

Bewertung zukünftiger Biomasse-Nutzung in der Stahlindustrie

**Die Rolle der Biomasse in der Transformation der
Stahlindustrie & Quantifizierung möglicher Biomasse-
Stoffströme**

SCI4climate.NRW steht für die wissenschaftliche Begleitung der Industrietransformation. Das Ministerium für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (MWIKE) hat Ende 2022 das Wuppertal Institut, das Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, das Institut der deutschen Wirtschaft, die VDZ Technology gGmbH und die VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH (BFI) beauftragt, Transformationspfade für den klimaneutralen Umbau der Industrie in Deutschland zu erforschen. Nordrhein-Westfalen dient dabei als Modellregion. Die Forschung baut auf den Ergebnissen des Vorgängerprojekts SCI4climate.NRW 2018-2022 auf. Die Institute stehen in engem Austausch miteinander und mit Industrie und Politik in der Initiative IN4climate.NRW.



Bibliographische Angaben

Herausgeber:	SCI4climate.NRW
Veröffentlicht:	19. November 2025
Autoren:	Gerald Stubbe, Valdet Sadiku
Kontakt:	gerald.stubbe@bfi.de, valdet.sadiku@bfi.de
Bitte zitieren als:	Stubbe, G.; Sadiku, V. (2025): Bewertung zukünftiger Biomasse-Nutzung in der Stahlindustrie - Die Rolle der Biomasse in der Transformation der Stahlindustrie & Quantifizierung möglicher Biomasse-Stoffströme. Ein Bericht von SCI4climate.NRW.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis	6
1 Einleitung – Transformation der Stahlindustrie	7
2 Nutzung von festem Kohlenstoff nach Transformation der Eisen- und Stahlerzeugung	8
3 Biomasse als nachhaltige Kohlenstoffquelle für die transformierte Stahlindustrie	10
3.1 Biomassearten und Biomasse-Aufbereitungsverfahren	10
3.2 Limitierende Elemente / Komponenten beim Einsatz in metallurgischen Prozessen	11
3.3 Aufbereitungsoptionen für den Bio-Kohlenstoff	12
3.4 Einstellung einer geeigneten Einsatzform für den Bio-Kohlenstoff	13
3.5 Fazit: Bevorzugte Biomasse- bzw. Bio-Kohlenstoff-Arten zum Einsatz in der transformierten Stahlindustrie	13
4 Quantifizierung des zukünftigen Kohlenstoffbedarfs bzw. Biokohlenstoff-Potentials	14
Literaturverzeichnis	19

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Transformationsszenario der Stahlindustrie – Übergang von der BF-BOF-Route zur H₂-basierten DR-EAF/ESF-Route (Quelle: LowCarbonFuture-Projekt, modifiziert) 8

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Kohlenstoffnutzung in der Stahlindustrie nach Transformation in Richtung wasserstoffbasierter Direktreduktion mit Potential zur Bio-Kohlenstoff-Nutzung, Daten nach	9
Tabelle 2:	Rohstahl-Produktionsdaten (unlegiert / niedriglegiert) von Gesamt-Deutschland sowie NRW für das Referenzjahr 2019 – gegliedert nach Oxygenstahl und Elektro Stahl	14
Tabelle 3:	Quantifizierung des „unvermeidbaren“ Kohlenstoffbedarfs bzw. Bio-Kohlenstoff-Potentials bei der Erzeugung von unlegiertem oder niedriglegiertem Stahl für Deutschland bzw. NRW (Szenario 2040).....	16
Tabelle 4:	Abschätzung des potentiellen Primär-Biomassebedarfs (Holz/Restholz) bei der Erzeugung unlegierter sowie niedriglegierter Stähle in Deutschland bzw. NRW - für stofflich unvermeidbaren Kohlenstoffeinsatz	17

Abkürzungsverzeichnis

BF	Blast Furnace (Hochofen)
BOF	Basic Oxygen Furnace (Konverter)
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Usage
DRI	Direct Reduced Iron (direkt reduziertes Eisen; Eisenschwamm)
EAF	Electric Arc Furnace (Elektrolichtbogenofen)
ESF	Electric Smelting Furnace (Elektr. Einschmelzer)
HTC	Hydrothermale Carbonisierung / carbonisierter Kohlenstoff
SAF	Submerged Arc Furnace (Elektroniederschachtofen)

1 Einleitung – Transformation der Stahlindustrie

Das Ziel der bereits angelaufenen Transformation der deutschen Stahlindustrie ist es, bis 2045 Klimaneutralität zu erreichen. Bis zu diesem Zeitpunkt müssen fossile CO₂-Emissionen vollständig vermieden werden.

Zur Primär-Stahlerzeugung auf Basis von Eisenerz zählt in Deutschland derzeit nahezu ausschließlich die Prozessroute Hochofen (BF – „Blast Furnace“) – Konverter (BOF – „Basic Oxygen Furnace“) mit vorgeschalteter Sinteranlage sowie Kokerei. Diese Route beruht auf fossiler Steinkohle als Energieträger und Reduktionsmittel für die Eisenerzträger. Die schrottbasierte Sekundär-Stahlerzeugung erfolgt dagegen im Elektrolichtbogenofen (EAF – „Electric Arc Furnace“). Hierbei wird kaum Reduktionsmittel benötigt, zum Einschmelzen ist elektrische Energie der Haupt-Energieträger. Während die Sekundär-Stahlerzeugung im EAF mit steigendem Anteil an „grünem“ Strom aus erneuerbaren Quellen „automatisch“ sukzessive klimaneutraler wird, bedarf es bei der Primär-Stahlerzeugung zur Erreichung der Klimaneutralität eines Technologieumbruches. In erster Linie soll bei den zukünftigen Prozessen fossiler Kohlenstoff vollständig durch klimaneutrale, alternative Reduktionsmittel oder Energieträger substituiert werden.

Die wichtigste in Deutschland und der EU diskutierte Technologie hierzu ist die Direktreduktion auf Basis von „grünem“ Wasserstoff (H₂), der durch Wasserelektrolyse aus „grünem“ Strom erzeugt wird. Bei einer Direktreduktionsanlage wird festes, direkt reduziertes Eisen (DRI – „Direct Reduced Iron“) erzeugt, welches dann unter Einsatz von elektrischer Energie im EAF oder in einem speziellen elektrischen DRI-Einschmelzer (SAF – „Submerged Arc Furnace“ oder ESF – „Electric Smelting Furnace“) aufgeschmolzen wird. Im EAF wird Rohstahl erzeugt, der über Sekundärmetallurgie und Strangguss zu Lang- oder Flachstahl weiterverarbeitet wird, während der Einschmelzer ein kohlenstoffhaltiges Roheisen produziert, welches zunächst im Konverter zu Rohstahl umgewandelt wird. **Abbildung 1** illustriert das beschriebene Transformationsszenario der Stahlindustrie. Alle deutschen integrierten Hüttenwerke planen derzeit auf diese Weise den sukzessiven Ersatz der betriebenen Hochöfen.

