühe ökologische und ökonomische Wirkung.

#### 4.3.3 Einfluss des Mangangehalts

Dieses Unterkapitel analysiert den Einfluss des Manganeinsatzes im Vergleich zum manganfreien Referenzfall, siehe Tabelle 11. Ein direkter Vergleich erfordert aufgrund technischer Restriktionen eine Anpassung der Datengrundlage. Der Vergleich berücksichtigt ausschließlich SiC-Gehalte von 0,5 und 0,58, da eine Kombination aus Mangan und einem SiC-Gehalt von 0,7 die technische Umsetzbarkeit überschreitet. Das FeMn68-Verhältnis beträgt 13,5 %. Dieser Wert entspricht dem spezifischen Bedarf der Partnergießerei innerhalb des Projektverbunds zur Erreichung des Ziel-Mangangehalts. Dies variiert je nach Gießerei.

Tabelle 14 und Abbildung 29 verdeutlichen, dass Mangan – analog zur Erhöhung des SiC-Gehalts – sowohl die ökonomischen Kosten als auch die ökologischen Wirkungen maßgeblich steigert. Da die Vorgabe von Mangan eine Gießereianforderung ist, liegt der Fokus auf den Auswirkungen für den Staubeinsatz. Der Staub kann ökonomisch stärker wirken, wenn kein Mangan integriert ist. Die Belegung des Restvolumens durch Mangan erzwingt den Einsatz hochwertigerer SiC-Rohstoffe. Dies erhöht die Umweltwirkungen und begrenzt gleichzeitig die Kapazität für den Staubeinsatz. Es ist erkennbar, dass Staub G nur für den Fall mit Mangan im Ergebnis vorkommt, siehe Abbildung 30.

Die Daten in Anhang K bestätigen diese Kausalität: Ein reduziertes Restvolumen schränkt die Flexibilität bei der Basizitätseinstellung über SiC-Rohstoffe ein und verstärkt die positiven Effekte des Staubs durch Quarzsubstitution und vermiedene Deponierung. Dies begründet das Erreichen der Pareto-Optimalität bereits bei einer ökologischen Gewichtung von knapp unter 0,8. Das Fehlen von Staub bei maximaler ökologischer Gewichtung im manganfreien Szenario bestätigt diese Beobachtung.

Tabelle 14: Ergebnisse der Zielfunktionen abhängig vom Vorkommen von Mangan.

Gehalt an Mangan	Wertebereiche [mit Staub]	Ergebnis [ohne Staub]	Maximale, relative Einsparungen
0	Ökonomisch [€]: [539, 572] Ökologisch [%]: [22,94, 20,02]	Ökonomisch [€]: 572 Ökologisch [%]: 20,03	Ökonomisch: 5,77 % Ökologisch: 0,05 %
0,135	Ökonomisch [€]: [667, 682]	Ökonomisch [€]: 686	Ökonomisch: 2,77 %

	Ökologisch [%]: [28,07, 26,94]	Ökologisch [%]: 27,21	Ökologisch: 0,99 %
--	--------------------------------	-----------------------	--------------------

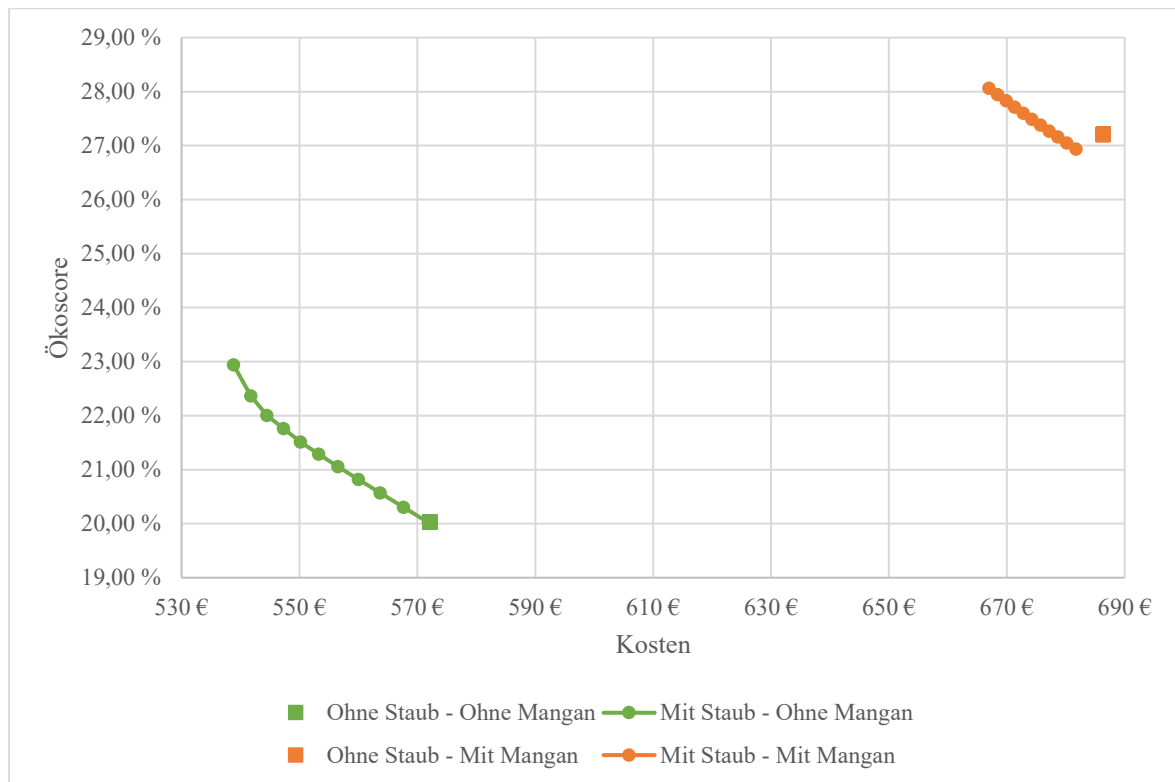


Abbildung 29: Gegenüberstellung des Trade-off von Referenzfall (ohne Mn) und mit Mangan.

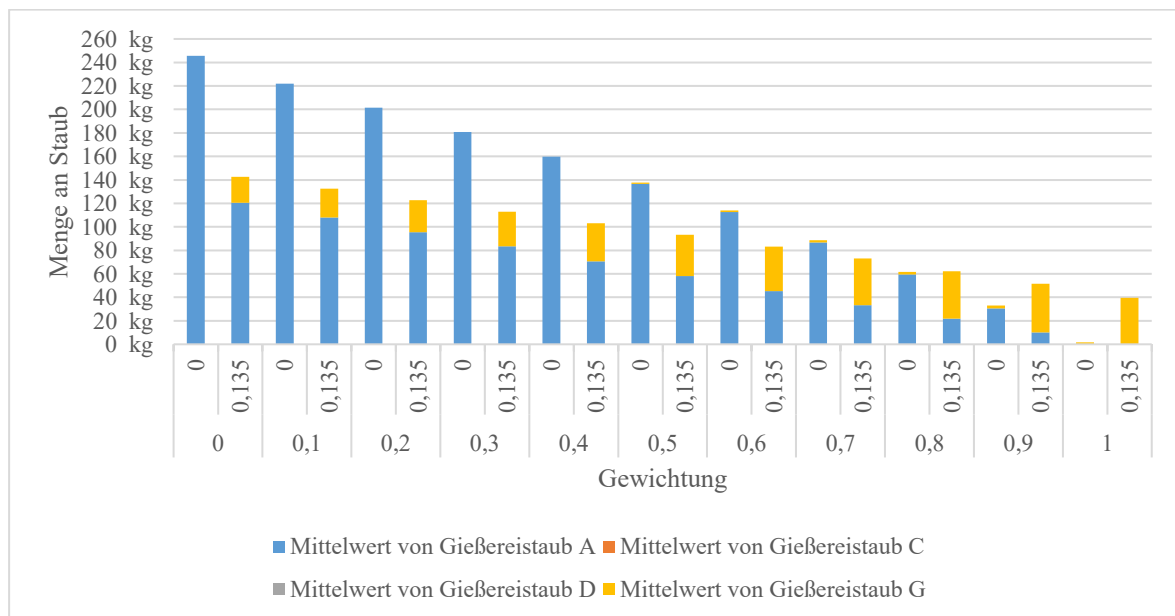


Abbildung 30: Staubeinsatz bei Gegenüberstellung von Referenzfall (ohne Mn) und mit Mangan.

#### 4.4 Einfluss der Staubverfügbarkeit

Logistische oder prozessbezogene Rahmenbedingungen schränken den Einsatz der Stäube potenziell auf einzelne Sorten ein. Dieses Kapitel analysiert die daraus resultierenden Auswirkungen auf die Ergebnisse.

Abbildung 31 visualisiert die Ergebnisse der Staubverfügbarkeit und stellt die Trade-offs der verschiedenen Einzelstaub-Varianten im Vergleich zur Nutzung des gesamten Staubportfolios dar. Vereinzelt beziehen sich Erklärungen auch auf die Abbildungen der Staub- oder SiC-Mengen aus Anhang L.

Die Variante „Alle Stäube“ liefert die effizienteste Lösung. Das MCDM-Modell greift hierbei auf das gesamte Portfolio zu und optimiert die Mischung ohne Restriktionen. Für die isolierte Betrachtung der Stäube ist eine klare Hierarchie zu erkennen: Die Nutzung aller Stäube übertrifft die Ergebnisse von Staub A. Dieser dominiert wiederum Staub C, der Staub D dominiert. Demnach gilt: *Alle Stäube* > *Staub A* > *Staub C* > *Staub D*. Staub G entzieht sich dieser Einordnung aufgrund seines differenzierten Kurvenverlaufs und stellt einen Sonderfall dar.

Staub G zeigt ein komplexes Verhalten. Da die Unterschiede im Wertebereich teils sehr gering sind, bezieht sich die Beschreibung auf die elf Punkte, also Gewichtungen des Falls „Nur Staub G“. Die Analyse verzichtet auf einen direkten Vergleich unterschiedlicher Kurven bei identischer Gewichtung, um Fehlinterpretationen zu vermeiden. Ein zielführender Vergleich prüft, ob es auf einer anderen Kurve einen Punkt gibt, der mindestens eine der beiden Zielfunktionen verbessert, ohne die andere zu verschlechtern. Dieses Vorgehen entspricht der Pareto-Optimalität.

Im Gewichtungsbereich von 0,1 bis 0,2 ist Staub G durch die Stäube C und D dominiert. Dies wechselt ab einer Gewichtung von 0,3 bis 0,5 und Staub G dominiert von da an die Stäube C und D. Ab einer Gewichtung von 0,8 dominiert Staub G sogar die Lösung von Staub A. Staub G empfiehlt sich somit primär für Spezialfälle, wie aus 4.3.2 sowie 4.3.3 bekannt. Wenn durch hohe SiC- oder Mangananteile viel Material als Spezifikation vorgegeben ist, wirkt Staub G demnach positiv. Im Umkehrschluss: Je höher der Bedarf an SiC\_high ausfällt, desto wahrscheinlicher erzielt Staub G positive Effekte.

Die isolierte Betrachtung von Staub G offenbart eine geringe Effizienz. Bis zu einer Gewichtung von 0,5 führen minimale Kosteneinsparungen zu einer massiven Verschlechterung des Ökoscores. Eine weitere manuelle Betrachtung der Rohdaten zeigt: Für den Referenzfall mit Variation der Staubverfügbarkeit kommt einzig und allein bei „Nur Staub G“ im Gewichtungsbereich bis 0,4 Kalkstein zur Erhöhung der Basizität vor. Dies belegt die technologische Barriere durch den hohen SiO<sub>2</sub>-Anteil in Staub G.

Staub A stellt die vorteilhafteste Option dar, sofern die Restriktion auf eine einzelne Sorte begrenzt bleibt. Der Verlauf der Kurve von Staub A liegt in unmittelbarer Nähe zur Gesamtoptimierung „Alle Stäube“. Diese Abweichung ist mithilfe von Kapitel 4.3.2 erklärbar. Für den höchsten SiC-Gehalt von 0,7 greift das MCDM-Modell aufgrund des SiO<sub>2</sub>-Gehalts auf

Staub G zurück. Da das im isolierten Fall von Staub A fehlt, können die optimalen Werte nicht erreicht werden. Für alle Kombinationen ohne einen SiC-Gehalt von 0,7 hat im Referenzfall Staub A exakt die ideale Lösung. Daher liegen die beiden Kurven eng aneinander.

Die bisherigen Ergebnisse verdeutlichen, dass steigende Staubmengen die Kosten senken, aber den Ökoscore belasten, bis auf wenige Ausnahmen. Die Daten in Anhang L revidieren diesen Trend teilweise. Sind nur einzelne Stäube verfügbar, ist unter geringeren Kosten und geringerem Ökoscore oftmals bei „Nur Staub A“ mehr Staub im Formling. Das gilt im Vergleich zu den anderen Fällen, in denen nur ein Staub verfügbar ist. Daher gilt: Es ist wichtig, den richtigen Staub zu verwenden, um bei Kosteneinsparungen den Umweltscore nicht stärker als nötig zu erhöhen.

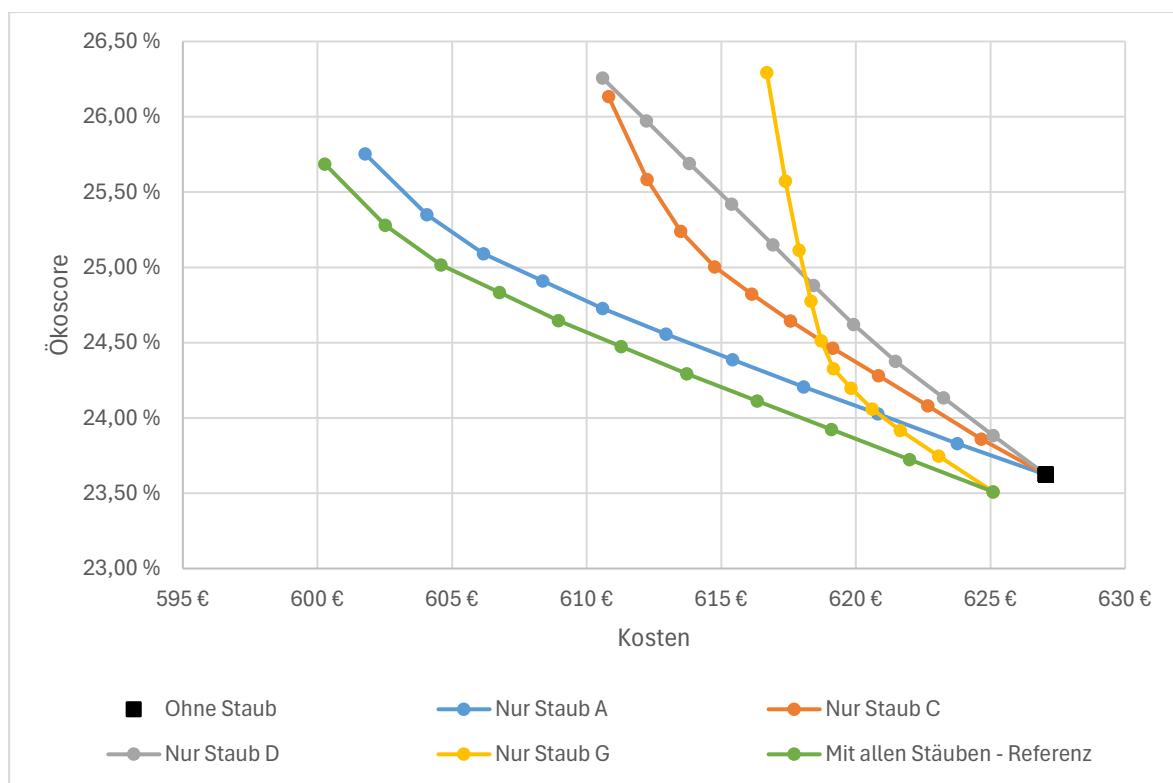


Abbildung 31: Trade-off bei Einschränkung der Staubverfügbarkeit.

Zusammenfassend gilt *Alle Stäube* > *Staub A* > *Staub C* > *Staub D*, wobei Staub A in vielen Fällen gleichauf mit „Alle Stäube“ liegt. Dies gilt nicht für Fälle, bei denen höchste Mengen anderer Rohstoffe im Formling sind, wie bei einem SiC-Gehalt von 0,7 oder Fällen mit Mangan. Für diese Fälle substituiert Staub G Quarzsand und hilft, einen frühen positiven Umwelt- sowie Preiseffekt zu bewirken. Staub G ist also ein Spezialist.

#### 4.5 Einfluss der Beseitigungs-/Verwertungsmethode

Diese Sensitivitätsanalyse untersucht den Einfluss der Gutschriftmethode für das Recycling. Die Untersuchung variiert den Referenzfall der Obertagedeponierung hin zur Untertagedeponierung sowie zum Bergversatz. Tabelle 7 (Kapitel 3.2.2) und Tabelle 15 enthalten die zugrunde liegenden Werte.

Abbildung 32 verdeutlicht, dass die Untertagedeponierung die beiden anderen Lösungen dominiert. Für jeden Punkt auf den anderen beiden Kurven liegt ein Punkt auf der Kurve der Untertagedeponierung, der in beiden Zielfunktionen bessere Werte erreicht. Beispielsweise ist der ökonomisch beste Punkt für den Referenzfall mit 600 € und einem Ökoscore von 25,69 % bestimmt. Für die Untertagedeponierung liegt bei einer Gewichtung von 0,4 ein Punkt mit Kosten von 587 € und einem Ökoscore von 24,96 % vor. Eine minimale Einschränkung dessen besteht bei maximaler ökologischer Gewichtung von 1. Dort sind die Differenzen so gering, dass Dominanzen verschwimmen.

Die Staubmengen sind bei der Untertagedeponierung höher, siehe Abbildung 33. Dies unterstreicht erneut die ökonomische Getriebenheit des Staubeinsatzes. Insbesondere zeigt dessen Dominanz aber auch, dass die Preisspanne massiv auf das Gesamtergebnis sowie das Verhältnis aus Ökonomie und Ökologie wirkt. Bei ökonomischem Fokus mischt das Modell nun Staub D zu und ändert die SiC-Zusammensetzung leicht, siehe Anhang M. Die ökonomische Einsparung von mehr Staubeinsatz durch die höhere Basizität bzw. den geringen SiO<sub>2</sub>-Gehalt von Staub D übersteigt durch die höhere ökonomische Gutschrift der Untertagedeponierung den ökonomischen Effekt, den Staub A mit niedrigerer Basizität und SiC hat, siehe Anhang F.

Ein ähnliches, weniger starkes Bild entsteht von der Verwertungsmethode Bergversatz gegenüber der Beseitigungsmethode Obertagedeponierung. Tabelle 15 bestärkt das Bild, dass der aufgerufene Preis einen starken Einfluss darauf nimmt, wie die Dominanzen der Methoden sind. In der aktuellen Konstellation gilt: Die teurere Methode dominiert die günstigere im Ergebnis, obwohl diese nicht auch gleichzeitig die höchsten ökologischen Gutschriften aufweisen. Erinnerung: Höhere Werte kennzeichnen bei Stäuben aufgrund der Gutschriftenlogik vorteilhafte Ergebnisse.

Die Analyse der Umweltwirkungen lässt gemeinsam mit Abbildung 33 erste Abhängigkeiten erkennen. Der Abgleich der Ergebnisse mit den Rohdaten offenbart komplexe Interdependenzen. Eine manuelle Analyse dieser Wirkungsgefüge erweist sich als zeitintensiv. Für valide Aussagen bedarf es an dieser Stelle einer komplexen, multivariaten Betrachtung. Diese erfordert die Auflösung der aggregierten Rohstoff-Cluster (SiC\_high, SiC\_mid, SiC\_low) hin zu einer isolierten Untersuchung spezifischer SiC-Rohstoffe und ihrer individuellen SiC-

Gehalte. Gleichzeitig beeinflussen die Staubmengen sowie Variationen weiterer Primärrohstoffe die Ergebnisse.

Eine zielführende Interpretation muss die Trade-off-Kurven berücksichtigen und den relativen Beitrag einzelner Komponenten zum Gesamtökoscore exakt quantifizieren. Gegenwärtig limitiert die Datenqualität eine derart tiefe Interpretation. Dies betrifft primär die fehlende Zuordnung der Entsorgungs- und Verwertungsszenarien einzelner Stäube seitens der Partnergießereien sowie die dazugehörigen realen Preisdaten. Eine solche Detailanalyse auf Basis der Modellergebnisse ist auch direkt in Excel wie aktuell per PowerQuery oder Alternativen wie Python möglich. Dies liegt außerhalb des Untersuchungsrahmens. Der Fokus dieses Abschnitts liegt gemäß Kapitel 2.7 auf der Validierung der generellen Funktionsweise des entwickelten Tools und ersten Erkenntnissen von Zusammenhängen.

Tabelle 15: Werte aus der Datenbank für die Beseitigungs-/Verwertungsmethoden.

Methode	Kosten [€/kg]	CO <sub>2</sub> -eq [relativ]	Sb-eq [relativ]
Referenz: Obertagedeponierung	0,10 → 1	1	1
Untertagedeponierung	0,25 → 2,5	0,61	0,25
Bergversatz	0,15 → 1,5	0,30	0,30

Zusammenfassend resultiert die Dominanz teurer Methoden aus den steigenden Preisen, die das Modell als Gutschriften verbucht. Diese übersteigen die Effekte des Verlustes der „Einsparung“ von Umweltwirkungen bei diesen Methoden. Die Effekte fallen mit Realdaten und Zuordnungen potenziell anders aus, da die Preise auf Annahmen beruhen.

