

ÖKOBILANZ
NACH ISO 14040/44
FÜR DAS
MULTIRECYCLING VON STAHL

von
Sabrina Neugebauer
Prof. Dr. Matthias Finkbeiner

im Auftrag von
Wirtschaftsvereinigung Stahl / Stahlinstitut VDEh
Düsseldorf

finaler Abschlussbericht
21.06.2012

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis	v
Abkürzungsverzeichnis	vi
1. Einführung	1
2. Ziel der Studie	2
2.1. Zieldefinition	2
2.2. Gründe der Durchführung	2
2.3. Anwendung der Studie	3
2.4. Zielgruppen	3
3. Untersuchungsrahmen der Studie	4
3.1. Funktion & Funktionelle Einheit	4
3.2. Systemgrenze	4
3.3. Datenerhebung & Anforderungen an die Datenqualität	6
3.4. Abschneidekriterien	9
3.5. Allokation	9
3.6. Methoden der Wirkungsabschätzung	10
3.7. Art und Methoden der Auswertung	11
3.8. Annahmen und Einschränkungen	12
3.9. Form und Inhalt des Berichtes	13
3.10. Kritische Prüfung	13
4. Sachbilanz	14
4.1. Datengrundlage & Datensammlung	14
4.2. Beschreibung der Modellierung	14
4.2.1. Hochofen-Route	15
4.2.2. Elektroofen-Route	20
4.2.3. Multi-Recycling-Ansatz	21
4.3. Sachbilanzergebnisse	26
5. Wirkungsabschätzung	29
5.1. Treibhauspotential	29
5.2. Versauerungspotential	30
5.3. Eutrophierungspotential	31
5.4. elementarer & fossiler Ressourcenverbrauch	32

5.5. photochemisches Oxidantienbildungspotential	34
5.6. Ozonabbaupotential.....	35
5.7. Normierung.....	36
6. Auswertung.....	38
6.1. Identifikation der signifikanten Parameter	38
6.2. Sensitivitätsprüfung.....	39
6.2.1. Ergebnisdarstellung ohne Systemraumerweiterung.....	40
6.2.2. Hochofen-Route bis feuerverzinkter Stahl	42
6.2.3. Variation der Lebenszyklen-Anzahl	45
6.2.4. Wirkungsabschätzung nach ReCiPe.....	47
6.3. Vollständigkeits- & Konsistenzprüfung	52
6.4. Schlussfolgerungen und Zusammenfassung	53
7. Referenzen.....	55
Anhang	57
A. Bericht zur kritischen Prüfung.....	57
B. Begriffserklärungen	66
a. Hochofen-Route	66
i. Warmband.....	66
ii. feuerverzinkter Stahl	67
b. Elektroofen-Route	68
C. Sekundärdaten	69

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: schematische Systemgrenze Ökobilanzmodell Stahl Multi-Recycling-Ansatz ..5	
Abbildung 2: Prozesse der HO-Route bis WB (GaBi 4.4 Modellierung)	16
Abbildung 3: Stahlwerkprozess der Elektroofen-Route (GaBi 4.4 Modellierung)	21
Abbildung 4: Ausschnitt aus der Modellierung des Multi-Recycling-Ansatzes in GaBi 4.4..	22
Abbildung 5: Berücksichtigte Verluste im MRA.....	23
Abbildung 6: Beispielhafte Darstellung des Multi-Recycling-Ansatzes	24
Abbildung 7: Vergleich MRA mit & ohne SE für CO ₂	27
Abbildung 8: Darstellung der Treibhausgasemissionen (GWP100-CML2001)	30
Abbildung 9: Wirkungsabschätzungsergebnisse Versauerungspotential	31
Abbildung 10: Wirkungsabschätzungsergebnisse Eutrophierungspotential	32
Abbildung 11: Wirkungsabschätzungsergebnisse fossiler Ressourcenverbrauch und kumulierter Energieaufwand	33
Abbildung 12: Wirkungsabschätzungsergebnisse elementarer Ressourcenverbrauch.....	34
Abbildung 13: Wirkungsabschätzungsergebnisse POCP	35
Abbildung 14: Wirkungsabschätzungsergebnisse Ozonabbaupotential.....	36
Abbildung 15: Normierte Ergebnisse für die betrachteten Wirkungskategorien	37
Abbildung 16: Ergebnisunterschiede für ADP (e) für die HO-Route mit & ohne SE	41
Abbildung 17: Ergebnisunterschiede für GWP für die HO-Route mit & ohne SE.....	42
Abbildung 18: Vergleich der GWP Wirkungsabschätzungsergebnisse für FVS	43
Abbildung 19: Vergleich der EP Wirkungsabschätzungsergebnisse für FVS.....	44
Abbildung 20: Darstellung der MRA-Ergebnisse für GWP über die die LZ für WB mit SE ...	46
Abbildung 21: MRA-Ergebnisse für ADP (e) über die die LZ für WB mit SE	47
Abbildung 22: Vergleich der Treibhauspotentiale nach CML und ReCiPe	48
Abbildung 23: Vergleich der Versauerungspotentiale nach CML und ReCiPe	50
Abbildung 24: Vergleich der Ozonabbaupotentiale nach CML und ReCiPe	51
Abbildung 25: Schema Warmwalzen von Stahl	67

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Anforderungen an die Datenqualität [ISO 14044].....	7
Tabelle 2: Untersuchte Wirkungskategorien (CML 2001 November 2009) [GaBi 4.4].....	10
Tabelle 3: Prozessschritte der Hochofen-Route	17
Tabelle 4: Nebenprodukte der Stahlproduktion	18
Tabelle 5: Sachbilanzergebnisse des Ökobilanzmodells	26
Tabelle 6: Sachbilanzergebnisse HO-Route mit und ohne SE	27
Tabelle 7: Vergleich der Wirkungsabschätzungsergebnisse für FVS.....	44
Tabelle 8: Ergebnisse Eutrophierung nach CML und ReCiPe	49
Tabelle 9: Ergebnisse POCP bzw. POF nach CML und ReCiPe.....	51
Tabelle 10: verwendete Sekundärdaten	69

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ADP	abiotischer Ressourcenverbrauch
AP	Versauerungspotential
Äqv.	Äquivalent (auch e, eq. oder Equiv.)
BTX	Benzol-Toluol-Xylol
CC	Climate Change (Treibhauspotential nach ReCiPe)
CML	Centrum voor Milieuwetenschappen Leiden
DE	Deutschland (bezogen auf den Bezugsraum von GaBi-Datensätzen)
DRI	Direct Reduced Iron (Eisenschwamm)
EP	Eutrophierungspotential
EO-Route	Elektroofen-Route
FE	funktionelle Einheit
FVS	feuerverzinkter Stahl
GaBi	(ganzheitliche Bilanzierung) verwendete Software zur Ökobilanzierung
GLO	Global (bezogen auf den Bezugsraum von GaBi-Datensätzen)
GWP	Global Warming Potential (Treibhauspotential)
HO-Route	Hochofen-Route
KEA	kumulierter Energieaufwand (Primärenergiebedarf)
KW	Kraftwerk
LCI	Life Cycle Inventory (Sachbilanz)
LZ	Lebenszyklus
MRA	Multi-Recycling-Ansatz
ODP	Ozone Depletion Potential (Ozonabbaupotential)
POCP	Photochemisches Oxidantienbildungspotential
POF	Photochemical Oxidant Formation
RER	Europa (bezogen auf den Bezugsraum von GaBi-Datensätzen)
SE	Systemraumerweiterung
VDEh	Verein deutscher Eisenhüttenleute
WB	Warmband
WSA	World Steel Association
ZA	Südafrika (bezogen auf den Bezugsraum von GaBi-Datensätzen)

1. EINFÜHRUNG

Das Projekt „MODELL FÜR KOPPELPRODUKTE UND SEKUNDÄRROHSTOFFE ZUR ÖKOBILANZIERUNG VON STAHL“ wurde 2011 unter der Koordination des Fachgebietes Sustainable Engineering der TU Berlin mit dem Stahlinstitut VDEh und der Wirtschaftsvereinigung Stahl (im Folgenden Stahl-Zentrum) sowie deren Mitgliedsunternehmen durchgeführt.

Das Projekt hatte eine materialpoolorientierte Bewertung des Werkstoffes Stahl im Rahmen der Ökobilanz zum Ziel, welche die beiden wesentlichen Routen der Stahlherstellung - die Hochofenroute und die Elektroofenroute - gemeinsam abbildet. Wichtige Themen hierbei sind die Behandlung von Gutschriften für Koppelprodukte und Sekundärrohstoffe. Dank geschlossener Kreislauflführung und moderner Recyclingtechnologien können sowohl pre- sowie auch post-consumer-Schrotte in hohem Maße zurückgewonnen werden, die wiederum Primärrohstoffe ersetzen. Es ist deshalb festzustellen, inwieweit methodisch valide Gutschriften für die Koppelprodukte und die Rückgewinnung der Sekundärrohstoffe vergeben werden können.

Im Rahmen der Studie „MODELL FÜR KOPPELPRODUKTE UND SEKUNDÄRROHSTOFFE ZUR ÖKOBILANZIERUNG VON STAHL“ wurde ein modifizierter Gleichberechtigungsansatz (sog. Multi-Recycling-Ansatz (MRA)) entwickelt und in einem Workshop des Stahl-Zentrums abschließend präsentiert. Zur Absicherung der Weiterverwendung des Ansatzes, auch zu Kommunikationszwecken und zur Sicherstellung der Glaubwürdigkeit, wird zusätzlich eine Kritische Prüfung nach ISO 14040/44 durchgeführt werden.

Dazu werden die Umweltwirkungen, die im Zusammenhang mit den Produktions- und Recyclingprozessen stehen, betrachtet. Die Nutzungsphase wird von der Betrachtung bewusst ausgeklammert, da sie für den Werkstoff Stahl sehr stark variieren kann und produktabhängig ist. Im Rahmen dieser Studie wird vielmehr eine rein materialbezogene Betrachtung der Herstellung von Stahl über mehrere Lebenszyklen durchgeführt.

2. ZIEL DER STUDIE

Die Durchführung der Studie, der Modellaufbau, die Datenermittlung von Vordergrund- und Hintergrunddaten sowie die Analyse selbst folgen den internationalen Normen zur Ökobilanzierung [ISO 14040, ISO 14044]. Die konsistente und transparent dokumentierte Datenbasis stellt sicher, dass die Ergebnisse und der Prozess der Ergebnisermittlung den Anforderungen der internationalen Standards genügen und dies durch externe Gutachter in Form eines Critical Review überprüfbar ist.

In Übereinstimmung mit den Anforderungen des Auftraggebers sind im Folgenden Ziele, Gründe für die Durchführung, beabsichtigte Anwendungen und Formen und Zielgruppen definiert.

2.1. ZIELDEFINITION

Das Ziel der Studie ist die Quantifizierung der Umweltwirkungen, die sich im Lebenszyklus des Werkstoffes Stahl im Rahmen seiner Herstellung und Entsorgung ergeben. Dabei wird von einem materialpoolorientierten, produktunabhängigen Ansatz ausgegangen, der die Produktion von Stahl betrachtet. Es soll eine gemeinsame Betrachtung der Hochofen-Route (HO-Route) und der Elektroofen-Route (EO-Route) erfolgen, um dadurch den Stahllebenszyklus realitätsnah abzubilden. Fokussiert wird dabei auf Stahl aus deutscher Produktion, wobei die genannten Produktionsrouten die Stahlproduktion in Deutschland und Europa dominieren [Dahlmann et al. 2012].¹

Im Rahmen der Materialpoolorientierung wird die Definition von Durchschnittswerten als Richtgröße für die Produktion von Stahl angestrebt.

2.2. GRÜNDE DER DURCHFÜHRUNG

Gründe zur Durchführung der Studie sind die Entwicklung einer Methode zur Bewertung des Werkstoffes Stahl aus Materialpoolsicht. Weiter sollen eine Abbildung des Umweltprofils und eine ganzheitliche Betrachtung inklusive der Recyclingprozesse für Stahl erfolgen, welche eine konsistente und gemeinsame Abbildung der Hochofen- und Elektroofen-Route ermöglichen.

¹ Siehe hierzu auch Kap. 3.8.

Hintergrund dafür ist auch, dass die ISO-Normen verschiedene Möglichkeiten zum Umgang mit Recyclingprozessen erlauben und sich bisher kein einheitlicher, international akzeptierter Ansatz durchgesetzt hat. Die beiden Extremansätze „Prinzip der ersten Verantwortung“ (recycled content approach) und „Prinzip der letzten Verantwortung“ (end of life recycling approach) werden am häufigsten verwendet und führen zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen [Frischknecht 2010]. Weiter wurden zahlreiche Ansätze entwickelt, die zwischen diesen beiden Extremen liegen [Guinée et al. 2004; Werner 1999; Kim et al. 1997; Ekvall/Tillman 1997; Vigon et al. 1993], von denen sich letztlich aber keiner durchgesetzt hat.

Der hier vorgeschlagene Multi-Recycling-Ansatz umgeht die strittige Frage der Zuordnung und Vergabe von Lasten bzw. Gutschriften, in dem das Material nicht willkürlich mit Fokus auf einen bestimmten Lebenszyklus (LZ) bewertet wird, sondern die Umweltlasten über eine konservative Anzahl von Lebenszyklen aufaddiert und dann gleichmäßig auf alle Lebenszyklen verteilt wird. Deshalb entspricht dieser Ansatz auch am ehesten dem sogenannten Gleichberechtigungsansatz [Vigon et al. 1993].

2.3. ANWENDUNG DER STUDIE

Die Studie ist nicht vergleichend, sondern ermittelt ein Ökobilanzprofil von Stahl aus deutscher Produktion.

Die Studie dient der Information der Mitgliedsunternehmen des Stahl-Zentrums, der Kunden und gesellschaftlichen Anspruchsgruppen, z.B. aus Wissenschaft und Politik. Eine Verwendung der Studie für vergleichende Aussagen, die an die Öffentlichkeit gerichtet sind, ist nicht unmittelbar vorgesehen. Wenn die Ergebnisse der Studie für solche Zwecke verwendet werden, ist eine erneute „Kritische Prüfung“ der vergleichenden Studie nach ISO 14040/44 notwendig.

Diese Studie wird basierend auf den technischen Realitäten und naturwissenschaftlichen Fakten unter vorrangiger Verwendung von Primärdaten durchgeführt.

2.4. ZIELGRUPPEN

Zielgruppe sind in erster Linie die Mitgliedsunternehmen des Stahl-Zentrums, ferner Zulieferer bzw. Kunden, sowie interessierte Dritte, deren Anfragen auf Basis der Ergebnisse beantwortet werden können. Eine Weitergabe der Studie erfolgt vollständig oder in Teilen, bezugnehmend auf die jeweilige Anfrage.

3. UNTERSUCHUNGSRAHMEN DER STUDIE

3.1. FUNKTION & FUNKTIONELLE EINHEIT

Eine detaillierte Beschreibung des Nutzens und der Funktion von Stahl sind nicht notwendig, da keine Produktbetrachtung und kein Vergleich erfolgt. Die Betrachtung des Primär- und Sekundärwerkstoffs erfolgt rein auf der gemeinsamen Materialebene, folglich sind keine spezifischen Produkthanforderungen zu berücksichtigen.

Als funktionelle Einheit (FE) und Referenzfluss wird die Bereitstellung von 1000 kg warmgewalzten Stahl über 6 Lebenszyklen festgelegt.²

Für die Erfüllung des Nutzens gilt die Voraussetzung, dass die inhärenten Materialeigenschaften insoweit erhalten bleiben, dass ein Recycling über 6 Lebenszyklen erfolgen kann. Dies ist eine konservative Annahme, da Stahl grundsätzlich uneingeschränkt recycelt werden kann. Weiter wird konservativ von einer Warmband-Produktion im Rahmen der Hochofen-Route ausgegangen (siehe Anhang B), so dass die Konsistenz in Bezug auf die Elektroofen-Route, auf der ein entsprechendes Pendant zum Warmband hergestellt wird, sichergestellt werden kann.³

3.2. SYSTEMGRENZE

Die Systemgrenzen für die Bilanzierung von Stahl umfassen die folgenden Module (siehe Abbildung 1):

1. Herstellung von Stahl über die Hochofen-Route
2. Betrachtung von anfallenden Nebenprodukten durch Systemraumerweiterung
3. Herstellung von Stahl über die Elektroofen-Route

² Zur Begründung der Wahl von 6 Lebenszyklen siehe Abschnitt 4.2.3

³ Diese Annahmen wurden in Rücksprache mit den Stahlexperten des Stahlinstituts getroffen.

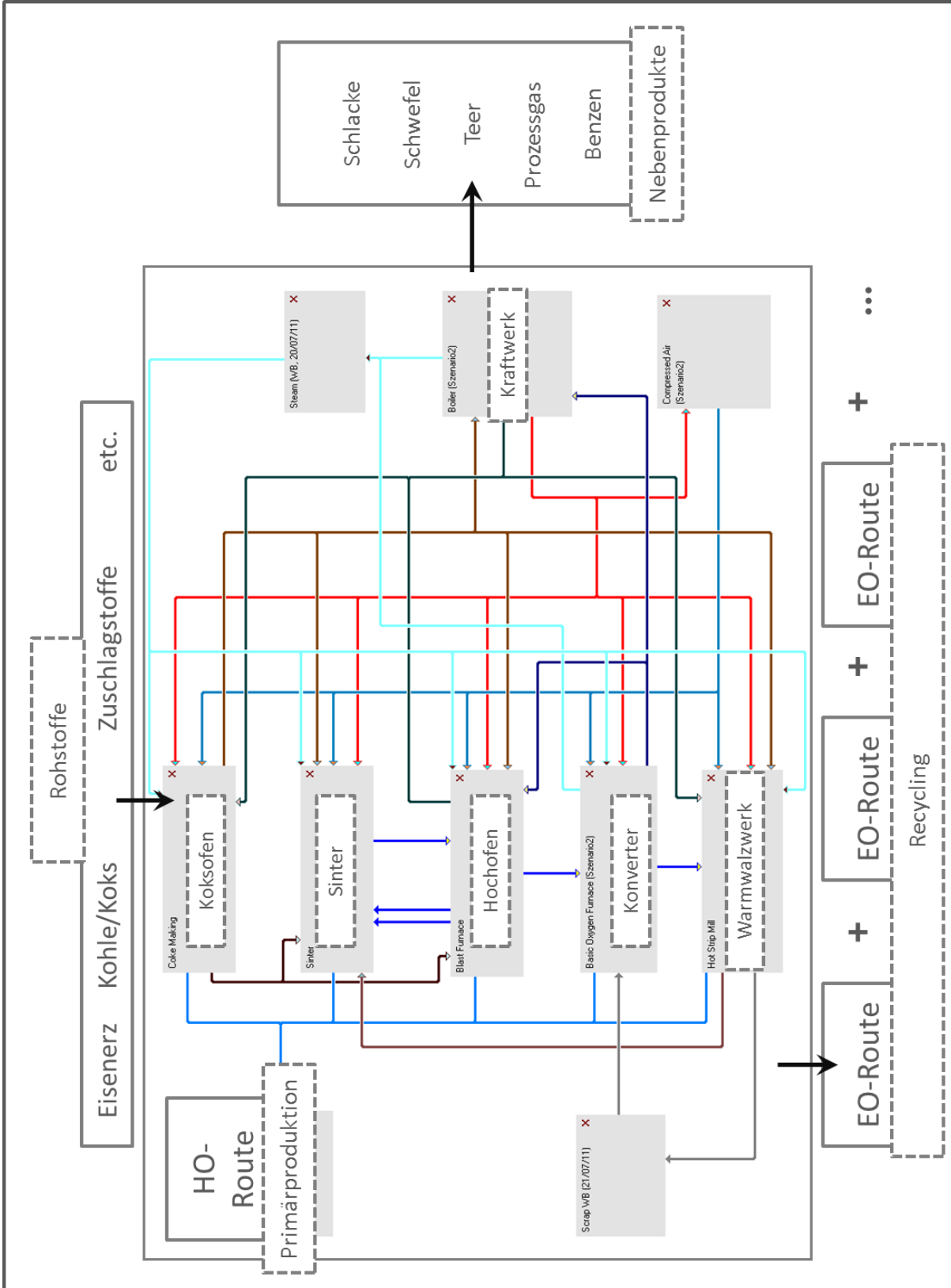


Abbildung 1: schematische Systemgrenze Ökobilanzmodell Stahl Multi-Recycling-Ansatz

In die Systemgrenzen sind alle Teilprozesse der Stahlherstellung eingeschlossen, sowohl für die HO- als auch für die EO-Route. Diese umfassen z.B. für die HO-Route die Prozesse der Koksherstellung und den Sinterprozess (siehe Abbildung 1). Die EO-Route setzt sich zusammen aus dem Stahlwerk und der angeschlossenen Stranggießanlage, sowie den Warmwalzwerken.⁴ Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Prozessschritte der beiden Routen ist den Kapiteln 4.2.1 und 4.2.2 zu entnehmen (siehe auch Anhang B).

Gemäß der funktionellen Einheit wird die Hochofen-Route innerhalb der Systemgrenze 1mal durchlaufen, die Elektroofen-Route wird innerhalb der Systemgrenze 5mal durchlaufen.

Eine alternative Erzeugung der Nebenprodukte (z. B. Schlacke und Schwefel) findet außerhalb der Systemgrenzen statt und wird mittels Systemraumerweiterung/Substitution modelliert.⁵ Die Gutschrift errechnet sich aus der eingesparten Primärproduktionsroute für das produzierte Material gemäß dem Ansatz nach World Steel Association [WSA 2010].⁶ Die Nutzungsphasen, der aus dem Stahl produzierten Produkte, sowie die Umweltlasten, der dazu notwendigen Prozessschritte, sind nicht Gegenstand dieser Ökobilanz.

3.3. DATENERHEBUNG & ANFORDERUNGEN AN DIE DATEN-QUALITÄT

Die Daten zur Roh- und Werkstoffherstellung sowie zur Energiebereitstellung spiegeln den aktuellen technischen Stand unter Berücksichtigung der geografischen Lage wider. Dies wird sichergestellt durch die Verwendung der jeweils aktuellsten Datenbanken.

Zur Modellierung der Verfahrensschritte der Stahlherstellung über die Hochofen-Route werden repräsentative Primärdaten eines Unternehmens mit Hochofenstandort in Deutschland verwendet. Dabei werden alle Prozessstufen des Hochofenprozesses, die in Kapitel 4 näher erläutert werden, bis einschließlich zum Warmwalzwerk betrachtet.

Weiter werden für die Stahlherstellung über die Elektroofen-Route repräsentative Primärdaten eines Unternehmens mit Elektrostahlwerk zur Herstellung von Kohlenstoffstahl in

⁴ Auf eine detailliertere Abbildung wurde aufgrund der relativ geringen Anzahl der Prozessschritte verzichtet.

⁵ Siehe hierzu auch Kap. 4.2.1.

⁶ Siehe hierzu Kap. 4.2.1.

Deutschland verwendet. Es werden alle Prozessstufen des Elektroofenprozesses bis zur Rückgewinnung des Stahls erfasst (Erläuterung siehe Kap. 4).

Zusätzlich zu den verwendeten Primärdaten sind die folgenden Daten notwendig:

- Daten bzgl. der in den Prozessen verwendeten Rohstoffe
- Daten bzgl. der Kühlwasserbereitstellung
- Daten bzgl. der Energie- und Elektrizitätsbereitstellung
- Daten bzgl. der für die Nebenprodukte angesetzten Gutschriften

Dazu werden Sekundärdaten⁷ aus

1. bestehenden LCI-Datenbanken,
2. anderen Datenquellen, wie Büchern oder wissenschaftlichen Publikationen,
3. Näherungsdaten, z.B. für Materialien mit ähnlichen Herstellungsprozessen⁸

verwendet.

Die Anforderungen an die Datenqualität basieren auf den Vorgaben der ISO 14044 und sind untenstehender Tabelle 1 zu entnehmen. Potentielle Unsicherheiten auf die Daten bezogen werden mit maximal 10 Prozent geschätzt [Kupfer 2005].