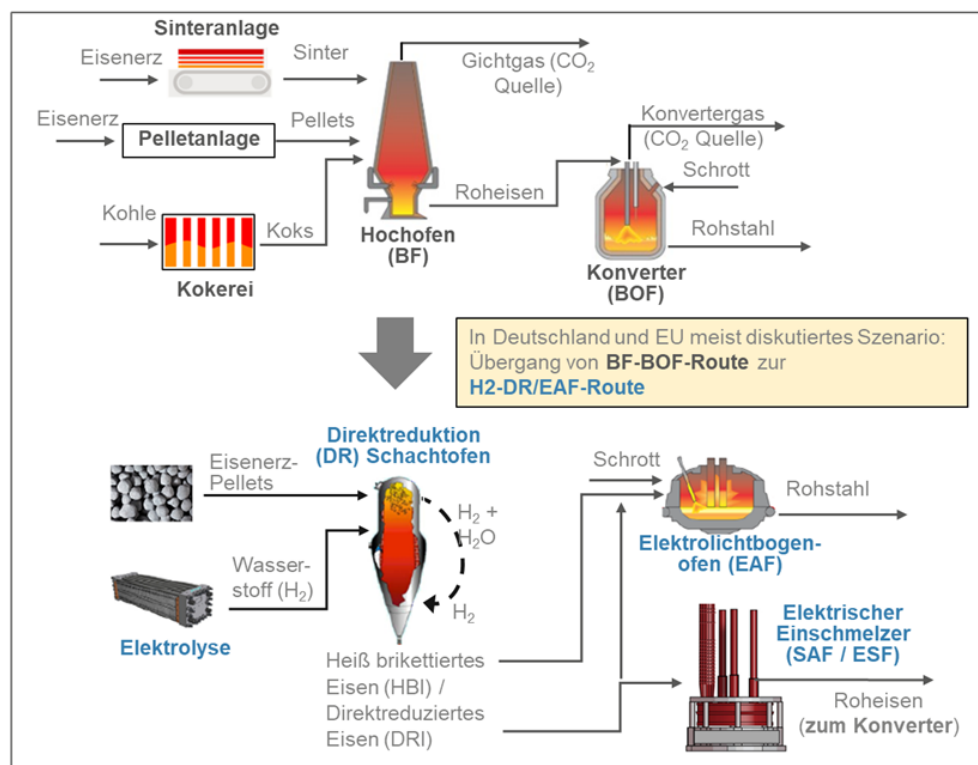


Abbildung 1: Transformationsszenario der Stahlindustrie – Übergang von der BF-BOF-Route zur H₂-basierten DR-EAF/ESF-Route (Quelle: LowCarbonFuture-Projekt, modifiziert)

Während der Transformationsphase, in der neben der neuen Direktreduktionsroute auch noch die bisherigen Prozesse existieren, besteht weiteres CO₂-Minderungspotential in verbleibenden hochofenbasierten Prozessen durch prozessintegrierte Maßnahmen. Dies beinhaltet die Verringerung des Kohlenstoffbedarfs (z.B. durch verstärkte Substitution von Eisenerz durch Schrott oder vorreduzierte Eisenträger), Maßnahmen zur Kohlenstoffabscheidung, -speicherung oder -nutzung (CCS/CCU), sowie die Substitution fossiler Kohlenstoffträger durch Kohlenstoffträger aus Biomasse (z.B. Bio-Kohlenstoff). Diese möglichen Übergangsszenarien unter Einbezug verbleibender hochofenbasierter Prozesse sind in der vorliegenden Arbeit allerdings nicht betrachtet.

2 Nutzung von festem Kohlenstoff nach Transformation der Eisen- und Stahlerzeugung

Auch nach vollständiger Transformation der Eisen- und Stahlerzeugungsprozesse in Richtung wasserstoffbasierter Direktreduktion wird jedoch immer noch eine signifikante Menge an „unvermeidbarem“, größtenteils stofflich genutztem, festem Kohlenstoff benötigt. Dies betrifft insbesondere die elektrischen Schmelzprozesse, aber auch die Sekundärmetallurgie.

Zur Abschätzung der verbleibenden Kohlenstoffströme, sowie der potentiellen Rolle der Biomasse in der Transformation der Stahlindustrie, erfolgte daher eine Bestandsaufnahme der spezifischen Einsatzmengen verschiedener Kohlenstoffträger für den Elektrolichtbogenofen (EAF), den zukünftigen elektrischen DRI-Einschmelzer (SAF, ESF) sowie die jeweils zugeordnete Sekundärmetallurgie im

Elektrostahlwerk bzw. Oxygenstahlwerk. Auf Basis von Literaturdaten wurde für die betrachteten Prozesse eine Bandbreite der möglichen Austauschrate für Bio-Kohlenstoff angegeben. Dabei wird für Bio-Kohlenstoff ein vergleichbarer Kohlenstoffgehalt wie bei fossilen Kohlenstoffträgern erwartet.

In **Tabelle 1** ist eine entsprechende Übersicht der spezifischen Kohlenstoffnutzung in der Stahlindustrie sowie die jeweils abgeschätzte Austauschrate von Bio-Kohlenstoff zusammengestellt.