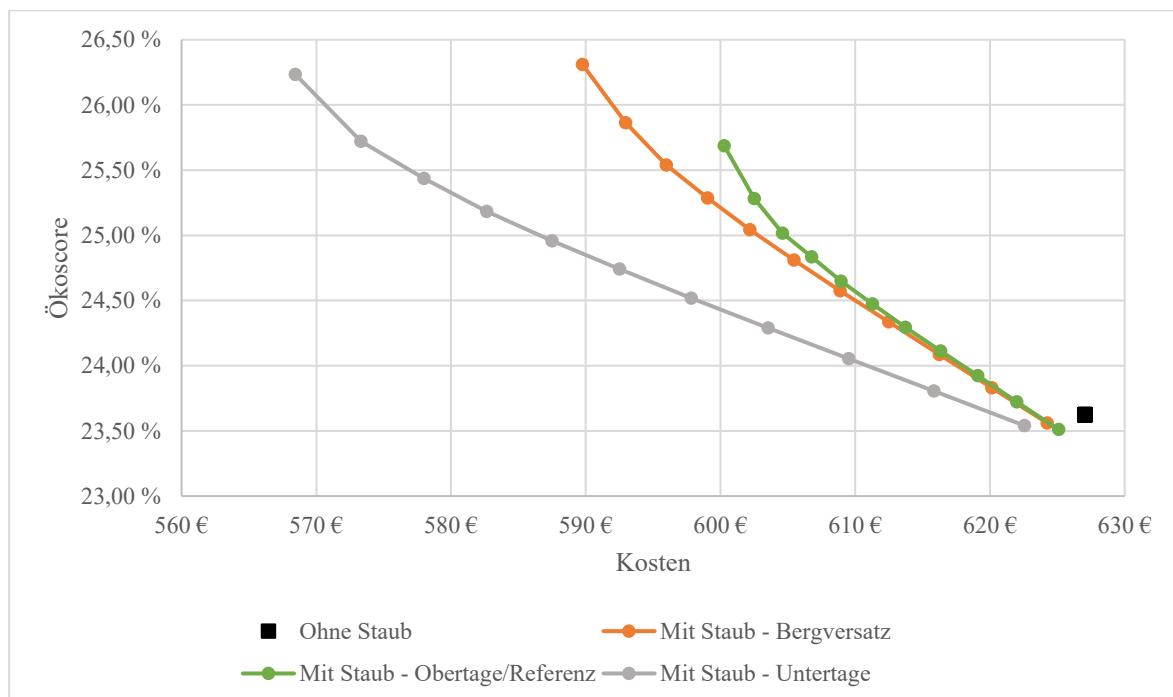


Abbildung 32: Trade-off bei Variierung der Beseitigungs-/Verwertungsmethode.

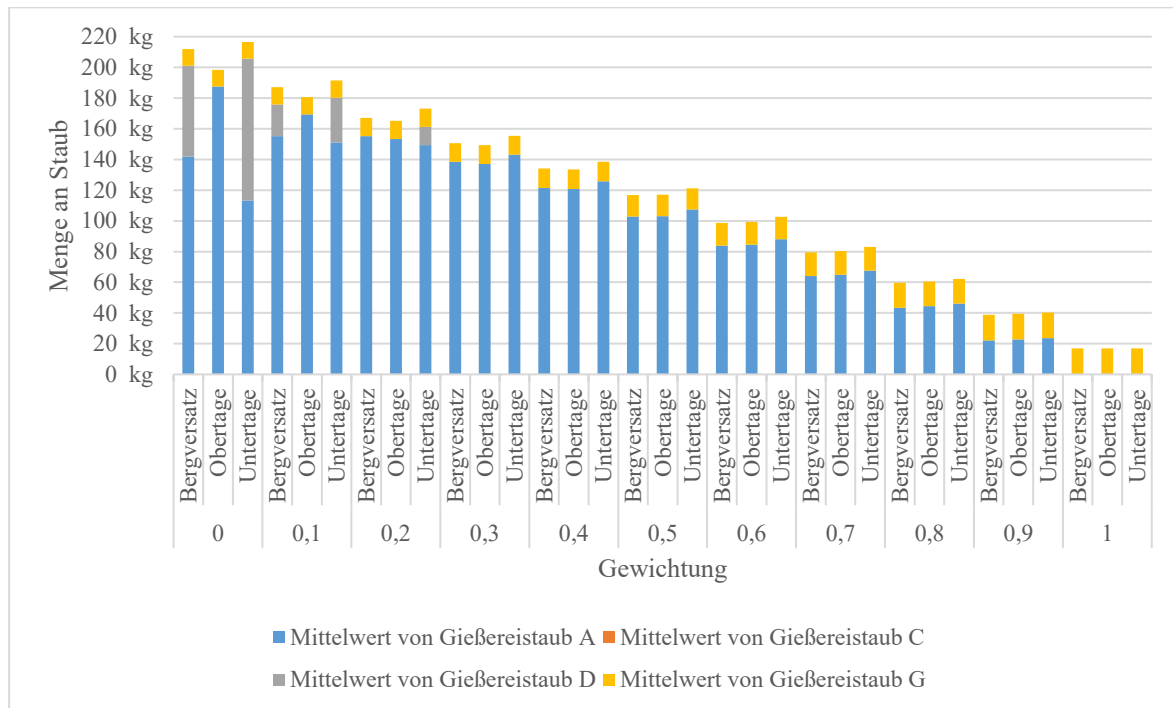


Abbildung 33: Staubmengen bei Variierung der Beseitigungs-/Verwertungsmethode.

#### 4.6 Einfluss der Berechnungsmethode der SiC-Umweltwirkungen

Die Sensitivitätsanalyse untersucht primär, wie die Berechnungsmethoden der SiC-Umweltwirkungen die Ergebnisse beeinflussen. Diese Rohstoffe nehmen im Vergleich zu anderen Formlingsbestandteilen eine dominante Rolle ein, da sie sowohl in großen Mengen verarbeitet sind als auch hohe spezifische Kosten und Umweltlasten aufweisen. Die Ergebnisse legen nahe, dass die gewählten SiC-Werte die Gesamtbewertung des Modells maßgeblich bestimmen. Um diese Abhängigkeit zu quantifizieren, variiert der folgende Abschnitt die Berechnungsgrundlagen und analysiert deren Auswirkungen auf die ökonomischen und ökologischen Zielgrößen. Im Übrigen gelten alle Spezifikationen des Referenzfalls aus Tabelle 11. Auch die Preise der SiC-Rohstoffe bleiben konstant, nur die Umweltwirkungen sind angepasst.

Tabelle 16 und Abbildung 34 fassen alle relevanten Werte zusammen. In allen Berechnungsmethoden liegt die maximale ökonomische Einsparung bei 4,3 %. Im Referenzfall führt die maximale ökonomische Einsparung zu einer Minderung des Ökoscores um 8,8 %. Die absolute Berechnungsmethode verschärft diesen Effekt. Bei identischer ökonomischer Einsparung verschlechtert sich der Ökoscore auf 10,1 %.

Ein gegenteiliges Bild zeigt die relative Anpassung der Berechnungsmethode. Zwar bleibt das ökonomische Potenzial mit 4,3 % Einsparung konstant, der negative Einfluss auf den Ökoscore reduziert sich drastisch auf 2,4 %. Diese Verschiebung ändert das Verhältnis der

beiden Zielgrößen grundlegend. Dennoch bleibt das Recycling der Stäube ökologisch überwiegend nachteilig.

Tabelle 16: Auswirkungen der SiC-Berechnungsmethode bei maximaler ökonomischer Gewichtung.

Berechnungsmethode	Veränderung der Kosten	Veränderung des Ökoscores	Verhältnis ökonomisch/ökologisch
Referenz	- 4,3 %	+ 8,8 %	- 0,49
Absolute Anpassung	- 4,3 %	+ 10,1 %	- 0,43
Relative Anpassung	- 4,3 %	+ 2,4 %	- 1,79

Anhang N schlüsselt die zugrundeliegenden Änderungen in der Materialzusammensetzung auf. Die Analyse zeigt, dass das Modell im Fall der „relativen“ Berechnungsmethode bei einer Gewichtung zwischen 0,1 und 0,9 eine höhere Menge an Gießereistaub im Formling zulässt als bei den anderen beiden Methoden. Der Einsatz hochwertigerer SiC-Rohstoffe kompensiert diesen Effekt. Das weniger strenge Verhältnis zwischen SiC-Gehalt und der daraus resultierenden Umweltwirkung begünstigt die Integration von Staub. Dies verbessert den Zielkonflikt zwischen Ökonomie und Ökologie massiv.

Zusammenfassend demonstrieren diese Ergebnisse eine hohe Sensitivität der getroffenen Aussagen gegenüber der gewählten Berechnungsart der SiC-Umweltwirkungen. Durch die Wahl anderer Emissionswerte sind auch positive ökologische Effekte über alle Gewichtungen hinweg realisierbar. Diese methodische Abhängigkeit stellt eine wesentliche Unbekannte im Projekt dar, deren Implikationen die Diskussion im weiteren Verlauf der Arbeit behandelt.

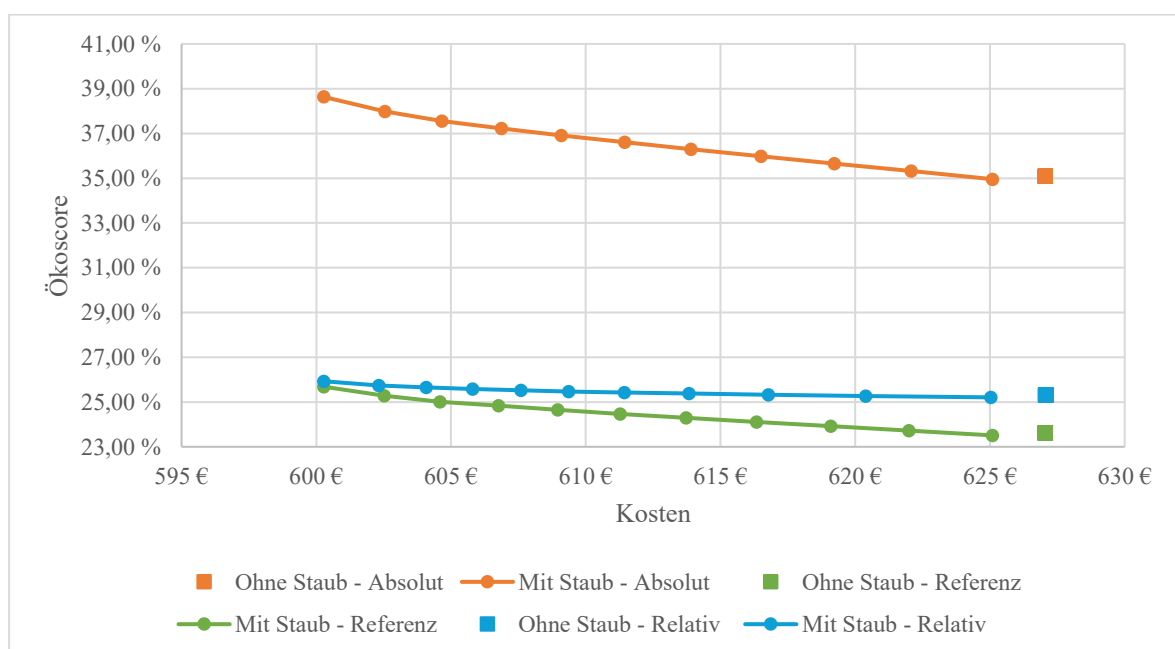


Abbildung 34: Trade-off bei Änderung der Berechnungsmethode für die Umweltwirkungen der SiC-Rohstoffe.

### 4.7 Sonderfälle

Einzelne Datensätze belegen Szenarien, in denen der Staubeinsatz über alle Parameter hinweg ökologische Vorteile erzielt. Abbildung 35 und Abbildung 36 zeigen Fälle mit wenig verfügbarer Restmenge im Formling und einer geringen Zielbasizität. In diesen Szenarien dominiert der Staubeinsatz, da Staub G Quarzsand verstärkt substituiert. Die ökonomischen und ökologischen Wirkungsbereiche fallen hier geringer als im Durchschnitt der untersuchten Fälle aus. Abbildung 35 zeigt auch das erste Mal, dass die Gewichtungen ohne Staub einen kleinen Einfluss auf das Endergebnis haben.

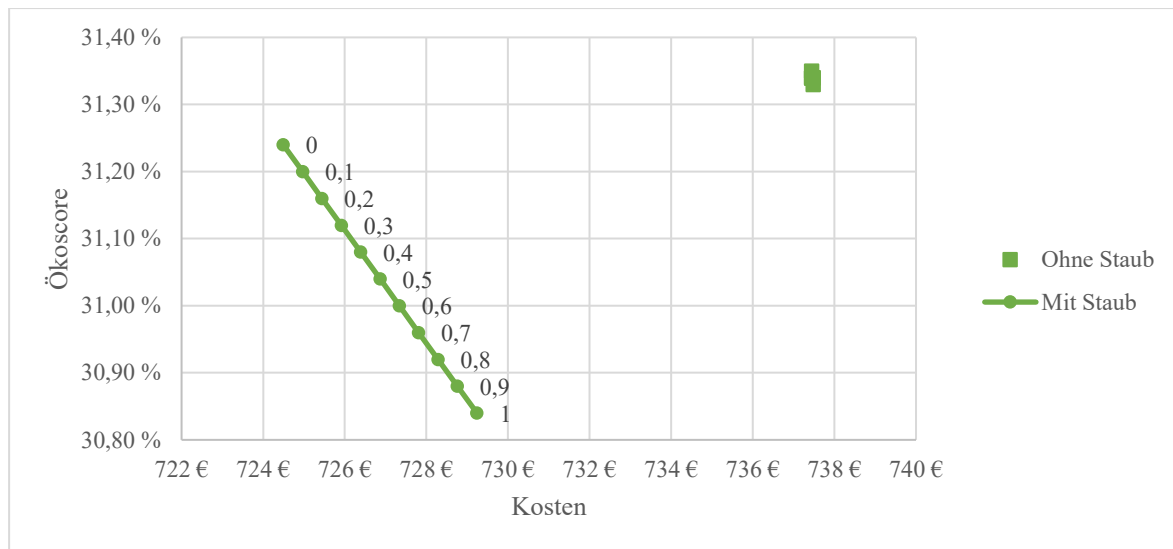


Abbildung 35: Trade-off bei SiC-Gehalt von 0,7; Basizität von 0,7; keinem Mangan; Obertagedeponierung und der Verfügbarkeit aller Stäube.

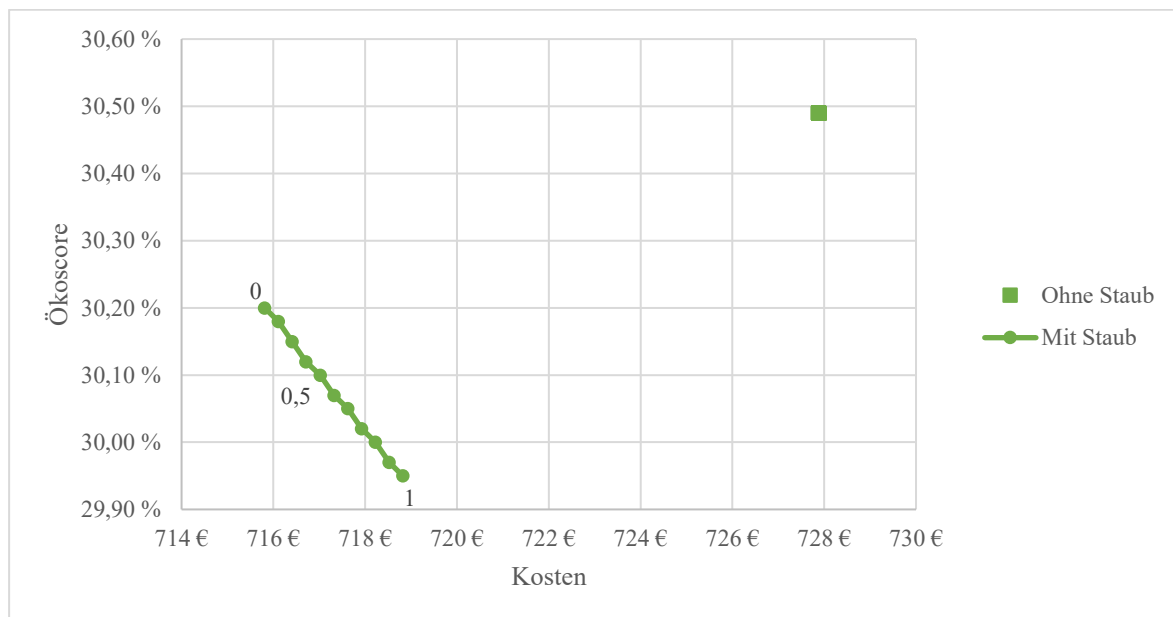


Abbildung 36: Trade-off bei SiC-Gehalt von 0,58; Basizität von 0,7; mit Mangan; Obertagedeponierung und der Verfügbarkeit aller Stäube.

#### 4.8 Nachträgliche Bewertung des Kohlenstoffgehalts von Stäuben

Laut Kapitel 3.2.1 erfolgt im Ergebnisteil eine Bewertung, welchen Einfluss die fehlende Berücksichtigung der Substitutionswirkung von Kohlenstoff im Staub hat.

Die höchste Einsatzmenge von Staub A beträgt 307 kg. Staub A weist einen Kohlenstoffgehalt von ca. 50 % auf, vergleiche Anhang G. Unter der Annahme von 100 % Kohlenstoff im Koks ergibt dies eine Ersparnis von 154 kg Koks. Dies macht am Umweltscore mit Ecoinvent-Daten eine Verbesserung von 1,57 Prozentpunkten aus. Da so hohe Staubmengen bei Fokus auf Ökonomie vorkommen, verbessert das den Umweltscore für stärkeren ökonomischen Fokus stark, aber nicht per se die Aussage, dass Stäube eher ökonomisch als ökologisch wirken.

Für den Referenzfall liegt das höchste absolute Delta des Ökoscores aktuell bei 2,07 Prozentpunkten bei einem Einsatz von 188 kg Staub A, siehe Tabelle 17. Durch die Berücksichtigung von Kohlenstoff sinkt die ökologische Verschlechterung von 8,8 % auf 4,7 %. Für die ökonomischen Auswirkungen liegen keine Preise vor. Jedoch erhöht sich die Einsparung, wodurch gilt, dass die Berücksichtigung von Kohlenstoff mindestens einen signifikanten positiven Einfluss auf den Ökoscore hat.

Tabelle 17: Auswirkungen der Berücksichtigung des Kohlenstoffgehalts im Staub im Referenzfall.

Methoden	Ergebnis [Gewichtung 0, mit Staub]	Ergebnis [Gewichtung 0, ohne Staub]	Relative Auswirkung des Staubeinsatzes
Ohne Berücksichtigung des Kohlenstoffs	Ökonomisch [€]: 600 (-27) Ökologisch [%]: 25,69 (+2,07)	Ökonomisch [€]: 627 Ökologisch [%]: 23,62	Ökonomisch: - 4,3 % Ökologisch: + <b>8,8 %</b>
Mit Berücksichtigung des Kohlenstoffs	Ökonomisch [€]: unbekannt Ökologisch [%]: 24,73 (+1,11)	Ökonomisch [€]: unbekannt Ökologisch [%]: 23,62	Ökonomisch: - 4,3 % oder besser Ökologisch: + <b>4,7 %</b>

Die Interaktivität des Systems bedingt weitere Abhängigkeiten. Die Integration des Kohlenstoffs steigert potenziell die Staubmengen über den gesamten Gewichtungshorizont, da der Algorithmus den ökonomischen und ökologischen Wert des Kohlenstoffs quantifiziert. Somit ändern sich die Werte der Zielfunktionen und die Trade-offs.

Abschließend sei noch eine Erkenntnis bezüglich des Einflusses der Wirkungskategorien erwähnt: Manuelle Untersuchungen zeigen die Dominanz von GWP, das oftmals über 95 % des Ökoscores beansprucht. ADP hat im Gesamtkontext sowohl absolut als auch gewichtet eine geringe Rolle.

## 5 Diskussion

Diese Arbeit stellt bereits einige Diskussionspunkte und Zusammenhänge im Rahmen des vorherigen Kapitels dar, um die Erkenntnisse daraus verständlich zu machen. Dieses Kapitel dient daher dazu, diese Erkenntnisse zu aggregieren, übergeordnete Hinweise aufzufassen und darzustellen, welche weiteren Bedarfe diese Arbeit aufdeckt.

Die Analyse der Rezepturen verdeutlicht das Spannungsfeld zwischen ökonomischen und ökologischen Zielsetzungen. Der Einsatz von Gießereistäuben erzielt ökonomische Vorteile, verschlechtert jedoch überwiegend die ökologische Bilanz. Dieser Effekt resultiert daraus, dass Stäube niederkonzentrierte SiC-Rohstoffe verdrängen. Da Stäube Volumen beanspruchen, aber nur geringe SiC-Mengen einbringen, substituiert das Modell diese durch höherkonzentrierte SiC-Träger, um die geforderten Mindestgehalte zu sichern. Deren nicht-lineare, überproportionale Umweltwirkungen belasten die ökologische Gesamtbilanz des Formlings.

Eine Ausnahme bildet der Einsatz von Staub G. Dieser substituiert primären Quarzsand in Szenarien mit geringem Restvolumen, verursacht durch hohe SiC- oder Mangengehalte. Dies geschieht vor allem bei niedriger Zielbasizität, da der Staub einen hohen SiO<sub>2</sub>-Gehalt und eine geringe Basizität aufweist. Daraus resultieren simultane ökonomische und ökologische Vorteile: Das Modell reduziert sowohl die Kosten als auch die Umweltwirkungen, primär durch die vermiedene Deponierung sowie den Ersatz des Primärrohstoffs. Die Ergebnisse widerlegen die Annahme eines universellen ökologischen Nutzens durch das Recycling der Stäube. Sie bestätigen jedoch das Potenzial, Primärrohstoffe wie Quarzsand in spezifischen Szenarien vorteilhaft zu substituieren.

Der folgende Abschnitt widmet sich der expliziten Beantwortung der Forschungsfragen und diskutiert anschließend die Limitationen des Modells. Insbesondere die Sensitivität der Ergebnisse gegenüber Datenänderungen, die sich bereits in der Analyse andeutete, ist kritisch beleuchtet.

### 5.1 Beantwortung der Forschungsfrage

Hinsichtlich der ersten Forschungsfrage zeigt sich, dass die Kombination aus Workshops, Expertengesprächen und der MoSCoW-Priorisierung die komplexen Anforderungen an ein MCDM-Recycling-Tool präzise definiert.

Der gewählte Ansatz einer linearen Programmierung mit Min-Max-Methode und Augmented-Tchebycheff-Skalarisierung übertrifft die in Vorversuchen genutzte Weighted-Sum-Methode. Er liefert die erwarteten Ergebnisse und identifiziert replizierbare, globale Optima.

Das entwickelte Tool über den MVP-Ansatz erfüllt die Bedürfnisse der Gießereien sowie des herstellenden Unternehmens der Formlinge und ermöglicht eine multifaktorielle Entscheidungsunterstützung, auch wenn es nicht für behördliche Nachweise oder Business Cases konzipiert ist. Dennoch liefert das Tool die notwendige Datenbasis, um durch weiterführende Analysen (bspw. mittels externer Softwarelösungen) allgemeingültige Aussagen abzuleiten und diese mit Kontextinformationen anzureichern.

Bezüglich der zweiten Forschungsfrage zum Einfluss der Spezifikationen ist festzuhalten: Die Spezifikationen beeinflussen die Ergebnisse in einer Bandbreite von marginal bis signifikant. Während die Basizität eine untergeordnete Rolle spielt, fungieren SiC- und Mangan-gehalte als wesentliche Treiber für Kosten und Umweltwirkungen. Für einen Referenzfall konnte quantifiziert werden, dass, im ökonomischen Extrem, Einsparungen von 4,3 Prozent möglich sind, die mit einer Erhöhung des Umweltscores um 8,8 Prozent einhergehen. Im ökologischen Extrem zeigen sich leichte ökologische Vorteile (0,47 Prozent) bei gleichzeitig geringen ökonomischen Einsparungen (0,32 Prozent). Diese Zahlen verdeutlichen die notwendigen Trade-offs. Generell sind die gefundenen Quantifizierungen nicht uneingeschränkt nutzbar, um finale Aussagen über die Auswirkungen des Recyclings zu treffen. Diese Einschränkungen sind in 5.3 dargelegt.