Tabelle 1: Anforderungen an die Datenqualität [ISO 14044]

Parameter	Beschreibung	Anforderungen
Zeitbezogener Erfassungsbereich	Alter und der kleinste Zeitrahmen, in dem die Daten liegen sollten	Die Daten spiegeln die Situation in 2010 wider. Allgemeine und Datenbankdaten spiegeln ebenfalls die Situation in 2010 wider und sind in keinem Fall älter als 5 Jahre. Das Datenalter wird dokumentiert.
Geographischer Erfassungsbereich	Geographischer Raum, aus dem die Daten stammen sollten	Die Daten spiegeln die aktuelle deutsche Marktsituation wider. Der Strom-Mix wurde auf das

⁷ Eine Liste der verwendeten Sekundärdaten ist dem Anhang C zu entnehmen.

⁸ Siehe hierzu auch Kap. 4.2.2.

		betrachtete Land bezogen.
Technologischer Erfassungsreich	Technologie-Mix	Die Daten geben den aktuellen Stand der Technik für die Stahlproduktion in Deutschland wieder.
Präzision	Maß für die Schwankungsbreite der Werte für alle angegebenen Daten (z. B. Varianz)	In der Studie werden spezifische und repräsentative Daten verwendet. An Stellen, an denen Annahmen getroffen werden, können Schwankungen auftreten. Für diese Fälle werden Sensitivitätsanalysen durchgeführt.
Vollständigkeit	Bestimmung, ob alle relevanten Input- und Outputdaten enthalten sind.	Sofern möglich werden bestimmte Datensätze anhand von Literaturdaten überprüft. Einfache Datenüberprüfungen anhand von z.B. Massenbilanzen werden durchgeführt.
Repräsentativität	Qualitative Einschätzung in wie fern die Daten den zeitlichen, geographischen und technologischen Rahmen wiedergeben.	Die Daten erfüllen den definierten zeitlichen, geographischen und technologischen Rahmen.
Konsistenz	Qualitative Einschätzung, ob die Methode der Studie auf die verschiedenen Komponenten der Analyse einheitlich angewendet wird.	Die gewählte Methode wird einheitlich für alle Komponenten der Analyse angewendet.
Reproduzierbarkeit	Qualitative Einschätzung für den Umfang, in dem ein unabhängiger Ersteller mit den Informationen über die Methode und die Datenwerte die in der Studie angegebenen Ergebnisse reproduzieren kann.	Informationen, die Daten und die Methode betreffend, ermöglichen eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Aus Geheimhaltungsgründen wird dieses Datenlevel jedoch nicht im finalen Bericht zur Verfügung gestellt.
Datenquellen	Bestimmung der verwendeten	Die Daten stammen aus vertrau-

	Datenquellen	enswürdigen Quellen und Datenbanken.
Datenunsicherheit	Quantifizierung der Unsicherheit der verwendeten Daten	Die den verwendeten Daten inwohnende Unsicherheit ist nicht größer als 10 %.

3.4. ABSCHNEIDEKRITERIEN

Die Modellierung der Stahlherstellungsprozesse wurde auf Basis aller verfügbaren Masseinformationen umgesetzt, es wurden massebezogene Abschneidekriterien von 1 % angewandt, wobei anhand einer Prüfung der Umweltrelevanz sichergestellt wurde, dass keine relevanten Flüsse abgeschnitten wurden. Sekundärdaten⁹, die Datenbanken entnommen wurden, berücksichtigen implizit die dort verwendeten Abschneidekriterien und sind in der Datenbank entsprechend dokumentiert [GaBi 4.4].

Bei Berücksichtigung der Nebenprodukte der Stahlherstellung, wurden diese nicht betrachtet, welche lediglich in sehr geringen Mengen auftreten. So wurden z.B. Zink und Ammoniak aus der Betrachtung ausgeschlossen.

3.5. ALLOKATION

Im Vordergrundsystem wurde keine Allokation vorgenommen. Im Hintergrundsystem vorgenommene Allokationen sind der Dokumentation der Datenbank zu entnehmen [GaBi 4.4]. Die Nebenprodukte, die die innere Systemgrenze verlassen, werden via Systemraumerweiterung in das Gesamtsystem eingeschlossen. Es findet demnach eine Vermeidung der Allokation statt.

Innerhalb der beiden Routen auftretende Abfälle, wie z.B. Stahlwerksstäube oder Gichtgasschlämme, werden abgeschnitten. Es ist folglich keine Allokation erforderlich.

⁹ Siehe hierzu Kap. 3.3 und Anhang C. Dementsprechend wurden Abschneidekriterien für die verwendeten Vorprodukte und Energieträger gemäß der Datenbank angewendet.

3.6. METHODEN DER WIRKUNGSABSCHÄTZUNG

Die Aufgabe der Wirkungsabschätzung ist es, die in der Sachbilanz erhobenen Daten in Hinblick auf bestimmte Umweltauswirkungen, sogenannte Wirkungskategorien, zu untersuchen und damit zusätzliche Informationen zu liefern. Nachfolgend werden die in dieser Studie betrachteten Wirkungskategorien aufgeführt und erläutert.

Der kumulierte Energieaufwand von Energieprodukten ergibt sich aus den physikalischen Zusammenhängen des unteren Heizwertes der geförderten Primärressourcen sowie den Wirkungsgraden der Konversions- und Produktionsprozesse (z.B. Kraftwerke und Raffinerien) in der Energiebereitstellungskette.

- kumulierter Energieaufwand (KEA)
 - nicht erneuerbar (umfasst Braunkohle, Erdgas, Erdöl, Steinkohle, Uran)
 - erneuerbar (umfasst Windkraft, Wasserkraft, Solarenergie, Biomasse)

Die Wirkungsabschätzung basiert auf den international akzeptierten Methoden und Daten, die vom Centrum voor Milieuwetenschappen (CML) in Leiden zusammengetragen wurden [CML 2010].

Die Wirkungsabschätzung erfolgt anhand der folgenden Wirkungskategorien (Tabelle 2):

Tabelle 2: Untersuchte Wirkungskategorien (CML 2001 November 2009) [GaBi 4.4]

Wirkungsindikator	Bemerkung	Bezugseinheit
CML Treibhauspotential (GWP100)	Erwärmung der Erdatmosphäre durch die Reflexion von Wärmestrahlung, durch Gase in derselben	kg CO ₂ -Äqv.
CML Eutrophierungspotential (EP)	Überdüngung von Böden und Gewässern	kg Phosphat-Äqv.
CML Photochemisches Oxidationspotential (POCP)	bodennahe Ozonbildung durch Photooxidantien (Sommersmog)	kg Ethen-Äqv.
CML Versauerungspotential (AP)	Klassifizierung von Vorläufersubstanzen für Säuren	kg SO ₂ -Äqv.

CML Ozonabbaupotential (ODP)	Maß für den rel. Effekt des Abbaus der Ozonschicht durch einen Stoff (z.B. Fluorchlorkohlenwasserstoffe)	kg R11-Äqv.
CML Abiotic Depletion elementar (ADP (e))	Maß des Verbrauchs an abiotischen Ressourcen mineralischen Typs	kg Sb-Äqv.
CML Abiotic Depletion fossil (ADP (f))	Maß für den abiotischen Ressourcenverbrauch und die Reserven an fossilen Energieträgern	MJ

Das USEtox Konsensmodell [Rosenbaum et al. 2008] wird nicht innerhalb dieser Ökobilanzstudie betrachtet, da die Präzision der Charakterisierungsfaktoren noch zu ungenau ist. Sie weisen einen Wert zwischen 10 und 100 für die Frischwasser Ökotoxizität und zwischen 100 und 1.000 für die menschliche Gesundheit auf, wobei diese relative Unsicherheit vor allem durch die große Anzahl an Substanzen verursacht wird. Die Werte stellen eine beträchtliche Verbesserung gegenüber den anderen verfügbaren Toxizitätsmodellen dar, dennoch ist die absolute Unsicherheit im Vergleich zu den oben genannten Kategorien signifikant höher. Weiter ist eine Betrachtung aufgrund fehlender Sachbilanzdaten für diese noch relativ neuen Kategorien schwierig. Ergänzend wird in dieser Studie nicht das primäre Ziel einer Abbildung des Umweltprofils verfolgt, sondern auf die entwickelte Methode des Multi-Recycling-Ansatzes fokussiert.

Die Wirkungskategorien Flächenverbrauch und Geruchsbelästigungen/Lärm werden für die Ökobilanz nicht berücksichtigt, da die mit ihnen verbundenen spezifischen Wirkungen aufgrund heute noch fehlender adäquater Sachbilanzdaten nicht quantifiziert werden können.

In der Wirkungsabschätzung wird eine Normierung für die betrachteten CML-Wirkungskategorien mit Bezug auf die Gesamtwerte in Europa durchgeführt. Die optionalen Elemente der Ordnung und Gewichtung werden aufgrund ihres subjektiven Charakters nicht verwendet.

3.7. ART UND METHODEN DER AUSWERTUNG

Die Auswertung wird entsprechend der in ISO 14040/44 geforderten Bestandteile durchgeführt. Diese umfassen:

- Identifizierung der signifikanten Parameter auf der Grundlage der Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzungs-Phasen der Ökobilanz
- Beurteilung der Vollständigkeit, Sensitivität und
- Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen.

Aufgrund der zentralen Bedeutung der Anzahl der Lebenszyklen in der Definition der Nutzeneinheit wird diese im Rahmen einer Sensitivitätsprüfung variiert.

3.8. ANNAHMEN UND EINSCHRÄNKUNGEN

Der gewählte Multi-Recycling-Ansatz unterstellt nicht, dass in Deutschland ein geschlossener Materialkreislauf in Bezug auf Stahl real existiert. Vielmehr ist bei Stahl von einem globalen Materialpool auszugehen, über den die verschiedenen Produkte und Werkstoffe in Verbindung stehen. Nach ISO 14044 ist das Vorhandensein eines real geschlossenen Materialkreislaufs nicht zwingend erforderlich um einen closed-loop Ansatz zu modellieren. Es reicht aus, wenn von einem Erhalt der inhärenten Eigenschaften eines Materials ausgegangen werden kann und so ein quasi-closed-loop besteht.

Der gewählte MRA-Ansatz gilt demnach unter der Annahme, dass die inhärenten Materialeigenschaften von Stahl über mindestens 6 Lebenszyklen erhalten bleiben. Diese Annahme ist als konservativ anzusehen, da sich Stahl aufgrund seiner physikalisch-chemischen Eigenschaften praktisch unendlich recyceln lässt.

Davon ausgehend, dass der Materialpool von Stahl insgesamt wächst, wird in der Realität für die gewählten 6 LZ genug Rohmaterial vorhanden sein. Diese Annahme wird gestützt unter Berücksichtigung des Produktionsmix in Deutschland, der sich anteilig aus der Hochofen-Route mit 2/3 Anteil und der Elektroofen-Route mit 1/3 Anteil zusammensetzt, und unter Berücksichtigung, dass bereits heute Stahl in Deutschland zu 42 Prozent auf Basis von Stahlschrott produziert wird [Dahlmann et al. 2012].

Weiter ist für die Studie ist der Materialpoolansatz eine zentrale Annahme, mit der das Basismaterial Stahl unabhängig von spezifischen Produkten betrachtet wird. Die Verwendung der Ergebnisse der Studie ist eingeschränkt, wenn sehr spezifische Legierungen oder Produkte betrachtet werden sollen. In solchen Fällen, kann die Methode der Worldsteel Association [WSA 2010] angewendet werden, die eine produktspezifische Anpassung erlaubt.

Der Stahl wird auf der Ebene von Warmband¹⁰ (WB) modelliert, da diese Stufe von allen Stahlprodukten der Hochofenroute durchlaufen wird, wobei ausdrücklich auf die deutschen Produktionsrouten fokussiert wird. Höher verarbeitete Stufen, wie z.B. feuerverzinkter Stahl (FVS), werden in der Sensitivitätsanalyse untersucht.

3.9. FORM UND INHALT DES BERICHTES

Dieser technisch detaillierte Bericht mit der vollständigen Dokumentation der Studie ist primär für die interne Verwendung auf Expertenebene und die Durchführung der Kritischen Prüfung gedacht. Das Stahl-Zentrum wird zu gegebener Zeit entscheiden, ob er ggf. auf Anfrage den unter Kap. 2.3 und 2.4 genannten Gruppen vollständig oder in Teilen zur Verfügung gestellt wird.

Auszüge und Ergebnisse des Berichtes werden ggf. zielgruppenorientiert aufbereitet und in den Kommunikationsmedien des Stahl-Zentrum veröffentlicht. Die Veröffentlichung einer Zusammenfassung der Studie in einer wissenschaftlichen Zeitschrift ist vorgesehen.

3.10. KRITISCHE PRÜFUNG

Unter Berücksichtigung der beabsichtigten Publikation von Teilergebnissen wird eine kritische Prüfung gemäß ISO 14040/44 vorgenommen. Die Prüfung erfolgt gemäß Abschnitt 6.2 der ISO 14044 durch ein Panel externer Sachverständiger.

Die Prüfung wird von

- Prof. Dr. Walter Klöpffer (Editor-in-chief, Int. Journal of Life Cycle Assessment),
- Prof. Ralph K. Rosenbaum (Associate Professor, Technical University of Denmark (DTU)) und
- Dr. Matthias Buchert (Ökoinstitut e.V.)

durchgeführt. Vorsitzender des Review Panels ist Prof. Dr. Walter Klöpffer.

Das Gutachten wird in den Anhang A des Berichtes aufgenommen.

¹⁰ Siehe hierzu auch Anhang B.

4. SACHBILANZ

4.1. DATENGRUNDLAGE & DATENSAMMLUNG

Die Verarbeitungsprozesse wurden, basierend auf Primärdaten, die für die Hochofen-Route und die Elektroofen-Route der Stahlproduktion erhoben wurden, konsistent modelliert. Somit wird eine hohe Datenqualität und Konsistenz der verwendeten Daten sichergestellt. Die Daten sind als repräsentativ für die deutsche Stahlproduktion anzusehen, die sich hauptsächlich aus der Hochofen-Route und der Elektroofen-Route zusammensetzt. Ein für den Stand der Technik repräsentativer Technologie-Mix und die Realitätsnähe werden somit gewährleistet.

Die Datensätze für die Energiebereitstellung, Wasserversorgung sowie die Ausgangsrohstoffe, wie beispielsweise Eisenerz oder Koks, werden dem Softwaresystem [GaBi 4.4] entnommen. Im Besonderen die Daten für die Energiebereitstellung und Wasserversorgung sind länderspezifisch verfügbar und wurden auf den Produktionsstandort Deutschland bezogen. Der geographische Bezug der Datensätze wird nach Möglichkeit landesspezifisch, ansonsten europäisch oder global (in dieser Priorisierung) gewählt. Alle Daten werden möglichst aktuell gewählt, sind aber niemals älter als 5 Jahre.

4.2. BESCHREIBUNG DER MODELLIERUNG

Die Grundlage des Modells ist das Softwaresystem GaBi 4.4. Gegenstand der Modellierung ist die ganzheitliche Abbildung des Lebensweges von Stahl. Betrachtet werden hierbei, wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, die Hochofen-Route und die Elektroofen-Route.

Es erfolgt keine getrennte Betrachtung der beiden Routen, vielmehr findet eine Gesamtbetrachtung im Rahmen des entwickelten Multi-Recycling-Ansatzes statt. Dabei wird die Hochofen-Route einmal durchlaufen und die Elektroofen-Route 5mal. Am Ende jedes Lebenszyklus werden die auftretenden Lebenswegverluste berücksichtigt. Des Weiteren werden die Aufbereitungsverluste innerhalb der EO-Route sowie die notwendigen Kühlschrottinputs in die HO-Route inkludiert.

Die Nutzungsphase wurde für die Modellierung innerhalb dieser Ökobilanz bewusst ausgeklammert, da auf einen Materialpoolansatz zur ganzheitlichen Bewertung des Werkstoffs Stahl fokussiert wurde (siehe hierzu Kap. 2.1 und 3.2).

Es wird nach erfolgter Primärdatenaufnahme und der Ergänzung aller Vorketten-, Zuliefer- und Hintergrunddaten mit Hilfe von Sekundärdaten¹¹ eine Sachbilanz berechnet, die alle wesentlichen Energie- und Materialflüsse aus der Umwelt und in die Umwelt quantifiziert, d.h. sowohl die Materialentnahme aus der Umwelt als auch die Emissionen in Luft, Wasser, Boden. Anschließend wird das Sachbilanzmodell für weitere Analysen im Rahmen der Wirkungsabschätzung und der Auswertung verwendet.

4.2.1. HOCHOFEN-ROUTE

Ausgangspunkt der Stahlherstellung ist die Hochofen-Route, in der aus Eisenerz Roheisen und schließlich im Konverter-Prozess Rohstahl hergestellt wird, der anschließend im Warmwalzwerk zu Warmband verarbeitet wird.

Im Rahmen dieser Ökobilanz wurden alle notwendigen Prozessschritte vom Eisenerz bis zum Warmband, basierend auf repräsentativen Primärdaten eines Unternehmens mit Hochofenstandort in Deutschland modelliert (siehe Abbildung 2). Diese umfassen den Koksofen-Prozess, die Sinteranlage, den Hochofen-Prozess, das Stahlwerk (den Konverter-Prozess), das Warmwalzwerk sowie die notwendigen Prozesse zur Energiebereitstellung¹².

¹¹ Siehe hierzu Anhang C.

¹² Die benötigte Energie für die einzelnen Prozessschritte wird gänzlich über die anfallenden Prozessgase und den Energieträger Erdgas bereitgestellt, die im standortinternen Kraftwerk umgesetzt werden. Dazu wurden neben den Prozessschritten zur Stahlherstellung auch die Kraftwerksprozesse modelliert.

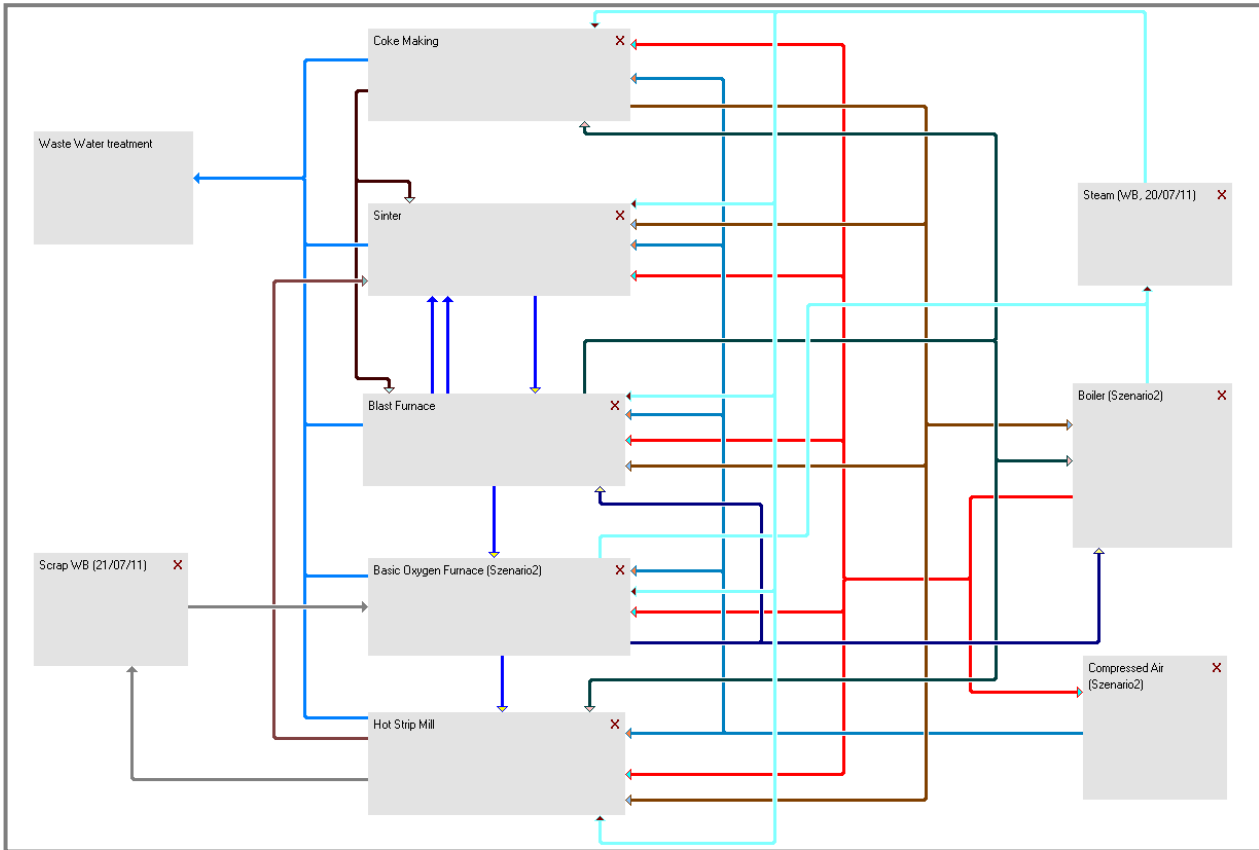


Abbildung 2: Prozesse der HO-Route bis WB (GaBi 4.4 Modellierung)¹³

Die Modellierung umfasst dabei sowohl die prozessspezifischen Verarbeitungsvorgänge, als auch die benötigten Rohstoffe¹⁴ und Zwischenprodukte. Weiter werden die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Produktionsschritten, z.B. die geschlossene Kreislaufführung der Prozessgase, in der Modellierung berücksichtigt.

Eine schematische Darstellung der Vorgänge sowie der wichtigsten Inputs und Outputs für den Prozessverlauf gliedert nach Prozessschritten kann Tabelle 3 entnommen werden.

¹³ Die notwendigen Rohstoff-Inputs werden in den Unterplänen berücksichtigt.

¹⁴ Die notwendigen Rohstoff-Inputs werden in den Unterplänen berücksichtigt.

Tabelle 3: Prozessschritte der Hochofen-Route¹⁵

Prozess	Ablauf	Input/Output
Koksofen	Produktion von Koks für den Sinter- und den Hochofen-Prozess	Input: Steinkohle, Energie, Zuschlagstoffe Output: Koks & Koksofengas
Sinter	Herstellung von Sinterpellets für den Hochofen-Prozess	Input: Eisenerz, Koks, Energie, Zuschlagstoffe, Legierungselemente Output: Sinter-Pellets
Hochofen	Herstellung von Roheisen	Input: Eisenerz, Sinterpellets, Koks, Energie, Wasser, Zuschlagstoffe Output: Roheisen, Prozessgas, Schlacke
Stahlwerk (Konverter)	Herstellung von Rohstahl	Input: Roheisen, Energie, Wasser, Zuschlagstoffe, Legierungsmittel Output: Rohstahl, Schlacke, Prozessgas
Warmbandwerk	Weiterverarbeitung der Rohstahlbrammen zu Warmband	Input: Rohstahl, Wasser, Energie Output: Warmband, Stahlschrott
Kraftwerk	Energiebereitstellung durch Umwandlung von Prozessgasen und Erdgas in elektrische und thermische Energie	Input: Prozessgas, Erdgas Output: elektrische Energie, Dampf

Die während der Stahlherstellung über die Hochofen-Route anfallenden Nebenprodukte, wie Schlacke, überschüssige Prozessgase, Schwefel, Teer und Benzol, werden via Systemraumerweiterung (SE) berücksichtigt. Es werden Gutschriften entsprechend des eingesparten Primärproduktionsweges vergeben. Dabei finden nur die Nebenprodukte Berücksichtigung.

¹⁵ Die dargestellten Inputs und Outputs erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit und dienen lediglich der Veranschaulichung der Prozesskette. Hilfsmedien, wie Sauerstoff, Stickstoff und Druckluft wurden in der Modellierung berücksichtigt, werden aber an dieser Stelle nicht gesondert aufgeführt.

sichtigung, die nachgewiesen einer weiteren Verwendung zugeführt werden [Ehrenberg 2006], [ThyssenKrupp 2009]. Wobei sich auch an den aufgeführten Nebenprodukten nach World Steel Association [WSA 2010] orientiert wurde (siehe Tabelle 4).¹⁶ Weitere Nebenprodukte, wurden konservativ vereinfachend nicht in die Betrachtung eingeschlossen, da diese entweder nur in vernachlässigbaren Mengen auftreten, z.B. Zink und Ammoniak, oder in der betrachteten Produktionsroute nicht auftreten. So tritt beispielsweise kein Überschuss an Strom auf, da der Strombedarf über die auftretenden Prozessgase gedeckt wird, woraus sich ein Prozessgasüberschuss ergibt.