Tabelle 1: Kohlenstoffnutzung in der Stahlindustrie nach Transformation in Richtung wasserstoffbasierter Direktreduktion mit Potential zur Bio-Kohlenstoff-Nutzung, Daten nach ^{1,2,3}

	Prozess	Kohlenstoff-träger (fossil)	Spezifische Einsatzmenge in kg/t Rohstahl bzw. Roheisen		Austauschrate Bio-Kohlenstoff	Einsatzform	Stoffliche Anforderungen an Kohlenstoff-träger	Option zur Kohlenstoff-Kreislauf-schließung
			min	max				
Elektrostahlwerk	Elektrolichtbogenofen (EAF)	Satzkohle	5	12	50-100 %	Grobstückig, agglomeriert	Geringer/mittlerer Anteil flüchtiger Komponenten möglich	CCU aus EAF-Prozessgas (technisch schwierig umsetzbar)***
		Einblaskohle (Schlackeschäumen)	5	10	50-100 %	Feinkörnig, pneumatisch förderbare Injektionsmischung		
		EAF-Graphitelektroden	1	3	0 %	-	-	
	Sekundärmetallurgie (Elektrostahlwerk)	Aufkohlungsmittel	1,4		50-100 %	Kleinstückig, agglomeriert	Flüchtige Komponenten weitgehend unerwünscht	CCU technisch nicht sinnvoll
DRI-Einschmelzer	DRI-Einschmelzer (SAF, ESF)	Aufkohlungs- und Reduktionsmittel	35 *	50 **	50 – 100 % (vgl. Satzkohle EAF)	Grobstückig, agglomeriert	Flüchtige Komponenten weitgehend unerwünscht	CCU aus Einschmelzer- und Konverter-Prozessgas (technisch gut umsetzbar)
		Graphit- oder Söderberg-Elektroden Einschmelzer	1		0 %	-	-	
	Sekundärmetallurgie (Oxygenstahlwerk)	Aufkohlungsmittel	0,25		50-100 %	Kleinstückig, agglomeriert	Flüchtige Komponenten weitgehend unerwünscht	CCU technisch nicht sinnvoll

* Abgeschätzt: bei Roheisen-Aufkohlung auf 3 %, zzgl. 5 kg/t zur Reduktion;

** Abgeschätzt: bei Roheisen-Aufkohlung auf 4,5 %, zzgl. 5 kg/t zur Reduktion;

*** abhängig von Art der Prozessführung

Im Elektrolichtbogenofen sind vor allem die Satz- und Einblaskohle als Kohlenstoffträger relevant, während beim DRI-Einschmelzer das eingesetzte Aufkohlungs- und Reduktionsmittel im Mittelpunkt steht. Insbesondere durch die notwendige Aufkohlung in Richtung einer Roheisen-Zusammensetzung (mit bis zu 4,5 % C) ist der spezifische Kohlenstoffbedarf im DRI-Einschmelzer in Form von Aufkohlungs- und Reduktionsmitteln mit 35-50 kg/t_{Roheisen} deutlich größer als im Elektrolichtbogenofen, bei dem der max. Kohlenstoffeinsatz in Summe etwa 22 kg/t_{Rohstahl} beträgt. In beiden Prozessrouten wird abschließend im Zuge der Sekundärmetallurgie Kohlenstoff als Aufkohlungsmittel eingesetzt, jedoch

¹ Terry Norgate et. al.: Biomass as a Source of renewable Carbon for Iron and Steelmaking. ISIJ International, Vol. 52 (2012), No. 8

² Echthof, T. Review on the Use of Alternative Carbon Sources in EAF Steelmaking. Metals 2021, 11, 222. <https://doi.org/10.3390/met11020222>

³ Sa Ge, Kamal Joubarani, Kyle Chomyn, Chris Walker, Ian Cameron, Terry Koehler: Emissions, Economics, and Risks of Electric Smelting Furnace (ESF) for Green Steel Production, Hatch Ltd, Presentation ESTAD 2023, Düsseldorf

mit jeweils etwas unterschiedlicher Einsatzmenge. Die Verwendung als (Graphit-) Elektrodenmaterial bietet kein erkennbares Potential zur Nutzung von Bio-Kohlenstoff.⁴

Zur Erzielung von klimaneutralen Prozessen besteht die Möglichkeit zum Einsatz von biogenem Kohlenstoff an Stelle von den bisher üblichen fossilen Kohlenstoffträgern. Die *Bio-Kohlenstoff-Austauschrate* für die potentiell substituierbaren Kohlenstoffträger ist in der Literatur mit 50-100 % angegeben. Die *Einsatzform des Kohlenstoffträgers* richtet sich nach dem jeweiligen Prozessschritt, bei dem entweder ein grob- oder kleinstückiges Einsatzmaterial (EAF-Satzkohle sowie Aufkohlungs- oder Reduktionsmittel im DRI-Einschmelzer) bzw. ein feinkörniges, pneumatisch förderbares Material (EAF-Einblaskohle) erforderlich ist. Beim Einsatz von Bio-Kohlenstoff wird daher in der Regel stets eine Agglomeration ggf. inkl. vorgeschalteter Aufbereitung erforderlich sein.

Auch die *stofflichen Anforderungen* an den jeweiligen Kohlenstoffträger müssen bei der Auswahl des jeweiligen (Bio)-Kohlenstoffträgers berücksichtigt werden. Bei der Satz- sowie der Einblaskohle im Elektrolichtbogenofen ist ein gewisser Anteil an flüchtigen Komponenten möglich, während diese bei allen anderen Kohlenstoffträgern weitgehend unerwünscht sind. Darüber hinausgehende Anforderungen an die chemische Zusammensetzung werden im **Kapitel 3** erläutert.

Eine Option zur *Kohlenstoff-Kreislaufschließung* besteht prinzipiell sowohl beim Elektrolichtbogenofen wie auch beim DRI-Einschmelzer durch „Carbon Capture and Usage“ (CCU) aus dem jeweiligen Prozessgas, sowie bei der DRI-Einschmelzer-Route zusätzlich aus dem Konvertergas. Beim Elektrolichtbogenofen ist dies – abhängig von der Betriebsweise – jedoch technisch schwieriger umzusetzen, da dessen Chargenbetrieb zur einer fluktuierenden Prozessgaszusammensetzung führt und durch Luftzutritt eine Verdünnung des Prozessgases sowie eine partielle Nachverbrennung des enthaltenen CO stattfindet. In der Sekundärmetallurgie erscheint CCU aufgrund der schwierigen Erfassung des Abgasstroms sowie der geringen Einsatzmenge nicht sinnvoll. Beim Einsatz von Bio-Kohlenstoff sind in Verbindung mit CCS/CCU prinzipiell sogar negative CO₂-Emissionen erzielbar.

3 Biomasse als nachhaltige Kohlenstoffquelle für die transformierte Stahlindustrie

Wie bereits oben erwähnt, ist in der transformierten Stahlindustrie die Substitution von weiterhin notwendigen (fossilen) festen Kohlenstoffträgern durch Bio-Kohlenstoff aus Biomasse eine wichtige Option zur Erzielung einer vollständigen Klimaneutralität.