## **5.2 Kritische Reflexion des Entwicklungsprozesses**

Die Entwicklung des Entscheidungsunterstützungssystems mit einer agilen Methodik unter Nutzung des MoSCOW-Priorisierungsverfahrens und der Entwicklung eines MVP ist für das vorliegende Problem gut geeignet. Dieses Vorgehen ermöglicht ein direktes Testen der Funktionalitäten, wodurch das Projektteam frühzeitig ein tiefes System- und Prozessverständnis generiert und die Entwicklung zielführend steuert. Ein klassisches Wasserfallmodell hätte hier vermutlich zu späten Feedbackschleifen geführt und den Zeitplan gefährdet. Dennoch bedingt der iterative Ansatz, insbesondere in Kombination mit Excel, redundante Arbeitsschritte, da sich Anforderungen mehrfach ändern.

Die Wahl von Microsoft Excel als Umsetzungsplattform stellt einen Kompromiss dar. Für den Endanwendenden bietet die bekannte Umgebung den Vorteil einer schnellen Adaption und niedrigen Einstiegshürde. Das Tool wirkt vertraut, erst versteckte Arbeitsblätter und der VBA-Code zeigen die Komplexität. Technisch bietet Excel ausreichend Funktionen für die Modellierung, Berechnung und Visualisierung, wobei die Rechenzeit mit wenigen Sekunden pro Gewichtungsschritt sehr gering ausfällt. Aus Entwicklungssicht offenbaren sich Limitationen. Die gewählte Umgebung erfordert komplexe Datenhaltungen und Workarounds. Dies erhöht den Implementierungsaufwand im Vergleich zu dedizierten

Programmiersprachen wie Python. Zudem verbleibt ein Risiko für Bedienungsfehler, etwa durch falsche Schreibweisen neuer Rohstoffe, woraufhin diese nicht in der Erfüllung der Nebenbedingungen registriert sind. Mögliche logische Konflikte zwischen Datenbank-Verfügbarkeiten in der Datentabelle und Mindestmengen aus den NBs resultieren in generischen Fehlercodes. Dennoch sind für die kritischsten Fehlerquellen Überprüfungen oder Hinweise in VBA oder Excel selbst hinterlegt, um die Wahrscheinlichkeit dieser zu reduzieren.

### **5.3 Kritische Reflexion des Modells und der Datenbasis**

Das mathematische Modell unterliegt spezifischen Einschränkungen. Eine explizite Nebenbedingung für die Festigkeit der Formlinge fehlt aufgrund mangelnder Datenlage, siehe Kapitel 3.2.4. Ein konstanter Zementgehalt gewährleistet die erforderliche Festigkeit. Dies bedeutet, dass das Modell keine Aussage darüber trifft, wie sich variierende Staubanteile realmechanisch auf die Festigkeit auswirken. Zudem ist das Modell streng linear ausgelegt, was Erweiterungen um nicht-lineare Zusammenhänge erschwert. Sind also im späteren Projektverlauf mehr Daten zur Festigkeit verfügbar und die daraus generierte Nebenbedingung nicht linearisierbar, muss der Simplex-Algorithmus des Excel-Solvers einem Algorithmus für nichtlineare Optimierungsprobleme weichen. Da der Standard Solver dafür nur den GRG-nichtlinear oder Evolutionären Algorithmus zur Verfügung stellt, die nicht zwingend globale Optima finden, erfordert eine Modelländerung dann ein externes Add-In und Änderungen im VBA-Code. Diese Add-Ins sind bislang aufgrund der IT-Abteilungen der Gießereien ausgeschlossen.

Die Aggregation der Umweltwirkungen zu einem einzigen Ökoscore birgt das Risiko von Fehlinterpretationen. Ein Anstieg des Scores von 30 auf 32 Prozentpunkte erscheint marginal, entspricht bei einer mittleren Gießerei mit einem Jahresbedarf von 2.400 t SiC-Formlingen jedoch der jährlichen Emissionsmenge von rund 48 Personen. Diese 2.400 t entstehen bei einer produzierten Menge von 80.000 t Gusseisen und dem Bedarf von 30 kg SiC-Formling pro Tonne Gusseisen, siehe 2.1.3. Wenn nun alle Gießereien mit Kupolöfen dieses Recycling betreiben, verstärkt sich dies über den Skaleneffekt. Entscheidungsbefugte stützen ihre Wahl bezüglich des Staubrecyclings idealerweise auf die Gesamtbedarfe der jeweiligen Spezifikation sowie die daraus resultierenden ökonomischen und ökologischen Gesamteffekte. Die daraus entstehenden Dimensionen sind besser vergleichbar als bei Beschränkung auf eine Formlingsrezeptur mit 962 kg.

Hinsichtlich der Optimierungsgüte stellt sich das „Orakel-Problem“. Die Verifizierung des Modells – die Prüfung auf Einhaltung aller Nebenbedingungen – erfolgt problemlos. Die Validierung des globalen Optimums bleibt mangels Referenzdaten jedoch theoretisch. Diese

Referenzdaten bestätigen bei einem Ergebnisabgleich, dass die gefundene Lösung tatsächlich optimal ist. Rein aus der mathematischen Theorie spricht alles dafür, dass dies so ist. Es fehlen Daten, um dies endgültig zu bestätigen.

Bezüglich der gewählten Systemgrenzen zeigt sich anhand der Ergebnisse, dass die Berücksichtigung des Kohlenstoffanteils doch einen starken Einfluss auf die Endergebnisse aufweisen kann. Daher gilt als Erstes zu klären, inwiefern Kohlenstoff gebunden im SiC-Formling und bei einer Zugabe von 3 % pro Tonne Gusseisen aktiv dafür sorgt, dass die Gießereien im Kupolofen weniger Koks zugeben. Bestünde diese Substitution lediglich theoretisch, entfällt die Grundlage für eine Anrechnung des Effekts.

Die größte Unsicherheit der Arbeit liegt in der Datenbasis. Die Sensitivität der Ergebnisse gegenüber Preisannahmen für Entsorgung und Verwertung ist hoch. Zudem sind alle Stäube immer einer Entsorgungs-/Verwertungsmethode zugeordnet, statt zu differenzieren, wie das in der Realität möglicherweise ist. Hierfür gab es keine Zuordnung der Gießereien, somit war eine Zuweisung nicht möglich.

Noch gravierender wirkt sich die Unsicherheit bei der Berechnung der Umweltwirkungen der SiC-Rohstoffe aus. Da kaum akademische Daten verfügbar sind, basiert die Berechnung der Umweltwirkungen in Abhängigkeit des SiC-Gehalts auf geringer Datenbasis, siehe 3.2.2. Diese Berechnungsmethode ist – wie die Ergebnisse zeigen – ein entscheidender Hebel für die ökologische Bewertung. Eine Änderung dieser Datengrundlage kann die zentrale Aussage revidieren, dass Stäube ökologisch nachteilig wirken.

#### **5.4 Ausblick**

Die Untersuchungen zeigen, dass das Tool funktioniert und die Ergebnisse liefert, die es soll. Dennoch gibt es diverse Möglichkeiten und Bedarfe, die Daten zu verfeinern oder auch das Tool zu erweitern.

1. Prüfung der Berechnungsmethode der Umweltwirkungen der SiC-Rohstoffe

Zukünftige Untersuchungen müssen prüfen, ob die aktuelle Berechnung die Realität trotz geringer Datenlage korrekt abbildet oder ob es bessere Methoden gibt, die Umweltwirkungen zuzuordnen. Durch den hohen Impact auf den ökologischen Score ist dies essenziell.

2. Stochastische Erweiterung für unsichere ökologische Auswirkungen

Bei fortbestehender Unsicherheit der SiC-Umweltwirkung integriert eine stochastische Erweiterung des Tools diese Datenunsicherheiten in das Modell. Dafür benötigt es aber explizitere Informationen über die mathematische Form der vorliegenden Unsicherheiten.

3. Bewertung der Nutzbarkeit von freiem Kohlenstoff im Staub

Anhand des Wissens, ob und wie freier Kohlenstoff aus Stäuben den Koksverbrauch im Kuppelofen reduziert, kann das Projektteam das Tool um die ökonomische und ökologische Wirkung des Kohlenstoffs erweitern. Dies hat einen positiven Einfluss auf die (ökologische) Bewertung der Stäube und ändert die Trade-offs. Hierbei ist zu beachten, dass sich die Gewichtsprozent aus der XRF-Analyse in Anhang F und die Analyse des SiC- sowie Kohlenstoffgehalts in Anhang G auf 100 % aufsummieren, sodass sich korrekte Anteile im Tool wiederfinden.

#### 4. Ableitung der übergeordneten Einflussfaktoren

Derzeit fehlen Daten zu jährlichen Produktionsmengen spezifischer Produktspezifikationen. Mit diesen kann eine entscheidungsberechtigte Person berechnen, wie hoch der ökonomische und ökologische Einfluss des Staubrecyclings gesamtheitlich ist und entscheiden, ob das Staubrecycling in SiC-Formlingen als sinnvoll zu erachten ist.

#### 5. Zuordnung für die Stäube

Für jeden der Stäube sollen die Gießereien die spezifischen Kosten sowie Entsorgungswege nennen. Aktuell sind diese für alle Stäube jeweils gleich. Die Analyse verdeutlicht, dass Preise und Zuordnungen die Ergebnisse maßgeblich determinieren. Belastbare Aussagen über reale Auswirkungen erfordern präzise Primärdaten, die zum aktuellen Zeitpunkt nicht vorliegen.

#### 6. Realtests und Bewilligungen

Soll die Nutzung von Stäuben in SiC-Formlingen weiter forciert werden, müssen Tests mit den Rezepturen des Tools durchgeführt werden. Zudem muss potenziell eine Bewilligung des Recyclings von Behörden erwirkt werden, die in einem Business Case zu berücksichtigen ist.

#### 7. Festigkeit berücksichtigen

Beeinflussen die Gießereistäube die mechanische Festigkeit der SiC-Formlinge positiv, sinkt der Bedarf an Bindemittel. Diese Einsparung verbessert die ökologische Bewertung des Produkts. Da der aktuell auf 14 % fixierte Zementgehalt lediglich 0,7 Prozentpunkte des Ökoscores beansprucht, verändert eine Zementreduktion das Ergebnis nicht signifikant.

#### 8. Erweiterung des Tools um Umweltwirkungskategorien

Das Tool lässt sich auf alle 16 Umweltwirkungskategorien des Product Environmental Footprint erweitern. Hat man die Umweltwirkungen aus Ecoinvent oder anderen Datenbanken, ist der Arbeitsaufwand in Excel sehr überschaubar und in unter einer Stunde alles angepasst, um die Umweltimpacts noch umfassender zu berechnen.

## 6 Zusammenfassung

Diese Arbeit präsentiert ein Software-Tool. Dieses generiert Rezepturen für SiC-Formlinge mit und ohne Verwendung von Gießereistäuben. Hierbei bezieht es die individuellen ökologischen und ökonomischen Gewichtungen von Gießereien ein.

Ein lineares MCDM-Modell bildet das ökonomisch-ökologische Optimierungsproblem mittels Min-Max-Methode und Augmented-Tchebycheff-Skalarisierung ab. Workshops, Interviews mit Fachkundigen und digitale Miro-Boards dienen dazu, die Anforderungen an das Tool systematisch zu erfassen. Die MoSCoW-Matrix ist ausreichend, um diese dabei oder anschließend zu priorisieren.

Die Entwicklung eines Minimum Viable Product beschleunigt das Verständnis der Modell- und Prozesseigenschaften. Dieser agile Ansatz fördert die kontinuierliche Erprobung und Optimierung. Neue Anforderungen führen jedoch zu zeitintensiven Anpassungen. Inwiefern ein striktes Wasserfallmodell das Projektergebnis beeinflusst hätte, bleibt hypothetisch.

Die Ergebnisse zeigen starke Sensitivitäten für die gewählten Daten. Speziell die Berechnung der Umweltwirkungen über die SiC-Gehalte der Rohstoffe limitiert die Aussagekraft der Ergebnisse. Die geringe akademische Datenlage erschwert die Berechnung und verdeutlicht die bestehenden Forschungslücken in diesem Bereich. Des Weiteren schränken vor allem die fehlenden Zuordnungen von Einzelstäuben auf Entsorgungs-/Verwertungsmethoden sowie deren fehlende Realpreise die Belastbarkeit ein.

Für die vorliegenden Daten belegen die Ergebnisse primär ökonomische Vorteile durch den Einsatz der Gießereistäube, die mit erhöhten Umweltwirkungen einhergehen. In Einzelfällen sinken sowohl die Kosten als auch die Umweltwirkungen im Vergleich zur staubfreien Referenz. Diese gehen allerdings mit sehr geringen absoluten und relativen Auswirkungen für beide Zieldimensionen einher. Ökologische Verbesserungen zur staubfreien Referenz resultieren insbesondere aus spezifischen Randbedingungen. Eine positive ökologische Wirkung entfaltet sich in Szenarien, in denen die Rezeptur durch strikte Spezifikationen limitiert ist. Erfordert die Zielzusammensetzung einen hohen Anteil an SiC oder das Vorkommen von Mangan, verringert dies das verfügbare Massenvolumen für weitere Zuschlagstoffe. In dieser Konstellation steuert das MCDM-Modell die geforderte Basizität nicht mehr ausschließlich über die Variation der SiC-Rohstoffe, sondern muss auf Quarzsand als Primärrohstoff zurückgreifen.

Hierbei nimmt Staub G eine funktionale Schlüsselrolle ein. Zum einen substituiert er Quarzsand aufgrund seines hohen  $\text{SiO}_2$ -Gehalts ideal. Zum anderen bringt er ökonomische sowie ökologische Gutschriften durch die vermiedene Deponierung ein. Dadurch ermöglicht er in diesen eng definierten Grenzfällen einen positiven Effekt auf beide Zielfunktionen. Dies gilt

verstärkt für Rezepturen, die eine geringe Zielbasizität verlangen. Staub G fungiert somit als ökologischer Spezialist, der Ressourceneffizienz in technisch anspruchsvollen Mischungsverhältnissen sicherstellt.

Im Gegensatz dazu etabliert sich Staub A als dominante Universalkomponente. Aufgrund seiner ausgewogenen Eigenschaften und des SiC-Gehalts greift der Algorithmus am häufigsten auf diesen Rohstoff zurück, wodurch er die Basis der Rezepturen bildet. Ergänzend hierzu wirkt Staub D als ökonomischer Hebel. Durch seine für Stäube hohe Basizität und den geringen SiO<sub>2</sub>-Anteil erlaubt dieser Staub ab einer gewissen Schwelle eine Erhöhung der Gesamteinsatzmenge an Staub. Staub D optimiert folglich die Wirtschaftlichkeit der Mischung, wenn der Fokus auf ökonomischer Optimierung liegt.

Staub C besitzt keine Relevanz für die Optimierung. Dessen chemische Eigenschaften, insbesondere eine im Vergleich zu Staub G nur geringfügig höhere Basizität bei deutlich niedrigerem SiO<sub>2</sub>-Gehalt, bieten keinen algorithmischen Mehrwert. Das Modell bevorzugt in sämtlichen Szenarien alternative Stäube, weshalb Staub C obsolet ist. Die Kernerkenntnisse sind Tabelle 18 zu entnehmen.

Tabelle 18: Zusammenfassung der Wirkung der betrachteten Stäube.

Staubtyp	Primäre Funktion	Einsatzszenario	Treiber
Staub A	Universal-Komponente	Standard-Rezepturen	SiC-Gehalt
Staub C	Ohne Relevanz	-	-
Staub D	Ökonomischer Spezialist	Hoch-Basizität-Szenarien und starker ökonomischer Fokus	Kostenreduktion
Staub G	Ökologischer Spezialist	Platzkritische Rezepturen (Substitut für Quarzsand)	Ressourcen-Effizienz

Diese Arbeit empfiehlt abschließend folgende drei Maßnahmen. Zunächst sind die Umweltwirkungen der SiC-Rohstoffe bezogen auf ihren SiC-Gehalt zu prüfen. Zu klären ist, ob die aktuelle Berechnungsmethode die Realität korrekt abbildet. Gleichzeitig ist abzustimmen, ob der Kohlenstoff aus dem Staub im Kupolofen realistisch Koks substituiert und dessen Effekte ins Tool zu integrieren. Abschließend ist zu untersuchen, wie die monetären und ökologischen Gesamteffekte mit realen Produktionsmengen ausfallen. Auf diesen Informationen ist zu entscheiden, ob die Kreislaufführung von Gießereistäuben in SiC-Formlingen weiterhin eine valide Option darstellt. Das entsprechende Softwaretool zur Generierung der hierfür notwendigen Informationen existiert nun.

## 7 Literaturverzeichnis

- Abolpour, B. & Shamsoddini, R. (2022). A Numerical Investigation of SiC Production from SiO<sub>2</sub> and Carbon in an Industrial Scale. *Chemical Process Design*, 1(1), 43–58. <https://doi.org/10.22111/cpd.2022.43514.1008>
- Adenowo, A. A. A. & Adenowo, B. A. (2013). Software engineering methodologies: a review of the waterfall model and object-oriented approach. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4(7), 427–434.
- Ahlroth, S. (2014). The use of valuation and weighting sets in environmental impact assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 85, 34–41. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.11.012>
- Ahmad, J., Zhou, Z., Martínez-García, R., Vatin, N. I., de-Prado-Gil, J. & El-Shorbagy, M. A. (2022). Waste Foundry Sand in Concrete Production Instead of Natural River Sand: A Review. *Materials (Basel, Switzerland)*, 15(7). <https://doi.org/10.3390/ma15072365>
- Alhenawi, E., Awawdeh, S., Khurma, R. A., García-Arenas, M., Castillo, P. A. & Hudaib, A. (2024, 20. Februar). *Choosing a Suitable Requirement Prioritization Method: A Survey*. <https://arxiv.org/pdf/2402.13149>
- Aries, E., Chronopoulos, G., Schorcht, F. & Roudier, S. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Smitheries and Foundries Industry (SF BREF). 1831-9424. Vorab-Onlinepublikation. <https://doi.org/10.2760/4805267>
- Bafail, O. A. & Abdulaal, R. M. (2021). New approach for selecting a suitable recycling collection program for recovered paper and pulp recyclables using AHP-TOPSIS techniques. *Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, 39(11), 1406–1413. <https://doi.org/10.1177/0734242X21994903>
- Balzert, H. (2011). *Lehrbuch der Softwaretechnik: Entwurf, Implementierung, Installation und Betrieb* (3. Aufl. 2012). Spektrum Akademischer Verlag. <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1566645> <https://doi.org/10.1007/978-3-8274-2246-0>
- Beckmann, M., Künzi, H. P., Hwang, C.-L. & Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making* (Bd. 186). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>

- Bühning-Polaczek, A., Michaeli, W. & Spur, G [Günther]. (2014). *Handbuch Urformen. Edition Handbuch der Fertigungstechnik*. Hanser. <http://www.hanser-elibrary.com/isbn/978-3-446-42035-9>
- Chen, W., Wiecek, M. M. & Zhang, J. (1999). Quality Utility—A Compromise Programming Approach to Robust Design. *Journal of Mechanical Design*, 121(2), 179–187. <https://doi.org/10.1115/1.2829440>
- Christian Strakos. (2023). *Charakterisierung, Entwicklung und Analyse von Aufbereitungs- und Verwertungsmethoden für Gießereistäube sowie Modellierung zur Quantifizierung ökologischer Nachhaltigkeit* [Doctoralthesis, Universität Augsburg]. BibTeX.
- Dehoust, G., Neles, J., Schüler, D. & Schmidt, G. (2007). *Methodenentwicklung für die ökologische Bewertung der Entsorgung gefährlicher Abfälle unter und über Tage und Anwendung auf ausgewählte Abfälle*. <https://www.oeko.de/oekodoc/730/2007-110-de.pdf>
- Dekker, R., Bloemhof, J. & Mallidis, I. (2012). Operations Research for green logistics – An overview of aspects, issues, contributions and challenges. *European Journal of Operational Research*, 219(3), 671–679. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.11.010>
- Demin, D. (2025). Optimization of parameters of the cupola melting by the criterion of the maximum cast iron temperature. *EUREKA: Physics and Engineering*(2), 158–165. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2025.003712>
- Deutsche Energie-Agentur GmbH (Hrsg.). (2021). *Systematisch Energieeffizienz steigern und CO2-Emissionen senken in der Gießerei-Industrie*. [https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/LEITFADEN\\_Systematisch\\_Energieeffizienz\\_steigern\\_und\\_CO2-Emissionen\\_senken\\_in\\_der\\_Giesserei-Industrie.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/LEITFADEN_Systematisch_Energieeffizienz_steigern_und_CO2-Emissionen_senken_in_der_Giesserei-Industrie.pdf)
- Edalati, K., Akhlaghi, F. & Nili-Ahmadabadi, M. (2005). Influence of SiC and FeSi addition on the characteristics of gray cast iron melts poured at different temperatures. *Journal of Materials Processing Technology*, 160(2), 183–187. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.06.007>
- Emmerich, M. T. M. & Deutz, A. H. (2018). A tutorial on multiobjective optimization: fundamentals and evolutionary methods. *Natural Computing*, 17(3), 585–609. <https://doi.org/10.1007/s11047-018-9685-y>
- European Commission. (2022a). *Understanding Product Environmental Footprint and Organisation Environmental Footprint methods*. Publications Office. <https://doi.org/10.2760/11564>

- European Commission (Hrsg.). (Juli 2022b). *Developer Environmental Footprint (EF): Environmental Footprint reference packages*. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/developerEF.html>
- The European Foundry Association (Hrsg.). (November 2024). *The European Foundry Industry in 2023*. Düsseldorf. [https://eff-eu.org/wp-content/uploads/2024/12/CAEF-Co7\\_2023-complete.pdf](https://eff-eu.org/wp-content/uploads/2024/12/CAEF-Co7_2023-complete.pdf)
- Eurostat (Hrsg.). (Juli 2025). *Final energy consumption in industry - detailed statistics*. [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Final\\_energy\\_consumption\\_in\\_industry\\_-\\_detailed\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Final_energy_consumption_in_industry_-_detailed_statistics)
- Fararah, E., Abouel Nasr, E. & Abbas Mahmoud, H. (2023). MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION MODELING OF INTEGRATED SUPPLY CHAIN FOR SOLID WASTE TREATMENT. *International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice*, 30(1). <https://doi.org/10.23055/ijietap.2023.30.1.8647>
- Fefi. (2009). *Kupolofen*. Zugriff am 14. November 2025, verfügbar unter <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kupolofen.jpg> & <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode>
- Foundry Technologies & Engineering GmbH (Hrsg.). (2025, 14. November). *Zustellung*. <https://www.giessereilexikon.com/giesserei-lexikon/Encyclopedia/show/zustellung-1054/?cHash=25fc74e53130de3b35a0741a4b5c1058>
- Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. & Olsen, S. I. (Hrsg.). (2018). *Life cycle assessment: Theory and practice*. Springer. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6312187>
- Hillier, F. S. & Lieberman, G. J. (2024). *Introduction to operations research* (2024 release, international student edition). McGraw Hill LLC.
- ISO, I. S. (2006). 14040 International standard. *Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework*.
- Kaplinski, O., Peldschus, F., Nazarko, J., Kaklauskas, A. & Baušys, R. (2019). MCDM, operational research and sustainable development in the trans-border Lithuanian–German– Polish co-operation. *Engineering Management in Production and Services*, 11(2), 7–18. <https://doi.org/10.2478/emj-2019-0007>
- Karat, J., Vanderdonckt, J., Lieberman, H., Paternò, F. & Wulf, V. (Hrsg.). (2006). *End User Development* (Bd. 9). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/1-4020-5386-X>

