

**Auftrag:** Erstellung einer gutachterlichen Stellungnahme zum Klimaschutzbeitrag der HMV-Schlackeaufbereitung und -verwendung

**Kontakt:** Janus zum Brock, [janus.zum.brock@tuhh.de](mailto:janus.zum.brock@tuhh.de)  
Prof. Dr. -Ing. Kerstin Kuchta, [kuchta@tuhh.de](mailto:kuchta@tuhh.de)

**Stand:** 17.12.2024

## Inhalt

<b>1</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>SUMMARY.....</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>ZIELSETZUNG DIESES GUTACHTEN .....</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>VORGEHENSWEISE ZUR GUTACHTERLICHEN STELLUNGNAHME ZUM KLIMASCHUTZBEITRAG DER HMV-SCHLACKEAUFBEREITUNG UND -VERWENDUNG .....</b>	<b>9</b>
4.1	GRUNDBEGRIFFE UND HINTERGRUND .....	10
4.1.1	CO <sub>2</sub> -FUßABDRUCK.....	10
4.1.2	TREIBHAUSPOTENZIAL .....	10
4.2	EINFLUSS DER KARBONATISIERUNG .....	11
<b>5</b>	<b>ERMITTLUNG DES CO<sub>2</sub>-FUßABDRUCKS .....</b>	<b>14</b>
5.1	METHODIK ZUR ERARBEITUNG DES PROCESS CARBON FOOTPRINT .....	14
5.1.1	VERWENDETE SOFTWARE UND ÖKOBILANZIERUNGS-DATENBANK UND LCIA-METHODE .....	14
5.1.2	BETRACHTUNGSGRENZEN.....	14
5.1.3	MODELLBILDUNG DER SCHLACKEAUFBEREITUNGSANLAGEN DER IGAM.....	14
5.2	BILANZIERUNG DER SCHLACKEAUFBEREITUNGSANLAGEN.....	16
5.3	KARBONATISIERUNG VON SCHLACKE.....	16
5.4	VERGLEICH ZU NATÜRLICHEN BAUSTOFFEN .....	17
5.5	ALTERNATIVSZENARIO „KEINE SCHLACKEBEHANDLUNG“ .....	19
5.6	TRANSPORTEMISSIONEN.....	19
5.7	METALLRÜCKGEWINNUNG .....	22
5.7.1	EISENMETALLE .....	22
5.7.2	NICHTEISENMETALLE .....	25
<b>6</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>32</b>
<b>7</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>33</b>
7.1	ERNEUERBARER STROMMIX.....	33
7.2	IGAM-REFERENZANLAGE .....	34

# 1 Zusammenfassung

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Aufbereitung von HMV-Schlacke liegt gemittelt, unter Verwendung eines erneuerbaren Strommix bei 2,99 kg CO<sub>2</sub>e pro Mg behandelte Schlacke bzw. bei Verwendung des deutschen Strommix bei 4,2 kg CO<sub>2</sub>e pro Mg behandelte Schlacke. Im Vergleich dazu liegt die Förderung von natürlichen Baustoffen, wie Sand und Kies, zwischen 3 und 7 kg CO<sub>2</sub>e pro Mg. Diese Werte beziehen sich ausschließlich auf die Emissionen der Aufbereitung der Schlacke bzw. der Förderung der Naturbaustoffe und die jeweiligen Emissionen der entsprechenden Prozesse aus den jeweiligen Vorketten, wie z. B. Emissionen aus der Dieselproduktion.

Durch einen Wechsel auf einen erneuerbaren Strommix lassen sich bereits ca. 30 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Schlackeaufbereitung einsparen.

Wird zusätzlich zur Aufbereitung der Schlacke der Effekt der Karbonatisierung berücksichtigt, also die mineralische Bindung von atmosphärischen CO<sub>2</sub>, ergibt sich eine CO<sub>2</sub>-Senke von 23 kg CO<sub>2</sub> pro Mg Schlacke. Hierbei handelt es sich um eine echte CO<sub>2</sub>-Senke, da hierbei direkt CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre gebunden wird.

Dadurch ergeben sich negative CO<sub>2</sub>-Emissionen von -18,8 (konventioneller Strommix) bis -20,0 kg CO<sub>2</sub>e pro Mg Schlacke (erneuerbarer Strommix).

Aufgrund dieser negativen Emissionswerte ist ein klimaneutraler Transport möglich, was bei Naturbaustoffen nicht der Fall wäre.

Ein weiterer Aspekt sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen, die bei der Rückgewinnung von Eisen- und Nichteisenmetallen aus der Schlacke eingespart werden. Diese ergeben sich aus der Differenz von der Primärerzeugung der Metalle und dem jeweiligen Recycling dieser wiedergewonnenen Metalle. Daraus ergeben sich pro Mg zurückgewonnener Eisenmetalle eine CO<sub>2</sub>-Gutschrift von 1.548,7 kg CO<sub>2</sub>e. Für NE-Metalle entspricht diese pro Mg abgeschiedener NE-Metalle 2.471 kg CO<sub>2</sub>e.

Werden diese Gutschriften aus der Metallrückgewinnung auf die behandelte Menge Schlacke bezogen, ergibt sich ein gesamter CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von ca. -205 kg CO<sub>2</sub>e pro Mg behandelte Schlacke.

Es sollte darauf geachtet werden, dass die Gutschriften aus der Metallrückgewinnung nicht mehrfach, z. B. durch andere Industriezweige, beansprucht werden. Eine klare Zuweisung der Gutschriften ist notwendig.

Schlacke aus HMV-Anlagen ist eine klimaschützende Alternative zu Primärbaustoffen und bietet ein besonderes Maß an CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial.

## Gesamtübersicht der Zusammensetzung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks

Tabelle 1: Gemittelte Gesamtübersicht der Zusammensetzung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks

	Einheit	Mittelwert (regenerativer Strommix)	Mittelwert (deutscher Strommix)
CO <sub>2</sub> -Fußabdruck der Schlackeaufbereitung [Mg CO <sub>2</sub> e]	[Mg CO <sub>2</sub> e]	582	824
CO <sub>2</sub> -Gutschrift Karbonatisierung [Mg CO <sub>2</sub> ]	[Mg CO <sub>2</sub> e]	-4.481	-4.481
<b>Summe CO<sub>2</sub>-Fußabdruck Schlackeaufbereitung und Karbonatisierung [Mg CO<sub>2</sub>]</b>	<b>[Mg CO<sub>2</sub>e]</b>	<b>-3.898</b>	<b>-3.657</b>
CO <sub>2</sub> -Gutschrift FE-Metalle [Mg CO <sub>2</sub> e]	[Mg CO <sub>2</sub> e]	-18.390	-18.390
CO <sub>2</sub> -Gutschrift NE-Metalle [Mg CO <sub>2</sub> e]	[Mg CO <sub>2</sub> e]	-17.695	-17.695
<b>Summe Gutschriften aus der Metallabscheidung [Mg CO<sub>2</sub>e]</b>	<b>[Mg CO<sub>2</sub>e]</b>	<b>-36.085</b>	<b>-36.085</b>
<b>Gesamtsumme CO<sub>2</sub>-Fußabdruck [Mg CO<sub>2</sub>e]</b>	<b>[Mg CO<sub>2</sub>e]</b>	<b>-39.983</b>	<b>-39.742</b>

## Übersicht der Zusammensetzung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks von einer Tonne behandelte Schlacke

Tabelle 2: Gemittelte Gesamtübersicht der Zusammensetzung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks bezogen auf 1 Tonne behandelte Schlacke

	Einheit	Mittelwert (regenerativer Strommix)	Mittelwert (deutscher Strommix)
CO <sub>2</sub> -Fußabdruck der Schlackeaufbereitung bezogen auf 1 Mg behandelte Schlacke	[kg CO <sub>2</sub> e]	2,99	4,23
CO <sub>2</sub> -Gutschrift Karbonatisierung	[kg CO <sub>2</sub> e]	-23,00	-23,00
<b>Summe CO<sub>2</sub>-Fußabdruck Schlackeaufbereitung und Karbonatisierung</b>	<b>[kg CO<sub>2</sub>e]</b>	<b>-20,01</b>	<b>-18,77</b>
CO <sub>2</sub> -Gutschrift FE-Metalle bezogen auf 1 Mg behandelte Schlacke	[kg CO <sub>2</sub> e]	-94,40	-94,40
CO <sub>2</sub> -Gutschrift NE-Metalle bezogen auf 1 Mg behandelte Schlacke	[kg CO <sub>2</sub> e]	-90,83	-90,83
<b>Summe Gutschriften aus der Metallabscheidung</b>	<b>[kg CO<sub>2</sub>e]</b>	<b>-185,23</b>	<b>-185,23</b>
<b>Gesamtsumme CO<sub>2</sub>-Fußabdruck</b>	<b>[kg CO<sub>2</sub>e]</b>	<b>-205,24</b>	<b>-204,00</b>

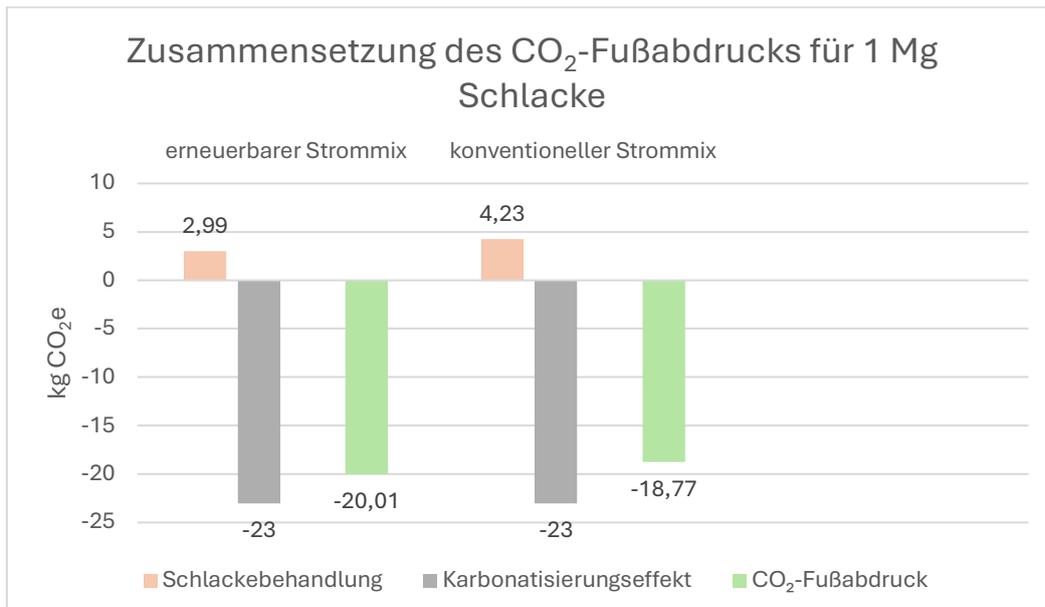


Abbildung 1: Zusammensetzung des negativen CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks von Schlacke

## 2 Summary

The average CO<sub>2</sub> emissions from the treatment of bottom ash from municipal waste incineration are 2.99 kg CO<sub>2</sub>e per Mg of treated bottom ash when using a renewable electricity mix and 4.2 kg CO<sub>2</sub>e per Mg of treated bottom ash when using the German electricity mix. In comparison, the extraction of natural building materials, such as sand and gravel, is between 3 and 7 kg CO<sub>2</sub>e per Mg. These values relate exclusively to the emissions from the processing of the bottom ash respectively the extraction of natural building materials and the respective emissions from the corresponding processes from the respective upstream chains, e.g. such as emissions from diesel production.