Tabelle 4: Nebenprodukte der Stahlproduktion

Nebenprodukte der Stahlproduktion [WSA 2010]	Funktion als Beiprodukt [WSA 2010]	Gutschrift MRA	Datenquelle	Auftretende Menge pro FE
HO-Schlacke	Zement od. Klinker	Beton	GaBi 4.4 DE ready-mix concrete	352 kg
EO-Schlacke, Konverter-Schlacke	Straßenbau (Schotter)	Schotterproduktion	GaBi 4.4 DE Gravel	97 bzw. 98 kg
Konverter-Schlacke	Düngemittel	Kalkherstellung	GaBi 4.4 DE Lime	30 kg
Prozessgase	Wärmeproduktion	keine		
	Stromproduktion	Stromproduktion	GaBi 4.4 DE power grid mix	862 MJ
EO-Staub	Zinkproduktion	keine		
Elektrizität durch Energierückgewinnung	Stromproduktion	keine		
Prozessdampf	Wärmeproduktion	keine		
Prozesswasser (heiß)	Wärmeproduktion	keine		
Ammoniak	Ammoniakherstellung	keine		
Ammoniumsulfat	Ammoniumsulfatherstellung	keine		
Benzol	Benzolherstellung	Benzolherstellung	GaBi 4.4 DE Benzene mix	2 kg
BTX	BTX-Herstellung	keine		

¹⁶ Die Annahmen beruhen zum Teil auf Informationen der beteiligten Unternehmen, in Bezug auf die spezifische Verwendung der Hochofen- und Konverter-Schlacken und der überschüssigen Prozessgase. Orientiert wurde sich auch an den Angaben der World Steel Association.

Schwefel(säure)	Schwefel(säure)herstellung	Schwefelherstellung	GaBi 4.4 DE Sulphur	1 kg
Teer	Teerproduktion	Teerproduktion	GaBi 4.4 DE tar	8 kg
Öl (genutzt)	Wärmeproduktion	keine		
Zink	Zinkproduktion	keine		
Zink-Staub	Zinkproduktion	keine		
Elektroden	Elektrodenherstellung	keine		

Die anfallende Hochofen- und Stahlwerk-Schlacke wird in unterschiedlichen Anwendungen weiterverarbeitet. Die Hochofen-Schlacke wird entsprechend der Berechnungsgrundlage vollständig der Zementproduktion zugeführt. Hier wurde als Gutschrift Beton gewählt, der ein Zementgemisch mit bis zu 20 Prozent Zement darstellt. Da die HO-Schlacke ohnehin nur einen gewissen Anteil des Zements ersetzen kann, wurde sich an dieser Stelle über die Beton-Gutschrift für einen konservativeren Ansatz entschieden. Eine weitere Möglichkeit wäre eine Gutschrift gemäß des Zementanteils, den die HO-Schlacke ersetzt. Im Vergleich würde diese Gutschrift etwas höher ausfallen, jedoch liegen beide Werte in einer vergleichbaren Größenordnung. Allerdings bietet die hier gewählte Beton-Gutschrift eine solidere Basis, aufgrund der verfügbaren Literaturdaten in Bezug auf Zement [Verein deutscher Zementwerke 2008]. Diese geben lediglich Auskunft über das Einsparpotential in Bezug auf CO₂-Äqv. und treffen keine Aussage über weitere Wirkungsindikatoren.

Die Stahlwerk-Schlacke geht zu Teilen in die Düngemittelproduktion und den Wasserstraßenbau [Dahlmann et al. 2012]. Die Gutschriftenvergabe erfolgt, entsprechend der jeweiligen Anteile, entweder für die Produktion von Schotter, der in den Wasserstraßenbau geht, oder von Kalk für Wirtschaftsdünger.

Für die überschüssigen Prozessgase wird, unter Berücksichtigung des entsprechenden Wirkungsgrades, eine energetische Gutschrift entsprechend des deutschen Strom-Mixes vergeben, da diese auch generell zur Energiebereitstellung in der Stahlproduktion dienen (siehe Tabelle 3).

Aufgrund des Ergebniseinflusses der gutgeschriebenen Nebenprodukte wird dieser Aspekt näher in den Sensitivitätsanalysen untersucht.

4.2.2. ELEKTROOFEN-ROUTE

Im Zuge der ganzheitlichen Betrachtung des Werkstoffes Stahl wurde die Elektroofen-Route, ebenfalls basierend auf Primärdaten, die von einem Unternehmen mit Elektrostahlwerk zur Herstellung von Kohlenstoffstahl¹⁷ in Deutschland zur Verfügung gestellt wurden, modelliert. Auch hier wurden alle notwendigen Prozessschritte vom Stahlschrott bis zur Rückgewinnung des Stahlwerkstoffes betrachtet. Dies umschließt das Stahlwerk und die Stranggießanlage (Abbildung 3), die Schlackenmahlanlage und die Warmwalzstraßen. Hauptprozessschritt ist dabei das Stahlwerk mit angeschlossener Stranggießanlage ist, in dem Rohstahl erzeugt wird. Die Schlackenmahlanlage dient lediglich zur Weiterverarbeitung der Schlacke und die Warmwalzstraßen dienen zur Weiterverarbeitung des Rohstahls, da hier ein vergleichbares Komplementärprodukt zum Warmband entsteht.

Die benötigte Energie wird über den deutschen Strom-Mix sowie die Energieträger Kohle und Erdgas bereitgestellt. Die Modellierung umfasst sowohl die prozessspezifischen Verarbeitungsvorgänge, als auch die notwendigen Rohstoffe und Zwischenprodukte. Bei den Rohstoffen Niob und Vanadium wurde eine Näherung über Tantal getroffen, das zur selben Gruppe wie Niob und Vanadium gehört, da entsprechende Datenbankprozesse nicht zur Verfügung stehen. Für Calcium-Silikat wurde ebenfalls aufgrund von Datenlücken eine Näherung über Calciumoxid und Silikat getroffen¹⁸.

Simultan zu Hochofen-Route werden auch für die Elektroofen-Route Gutschriften für die entstehenden Nebenprodukte vergeben. In diesem Zusammenhang wird die anfallende EO-Schlacke berücksichtigt, die als Baustoff im Straßenbau Verwendung findet. Eine entsprechende Gutschrift für die Produktion von Schotter wird durch die Erweiterung des Systems und Substitution vergeben.¹⁹

¹⁷ Die Bezeichnung dient der begrifflichen Differenzierung zu Edelstahl, der ebenfalls auf der EO-Route hergestellt werden kann.

¹⁸ Gemäß chemischer Reaktionsgleichung.

¹⁹ Die notwendigen Informationen bzgl. der Weiterverwendung der Schlacke wurden von den beteiligten Unternehmen zur Verfügung gestellt.

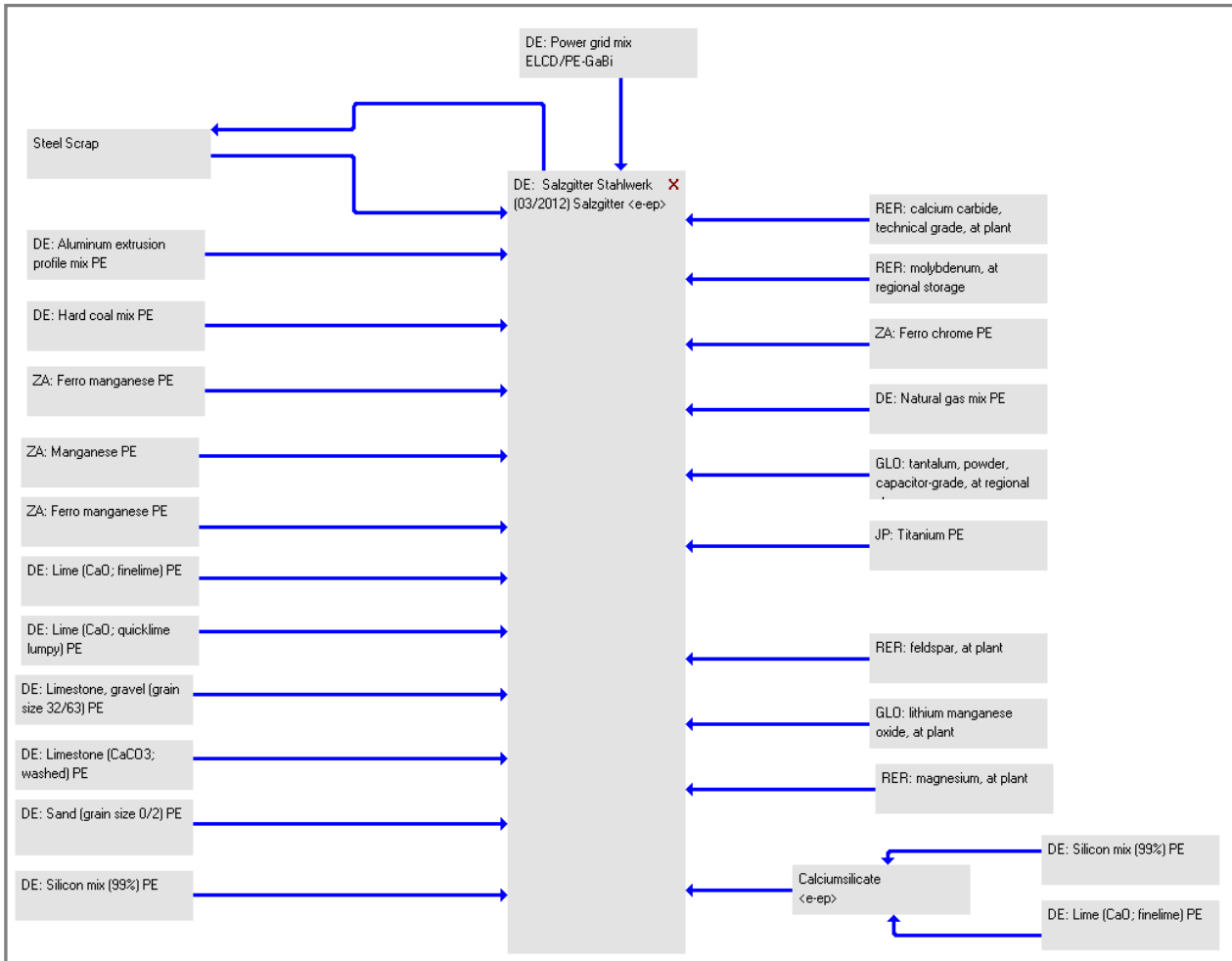


Abbildung 3: Stahlwerkprozess der Elektroofen-Route (GaBi 4.4 Modellierung)

4.2.3. MULTI-RECYCLING-ANSATZ

Für die Ermittlung eines ganzheitlichen Ökobilanzprofils für Stahl aus deutscher Produktion wurde mit dem Multi-Recycling-Ansatz eine Methode entwickelt, die der Recyclingfähigkeit des Werkstoffes Rechnung trägt und eine Gesamtbetrachtung des Lebensweges von Stahl zulässt. Auf die methodische Diskussion, wie mit Recyclingprozessen in Ökobilanzen umzugehen ist, wurde bereits in Kapitel 2.2 eingegangen.

Hierbei bilden die Hochofen-Route und die Elektroofen-Route die beiden Ausgangspunkte der Methodik, da sie gleichzeitig die beiden Hauptproduktionsrouten für Stahl darstellen [Dahlmann et al. 2012]. Während innerhalb der Hochofen-Route hauptsächlich Eisenerz und Roheisen verarbeitet werden, werden auf der Elektroofen-Route vorrangig Stahlschrotte zu Stahl recycelt. Jedoch ist eine klare Trennung zwischen primärem und sekundärem

därem Stahl nicht ohne weiteres möglich. In jedem Stahl, der über die Hochofen-Route produziert wird, wird auch anteilig Stahlschrott verarbeitet. Gleichzeitig kann innerhalb der Elektroofen-Route neben Stahlschrott auch Eisenschwamm (auch bezeichnet als Direct Reduced Iron (DRI))²⁰ verarbeitet werden, wodurch die Grenzen weiter verwischen [Stahlnfo 2010].

Die entwickelte Methodik des Multi-Recycling-Ansatzes setzt daher bewusst am Materialpool an und unterscheidet nicht zwischen primärem und sekundärem Stahl im eigentlichen Sinn. Dies geschieht unter der Annahme, dass der Werkstoff Stahl beliebig oft recycelt werden und auch nach mehreren Lebenszyklen noch für nahezu alle Stahlprodukte einsetzbar ist [Ameling/Endemann 2007] [Stubbe et al. 2008]. Davon ausgehend wird für den Multi-Recycling-Ansatz angenommen, dass eine Tonne Warmband über die Hochofen-Route produziert und wiederholt über die Elektroofen-Route recycelt wird (siehe Abbildung 4). Folglich werden über den gesamten Lebensweg die Hochofen-Route einmal und die Elektroofen-Route wiederholt durchlaufen.

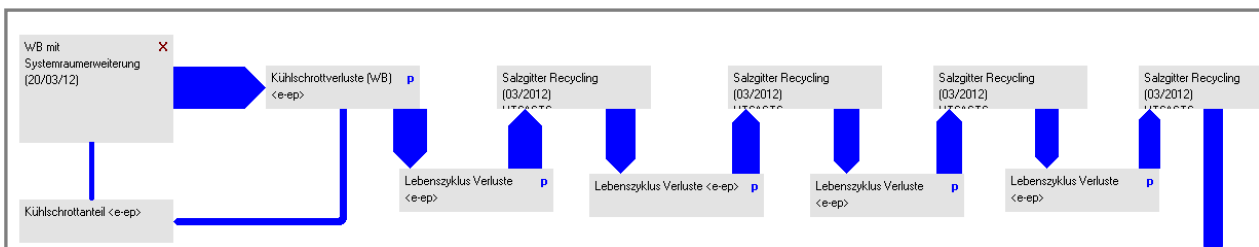


Abbildung 4: Ausschnitt aus der Modellierung des Multi-Recycling-Ansatzes in GaBi 4.4

In der Methode werden sowohl der erforderliche Schrott-Input als auch die Lebensweg- und Prozessverluste, die beim Recycling auftreten, berücksichtigt (siehe hierzu Abbildung 5). Dadurch reduziert sich die Menge an Stahl über den Lebensweg und nach dem 17ten Lebenszyklus sind nur noch ca. 10 % des eingesetzten Materials vorhanden. Aus diesem Grund wurde in den ersten Auswertungen ursprünglich mit 17 Lebenszyklen gerechnet.

²⁰ Siehe auch Anhang B.

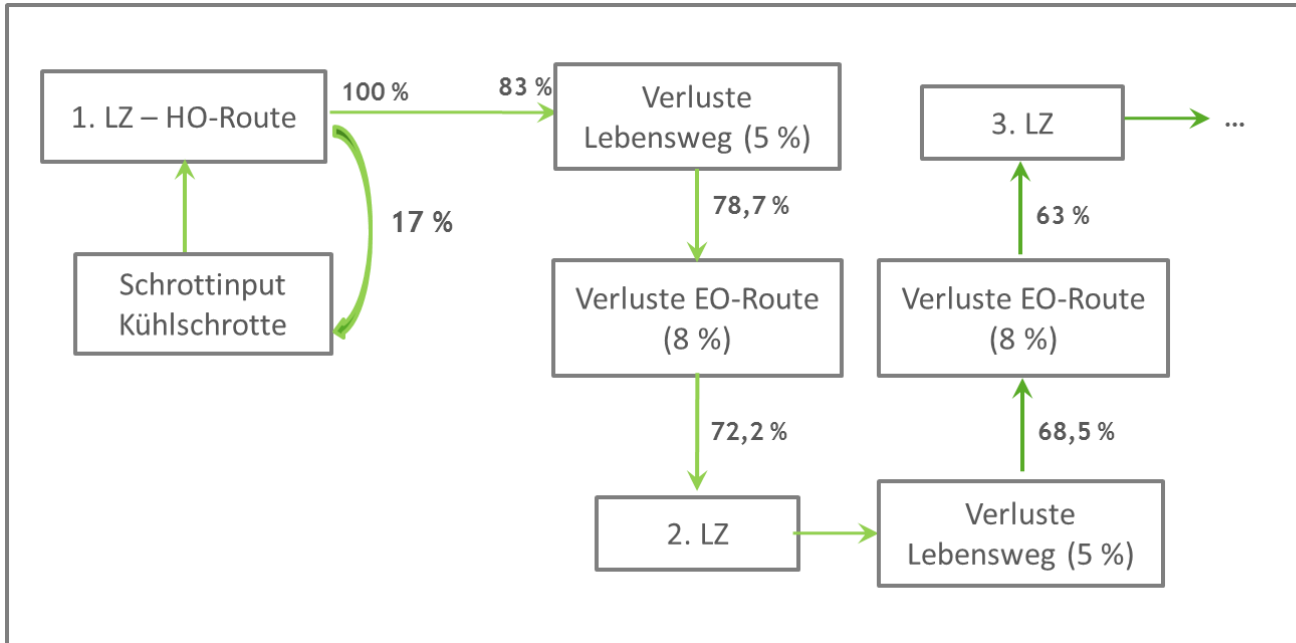


Abbildung 5: Berücksichtigte Verluste im MRA

Allerdings wurde innerhalb des Projektteams die Frage erörtert, ob das aufgrund der z.T. langen Lebensdauer von Stahlprodukten so vertretbar ist. Es gibt mehrere Studien zur Ermittlung der mittleren Lebensdauer von Stahl. Je nach Produkt - von der Konservendose bis zum Stahlträger eines Gebäudes - kann der einzelne Lebenszyklus eines Stahlproduktes zeitlich sehr unterschiedlich lang sein. In dieser Studie wird sich auf eine detaillierte Studie von [Daigo et al. 2007] bezogen, in der eine durchschnittliche Lebensdauer von Stahlprodukten von 16 Jahren ermittelt wurde. Geht man von einem Betrachtungshorizont von maximal 100 Jahren aus (in Analogie z.B. zum üblichen GWP100), ergeben sich die für die funktionelle Einheit gewählten 6 Lebenszyklen. Die Wahl von 6 Lebenszyklen und der daraus resultierende Betrachtungszeitraum von 96 Jahren tragen auch dem Ziel der Studie, einen konservativen Ansatz zu wählen, Rechnung. Die Wahl von 17 Lebenszyklen hätte einem Gesamtzeitraum von 256 Jahren entsprochen. Aus ökobilanzieller Sicht wäre dies kritisch, da es sich um einen nicht-abschätzbaren Zeitraum in der Zukunft handelt.

Für den Betrachtungszeitraum wird unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen, dass die Hochofen-Route einmal und die Elektroofen-Route 5mal durchlaufen werden, ein Gesamt-Umweltprofil für Stahl ermittelt. Dieses Gesamt-Profil wird anteilig den 6 Lebenszyklen zugerechnet, so dass jeder LZ die gleichen Lasten trägt (siehe Abbildung 6).

Im Ergebnis wird nicht zwischen primärem und sekundärem Material unterschieden, sondern man erhält ein Endergebnis für den Werkstoff Stahl²¹ bezogen auf 1000 kg und eine Gesamt-Lebenszyklusanzahl von 6. Man erkennt, dass alle Lebenszyklen den gleichen Wert aufweisen, weshalb der MRA-Ansatz auch einen modifizierten Gleichberechtigungsansatz darstellt.

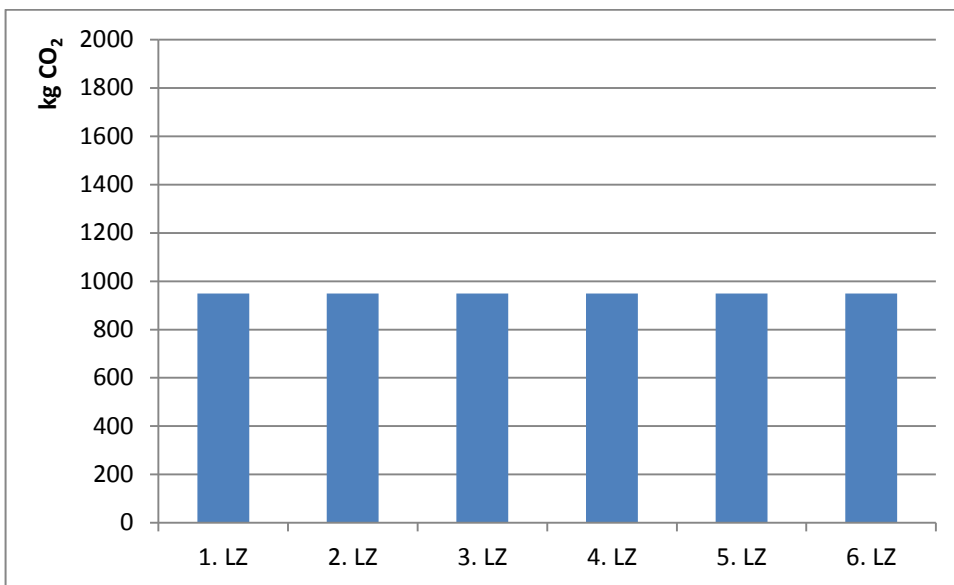


Abbildung 6: Beispielhafte Darstellung des Multi-Recycling-Ansatzes

Da in der Modellierung jedoch über die Lebenszyklen auftretende Materialverluste mit berücksichtigt werden, muss, um die Übereinstimmung mit der funktionellen Einheit zu gewährleisten, auf jeweils 1000 kg Stahl pro betrachteten Lebenszyklus skaliert werden. D.h. die tatsächliche Umweltlast wird der verfügbaren Materialmenge gegenübergestellt und anschließend auf die gewollte Materialmenge bezogen und auf die betrachtete Lebenszyklusanzahl verteilt. Die Umweltlasten pro Lebenszyklus werden entsprechend der jeweiligen Lebenszyklusanzahl anhand der untenstehenden Formel berechnet:

$$UL_{LZ_i} = \frac{\left(\frac{\sum UL_{LZ}}{\sum MM_{LZ}} \right) \times MM_{LZ FE}}{LZ_{FE}}$$

- UL_{LZ_i} : entspricht der skalierten Umweltlast pro Lebenszyklus, die in Abhängigkeit der zu durchlaufenden Lebenszyklen berechnet wird

²¹ Zunächst bezogen auf Warmband.

- $\sum UL_{LZ}$: entspricht der tatsächlich auftretenden Umweltlast, die aus den Produktionsprozessen und Recyclingprozessen resultiert (wobei hier die auftretenden Materialverluste berücksichtigt werden)
- $\sum MM_{LZ}$: entspricht der insgesamt verfügbaren Materialmenge, für die betrachtete Lebenszyklusanzahl (inkl. Materialverluste)
- MM_{LZFE} : entspricht der errechneten (gewollten) Materialmenge, die gemäß der funktionellen Einheit pro LZ zur Verfügung stehen soll (in dieser Studie wird von einer Materialmenge von 1000 kg pro LZ und 6 LZ ausgegangen)
- LZ_{FE} : entspricht der betrachteten Lebenszyklusanzahl

Alle im Folgenden ermittelten Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung für den Multi-Recycling-Ansatz wurden anhand der genannten Formel berechnet, wobei sich auch eine Lebenszyklusanzahl von 6 und eine Materialmenge von 1000 kg Stahl pro Lebenszyklus, folglich insgesamt 6 Tonnen Stahl, gemäß der funktionellen Einheit, bezogen wird.

Alternativ wäre auch ein Bezug auf die tatsächlich verfügbare Materialmenge möglich. Wobei man dann aufgrund der tatsächlich verfügbaren Materialmenge für die gewählte Lebenszyklusanzahl eine entsprechende Umweltlast ermittelt. Diese wird ins Verhältnis mit der Gesamt-Umweltlast gesetzt und daraus die Umweltlast pro Lebenszyklus berechnet. Die Umweltlasten pro Lebenszyklus ergeben sich dann nach folgender Formel:

$$UL_{LZ_i} = \frac{\sum UL_{LZ}}{\sum MM_{LZ}} \times MM_{FE}$$

- UL_{LZ_i} : entspricht der Umweltlast pro Lebenszyklus, die in Abhängigkeit der zu durchlaufenden Lebenszyklen berechnet wird
- $\sum UL_{LZ}$: entspricht der tatsächlich auftretenden Umweltlast, die aus den Produktionsprozessen und Recyclingprozessen resultiert (wobei hier die auftretenden Materialverluste berücksichtigt werden)
- $\sum MM_{LZ}$: entspricht der insgesamt verfügbaren Materialmenge, für die betrachtete Lebenszyklusanzahl
- MM_{FE} : entspricht der nach Definition der funktionellen Einheit erforderlichen Materialmenge pro Lebenszyklus (in dieser Studie wären das 1000 kg Stahl)

Die Ergebnisse sind deckungsgleich mit den Ergebnissen gemäß der in dieser Studie angewandten Skalierungsmethode.