- Kazakevich, B. & Joiner, K. (2024). Agile approach to accelerate product development using an MVP framework. *Australian Journal of Multi-Disciplinary Engineering*, 20(1), 1–12. <https://doi.org/10.1080/14488388.2023.2266164>
- Ko, A. J., Abraham, R., Beckwith, L., Blackwell, A., Burnett, M., Erwig, M., Scaffidi, C., Lawrance, J., Lieberman, H., Myers, B., Rosson, M. B., Rothermel, G., Shaw, M. & Wiedenbeck, S. (2011). The state of the art in end-user software engineering. *ACM Computing Surveys*, 43(3), 1–44. <https://doi.org/10.1145/1922649.1922658>
- Koski, J. (1984). Multicriterion optimization in structural design. In E. Atrek (Hrsg.), *A Wiley-Interscience publication. New directions in optimum structural design: Proceedings of the 2. International Symposium on Optimum Structural Design was held on 19 - 22 October 1981 on the campus of the University of Arizona, Tucson* (S. 483–503). Wiley.
- Koski, J. & Silvennoinen, R. (1987). Norm methods and partial weighting in multicriterion optimization of structures. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 24(6), 1101–1121. <https://doi.org/10.1002/nme.1620240606>
- Kranert, M. & Cord-Landwehr, K. (2010). Stoffstrommanagement und Ökobilanzen. In M. Kranert & K. Cord-Landwehr (Hrsg.), *Einführung in die Abfallwirtschaft* (S. 519–545). Vieweg+Teubner. [https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9681-0\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9681-0_12)
- Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG). <https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/>
- Kumar, P. V. & Gupta, G. S. (2002). Study of formation of silicon carbide in the Acheson process. *Steel Research*, 73(2), 31–38. <https://doi.org/10.1002/srin.200200170>
- Kunwar, R. & Sapkota, H. P. (2022). Introduction to Linear Programming Problems with Some Real-Life Applications. *European Journal of Mathematics and Statistics*, 3(2), 21–27. <https://doi.org/10.24018/ejmath.2022.3.2.108>
- Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (Hrsg.). (1996). *Handbuch Abfall 1: Untersuchung von Eisen- und NE-Metallgießereien*. Branchengutachten.
- Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (Hrsg.). (2009). *Abfallsteckbrief "1009 Eisen- und Stahlgießereien"*. ABAG-itm GmbH. [https://www.abfallbewertung.org/repgen.php?report=ipa&char\\_id=1009\\_Eisen&lang\\_id=de&avv=&synon=&kapitel=7&gtactive=no](https://www.abfallbewertung.org/repgen.php?report=ipa&char_id=1009_Eisen&lang_id=de&avv=&synon=&kapitel=7&gtactive=no)
- Lenarduzzi, V. & Taibi, D. MVP Explained: A Systematic Mapping Study on the Definitions of Minimal Viable Product. In *2016 42th Euromicro Conference* (S. 112–119). <https://doi.org/10.1109/SEAA.2016.56>
- Mankaa, R. N., Traverso, M. & Zhou, Y. (2024). A new life cycle impact assessment methodology for assessing the impact of abiotic resource use on future resource

- accessibility. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 29(1), 116–131. <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02229-y>
- Marler, R. T. & Arora, J. S. (2004). Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 26(6), 369–395. <https://doi.org/10.1007/s00158-003-0368-6>
- Miettinen, K. (1998). *Nonlinear Multiobjective Optimization* (1. Aufl.). *International Series in Operations Research and Management Science Ser: v.12*. Springer. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=3081836>
- Mombelli, D., Mapelli, C., Dall'Osto, G., Tavčar, G., Kocjančič, R., Radulović, D., Ristović, I., Ciszewski, M., Kastivnik, J., Mladenovic, A., Mauko Pranjić, A. & Košir, M. (2024). EIT Raw Materials RIS-DustRec: investigation and selection of furnace dust samples for valuable metals recovery. *La Metallurgia Italiana*, 115, 8–23.
- Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T. & Zhang, H. (2013). Anthropogenic and natural radiative forcing. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]* (S. 659–740). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.018>
- Nagy, M., Mansour, Y. & Abdelmohsen, S. (2020). Multi-Objective Optimization Methods as a Decision Making Strategy. *International Journal of Engineering Research and*, 19(03). <https://doi.org/10.17577/IJERTV9IS030480>
- Odu, G. O. (2013). Review of Multi-criteria Optimization Methods – Theory and Applications. *IOSR Journal of Engineering*, 3(10), 1–14. <https://doi.org/10.9790/3021-031020114>
- Olsen, D. (2015). *The lean product playbook: How to innovate with minimum viable products and rapid customer feedback*. Wiley. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=4040191>
- Panneerselvam, R. (2023). *OPERATIONS RESEARCH*. PHI LEARNING.
- Petropoulos, F., Laporte, G., Aktas, E., Alumur, S. A., Archetti, C., Ayhan, H., Battarra, M., Bennell, J. A., Bourjolly, J.-M., Boylan, J. E., Breton, M., Canca, D., Charlin, L., Chen, B., Cicek, C. T., Cox, L. A., Currie, C. S., Demeulemeester, E., Ding, L., . . . Zhao, X. (2024). *Operational Research: methods and applications*.

- Journal of the Operational Research Society*, 75(3), 423–617.  
<https://doi.org/10.1080/01605682.2023.2253852>
- Pramanik, P. K. D., Biswas, S., Pal, S., Marinković, D. & Choudhury, P. (2021). A Comparative Analysis of Multi-Criteria Decision-Making Methods for Resource Selection in Mobile Crowd Computing. *Symmetry*, 13(9), 1713.  
<https://doi.org/10.3390/sym13091713>
- Rabbani, M., Heidari, R. & Yazdanparast, R. (2019). A stochastic multi-period industrial hazardous waste location-routing problem: Integrating NSGA-II and Monte Carlo simulation. *European Journal of Operational Research*, 272(3), 945–961.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.07.024>
- Raković, L. (2019). A framework for managing spreadsheet-based end user applications. *International Journal of Management and Decision Making*, 18(1), Artikel 96695, 76. <https://doi.org/10.1504/IJMDM.2019.096695>
- Rao, S. S. & Freiheit, T. I. (1991). A Modified Game Theory Approach to Multiobjective Optimization. *Journal of Mechanical Design*, 113(3), 286–291.  
<https://doi.org/10.1115/1.2912781>
- Reeb, J. E. & Leavengood, S. (1998). Using the Simplex Method to Solve Linear Programming Maximization Problems. *Performance Excellence in the Wood Products Industry*. <https://ir.library.oregonstate.edu/xmlui/bitstream/handle/1957/20086/em8720-e.pdf>
- Roesch, A., Sala, S [Serenella] & Jungbluth, N. (2020). Normalization and weighting: the open challenge in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(9), 1859–1865. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01790-0>
- Ruetten (2006). APPLICATION OF THE WAELZ TECHNOLOGY ON RESOURCE RECYCLING OF STEEL MILL DUST BY. *GDMB*, 35.
- Saetta, S. & Fratta, G. (2025). Waste Management in Foundries: The Reuse of Spent Foundry Sand in Compost Production—State of the Art and a Feasibility Study. *Sustainability*, 17(13), 6004. <https://doi.org/10.3390/su17136004>
- Sala, S [S.], Cerutti, A. & Pant, R. (2017). Development of a weighting approach for the Environmental Footprint. 1018-5593. Vorab-Onlinepublikation.  
<https://doi.org/10.2760/945290>
- Sánchez, A. V., Bulos, R. G., Prince, J. C., Zárata, A. & Gijón, M. A. (2025). Energetic Analysis for the Improvement of a Cupola Furnace. *Engineering Proceedings*, 86ff.  
<https://doi.org/10.3390/engproc2025104086>

- Schnurrenberger, N. (2024). *Recycling von Gießereistäuben in SiC-Formlingen* [Bachelorarbeit]. Universität Augsburg, Augsburg.
- Sotoudeh-Anvari, A. (2022). The applications of MCDM methods in COVID-19 pandemic: A state of the art review. *Applied soft computing*, 126, 109238. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109238>
- Spur, G [Günter], Michaeli, W. & Bührig-Polaczek, A. (2014). *Handbuch Urformen*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. <https://doi.org/10.1007/978-3-446-43406-6>
- SS&C Technologies (Hrsg.) (2006). *Normalization and other topics in multi-objective optimization*. <https://miis.maths.ox.ac.uk/233/1/fmipw1-6.pdf>
- Stallkamp, C., Steins, J., Ruck, M., Volk, R. & Schultmann, F. (2022). Designing a Recycling Network for the Circular Economy of Plastics with Different Multi-Criteria Optimization Approaches. *Sustainability*, 14(17), 10913. <https://doi.org/10.3390/su141710913>
- Stawarz, M., Kajzer, W., Kajzer, A. & Dojka, M. (2017). Physicochemical Properties of Silicon Cast Iron. *Archives of Foundry Engineering*, 17(2), 101–106. <https://doi.org/10.1515/afe-2017-0059>
- Stefana, E., Cocca, P., Marciano, F., Rossi, D. & Tomasoni, G. (2019). A Review of Energy and Environmental Management Practices in Cast Iron Foundries to Increase Sustainability. *Sustainability*, 11(24), 7245. <https://doi.org/10.3390/su11247245>
- Strakos, C., Schäfer, H., Bauer, E., Marx, C., Gottlieb, A. & Richard Weihrich, R. (2022). Wiederverwertung von Gießereistäuben durch Einarbeitung in SiC-Formlinge. *MÜLL und ABFALL*. Vorab-Onlinepublikation. <https://doi.org/10.37307/j.1863-9763.2022.02.07>
- Svehla, J., Krutzler, T. & Schindler, I. (2012). *STAND DER TECHNIK DER ÖSTERREICHISCHEN GIESSEREIEN: Gesetzliche Rahmenbedingungen, technische Gesetzliche Rahmenbedingungen, technische Möglichkeiten und Gießereibetriebe in Österreich*. Wien. <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0389.pdf>
- Taherdoost, H. & Madanchian, M. (2023). Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods and Concepts. *Encyclopedia*, 3(1), 77–87. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia3010006>
- Taylor, M. J., Moynihan, E. P. & Wood-Harper, A. T. (1998). End-user computing and information systems methodologies. *Information Systems Journal*, 8(1), 85–96. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2575.1998.00005.x>

- van Oers, L. & Guinée, J. (2016). The Abiotic Depletion Potential: Background, Updates, and Future. *Resources*, 5(1), 16. <https://doi.org/10.3390/resources5010016>
- van Oers, L., Guinée, J. B. & Heijungs, R. (2020). Abiotic resource depletion potentials (ADPs) for elements revisited—updating ultimate reserve estimates and introducing time series for production data. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(2), 294–308. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01683-x>
- Verbücheln, M., Klein, V., Lizak, S., Assies, F., Köhler, S., Thorenz, A., Hanstein, S., Vogelsang, M., Mostovenko, I. & Schweizer, M. (2023). *Vermeidung, Substitution und nachhaltige Kreislaufwirtschaft von Kunststoffen*. [https://doi.org/10.34744/DIFU-IMPULSE\\_2023-11](https://doi.org/10.34744/DIFU-IMPULSE_2023-11)
- Wang, C.-N., Nhieu, N.-L. & Tran, T. T. T. (2021). Stochastic Chebyshev Goal Programming Mixed Integer Linear Model for Sustainable Global Production Planning. *Mathematics*, 9(5), 483. <https://doi.org/10.3390/math9050483>
- Wehrich, R. (2022). *Rohstoffsicherung- und erhalt durch Aufbereitung und Verwertung von Gießerei-Stäuben – Bayerisches Konsortium für Gießereistaub-Metall-Rückgewinnung – BGMR*. Augsburg. [https://www.stmuv.bayern.de/themen/ressourcenschutz/forcycle/forcycle2/doc/09\\_abschlussbericht.pdf](https://www.stmuv.bayern.de/themen/ressourcenschutz/forcycle/forcycle2/doc/09_abschlussbericht.pdf)
- Wetzel, S. & Phelan, K. (2021). Fewer Castings made in 2020: Census of world castin production. *Modern Casting*, 26–28. <https://cdn.co-verband.com/55001/730025/7c417a4e4b62d90ed2d05e545d9ddd34b8ffa622.pdf>
- Zimmermann, H.-J. (2005). *Operations Research: Methoden und Modelle. Für Wirtschaftsingenieure, Betriebswirte, Informatiker*. SpringerLink Bücher. Vieweg+Teubner Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-322-93906-7>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematischer Gießereiprozess und die Entstehungsorte von Staub.....	1
Abbildung 2: Der Kupolofen.....	5
Abbildung 3: LCI-Faktoren in der Produktion des Augsburger Bechers.....	8
Abbildung 4: Ergebnis der LCI.....	8
Abbildung 5: LCIA – Aggregation zu Impact Categories. ....	9
Abbildung 6: Ablauf der Modellerstellung im OR. ....	11
Abbildung 7: Grafische Darstellung des Simplex Lösungsvorgehens.....	15
Abbildung 8: Entscheidungsbaum für MCDM-Kategorien.....	16
Abbildung 9: Darstellung von Pareto-optimalen Lösungen.....	17
Abbildung 10: Ergebnisse der WSM für verschiedene Gewichtungen bei konvexer und konkaver Pareto-Front.....	20
Abbildung 11: Zusammenspiel von Pareto-Front, WSM und Simplex-Algorithmus im linearen Fall.....	21
Abbildung 12: Neun Schritte in der Entwicklung eigener Tabellenkalkulationsprogramme.....	23
Abbildung 13: Priorisierungsansätze im Anforderungsmanagement.....	24
Abbildung 14: Darstellung des Zusammenspiels von anwendender Person und Excel. ....	41
Abbildung 15: Darstellung des Entwicklungsprozesses. ....	43
Abbildung 16: UserForm für die Abfrage der Nebenbedingungen.....	46
Abbildung 17: UserForm für die Abfrage der Gewichtung.....	46
Abbildung 18: Grafik im Dashboard für die Darstellung des Kostenvergleich.....	47
Abbildung 19: Grafik im Dashboard für die Darstellung des Ökoscores.....	47
Abbildung 20: Tabelle im Dashboard für die Darstellung der Rezeptur mit Staub.....	47
Abbildung 21: Ökonomisch und ökologische Auswirkungen des Referenzfalls.....	49
Abbildung 22: Trade-Off Grafik des Referenzfalls.....	50
Abbildung 23: Staubeinsatz im Referenzfall.....	51
Abbildung 24: SiC-Einsatz im Referenzfall.....	52
Abbildung 25: Trade-off bei Variierung der Basizität im Referenzfall.....	54
Abbildung 26: Staubeinsatz bei Variierung der Basizität im Referenzfall.....	55
Abbildung 27: Trade-off bei Variierung des SiC-Gehalts im Referenzfall.....	57
Abbildung 28: Staubeinsatz bei Variierung des SiC-Gehalts für den Referenzfall.....	58
Abbildung 29: Gegenüberstellung des Trade-off von Referenzfall (ohne Mn) und mit Mangan.....	60

Abbildung 30: Staubeinsatz bei Gegenüberstellung von Referenzfall (ohne Mn) und mit Mangan.....	60
Abbildung 31: Trade-off bei Einschränkung der Staubverfügbarkeit.....	62
Abbildung 32: Trade-off bei Variierung der Beseitigungs-/Verwertungsmethode. ....	64
Abbildung 33: Staubmengen bei Variierung der Beseitigungs-/Verwertungsmethode. ....	65
Abbildung 34: Trade-off bei Änderung der Berechnungsmethode für die Umweltwirkungen der SiC-Rohstoffe.....	66
Abbildung 35: Trade-off bei SiC-Gehalt von 0,7; Basizität von 0,7; keinem Mangan; Obertagedeponierung und der Verfügbarkeit aller Stäube.....	67
Abbildung 36: Trade-off bei SiC-Gehalt von 0,58; Basizität von 0,7; mit Mangan; Obertagedeponierung und der Verfügbarkeit aller Stäube.....	67
Abbildung A37: Arten von Gießereien in Deutschland und ihr Energieverbrauch. ....	I
Abbildung A38: Neun Schritte in der Entwicklung eigener Tabellenkalkulationsprogramme. ....	IV
Abbildung A39: Aufgestellte Anforderungen an das Tool, priorisiert nach der MoSCoW-Methode.....	VIII
Abbildung A40: GWP-Umweltwirkungen abhängig vom SiC-Gehalt.....	X
Abbildung A41: ADP-Umweltwirkungen abhängig vom SiC-Gehalt.....	X
Abbildung A42: SiC- sowie C-Gehalte im Gießereistaub. ....	XII
Abbildung A43: SiC-Zusammensetzung bei Variation der Basizität ohne Staubeinsatz. ....	XIII
Abbildung A44: SiC-Zusammensetzung bei Variation der Basizität mit Staubeinsatz... ..	XIV
Abbildung A45: Trade-off bei Festsetzung des SiC-Gehalts auf 0,5.....	XV
Abbildung A46: Trade-off bei Festsetzung des SiC-Gehalts auf 0,58.....	XV
Abbildung A47: Trade-off bei Festsetzung des SiC-Gehalts auf 0,7.....	XVI
Abbildung A48: Trade-off bei Festsetzung des SiC-Gehalts auf 0,7 (Detailblick). ....	XVI
Abbildung A49: SiC-Zusammensetzung bei Variation des SiC-Gehalts mit Staubeinsatz. ....	XVII
Abbildung A50: SiC-Zusammensetzung bei Variation des SiC-Gehalts ohne Staubeinsatz. ....	XVIII
Abbildung A51: SiC-Zusammensetzung bei Variation des Mangangehalts mit Staubeinsatz. ....	XIX
Abbildung A52: SiC-Zusammensetzung bei Variation des Mangangehalts ohne Staubeinsatz.....	XX
Abbildung A53: Staubzusammensetzung/-mengen bei Variation der Staubverfügbarkeit. ....	XXI

Abbildung A54: SiC-Zusammensetzung bei Variation der Staubverfügbarkeit.....	XXII
Abbildung A55: SiC-Zusammensetzung bei Variation der Beseitigungs-/Verwertungsmethode mit Staub.....	XXIII
Abbildung A56: SiC-Zusammensetzung bei Variation der Beseitigungs-/Verwertungsmethode ohne Staub. ....	XXIV
Abbildung A57: Staubzusammensetzung/-mengen bei Variation der Berechnungsart der SiC-Umweltwirkungen.....	XXV
Abbildung A58: SiC-Zusammensetzung bei Variation der Berechnungsart der SiC-Umweltwirkungen mit Staub. ....	XXVI
Abbildung A59: SiC-Zusammensetzung bei Variation der Berechnungsart der SiC-Umweltwirkungen ohne Staub. ....	XXVII

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Die vier Phasen einer LCA nach ISO 14040. ....	10
Tabelle 2: Komponenten eines linearen Optimierungsmodells. ....	13
Tabelle 3: Vier Klassifikationen von MODM-Methoden. ....	19
Tabelle 4: Identifizierte Interessengruppen des Optimierungstools.....	28
Tabelle 5: Mögliche Einflussfaktoren des Staubrecyclings auf den Hauptprozess des Kupolofens. ....	31
Tabelle 6: Identifizierte Rohstoffe und ihr Datenursprung. ....	32
Tabelle 7: Übersicht der definierten Entsorgungsszenarien für ökonomische und ökologische Bewertung. ....	34
Tabelle 8: Verwendete Normalisierungs- und Gewichtungsfaktoren. ....	36
Tabelle 9: Mit dem Tool getestete fiktive Spezifikationen für SiC-Formlinge. ....	44
Tabelle 10: Blätter des Excel-Tools und ihre Funktion. ....	45
Tabelle 11: Spezifikation des Referenzfalls. ....	48
Tabelle 12: Cluster der SiC-Rohstoffe. ....	51
Tabelle 13: Ergebnisse der Zielfunktionen abhängig vom SiC-Gehalt.....	56
Tabelle 14: Ergebnisse der Zielfunktionen abhängig vom Vorkommen von Mangan. ....	59
Tabelle 15: Werte aus der Datenbank für die Beseitigungs-/Verwertungsmethoden. ....	64
Tabelle 16: Auswirkungen der SiC-Berechnungsmethode bei maximaler ökonomischer Gewichtung. ....	66
Tabelle 17: Auswirkungen der Berücksichtigung des Kohlenstoffgehalts im Staub im Referenzfall. ....	68
Tabelle 18: Zusammenfassung der Wirkung der betrachteten Stäube. ....	75
Tabelle A19: Im Tool hinterlegte Rohstoffe (ohne Staub) und ihre chemische Zusammensetzung. ....	IX
Tabelle A20: XRF-Analyse – chemische Zusammensetzung der Stäube nach Gewichtsprozent.....	XI

**Abkürzungsverzeichnis**

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
<b>ADP</b>	Abiotic Depletion Potential (Potenzial zur abiotischen Erschöpfung)
<b>CF</b>	Charakterisierungsfaktor
<b>eq</b>	Equivalent (Äquivalent)
<b>EUD</b>	End User Development
<b>EUSE</b>	End-User Software Engineering
<b>EV</b>	Entscheidungsvariable
<b>FU</b>	Functional Unit (Funktionelle Einheit)
<b>GWP</b>	Global Warming Potential (Treibhauspotenzial)
<b>LCA</b>	Life Cycle Assessment (Umweltbilanz)
<b>LCI</b>	Life Cycle Inventory (Sachbilanz)
<b>LCIA</b>	Life Cycle Impact Assessment (Wirkungsabschätzung)
<b>LP</b>	Lineare Programmierung
<b>MADM</b>	Multi-Attribute Decision Making
<b>MCDA</b>	Multi Criteria Decision Analysis
<b>MCDM</b>	Mutli Criteria Decision Making
<b>Mn</b>	Mangan
<b>MODM</b>	Multi-Objective Decision Making
<b>MVP</b>	Minimal Viable Product
<b>NB</b>	Nebenbedingung
<b>NNB</b>	Nicht-Negativitäts-Bedingung
<b>Ökoscore</b>	Ökologiescore
<b>OR</b>	Operations Research
<b>PEF</b>	Product Environmental Footprint
<b>Sb</b>	Antimon
<b>SiC</b>	Siliziumkarbid
<b>t</b>	Tonnen
<b>UI</b>	Benutzeroberfläche
<b>VBA</b>	Visual Basic for Applications
<b>WGP</b>	Weighted Goal Programming
<b>WMMM</b>	Weighted Min-Max-Methode
<b>WSM</b>	Weighted Sum Methode