By switching to a renewable electricity mix, around 30% of CO<sub>2</sub> emissions can already be reduced.

When the effect of carbonation, the mineral binding of atmospheric CO<sub>2</sub>, is taken into account in addition to the treatment of the bottom ash, there is a CO<sub>2</sub> sink of 23 kg CO<sub>2</sub> per Mg of bottom ash. This is a true CO<sub>2</sub> sink, as CO<sub>2</sub> is bound directly from the atmosphere.

This results in negative CO<sub>2</sub> emissions of -18.8 (conventional German electricity mix) to -20.0 kg CO<sub>2</sub>e per Mg of bottom ash (renewable electricity mix).

Due to these negative emission values, climate-neutral transport is possible, which would not be the case with natural sand and gravel.

Another aspect are the CO<sub>2</sub> emissions that are saved by recovering ferrous and non-ferrous metals from the bottom ash. These results from the difference between the primary production of the metals and the respective recycling of these recovered metals. This results in a CO<sub>2</sub> credit of 1,548.7 kg CO<sub>2</sub>e per Mg of ferrous metals recovered. For non-ferrous metals, this corresponds to 2,471 kg CO<sub>2</sub>e per Mg of separated non-ferrous metals.

If these credits from metal recovery are related to the treated amount of bottom ash, this results in a total CO<sub>2</sub> footprint of approx. -205 kg CO<sub>2</sub>e per Mg of treated bottom ash.

Care should be taken to ensure that the credits from metal recovery are not utilised more than once, e.g. by other industrial sectors. A clear allocation of credits is necessary.

Bottom ash from municipal waste incineration plants is a climate-friendly alternative to primary building materials and offers particular potential for CO<sub>2</sub> savings.

### 3 Zielsetzung dieses Gutachten

Nachhaltigkeit und Klimaneutralität durchdringen zunehmend alle Bereiche der Gesellschaft und stellen bereits heute ein operatives Thema für die strategische Entwicklung von Unternehmen dar.

Die bisherigen Arbeiten des Instituts für Circular Resource Engineering and Management (CREM) an der TU Hamburg zusammen mit dem Hamburg Institute for Innovation, Climate Protection and Circular Economy (HiCCE) zum CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von HMV-Schlacken zeigen, dass die Aufbereitung und Nutzung von Schlacke einen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Die Verwendung der aufbereiteten Schlacken als Baustoff führt durch den Karbonatisierungseffekt zur chemischen Bindung von atmosphärischem CO<sub>2</sub> und stellt nachweislich eine technische CO<sub>2</sub>-Senke dar. Damit leistet auch die Verwendung des mineralischen Anteils der Schlacke einen relevanten Beitrag zum Klimaschutz. Durch eine effektive und effiziente Aufbereitung von Schlacke können die Wertstoffe in die Kreislaufwirtschaft zurückgeführt und somit CO<sub>2</sub>-Emissionen vermieden werden.

Nach einer gemeinsamen Umfrage der Verbände ITAD und IGAM konnte im Jahr 2022 aus den 6,05 Mio. Mg Frischschlacke 5,62 % FE-Metalle, 2,24 % NE-Metalle und 0,33 % VA-Metalle/Grobmetalle hochwertig wiedergewonnen werden (ITAD / IGAM 2024). Die Schlackeaufbereitung leistet dabei vor allem durch die Zurückgewinnung von Metallen einen positiven Beitrag zum Klimaschutz.

Ziel dieser Gutachterlichen Stellungnahme ist die Erarbeitung einer wissenschaftlich fundierten Bewertungsmethode der Schlackeaufbereitung, die Modellierung der Schlackeaufbereitung nach dem Stand der Technik und der Definition eines Vergleichsszenarios. Weiterhin wird allgemein der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von HMV-Schlacke für die Interessengemeinschaft der Aufbereiter und Verwerter von Müllverbrennungsschlacken (IGAM) bilanziert.

Für die CO<sub>2</sub>-Bilanzierung werden folgende Aspekte berücksichtigt:

- Energiebedarf der Schlackebehandlung
- Karbonatisierungseffekt der Schlacke
- Eingesparte CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Metallrückgewinnung

Die Datengrundlage für die Bilanzierung basieren auf dem Mittelwert von drei Anlagen aus dem Jahr 2020.

Der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck stellt eine anerkannte Methode zur Bewertung der Klimaauswirkungen eines Produkts dar. Dabei werden alle Treibhausgasemissionen (THG), die bei der Herstellung von Produkten entstehen, bilanziert.

Der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck fördert die Transparenz der Klimarelevanz einzelner Produkte, wie z. B. von Schlacke und ermöglicht eine Vergleichbarkeit zu Alternativen, wie Natursande und Kiese. Auch können Verfahrensschritte lokalisiert werden, die den größten Anteil an der Klimawirksamkeit haben. Somit werden jene Stellen im System

identifiziert, an welchen mit geringstem Aufwand der größte Einfluss ausgeübt werden kann.

Auftraggeber dieser gutachterlichen Stellungnahme ist die Interessengemeinschaft der Aufbereiter und Verwerter von Müllverbrennungsschlacke (IGAM). Die IGAM ist ein Zusammenschluss von 28 Mitgliedern, die sich für die Förderung und Weiterentwicklung der Aufbereitung und Verwertung von Hausmüllverbrennungsschlacke (HMV-Schlacke) einsetzen.

Die IGAM plant diesen realen Klimaschutzbeitrag von HMV-Schlacke in der politischen Diskussion zu nutzen und will ihren Mitgliedsunternehmen die wissenschaftlich fundierten Berechnungen dieses Gutachtens zur Verfügung zu stellen.

## 4 Vorgehensweise zur Gutachterlichen Stellungnahme zum Klimaschutzbeitrag der HMV-Schlackeaufbereitung und -verwendung

Zunächst wird ein grundlegendes Modell der Schlackeaufbereitung und Schlackeverwertung erstellt. Dieses umfasst:

1. Die Erarbeitung einer wissenschaftlich fundierten Bewertungsmethode (Process Carbon Footprint)
2. Die Modellierung der Schlackeaufbereitung nach Stand der Technik in enger Abstimmung mit der IGAM
3. Die Definition eines Vergleichsszenarios
4. Berechnung des Carbon Footprint der Schlackeaufbereitung und -verwertung nach IGAM-Standard

Die zu erarbeitende Methodik folgt dem Prinzip des Process Carbon Footprint. Dieser zeigt auf, welche CO<sub>2</sub>-Emissionen entstehen und welche Einsparungen durch rückgewonnene Materialien erzielt werden. Der Process Carbon Footprint bildet auch die Basis für Reduktionen durch Prozessoptimierungen und technische Veränderungen.

Die Modellierung der HMV-Schlackeaufbereitung wird auf Basis von Daten aus Literatur, eigenen Projekten sowie Daten der IGAM erstellt. Hierfür wird gemeinsam mit der IGAM ein allgemeiner Stand der Aufbereitungstechnik und der Abtrennung von Metallen festgelegt.

Der Einfluss der Transportemissionen wird grafisch dargestellt.

Als Vergleichsszenario wird die Schlackebehandlung ohne Aufbereitungstechnik festgelegt und modelliert.

Auf der Basis dieser Modelle erfolgt die Berechnung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks der Schlackeaufbereitung und -verwertung der IGAM-Mitgliedsunternehmen für das Bezugsjahr 2020. Hierzu sind folgende allgemeine Betriebsdaten notwendig, die von der IGAM bereitgestellt werden:

- Gesamt-Schlackemenge (behandelt)
- Energieeinsatz
  - Kraftstoffeinsatz
  - Strombedarf
- Anteil der zurückgewonnen NE und FE-Metalle

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen der einzelnen Prozessschritte sowie die Gutschriften für die abgetrennten Metalle werden wissenschaftlicher Literatur und einschlägigen Datenbanken entnommen und dokumentiert. Für die Berücksichtigung der Gutschriften die sich aus der Metallrückgewinnung ergeben, werden die klimawirksamen Emissionen aufgezeigt, die durch die Rückgewinnung der Metalle aus der HMV-Schlacke verhindert werden. Hierfür wird zunächst berechnet welche CO<sub>2</sub>-Emissionen

sich aus der Rohmetallproduktion ergeben, um von diesen die ebenfalls berechneten CO<sub>2</sub>-Emissionen des jeweiligen Metallrecyclings abzuziehen.

Eine weitere Betrachtung liegt auf dem Karbonatisierungseffekt der HVM-Schlacke. Hierbei wird atmosphärisches CO<sub>2</sub> mineralisch gebunden. Bei dieser Potentialabschätzung wird auf Literaturwerte zurückgegriffen.

Der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von „Natursand“ und „natürlicher Gesteinskörnung“ wird den Ergebnissen der Schlackebilanzierung gegenübergestellt. Die Bedeutung von Transportemissionen wird über die oben dargelegte Methode in Form von Entfernungsradien illustriert.

## 4.1 Grundbegriffe und Hintergrund

### 4.1.1 CO<sub>2</sub>-Fußabdruck

Ziel bei der Erstellung eines CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks ist es, die klimarelevanten Verbrauchsdaten eines Unternehmens, eines Standortes oder eines Produktes zu erfassen.