3.1 Biomassearten und Biomasse-Aufbereitungsverfahren

Biomasse dient als Ausgangsstoff für die Herstellung von Bio-Kohlenstoff. Die Biomasse kann direkt aus Anbaupflanzen, aus Nebenprodukten und Rückständen der Land-/Forstwirtschaft und Industrie (z.B. Stroh, Gülle, Sägespäne, Restholz) sowie aus Abfällen (z.B. Klärschlamm, Bioabfälle) gewonnen werden.⁵ Im Hinblick auf die weitere Aufbereitung zum Bio-Kohlenstoff erfolgt eine Unterscheidung einerseits in *feuchte Biomasse* mit ca. 20-25 % Trockenmasseanteil, andererseits in *trockene Biomasse*

⁴ Jesse F. White et.al.: Lignin-based products as biogenic secondary carbon carriers for the manufacture of furnace electrodes and refractories in iron metallurgy and steelmaking. SecCarb4Steel - ESTEP workshop (online), 15 - 22 - 29 November 2024

⁵ NRW.Energy4Climate (2024), Umstellung auf biogene Rohstoffe

mit 70-80 % Trockenmasseanteil. Feuchte Biomassearten sind z.B. Klärschlamm, Gärrückstand, tierische Exkremente oder Rückstände aus der Papierherstellung. Dagegen basiert die trockene Biomasse hauptsächlich auf Holz (z.B. Holzschnitzel, Sägespäne, Restholz) oder Anbaupflanzen (z.B. Rückstände/Reste aus der Getreideernte). Feuchte Biomasse besitzt in der Regel einen geringeren Kohlenstoffanteil, einen deutlich höheren Phosphor-Anteil (P-Anteil) als trockene Biomasse sowie oft auch einen erhöhten Gehalt an unterschiedlichen Verunreinigungen.⁶

Die Aufbereitung zum Bio-Kohlenstoff erfolgt bei trockener Biomasse vor allem durch Pyrolyseprozesse bei typischerweise etwa 700 °C. Hierbei erfolgt unter Luftabschluss eine Zersetzung und Entfernung organischer (flüchtiger) Komponenten. Neben dem Carbonisat, einem Bio-Kohlenstoff-Produkt mit hohem Anteil an freiem Kohlenstoff, wird auch ein Pyrolysegas erzeugt, welches in der Regel thermisch genutzt wird – u.a. auch zum Betrieb des Pyrolyseprozesses.⁶ Bei feuchter Biomasse kommt daneben vorteilhaft auch die hydrothermale Carbonisierung (HTC) zum Einsatz, die im wässrigen Medium bei rund 180-250°C und 20 bar betrieben wird.⁷ Hierbei muss das Bio-Kohlenstoffprodukt mechanisch entwässert werden und es ist eine Abwasserbehandlung erforderlich. Beim hydrothermal erzeugten Bio-Kohlenstoff liegt der Gesamt-Kohlenstoffgehalt bei 50-60 %, wobei davon der größte Teil in Form von flüchtigen Komponenten vorliegt (rund 65 %) und nur ein kleinerer Teil als freier Kohlenstoff (rund 25 %).⁷

3.2 Limitierende Elemente / Komponenten beim Einsatz in metallurgischen Prozessen

Für die metallurgische Anwendung der (Bio-)Kohlenstoffträger müssen nachfolgend aufgeführte limitierenden Elemente bzw. Komponenten berücksichtigt werden.⁸

Wasseranteil

Feuchtes Einsatzmaterial in pyrometallurgischen Prozessen führt zu deutlich erhöhtem Energiebedarf zur Wasserverdampfung und kann den Prozess lokal zu stark kühlen. Beim direkten Einsatz im Schmelzbad eines Elektrolichtbogenofens sind Sicherheitsprobleme durch Wasserdampfexplosionen möglich. Daher ist nur der Einsatz von weitestgehend trockenen Kohlenstoffträgern möglich.

Flüchtige organische Komponenten & freier Kohlenstoff

Flüchtige organische Komponenten tragen im Gegensatz zu freiem Kohlenstoff nicht nennenswert zur Aufkohlung der Stahl- oder Roheisenschmelze im Schmelzbad bei. Dagegen sind sie als Reduktionsmittel in einer Schüttung oder in selbstreduzierenden Agglomeraten (Mischung von Eisenträger und Kohlenstoff) effizient.^{7,9} Flüchtige Komponenten erhöhen den Energiebedarf des Schmelzprozesses tendenziell und es sind Probleme im Abgassystem möglich, die nachgeschaltete Maßnahmen erfordern können (z.B. gezielte Nachverbrennung, angepasste Prozessgasreinigung). Für die Verwendung als Aufkohlungsmittel sollte der Anteil an flüchtigen organischen Komponenten

⁶ D. Meitner: Biochar production plants: Status quo. SecCarb4Steel - ESTEP workshop (online), 15 - 22 - 29 November 2024

⁷ Y.-C. Lu, A. Karasev, B. Glaser, C. Wang: Application of hydrochar for a sustainable electric arc furnace process. SecCarb4Steel - ESTEP workshop (online), 15 - 22 - 29 November 2024

⁸ Hedda Pousette, Pär Ljungqvist, Niklas Kojola, Joel Carlsson, Xianfeng Hu, Magnus Heintz, Erik Sandberg, Ulf Sjöström, Liviu Brabie: Biocarbon application during melting of H₂-reduced DRI; Presentation, ESTAD 2023, Düsseldorf

⁹ V. Alemanno, D. Mirabile: Hydrochar as a secondary carbon carrier: A circular approach for low-carbon steel production. SecCarb4Steel - ESTEP workshop (online), 15 - 22 - 29 November 2024

minimiert werden (d.h. maximaler Gehalt an freiem Kohlenstoff). Für den Einsatz als Satz- oder Schäumkohle im Elektrolichtbogenofen ist jedoch ein geringer Anteil flüchtiger organischer Komponenten möglich, da hier ein Beitrag zur Reduktion oder Gasbildung durchaus erwünscht ist.

Asche & Alkalien

Im Kohlenstoffträger enthaltene Asche und Alkalien tragen zur Schlackenbildung bei und können zum Teil in den Filterstaub übergehen. Damit kann ein erhöhter Eintrag dieser Komponenten die Schlacken- und Filterstaubmenge erhöhen sowie deren Zusammensetzung verändern. Bio-Kohlenstoffe aus feuchter Biomasse besitzen häufig einen höheren Aschegehalt als andere Bio-Kohlenstoffe oder auch fossile Kohlenstoffträger. Pyrolysierte Bio-Kohlenstoffe besitzen oft einen höheren Gehalt an Alkalikomponenten im Vergleich zu den fossilen Kohlenstoffträgern sowie zu hydrothermal erzeugtem Bio-Kohlenstoff. Bei den betrachteten elektrischen Schmelzprozessen wird jedoch kein kritischer Einfluss der Asche und der Alkalien erwartet.

