

Nebenprodukte aus der Metallurgie und Reststoffe aus dem Bergbau

Future Slag Production in a Low Carbon Steel Industry

David Algermissen

In order to implement the Paris Climate Change Agreement, the EU is aiming for a multi-stage reduction of greenhouse gas emissions, up to complete avoidance. Therefore the steel industry, along with other industries, is undergoing radical change. Various new developments as well as further developments should lead to changes in steel production processes in order to meet the EU targets. The focus here is on direct reduction in combination with hydrogen. In addition to the political and economic framework conditions, however, technical hurdles must be overcome and the processes must be tested in operation. One aspect that is usually not considered is that the new processes also generate other types and quantities of by-products, which have been saving CO₂ emissions and raw materials in other industries for many decades and which also lead to many new challenges but also opportunities. First and foremost, the blast furnace, whose rapid cooled slag has been used in the cement industry for over 100 years. Thanks to this interdisciplinary cooperation between the steel and cement industries, large quantities of CO₂ can be saved every year, which otherwise cannot be avoided due to the raw materials used. As a result, research activities on the use of electric furnace slag in the cement industry have been intensified in recent years in order to benefit both industries as well as Germany and Europe. Furthermore, the example of dusts from the steel industry can be used to show that the changed processes and thus the changed composition of the dusts can also lead to a break in the recycling economy. However, these developments should not be neglected in future, in addition to the important other research and development activities regarding the process and hydrogen production.

Zukünftige Schlackenerzeugung in einer CO₂-armen Stahlindustrie

David Algermissen

1.	Status quo in der Stahlindustrie	183
2.	Optimierungen und neue Prozesse	185
3.	Neue Prozesse, neue Schlacken	187
4.	Stäube.....	189
5.	Zusammenfassung	190
6.	Quellen	190

Die Stahlindustrie befindet sich in einem Umbruch. Um die Ziele des Pariser Klimaabkommens zu erreichen, strebt die EU eine mehrstufige Senkung der Treibhausgasemissionen an, bis hin zur nahezu vollständigen Vermeidung. Dabei gehört die Stahlindustrie, neben der chemischen- und Zementindustrie, zu einem großen Erzeuger vom Treibhausgas CO₂. Diverse Neuentwicklungen sowie Weiterentwicklungen von bereits erprobten Technologien sind an vielen Stellen in der öffentlichen sowie Fachpresse zu lesen. Dabei werden meist die Stichwörter Wasserstoff und Direktreduktion genannt, welche für die integrierte Stahlerzeugung völlig neue Prozesse und Abläufe mit sich bringen. Im Fokus stehen dabei immer die eingesparten CO₂-Emissionen sowie die notwendige elektrische Energie, welche in großer Menge sowie klimaneutral zur Verfügung stehen muss, um den Wandel zu vollziehen. Ein in den Diskussionen meist nicht genannter Aspekt ist die Entstehung anderer Arten und Mengen von Nebenprodukten durch die neuen Prozesse, welche seit vielen Jahrzehnten in anderen Industrien CO₂-Emissionen und Rohstoffe einsparen und auch hier zu vielen neuen Herausforderungen, aber auch Chancen führen.

1. Status quo in der Stahlindustrie

Die heutige Stahlerzeugung erfolgt maßgeblich mittels der zwei Erzeugungsrouten über Hochofen und LD-Konverter (integrierte Route) sowie dem Elektrolichtbogenofen. Die Elektrolichtbogenöfen in Deutschland nutzen nahezu ausschließlich Schrott als Einsatzmaterial zur Rohstahlerzeugung und sind nicht auf die Primärstoffe Kohle und Eisenerz angewiesen. Dabei können sie, in Abhängigkeit vom Strommix, bereits heute mit sehr niedrigen CO₂-Emissionen wirtschaftlich produzieren. Während die

Lebenszyklen von Stahlprodukten jedoch immer länger werden und gleichzeitig der Bedarf an Stahl ansteigt, ist die Erzeugung über die Primärroute aber weiter notwendig. Derzeit werden in Deutschland so 30 Millionen Tonnen, entsprechend etwa 70 %, des Rohstahls erzeugt [16]. Dabei ist der Hochofen das maßgebliche Aggregat, welches sich in den letzten 100 Jahren etabliert hat und stetig weiterentwickelt wurde. Durch Kohlenstoffträger kann aus Eisenerz Roheisen gewonnen werden, weshalb die Erzeugung von CO und CO₂ den Prozess charakterisiert und nicht vermeidbar ist. Diverse Entwicklungen führten dazu, dass der Hochofenprozess heute nah am thermodynamischen Optimum arbeitet und Entwicklungssprünge zum Erreichen der Ziele des Pariser Klimaabkommens [4] von bis zu 95 % Verringerung von Treibhausgasen gegenüber 1990 selbst theoretisch nicht realisierbar sind.