Das Vorgehen erfolgt, soweit in diesem Fall anwendbar, in Übereinstimmung mit dem Corporate Value Chain Accounting and Reporting Standard des GHG Protocol und der ISO Norm 14064 - Treibhausgase.

Zur CO<sub>2</sub>-Bilanzierung werden Ökobilanzierungsdatenbanken in Kombination mit entsprechender Bilanzierungssoftware genutzt. Im Rahmen dieser gutachterlichen Stellungnahme wurde die Ökobilanzierungsdatenbank ecoinvent 3.10 zusammen mit der Open Source Life Cycle Assessment Software open LCA 2.2.0 von der GreenDelta GmbH verwendet.

Die Erstellung eines Produkt CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks erhöht die Transparenz über die Umweltauswirkungen einzelner Produkte und Prozesse und hilft bei der Entwicklung einer adäquaten Klimastrategie und dem Verfolgen von Nachhaltigkeitszielen. Die Bewertung der unternehmensspezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen wird immer bedeutender und häufig auch von Kunden gewünscht. Sie stellen ein wichtiges Marketingwerkzeug dar und können bei einem transparenten Umgang das Vertrauen von Kunden stärken.

Für Schlacke aus der Hausmüllverbrennung kann ebenfalls ein CO<sub>2</sub>-Fußabdruck erstellt werden. Dabei werden die Emissionen, die bei der Behandlung der Schlacke entstehen, der Karbonatisierungseffekt der Schlacke sowie die Umweltvorteile durch die Rückgewinnung von Metallen berücksichtigt.

### 4.1.2 Treibhauspotenzial

Beim Treibhauspotential (Global Warming Potential – GWP) werden die Mengen an klimawirksamen Gasen bilanziert, die zur Verstärkung des Treibhauseffekts beitragen. Weiterhin werden ihre Verweildauer in der Atmosphäre, die dazugehörigen Absorptionskoeffizienten für infrarote Wärmestrahlung des Sonnenlichtes und die erwartete Wärmeabstrahlung ins All berücksichtigt.

Die sechs wesentlichen klimawirksamen Gase wurden 1997 im Kyoto-Protokoll definiert.

Diese sind Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>), Distickstoffmonoxid beziehungsweise Lachgas (N<sub>2</sub>O), teilhalogenierte Fluorwasserstoffe (H-FKW/HFCs), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW/PFCs) und Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>) (vgl. UNFCCC 1997). Um die verschiedenen Einflüsse der verschiedenen klimawirksamen Gase miteinander vergleichen zu können, werden sie in Relation zu den Klimaauswirkungen von einem Kilogramm CO<sub>2</sub> gesetzt, den CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (CO<sub>2</sub>e).

Zur besseren Veranschaulichung stellt Tabelle 3 eine Auswahl von Referenzwerten von Produkten oder Dienstleistungen dar, die 1 kg CO<sub>2</sub>e verursachen.

Tabelle 3: Referenzwerte für Produkte und Dienstleistungen welche 1 kg CO<sub>2</sub>e emittieren

9,43	km Transport per LKW > 32 Tonnen, EURO 6 von 1 Mg Schüttgut	Ecoinvent 3.10: transport, freight, lorry > 32 metric ton, EURO6
2,34	kWh Strommix in Deutschland	Ecoinvent 3.10: market for electricity, medium voltage   electricity, medium voltage   Cutoff, U
13,8	kWh Strommix aus erneuerbaren Energien in Deutschland	Angepasster ecoinvent 3.10 Datensatz. Siehe Anhang S. 32
0,28	Liter Diesel, genutzt in einem Radlader	Ecoinvent 3.10: diesel, burned in building machine   diesel, burned in building machine   Cutoff, U
4,3	Minuten Nutzung eines LPG Gasstaplers (Beispielsweise H50 / 500 T von Linde)	<a href="https://www.linde-mh.de/media/Datasheets/DE_tb_h3_5_h50_1204_de_a_0122_view.pdf">https://www.linde-mh.de/media/Datasheets/DE_tb_h3_5_h50_1204_de_a_0122_view.pdf</a>

## 4.2 Einfluss der Karbonatisierung

Frische Schlacke durchläuft einen natürlichen Verwitterungsprozess, bei welchem sich die Schlacke chemisch stabilisiert. Dieser Prozess dauert drei bis sechs Monate. Dabei karbonatisiert die Schlacke unter atmosphärischen Bedingungen, bei welcher atmosphärisches CO<sub>2</sub> chemisch gebunden wird. (Rendek et al., 2006), (Lam et al., 2010)

Die Karbonatisierung wird durch Faktoren wie Reaktionszeit, Partikelgröße, Temperatur, Druck, Wasser-Feststoff-Verhältnis (Wassergehalt oder Feuchtigkeit) und Vorhandensein anderer Elemente beeinflusst. Durch die Karbonatisierung verringert sich die Auswaschung von Schwermetallen wie Blei, Chrom und Kadmium (Rendek et al., 2006).

In einer von Rendek et al. (2006) durchgeführten Studie wurden ungesiebte und gesiebte Schlackeproben in einer Kohlendioxidkammer unter Variation des Drucks und der Feuchtigkeit der Probe karbonisiert. Im Durchschnitt betrug die Sequestrierung von CO<sub>2</sub> bei gesiebten Versuchen 24 L/kg Trockenmasse (TM) und bei ungesiebten 12,5 L/kg TM, wobei eine Feuchtigkeit von 15 % der Schlacke zur höchsten

Karbonatisierung führte (Rendek et al., 2006). Dies stöchiometrisch umgerechnet ergibt 47 kg CO<sub>2</sub> pro Mg Schlacke.

Nam et al. (2012) stellten fest, dass die idealen Bedingungen für eine schnelle Karbonatisierung von Schlacke bei einer Temperatur von 20 °C, einem Verhältnis von Flüssigkeiten zu Feststoffen von 0,2 und einer CO<sub>2</sub>-Zufuhr von 20 % erreicht wurden, was unter idealen Bedingungen zu einer CO<sub>2</sub>-Aufnahme von 33 kg pro Mg Schlacke führte. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass das aus Verbrennungsanlagen emittierte CO<sub>2</sub> mit dem typischen Wassergehalt (15 – 25 %) und der CO<sub>2</sub>-Konzentration (5 – 20 %) direkt für eine effiziente Karbonatisierung von Schlacke genutzt werden kann.

Schnabel et al. (2021) führten einen Versuch durch, bei dem ein Reaktionsgas mit 10 Vol.-% CO<sub>2</sub> für 2 Stunden in Festbett- und Drehtrommelreaktoren zugeführt wurde. Die Karbonatisierung von behandelter und gesiebter Schlacke führte zu einer CO<sub>2</sub>-Aufnahme von 35 kg CO<sub>2</sub> pro Mg Schlacke für die rotierende Trommel und 25 kg CO<sub>2</sub> pro Mg Schlacke für den Festbettreaktor.

In ähnlicher Weise führten Brück et al. (2018) Versuche für behandelte und gesiebte Schlacke unter einer 100-prozentigen CO<sub>2</sub>-Atmosphäre für 2 Stunden in statischen und dynamischen Reaktoren durch. Statische Versuche zeigten eine CO<sub>2</sub>-Fixierung von 15 kg CO<sub>2</sub> pro Mg Schlacke, während dynamische Versuche eine CO<sub>2</sub>-Fixierung von 26 kg CO<sub>2</sub> pro Mg Schlacke ergaben.

Abbildung 2 gibt einen Überblick über die unterschiedlichen Karbonatisierungsgrade der genannten Studien bezogen auf 1 Mg Schlacke durch dynamische und statische Karbonatisierungsverfahren.

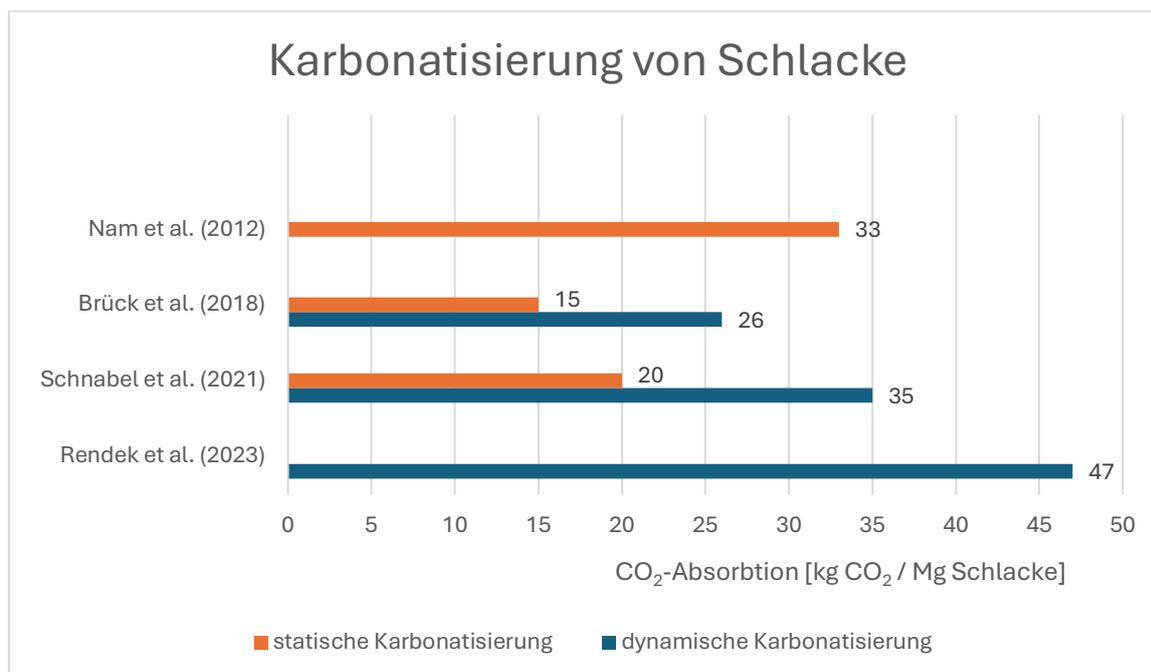


Abbildung 2: Zusammenfassung der Forschungsergebnisse zur CO<sub>2</sub>-Bindung bei dynamischer und statischer Karbonatisierung

Je nach vorhandenen Bedingungen variiert die Karbonatisierung von Schlacke. Erhöhter atmosphärischer Druck, hohe CO<sub>2</sub>-Konzentration, aktive Belüftung sowie ein optimales fest/flüssig Verhältnis der Schlacke erhöhen den Karbonatisierungsgrad.