Schwefel und Phosphor

Schwefel (S) und Phosphor (P) sind beides „Stahlschädlinge“ mit ungünstigem Einfluss auf die Werkstoffeigenschaften des Stahls. Bei den meisten Stahlsorten müssen strenge Grenzwerte für diese Elemente eingehalten werden. Stahl- oder Roheisen-Entschwefelungsprozesse sind etablierte metallurgische Verfahrensschritte, während die Entphosphorung aufwendiger ist und in Europa aufgrund P-arter Eisenerze nur begrenzt zum Einsatz kommt. Sowohl der Schwefel- als auch Phosphorgehalt sollten im verwendeten (Bio)-Kohlenstoffträger so gering wie möglich sein.

Da der Schwefelgehalt bei nahezu allen Bio-Kohlenstoffen geringer als bei fossilen Kohlenstoffträgern ist, stellt dies meist kein Problem bei der Substitution dar. Dagegen muss der Phosphorgehalt genau betrachtet werden. Dieser ist in der Regel bei allen biogenen Kohlenstoffträgern höher als bei den fossilen, wobei insbesondere die Bio-Kohlenstoffe aus feuchter Biomasse wesentlich höheren P-Gehalt aufweisen als diejenigen aus trockener Biomasse.^{6,7}

3.3 Aufbereitungsoptionen für den Bio-Kohlenstoff

Um den durch hydrothermale Carbonisierung oder Pyrolyse erzeugten Bio-Kohlenstoff für den Einsatz im Zielprozess (z.B. in der Metallurgie) zu optimieren, stehen mehrere Verfahrensoptionen zur Entfernung von Störkomponenten zur Verfügung.

Zum Beispiel können die *flüchtigen Komponenten* beim HTC-Kohlenstoff durch eine anschließende Pyrolysebehandlung weitestgehend entfernt werden, womit ein Anteil an freiem Kohlenstoff zwischen 55 und 85 % erreicht werden kann. Der freie Kohlenstoffgehalt entspricht im besten Fall dem von üblichen fossilen Kohlenstoffträgern (z.B. Anthrazit) oder dem von Holzkohle. Gegenüber dem HTC ist jedoch der Gehalt an Asche, Alkalikomponenten, S und P angereichert. Insbesondere der Asche- (ca. 15-45 %) und Phosphoranteil (bis 0,4 %) liegen im Vergleich zu etablierten, in metallurgischen Prozessen eingesetzten Kohlenstoffträgern oft höher.⁷ Daher muss die Eignung für den Prozess im Einzelfall geprüft werden.

Eine *Phosphorentfernung* aus Bio-Kohlenstoff kann durch einen Laugungsprozess z.B. mit Salpetersäure (HNO_3) erfolgen. Neben dem im P-Gehalt reduzierten Bio-Kohlenstoff wird durch Fällung aus der wässrigen Lösung ein phosphorreiches Produkt erzeugt, welches als Düngemittel verwendet

werden kann. Hierzu wurde eine Prozesskette entwickelt, bei der ausgehend von getrockneter Biomasse aus Abfällen im ersten Schritt durch Pyrolyse Bio-Kohlenstoff erzeugt wird.¹⁰

Die beschriebenen Aufbereitungsoptionen befinden sich noch nicht in großindustrieller Anwendung und stellen in jedem Fall einen zusätzlichen kosten- und energieintensiven Prozessschritt dar. Aufgrund des Kostendrucks in der Stahlindustrie wird daher sicherlich der Einsatz von Bio-Kohlenstoff bevorzugt, welcher keiner Nachbehandlung zur Entfernung von Störelementen/-komponenten bedarf.

3.4 Einstellung einer geeigneten Einsatzform für den Bio-Kohlenstoff

Die Partikelgröße des erzeugten Bio-Kohlenstoffs wird wesentlich durch Art und Grad der Vorzerkleinerung der ursprünglichen Biomasse bestimmt. Die Partikelgröße von Bio-Kohlenstoff reicht von staubförmig (z.B. bei Bio-C aus schlammförmiger Biomasse) über feinkörnig (z.B. bei Holzspänen oder -chips) bis hin zu grobstückig (z.B. bei stückiger Holzkohle). In der Regel wird Bio-Kohlenstoff stückig in die elektrischen Schmelzprozesse der Stahlindustrie eingesetzt, typischerweise in Pelletgrößen von bis zu 60 mm. Er kommt beispielsweise als Satzkohle im EAF oder als Aufkohlungs- oder Reduktionsmittel im DRI-Einschmelzer zum Einsatz. Der Einsatz von staubförmigen oder sehr feinkörnigen Kohlenstoffträgern ist nicht zielführend, da dabei zu viel Material in das Prozessgas-Reinigungssystem übertragen würde.

Daher ist in den meisten Fällen eine Agglomeration des Bio-Kohlenstoffs erforderlich, ggf. mit vorgeschalteter Klassierung und Vorzerkleinerung. Hierzu stehen mehrere Techniken zur Auswahl, wie z.B. das Pelletieren, Brikettieren mit Stempel- oder Walzenpressen oder die Extrusion. In allen Fällen müssen die Anforderungen der metallurgischen Prozesse an die Festigkeit (Kalt- und Heiß-) und die Zusammensetzung (flüchtige und schlackenbildende Komponenten) erfüllt sein. Hierzu muss jeweils ein geeignetes Bindemittel ausgewählt werden.

Für den Einsatz als Einblaskohle im EAF muss der Bio-Kohlenstoff dagegen feinkörnig sein, um eine optimale pneumatische Förderbarkeit zu gewährleisten. Dazu kann z.B. eine Mikrogranulation oder auch eine entsprechende Zerkleinerung und/oder Klassierung notwendig sein.

3.5 Fazit: Bevorzugte Biomasse- bzw. Bio-Kohlenstoff-Arten zum Einsatz in der transformierten Stahlindustrie

Für die Eisen- und Stahlerzeugung eingesetzte Bio-Kohlenstoffe sollten trocken sein, einen hohen Anteil an freiem Kohlenstoff und nur eine geringe Menge flüchtiger organischer Komponenten enthalten, wenig Asche und Alkalien sowie einen niedrigen Phosphorgehalt aufweisen.