**XRF-Analyse**      Röntgenfluoreszenzanalyse

**ZF**                Zielfunktion

## Anhang

### A Arten von Gießereien in Deutschland und ihr Energieverbrauch

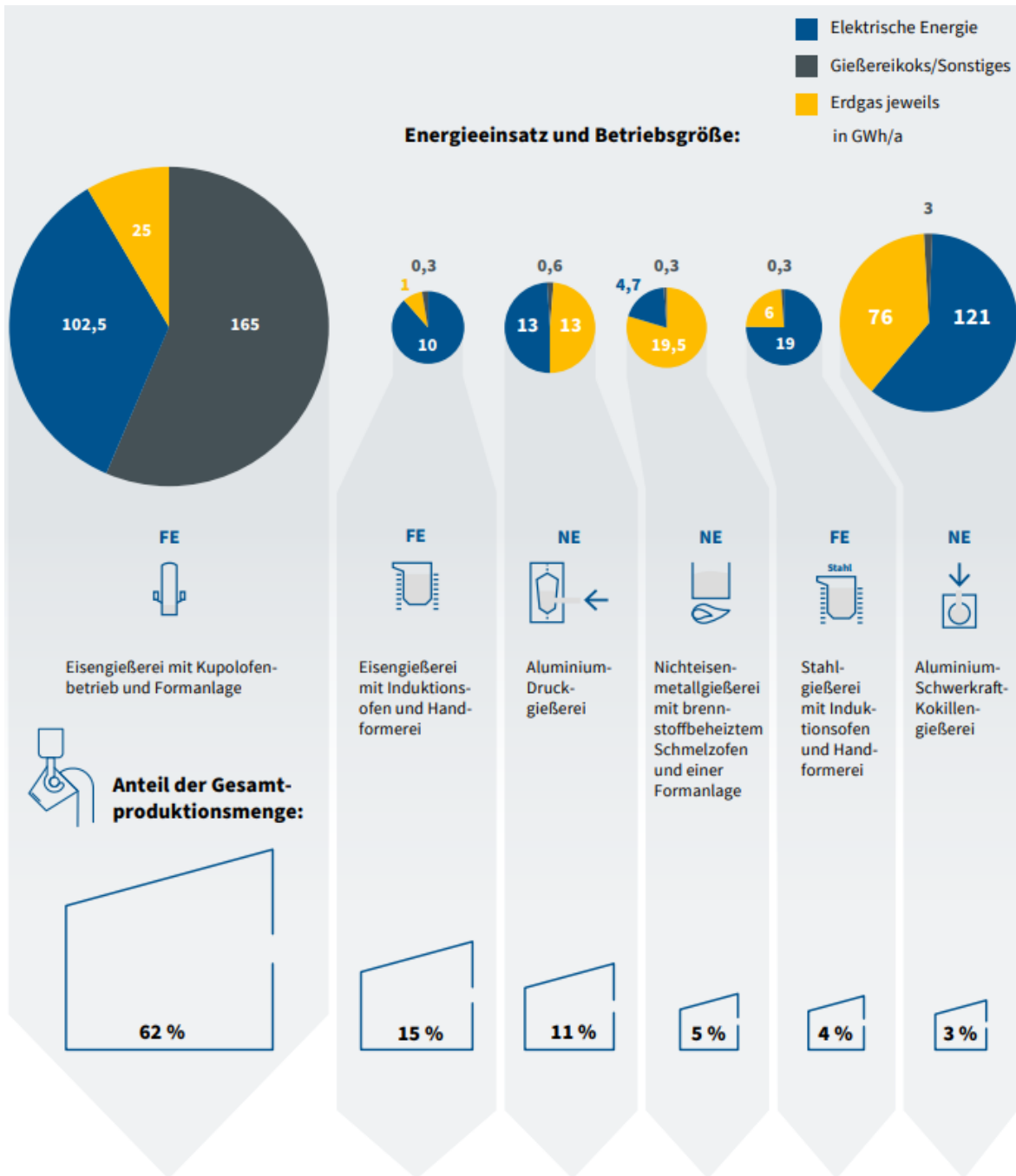


Abbildung A37: Arten von Gießereien in Deutschland und ihr Energieverbrauch. (Quelle: Deutsche Energie-Agentur GmbH [dena], 2021)

## **B Neun Schritte in der Entwicklung eigener Tabellenkalkulationsprogramme nach Raković**

Hinweis: Der Autor stellt keine Richtlinien für die Definition der Anforderungen dar.

- a Design (step 2, Figure 2). When designing, it is necessary to outline a new model, bearing in mind the following recommendations:
  - separate the inputs and outputs of the created model
  - if the model contains a large number of cells to be filled in by the users, it is necessary to separate inputs that are changed more frequently from those that the users change infrequently
  - related formulas should be as close to each other as possible
  - formula arguments should be positioned above and/or left of the formula
  - constants have to be extracted to separate cells, i.e., should not be directly included into formulas
  - formulas should be as simple as possible
  - create a specification of all inputs into the model (units, scope, etc.)
  - create a specification of all formulas
  - omit unnecessary elements.
- b Implementation (step 3, Figure 2). After completing the design, the model should be imported into the spreadsheet program, bearing in mind the following guidelines:
  - use previously adopted convention of naming files, worksheets, captions in cells and cell names and cell scopes; descriptive names should be used
  - use cell naming so as to make formulas as legible as possible
  - formulas need to be as simple as possible; if the formulas have a larger number of arguments, it is recommendable to include additional columns and simplify the formulas
  - use different background colours in cells containing inputs and calculations;
  - protect formulas with codes
  - protect the workbook with a code
  - set limitations (validation) on cells containing inputs.

- c Testing (step 4, Figure 2). The following needs to be done:
- check whether the spreadsheet meets the objectives set in the first phase
  - check the formulas
  - enter test data
  - use the formula review tool: show all formulas, evaluate formulas, and
  - it is recommended that testing should be done by a person who did not develop the spreadsheet.

Should the test detect a flaw, depending on its type, the building cycle should be returned to the design or implementation phase.

- d Documenting (step 5, Figure 2). After finishing the testing, it is necessary to document applications. Each user developed application should include an additional worksheet named 'documentation' and the following data:
- a brief description of the purpose of the spreadsheet
  - description of inputs (scope of values that individual cells receive)
  - developer data: full name, work unit, contact data (email, telephone)
  - responsible person data
  - creation date of the spreadsheet
  - data on performed modifications (date and description)
  - data on performed verification, the person who performed the verification and date
  - instruction for the use of the spreadsheet.
- e Risk assessment (step 6, Figure 2). Before using the spreadsheet, it is necessary to assess the risk of using it. If the spreadsheet provides support to key business processes, and if the errors may make a negative impact on business operations, the spreadsheet needs to be verified by an authorised person. The developer can also be the authorised person; however, it is recommendable that the spreadsheet should be verified by a person who did not create it. Verified tables become parts of the repository. If the authorised person does not verify the table, the building process is returned to phase 1.
- f Adding to the spreadsheet repository (step 7, Figure 2). After documenting and, if necessary, verification, the spreadsheet should be added to a repository. Such a spreadsheet can also be used when designing or implementing new user developed applications. When creating each spreadsheet, it is necessary to save at least three last versions (if they exist) of the spreadsheet (which can be very useful when modifying them).
- g Use (step 8, Figure 2). Only after the completion of all the previous phases is the spreadsheet ready to use.
- h creating backup copies (step 9, Figure 2). Mandatory creation of backup copies should be introduced at the organisation level. Backup copies should be created both locally, each user for himself, and at the level of department or organisation.

The following needs to be done at the organisation or department level:

- Create a template that will contain a worksheet for model documentation and legend of used formats. If necessary, the template may also include certain macros.
- Set the conventions of naming files, worksheets, captions in cells and names of cells and scopes of cells.
- Set formatting rules (e.g., all cells containing the user's inputs should have blue background, and all cells containing calculations should have green background).
- Create and maintain a list and a repository of user developed applications. The list should include the following: file name, organisational unit name, developer data, authorised person data, link to file. Approach to repository should be limited by setting an access password. A person should be authorised to maintain the list and repository of spreadsheet.
- Inform users about the most common errors in user development of applications in spreadsheet programs.

Abbildung A38: Neun Schritte in der Entwicklung eigener Tabellenkalkulationsprogramme. (Quelle: Raković, 2019)

# C Anforderungsliste nach MoSCoW

## Must Have

<p><b>Ökologische Bewertung von Gießereistaub-Recycling in SIC-Formlingen</b> (Pokus, CO2-eq, &amp; absolute) Ressourcenverbrauch) im Vergleich zu Referenzszenarien (Deponierung &amp; Bergmatsatz)</p>	<p><b>Ökonomische Bewertung von Gießereistaub-Recycling in SIC-Formlingen</b> im Vergleich zu Referenzszenarien (Deponierung &amp; Bergmatsatz)</p>	<p><b>Prozessindividuelle Faktoren:</b> Berücksichtigung Rezepturbewertung, insbesondere der <b>Basizität</b></p>	<p><b>Input-Validierung:</b> Plausibilitätsprüfungen für Nutzereingabe (z.B. Summe der Bestandteile = 100%, positive Kosten etc.), um Fehleringaben zu minimieren</p>	<p><b>Inputparameter:</b> Klare Definition und Eingabebemerkung für die Inputparameter der Staube (z.B. chemische Zusammensetzung und Prozessdaten)</p>	<p>Implementierung einer Funktion zur Berechnung der <b>Einordnung</b> eines Status basierend auf Grenzwerten für physikalische Eigenschaften (z.B. Feinheit), die aus vorhandenen Testdaten (Belastungstest, Feinheitsanalyse) oder für die Annahme getroffen werden</p>
<p><b>Datenquellen:</b> Nutzung vorkonfigurierter LCA Datenparameter (z.B. für Rohstoffe, Prozesse, Entsorgungsweg) aus externen Quellen/Datenbanken (wie von Ökoprodukt bereitgestellt oder recherchiert)</p>	<p><b>Transparenz der Kernberechnungen und Annahmen, um menschliche Einschätzung in Gießerei zu ermöglichen</b></p>	<p><b>Dokumentation &amp; User Guide:</b> zur Nutzung für die Gießereien sowie die Weiterentwicklung des Tools</p>	<p><b>Rezeptur:</b> Bereitstellung eines technisch, ökologisch und/oder ökonomisch optimierten <b>Rezepturvorschlags</b> für SIC-Formlinge basierend auf den eingegebenen Staubdaten und Bewertungen</p>	<p><b>Outputparameter:</b> Klare Definition und Ausgabe des Outputs (Rezeptur, ökologische/ökonomische Kennzahlen, Vergleichswerte)</p>	<p><b>Anpassbare Parameter</b> Erlauben, dass der Nutzer bestimmte Schlüsselparameter (z.B. Kostenfaktoren für Transport, Energie, Entsorgung ggf. Emissionsfaktoren) an seine spezifische Situation anpassen kann</p>
<p><b>In MA:</b> <b>Limitationen diskutieren:</b> Klare Darstellung der Grenzen des Modells, der Datenbasis und der getroffenen Annahmen</p>	<p><b>In MA:</b> Einordnung von Nachhaltigkeitsaspekten im spezifischen Kontext des SIC-Formlings-Recyclings</p>	<p><b>In MA:</b> Analyse der Zusammenhänge zwischen Staubzusammensetzung und relevanten physikalischen Eigenschaften (instb. Feinheit) anhand vorhandener Daten.</p>	<p><b>In MA:</b> Betrachtung von Nachhaltigkeit (insb. Closed Loop) und Einordnung von Bewertung/LCA</p>	<p><b>In MA:</b> Empfehlungen für zukünftige Forschung/Entwicklung: Konkrete Vorschläge, wie das Tool oder die Bewertungsmethodik weiterentwickelt werden kann (z.B. bessere Festlegungsmodelle, dynamische LCA)</p>	<p><b>In MA:</b> Darstellung des Kupolofen-Prozesses sowie des Pressens der SIC-Formlinge und Einordnung in den Gesamtprozess</p>
<p><b>In MA:</b> <b>Sensitivitätsanalyse:</b> Untersuchung in der Masterarbeit, wie empfindlich die Ergebnisse (ökonomisch, ökologisch, Rezeptur) auf Änderungen wichtiger Input-Parameter reagieren</p>	<p><b>In MA:</b> <b>Normalisierung beachten</b></p>	<p><b>In MA:</b> <b>Paar Resultate durchrechnen</b></p>	<p><b>In MA:</b> <b>Paar Resultate durchrechnen</b></p>	<p><b>In MA:</b> <b>Paar Resultate durchrechnen</b></p>	<p><b>In MA:</b> <b>Paar Resultate durchrechnen</b></p>

# Should Have



# Could Have

Darstellung der Ergebnisse und Historie in einem **grafischen Dashboard** innerhalb des Excel-Tools

**Erweiterung** der ökologischen Betrachtung um zusätzliche **Wirkungskategorien** über CO<sub>2</sub>-eq. und Toxizität hinaus

Implementierung einer einfachen **Feedback-Funktion**

Nutzer können melden, ob eine empfohlene Rezeptur funktioniert hat (z.B. bzgl. Festigkeit). Das Tool passt zukünftige Empfehlungen daraufhin leicht an (z.B. durch konservativere Annahmen), ohne komplexes Machine Learning.

Archivierungsfunktion für frühere **Stäube inkl. Bewertungen/Empfehlungen**

**Szenario-Verwaltung:** Möglichkeit, verschiedene Eingabe-Szenarien (z.B. für unterschiedliche Stäube oder Randbedingungen) zu speichern, zu laden und direkt im Tool zu vergleichen

**Stapelverarbeitung (Batch Processing):** Möglichkeit, Daten für mehrere Staubproben gleichzeitig einzugeben und die Ergebnisse gesammelt auszugeben.

**Kommentarfunktion:** Möglichkeit für den Nutzer, Notizen oder Kommentare zu gespeicherten Szenarien oder Ergebnissen direkt im Tool zu hinterlegen

**Konfigurierbarer Report-Export:** Eine Funktion, die die wichtigsten Ergebnisse und Annahmen eines Szenarios in eine formatierte Übersicht (z.B. als PDF oder druckfertige Excel-Ansicht) exportiert

# Won't Have

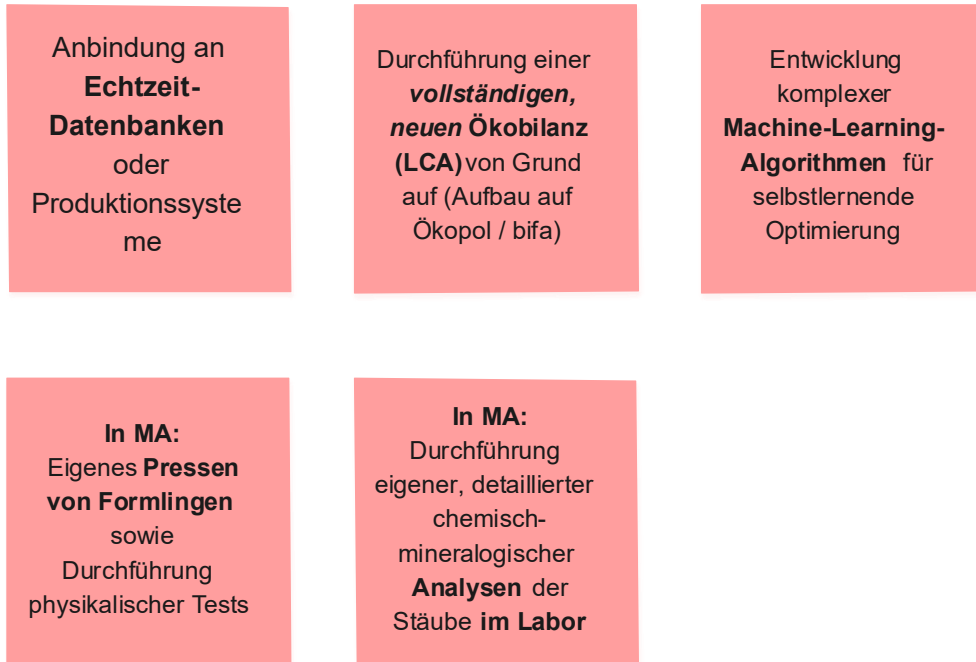


Abbildung A39: Aufgestellte Anforderungen an das Tool, priorisiert nach der MoSCoW-Methode.

**D Die genutzten Rohstoffe und ihre chemische Zusammensetzung**

Tabelle A19: Im Tool hinterlegte Rohstoffe (ohne Staub) und ihre chemische Zusammensetzung.

<b>Rohstoff</b>	<b>Preis [€/kg]</b>	<b>CaO [w-%]</b>	<b>MgO [w-%]</b>	<b>SiO<sub>2</sub> [w-%]</b>	<b>SiC [w-%]</b>
SiC 1	1,30	0,30 %	0,00 %	0,57 %	96,43 %
SiC 3	0,92	0,30 %	0,00 %	4,00 %	87,14 %
SiC 4	0,74	0,90 %	0,00 %	6,60 %	70,00 %
SiC 6	0,88	0,30 %	0,00 %	4,00 %	82,86 %
SiC 7	0,50	8,70 %	0,00 %	8,00 %	47,14 %
SiC 8	0,79	0,30 %	0,00 %	4,00 %	74,29 %
SiC 10	0,44	0,30 %	0,00 %	5,00 %	41,43 %
SiC 11	0,97	0,64 %	0,00 %	3,00 %	91,43 %
SiC 12	0,64	0,64 %	0,00 %	11,50 %	60,00 %
SiC 13	1,25	0,48 %	0,00 %	0,50 %	95,71 %
SiC 14	1,20	0,48 %	0,00 %	0,50 %	95,71 %
SiC 15	0,91	0,30 %	0,00 %	5,00 %	85,71 %
SiC 17	0,91	0,30 %	0,00 %	4,00 %	85,71 %
SiC 21	0,83	0,90 %	0,00 %	6,60 %	78,57 %
SiC 22	0,79	0,30 %	0,00 %	4,00 %	74,29 %
SiC 23	0,98	0,30 %	0,00 %	4,00 %	92,86 %
SiC 33	0,93	0,63 %	0,00 %	2,50 %	87,86 %
SiC 37	0,88	0,63 %	0,00 %	2,50 %	82,86 %
SiC 40	0,70	10,00 %	0,00 %	22,00 %	65,71 %
SiC 41	0,53	10,00 %	0,00 %	22,00 %	50,00 %
FeMn68	0,88	0,64 %	0,00 %	0,90 %	0,00 %
Quarzsand	0,02	0,10 %	0,00 %	85,00 %	0,00 %
Zement	0,16	63,50 %	0,00 %	20,00 %	0,00 %
Kalkstein	0,02	48,00 %	0,00 %	10,00 %	0,00 %

## E Ergebnisse der Modellierung der Umweltwirkungen je SiC-Gehalt

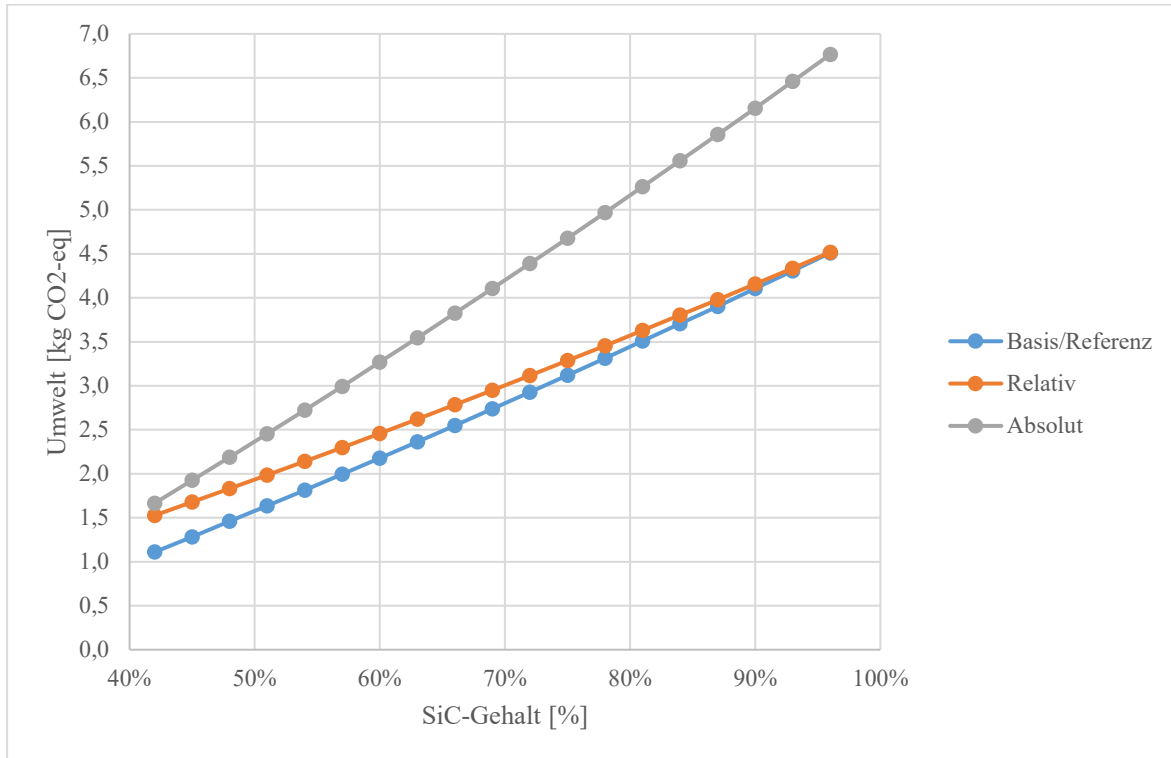


Abbildung A40: GWP-Umweltwirkungen abhängig vom SiC-Gehalt.