Unter idealsten Bedingungen (Rendek et al. (2006)) kann bis zu 47 kg CO<sub>2</sub> pro Mg Schlacke mineralisch gebunden werden.

Für den Karbonatisierungseffekt, der in diesem Gutachten verwendet wird, wird von einer Karbonatisierung von 23 kg CO<sub>2</sub> pro Mg Schlacke ausgegangen. Diese ergibt sich aus dem Mittelwert der Ergebnisse aus den oben genannten Studien zur statischen Karbonatisierung.

## 5 Ermittlung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks

### 5.1 Methodik zur Erarbeitung des Process Carbon Footprint

Im folgenden Abschnitt werden die benötigte Software, LCIA-Methode und Betrachtungsgrenzen für die Modellierung des CO<sub>2</sub>-Fußabdruckes aufgeführt und kurz erläutert.

#### 5.1.1 Verwendete Software und Ökobilanzierungs-Datenbank und LCIA-Methode

Im Rahmen dieses Gutachtens wurde die Ökobilanzierungssoftware openLCA 2.2.0 zusammen mit der Ökobilanzierungsdatenbank ecoinvent 3.10 Cutoff – unit verwendet. Bei beiden handelt es sich um die aktuellsten verfügbaren Versionen (Stand November 2024). Als LCIA-Methode wurde „ReCiPe-Midpoint (H)“ (2016) verwendet.

#### 5.1.2 Betrachtungsgrenzen

Die Prozesse, die hinsichtlich der Stoff- und Energieflüsse sowie der Emissionen untersucht werden, werden durch Systemgrenzen definiert. Dies führt notwendigerweise zu einer Abgrenzung der verschiedenen Prozesse des untersuchten Systems.

In der vorliegenden Auswertung wurde für die jeweiligen Schlackeaufbereitungsanlagen als erste Systemgrenze die Bewegung der Schlacke auf dem jeweiligen Betriebsgelände mit Bagger und Radlader als Eingangssystemgrenze gewählt. Dies stellt den Beginn der Schlackenbehandlung dar. Die zweite Betrachtungsgrenze ist das Verlassen der Schlacke aus der Aufbereitungsanlage, wobei hierbei keine Transportprozesse mitbilanziert werden.

#### 5.1.3 Modellbildung der Schlackeaufbereitungsanlagen der IGAM

Die im Anhang beigefügte Referenzanlage stellt die typische Prozessübersicht dar die von Mitgliedern der IGAM verwendet wird. Diese bildet bei der Modellierung der CO<sub>2</sub>-Bilanz der Schlacke bzw. der Schlackeaufbereitungsanlage die Grundlage der betrachteten Prozesse. Darüber hinaus werden Materialbewegungen welche mittels Radlader und Bagger stattfinden berücksichtigt.

Die Schlacke-Behandlung der IGAM-Referenzanlage beginnt mit der Vorbehandlung, in welcher Störstoffe aussortiert werden. Die Störstoffe werden ggf. in die Kategorien Unverbranntes, NE/FE sehr grob und Reste sehr grob unterteilt. Die Schlacke wird in einem Grob-Sieb in die Fraktionen < 45 - 80 mm und > 45 - 80 mm getrennt. Mittels der nachgestellten Magnetabscheidung werden die FE-grob Anteile von beiden Fraktionen abgeschieden. Die Fraktion < 45 - 80 mm wird über die Fein-Fraktionierung, bspw. Siebanlagen oder ballistische Trennung, in einer oder mehreren Stufen in bis zu vier Fraktion (sehr fein, fein, mittel, grob) weiterunterteilt. Anschließend werden in den vier Fraktionen über Magnetabscheider die FE-Metalle und über die Wirbelstromabscheider die NE-Metalle abgeschieden. Die Mineral-Fraktion ist das zurückbleibende Material und wird als Schlacke weiterverwendet. Die

Fraktion > 45 - 80 mm wird zunächst durch einen Brecher zerkleinert. Anschließend wird das Material über ein Grob-Sieb getrennt, wobei das Feingut der Fraktion < 45 - 80 mm zugeführt wird. Der unverbrannte Anteil des Grobguts wird daraufhin mit Hilfe eines Windsichters abgetrennt. Im letzten Schritt wird das verbliebene Material per Hand in die Fraktionen Rest grob, Unverbranntes und NE/FE grob sortiert.

Zur Modellbildung der CO<sub>2</sub>-Bilanzierung der Schlackeaufbereitung der IGAM dient das Flussdiagramm in Abbildung 3.

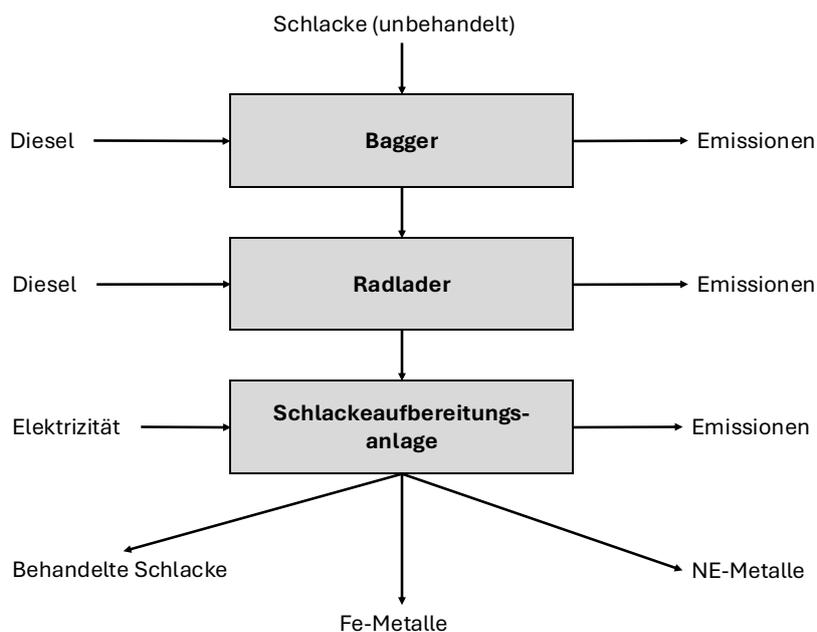


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Schlackeaufbereitung der IGAM

Modelliert wird dies durch die folgenden ecoinvent 3.10 Datensätze.

- diesel, burned in building machine | diesel, burned in building machine | Cutoff, U
- electricity, medium voltage, residual mix | electricity, medium voltage | Cutoff, U

Der in dieser Bilanz verwendete Strommix der Schlackebehandlungsanlagen entspricht dem deutschen Strommix bzw. einem regenerativeren Strommix, dessen genaue Zusammensetzung im Anhang dargestellt ist.

## 5.2 Bilanzierung der Schlackeaufbereitungsanlagen

Bezogen auf eine Tonne behandelte Schlacke ergeben sich im Jahr 2020 für die drei Anlagen gemittelt folgende CO<sub>2</sub>-Fußabdrücke, welche in Tabelle 4 dargestellt sind. Ebenfalls ersichtlich ist die Differenz, wenn statt des deutschen Strommix ein erneuerbarer Strommix verwendet wird, in welchem keine fossilen Energieträger enthalten sind.

Tabelle 4: Gemittelter CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der drei Anlagen

	Mittelwert
Behandelte Schlacke	194.812 Mg
Diesel Verbrauch	129.542 L
Stromverbrauch	542.178 kWh
CO <sub>2</sub> -Fußabdruck pro behandelte Tonne Schlacke (mit konventionellem Strommix)	<b>4,23 kg CO<sub>2</sub>/Mg Schlacke</b>
CO <sub>2</sub> -Fußabdruck pro behandelte Tonne Schlacke (mit erneuerbarem Strommix)	<b>2,99 kg CO<sub>2</sub>/Mg Schlacke</b>

Den größten Anteil an den CO<sub>2</sub>-Emissionen der betrachteten Schlackebehandlungsanlagen der IGAM machen der Dieselverbrauch und die damit einhergehenden Emissionen aus der Dieselproduktion aus.

Hervorzuheben ist der Unterschied zwischen der Verwendung eines konventionellen Strommix gegenüber einem erneuerbaren Strommix. So ist es möglich durch einen Wechsel von einem konventionellen Strommix auf einen erneuerbaren Strommix 30 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Schlackeaufbereitung einzusparen.

Die hier berechneten Werte für den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Aufbereitungstechnik sind in ihrer Größenordnung vergleichbar mit vorherigen im Institut durchgeführten Berechnungen von Schlackeaufbereitungsanlagen.

## 5.3 Karbonatisierung von Schlacke

Frische Schlacke durchläuft einen natürlichen Verwitterungsprozess, bei welchem sich die Schlacke chemisch stabilisiert und atmosphärisches CO<sub>2</sub> chemisch gebunden wird.

Darüber hinaus verringert die Karbonatisierung die Auswaschung von Schwermetallen wie Blei, Chrom und Kadmium (Rendek et al., 2006).

Die Karbonatisierung wird durch Faktoren wie Reaktionszeit, Partikelgröße, Temperatur, Druck, Wasser-Feststoff-Verhältnis (Wassergehalt oder Feuchtigkeit) und

Vorhandensein anderer Elemente beeinflusst. Als Referenzwert für den Karbonatisierungseffekt wird in dieser Studie 23 kg CO<sub>2</sub> pro Mg Schlacke gewählt.

Tabelle 5 zeigt die hochgerechnete Menge an gebundenem CO<sub>2</sub> auf, welche durch die Karbonatisierung gebunden wurde.

Tabelle 5: Karbonatisierungseffekt der Schlacke, hochgerechnet auf die Gesamtmenge an behandelter Schlacke

Gemittelte Menge behandelte Schlacke der drei Anlagen	194.812 Mg
durch Karbonatisierung gebundenes CO <sub>2</sub>	4.481 Mg CO <sub>2</sub>

Unter Berücksichtigung der Karbonatisierung und der Schlackebehandlung ergibt sich für 1 Mg Schlacke ein negativer CO<sub>2</sub>-Fußabdruck. Somit handelt es sich bei der Schlacke um einen CO<sub>2</sub>-negativen Ersatzbaustoff. Abbildung 4 zeigt die Zusammensetzung des CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Schlacke auf. Diese Werte basieren auf gemittelte Verbrauchsdaten von drei Anlagen.