In einer zweiten Prozessstufe muss das aus dem Hochofen stammende, kohlenstoffreiche Roheisen gefrischt werden, in Europa üblicherweise in einem LD-Konverter. Dabei werden nicht benötigte Stoffe, wie z.B. Kohlenstoff, Silizium und Phosphor in die Gasphase oder Schlacke überführt.

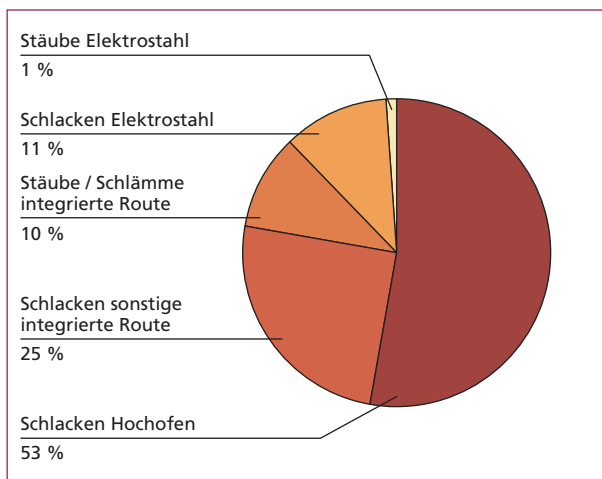


Bild 1:

Erzeugte Schlacken, Stäube/
Schlämme in 2018

Auch hier kann die Erzeugung von CO und CO₂ nicht vermieden werden, da dies thermodynamisch bedingt notwendig ist. Weiterhin wird im Konverter Schrott hinzugegeben, um Einerseits den Rohstahl aufgrund der exothermen Reaktionen zu kühlen und andererseits weitere Eisenträger aufzuschmelzen und zu rezyklieren. Damit ist der Hochofen auf die Konverter-Prozessstufe angewiesen, um einen Rohstahl für die nachfolgenden Behandlungen in der Sekundärmetallurgie zu erzeugen.

Nebenprodukte in der Stahlindustrie

Neben dem Hauptprodukt Stahl werden in der Stahlindustrie auch diverse weitere Materialien erzeugt, welche für die Prozessführung unabdingbar sind. Dabei zählt die Schlacke mit derzeit über 13 Millionen Tonnen pro Jahr in Deutschland mengenmäßig und aufgrund der hohen Nutzungsrate von 95 % zum wichtigsten Nebenprodukt, Bild 1 [5, 8].

Während der Straßen- und Wegebau für die kristallin erstarrenden Schlacken aus dem Elektroofen und LD-Konverter der wichtigste Absatzmarkt ist, ist es bei den Hochofenschlacken die Zementindustrie. Etwa 90 % der erzeugten Hochofenschlacke in Deutschland wird mit Wasser zum glasigen Hüttensand abgeschreckt. Aufgrund seiner latent hydraulischen Eigenschaften wird er nahezu vollständig in der Zementindustrie eingesetzt, um Portlandzementklinker zu substituieren. Dadurch können nachweislich Primärrohstoffeinsatz sowie CO₂-Emissionen verringert werden, da bei der Herstellung von einer Tonne Portlandzementklinker etwa 800 kg CO₂ erzeugt werden, davon mehr als die Hälfte rohstoffbedingt [7]. So lassen sich die Einsparungen durch die Nutzung von Hüttensand auf jährlich rund 4,6 Millionen Tonnen CO₂ sowie 12 Millionen Tonnen Primärrohstoffe, allein in Deutschland, beziffern.

2. Optimierungen und neue Prozesse

Ein Ersatz für den Kohlenstoff könnte Wasserstoff sein, welcher ebenfalls in der Lage ist Oxide zu reduzieren, unter Erzeugung von H₂O anstelle von CO₂. Deshalb werden derzeit viele Verfahren untersucht, um Wasserstoff in der Stahlindustrie großtechnisch einzusetzen und nahezu klimaneutral Stahl zu produzieren.