Zum Einsatz in metallurgischen Anwendungen der Stahlindustrie ist daher insbesondere trockene holzbasierte Biomasse vorteilhaft, die anschließend durch (langsame) Pyrolysebehandlung zum Bio-Kohlenstoff-Produkt verarbeitet wird.¹¹ Dieses enthält im Vergleich zu anderen Produkten aus Biomasse nur einen geringen Anteil an flüchtigen organischen Komponenten, besitzt einen geringen P-Gehalt und ähnelt hinsichtlich der wesentlichen Eigenschaften den fossilen Kohlenstoffträgern. Aber auch andere Bio-Kohlenstoff-Arten sind nach Einzelfallprüfung einsetzbar.

¹⁰ Andrea Salimbeni: Turning biowaste into steelgrade biocoal to decarbonize the steelmaking process. ESTEP Spring Dissemination Event, 5-9 June 2025, Krakow, Poland

¹¹ Maéva Chrzaszcz, Mariam Sidawi, Ian Cameron, Richard Elliott, Mitren Sukhram: Can Biotechnologies be the Solution for Carbon Neutral Electric Steelmaking? Presentation, ESTAD 2023, Düsseldorf

4 Quantifizierung des zukünftigen Kohlenstoffbedarfs bzw. Biokohlenstoff-Potentials

Zur Quantifizierung des zukünftigen Kohlenstoffbedarfs im Rahmen der Transformation der Stahlindustrie wurden zunächst Rohstahl-Produktionsdaten aus verschiedenen Quellen für Deutschland insgesamt sowie NRW zusammengestellt. Als Referenz wurde das Jahr 2019 gewählt, da dieses noch weitgehend von nachfolgenden globalen Krisen, wie z.B. der COVID-19-Pandemie oder dem Krieg in der Ukraine, unbeeinflusst war und sich daher gut für eine Zukunftsprognose eignet. Die Rohstahl-Produktionsdaten wurden nach Herstellungsrouten aufgeschlüsselt: Oxygenstahl (Primärstahlerzeugung, d.h. erzbasiert) und Elektrostahl (Sekundärstahlerzeugung, d.h. schrottbasiert). Betrachtet wurden nur die unlegierten und niedriglegierten Stahl-Legierungsgruppen. In dieser Betrachtung ist die Erzeugung hochlegierter Stähle vernachlässigt, da hier der spezifische Kohlenstoffbedarf kleiner und auch die Produktionsmenge mit 0,95 Mio. t/a in Deutschland bzw. 0,6 Mio. t/a in NRW in Relation zur Gesamt-Stahlerzeugung vergleichsweise gering ist.

Tabelle 2: Rohstahl-Produktionsdaten (unlegiert/ niedriglegiert) von Gesamt-Deutschland sowie NRW für das Referenzjahr 2019 – gegliedert nach Oxygenstahl und Elektrostahl ^{12,13,14,15,16,17,18}

	Primär- Stahlerzeugung (erzbasiert) Oxygenstahl in Mio. t/a	Sekundär- Stahlerzeugung (schrottbasiert) Elektrostahl in Mio. t/a	Summe in Mio. t/a
Rohstahl unlegiert/ niedriglegiert - in Deutschland	27,4	11,3	38,7
Rohstahl unlegiert/ niedriglegiert - in NRW	13,9	0,3	14,2

Tabelle 2 zeigt die Rohstahl-Produktionsdaten (unlegiert/ niedriglegiert) von Deutschland sowie NRW für das Referenzjahr 2019, gegliedert nach Primär- und Sekundärstahlerzeugung. Dies entspricht aktuell der Oxygenstahl- und Elektrostahl-Route. Die entsprechende Rohstahl-Gesamtproduktion in Deutschland beträgt 38,7 Mio. t/a, wovon 27,4 Mio. t/a auf die Oxygenstahl- bzw.

¹² Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie 2022/2023, Wirtschaftsvereinigung Stahl, Berlin, 2023

¹³ Produzierte Stahlmenge der deutschen Stahlwerke, <https://stahl.webstexx.de/daten-und-statistik/stahlstatistiken-deutschland/alle-stahlwerke-deutschland/>, Zugriff 03/2023

¹⁴ Circular Economy mit Stahl - Beitrag zum Klimaschutz in Europa, Wirtschaftsvereinigung Stahl, Berlin, Februar 2020

¹⁵ Medieninformation Stahlproduktion in Deutschland, Dezember 2022, Wirtschaftsvereinigung Stahl, Berlin, 23.01.2023

¹⁶ Monatliche Pressemitteilung zur Rohstahlproduktion sowie Übersichten zur Stahlkonjunktur in Deutschland abrufbar unter www.stahl-online.de

¹⁷ EUROPEAN STEEL IN FIGURES 2022, Eurofer, Brüssel, 2022, (www.eurofer.eu)

¹⁸ Fakten zur Stahlindustrie 2022, Wirtschaftsvereinigung Stahl, Berlin, November 2022

Primärstahlerzeugung entfallen und der Rest (11,3 Mio. t/a) auf die Elektrostahlerzeugung. Im Vergleich dazu besitzt die Oxygenstahl- bzw. Primärstahlerzeugung in NRW mit 13,9 Mio. t/a einen noch wesentlich größeren Anteil an der Gesamt-Rohstahlerzeugung in Höhe von 14,2 Mio. t/a. Die Elektrostahlerzeugung unlegierter und niedriglegierter Güten beträgt dagegen nur 0,3 Mio. t/a.

Allen nachfolgenden Berechnungen liegt die Annahme zugrunde, dass die in **Tabelle 2** zusammengestellten Produktionsmengen sowie -anteile von Primär- und Sekundärstahlerzeugung auch noch für die vollständig transformierte Stahlindustrie gelten (Szenario 2040). Im Zuge der Transformation ist zu beachten, dass zukünftig neben der verbleibenden Sekundärstahlerzeugung im Elektrolichtbogenofen auch die gesamte Primärstahlerzeugung (heute ausschließlich Oxygenstahlerzeugung) über elektrische Schmelzverfahren erfolgt, die dann die wesentlichen Verbraucher von festen Kohlenstoffträgern darstellen. Für die Primärstahlerzeugung mittels Direktreduktion existieren zwei Varianten von elektrischen Schmelzverfahren.

Die erste Variante der Primärstahlerzeugung ist die Nutzung von *Elektrolichtbogenöfen* als Einschmelzaggreat für das in der Direktreduktion erzeugte DRI. Da es sich um das gleiche Schmelzaggreat wie bei der Sekundärstahlerzeugung handelt, werden die entsprechenden Produktionsmengen und Kohlenstoffbedarfe für Primär- und Sekundärstahlerzeugung zusammengefasst. Es gilt die vereinfachte Annahme, dass die spezifischen Kohlenstoffbedarfe im Elektrolichtbogenofen (einschließlich der Sekundärmetallurgie) sowohl bei der Primär- als auch der Sekundärstahlerzeugung gleich sind.