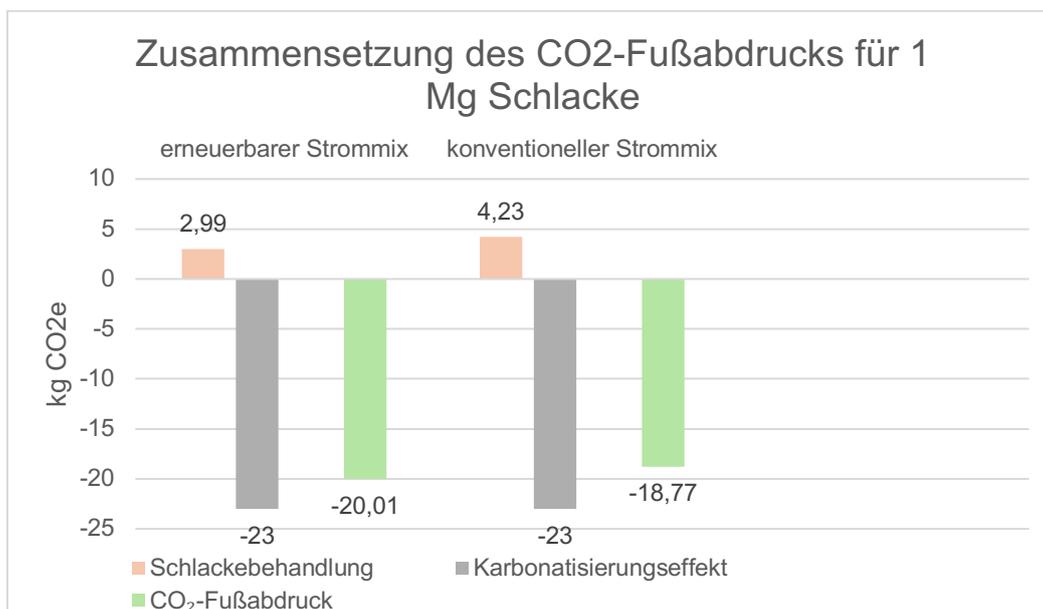


Abbildung 4: Zusammensetzung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks für 1 Mg Schlacke

#### 5.4 Vergleich zu natürlichen Baustoffen

HMV-Schlacke kann als mineralischer Ersatzbaustoff natürliche Baustoffe wie Sand und Kies substituieren.

Tabelle 6 zeigt die CO<sub>2</sub>-Emissionen für vergleichbare Naturprodukte, wie Sand, Splitt und Kies 2/32 auf. Im Vergleich dazu steht die behandelte Schlacke mit CO<sub>2</sub>-Emissionen von gemittelt 2,99 kg CO<sub>2</sub>e (erneuerbarer Strommix) bzw. 4,23 kg

CO<sub>2</sub>e (konventioneller Strommix) abzüglich des Karbonatisierungseffekts, wie in der obigen Abbildung 4 dargestellt.

Tabelle 6: CO<sub>2</sub>-Fußabdrücke verschiedener natürlicher Baustoffe

Produkt	CO <sub>2</sub> -Emissionen für die Produktion von 1 Tonne [kg CO <sub>2</sub> e]	Hintergrund	Datengrundlage
Sand	5,5	35 % Sand und 65 % Kies	ecoinvent Datensatz: market for sand   sand   Cutoff, U
Splitt	6,9	Gebrochener Splitt aus Granit oder Basalt Steinbrüchen	ecoinvent Datensatz: market for gravel, crushed   gravel, crushed   Cutoff, U
Kies 2/32	2,9	Tagebau, Wäsche und Siebe	<a href="https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=3ce61a4e-4d91-4b1d-b675-276be05b9225&amp;version=20.19.120">https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=3ce61a4e-4d91-4b1d-b675-276be05b9225&amp;version=20.19.120</a>

## 5.5 Alternativszenario „Keine Schlackebehandlung“

Für die Berechnung des Szenarios „Keine Schlackebehandlung“, bei welchem die Schlacke nicht aufbereitet wird, wird kein Stromverbrauch und die Hälfte des Dieselverbrauchs als Grundlage der Berechnung gewählt. Dieser Ansatz ergibt sich daraus, dass das Material nur einmal bewegt wird. Gemittelt ergibt sich dadurch ein CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von 1,37 kg CO<sub>2</sub>e für dieses Szenario.

Die folgende Abbildung 5 stellt die Behandlung der Schlacke mit einem erneuerbaren Strommix und dem konventionellen Strommix der Förderung von Natursand und -kies gegenüber. Weiterhin dargestellt ist das Szenario „Keine Behandlung“.

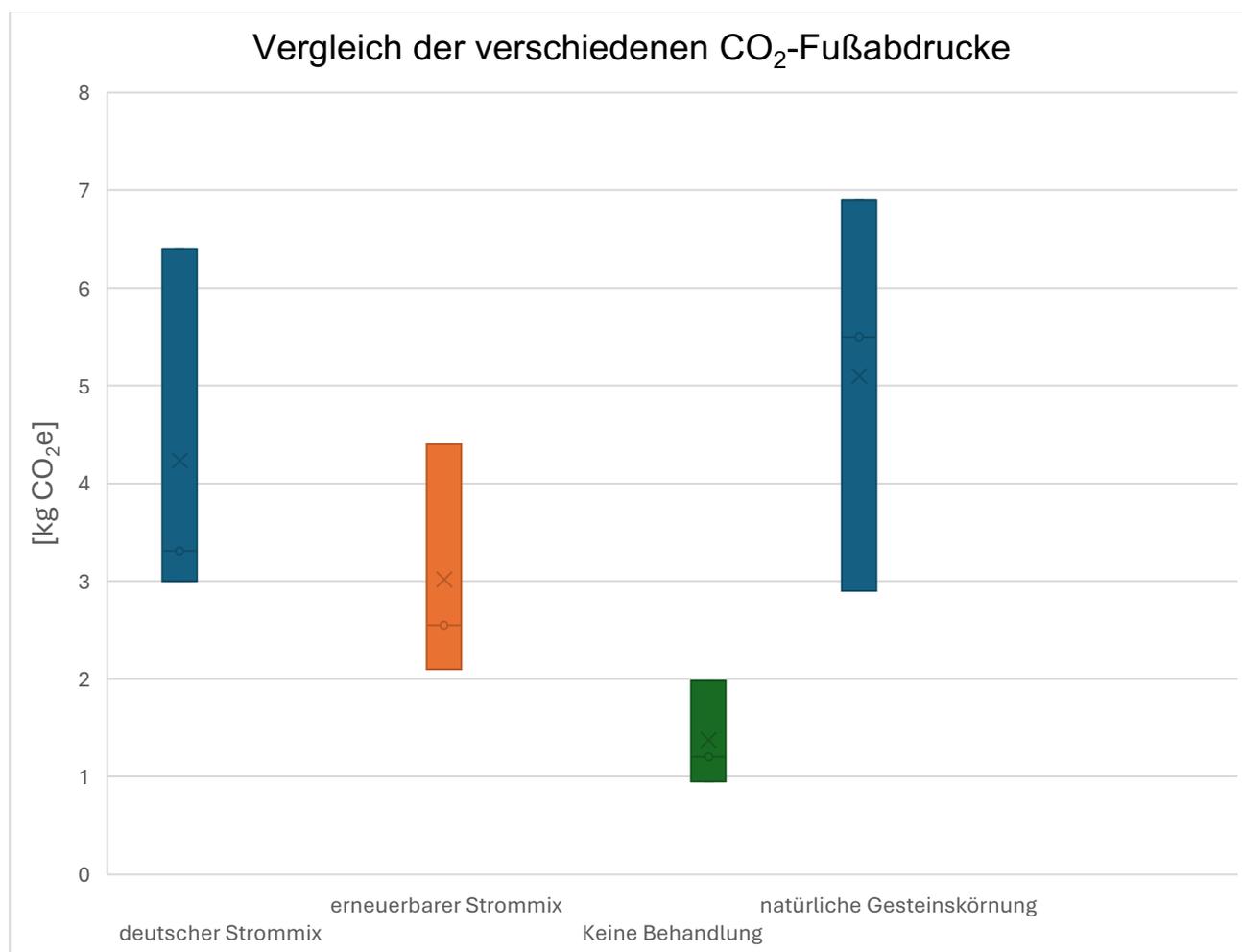


Abbildung 5: Gegenüberstellung der CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Behandlung 1 Mg Schlacke mit erneuerbarem und konventionellem Energiemix, dem Szenario keine Behandlung der Schlacke durchzuführen sowie der Förderung von natürlicher Gesteinskörnung.

## 5.6 Transportemissionen

Transportentfernungen sind von entscheidender Bedeutung. Denn nach ca. 40 km übersteigen die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Transport mit einem Kippsattelzug mit 40 t Gesamtmasse bereits die CO<sub>2</sub>-Emissionen die bei der Aufbereitung der Schlacke

entstehen (in dieser Darstellung 4,23 kg CO<sub>2</sub>e /t Schlacke). Die folgende Abbildung 6 veranschaulicht die Transportstrecke, welche die gleiche Menge CO<sub>2</sub>e freisetzt, wie die Aufbereitung der Schlacke. Als Ausgangsort wurde das CREM Institut gewählt.