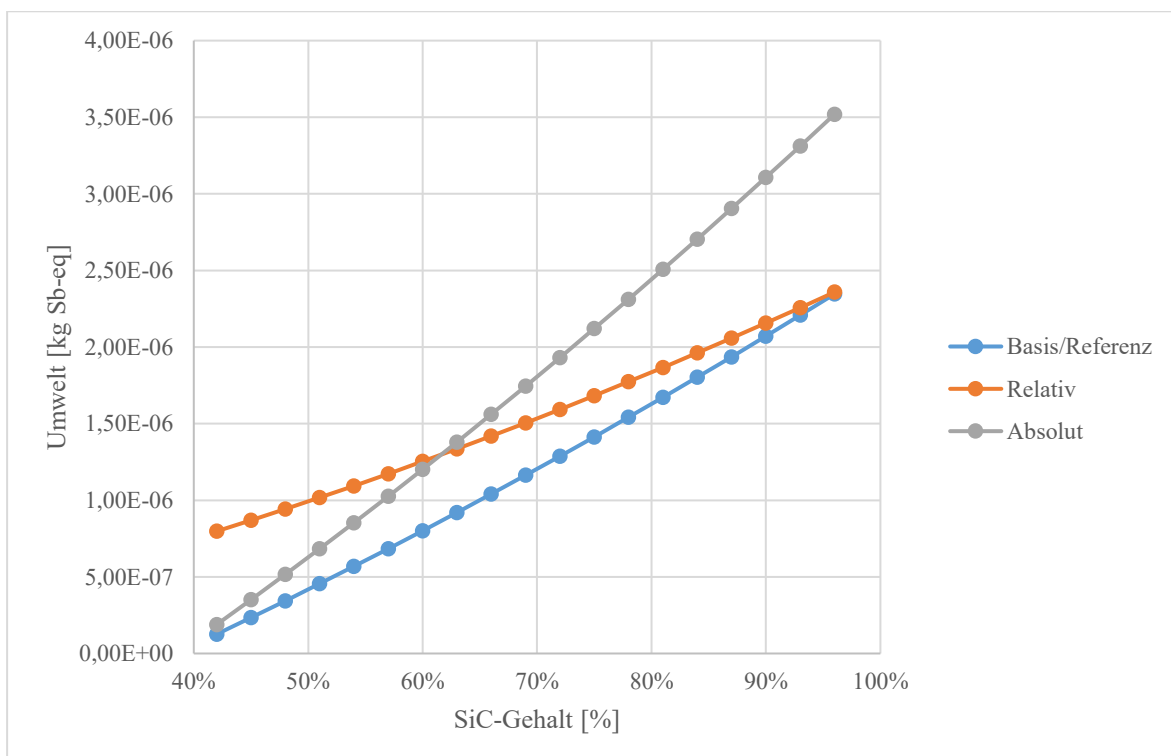


Abbildung A41: ADP-Umweltwirkungen abhängig vom SiC-Gehalt.

**F Gießereistäube: XRF-Ergebnisse**

Tabelle A20: XRF-Analyse – chemische Zusammensetzung der Stäube nach Gewichtsprozent.

Nummer	Komponente	Staub A	Staub C	Staub D	Staub G
0	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,48	7,89	4,01	0,82
1	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	0	0	0
2	BaO	0,09	0,03	0,12	0
3	Br	0	0	0,02	0
4	CaO	14,48	0,9	9,75	0,05
5	CeO <sub>2</sub>	0	0	0	0
6	Cl	0,4	0,05	1,59	0,02
7	Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,11	0	0,03	0,04
8	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1	0,07	0,31	0,02
9	CuO	0,06	0,04	0,19	0
10	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,97	40,32	22,01	1,65
11	I	0	0	0,01	0
12	K <sub>2</sub> O	1,32	0,28	2,9	0,08
13	MgO	0,89	1,71	1,07	0,93
14	MnO	1,38	0,61	5,17	0,02
15	MoO <sub>3</sub>	0	0	0,01	0
16	Na <sub>2</sub> O	0,6	1,29	0	0
17	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	0	0	0
18	NiO	0,03	0,02	0,2	0,01
19	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,23	0,04	0,39	0,15
20	PbO	0,02	0	6,89	0
21	Rb <sub>2</sub> O	0,01	0	0,03	0
22	ReO <sub>2</sub>	0,01	0	0	0,01
23	Rh <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	0	0,06	0
25	SiO <sub>2</sub>	50,55	46,15	24,99	93,35
26	SnO <sub>2</sub>	0	0	0,19	0
24	SO <sub>3</sub>	3,4	0,43	6,25	2,5
27	SrO	0,09	0	0,06	0
28	TiO <sub>2</sub>	0,45	0,13	0,41	0,13
29	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03	0	0,1	0
30	WO <sub>3</sub>	0,57	0,02	0,02	0,21
31	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	0	0	0
32	ZnO	0,71	0	13,15	0
33	ZrO <sub>2</sub>	0,02	0,01	0,04	0,03

**G Analyse des SiC-Gehalts der Stube***Staub 1a*  $\triangleq$  Staub A  $\rightarrow$  Kupolofen Abgasreinigung*Staub 4c*  $\triangleq$  Staub C  $\rightarrow$  Strahlanlage*Ofenstaub*  $\triangleq$  Staub D  $\rightarrow$  Ofenstaub*BMD3*  $\triangleq$  Staub G  $\rightarrow$  Sandruckgewinnung**Analyse Nr.: 784****Material:** Gießereistaub**Lieferant:** Universitat Augsburg**Analyse:**

<b>Muster:</b>	<b>1</b> Staub 1a KW 04	<b>2</b> Staub 1a KW 12	<b>3</b> Staub 1a KW 18	<b>4</b> Staub 3 KW 10	<b>5</b> Staub 4c KW 12
<b>SiC [%]</b>	2,45	5,15	2,89	-	-
<b>Si [%]</b>	1,72	3,60	2,02	-	-
<b>C-frei [%]</b>	39,87	42,41	52,61	11,37	3,90
<b>S [%]</b>	0,513	0,449	0,525	0,286	0,145

<b>Muster:</b>	<b>6</b> Staub 4d KW 14	<b>7</b> Ofenstaub 04.03.24	<b>8</b> BMD 2 04.03.24	<b>9</b> BMD 3 04.03.24
<b>SiC [%]</b>	-	-	-	-
<b>Si [%]</b>	-	-	-	-
<b>C-frei [%]</b>	3,55	35,22	18,20	9,41
<b>S [%]</b>	0,156	2,241	0,391	0,230

**Anmerkung:** Doppelbestimmung14.08.2025  
i.A. [REDACTED]

Abbildung A42: SiC- sowie C-Gehalte im Gießereistaub.

## H Variation der Basizität: Abbildungen für die Änderung der SiC-Zusammensetzung

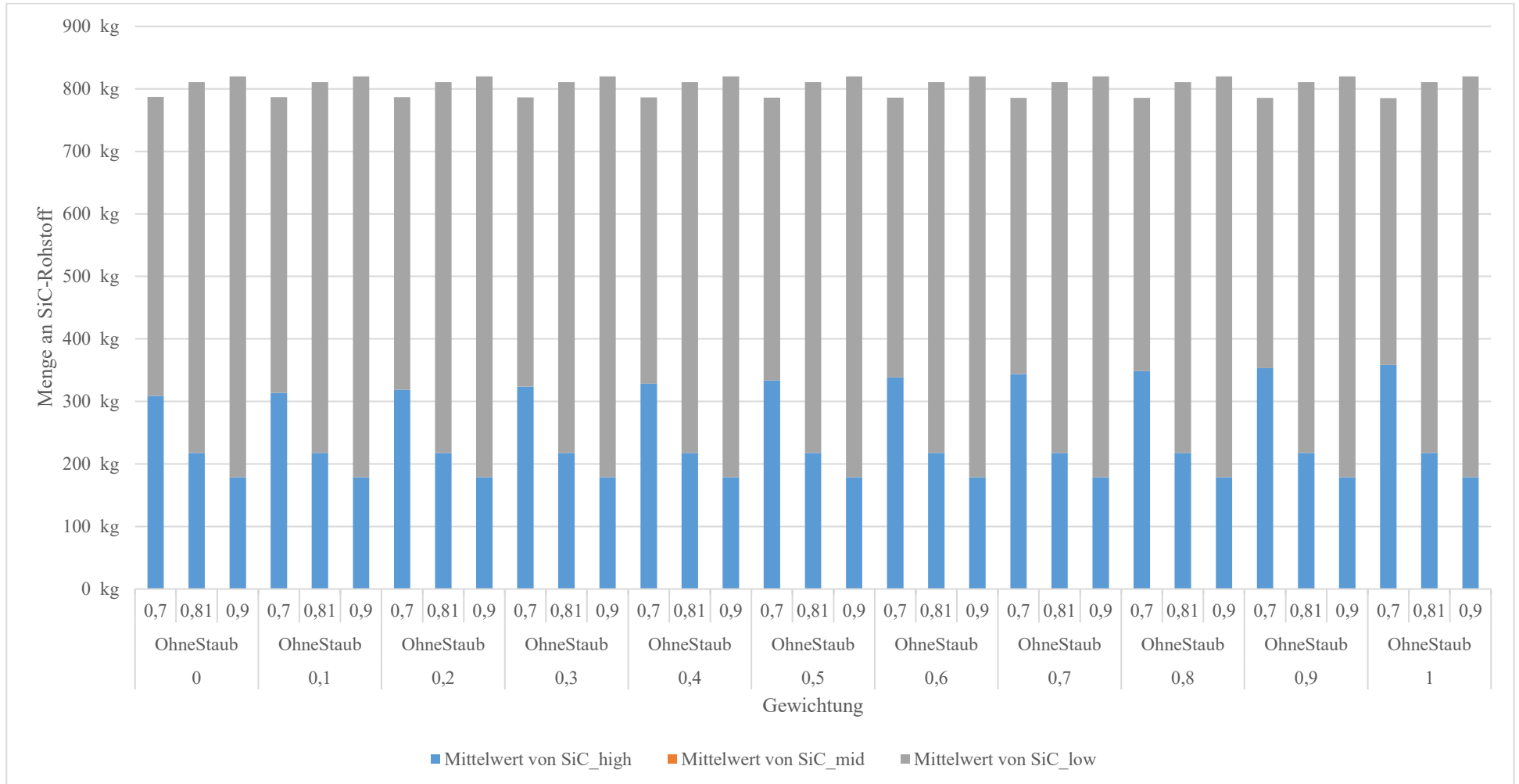


Abbildung A43: SiC-Zusammensetzung bei Variation der Basizität ohne Staubeinsatz.

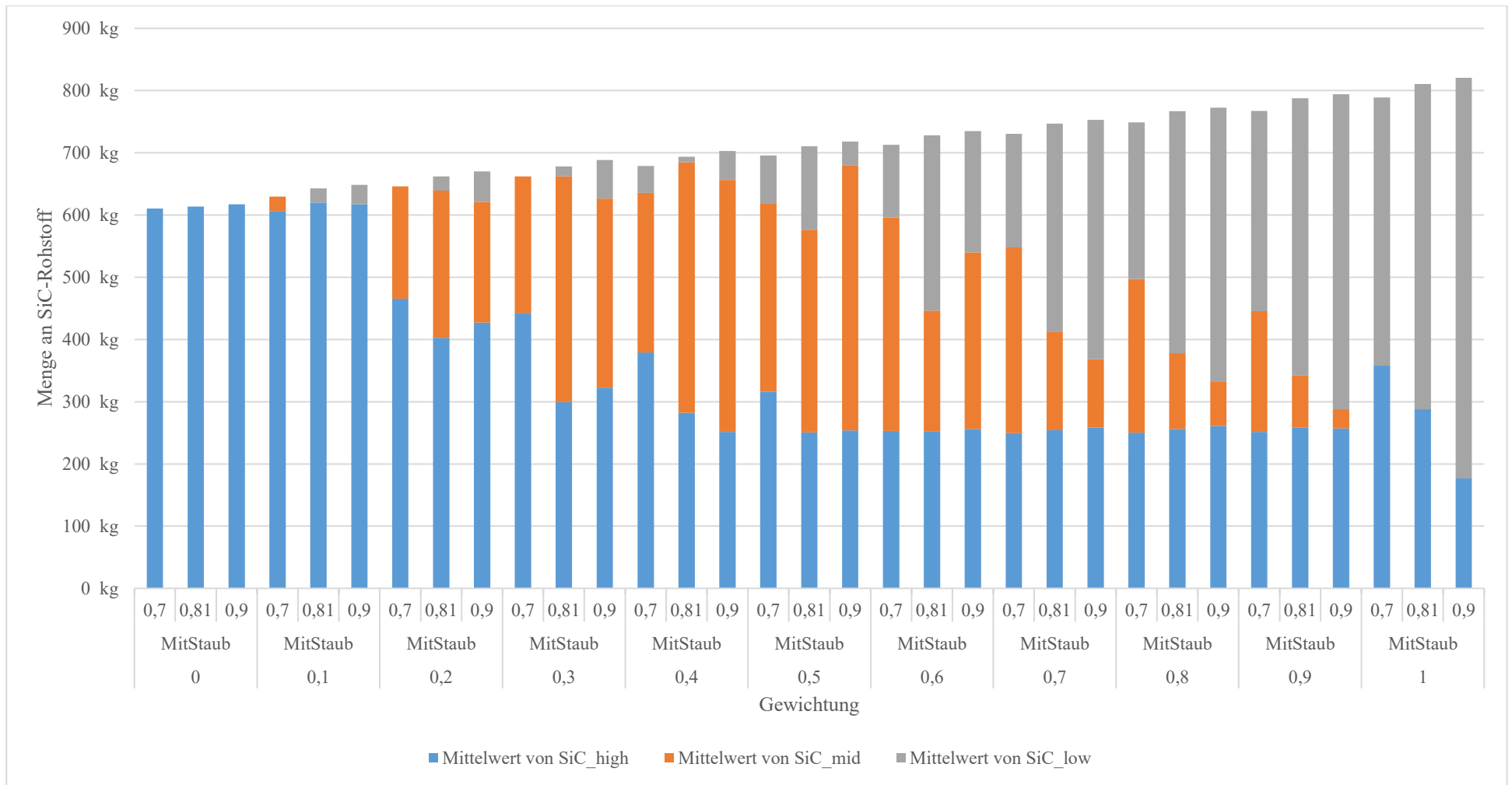


Abbildung A44: SiC-Zusammensetzung bei Variation der Basizität mit Staubeinsatz.

## I Variation des SiC-Gehalts: Abbildungen für den Trade-off

Für die Vergleichbarkeit sind die Achsen der ersten drei Grafiken auf einen Wertebereich beschränkt.

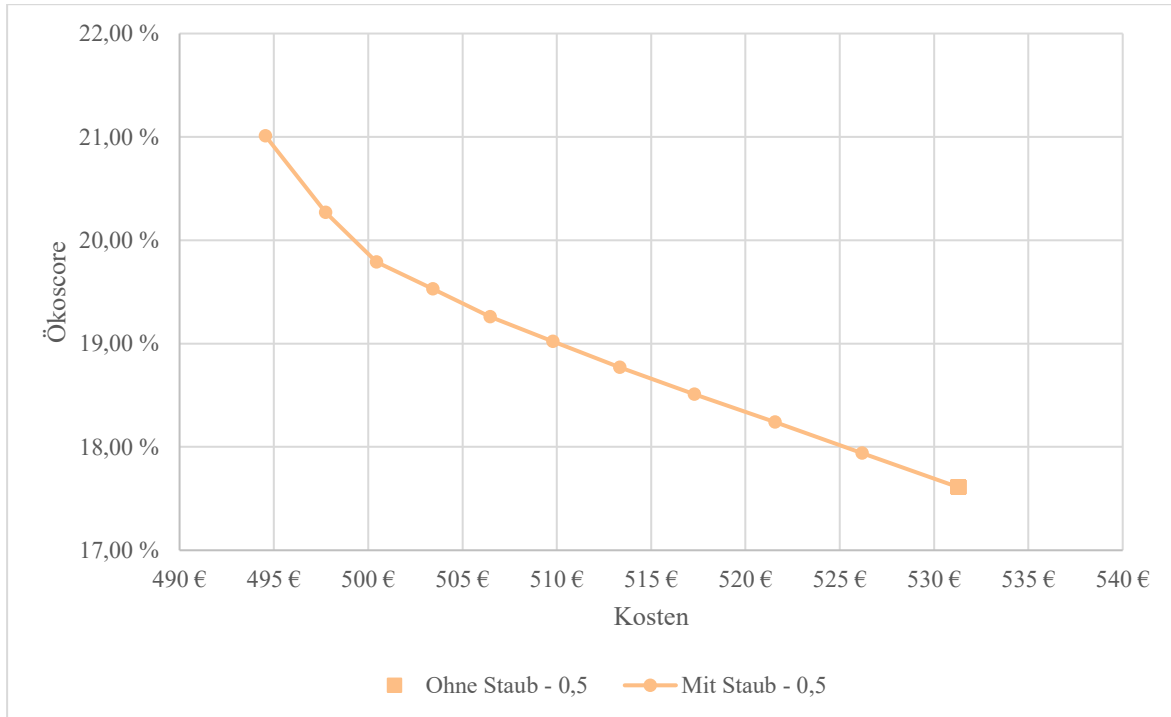


Abbildung A45: Trade-off bei Festsetzung des SiC-Gehalts auf 0,5.

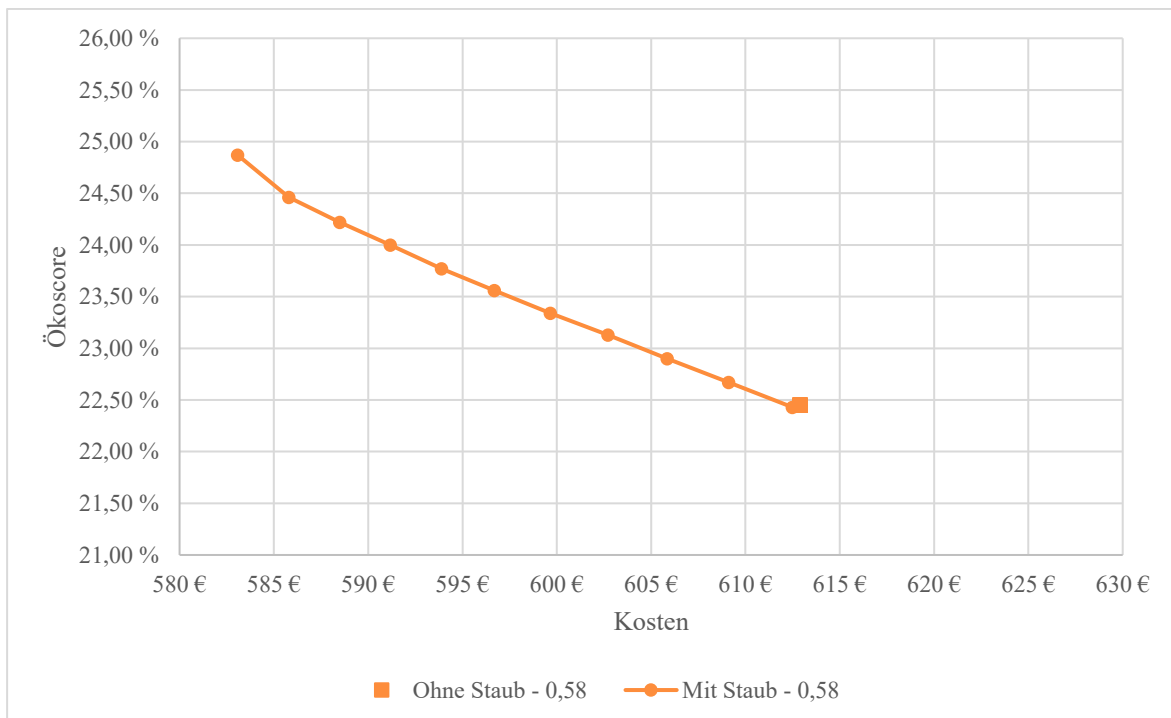


Abbildung A46: Trade-off bei Festsetzung des SiC-Gehalts auf 0,58.

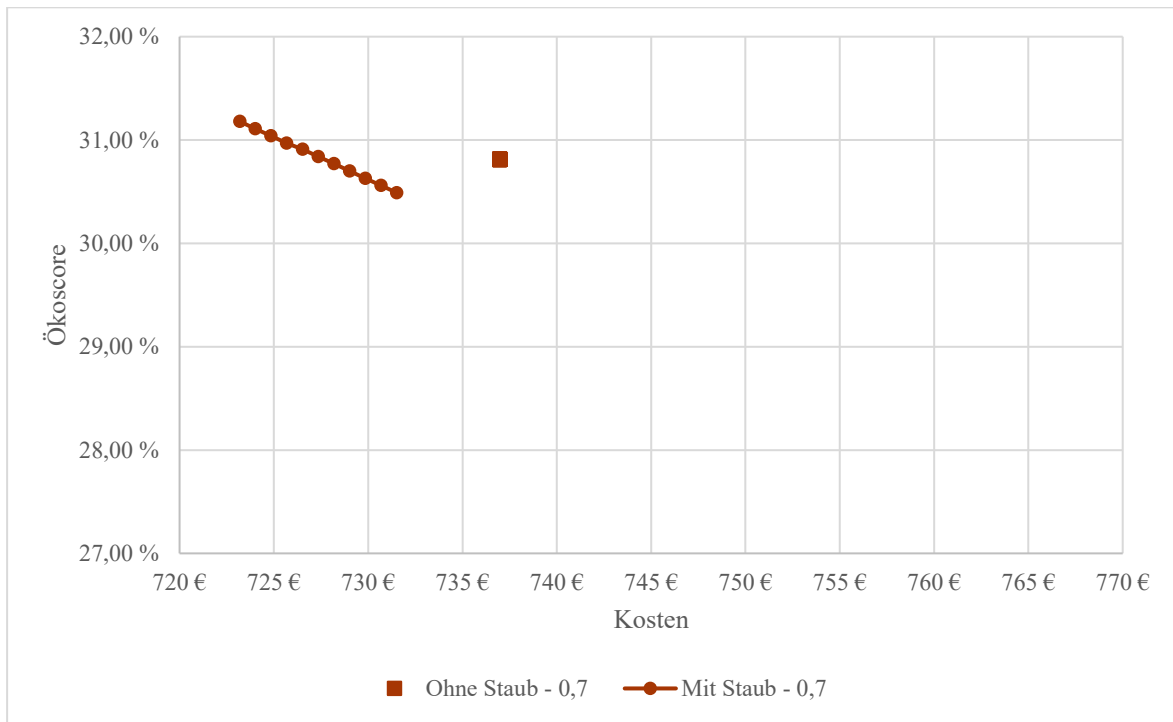


Abbildung A47: Trade-off bei Festsetzung des SiC-Gehalts auf 0,7.