Die zweite Variante der Primärstahlerzeugung ist der Einsatz von *elektrischen DRI-Einschmelzern in Verbindung mit nachgeschalteten Konvertern* im Oxygenstahlwerk. Auf Basis aktueller Transformationspläne deutscher Stahlhersteller wird angenommen, dass in Deutschland nur ein in NRW ansässiger Stahlstandort mit einer Rohstahl-Produktionskapazität von rund 8,5 Mio. t/a diese Verfahrensvariante für das gesamte Werk anwenden wird. Alle anderen Primärstahlerzeugungs-Standorte werden voraussichtlich Elektrolichtbogenöfen als Einschmelzaggreat nutzen. Das bedeutet, dass die DRI-Einschmelzer-Route in NRW mit einem Anteil von 60 % an der gesamten - Rohstahlerzeugung (Primär- und Sekundärstahl) deutlich stärker vertreten sein wird als im bundesweiten Durchschnitt, da ihr Anteil hier lediglich 22 % betragen wird (Szenario 2040).

Auf Basis des geschätzten zukünftigen Produktionsanteils der DRI-Einschmelzer-Route an der gesamten Rohstahlerzeugung, der Rohstahl-Produktionsdaten aus **Tabelle 2**, sowie der Daten zum spezifischen Kohlenstoffbedarf aus **Tabelle 1**, wurde der zukünftige „unvermeidbare“ Kohlenstoffbedarf der Eisen- und Stahlindustrie bzw. das Einsatzpotential für Bio-Kohlenstoff nach der Transformation der Stahlindustrie quantifiziert. Für alle substituierbaren Kohlenstoffströme (**Tabelle 1**) wurde in den Berechnungen die maximale Bio-Kohlenstoff-Austauschrate von 100 % berücksichtigt. Vereinfachend wurde zudem angenommen, dass die erforderliche Einsatzmenge des Bio-Kohlenstoffs derjenigen des heute eingesetzten fossilen Kohlenstoffträgers entspricht, auch wenn dies nicht für alle biogenen Kohlenstoffträger zutrifft. Die entsprechende Quantifizierung des „unvermeidbaren“ Kohlenstoffbedarfs bzw. Bio-Kohlenstoff-Potentials für Deutschland und NRW gemäß Szenario 2040 ist in **Tabelle 3** dargestellt.

Tabelle 3: Quantifizierung des „unvermeidbaren“ Kohlenstoffbedarfs bzw. Bio-Kohlenstoff-Potentials bei der Erzeugung von unlegiertem oder niedriglegiertem Stahl für Deutschland bzw. NRW (Szenario 2040)

	Deutschland			NRW		
Kohlenstoffträger	Stahl- Erzeugung in Mio. t/a	Bio-C- Potential (min) in t/a	Bio-C- Potential (max) in t/a	Stahl- Erzeugung in Mio. t/a	Bio-C- Potential (min) in t/a	Bio-C- Potential (max) in t/a
Primärstahlerzeugung über DRI-Einschmelzer und Konverter						
Reduktionskohle Einschmelzer	8,5	42.500	42.500	8,5	42.500	42.500
C zur Aufkohlung im Einschmelzer		255.000	382.500		255.000	382.500
Aufkohlungsmittel Sekundärmetallurgie (Oxygenstahlwerk)		2.125	2.125		2.125	2.125
Primär- und Sekundärstahlerzeugung über Elektrolichtbogenofen						
EAF-Satzkohle	30,2	150.750	361.800	5,7	28.500	68.400
EAF-Einblaskohle		150.750	301.500		28.500	57.000
Aufkohlungsmittel Sekundärmetallurgie (Elektrostahlwerk)		42.210	42.210		7.980	7.980
Summe	38,7	643.335	1.132.635	14,2	364.605	560.505

Die Tabelle zeigt die Bio-Kohlenstoff-Potentiale (jeweils Min. und Max.-Werte) sämtlicher relevanter fester Kohlenstoff-Ströme, differenziert nach der Primärstahlerzeugung über DRI-Einschmelzer und Konverter sowie der Primär- und Sekundärstahlerzeugung über den Elektrolichtbogenofen. Für Deutschland errechnet sich für das Szenario 2024 ein Bio-Kohlenstoff-Einsatzpotential zwischen rund 645 kt/a und 1150 kt/a, während sich für NRW ein Bio-Kohlenstoff-Potential zwischen rund 365 kt/a und 560 kt/a ergibt.

Auf Basis der minimalen und maximalen Werte des in **Tabelle 3** errechneten Bio-C-Potentials ist in **Tabelle 4** eine Abschätzung des potentiellen *Primär-Biomassebedarfs* (v.a. Holz) für die Erzeugung unlegierter und niedriglegierter Stähle in Deutschland sowie NRW gemäß des beschriebenen Szenarios 2040 dargestellt. Der Biomassebedarf berechnet sich über die Feststoffausbeute bei der Pyrolyse von Holz zu Bio-Kohlenstoff in Höhe von 30 %.

Tabelle 4: Abschätzung des potentiellen Primär-Biomassebedarfs (Holz/Restholz) bei der Erzeugung unlegierter sowie niedriglegierter Stähle in Deutschland bzw. NRW - für stofflich unvermeidbaren Kohlenstoffeinsatz

Szenario 2040	Bio-C-Potential in t/a		Feststoffausbeute Holz → Bio-C (Pyrolyse) ¹⁹	Primär-Biomasse (Holz/Restholz) in t/a	
	min	max		min*	max*
Deutschland					
22 % der Gesamt- Rohstahlerzeugung über DRI-Einschmelzer, Rest über EAF	643.335	1.132.635	30 %	<u>2.140.000</u>	<u>3.780.000</u>
NRW					
60 % der Gesamt- Rohstahlerzeugung über DRI-Einschmelzer, Rest über EAF	364.605	560.505	30 %	<u>1.220.000</u>	<u>1.870.000</u>

* gerundet

Für Deutschland ergibt sich ein potentieller Bedarf der Stahlindustrie an Primär-Biomasse in Höhe von rund 2,1 und 3,8 Mio. t/a und für NRW zwischen 1,2 und 1,9 Mio. t/a.