4.3. SACHBILANZERGEBNISSE

Die Modellierung fokussiert auf die Darstellung des entwickelten Multi-Recycling-Absatzes zur Ermittlung eines durchschnittlichen Umweltprofils für Stahl. Zu diesem Zweck werden sowohl die Hochofen-Route bis Warmbandstahl unter Berücksichtigung von Nebenprodukten und die Elektroofen-Route ebenfalls unter Berücksichtigung von Nebenprodukten betrachtet. Einige ausgewählte Sachbilanzergebnisse werden zum Vergleich sowohl für die Hochofen-Route, die Elektroofen-Route und den Multi-Recycling-Ansatz (für 6 LZ) nebeneinander dargestellt (Tabelle 5).

Tabelle 5: Sachbilanzergebnisse des Ökobilanzmodells

	HO-Route	MRA (6 LZ)	EO-Route
CO ₂ [kg]	1605	938	712
CO [kg]	24,5	6,8	0,5
SO ₂ [kg]	2,3	1,5	1,3
NO _x [kg]	2,7	1,6	1,2
CH ₄ [kg]	7,1 ²²	2,9	1,4
KEA [GJ]	24	14	11

Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf jeweils eine Tonne Materialoutput. Die dargestellten Ergebnisse für den Multi-Recycling-Ansatz sind skaliert (siehe Kap. 4.2.3), so dass für jeden durchlaufenen Lebenszyklus von einem Materialoutput von 1000 kg Stahl ausgegangen werden kann. Die Berechnung erfolgt über das Verhältnis von anfallender Umweltlast zu zur Verfügung stehender Materialmenge bezogen auf die Lebenszykluszahl.

Im Sachbilanzergebnis weist die Hochofen-Route, für alle dargestellten Elementarflüsse, die prozentual höchsten Ergebnisse auf. Besonders deutlich ist der Unterschied für die Kohlendioxid-Emissionen. Die Elektroofen-Route weist dagegen immer die niedrigsten

²² Die Methan-Emissionen resultieren nicht aus der Stahlerzeugung selbst, sondern aus der Vorkette, d.h. aus der Gewinnung der Kohle.

Werte auf, während die Ergebnisse für den Multi-Recycling-Ansatz zwischen den beiden Routen liegen.

In wie fern die Ergebnisse der Hochofen-Route durch die vergebenen Gutschriften für die Nebenprodukte beeinflusst werden, zeigt die Tabelle 6.

Tabelle 6: Sachbilanzergebnisse HO-Route mit und ohne SE

	HO-Route	
	mit SE	ohne SE
CO ₂ [kg]	1605	1838
CO [kg]	24	25
SO ₂ [kg]	2,3	2,6
NO _x [kg]	2,7	3,0
CH ₄ [kg] ²³	7,1	7,5
KEA [GJ]	24	28

Die Ergebnisse ohne Vergabe von Gutschriften für die Nebenprodukte via Systemraumerweiterung fallen erwartungsgemäß etwas höher aus. Signifikante Unterschiede treten jedoch nicht auf wobei der Unterschied für CO₂ etwas größer ausfällt. Dies führt zu einem etwas höheren Ergebnis für den Multi-Recycling-Ansatz (siehe Abbildung 7).

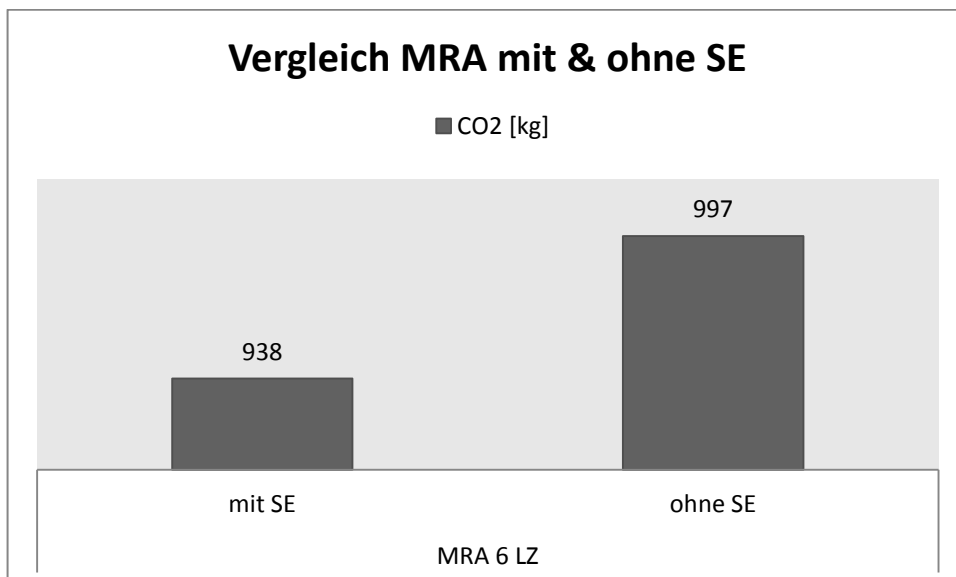


Abbildung 7: Vergleich MRA mit & ohne SE für CO₂

²³ Die Methan-Emissionen resultieren nicht aus der Stahlerzeugung selbst, sondern aus der Vorkette, d.h. aus der Gewinnung der Kohle.

Für die anderen Emissionen ist eine Verschiebung des Ergebnisses in dieser Größenordnung nicht zu erwarten, da die Unterschiede wesentlich geringer ausfallen. Kritische Ergebnisse in der Wirkungsabschätzung werden jedoch zusätzlich im Rahmen einer Sensitivitätsprüfung in Kap. 6.2.1 geprüft.

5. WIRKUNGSABSCHÄTZUNG

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Lebenszyklusergebnisse für die entwickelte Methode zur ganzheitlichen Betrachtung von Stahl. Die Ergebnisse werden, differenziert nach Hochofen-Route, Elektroofen-Route und Multi-Recycling-Ansatz, dargestellt. Dabei wird auch auf die Hauptemissionsquellen und Zusammenhänge eingegangen.

Entsprechend den Ausführungen in Kapitel 3.6 werden die Wirkungskategorien Treibhauspotential (GWP), Versauerungspotential (AP), Eutrophierungspotential (EP), elementarer & fossiler Ressourcenverbrauch (ADP (e) und (f)), kumulierter Energieaufwand (KEA), Photochemisches Oxidantienbildungspotential (POCP) sowie Ozonabbaupotential (ODP) betrachtet. Dabei wird entsprechend der datenbezogenen Unsicherheiten (siehe Kap. 3.3) von möglichen Abweichungen ausgegangen, die nicht größer als 10 Prozent sind.

Eine Betrachtung der Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit wird im Rahmen der Wirkungsabschätzung nicht betrachtet, kann jedoch einen Anteil am Umweltwirkungsprofil haben. Daher findet im Rahmen der Sensitivitätsanalyse (siehe 6.2.4) eine Prüfung der Auswirkungen durch Partikelemissionen statt.

5.1. TREIBHAUSPOTENTIAL

Das Treibhauspotential weist für alle drei Fälle eine hohe Relevanz auf. Dabei liegen die Ergebnisse für die Hochofen-Route deutlich über denen der Elektroofen-Route. Hierbei haben die Prozessschritte Koksofen und Hochofen mit 30 bzw. 36 Prozent einen entscheidenden Anteil an der Gesamtumweltwirkung. Die über Systemraumerweiterung vergebenen Gutschriften spielen mit nicht einmal -14 Prozent nur untergeordnet eine Rolle.

Durch die Anwendung des Multi-Recycling-Ansatzes wird ein Wert erreicht, der zwischen den beiden Produktionsrouten für Stahl liegt. Bei einer Betrachtung von 6 zu durchlaufenden Lebenszyklen unter der Annahme, dass die Hochofen-Route einmal und die Elektroofen-Route 5mal durchlaufen werden, ergibt sich ein Treibhauspotential von 999 kg CO₂-Äqv. pro Tonne Stahl und LZ (siehe Abbildung 8).

Die Hauptumweltwirkungsquelle der Elektroofen-Route ist der Stahlwerksprozess mit der nachgeschalteten Stranggießanlage. Wobei hier die benötigte elektrische Energie mit 52 Prozent den größten Beitrag zur Gesamtumweltwirkung liefert, während die Prozesse im Stahlwerk nur etwa 10 Prozent zum Gesamt-GWP beitragen.

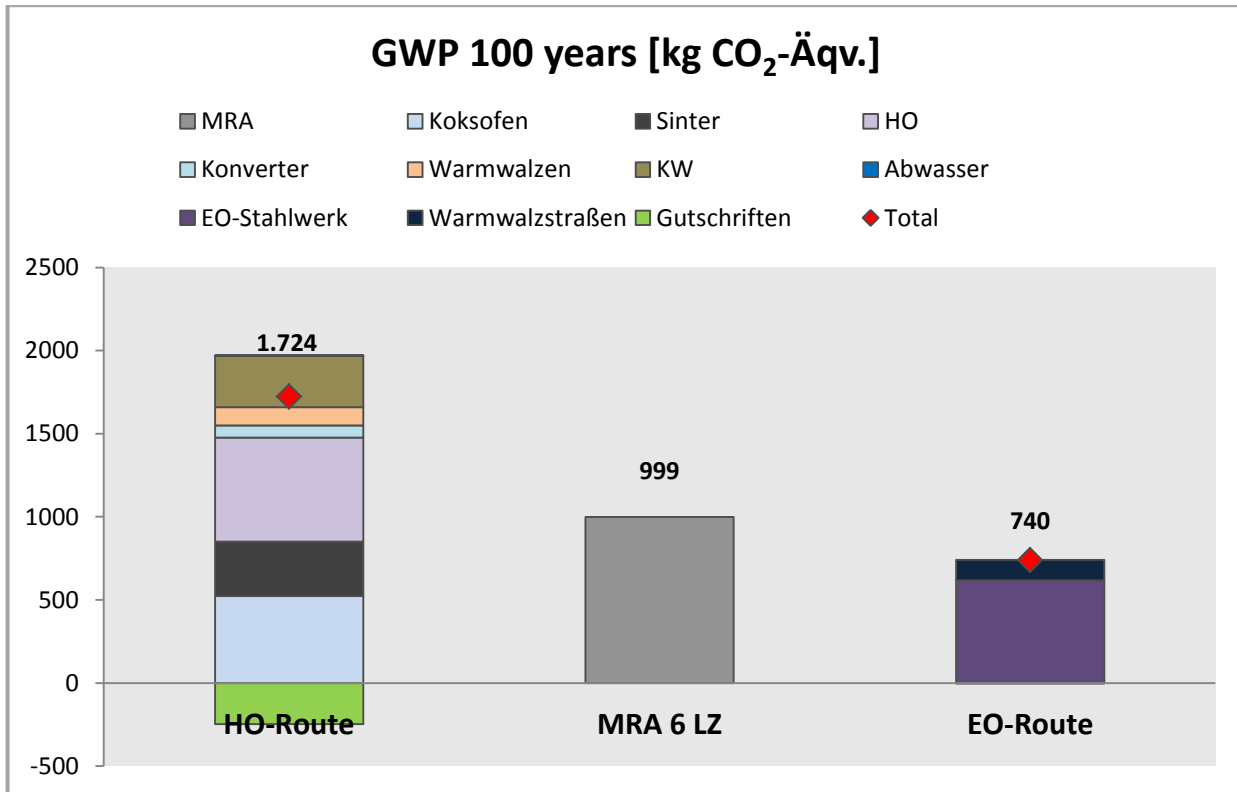


Abbildung 8: Darstellung der Treibhausgasemissionen (GWP100-CML2001)

5.2. VERSAUERUNGSPOTENTIAL

Für die Hochofen-Routen treten auch beim Versauerungspotential die höchsten Wirkpotentiale auf (siehe Abbildung 9). Der dominierende Prozess ist hier die Sinteranlage, die mit 51 Prozent erheblich zum Versauerungspotential des Gesamtprozesses beiträgt, wobei hier den mengenmäßig größten Input das Eisenerz darstellt. Die über Systemraumerweiterung vergebenen Gutschriften gehen mit ca. -10 Prozent in die Bilanz mit ein. Dabei spielt vor allem die Gutschrift für die Prozessgase eine Rolle.

Für die Ergebnisse der Elektroofen-Routen spielt hauptsächlich das Stahlwerk und die Stranggießanlage mit 90 Prozent Anteil am Gesamtergebnis eine übergeordnete Rolle, wobei der Strom-Mix daran den größten Anteil trägt.

Die Ergebnisse für den Multi-Recycling-Ansatz liegen wie auch beim Treibhauspotential zwischen den beiden Produktionsrouten.

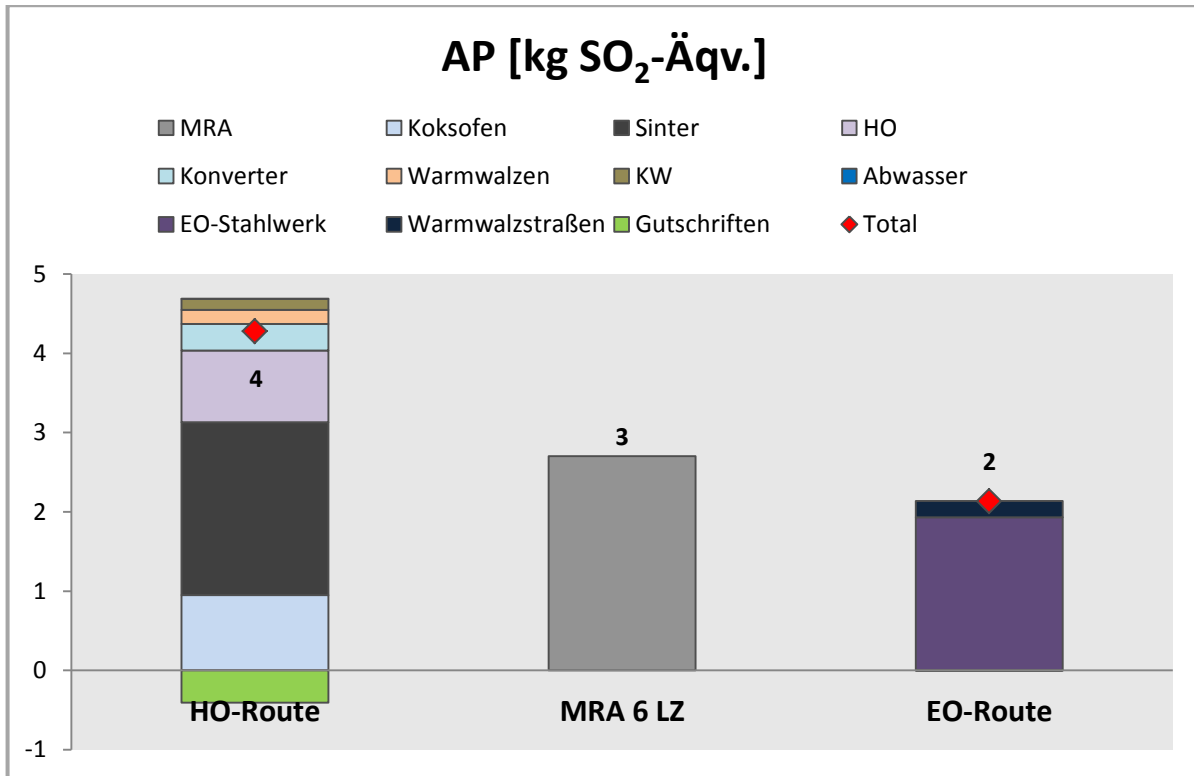


Abbildung 9: Wirkungsabschätzungsergebnisse Versauerungspotential

5.3. EUTROPHIERUNGSPOTENTIAL

Auch bei der Auswertung des Eutrophierungspotentials weist die Hochofen-Route die höchsten Werte auf (siehe Abbildung 10). Das Ergebnis wird dominiert durch den Koks-ofen-Prozess (ca. 30 Prozent) und den Sinterprozess (ca. 35 Prozent). Die über System-raumerweiterung vergebenen Gutschriften machen nicht mehr als -10 Prozent aus.

Die Elektroofen-Route weist niedrigere Werte als die HO-Route auf, wobei der Hauptan-teil hier erneut beim Stahlwerksprozess liegt. Der Strom-Mix trägt hier den Hauptteil der Umweltlasten mit etwa 25 Prozent.

Das Ergebnis für den Multi-Recycling-Ansatz spiegelt auch hier einen Mittelwert zwischen den beiden Routen wieder. Allerdings ist an dieser Stelle anzumerken, dass eine klare Unterscheidung der Ergebnisse aufgrund der potentiellen Unsicherheiten nicht mit Sicher-heit getroffen werden kann. Die Ergebnisse sind für diese Wirkkategorie demnach als mehr oder weniger gleichwertig anzusehen.

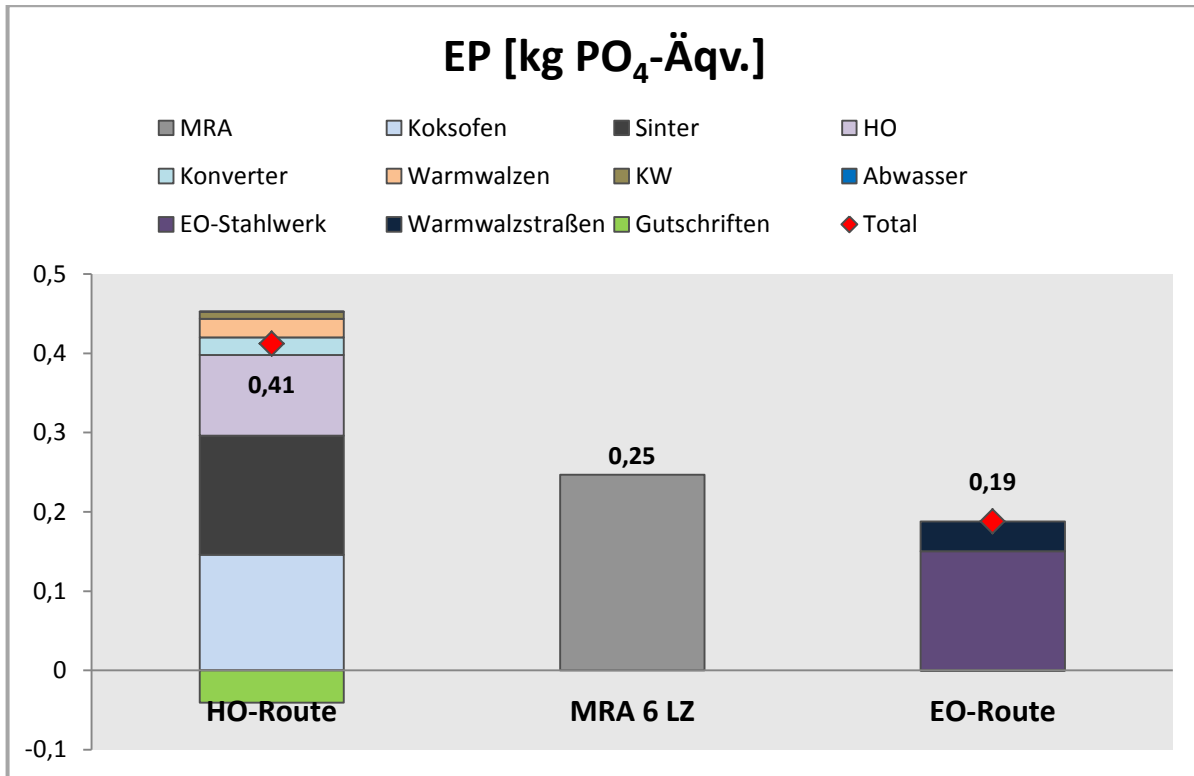


Abbildung 10: Wirkungsabschätzungsergebnisse Eutrophierungspotential

5.4. ELEMENTARER & FOSSILER RESSOURCENVERBRAUCH

Abbildung 11 zeigt die Wirkungsabschätzungsergebnisse für die Kategorien kumulierter Energieaufwand und fossiler abiotischer Ressourcenverbrauch. Beide Kategorien werden von der Hochofen-Route dominiert, wobei hier der dominierende Prozess mit 77 Prozent (ADP (f) & KEA) der Koksofen ist, aufgrund des Energieträgers Kohle. Die vergebenen Gutschriften fallen mit ca. -10 Prozent kaum ins Gewicht.

Für die Elektroofen-Route ist der Hauptverursacher mit 78 Prozent (ADP (f)) bzw. 80 Prozent (KEA) das Stahlwerk, vorrangig verursacht durch die im Prozess benötigte elektrische Energie²⁴.

Die Ergebnisse des Multi-Recycling-Ansatzes liegen erneut dazwischen.

Die höheren Werte des kumulierten Energieaufwands im Vergleich zum fossilen Ressourcenverbrauch (ADP (f)) sind mit der etwas höheren Gewichtung der fossilen Energieträger zu begründen. Die Quasi-Übereinstimmung der beiden Kategorien lässt sich durch die

²⁴ Für ADP macht der Strom-Mix 46 % aus, für PE sind es sogar 54 %.

übergeordnete Rolle an fossilen Energieträgern im Produktionsprozess begründen [Berger/Finkbeiner 2011].

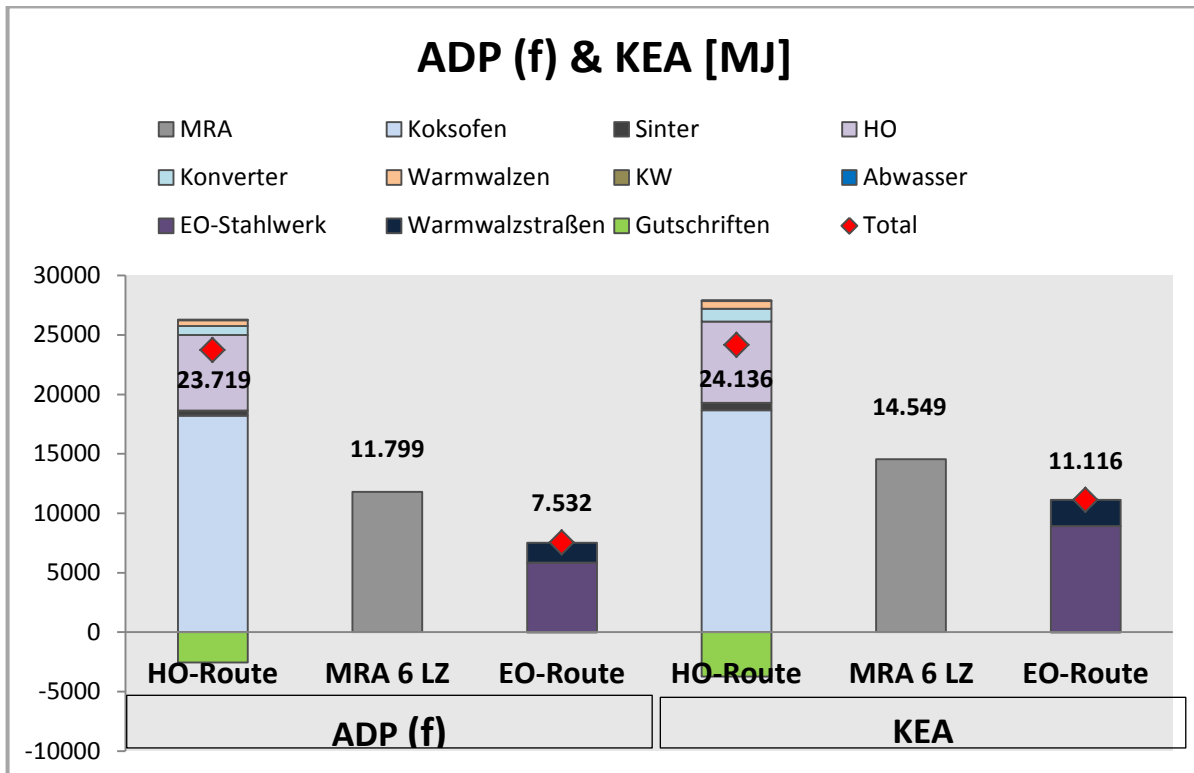


Abbildung 11: Wirkungsabschätzungsergebnisse fossiler Ressourcenverbrauch und kumulierter Energieaufwand

Im Gegensatz dazu fallen die Ergebnisse für den elementaren Ressourcenverbrauch genau gegenteilig aus (siehe Abbildung 12). Die Ergebnisse für die Hochofen-Route fallen niedriger aus als für die Elektroofen-Route. Den größten Anteil der HO-Route hat hier mit ca. 73 Prozent der Hochofen-Prozess. Die Gutschriften nehmen einen Einfluss mit -35 Prozent auf das Ergebnis, wobei den größten Beitrag die Gutschrift für die Schlacke, die in die Zementproduktion geht, leistet.²⁵

Daraus ergibt sich, dass die Umweltlasten der Elektroofen-Route höhere Werte aufweisen. Diese werden zu 90 Prozent durch die Stahlwerksprozesse verursacht, im Besonderen mit etwa 77 Prozent durch das eingesetzte Molybdän und untergeordnet durch Tantal.