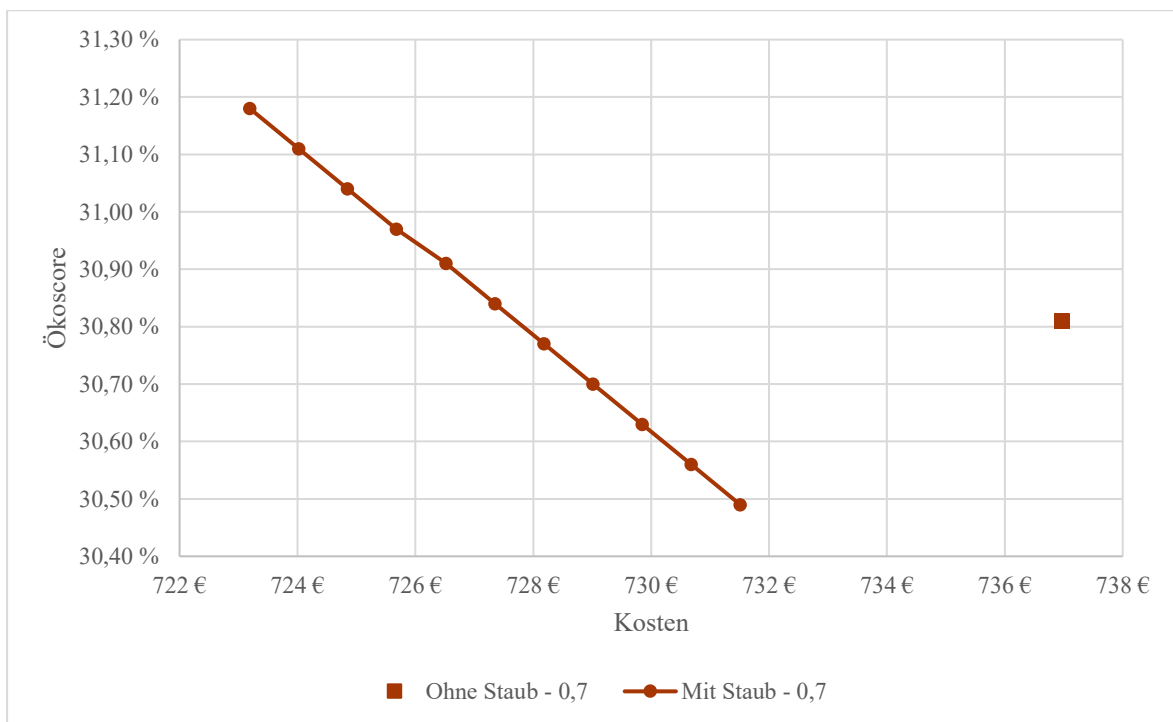


Abbildung A48: Trade-off bei Festsetzung des SiC-Gehalts auf 0,7 (Detailblick).

**J Variation des SiC-Gehalts: Abbildungen für Änderung der SiC-Zusammensetzung**

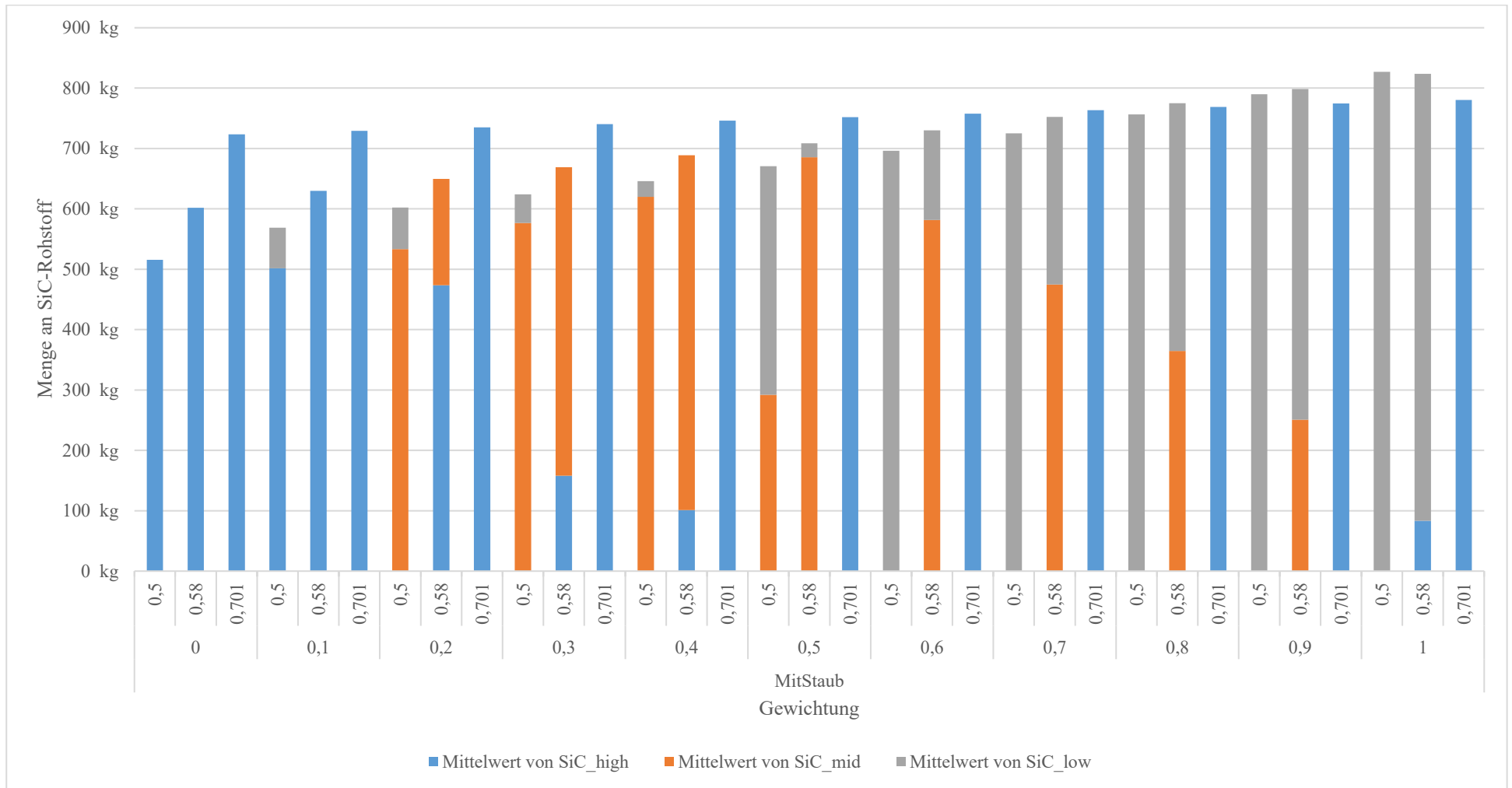


Abbildung A49: SiC-Zusammensetzung bei Variation des SiC-Gehalts mit Staubeinsatz.

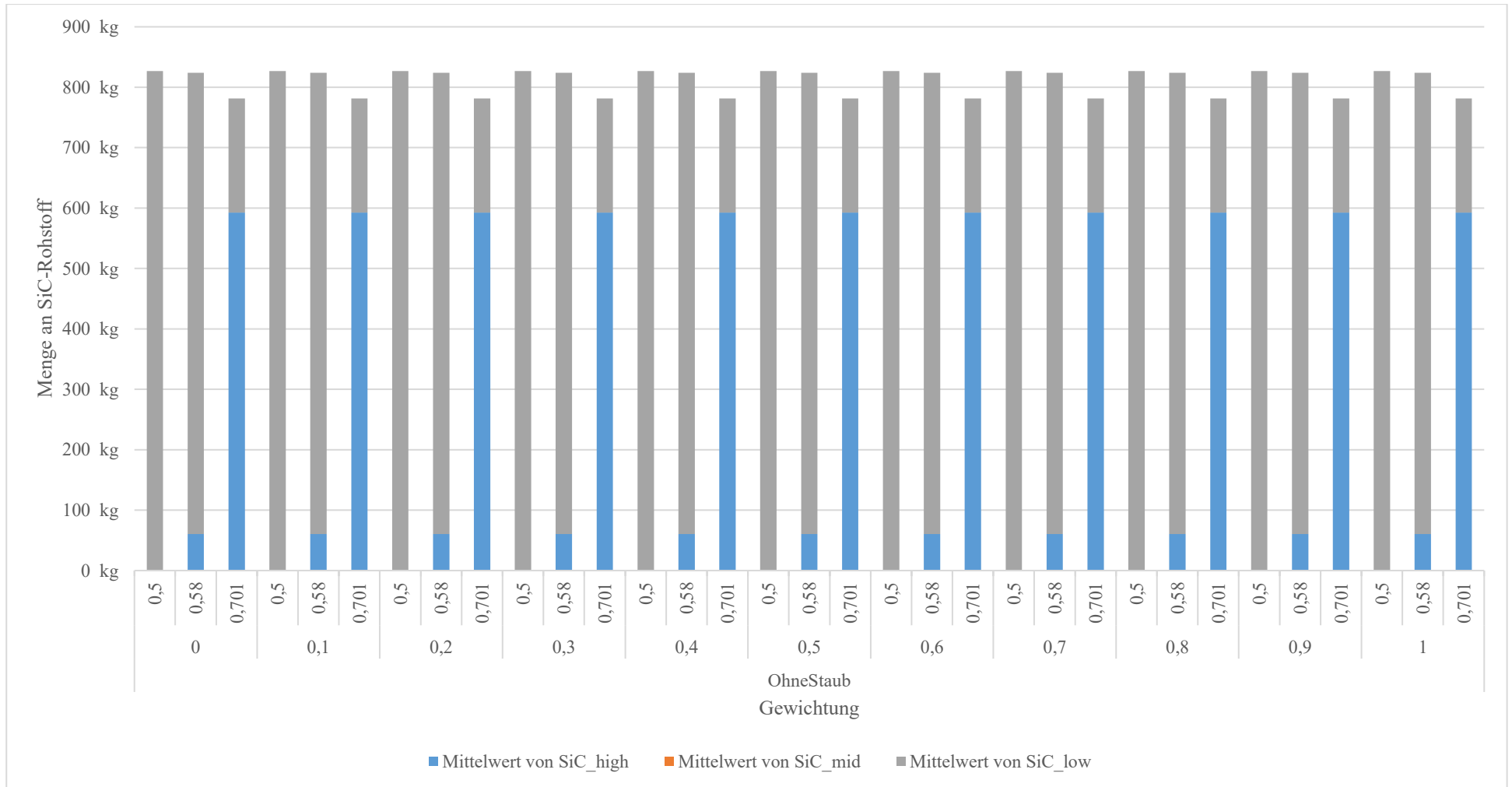


Abbildung A50: SiC-Zusammensetzung bei Variation des SiC-Gehalts ohne Staubeinsatz.

**K Variation des Mangangehalts: Abbildungen für Änderung der SiC-Zusammensetzung**

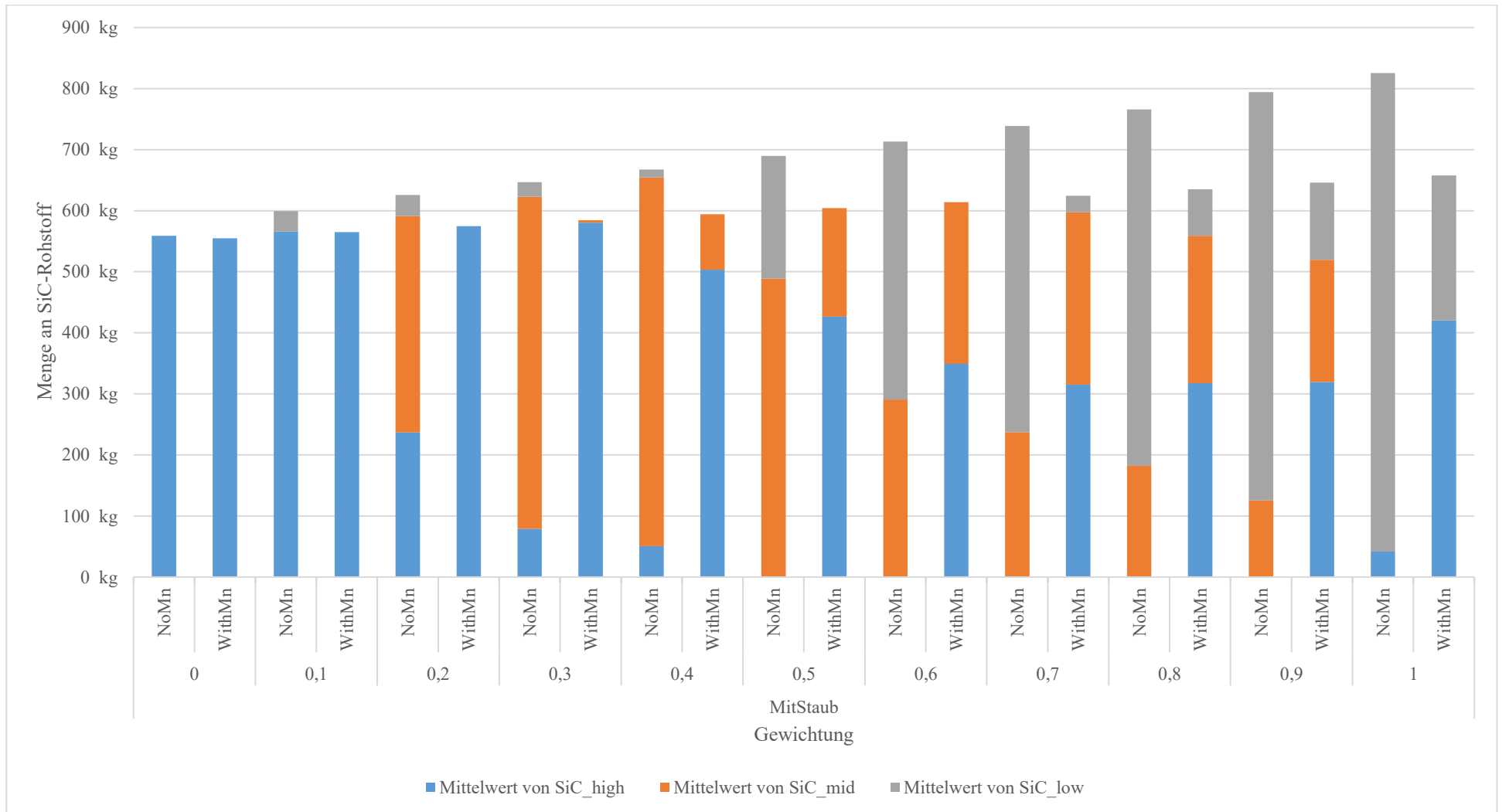


Abbildung A51: SiC-Zusammensetzung bei Variation des Mangangehalts mit Staubeinsatz.

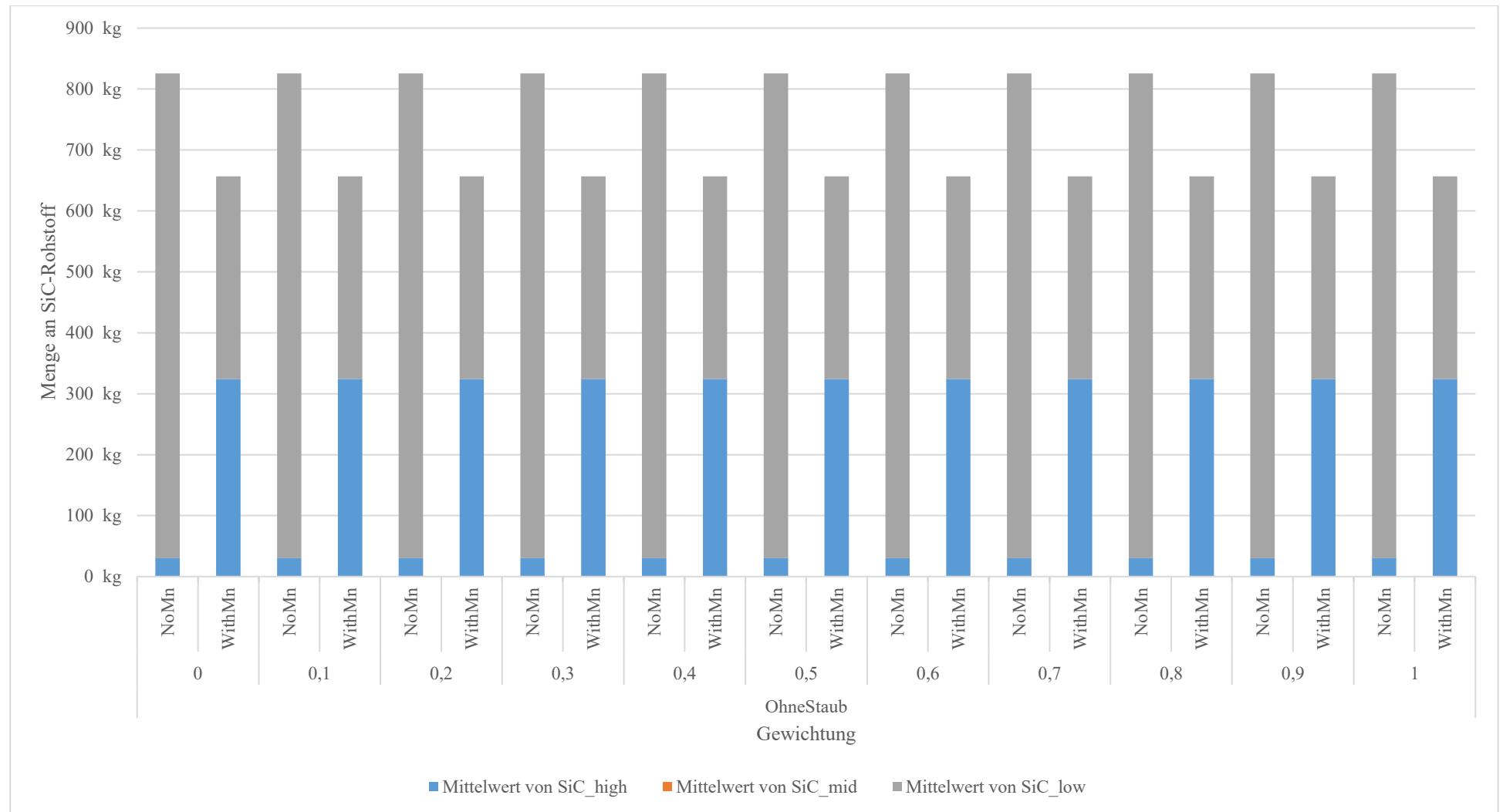


Abbildung A52: SiC-Zusammensetzung bei Variation des Mangangehalts ohne Staubeinsatz.

**L Variation der Staubverfügbarkeit: Abbildungen zu Staub- und SiC-Mengen**

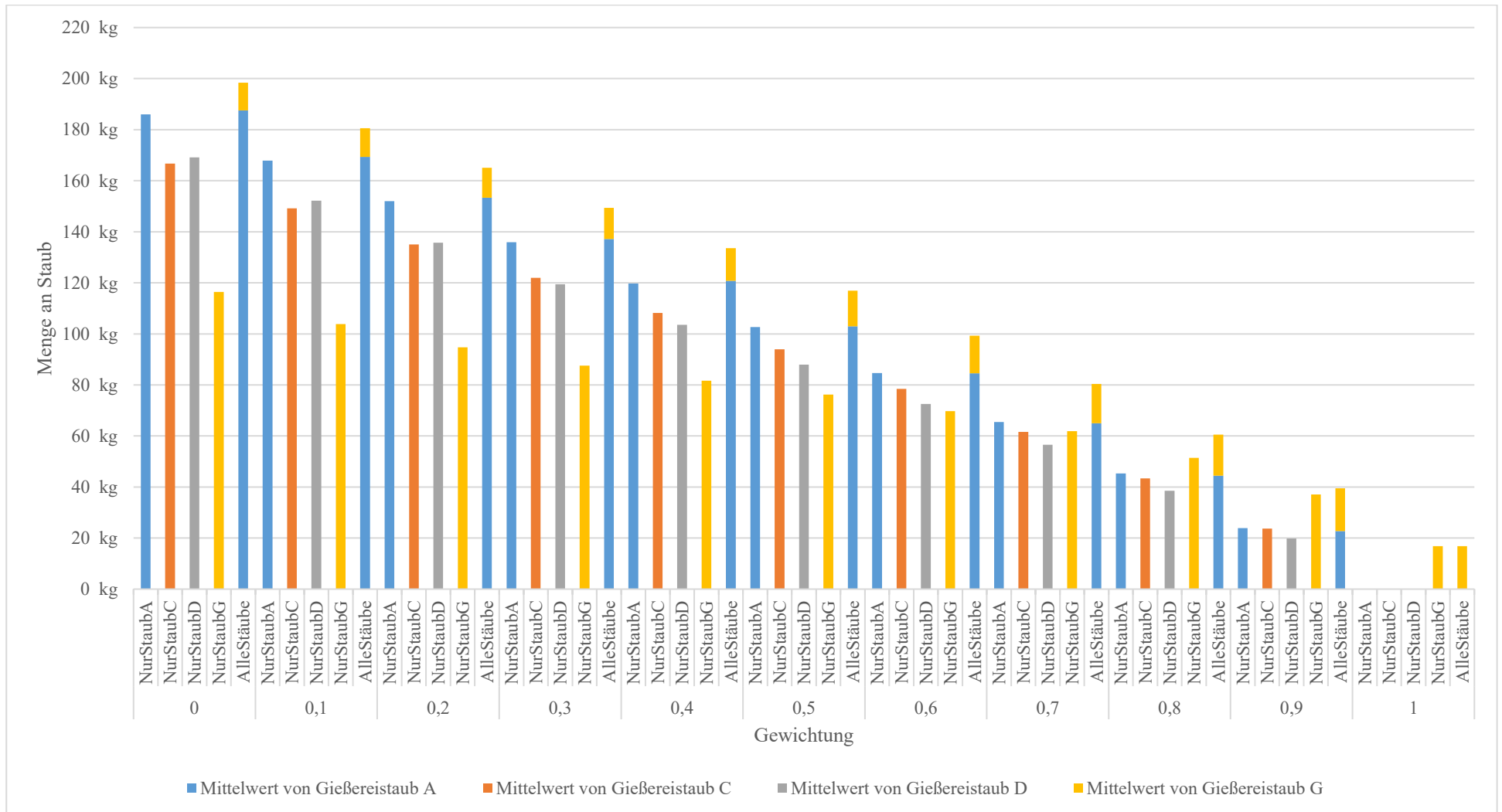


Abbildung A53: Staubzusammensetzung/-mengen bei Variation der Staubverfügbarkeit.