Der Vorteil von Wasserstoff ist die Erzeugung mittels elektrische Energie, welche, je nach Verfügbarkeit, vollständig aus regenerativen Quellen stammen kann. Gleichzeitig kann Wasserstoff besser als elektrische Energie gespeichert werden. Ein Nachteil besteht jedoch in den bisher noch nicht sehr hohen Wirkungsgraden der Wasserstofferzeugung über die Elektrolyse von etwa 70-80 %. Es gibt derzeit aber viele Entwicklungen in diesem Bereich, sodass perspektivisch höhere Wirkungsgrade realistisch sind [2].

Um schrittweise den Umgang mit Wasserstoff zu erproben, setzt beispielsweise der größte deutsche Stahlerzeuger, die thyssenkrupp Steel Europe AG, als Brückentechnologie auf den Einsatz von Wasserstoff im Hochofen, um so Kohlenstoff und damit CO₂ zu verringern. Jüngste Untersuchungen zeigen jedoch, dass dem Wasserstoffeinsatz im Hochofen Grenzen gesetzt sind, da dieser prozessbedingt auf Kohlenstoff angewiesen ist. Thermodynamische Berechnungen limitieren die Substitution durch Wasserstoff auf etwa 30 % [17].

Eine Alternative könnte die Direktreduktion darstellen. Kommerziell erhältliche Direktreduktionsanlagen können Erze zu Eisenschwamm mit einem Metallisierungsgrad von bis zu über 95 % erzeugen und nutzen Gase als Reduktionsmittel. In der Regel wird Erdgas, welches ebenfalls einen gewissen Wasserstoffanteil besitzt, genutzt, wodurch bereits Einsparungen von etwa 40 % an CO₂ erreicht werden können [14]. Weiterhin wird beispielsweise bei ArcelorMittal in Hamburg bereits der Einsatz von reinem Wasserstoff untersucht, um CO₂ nahezu vollständig vermeiden zu können. Dort ist seit 1971 die einzige Direktreduktionsanlage in Europa im Produktionsbetrieb im Einsatz.

Im Gegensatz zum Hochofenprozess entsteht bei der Direktreduktion jedoch keine Schlacke, sondern lediglich ein staubhaltiges Abgas und der Eisenschwamm. Letzterer muss in einem nachfolgenden Prozessschritt aufgeschmolzen werden, um

ihn im Anschluss als Rohstahl weiterverarbeiten zu können. Dies kann beispielsweise über den Möller in den Hochofen erfolgen, um Erze und die damit verbundene Reduktionsarbeit zu verringern sowie im Endeffekt die CO₂ Emissionen zu reduzieren. Diese Brückentechnologie wird derzeit von der voestalpine in Österreich in Betriebskampagnen praktiziert, wird jedoch ebenfalls nicht zum Erreichen des 95 % Ziels des Pariser Klimaabkommens führen, aufgrund der thermodynamischen Limitierungen des Hochofenprozesses. Wie am Beispiel von ArcelorMittal Hamburg oder auch anderen Stahlwerken in der Welt, kann der Eisenschwamm im Elektrolichtbogenofen wieder aufgeschmolzen werden. In Abhängigkeit der zu produzierender Stahlgüte können Eisenschwamm und Schrott zwischen 0 – 100 % als Einsatzmaterialien variiert werden. Mittels grün erzeugter elektrischer Energie für die Wasserstofferzeugung sowie den Elektrolichtbogenofen, wäre so eine nahezu CO₂-neutrale Stahlerzeugung möglich.

Limitierungen

Die Pläne zur Umstellung der gesamten Stahlindustrie auf CO₂-arme Verfahren erscheinen technisch gut umsetzbar. Jedoch gibt es eine Vielzahl an limitierenden Faktoren, welche hier nur oberflächlich thematisiert werden.