Das Ergebnis des Multi-Recycling-Ansatzes liegt zwischen den beiden Produktionsrouten, tendiert aber eher Richtung Elektroofen-Route, da diese über die Lebenszyklen einen grö-

²⁵ Um die Unterschiede in den Ergebnissen ohne Systemraumerweiterung darzustellen wird in Kapitel 6.2 eine Sensitivitätsprüfung durchgeführt.

ßen Einfluss auf das Gesamtergebnis hat. Jedoch kann auch für diesen Wirkungsindikator aufgrund der potentiellen Unsicherheiten keine klare Unterscheidung der Ergebnisse erfolgen.

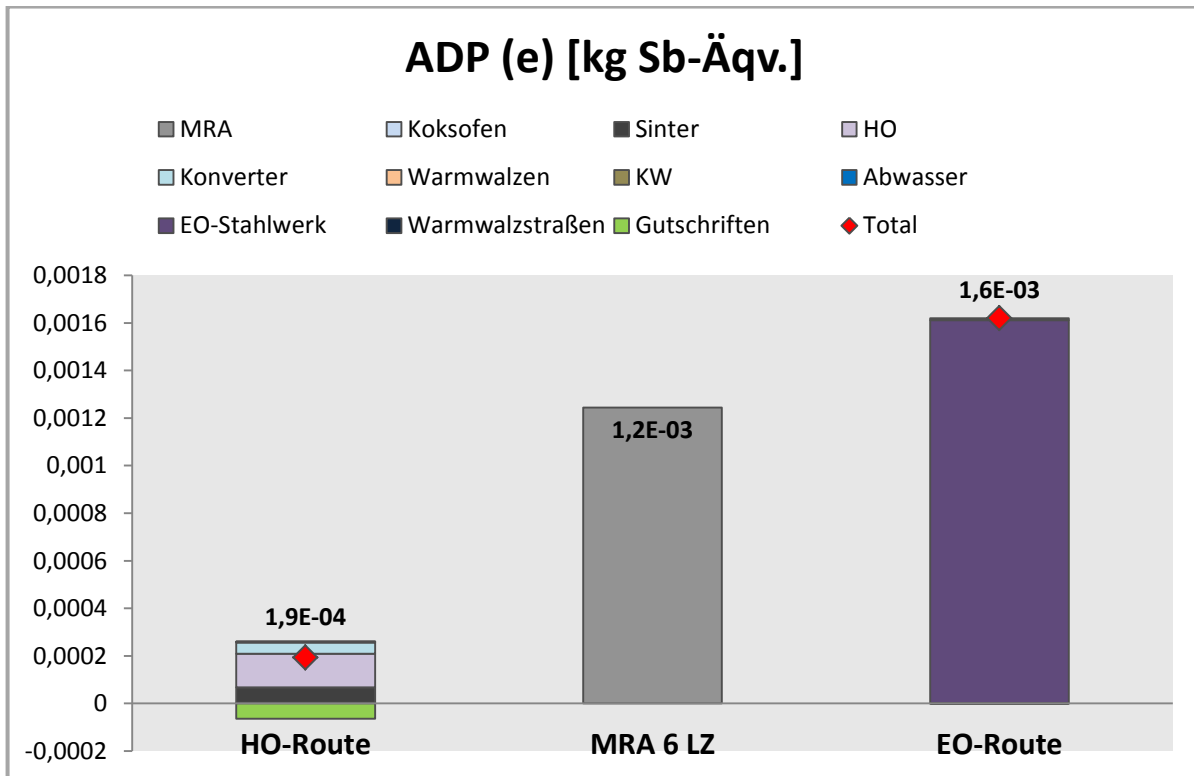


Abbildung 12: Wirkungsabschätzungsergebnisse elementarer Ressourcenverbrauch

5.5. PHOTOCHEMISCHES OXIDANTIENBILDUNGSPOTENTIAL

Die Bildung von Photooxidantien wird am meisten durch die Prozesse der Hochofen-Route begünstigt (siehe Abbildung 13), wobei hier der Sinterprozess mit 73 Prozent einen erheblichen Einfluss hat. Die vergebenen Gutschriften spielen mit nicht einmal -5 Prozent eine untergeordnete Rolle.

Die Elektroofen-Route trägt im Vergleich weniger zur Bildung von Photooxidantien bei. Hier ist der Hauptfaktor das Stahlwerk, wobei die benötigte Energie und die Bereitstellung des Tantal den größten Anteil haben.

Der Multi-Recycling-Ansatz weist ein Ergebnis zwischen den beiden Produktionsrouten auf.

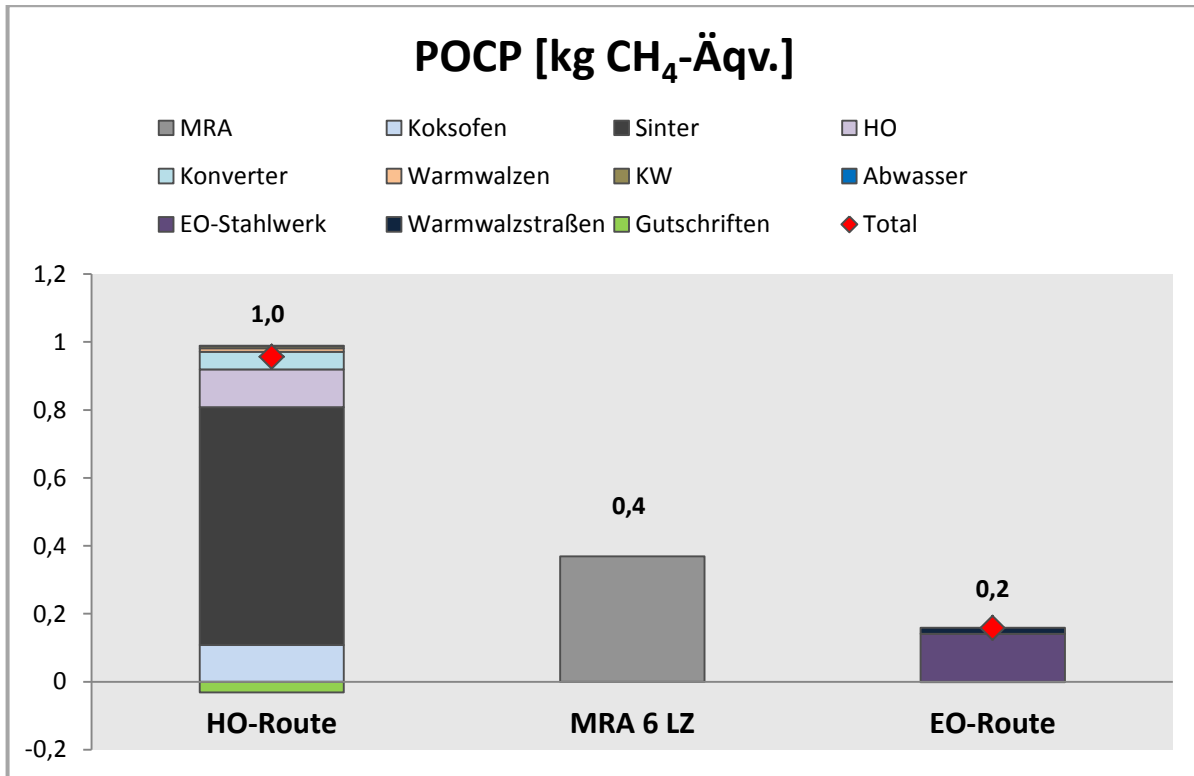


Abbildung 13: Wirkungsabschätzungsergebnisse POCP

5.6. OZONABBAUPOTENTIAL

Die Ergebnisse für das Ozonabbaupotential fallen für die Hochofen-Route negativ aus (siehe Abbildung 14). Dies ist vor allem durch die Gutschriften für die überschüssigen Prozessgase verursacht.

Für die Elektroofen-Route wird die Hauptumweltlast mit 83 Prozent durch die benötigte elektrische Energie verursacht.

Der Multi-Recycling-Ansatz und die Elektroofen-Route weisen kleinere Werte als die Hochofen-Route auf. Aufgrund der sehr kleinen Werte und unsicherer Basisdaten, ist an dieser Stelle eine potentielle Unsicherheit zu berücksichtigen, was die marginalen Unterschiede zwischen den beiden Routen betrifft. Aus diesem Grund wird das ODP im Rahmen der Sensitivitätsanalysen nicht weiter betrachtet.

Da ein negatives Ergebnis immer kritisch zu hinterfragen ist, wird für diesen Fall in Kapitel 6.2 eine Sensitivitätsprüfung durchgeführt, in der die Hochofen-Route bis Warmband ohne Vergabe von Gutschriften für die Nebenprodukte zugrunde gelegt wird.

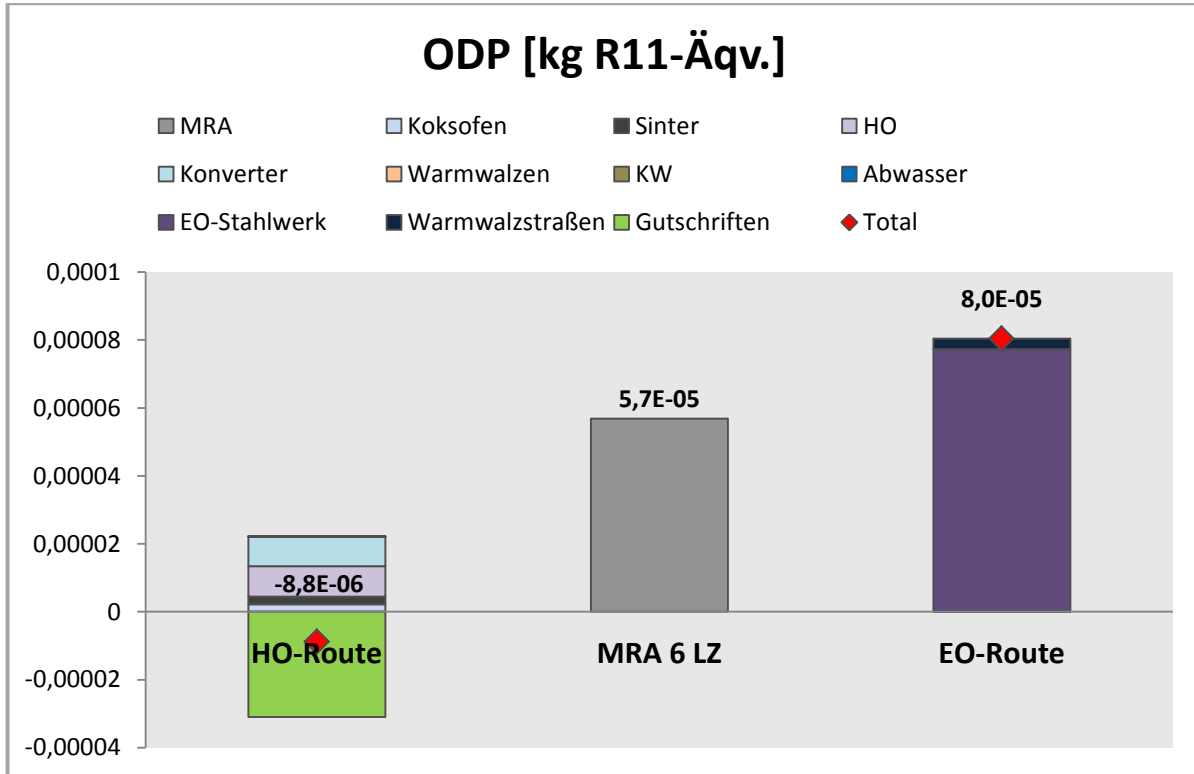


Abbildung 14: Wirkungsabschätzungsergebnisse Ozonabbaupotential

5.7. NORMIERUNG

Im Rahmen der Kritischen Prüfung wurde gewünscht, zur Veranschaulichung der Ergebnisse, eine Normierung auf den Bezugsraum Europa (EU25) durchzuführen. Die normierten Ergebnisse sind Abbildung 15 zu entnehmen.²⁶

Normierte Ergebnisse sind mit Sorgfalt und Zurückhaltung zu interpretieren, sie werden in vielen Studien tendenziell eher überinterpretiert. Sie als Quasi-Gewichtung der Relevanz der Wirkungskategorien zu interpretieren, ist nicht zulässig. Auch die Aussage, dass die Wirkungskategorien für den Bezugsraum einen bestimmten Anteil an der Gesamtwirkung haben, ist falsch - außer bei globalem Bezug. Dies liegt daran, dass in den Bilanzergebnissen auch Umweltbelastungen enthalten sind, die gar nicht im Bezugsraum entstanden sind. Dennoch wird die Normierung hier zu einer groben Einschätzung der mengenmäßigen Relevanz der Wirkungskategorien dokumentiert.

²⁶ Die Ergebnisse wurden auf den Bezugsraum EU-25 nach der CML Methode normiert.

Die Wirkungskategorien, die den rein mengenmäßig größten Einfluss für den Bezugsraum haben, haben auch absolut gesehen die höchsten Ergebnisse. Die nach der Normierung mengenmäßig relevantesten Kategorien sind GWP, ADP fossil, AP und POCP.

Das Wirkungsabschätzungsergebnis für das Ozonabbaupotential, das ein negatives Ergebnis für die HO-Route aufweist, spielt für den Bezugsraum Europa lediglich eine untergeordnete Rolle.

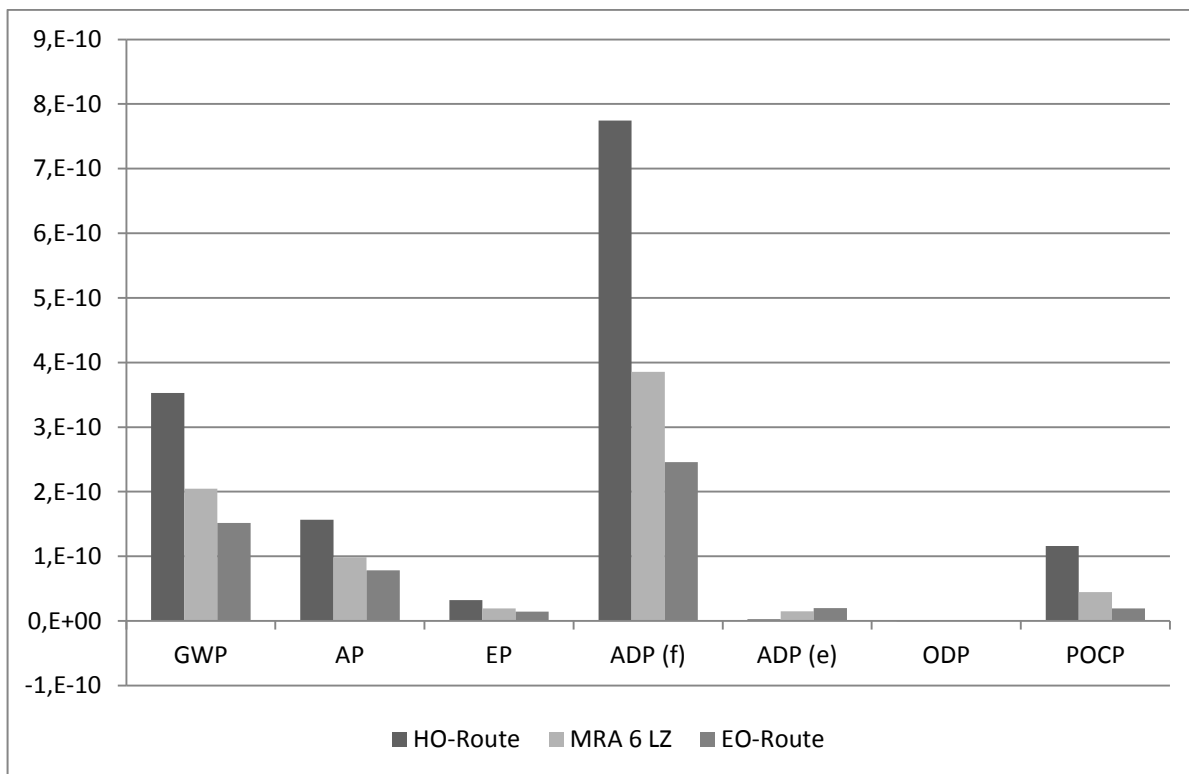


Abbildung 15: Normierte Ergebnisse für die betrachteten Wirkungskategorien

6. AUSWERTUNG

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die Ergebnisse der Ökobilanz diskutiert. Hierzu werden zunächst Parameter und Annahmen, die das Ergebnis der Ökobilanz wesentlich beeinflussen, herausgearbeitet und diskutiert. Die signifikanten Parameter in dieser Ökobilanz werden näher betrachtet und die zu prüfenden Punkte einer Sensitivitätsprüfung unterzogen. Weiter erfolgen eine Vollständigkeits- und Konsistenzprüfung. Abschließend geht Kapitel 6.4 zusammenfassend auf Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen ein, die sich aus der Ökobilanz ergeben.

6.1. IDENTIFIKATION DER SIGNIFIKANTEN PARAMETER

Die Ergebnisse des Multi-Recycling-Ansatzes sind von der Wahl der Anzahl der Lebenszyklen abhängig. Inwiefern diese eine signifikante Auswirkung auf das Gesamtergebnis hat, soll in einer Sensitivitätsanalyse geprüft werden.

Weiter soll die Kategorie ADP (e) aufgrund des niedrigen Ergebnisses für die Hochofen-Route in einer Sensitivitätsprüfung betrachtet werden, in der Warmband ohne Anwendung einer Systemraumerweiterung zugrunde gelegt wird.

Ergänzend werden die Ergebnisse der Hochofen-Route bis Warmband²⁷ mit Ergebnissen für einen höherwertigen Stahl (feuerverzinkter Stahl) gegenübergestellt.

Folgende Materialflüsse bzw. Prozessschritte könnten aus den oben genannten Gründen ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf das Gesamtergebnis haben:

- a) Gutschriften via Systemraumerweiterung für die Hochofen-Route
- b) Wahl der Lebenszyklusanzahl für den Multi-Recycling-Ansatz
- c) Wahl von Warmband in der Hochofen-Route
- d) Wahl der Wirkungsabschätzungsmethode CML

Die Ergebnisse nach Normierung der Wirkungskategorien zeigen für den Verbrauch fossiler Ressourcen (ADP (f)) mengenmäßig die höchste Relevanz, was für die Ökobilanz zur Herstellung und Rückgewinnung von Stahl der Erwartung entspricht. Fossile Ressourcen werden dabei sowohl in der Hochofen-Route, hauptsächlich in Form von Kohle und Erdgas, als auch in der Elektroofen-Route, in Form von vorrangig elektrischer Energie, verbraucht.

²⁷ Siehe hierzu Annex B.

Dementsprechend ist auch das Treibhauspotential erwartungsgemäß mengenmäßig bedeutend für die betrachteten Prozesse. Die größten Mengen an Treibhausgasemissionen entstehen während der Prozessschritte, in denen große Mengen fossiler Energieträger benötigt werden, wie dem Hochofen-Prozess oder dem Koksofen.

Das Versauerungspotenzial geht aus der Normierung als Kategorie mit der dritthöchsten mengenmäßigen Relevanz hervor. Bei der Versauerung handelt es sich um regionale Umweltschäden. Für die Versauerung spielt zum einen der Prozess des Sinterns, in dem das Eisenerz zu Sinter Pellets verarbeitet wird, eine übergeordnete Rolle. In der Hochofen-Route spielen zudem noch die vergebenen Gutschriften für die Prozessgase eine reduzierende Rolle. In der Elektroofen-Route trägt der deutsche Strom-Mix im Stahlwerksprozess den größten Anteil am Versauerungspotential. Die Ergebnisse für die Bildung von Photooxidantien korrelieren mit denen des Versauerungspotentials. Auch hier spielen der Sinterprozess der Hochofen-Route und der Stahlwerksprozess der Elektroofen-Route eine übergeordnete Rolle. Entsprechend den Ausführungen in Kapitel 5.7 sollen die Ergebnisse nach Normierung nicht überinterpretiert werden. Sie dienen lediglich der Veranschaulichung der Größenordnung, wobei aufgrund der Wahl des relativ kleinen Bezugsraumes eine Verfälschung nicht ausgeschlossen werden kann. Eine weitere Betrachtung im Rahmen der Sensitivitätsprüfung findet daher nicht statt.

6.2. SENSITIVITÄTSPRÜFUNG

Im Folgenden wird die Sensitivität der Ergebnisse der Ökobilanz anhand einer Variation von ausgewählten, ergebnisrelevanten Einflussgrößen dargestellt und diskutiert. Die Sensitivität dient auch dazu die Unsicherheiten einer Ökobilanz einzuschätzen und einzuschränken. Die methodischen Unsicherheiten in dieser Studie sind vor allem in der Wahl der Lebenszyklusanzahl und der Wirkungsabschätzungsmethode zu sehen. Für beide Fälle wird eine Sensitivitätsprüfung durchgeführt. Weiter erfolgt eine Ergebnisdarstellung ohne Gutschriftenvergabe für Nebenprodukte, zur Bestimmung des Einflusses der Gutschriften. Der Vergleich von Warmband und feuerverzinktem Stahl dient lediglich der Darstellung der Auswirkungen bei Verwendung einer höherwertigen Stahlqualität als Ausgangsrohstoff.

6.2.1. ERGEBNISDARSTELLUNG OHNE SYSTEMRAUMERWEITERUNG

Da die Ergebnisse für die Hochofen-Route bis zum Warmband mit Systemraumerweiterung für den elementaren Ressourcenverbrauch für die HO-Route besser abschneiden als für die EO-Route, soll an dieser Stelle eine Sensitivitätsprüfung erfolgen. Hierzu wird die Hochofen-Route bis zum Warmband ohne Gutschriftenvergabe für die Nebenprodukte betrachtet. Zusätzlich findet im Rahmen einer ganzheitlichen Abbildung auch die Betrachtung der Ergebnisse für das Treibhauspotential statt.

Die Ergebnisse für den Wirkungsindikator ADP (e) nehmen für die Hochofen-Route einen etwas höheren Wert an, sobald keine Gutschriften für die Nebenprodukte mehr vergeben werden. Allerdings schneidet in diesem Fall das Ergebnis für die Elektroofen-Route weiterhin schlechter ab, so dass das Ergebnis für den Multi-Recycling-Ansatz im Vergleich minimal schlechter ausfällt (siehe Abbildung 16).

In diesem Fall geht der größte Beitrag für die Hochofen-Route vom eingesetzten Eisenerz aus, während die Ergebnisse der Elektroofen-Route weiterhin von den Prozessen des Stahlwerks dominiert werden (siehe auch Kap. 5.4).