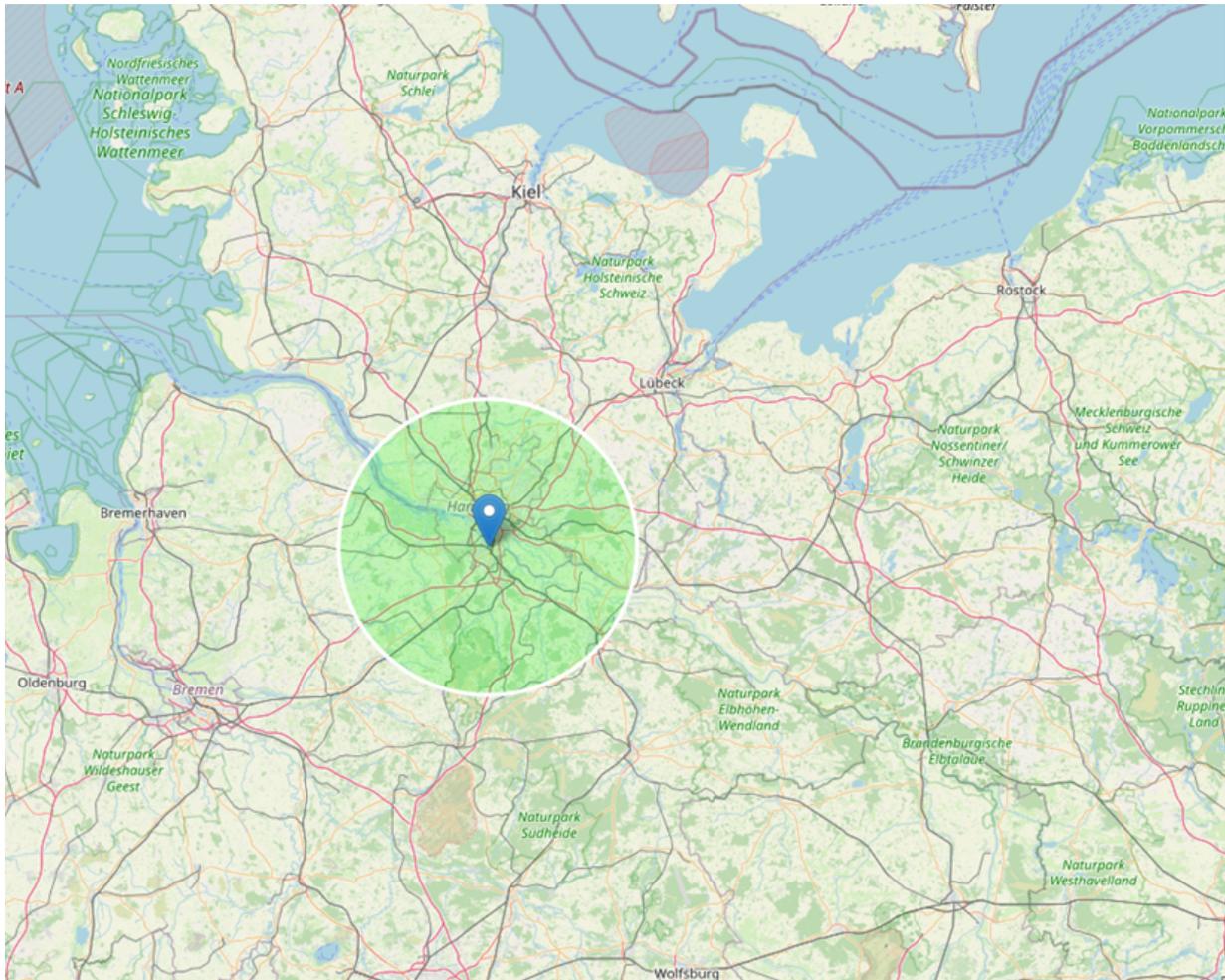


Abbildung 6: Veranschaulichung der Transportstrecke von 40 km mit einem LKW > 32 Tonnen, welche den CO<sub>2</sub>-Emissionen der Aufbereitung von 1 Mg Schlacke entspricht.

In der folgenden Abbildung 7 sind die Transportstrecken grafisch dargestellt, die den transportbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen des negativen CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks aus dem Vergleich auf Seite 18 entsprechen. Diese Darstellung verdeutlicht die Transportdistanz welche möglich wäre, bis die transportierte Schlacke nicht mehr klimaneutral, also einen negativen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck aufweist. Der innere Kreis entspricht 177 km, der äußere 188 km. Ersichtlich hier, die um 11 km höhere Transportdistanz, die sich aus der Aufbereitung der Schlacke mit einem erneuerbaren Strommix ergibt.

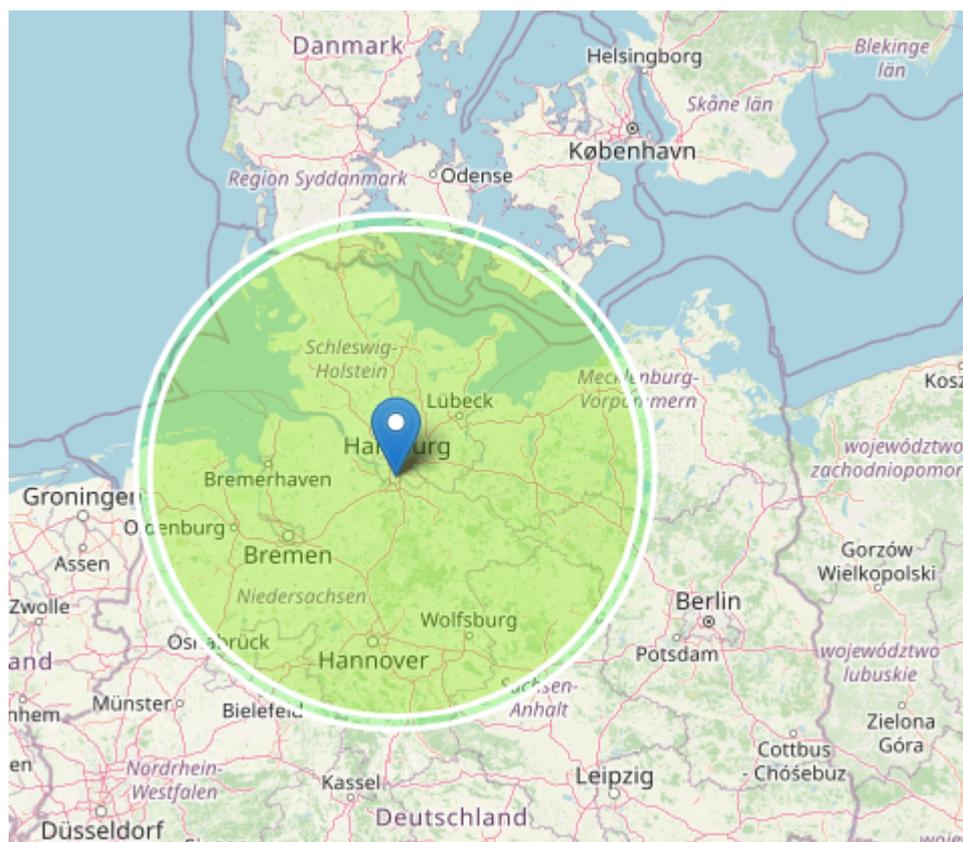


Abbildung 7: Darstellung des möglichen klimaneutralen Transport mit einem LKW > 32 Tonnen, unter Berücksichtigung des Karbonatisierungseffekts. Der äußere Kreis (188 km) berücksichtigt einen erneuerbaren Energiemix in der Schlackeaufbereitung, der innere (177 km) den deutschen Strommix.

Es gibt ein breites Netz an HMV-Schlackeaufbereitungsanlagen in Deutschland, wodurch eine breite regionale Verfügbarkeit von Schlacke gegeben ist. Je nach Verwendungsort und den davon abhängigen Transportentfernungen kann Schlacke im Vergleich zu Naturbaustoffen einen niedrigeren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck aufweisen.

Im Gegensatz zum Transport von Schlacke kann der Transport von Naturbaustoffen nicht klimaneutral erfolgen, da diese keinen negativen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck aufweisen.

In Abbildung 8 sind die unterschiedlichen entfernungsabhängigen Transportemissionen der unterschiedlichen Transportarten aufgetragen. Die Angaben beziehen sich dabei auf den Transport von 1 Tonne Schüttgut. Am effizientesten ist der Transport mit dem Binnenschiff, nahezu vergleichbar mit dem Transport mit einem Güterzug. Bei den LKW weisen die größeren LKW deutlich geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen auf als die kleineren.

Der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Schlacke als Bauprodukt ist somit an jeder Baustelle, je nach Transportdistanz und Transportart unterschiedlich.

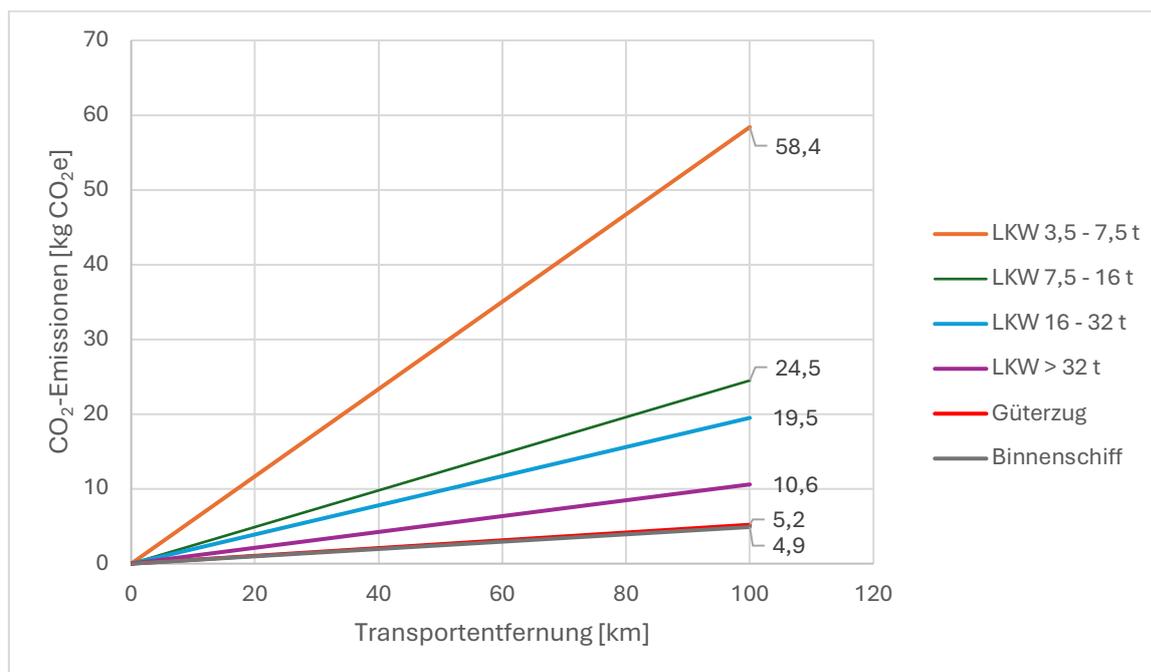


Abbildung 8: Distanzabhängige Transportemissionen mit verschiedenen Transportmöglichkeiten

## 5.7 Metallrückgewinnung

Für die Berechnung der CO<sub>2</sub>-Gutschriften bei der Metallrückgewinnung werden die aus der Schlacke zurückgewonnenen Metalle nach ihrer Aufbereitung gleichgesetzt mit konventionell produzierten Metallen. Die CO<sub>2</sub>-Gutschriften ergeben sich somit aus der Differenz zwischen den CO<sub>2</sub>-Emissionen, die bei der Primärmetallerzeugung entstehen und die bei dem Metallrecycling anfallen.