Wasserstoff

Zum Erreichen des 95 % Ziels ist die Nutzung von grünem, CO₂-neutral produziertem Wasserstoff notwendig. Selbst wenn nur die Stahlindustrie diesen für sich beanspruchen würde, wären immense Stromkapazitäten notwendig. Bei heutiger Stahlproduktion und einem durchschnittlichen Schrottanteil von 40 % würden in Deutschland etwa 125 Terrawattstunde/ Jahr an elektrischer Energie benötigt, entsprechend 7.000 Offshore Windkraftanlagen mit 5 MW [1]. Zudem haben weitere stark CO₂ emittierende Industrien, wie beispielsweise die Chemieindustrie, ebenfalls großes Interesse an Wasserstoff. Im Bereich der Elektromobilität mittels Wasserstoff und Brennstoffzelle würde bei vollständiger Umstellung, allein der PKW-Flotte, ein Strombedarf von etwa 230 Terrawattstunde/ Jahr für die Wasserstofferzeugung bestehen [3, 12]. Der deutsche Gesamtstromverbrauch lag im Vergleich dazu bei etwa 520 Terrawattstunden in 2017 [13].

Eisenerz

Weiterhin bestehen an das Eisenerz für die Nutzung in einer Direktreduktionsanlage gewisse Anforderungen, beispielsweise die Korngröße. Üblicherweise muss diese eine Pelletgröße von etwa 7-15 mm betragen, wodurch nur gewisse Mengen des derzeit importierten Eisenerzes eingesetzt werden können.

Prozesstechnik

Die möglichen Vorgehensweisen wurden bisher in Laborversuchen erprobt. Auch die Umstellung einer Direktreduktionsanlage von zunächst Erdgas auf Wasserstoff, sobald dieser wirtschaftlich in ausreichender Menge zur Verfügung steht, scheint möglich, jedoch wurde dies weltweit noch nie betriebstechnisch erprobt. Erste Versuche im Pilotmaßstab folgen voraussichtlich in den nächsten Jahren bei ArcelorMittal in Hamburg.

Wirtschaftlichkeit und Realisierung

Nicht zuletzt stellt die Wirtschaftlichkeit einen existenzentscheidenden Aspekt dar. Die Planung und Umsetzung in einem integrierten Hüttenwerk, wo diverse Hüttengase gesammelt, gemischt oder auch rein in anderen Prozessen genutzt werden ist immens, da bestehende Strukturen über die Jahre stetig optimiert wurden und diese nun zerrissen werden müssen. Dabei müssen weiterhin die Logistik, wie Transportwege, beachtet werden sowie die gesamte Medienversorgung. Während dieser schrittweisen Umstellung kann ein Stahlwerk zudem nicht vollständig stillgelegt werden, sondern muss weiter im Betrieb bleiben. Allein thyssenkrupp rechnet bis 2050 mit notwendigen Investitionen für die Umstellung auf eine klimaneutrale Stahlproduktion mit 10 Milliarden Euro [11].

Letzten Endes müssen zudem die global gehandelten Stahlprodukte dabei weiterhin wettbewerbsfähig bleiben.

3. Neue Prozesse, neue Schlacken

Die beschriebene crossindustrielle Symbiose aus Stahl- und Zementindustrie erscheint zukünftig somit deutlich schwieriger. Der Wegfall des in der Zementindustrie gerne eingesetzten Hüttsands würde neben dem Primärrohstoffbedarf zu einem deutlichen Anstieg an CO₂-Emissionen führen. Die zukünftige Verlagerung der Schlackenerzeugung vom Hochofen hin zum Elektrolichtbogenofen stellt ohne gesonderte Behandlung keinen Mehrwert für die Zementindustrie dar, da sich diese zwei Schlackentypen gänzlich voneinander unterscheiden, Tabelle 1 [6].

	Hochfenschlacke	Elektroofenschlacke
	Ma.-%	
CaO	34–43	20–36
SiO ₂	35–40	10–18
MgO	7–16	3–7
Al ₂ O ₃	8–12	4–9
Fe ₂ O ₃	0,1–1,0	29–48

Tabelle 1:

Typische, chemische Zusammensetzungen von Hochofen- und Elektroofenschlacken

Die entstehende Elektroofenschlacke bei vollständigem Einsatz von Eisenschwamm unterscheidet sich zwar teils wesentlich von der heute in Deutschland üblichen Elektroofenschlacken auf Schrottbasis, da maßgeblich die Gehalte an Legierungselementen geringer ausfallen, welche vornehmlich aus dem Schrott in die Schlacke überführt werden.