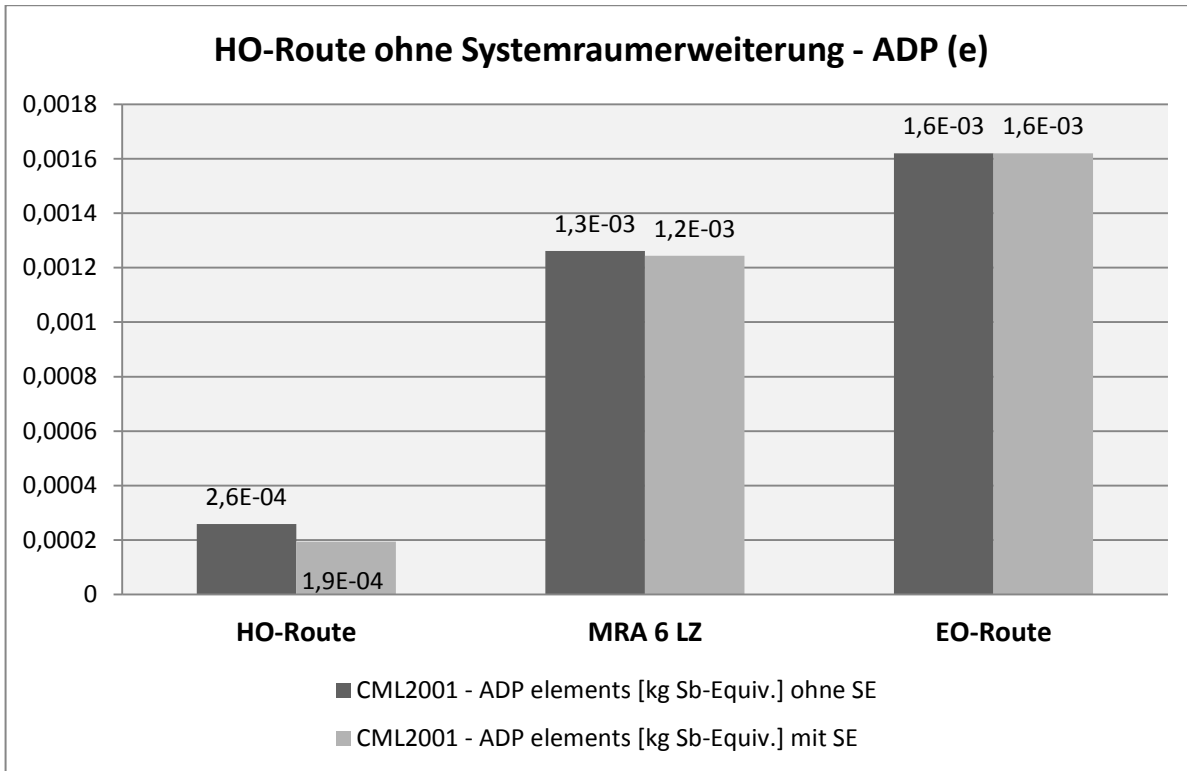


Abbildung 16: Ergebnisunterschiede für ADP (e) für die HO-Route mit & ohne SE

Auch die Ergebnisse für das Treibhauspotential fallen ohne Berücksichtigung der Nebenprodukte über Systemraumerweiterung für die HO-Route etwas höher aus. Daraus resultiert auch eine minimale Erhöhung des Ergebnisses für den MRA. Eine Veränderung der Reihenfolge im Hinblick auf die EO-Route erfolgt nicht (siehe Abbildung 17).

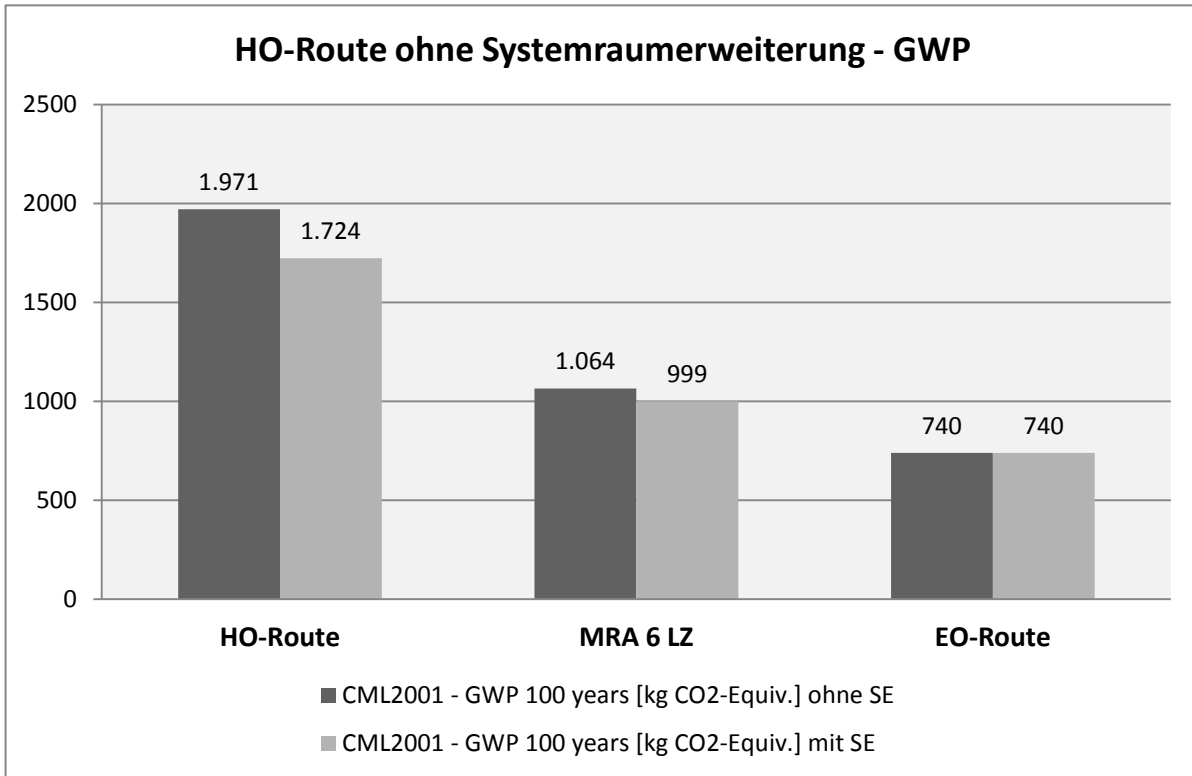


Abbildung 17: Ergebnisunterschiede für GWP für die HO-Route mit & ohne SE

Die Gutschriftenvergabe ändert demnach nichts am Gesamt-Ergebnis. Insgesamt gesehen, spricht daher und methodisch nichts gegen die Gutschriftenvergabe für die Nebenprodukte der Stahlherstellung. Durch alle entstehenden Nebenprodukte werden in anderen Prozessen Rohstoffe eingespart, wodurch die Gutschriftenvergabe gerechtfertigt werden kann. Zumal sich an den realen Gegebenheiten orientiert wurde und nur dann eine Gutschrift vergeben wurde, sofern eine Weiterverwendung des Nebenproduktes als gesichert angesehen werden konnte.

6.2.2. HOCHOFEN-ROUTE BIS FEUERVERZINKTER STAHL

Die Wahl von Warmband als Bezugsgröße für die Hochofen-Route wurde in Rücksprache mit den Experten der beteiligten Unternehmen und des Stahl-Zentrums und nach einer ausführlichen Literaturrecherche beschlossen. Warmband stellt in gewisser Weise den Ausgangsstahl dar, der sowohl in viele Endprodukte eingeht als auch zur Weiterverarbeitung für höherwertige Stähle genutzt wird (siehe hierzu Anhang B). Er stellt damit die konservative und konsistente Basis für den Multi-Recycling-Ansatz dar. Dennoch soll im

Zuge einer Sensitivitätsprüfung erörtert werden, inwieweit eine Abweichung der Ergebnisse auftritt, wenn von einem höherwertigen Stahl ausgegangen wird. Dies dient lediglich der Abschätzung der Auswirkungen im Vergleich zum Warmband. Theoretisch ist die Produktion eines Warmbandstahles auch mit einem höherwertigen Stahl möglich, wobei hier das Ziel die Veranschaulichung des Unterschiedes ist. Zwar wäre die Herstellung von höherwertigem Stahl theoretisch auch über EO-Route möglich, eine praktische Umsetzung erfolgt jedoch aus ökonomischen und logistischen Gründen nicht, bedingt durch die großen benötigten Inputmengen.

Für den Vergleich wird feuerverzinkter Stahl (FVS) herangezogen, der im Rahmen dieser Betrachtung das qualitativ hochwertigere Produkt der Hochofen-Route darstellt.²⁸ Untenstehender Abbildung 18 sind die Ergebnisse für das Treibhauspotential zu entnehmen.

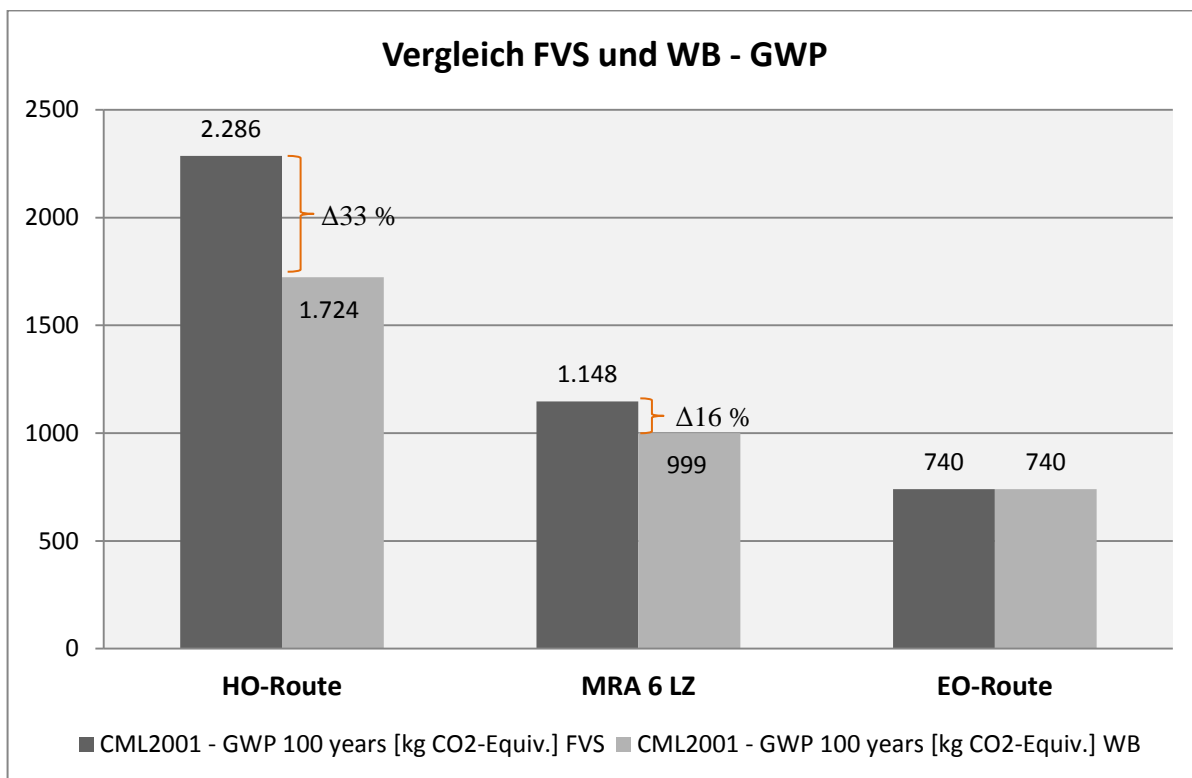


Abbildung 18: Vergleich der GWP Wirkungsabschätzungsergebnisse für FVS

Durch die neue Bezugsgröße feuerverzinkter Stahl, müssen im Rahmen der Herstellung die zusätzlichen Prozessschritte Beizen, Kaltwalzen, Glühen und Feuerverzinken durchlaufen werden. Die Aufwendungen für die Herstellung einer Tonne Stahl liegen folglich etwas über denen für Warmband. Das schlägt sich auch in der Auswertung des Multi-Recycling-

²⁸ Auch hier werden über Systemraumerweiterung die Nebenprodukte mit einer Gutschrift berücksichtigt.

Ansatzes nieder, der für die Betrachtung von 6 Lebenszyklen im Vergleich zum Warmband etwas schlechter abschneidet. Eine Umkehr der Ergebnisse erfolgt nicht. Dies gilt auch für die Wirkungskategorie Eutrophierung (siehe Abbildung 19).

Auch hier verschlechtert sich das Gesamt-Ergebnis für den Multi-Recycling-Ansatz aufgrund der höheren Anfangslast etwas, allerdings ist der Unterschied für diese Wirkungskategorie marginal. Die Ergebnisunterschiede werden in beiden Fällen durch den MRA abgemildert, da über die Lebensdauer der Einfluss der EO-Route an Bedeutung gewinnt.

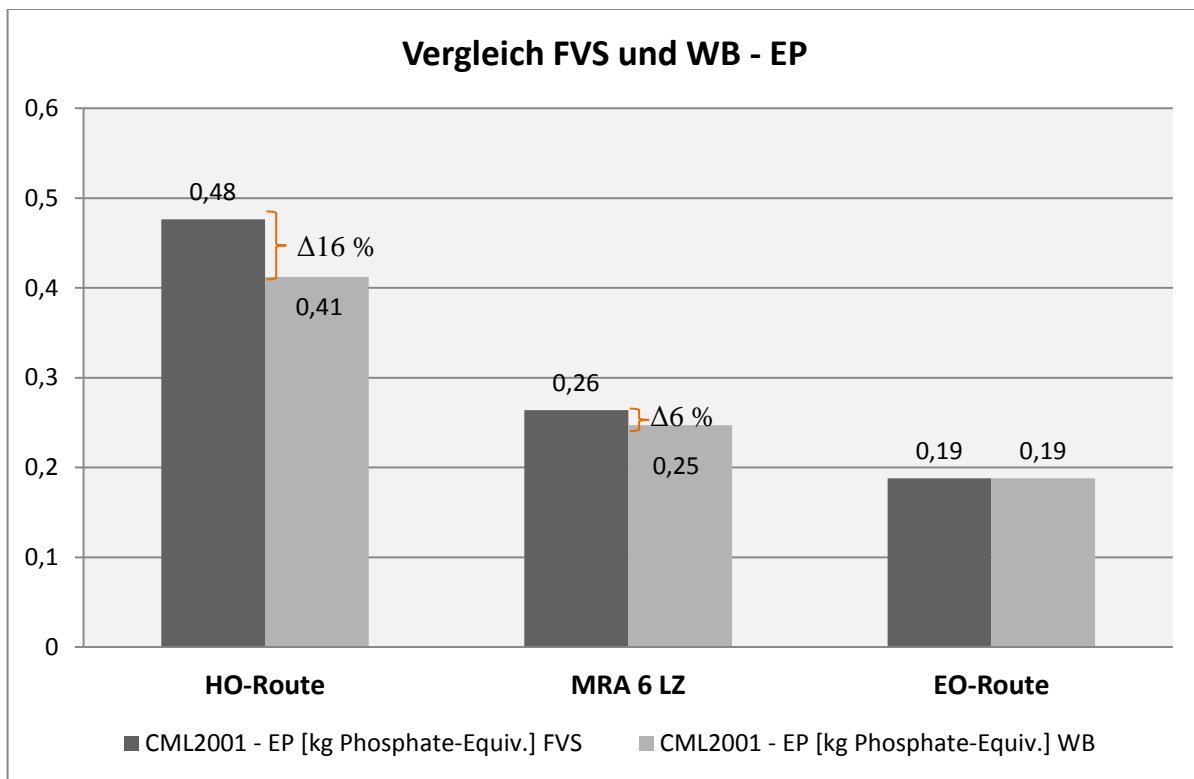


Abbildung 19: Vergleich der EP Wirkungsabschätzungsergebnisse für FVS

Dasselbe Bild lässt sich auch für die übrigen Wirkungskategorien zeichnen (siehe Tabelle 7).²⁹

Tabelle 7: Vergleich der Wirkungsabschätzungsergebnisse für FVS

	HO-Route		MRA (6 LZ)		EO-Route	
	FVS	WB	FVS	WB	FVS	WB
CML2001 - AP [kg SO ₂ -Equiv.]	5,8	4,3	3,1	2,7	2,1	2,1
CML2001 - POCP [kg Ethene-Equiv.]	1,0	1,0	0,4	0,4	0,2	0,2

²⁹ Der Wirkungsindikator ODP wird an dieser Stelle aufgrund der geringen Relevanz nicht weiter betrachtet.

CML2001 - ADP elements [kg Sb-Equiv.]	0,0504	0,0002	0,0145	0,0012	0,0016	0,0016
CML2001 - ADP fossil [MJ]	27004	23719	12666	11799	7532	7532
KEA [MJ]	28742	24136	15763	14549	11116	11116

Die Verhältnisse der Ergebnisse bleiben bestehen und es ergeben sich keine signifikanten Unterschiede oder nennenswerte Zusatzeinflüsse im Vergleich zur Warmband-Betrachtung.

6.2.3. VARIATION DER LEBENSZYKLEN-ANZAHL

Die Wahl der Betrachtung von 6 Lebenszyklen wurde aufgrund der durchschnittlichen Lebensdauer von Stahlprodukten als konservativer Ansatz gewählt. Auch wenn davon auszugehen ist, dass Stahl beliebig oft recycelt werden kann, ist es als kritisch anzusehen weit über einen Zeitraum von 100 Jahren hinaus zu planen. Jedoch ist gerade für den Werkstoff Stahl, im Hinblick auf die Materialeigenschaften und die Nachfrage nach (Sekundär-)Stahl, nicht von einem Ende des Lebensweges bereits nach dem zweiten oder dritten Lebenszyklus auszugehen [Dahlmann et al. 2012]. Dennoch soll im Rahmen einer Sensitivitätsprüfung der Einfluss auf die Ergebnisse durch Veränderung der Lebenszyklusanzahl geprüft werden.

Abbildung 20 zeigt die Ergebnisse für den Multi-Recycling-Ansatz für die einzelnen Lebenszyklen. In der Gesamtbetrachtung wird von 17 Lebenszyklen ausgegangen, da an diesem Punkt bei dem hier verfolgten konservativen Ansatz nur noch zehn Prozent des ursprünglich eingesetzten Materials vorhanden wären.

Es wird deutlich, dass der größte Effekt auf die Ergebnisse in den ersten vier Lebenszyklen eintritt und sich die Kurve danach asymptotisch einer fixen Parallelen zur x-Achse nähert, bedingt durch den sich verringern Einfluss der Hochofen-Route mit zunehmender Lebenszykluszahl auf das Gesamtergebnis.

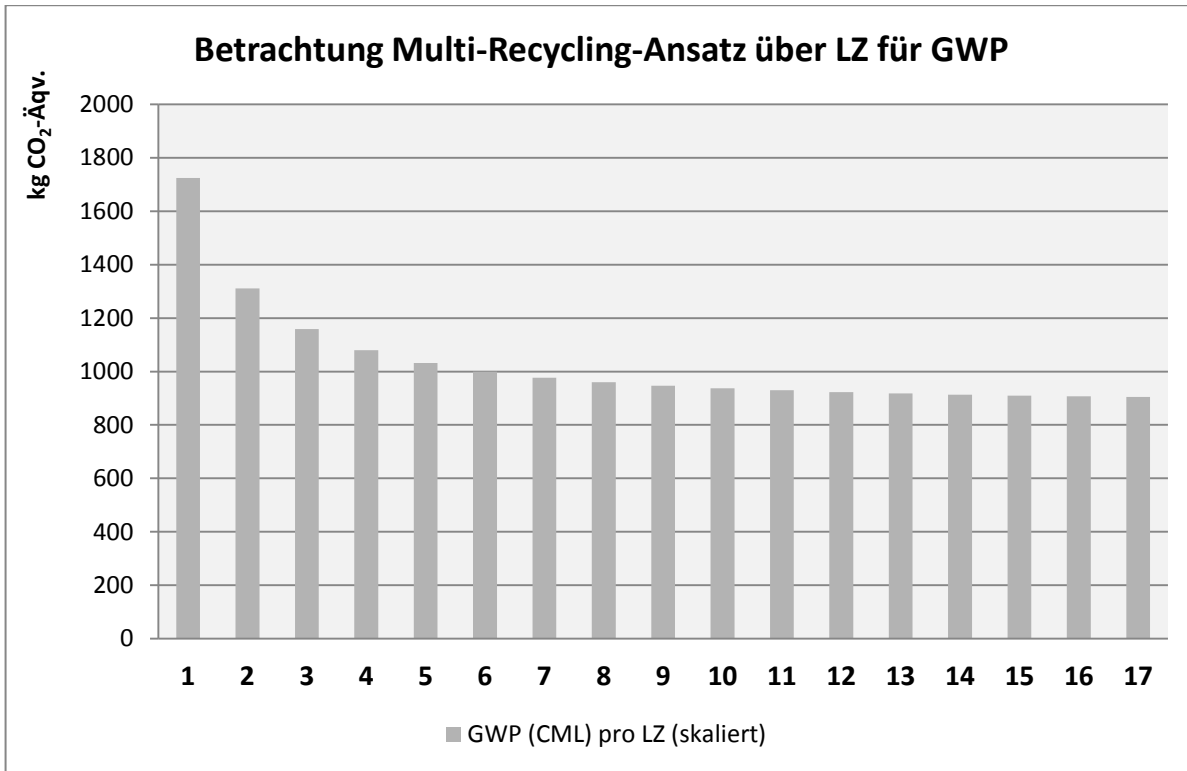


Abbildung 20: Darstellung der MRA-Ergebnisse für GWP über die die LZ für WB mit SE

Ähnliches gilt auch für die Wirkungskategorien, in denen die Hochofen-Route im Vergleich zur Elektroofen-Route geringere Umweltlasten verursacht (Abbildung 21).

Der Verlauf beschreibt in diesem Fall genau die umgekehrte Kurve, aber auch hier ist der größte Effekt in den ersten vier Lebenszyklen zu sehen.

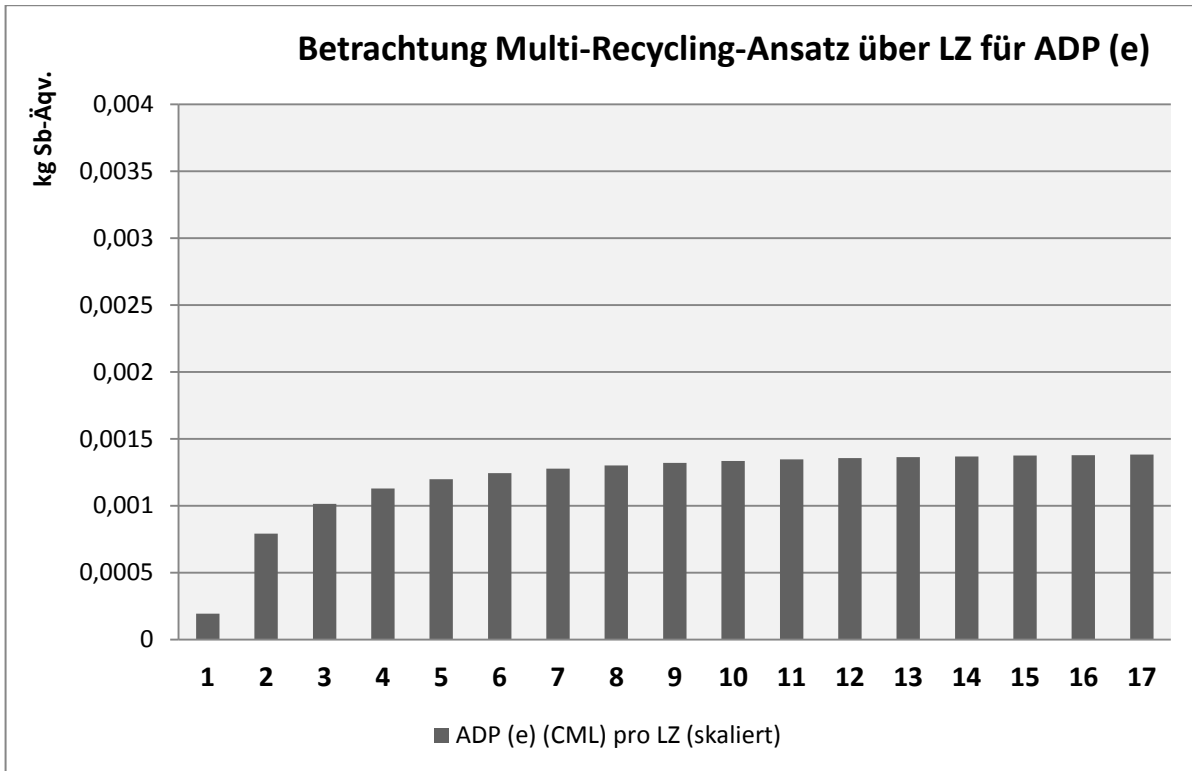


Abbildung 21: MRA-Ergebnisse für ADP (e) über die die LZ für WB mit SE

Für beide Fälle stellt der Rahmen von 6 Lebenszyklen einen guten Mittelwert dar. Somit ist die Wahl von 6 Lebenszyklen als Ausgangsannahme für den Multi-Recycling-Ansatz sowohl über die Ergebnisse als auch über die Lebensdauer von Stahlprodukten begründbar.