Auf der Grundlage ihrer magnetischen Eigenschaften werden die Schrottmetalle in der Schlacke in zwei Gruppen unterteilt: eisenhaltige (FE) und nichteisenhaltige (NE) Metalle, die je nach Komplexität der verwendeten Sortiermethode in unterschiedlichem Maße zurückgewonnen werden können (Allegrini et al., 2014).

Nachdem die Metalle von der Schlacke abgeschieden wurden, können diese aufbereitet werden, um als Sekundärwertstoff wiederverwendet zu werden. Für die CO<sub>2</sub>-Bilanzierung der Primär- und Sekundärmetalle werden die Metalle einzeln betrachtet. In den beiden folgenden Abschnitten werden die Datengrundlagen beschrieben, die zur Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Metalle verwendet werden und anschließend die CO<sub>2</sub>-Emissionen basierend auf diesen Daten berechnet.

### 5.7.1 Eisenmetalle

Für die Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Gutschrift von aus Schlacke zurückgewonnen Eisen wird zwischen den Eisen-Fractionen > 5 mm und < 5 mm unterschieden. Die Fraktion > 5 mm, kann für den Recyclingprozess direkt einem Elektrolichtbogenofen

zugeführt werden und dort Altstahl substituieren. Die Fraktion < 5 mm wird mit Eisenerz gleichgesetzt, da die Oberfläche der Eisenpartikel dieser Größe bereits zu sehr oxidiert ist. Diese Fraktion wird somit der Bereitstellung von Eisenerz gleichgestellt.

### Eisen Fraktion > 5 mm:

Für die Erstellung der CO<sub>2</sub>-Gutschrift des abgeschiedenen Eisens > 5 mm werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Primäreisenerzeugung mit denen vom Recyclingprozess von Eisen in einem Elektrolichtbogenofen verrechnet. Daraus ergibt sich eine Gutschrift von 1.703 kg CO<sub>2</sub>e pro Tonne aus der Schlacke abgeschiedenen Eisen > 5 mm. Tabelle 7 zeigt die Zusammensetzung auf.

Tabelle 7: Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Gutschrift der Eisenfraktion > 5 mm

Beschreibung	CO <sub>2</sub> -Emissionen für 1 Mg Eisen [kg CO <sub>2</sub> e]	Datengrundlage
Primäreisenerzeugung	2.248	Steel production, converter, low-alloyed, steel low-alloyed, cutoff, RER
Eisenrecycling	545	Steel production, electric, low alloyed, steel low-alloyed, cutoff, Europe without Switzerland and Austria
CO <sub>2</sub> -Gutschrift pro Tonne Eisen	1.703	

### Eisen Fraktion < 5 mm:

Für die Berechnung der CO<sub>2</sub>-Gutschrift des abgeschiedenen Eisens < 5 mm wird die Nagelschrottfraktion anstelle von Eisenerz eingesetzt. Damit ergibt sich die CO<sub>2</sub>-Einsparung durch das Vermeiden der Bereitstellung von Eisenerz. Dieses wird hier mit dem ecoinvent 3.10 Datensatz „Market for iron ore, crude ore, 63% FE, cutoff GLO“ berechnet. Um die Vergleichbarkeit mit dem berechneten reinen Eisenanteil der abgeschiedenen FE-Fraktion zu gewährleisten, werden die CO<sub>2</sub>-Äquivalente für die Bereitstellung des Eisenerzes auf 100 % hochskaliert.

Tabelle 8: Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Gutschrift der Eisenfraktion < 5 mm

Beschreibung	CO <sub>2</sub> -Emissionen für 1 Mg Eisenerz [kg CO <sub>2</sub> e]	Datengrundlage
Bereitstellung von Eisenerz (63 % Eisenanteil)	100,7	Market for iron ore, crude ore, 63% FE, cutoff GLO, Bezogen auf reinen Eisengehalt
Gutschrift bezogen auf eine reine Eisenfraktion < 5 mm	159,8	

In der folgenden Tabelle 9: CO<sub>2</sub>-Gutschriften der FE-Metalle sind die abgeschiedenen Eisenmengen der drei Anlagen dargestellt. Bei dieser Berechnung wird angenommen, dass der Nagelschrottanteil < 5 mm ca. 10 % des abgeschiedenen Eisens beträgt. Weiterhin wird angenommen, dass der Wasseranteil 7 % und die Reinheit der abgeschiedenen Metalle 90 % beträgt. In dieser Berechnung wird davon ausgegangen, dass 90 % der zurückgewonnenen FE-Metalle größer als 5 mm sind. Entsprechend sind 10 % kleiner als 5 mm. Dieses Verhältnis ist eine Abschätzung, die mit der IGAM getroffen wurde.

Tabelle 9: CO<sub>2</sub>-Gutschriften der FE-Metalle

	Einheit	Mittelwert
abgeschiedene FE-Fraktion	[Mg]	12.655,69
Reine FE-Fraktion	[Mg]	10.592,81
Eisen > 5 mm	[Mg]	9.533,53
Eisen <5 mm	[Mg]	1.059,28
Gutschrift Eisen > 5 mm	[Mg CO <sub>2</sub> e]	16.235,60
Gutschrift Eisen < 5 mm	[Mg CO <sub>2</sub> e]	169,27
Gesamt:	[Mg CO <sub>2</sub> e]	16.404,88
CO <sub>2</sub> -Gutschrift pro Tonne behandelte Schlacke	[kg CO <sub>2</sub> e]	94,40

## 5.7.2 Nichteisenmetalle

Für die Bilanzierung der Gutschriften, die sich aus der Rückgewinnung der NE-Metalle ergeben, wird von folgender Zusammensetzung ausgegangen (siehe Tabelle 10). Diese stellt eine Näherung dar, da die Metallzusammensetzung je nach Abfallzusammensetzung variieren kann. Im Fall von Aluminium ist bekannt, dass Verluste in Höhe von etwa 17 % auftreten (Enzner, V. and Kuchta, K. (2016)). Bei Kupfer sind Verluste in Höhe von 2 % zu erwarten (Glöser, S., Soulier, M., & Tercero Espinoza, L. A. (2013), S. 36). Es wird angenommen, dass die Aufbereitungsverluste der übrigen NE-Metalle niedrig und somit vernachlässigbar sind. Es sei darauf hingewiesen, dass die hier dargestellten CO<sub>2</sub>-Werte als Näherungswerte zu verstehen sind.

*Tabelle 10: Zusammensetzung der abgeschiedenen NE-Fraktion*

Zusammensetzung der NE-Metalle	Prozentualer Anteil
Mineralik	50 %
Aluminium	33 %
Kupfer	12 %
Zink	2,5 %
Rest	2,5 %

Der Rest besteht aus VA-Stahl, Blei, Silber, Gold, Platin und Palladium, deren mögliche CO<sub>2</sub>-Gutschrift hier aufgezeigt werden, jedoch aufgrund der geringen Menge dieser Metalle nicht in diese Bilanz mit eingeht.

Im Folgenden werden für die einzelnen Metalle die jeweiligen Gutschriften berechnet.

### **Aluminium:**

Für die Erstellung der CO<sub>2</sub>-Gutschrift des abgeschiedenen Aluminiums wird der Prozess der Primäraluminiumerzeugung mit der des Aluminiumrecyclings mit den folgenden Datensätzen von ecoinvent 3.10 berechnet. Folgend ist zu beachten, dass laut Enzner, Verena and Kuchta, Kerstin (2016) 17 % des Aluminiums als Verlust anfällt, da dieses während der Verbrennung in der HMV zu Aluminiumoxid oxidiert.

Tabelle 11: Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Gutschrift von Aluminium

Beschreibung	CO <sub>2</sub> -Emissionen für 1 Mg Aluminium [kg CO <sub>2</sub> e]	Datengrundlage
Primäraluminiumerzeugung	7.380,9	aluminium production, primary, ingot   aluminium, primary, ingot   Cutoff, U
Aluminiumrecycling	557,1	treatment of aluminium scrap, new, at remelter   aluminium, wrought alloy   Cutoff, U
CO <sub>2</sub> -Gutschrift	6.823,8	

### Kupfer:

Für die Erstellung der CO<sub>2</sub>-Gutschrift des abgeschiedenen Kupfers wird der Prozess der Primärkupfererzeugung mit der des Recyclings von Kupfer mit den folgenden Datensätzen von ecoinvent 3.10 verrechnet.

Tabelle 22: Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Gutschrift von Kupfer

Beschreibung	CO <sub>2</sub> -Emissionen für 1 Mg Kupfer [kg CO <sub>2</sub> e]	Datengrundlage
Primärkupfererzeugung	6.342,9	market for copper, anode   copper, anode   Cutoff, U
Kupferrecycling	1.748,9	treatment of copper scrap by electrolytic refining
CO <sub>2</sub> -Gutschrift	4.594	

### Zink:

Für die Erstellung der CO<sub>2</sub>-Gutschrift des abgeschiedenen Zinks wird der Prozess der Primärzinkerzeugung mit der des Recyclings von Zink mit den folgenden Datensätzen von ecoinvent 3.10 verrechnet.

Tabelle 133: Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Gutschrift von Zink

Beschreibung	CO <sub>2</sub> -Emissionen für 1 Mg Zink [kg CO <sub>2</sub> e]	Datengrundlage
Primärzinkerzeugung	2.636,6	market for zinc   zinc   Cutoff, U - GLO
Zinkrecycling	150	Rezinal (2022)
CO <sub>2</sub> -Gutschrift	2.486,6	

### Blei:

Für die Erstellung der CO<sub>2</sub>-Gutschrift des abgeschiedenen Bleis wird der Prozess der Primärbleierzeugung mit der des Recyclings von Blei mit den folgenden Datensätzen von ecoinvent 3.10 verrechnet.