Prinzipiell scheint die Deckung eines Biomassebedarfs in dieser Höhe in Deutschland möglich. Laut einer Studie wird für das Jahr 2030 ein maximales, mobilisierbares technisches Potential von Waldrestholz (Nadel & Laub) von etwa 11,5 Mio. t/a prognostiziert.²⁰ Allerdings ist noch offen, inwieweit diese Biomasse-Verfügbarkeit vor dem Hintergrund einer nachhaltigen Waldwirtschaft und einer wirtschaftlichen Gewinnung realistisch ist. Außerdem ist zu beachten, dass im Rahmen der Transformation künftig auch andere Industriezweige, wie z.B. die Chemieindustrie, auf biogenen Kohlenstoff als Rohstoff angewiesen sein werden. Daraus ergibt sich eine erhebliche Nutzungskonkurrenz.

Schlussbemerkungen & Einschränkungen

Das dargestellte Szenario 2040 zur Quantifizierung des Bio-Kohlenstoff bzw. Biomassepotentials basiert auf vereinfachten Annahmen. Es wird davon ausgegangen, dass die heutige Stahlproduktionsmenge (2019) auch 2040 in dieser Höhe weiterhin aktuell ist und dass die Transformation vollständig im Sinne der aktuellen Nachhaltigkeitsstrategien der deutschen Stahlunternehmen erfolgt ist. Angesichts der potentiell dynamischen politisch-wirtschaftlichen Rahmenbedingungen ist eine regelmäßige Überprüfung und ggf. Aktualisierung des Szenarios erforderlich. Während der Übergangszeit der Transformation kann zudem ein zusätzliches Bio-

¹⁹ NRW.Energy4Climate (Hrsg.) 2023: Nachhaltiger Einsatz von Biomasse – Die Rolle von Biomasse in der Energiewende und in einer klimaneutralen Industrie. Düsseldorf

²⁰ Abschlussbericht: Chemistry4Climate, 2023

Kohlenstoffpotential für den Einsatz in der Hochofen-Route bestehen, welches hier nicht berücksichtigt ist. Ebenso bleibt der potentielle Bedarf an festem Bio-Kohlenstoff für die Reduktion von Reststoffen in künftig verstärkt notwendigen, separat betriebenen Recyclingprozessen unberücksichtigt.

Auf technischer Ebene bestimmen die Eigenschaften des Bio-Kohlenstoffs (z.B. Gehalt an festem Kohlenstoff, Reaktivität) das im Realbetrieb erforderliche Massenverhältnis für den Austausch der bisherigen fossilen Kohlenstoffträgern durch Bio-Kohlenstoffe. In einigen Fällen, wie etwa bei einem hohen Gehalt an flüchtigen Komponenten, kann eine höhere Einsatzmenge von Bio-Kohlenstoff erforderlich sein, als hier prognostiziert.

Literaturverzeichnis

- [1] Terry Norgate et. al.: Biomass as a Source of renewable Carbon for Iron and Steelmaking. ISIJ International, Vol. 52 (2012), No. 8
- [2] Echterhof, T. Review on the Use of Alternative Carbon Sources in EAF Steelmaking. Metals 2021, 11, 222. <https://doi.org/10.3390/met11020222>
- [3] Sa Ge, Kamal Joubarani, Kyle Chomyn, Chris Walker, Ian Cameron, Terry Koehler: Emissions, Economics, and Risks of Electric Smelting Furnace (ESF) for Green Steel Production, Hatch Ltd, Presentation ESTAD 2023, Düsseldorf
- [4] Jesse F. White et.al.: Lignin-based products as biogenic secondary carbon carriers for the manufacture of furnace electrodes and refractories in iron metallurgy and steelmaking. SecCarb4Steel - ESTEP workshop (online), 15 - 22 - 29 November 2024
- [5] NRW.Energy4Climate (2024), Umstellung auf biogene Rohstoffe
- [6] D. Meitner: Biochar production plants: Status quo. SecCarb4Steel - ESTEP workshop (online), 15 - 22 - 29 November 2024
- [7] Y.-C. Lu, A. Karasev, B. Glaser, C. Wang: Application of hydrochar for a sustainable electric arc furnace process. SecCarb4Steel - ESTEP workshop (online), 15 - 22 - 29 November 2024
- [8] Hedda Pousette, Pär Ljungqvist, Niklas Kojola, Joel Carlsson, Xianfeng Hu, Magnus Heintz, Erik Sandberg, Ulf Sjöström, Liviu Brabie: Biocarbon application during melting of H2-reduced DRI; Presentation, ESTAD 2023, Düsseldorf
- [9] V. Alemanno, D. Mirabile: Hydrochar as a secondary carbon carrier: A circular approach for low-carbon steel production. SecCarb4Steel - ESTEP workshop (online), 15 - 22 - 29 November 2024
- [10] Andrea Salimbeni: Turning biowaste into steelgrade biocoal to decarbonize the steelmaking process. ESTEP Spring Dissemination Event, 5-9 June 2025, Krakow, Poland
- [11] Maéva Chrzaszcz, Mariam Sidawi, Ian Cameron, Richard Elliott, Mitren Sukhram: Can Biotechnologies be the Solution for Carbon Neutral Electric Steelmaking? Presentation, ESTAD 2023, Düsseldorf
- [12] Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie 2022/2023, Wirtschaftsvereinigung Stahl, Berlin, 2023
- [13] Produzierte Stahlmenge der deutschen Stahlwerke, <https://stahl.webstexx.de/daten-und-statistik/stahlstatistiken-deutschland/alle-stahlwerke-deutschland/>, Zugriff 03/2023
- [14] Circular Economy mit Stahl - Beitrag zum Klimaschutz in Europa, Wirtschaftsvereinigung Stahl, Berlin, Februar 2020
- [15] Medieninformation Stahlproduktion in Deutschland, Dezember 2022, Wirtschaftsvereinigung Stahl, Berlin, 23.01.2023
- [16] Monatliche Pressemitteilung zur Rohstahlproduktion sowie Übersichten zur Stahlkonjunktur in Deutschland abrufbar unter www.stahl-online.de
- [17] EUROPEAN STEEL IN FIGURES 2022, Eurofer, Brüssel, 2022, (www.eurofer.eu)
- [18] Fakten zur Stahlindustrie 2022, Wirtschaftsvereinigung Stahl, Berlin, November 2022
- [19] NRW.Energy4Climate (Hrsg.) 2023: Nachhaltiger Einsatz von Biomasse - Die Rolle von Biomasse in der Energiewende und in einer klimaneutralen Industrie. Düsseldorf
- [20] Abschlussbericht: Chemistry4Climate, 2023