6.2.4. WIRKUNGSABSCHÄTZUNG NACH RECIPE

Die CML-Methode ist eine der in der Anwendung von Unternehmen am weitesten verbreiteten Methoden zur Wirkungsabschätzung. Dennoch sollen die ermittelten Ergebnisse mit einer der neueren Wirkungsabschätzungsmethoden verglichen werden. Hierzu wird die ReCiPe-Methode [Goedkoop et al. 2008] herangezogen, deren Midpoint-Variante auch als Weiterentwicklung der CML-Methode anzusehen ist.

Für beide Methoden liegen die Treibhausgasemissionen im selben Bereich. Beide Methoden werten nach CO₂-Äquivalenten aus und kommen zu ähnlichen Ergebnissen (siehe Abbildung 22). Die geringen Unterschiede der Ergebnisse sind darauf zurückzuführen, dass in der CML-Methode die Bindung von CO₂-Emissionen durch erneuerbare Ressourcen berücksichtigt wird [CML 2010]. Wohingegen ReCiPe davon ausgeht, dass diese Emissionen früher

oder später wieder freigesetzt werden und deshalb eine Berücksichtigung nicht erforderlich ist [Goedkoop et al. 2009].³⁰

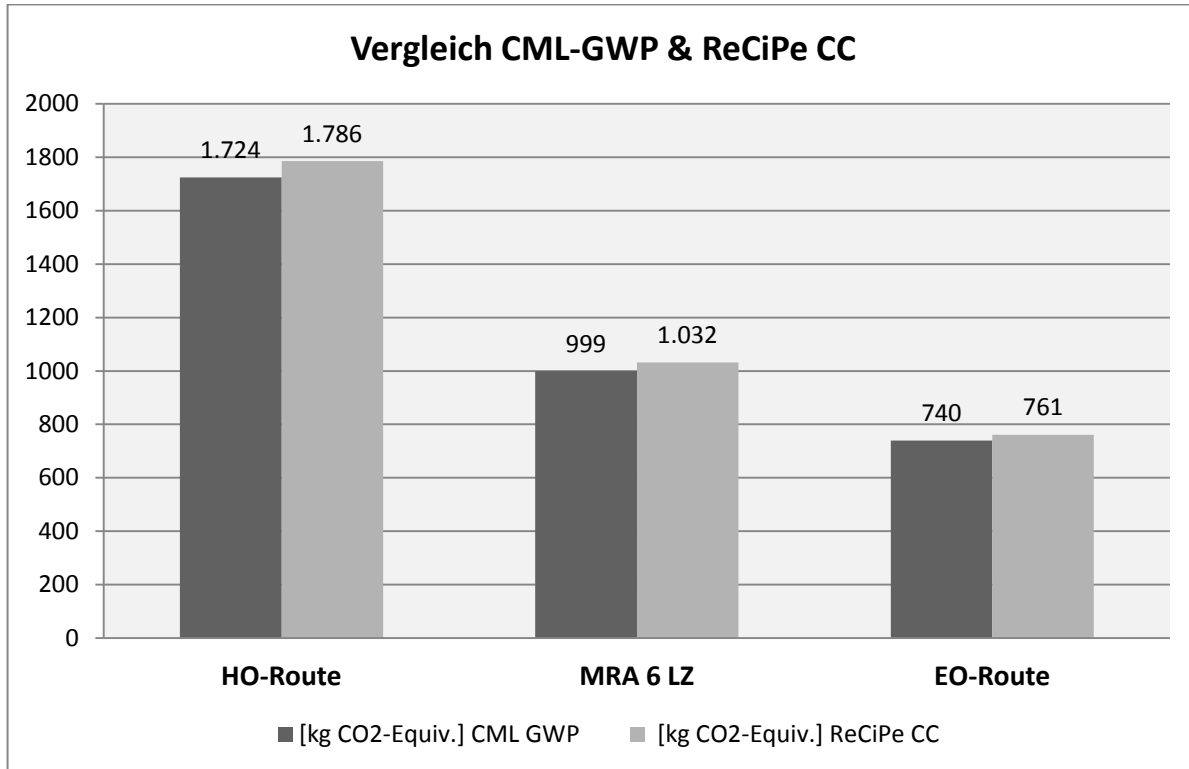


Abbildung 22: Vergleich der Treibhauspotentiale nach CML und ReCiPe

Für die Eutrophierung sieht der Vergleich zwischen den beiden Methoden schon anders aus, da ReCiPe im Gegensatz zu CML zwischen Frischwasser Eutrophierung³¹ und mariner Eutrophierung³² unterscheidet. Die CML-Methodik fasst Eutrophierung in einem Wert zusammen, der in Phosphat-Äquivalenten gemessen wird (siehe Tabelle 6). Während nach CML alle relevanten Flüsse in einer Wirkungskategorie zusammenfasst werden, teilt ReCiPe die Eutrophierung in zwei Wirkungskategorien auf. In der EP (freshwater) werden die phosphorbasierten Flüsse, wie Phosphat, Phosphor etc., zusammengefasst. In der EP (marin) werden alle mit Stickstoff zusammenhängenden Größen betrachtet, wie Ammoniak und Nitrate. Lachgas ist hier aus der Betrachtung ausgeschlossen, während es nach CML inkludiert ist.

³⁰ In diesem Zusammenhang fand auch eine Rücksprache mit unseren Ansprechpartnern von PE International statt, die diesen methodischen Unterschied bestätigten.

³¹ Gemessen in [kg P-Äqv.]

³² Gemessen in [kg N-Äqv.]

In der Eutrophierung nach CML sind zusätzlich noch Xylol und organische Komponenten eingeschlossen. Dennoch kommt ReCiPe zu höheren Ergebnissen, aufgrund der unterschiedlicher Charakterisierungsfaktoren und der unterschiedlichen Auftrittswahrscheinlichkeit. Die Rangfolge der Ergebnisse unterscheidet sich jedoch nicht. Die Ergebnisse für die Hochofen-Route liegen immer etwas über denen der Elektroofen-Route, wobei die Unterschiede teilweise marginal sind. Absolut gesehen sind die Ergebnisse nach CML und ReCiPe in dieser Form nicht vergleichbar.

Tabelle 8: Ergebnisse Eutrophierung nach CML und ReCiPe

*Die untenstehenden Ergebnisse sind aufgrund der unterschiedlichen Bezugsgröße nicht vergleichbar. Die Darstellung dient lediglich der Veranschaulichung der Unterschiede.			
	[kg PO ₄ -Äqv.]	[kg P-Äqv.]	[kg N-Äqv.]
	CML EP	ReCiPe EP (freshwater)	ReCiPe EP (marine)
HO-Route	0,4	0,002	1,1
MRA 6 LZ	0,3	0,0017	0,6
EO-Route	0,2	0,0016	0,5

In Bezug auf das Versauerungspotential gehen beide Methoden von derselben Bezugsgröße (kg SO₂-Äqv.) aus. Jedoch wird das Ergebnis bei CML aus 141 Flüssen berechnet, während ReCiPe ein Ergebnis aus lediglich 4 Stoffflüssen berechnet. Dennoch kommen beide Methoden zu relativ ähnlichen Ergebnissen, weshalb davon ausgegangen werden kann, dass die in ReCiPe betrachteten Flüsse³³ zumindest für diese Ökobilanzstudie die ausschlaggebenden Emissionen darstellen (siehe Abbildung 23). Der geringe Unterschied der Ergebnisse, lässt sich zum einen auf die schwerere Gewichtung von Schwefeldioxid nach CML³⁴ und zum anderen auf den geringen Einfluss weiterer Stoffe zurückführen, die in der ReCiPe Methode nicht berücksichtigt werden.

³³ Ammoniak, Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickoxide

³⁴ Gewichtung 1,2 statt 1.

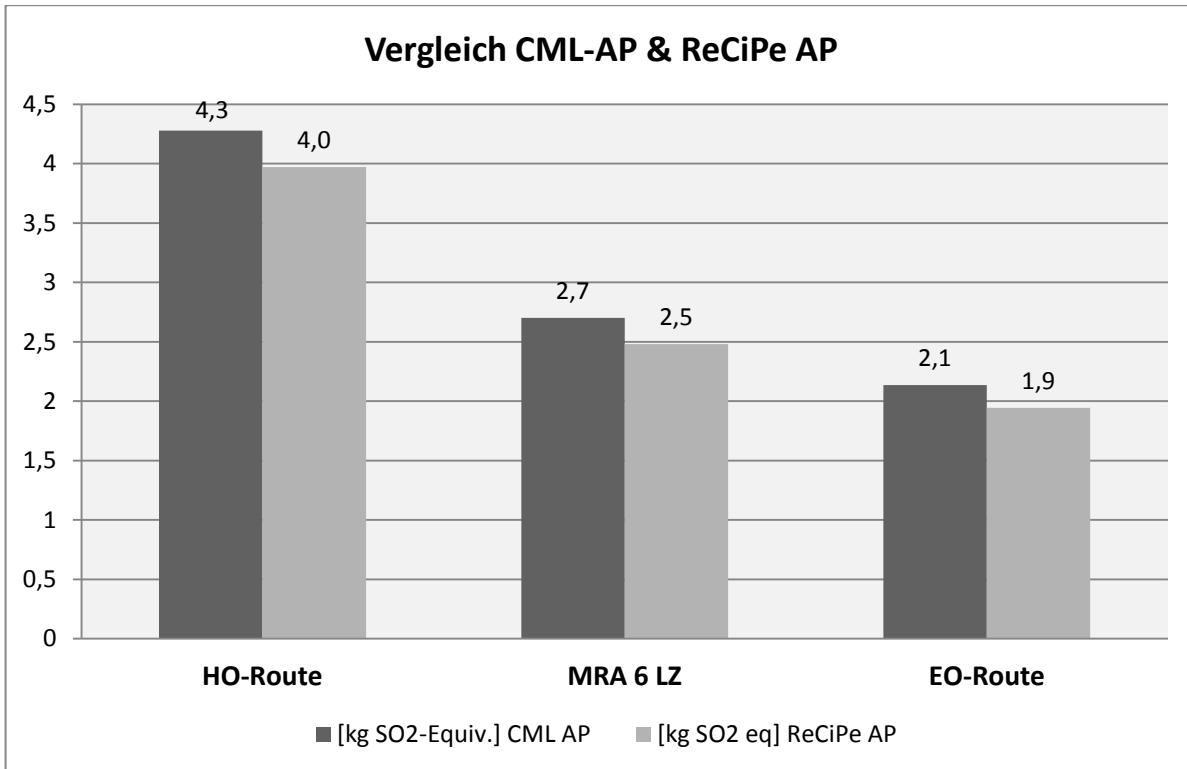


Abbildung 23: Vergleich der Versauerungspotentiale nach CML und ReCiPe

Für das Ozonabbaupotential gehen die beiden Methoden von nahezu derselben Grundlage und einer fast übereinstimmenden Gewichtung aus. In der ReCiPe Methode wird im Gegensatz zu CML noch die Gruppe der Kohlenwasserstoffe berücksichtigt. Bei den Ergebnissen gibt es jedoch kaum Abweichungen (siehe Abbildung 24). Das negative Ergebnis für die Hochofen-Route wurde in Kapitel 6.2.1 näher untersucht.

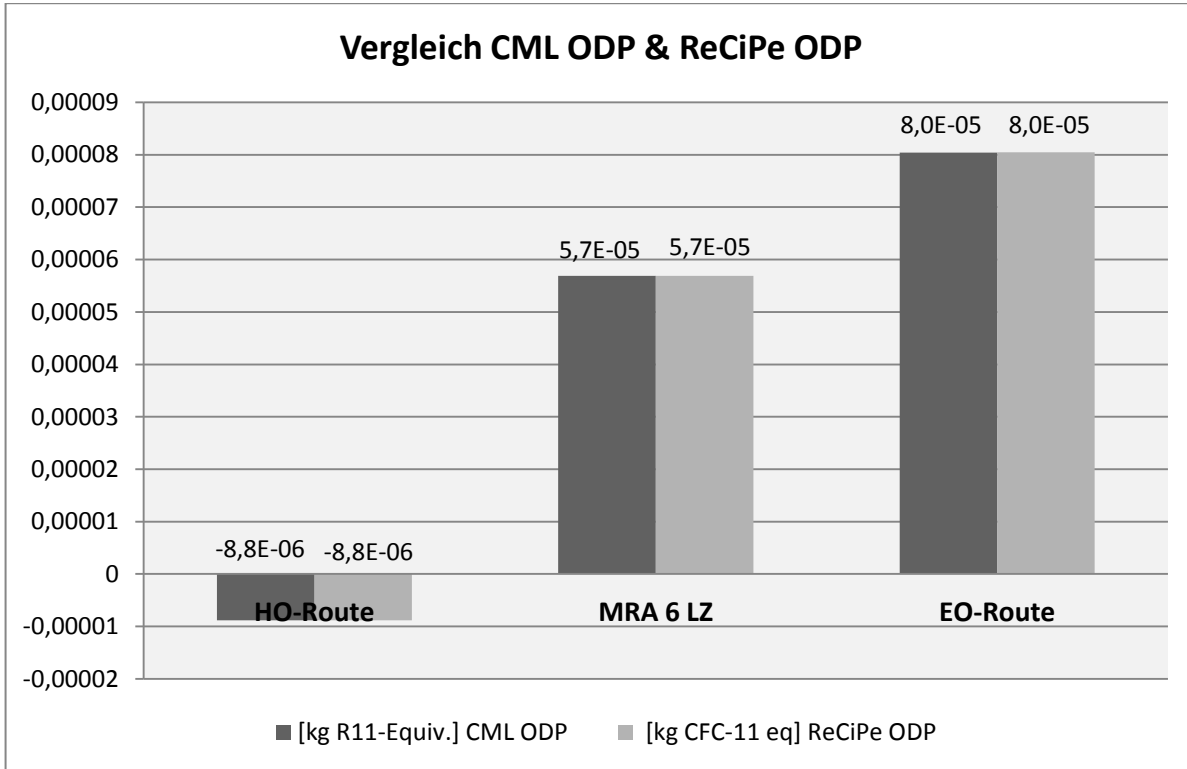


Abbildung 24: Vergleich der Ozonabbaupotentiale nach CML und ReCiPe

Für das photochemische Oxidantienbildungspotential gehen die beiden Methoden erneut von unterschiedlichen Bezugsgrößen aus³⁵, jedoch liegen weitestgehend dieselben Stoffflüsse zugrunde. Aufgrund der unterschiedlichen Bezugsgröße unterscheidet sich sowohl die Gewichtung für die einzelnen Stoffflüsse, als auch die Ergebnisse (siehe Tabelle 9). Absolut gesehen sind die Ergebnisse nach CML und ReCiPe auch hier nicht vergleichbar.

Tabelle 9: Ergebnisse POCP bzw. POF nach CML und ReCiPe

	[kg Ethan-Äqv.]	[kg NMVOC]
	CML POCP	ReCiPe POF
HO-Route	1	4
MRA 6 LZ	0,4	2

*Die untenstehenden Ergebnisse sind aufgrund der unterschiedlichen Bezugsgröße nicht vergleichbar. Die Darstellung dient lediglich der Veranschaulichung der Unterschiede.

³⁵ Die CML-Methodik bezieht sich auf kg Ethen-Äqv., während ReCiPe als Bezugsgröße kg NMVOC annimmt.

EO-Route	0,2	1
----------	-----	---

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass beide Methoden für die Wirkungskategorien, in denen von derselben Bezugsgröße ausgegangen wird, zu nahezu übereinstimmenden Ergebnissen kommen. Für die Kategorien Eutrophierung und das photochemische Oxidantienbildungspotential ist ein Vergleich aufgrund der verschiedenen Bezugsgrößen nicht ohne weiteres möglich. Eine zukünftige Harmonisierung der verschiedenen Methoden scheint hier sinnvoll.

Im Rahmen der kritischen Prüfung wurde angeregt die Auswirkungen der Partikelemissionen auf die menschliche Gesundheit nach ReCiPe in der Sensitivitätsanalyse zu untersuchen. Quantitative Gesamtergebnisse werden aufgrund der Unsicherheiten der Sachbilanzdaten³⁶ und der Charakterisierungsfaktoren, die stark von der Region abhängen und eine Variabilität im Bereich von Faktor 100 aufweisen können, nicht betrachtet [ILCD Handbook 2010].

Auf Basis der vorhandenen Daten und unter Berücksichtigung der genannten Unsicherheiten ergibt die Wirkungsabschätzung der Partikelmissionen nach ReCiPe für die Primärdaten einen geringen direkten Anteil für die HO-Route und die EO-Route von ca. je 8 Prozent.

6.3. VOLLSTÄNDIGKEITS- & KONSISTENZPRÜFUNG

Für die vorliegende Ökobilanz wurden Daten zu allen für die Stahlherstellung und das Stahlrecycling relevanten Prozessschritten erhoben. Alle gemäß der Primärdaten enthaltenen Stoffströme wurden unter Berücksichtigung der definierten Abschneidekriterien berücksichtigt. Nach Herstellerangaben bestehen keine für die betrachteten Wirkungskategorien relevanten Datenlücken. Die Materialströme wurden vollständig erfasst und über die beschriebenen Prozessschritte verfolgt. Für die Hochofen-Route als auch für die Elektroofen-Route ist die Datenlage als gut zu betrachten, da sie sich auf Primärdaten der jeweiligen Stahlhersteller stützt. Alle Daten wurden bis zur Ressource modelliert und es wurden keine relevanten Basisprozessdaten abgeschnitten. Die Repräsentativität der Da-

³⁶ Im Bezug auf die verwendeten Sekundärdaten, für die keine Nachprüfung der Messverfahren und Summenparameter möglich ist.

ten wurde anhand von GaBi-Datenbank-Prozessen und in Rücksprache mit Stahlexperten bestätigt.

Die zugrunde liegenden Daten zur Energieerzeugung entstammen der Datenbank der GaBi-Bilanzierungssoftware. Sie bilden den repräsentativen Stand der Technik unter Berücksichtigung der geografischen und zeitlichen Lage ab.

Die Konsistenz der eingesetzten Daten wird durch die zugrunde liegende Vorgehensweise sowie die Verwendung von vorrangig primären Daten sichergestellt, siehe auch Kapitel 3.3. Darüber hinaus stellt die ausführliche Ergebnisanalyse sicher, dass im Prozessgerüst keine Fehler bei ergebnisrelevanten Prozessschritten vorliegen.

6.4. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND ZUSAMMENFASSUNG

Die Ergebnisse der Hochofen- und der Elektroofen-Route werden für alle Wirkungskategorien durch die Anwendung des Multi-Recycling-Ansatzes relativiert. Es erfolgt eine Lebenswegbetrachtung, die sowohl die primäre Produktion als auch die sekundäre Produktion berücksichtigt und zu einem einheitlichen Umweltprofil für Stahl führt. Es wurde sich vor allem an den realen Umständen orientiert, die besagen, dass es den reinen Primärstahl oder Sekundärstahl in der Form nicht gibt und schon deshalb eine gemeinsame Betrachtung der HO- und der EO-Route nicht nur sinnvoll sondern auch notwendig erscheint. In allen Fällen bildet der Multi-Recycling-Ansatz einen guten Mittelwert zwischen den Rein-Ergebnissen der Hochofen-Route und der Elektroofen-Route ab. Dies entspricht insofern auch der realen Situation von Stahl, da sich Stahl aufgrund seiner physikalisch-chemischen Eigenschaften praktisch unendlich recyceln lässt. Die entwickelte Methode des Multi-Recycling-Ansatzes korrigiert zudem die best-case Betrachtung unter Verwendung der Elektroofen-Route und berücksichtigt die Materialherkunft über die Hochofen-Route.

Für die angenommenen Rahmenbedingungen des MRA-Ansatzes, wie auch im Rahmen der Sensitivitätsprüfung gezeigt wurde (siehe z.B. Abbildung 20), wird zudem ein mittlerer Wert über die Lebenszyklen abgebildet. Es findet also weder eine Unterschätzung noch eine Überschätzung der Umweltlasten statt. Es ergeben sich folgende Ergebnisse für die signifikanten Wirkungsindikatoren, auch unter Einbeziehung der Normierung, (siehe Kap. 5):

- Treibhauspotential 999 kg CO₂-Äqv.,
- Fossiler Ressourcenverbrauch 11.799 MJ,

- Versauerung 3 kg SO₂-Äqv.
- Photochemisches Oxidantienbildungspotential 0,37 kg Ethan-Äqv.

pro 1000 kg Warmbandstahl über 6 Lebenszyklen im Rahmen des MRA-Ansatzes.

Eine Anwendung der entwickelten Methode ist nur bei ganzheitlicher, materialpoolorientierter Betrachtungsweise zu empfehlen. Für spezifische Produktfälle ist es u.U. sinnvoller die Methode nach World Steel Association [WSA 2010] heranzuziehen.

Die Zielsetzung einen Richtwert für eine bestimmte Menge Stahl und bestimmten Rahmenbedingungen zu benennen, wurde erfüllt. Es ist mit der entwickelten MRA-Methode möglich ein Stahlprofil zu erstellen und einen Wert zur Orientierung auf Werkstoffebene zu bestimmen.

Für das weitere Vorgehen wird eine nähere Betrachtung des Terminus der inhärenten Eigenschaften empfohlen, auch um die getroffenen Annahmen zu untermauern. Weiter kann ein Ziel die detailliertere Betrachtung von bestimmten Produktfällen sein, vor allem im Hinblick auf den Lebensweg.