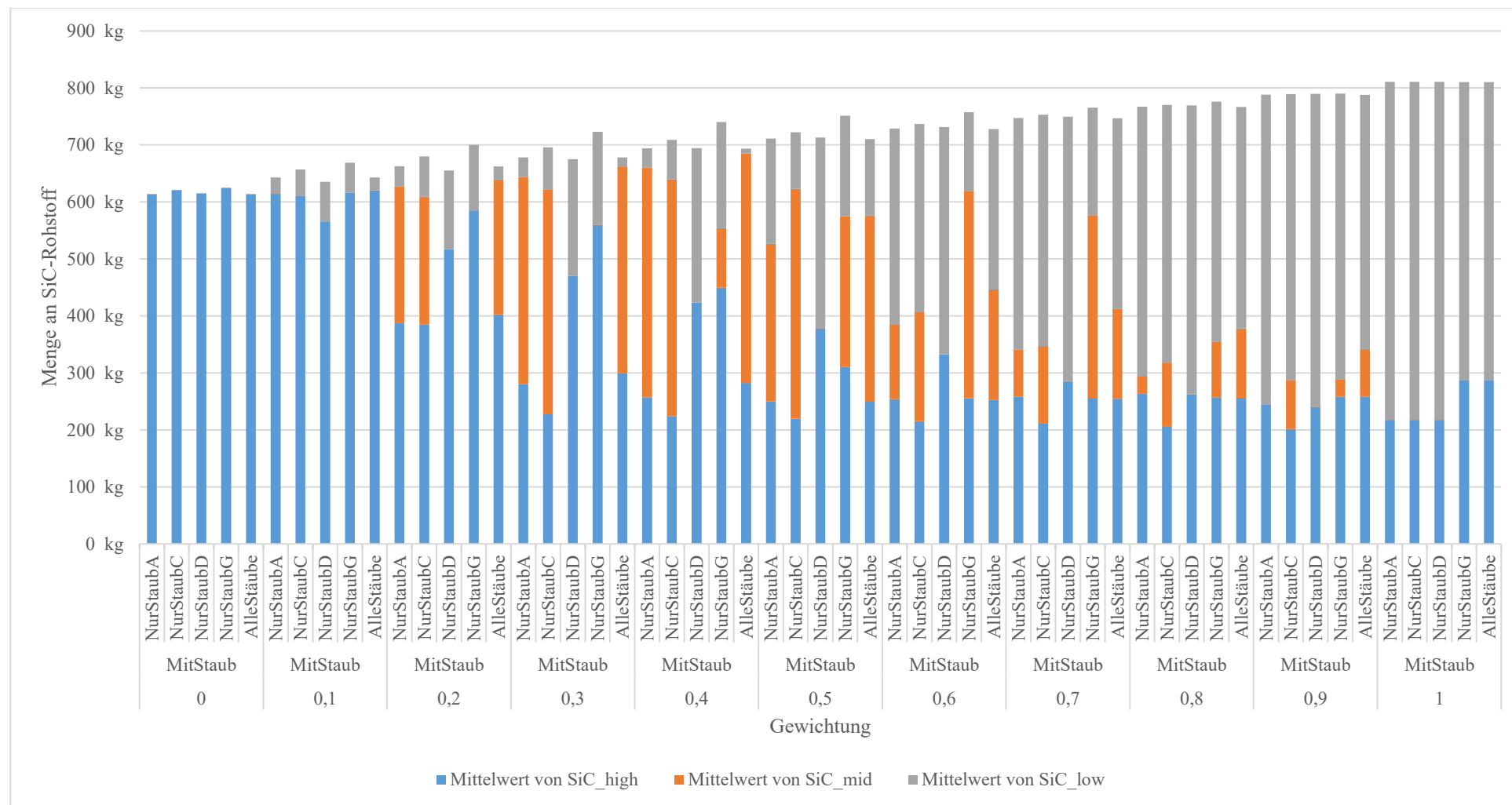


Abbildung A54: SiC-Zusammensetzung bei Variation der Staubverfügbarkeit.

Hinweis: Die Werte ohne Staub entsprechen der Abbildung im Referenzfall ohne Staub.

**M Variation der Beseitigungs-/Verwertungsmethode: Abbildungen für Änderung der SiC-Zusammensetzung**

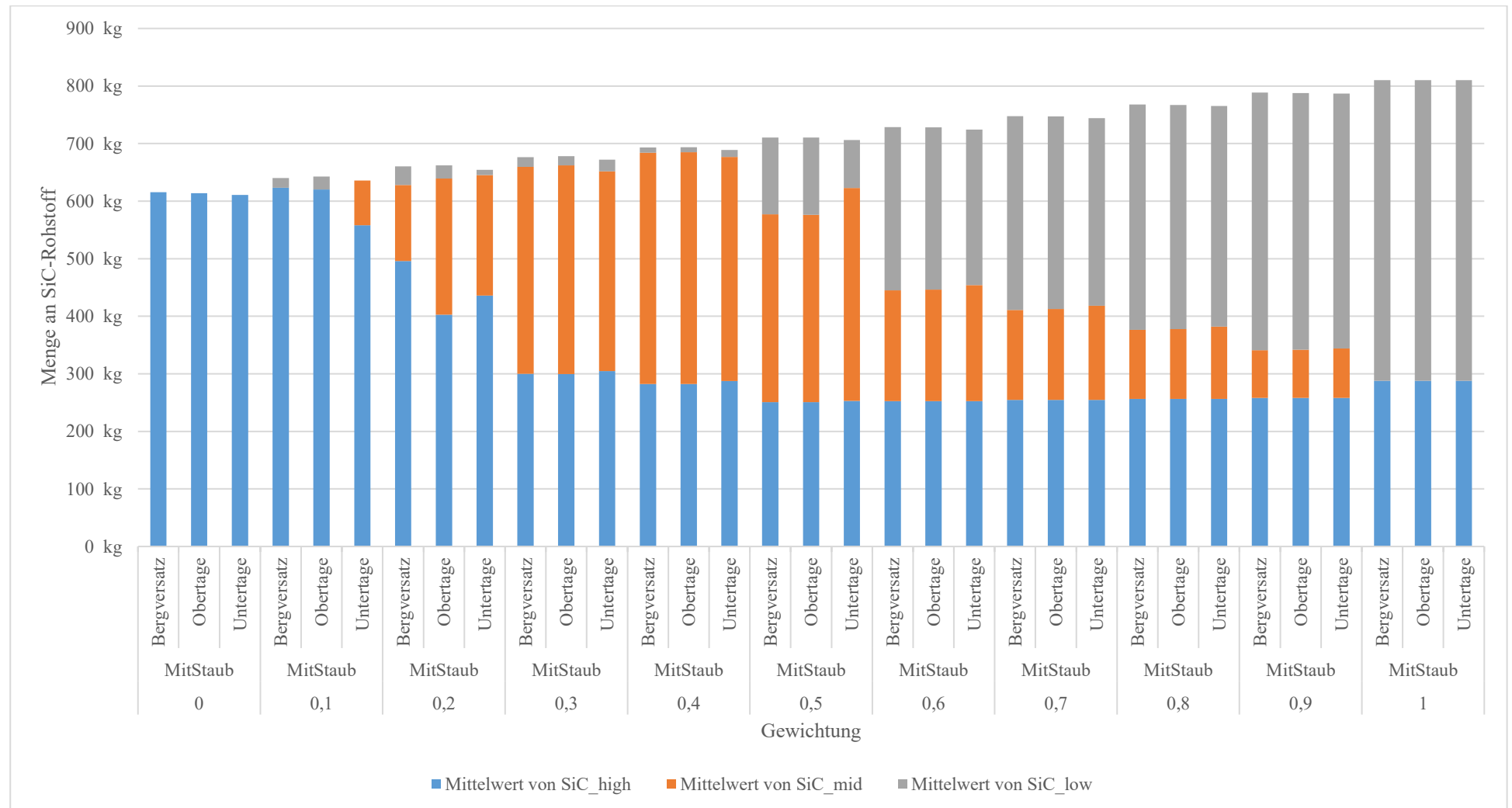


Abbildung A55: SiC-Zusammensetzung bei Variation der Beseitigungs-/Verwertungsmethode mit Staub.

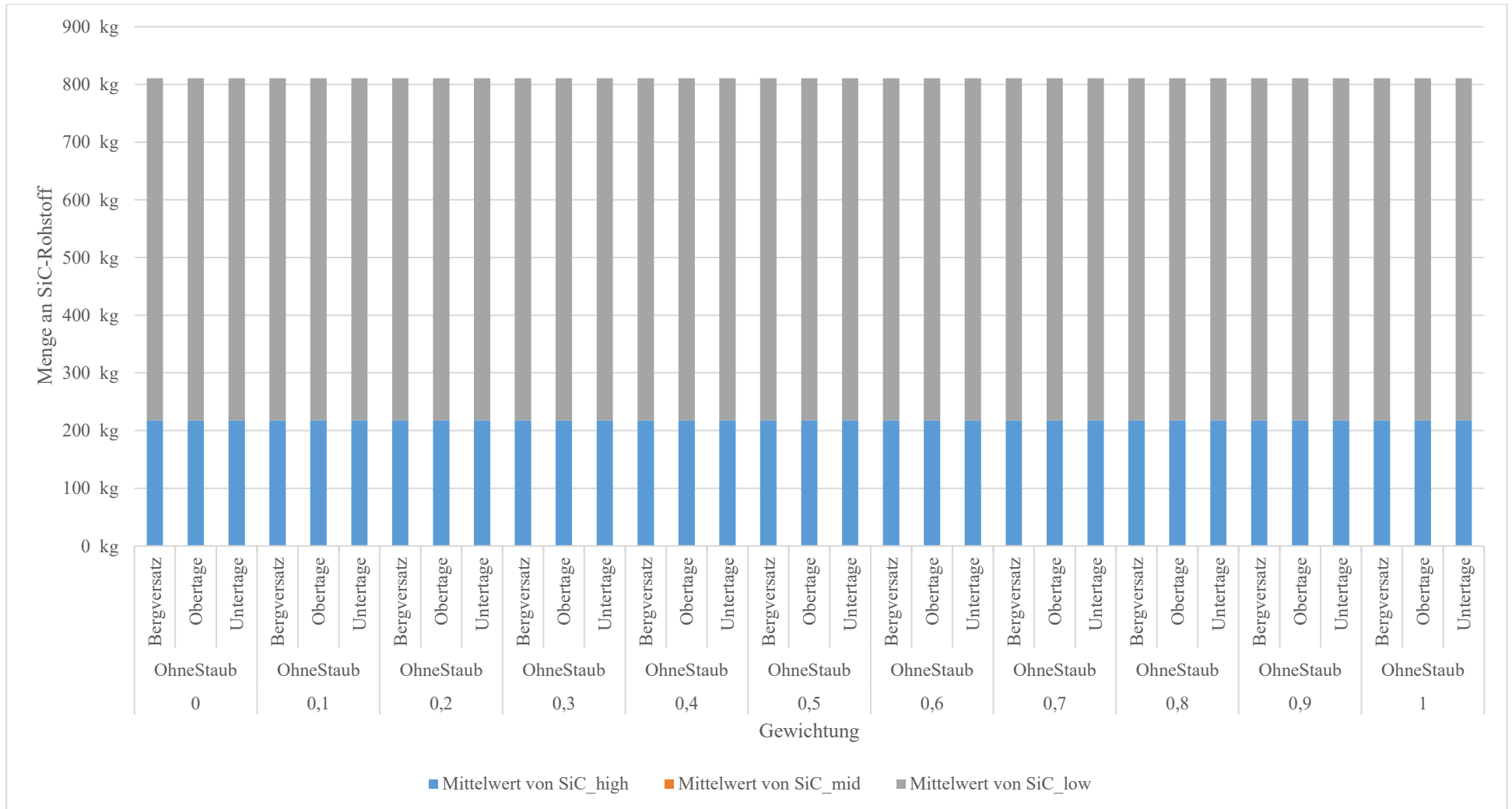


Abbildung A56: SiC-Zusammensetzung bei Variation der Beseitigungs-/Verwertungsmethode ohne Staub.

**N Anpassung der Berechnungsart der Umweltwirkungen der SiC-Rohstoffe: Abbildungen für Staubmengen und SiC-Cluster**

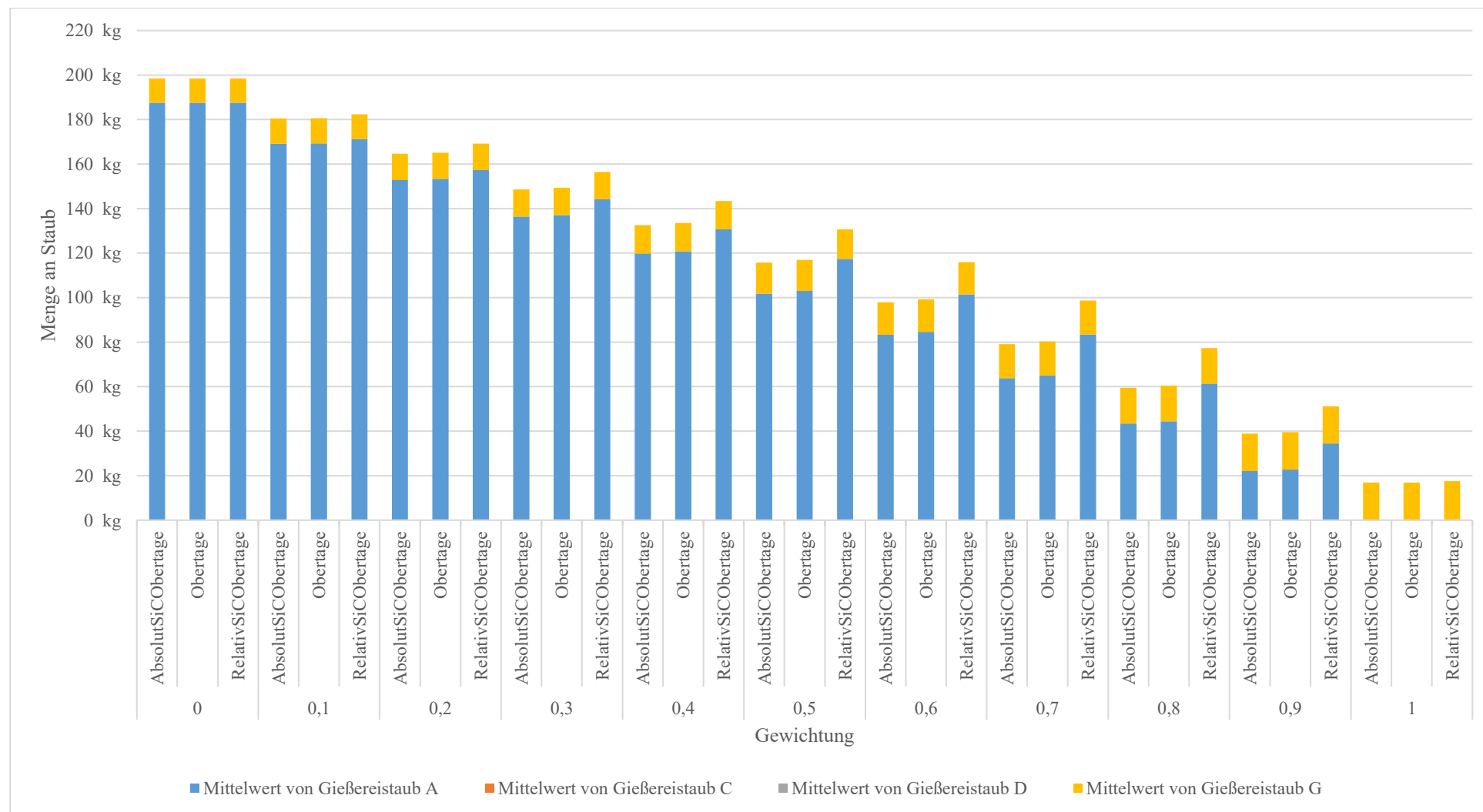


Abbildung A57: Staubzusammensetzung/-mengen bei Variation der Berechnungsart der SiC-Umweltwirkungen.

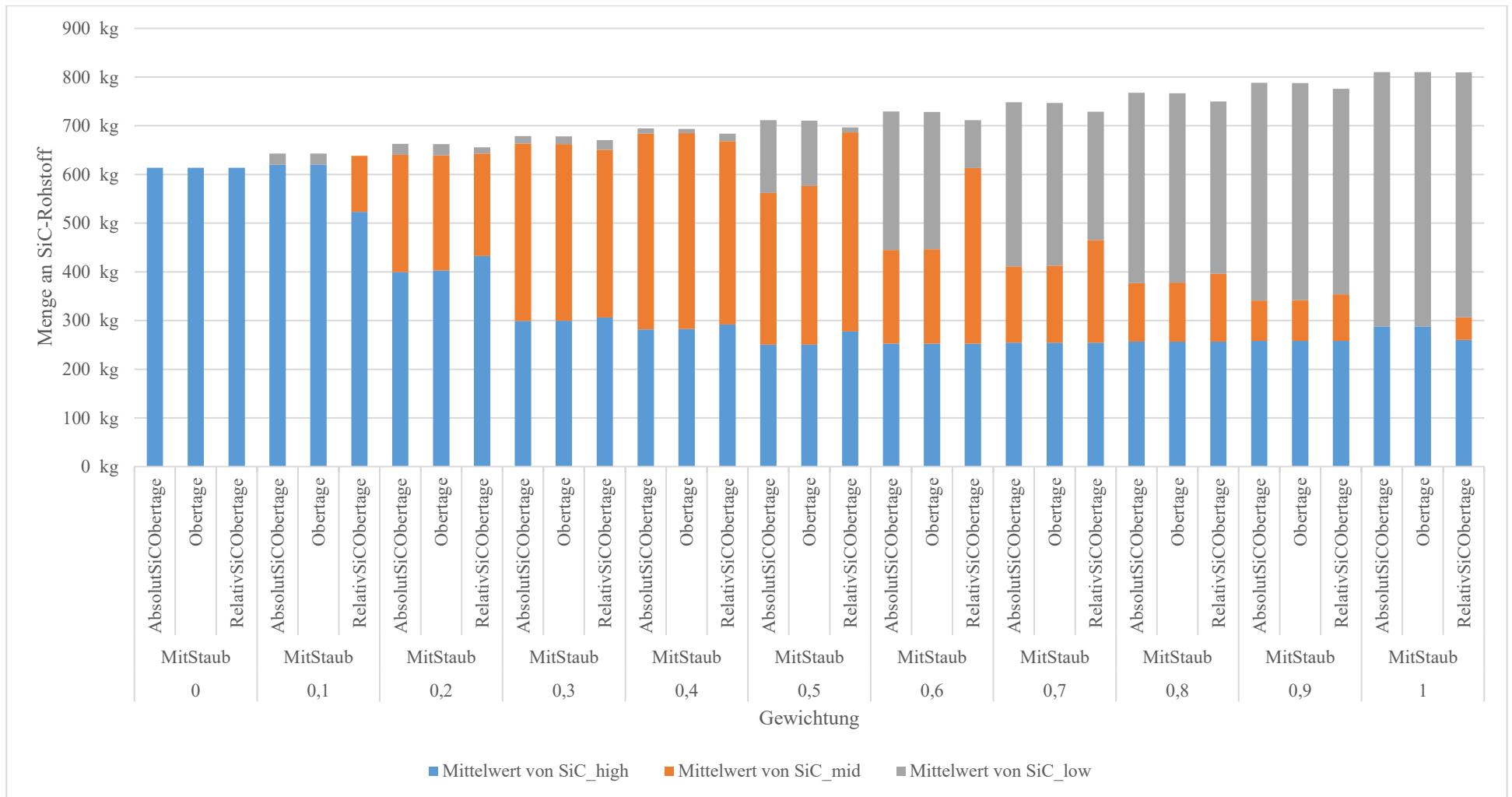


Abbildung A58: SiC-Zusammensetzung bei Variation der Berechnungsart der SiC-Umweltwirkungen mit Staub.

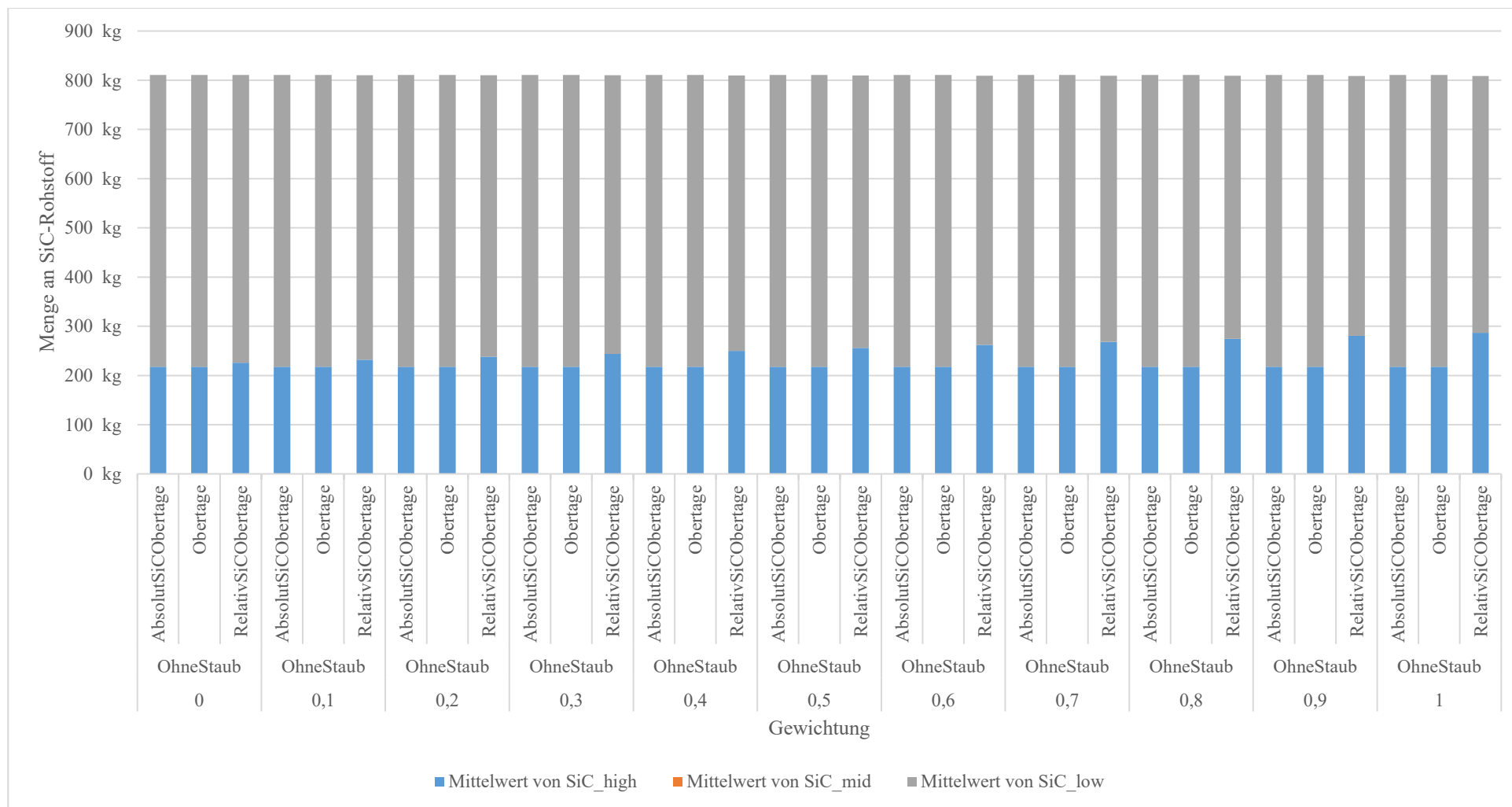


Abbildung A59: SiC-Zusammensetzung bei Variation der Berechnungsart der SiC-Umweltwirkungen ohne Staub.

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen angefertigt habe, und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen hat. Alle Ausführungen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden, sind als solche gekennzeichnet.

Augsburg, 30.12.2025

---

Unterschrift