Tabelle 14: Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Gutschrift von Blei

Beschreibung	CO <sub>2</sub> -Emissionen für 1 Mg Blei [kg CO <sub>2</sub> e]	Datengrundlage
Primärbleierzeugung	1.447,67	market for lead   lead   Cutoff, U - GLO
Bleirecycling	582,22	treatment of scrap lead acid battery, remelting   lead   Cutoff, U - RoW
CO <sub>2</sub> -Gutschrift	865,45	

### VA-Stahl:

Für die Erstellung der CO<sub>2</sub>-Gutschrift des abgeschiedenen Edelstahl (VA-Stahl) wird der Prozess der Primäredelstahlerzeugung mit der des Edelstahlrecyclings mit den folgenden Datensätzen von ecoinvent 3.10 berechnet.

Tabelle 15: Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Gutschrift von Edelstahl

Beschreibung	CO <sub>2</sub> -Emissionen für 1 Mg Edelstahl [kg CO <sub>2</sub> e]	Datengrundlage
Primäredelstahlerzeugung	5432,4	steel production, chromium steel 18/8, hot rolled   steel, chromium steel 18/8, hot rolled   Cutoff, U
Stahlrecycling	545	Steel production, electric, low alloyed, steel low-alloyed, cutoff, Europe without Switzerland and Austria
CO <sub>2</sub> -Gutschrift	4.887,4	

### Silber:

Für die Erstellung der CO<sub>2</sub>-Gutschrift des abgeschiedenen Silbers wird der Prozess der Primärsilbererzeugung mit der des Recyclings von Silber mit den folgenden Datensätzen von ecoinvent 3.10 verrechnet.

Tabelle 16: Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Gutschrift von Silber

Beschreibung	CO <sub>2</sub> -Emissionen für 1 Mg Silber [kg CO <sub>2</sub> e]	Datengrundlage
Primärsilbererzeugung	485,67	market for silver   silver   Cutoff, U - GLO
Silberrecycling	20,17	treatment of precious metal from electronics scrap, in anode slime, precious metal extraction   silver   Cutoff, U - RoW
CO <sub>2</sub> -Gutschrift	465,5	

### Gold:

Für die Erstellung der CO<sub>2</sub>-Gutschrift des abgeschiedenen Goldes wird der Prozess der Primärgolderzeugung mit der des Recyclings von Gold mit den folgenden Datensätzen von ecoinvent 3.10 verrechnet.

Tabelle 17: Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Gutschrift von Gold

Beschreibung	CO <sub>2</sub> -Emissionen für 1 Mg Gold [kg CO <sub>2</sub> e]	Datengrundlage
Primärgolderzeugung	51.035,20	market for gold   gold   Cutoff, U - GLO
Goldrecycling	1.562,35	treatment of precious metal from electronics scrap, in anode slime, precious metal extraction   gold   Cutoff, U - RoW
CO <sub>2</sub> -Gutschrift	49.472,85	

### Platin:

Für die Erstellung der CO<sub>2</sub>-Gutschrift des abgeschiedenen Platins wird der Prozess der Primärplatinernerzeugung mit der des Recyclings von Platin mit den folgenden Datensätzen von ecoinvent 3.10 verrechnet.

Tabelle 184: Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Gutschrift von Platin

Beschreibung	CO <sub>2</sub> -Emissionen für 1 Mg Platin [kg CO <sub>2</sub> e]	Datengrundlage
Primärplatinernerzeugung	72.252,4	market for platinum   platinum   Cutoff, U - GLO
Platinrecycling	1.220,02	treatment of automobile catalyst   platinum   Cutoff, U - RoW
CO <sub>2</sub> -Gutschrift	71.032,38	

### Palladium:

Für die Erstellung der CO<sub>2</sub>-Gutschrift des abgeschiedenen Kupfers wird der Prozess der Primärkupfererzeugung mit der des Recyclings von Palladium aus mit den folgenden Datensätzen von 3.10 ecoinvent verrechnet.

Tabelle 19: Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Gutschrift von Palladium

Beschreibung	CO <sub>2</sub> -Emissionen für 1 Mg Palladium [kg CO <sub>2</sub> e]	Datengrundlage
Primärpalladiumerzeugung	4.054,69	platinum group metal mine operation, ore with high palladium content   palladium   Cutoff, U - RU
Palladiumrecycling	350,67	treatment of precious metal from electronics scrap, in anode slime, precious metal extraction   palladium   Cutoff, U - RoW
CO <sub>2</sub> -Gutschrift	3.704,02	

### Zusammensetzung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks der NE-Fraktion

Aus den zuvor berechneten Gutschriften der einzelnen Metalle ergibt sich folgende Zusammensetzung der CO<sub>2</sub>-Gutschrift der NE-Metalle.

Tabelle 20: Zusammensetzung der Gutschrift der NE-Fraktion

Zusammensetzung der NE-Metalle	Prozentualer Anteil an der NE- Fraktion	CO <sub>2</sub> -Gutschrift bezogen auf 1 Tonne NE-Metalle [kg CO <sub>2</sub> e]
Mineralik	50 %	-
Aluminium (mit 17 % Verlust)	33 %	1.869
Kupfer (mit 2 % Verlust)	12 %	540
Zink	2,5 %	62
Rest	2,5 %	-
Summe		2.471

Anhand dieser Werte ergibt sich gemittelt für die drei Anlagen folgende CO<sub>2</sub>-Gutschriften für die NE-Metalle, siehe Tabelle 21.

Tabelle 21: Gemittelte CO<sub>2</sub>-Gutschrift für die NE-Metalle

	Einheit	Mittelwert
abgeschiedene NE-Metalle	[Mg]	7.161,03
Gutschrift NE-Metalle	[Mg CO <sub>2</sub> e]	17.694,91
CO <sub>2</sub> -Gutschrift pro Tonne behandelte Schlacke	[kg CO <sub>2</sub> e]	90,8

## 6 Literaturverzeichnis

- Brück, F., Fröhlich, C., Mansfeldt, T., & Weigand, H. (2018). A fast and simple method to monitor carbonation of MSWI bottom ash under static and dynamic conditions. *Waste Management*, 78, 588–594.  
doi.10.1016/j.wasman.2018.06.042
- global Carbon Atlas: Carbon Emissions 2024. Online verfügbar unter <https://globalcarbonatlas.org/emissions/carbon-emissions/>.
- Glöser, S., Soulier, M., & Tercero Espinoza, L. A. (2013). Dynamic analysis of global copper flows. Global stocks, postconsumer material flows, recycling indicators, and uncertainty evaluation. *Environmental science & technology*, 47(12), 6564–6572.
- Huijbregts, Mark A. J.; Steinmann, Zoran J. N.; Elshout, Pieter M. F.; Stam, Gea; Verones, Francesca; Vieira, Marisa et al. (2017): ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 22 (2), S. 138–147. DOI: 10.1007/s11367-016-1246-y.
- ITAD (2024): ITAD Jahresbericht 2022-2023. Online verfügbar unter <https://www.itad.de/ueber-uns/itad-jahresbericht-2022-23.pdf>.
- Jungbluth, Niels; Meili, Christoph (2019): Recommendations for calculation of the global warming potential of aviation including the radiative forcing index. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 24 (3), S. 404–411. DOI: 10.1007/s11367-018-1556-3.
- Nam, S.-Y., Seo, J., Thriveni, T., & Ahn, J.-W. (2012). Accelerated carbonation of municipal solid waste incineration bottom ash for CO<sub>2</sub> sequestration. *Geosystem Engineering*, 15(4), 305–311.  
<https://doi.org/10.1080/12269328.2012.732319>
- Rezinal (2022): Rezinal on its way to produce carbon-neutral zinc!,  
Online verfügbar unter: <https://www.rezinal.be/en/node/77>
- Schnabel, K., Brück, F., Mansfeldt, T., & Weigand, H. (2021a). Full-scale accelerated carbonation of waste incinerator bottom ash under continuous-feed conditions. *Waste Management*, 125, 40–48.  
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.02.027>
- Umweltbundesamt (2024): Emissionen fluorierter Treibhausgase („F-Gase“) 2024, 06.05.2024. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland/emissionen-fluorierter-treibhausgase-f-gase#entwicklung-in-deutschland-seit-1995>, zuletzt geprüft am 06.05.2024.
- UNFCCC (1997): Kyoto Protocol. Targets for the first commitment period. Online verfügbar unter <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-kyoto-protocol/what-is-the-kyoto-protocol/kyoto-protocol-targets-for-the-first-commitment-period>.
- Wbcsd, W.R.I. (2004): The greenhouse gas protocol. A corporate accountign and reporting standard. USA. Online verfügbar unter <https://ghgprotocol.org/corporate-standard>.

## 7 Anhang

### 7.1 Erneuerbarer Strommix

Zur Berechnung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks, wurde ein eigener erneuerbarer Strommix erstellt. Die Zusammensetzung basiert auf den folgenden Energieträgern.

- 31,0 % Windkraft
- 11,9 % Photovoltaik
- 6,2 % Biogas
- 4,1 % Wasserkraft

Zu finden unter:

[https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2024/03/PD24\\_087\\_43312.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2024/03/PD24_087_43312.html)

Um den erneuerbaren Strommix zu berechnen, wurden die in der folgenden Tabelle 22 aufgelisteten ecoinvent 3.10 Datensätze verwendet.

*Tabelle 22: Datensätze zur Berechnung des erneuerbaren Strommix*

kWh	Datensätze
0,079872097	electricity production, wind, <1MW turbine, onshore   electricity, high voltage   Cutoff, U
0,047986885	electricity production, wind, >3MW turbine, onshore   electricity, high voltage   Cutoff, U
0,438203589	electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   electricity, high voltage   Cutoff, U
0,016666104	electricity production, wind, 1-3MW turbine, offshore   electricity, high voltage   Cutoff, U
0,023097725	electricity production, hydro, pumped storage   electricity, high voltage   Cutoff, U
0,053972842	electricity production, hydro, run-of-river   electricity, high voltage   Cutoff, U
0,116545735	heat and power co-generation, biogas, gas engine   electricity, high voltage   Cutoff, U
0,074551675	electricity production, photovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si
0,074551675	electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, multi-Si, panel, mounted
0,074551675	electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, single-Si, panel, mounted

## 7.2 IGAM-Referenzanlage