7. REFERENZEN

- [Ameling/Endemann 2007] Ameling, Dieter und Endemann, Gerhard (2008), Ressourceneffizienz: Gute Argumente für Stahl, *Stahl und Eisen*, 127(8), S. 1-9
- [Berger/Finkbeiner 2011] Berger, Markus & Finkbeiner, Matthias 2011, Correlation analysis of life cycle impact assessment indicators measuring resource use, *International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 16, No. 1, S. 74-81
- [CML 2010] CML-IA Characterisation Factors 2010, Universiteit Leiden, [<http://cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html>], Zugriff: 22.03.2012
- [Dahlmann et al. 2012] Dahlmann, Peter et al. 2012, Zur Bedeutung der Stahlwerksschlacke als Sekundärbaustoff und Rohstoffpotential, *Recycling und Rohstoffe*, Band 5, S. 785- 796
- [Daigo et al. 2007] Daigo, Ichiro 2007, Accounting for steel stock in Japan, *ISIJ International*, 47(7), S. 1065-1069
- [Ehrenberg 2006] Ehrenberg, A. (2006). Hüttensand - Ein leistungsfähiger Baustoff mit Tradition und Zukunft. *Beton-Informationen*, 4, S. 35-63
- [Ekvall/Tillman 1997] Ekvall, Tomas & Tillman, Anne-Marie 1997, Open-loop recycling: Criteria for allocation procedures, *International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 2, No. 3, S. 155-162
- [Frischknecht 2010] Frischknecht, Rolf 2010, LCI modelling approaches applied on recycling of material in view of environmental sustainability, risk perception and eco-efficiency, *International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 15, No. 7, S. 666-671
- [GaBi 4.4] Ökobilanz-Software und Datenbank GaBi 4.4, PE International, (<http://www.gabi-software.com>), Zugriff: 12.03.12
- [Goedkoop et al. 2009] Goedkoop, Mark et al. 2009, ReCiPe 2008 - A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level, first edition, Januar 2009, Niederlande
- [Guinée et al. 2004] Guinée, Jeroen B. et al. 2004, Economic allocation: Examples and derived decision tree, *International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 9, No. 1, S. 23-33

- [ILCD Handbook 2010] ILCD Handbook - Analysis of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment, European Commission (JRC), Institute for Environment and Sustainability, 2010
- [ISO 14040] ISO 14040 2006, Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen, November 2009
- [ISO 14044] ISO 14044 2006, Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen, Oktober 2006
- [Kim et al. 1997] Kim, Seungdo et al. 1997, Allocation for Cascade Recycling System, *International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 2, No. 4, S. 217-222
- [Kupfer 2005] T. Kupfer, (2005). Prognose von Umweltauswirkungen bei der Entwicklung chemischer Anlagen, Dissertation, Universität Stuttgart
- [Rosenbaum et al. 2008] Rosenbaum, Ralph K. 2008, USEtox - the UNEP SETAC toxicity model: recommended characterization factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment, *International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 13, No. 7, S. 532-546
- [Stahlfibel 2007] Degner, Michael et al. 2007, Stahlfibel, Stahlinstitut VDEh (Hrsg.), Düsseldorf: Verlag Stahleisen GmbH
- [Stahlinfo 2010] Stahl Informations-Zentrum 2010, Stahl Recycling - Die Wege zum Stahl, [<http://stahl-info.de/Stahl-Recycling/stahlrecycling.asp>], Zugriff: 15.03.2012
- [Stubbe et al. 2008] Stubbe, Gerald et al. (2008), Schließung von Stoffkreisläufen beim Einsatz von verzinktem Schrott im Oxygenstahlwerk, *Stahl und Eisen*, 128(2), S. 55-60
- [ThyssenKrupp 2009] ThyssenKrupp. (2009). Werke und Produktionsanlagen - Die Anlagenwelt von ThyssenKrupp Steel. Duisburg: ThyssenKrupp Steel AG.
- [Verein deutscher Zementwerke 2008] Verein deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.) 2008, CEM II- und CEM III/A-Zemente im Betonbau - Nachhaltige Lösungen für das Bauen mit Beton, Verlag Bau+Technik GmbH, Düsseldorf
- [Vigon et al. 1993] Vigon, Bruce W. et al. 1993, Life-Cycle Assessment: Inventory Guidelines and Principles, EPA/600/R-92/245, Cincinnati, Ohio
- [Werner 1999] Werner, Frank 1999, Economic Allocation in LCA, A Case Study About Aluminium Window Frames, *Proceedings of the Recovery, Recycling, Reintegration 1999*, Genf, S. 272 - 277.
- [WSA 2010] World Steel Association, Life Cycle Inventory Study for Steel Products, October 2010

ANHANG

A. BERICHT ZUR KRITISCHEN PRÜFUNG

ÖKOBILANZ NACH ISO 14040/44 FÜR DAS MULTIRECYCLING VON STAHL

Schlussbericht zur kritischen Prüfung

von

**Walter Klöpffer
Frankfurt am Main**

**Matthias Buchert
Darmstadt**

und

**Ralph K. Rosenbaum
Kopenhagen**

an das

**Stahlinstitut VDEh und die Wirtschaftsvereinigung Stahl (im Folgenden Stahl-Zentrum)
Düsseldorf**

Juni 2012

1 Einleitung

Die zu prüfende Ökobilanz (LCA) wurde im Department Environmental Technology, Chair of Sustainable Engineering an der Technischen Universität Berlin („Ersteller“) im Rahmen des Projekts

**Ökobilanz
nach ISO 14040/44
für das Multirecycling von Stahl**

für das Stahl-Zentrum Düsseldorf („Auftraggeber“) durchgeführt.

Die Ökobilanz erhebt den Anspruch, in Übereinstimmung mit den internationalen Normen ISO EN 14040 und 14044 (2006) [1,2] erstellt worden zu sein. Die kritische Prüfung nach denselben Normen ermittelt inwieweit dieser hohe Anspruch gerechtfertigt ist.

Der hier vorliegende Schlussbericht zur kritischen Prüfung ist Bestandteil des Schlussberichts des Erstellers an den Auftraggeber. Ersteller und Auftraggeber haben nach der Norm ISO EN 14040/44 das Recht, schriftliche Kommentare zur kritischen Prüfung abzugeben, die dann ebenfalls Bestandteil des Berichts sind.

2 Veranlassung und Ablauf des kritischen Gutachtens

Ökobilanzen nach den internationalen Normen [1,2] welche vergleichende Aussagen enthalten, die der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden sollen, müssen einem kritischen Gutachten nach ISO 14040 Abschn. 7.3.3 bzw. 14044 Abschn. 6.3 (Panelmethode) unterzogen werden. Vergleichende Aussagen im Sinne der Norm sind von der Art: "Produkt A ist unter Umweltgesichtspunkten vorteilhafter als oder gleich gut wie Produkt B". Solche Aussagen sind im vorliegenden Projekt streng genommen nicht auszumachen, doch stellt die Analyse der Auswirkungen eines „deutschen“ Lebenszyklus der Stahlproduktion höchste Anforderungen an die Durchführung der Ökobilanz. Vergleichend ist in dieser Studie die Gegenüberstellung der Hochofenroute (Eisenerz – Roheisen – Stahl – Warmband) mit der Elektroofenroute (Stahlschrott – Elektroofen – Warmband) und dem Verbund der beiden grundlegenden Stahlherstellungsverfahren im sog. Multi-Recycling-Ansatz (MRA), der die beiden Verfahren zu einem System verbindet. Inwieweit dieses System real oder virtuell ist, war Gegenstand einer detaillierten Debatte.

Die vorliegende kritische Prüfung ist als eine begleitende (interaktive) einzustufen, wie erstmals von SETAC vorgeschlagen [3]. Da die internationalen Normen [1,2] offen lassen, ob das kritische Gutachten begleitend oder a posteriori durchgeführt wird, sind beide Ausführungsformen in Übereinstimmung mit der Norm. Die Variante „begleitend/interaktiv“ hat jedoch eindeutige Vorteile in Hinblick auf die beratende Einflussnahme durch den Gutachterkreis schon während der Durchführung der Ökobilanz [4,5]. Es ist positiv hervorzuheben, dass der Auftraggeber durch die Kombination Panelmethode („kritische Prüfung durch interessierte Kreise“) mit interaktiver Durchführung die beste, aber auch aufwendigste kritische Prüfung in Auftrag gab.

Die kritische Prüfung begann mit einer Telefonkonferenz am 23. Februar 2012. Es lag ein Entwurf zu „Ziel und Untersuchungsrahmen“ (Goal & Scope) der Ökobilanz vor. Diese wichtige Komponente der Ökobilanz legt fest, welche speziellen Regeln – im Rahmen der Normen [1,2] – in einer speziellen Studie zu gelten haben. Wichtig erscheint, dass die nunmehr ökobilanziell ausgearbeitete Studie auf einer 2011 vom Ersteller durchgeführten Studie „Modell für Koppelprodukte und Sekundärrohstoffe zur Ökobilanzierung von Stahl“ beruht, in der der Multi-Recycling-Ansatz konzipiert wurde. Dadurch konnte die eigentliche Ökobilanz relativ zügig erstellt werden.

Der erste Entwurf des Abschlussberichts lag bereits am 18. April 2012 vor und diente der Kommentierung durch die Gutachter im Vorfeld des Projekttreffens am 11. Mai 2012 im Stahl-Zentrum Düsseldorf. Kurzfristig vor dem Treffen wurde den Gutachtern der zweite Entwurf des Abschlussberichts vom 10.05.2012 übermittelt.

Das Treffen führte in intensiver Diskussion zu zahlreichen weiteren Verbesserungsvorschlägen, die in den revidierten Entwurf mit den während des Meetings und danach eingefügten Änderungen einfließen. Dieser Prüfbericht basiert auf dem revidierten 2. Entwurf vom 23. Mai 2012 mit kenntlich gemachten Änderungen.

Das vorliegende Gutachten beruht auf Konsens unter den drei Gutachtern. Es wurde vorab als Entwurf an Auftraggeber und Ersteller zur Kommentierung verschickt.

3 Normen und Prüfkriterien

Der Prüfung wurden die internationalen Normen ISO EN 14040 (2006) [1] und 14044 (2006) [2] zu Grunde gelegt.

Geprüft wurde nach den in der LCA-Rahmennorm 14040 [1] vorgegebenen Kriterien, ob

- *"die bei der Durchführung der Ökobilanz angewendeten Methoden mit dieser Internationalen Norm übereinstimmen;*
- *die bei der Durchführung der Ökobilanz angewendeten Methoden wissenschaftlich begründet sind und dem Stand der Ökobilanz-Technik entsprechen;*
- *die verwendeten Daten in Bezug auf das Ziel der Studie hinreichend und zweckmäßig sind;*
- *die Auswertungen die erkannten Einschränkungen und das Ziel der Ökobilanz berücksichtigen;*
- *der Bericht transparent und in sich stimmig ist".*

Außerdem wurde das der Untersuchung zu Grunde liegende System einschließlich der gewählten Systemgrenzen kritisch hinterfragt (4.1).

4 Ergebnisse der kritischen Prüfung

4.1 Allgemeiner Eindruck und Diskussion des untersuchten Systems

Die untersuchte Ökobilanz-Studie macht insgesamt einen positiven Eindruck auf die Gutachter. Besonders hervorzuheben ist die Verwendung von Originaldaten im gesamten Vordergrundsystem, das die Produktion und das Recycling von Stahl in Deutschland umfasst. Auch die Wahl von 6 Recyclingzyklen für die Berechnungen ist durch die verfügbaren Daten gut gedeckt und findet die volle Zustimmung der Gutachter. Die Zusammenfassung von Produktion in Deutschland (Hochofen- und Elektroofen Route) mit dem Recycling von Schrott zum „Multi-Recycling-Ansatz“ (MRA) führt allerdings zu einem künstlichen („virtuellen“) System, das nur ein Ausschnitt aus dem Gesamtsystem „Stahl in Deutschland“ sein kann. Das Gesamtsystem wird durch den Welthandel von Stahl und Stahlprodukten (Exporte sowohl wie Importe) geprägt. In Deutschland lokalisierbar sind die der Studie zugrunde liegenden Produktionsanlagen nach den beiden Routen (HO und EO), sowie der Transport von Stahlschrott zu den Elektroöfen. Die Herkunft des Schrotts diversifiziert sich durch den immer stärker verflochtenen Welthandel über die Importe von Stahl und Stahlprodukten zunehmend in Richtung der entsprechenden Exportländer (z.B.. China, ca. 50% der Weltproduktion von Stahl). Dennoch handelt es sich beim MRA um einen interessanten Ansatz, dessen Grenzen in Abschnitt 4.2 diskutiert werden.

4.2 Stellungnahme zu den Kriterien in Kap. 3

4.2.1 Übereinstimmung mit der Norm

Ziel und Untersuchungsrahmen der Studie sind vollständig und entsprechend der Anforderungen nach ISO 14040/14044 dokumentiert und wurden für alle Ökobilanzierungsphasen umgesetzt. Die Methoden und Annahmen bezüglich der Modellierung des MRA, der Wirkungsanalyse und der Interpretation stehen im Einklang mit den ISO-Normen.

4.2.2 Wissenschaftliche Begründung der Methodik und Stand der Technik

Für die Modellierung des Systems wurde mit GaBi 4.4 eine etablierte Software und dem Stand der Technik entsprechende Anwendung benutzt.

Seitens der Wirkungsanalyse wurde mit der CML Methode eine dem Stand der Technik entsprechende Midpoint-basierte, wissenschaftlich begründete und etablierte Charakterisierungsmethode benutzt. Eine Sensitivitätsanalyse bezüglich des Einflusses der Wahl der Methode mit der alternativen ReCiPe-Methode wurde durchgeführt und ergab keinen wesentlichen Einfluss auf die Resultate. Von der Möglichkeit der Normierung der Ergebnisse wurde Gebrauch gemacht, während von Gewichtung aufgrund der inhärenten Subjektivität abgesehen wurde. Damit sind die Anforderungen der relevanten ISO-Normen für diese Phase der Ökobilanz erfüllt.

4.2.3 Daten

Besonders hervorzuheben ist an dieser Stelle die präzise Parametrisierung des Vordergrundsystems mit Primärdaten von deutschen Standorten. Die Benutzung der entsprechenden GaBi 4.4 Datenbanken für die Quantifizierung des Hintergrundsystems ist sinnvoll und angemessen.

Die verwendeten Daten sind im Bericht gut dokumentiert und in Bezug auf das Ziel der Studie hinreichend und zweckmäßig.

4.2.4 Berücksichtigung der Einschränkungen in der Auswertung

Die Auswertung steht nicht im Widerspruch zu den gemachten Einschränkungen (siehe Kap. 3.8) und erfüllt die Ziele der Ökobilanz (Kap. 2).

4.2.5 Transparenz

Die Struktur des Berichtes folgt im Wesentlichen der Struktur und den Anforderungen der Normen ISO 14040/14044. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgte in verständlicher Form und bereitete bei der Begutachtung keine Schwierigkeiten. Die graphische Darstellung von Resultaten ist von guter Qualität. Die in der Sachbilanz verwendeten Datensätze wurden beschrieben und ihre Herkunft angegeben, aber aus Geheimhaltungsgründen nicht abgedruckt.

5 Fazit

Insgesamt kann festgestellt werden, dass diese Studie nach den internationalen Normen ISO 14040 und 14044 (2006) durchgeführt wurde.

Die angewandten Methoden sind wissenschaftlich begründet und entsprechen dem gültigen Stand der Technik.

Die verwendeten Daten sind in Bezug auf das Ziel der Studie hinreichend und zweckmäßig.

Die Auswertungen berücksichtigen die erkannten Einschränkungen und das Ziel der Ökobilanz und entsprechen damit der Norm.

Der Bericht ist transparent und in sich stimmig.

Aus Sicht des Gutachterpanels ist positiv hervorzuheben, dass die Verfasser sehr sorgfältig und umfassend auf die Vorschläge und Kritikpunkte eingegangen sind.

Dem Auftraggeber sei empfohlen, den Bericht zu veröffentlichen (z.B. auf einer Webseite) und ggf. eine Kurzfassung in einem Fachjournal.

Literatur:

[1] ISO 14040: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen. Deutsche und Englische Fassung ISO EN 14040, Genf Oktober 2006

[2] ISO 14044: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen. Deutsche und Englische Fassung ISO EN 14044, Genf Oktober 2006

[3] SETAC (1993): Society of Environmental Toxicology and Chemistry: Guidelines for Life-Cycle Assessment: A "Code of Practice". From the SETAC Workshop held at Sesimbra, Portugal, 31 March - 3 April 1993. Edition 1, Brussels and Pensacola (Florida), August 1993

[4] Klöpffer, W. (2005): The Critical Review Process According to ISO 14040-43: An Analysis of the Standards and Experiences Gained in their Application. Int. J. Life Cycle Assess. 10 (2) 98-102

[5] Klöpffer, W. (2012): The critical review of life cycle assessment studies according to ISO 14040 and 14044: origin, purpose and practical performance. Int. J. Life Cycle Assess. 17 (published online first DOI: 10.1007/s11367-012-0426-7)

Frankfurt am Main, am 18.06.2012



.....

Prof. Dr. Walter Klöpffer
für den Gutachterkreis

Adressen der Gutachter:

Prof. Dr. Walter Klöpffer
Editor-in-chief, Int. Journal of
Life Cycle Assessment
LCA CONSULT & REVIEW
Am Dachsberg 56E
D-60435 Frankfurt am Main

Tel.: (+49-(0)69) 54 80 19 35
E-Mail: walter.kloepffer@t-online.de

Prof. Dr. Ralph K. Rosenbaum
QUESAconsult
Kenny Drews Vej 83 – 3 th
DK-2450 Kopenhagen

Tel.: +45 5267 7685
ralph.rosenbaum@gmx.de

Dr. Matthias Buchert
Leiter Bereich Infrastruktur & Unternehmen



Öko-Institut e.V.
Rheinstrasse 95
D-64295 Darmstadt

Tel.: (+49 (0) 6151) 8191-47
mobil: 0170-562-6399
Fax: 06151-8191-33
m.buchert@oeko.de

B. BEGRIFFSERKLÄRUNGEN

a. HOCHOFEN-ROUTE

Das Endprodukt der Hochofenroute ist Stahl, sofern der Prozess des Warmwalzens inkludiert ist. Dazu wird zunächst im Hochofen flüssiges Roheisen erzeugt, welches im nachfolgenden Prozessschritt - dem Sauerstoffblaskonverter - zu Rohstahl umgewandelt wird. Der eingesetzte Ausgangsrohstoff ist Eisenerz. Dieses wird im Hochofen-Prozess mit Hilfe von Koks als Reduktionsmittel und Ersatzreduktionsmittel wie Kohle zu Roheisen reduziert. Durch den Schmelzvorgang werden die Nichteisenbestandteile vom gebildeten Roheisen getrennt. Die Schlacke schwimmt auf dem spezifisch schwereren Roheisen. Das Roheisen wird in bestimmten Zeitabständen abgestochen.

Zusammen mit festem Stahlschrott (zur Kühlung) wird das abgestochene flüssige Roheisen im Konverter unter Einblasen von Sauerstoff zu Stahl umgewandelt. Hierzu werden im Konverter-Prozess der hohe Kohlenstoffgehalt des Roheisens und der Phosphorgehalt durch Oxidation vermindert. Dieser Prozess wird „Frischen“ genannt. Gleichzeitig werden unerwünschte Begleitelemente wie Silicium oder Mangan verringert. Gewünschte Legierungselemente werden anschließend in der Sekundärmetallurgie zugegeben, um die gewollte Stahlqualität einzustellen. Anschließend kann der flüssige Rohstahl im Strangussverfahren vergossen und in nachfolgenden Prozessschritten weiterbearbeitet werden [Stahlfibel 2007].

i. WARBAND

Der auf die Produktion von Rohstahl zur Weiterverarbeitung folgende Prozessschritt ist das Warmwalzen. Das erfolgt auf Warmbandstraßen, die Bänder mit kontinuierlichen Dicken von 1,2 bis 20 mm erzeugen. Der Stahl wird in der Walzstraße von mindestens zwei parallel liegenden, sich in entgegengesetzter Richtung drehenden Walzen durch hohe Druckkräfte in Längsrichtung gewalzt [Stahlfibel 2007]. Dazu werden die Brammen im Ofen vorgewärmt und anschließend auf Rollengestellen, die die mit den Walzen bestückt sind, gewalzt (siehe Abbildung 25). Danach wird das Band laminar abgekühlt und zu Coils aufgerollt.

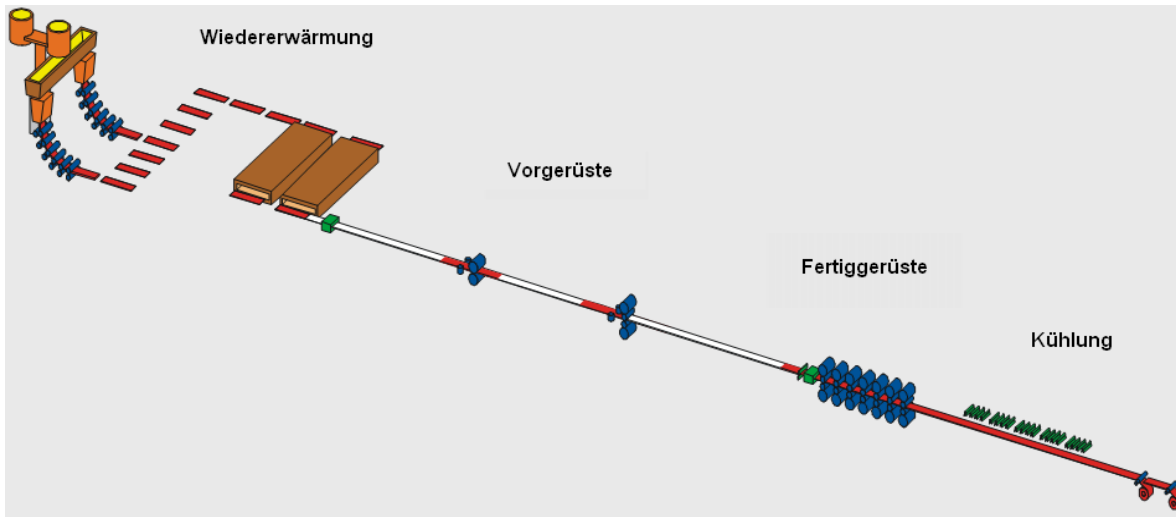


Abbildung 25: Schema Warmwalzen von Stahl

Beim Warmwalzen liegt die Walztemperatur oberhalb der Rekristallisationstemperatur. Folglich wird der Rohling bei hohen Temperaturen durch plastische Verformung verformt [Stahlfibel 2007].

Warmband kann durch weitere Umformverfahren, wie z.B. das Kaltumformen, und/oder durch eine Oberflächenveredelung zu einer Vielzahl von Fertigerzeugnissen verarbeitet werden. Zu diesen Fertigerzeugnissen zählen oberflächenveredelte³⁷ Bleche und Bänder, Fein- und Feinstbleche, Großrohre und Hohlprofile, die dann für Stahl-Endprodukte verwendet werden.

ii. FEUERVERZINKTER STAHL

Das Feuerverzinken ist ein wichtiges Verfahren zum metallischen Korrosionsschutz von Stahlerzeugnissen. Das feuerverzinkte Blech entsteht beispielsweise aus der Weiterverarbeitung des Warmbandes durch die Oberflächenveredelung in einem Zinkbad. Hierbei wird das Stahlband durch ein Zinkbad von ca. 450°C geführt. Das unedlere Zink bildet auf dem Stahl eine schützende Deckschicht. Bei Undichtigkeiten der Deckschicht wird zuerst das unedlere Metall korrodiert. Somit wird das Stahlerzeugnis in doppelter Weise geschützt. Die Schichtdicken von Zink betragen zwischen 5 und 50 µm.

Charakteristisch für feuerverzinkten Stahl ist sein hoher Korrosionswiderstand, sowie gute Schweißbarkeit und Umformbarkeit [Stahlfibel 2007].

³⁷ Z.B. verzinkte, alumierte, bandbeschichtete.

b. ELEKTROOFEN-ROUTE

Das Elektrostahlverfahren ist für Stahlsorten aller Legierungen geeignet.

Im Gegensatz zur Hochofenroute wird beim Elektrostahlverfahren i.d.R. 100 % Stahlschrott als Einsatzstoff gewählt. Alternativ kann z.B. auch Eisenschwamm (auch bezeichnet als Direct Reduced Iron (DRI)) anstelle von Schrott als Einsatzstoff verwendet werden. Der Eisenschwamm entsteht durch das Verfahren der „Direktreduktion“ im Schachtofen, welches Eisenerze im festen Zustand zu Eisen reduziert.

Zuschläge wie Kalk oder Fluorapat und Legierungselemente werden hinzugefügt. Die notwendige Wärme- und Einschmelzenergie wird in diesem Verfahren hauptsächlich durch elektrischen Strom mit Hilfe eines Lichtbogens erzeugt. Eine Graphitelektrode leitet den elektrischen Strom über einen Lichtbogen durch den metallischen Einsatz (Schrott) zur Bodenanode. Im Frischprozess werden Verunreinigungen wie Phosphor und nichtmetallische Verbindungen entfernt. In der anschließenden Sekundärmetallurgie erfolgt eine Pfannenbehandlung, die Stahlgüten mit hoher Qualität erzeugt. Verschiedene Verfahren wie z.B. Vakuumbehandlung oder Sonderschmelzverfahren können hier angewendet werden. Anschließend wird der Rohstahl durch das Stranggussverfahren in Form gebracht [Stahlfibel 2007].

C. SEKUNDÄRDATEN

Tabelle 10: verwendete Sekundärdaten

<i>HO-Route</i>	<i>EO-Route</i>
DE: Natural Gas Mix	DE: Aluminum mix
DE: Hard Coal Mix	DE: Hard coal mix
DE: Potable water from groundwater	DE: Silicon mix (99%)
DE: Coke mix	DE: Sand
DE: Siliceous sand	DE: Lime (CaO; finelime)
DE: Lime (CaO; quicklime lumpy)	DE: Lime (CaO; quicklime lumpy)
DE: Limestone flour (CaCO ₃ ; dried)	DE: Limestone, gravel
GLO: iron ore, 65% Fe	DE: Limestone (CaCO ₃ ; washed)
GLO: pellets, iron	RER: calcium carbide
DE: Nitrogen	RER: molybdenum
DE: Oxygen	DE: Natural gas mix
RER: dolomite	GLO: tantalum
DE: Ferro silicon mix	ZA: Ferro chrome
ZA: Ferro manganese	ZA: Ferro manganese
GLO: Compressed air	ZA: Manganese
DE: Power grid mix (invers)	JP: Titanium
DE: Sulphur (invers)	RER: feldspar
DE: tar (invers)	GLO: lithium manganese oxide
DE: Benzene mix (invers)	RER: magnesium
DE: Lime (CaO; finelime, invers)	DE: Power grid mix
DE: Gravel (invers)	DE: Gravel (invers)
DE: Ready-mix concrete (invers)	