Dennoch besitzt sie eine deutlich höhere Basizität (CaO/SiO_2) als jene aus dem Hochofen und verfügt auch bei rascher Abkühlung mittels Wassergranulation nicht über latent hydraulische Eigenschaften, da diese in ihrer Morphologie kristallin und nicht glasig erstarren. Für die Substitution von Klinker als hydraulisches Bindemittel sind die Schlacken wiederum nicht kalkreich genug, damit sich notwendige Mineralphasen wie Tricalciumsilikate in ausreichender Menge bilden, welche im Zement zu einer Festigkeitsentwicklung beitragen. Weiterhin bestehen Elektroofenschlacken zu etwa einem Drittel aus Eisenoxiden, welchen in dieser Größenordnung kein Festigkeitsbeitrag zugeordnet werden kann und deshalb als nicht reaktive Bestandteile einen Ballast für den Zement darstellen.

Ausblick für die Elektroofenschlacke für die Zementindustrie

Da in ihrer üblichen vorliegenden kristallinen Form die Elektroofenschlacke nur als Gesteinskörnung eingesetzt werden kann, ein Markt welcher sich zunehmend als schwierig darstellt, insbesondere wenn sich die Mengen an Elektroofenschlacke deutlich steigern würden, sind sowohl die Stahl- als auch die Zementindustrie bestrebt neue Lösungen zu finden, um die Jahrhunderte lange Zusammenarbeit fortzuführen.

Der Prozess im Elektroofen lässt metallurgisch bedingt keine Veränderung der Schlacke in dem Maße zu, dass diese einer Hochofenschlacke ähnelt. Deshalb werden Möglichkeiten untersucht nach dem Prozess eine Art sekundäre Schlackenmetallurgie durchzuführen.

In abgeschlossenen Forschungsvorhaben wurde bereits eine mögliche Transformation der Elektrolichtbogenofenschlacke hin zu einem klinkerähnlichen Material untersucht [9]. Die im Labor sehr positiven Ergebnisse ließen jedoch keine einfache Übertragbarkeit auf die industrielle Praxis zu, da neben ökonomischer Aspekte auch metallurgische Gründe gegen diese Verfahrensweise sprechen. Neben der Anhebung des CaO -Gehalts wären prozessuntypische Temperaturen notwendig, um die steigende Viskosität aufgrund des erhöhten Kalksatzes und verringerter Eisenoxidgehalte zu kompensieren.

Weiterhin wurde jedoch auch der vielversprechendere Weg zur Erzeugung eines hüttensandähnlichen Materials untersucht, welcher aufgrund einer Konditionierung mittels SiO_2 Trägern zu einer deutlich besseren Verfahrenstechnik führt.

Die sich in ihrer Zusammensetzung andersartigen Elektroofenschlacken auf Eisenschwamm-Basis lassen keine direkte Übertragbarkeit der im Projekt untersuchten Schlacken auf Schrottbasis zu, jedoch können hieraus Ableitungen gezogen werden, um die entwickelten Prozesse und Ideen zu übertragen. Perspektivisch könnten diese Ansätze zur Schlackenbehandlung für die zukünftigen Stahlerzeugungsrouten wieder zu einem beidseitigen Benefit für Stahl- und Zementindustrie beitragen.

Quantitäten

Neben den technischen Möglichkeiten und den Quantitäten, müssen auch die zukünftig zur Verfügung stehende Schlackenmengen betrachtet werden. Unter Annahme

diverser Rahmenbedingungen, wie beispielsweise die Beibehaltung der derzeitigen Rohstahlerzeugungskapazität in Deutschland, kann dies folgendermaßen abgeschätzt werden.

Basierend auf den Daten von 2018 [8] liegt die durchschnittliche Schlackenrate der deutschen Hochöfen bei etwa 280 kg/t Roheisen. Der Elektroofen liegt dabei mit etwa 130 kg/t Rohstahl etwa halb so hoch, basiert aber auf den Daten mit Schrott als maßgebliches Einsatzmaterial. Bei einer direkten Übertragung würde dies eine Abnahme von etwa 50 % bedeuten, verschoben von Hochofen- zur Elektroofenschlacke. Mit den heute bereits erzeugten Elektroofenschlacken mit Schrott als Einsatzmaterial würden dann zukünftig in Summe etwa 5,2 Millionen Tonnen pro Jahr an Elektroofenschlacken entstehen.

Die beschriebene prozesstechnisch enge Verbindung zwischen Hochofen und LD-Konverter wird weiterhin auch hier zu einer Abnahme an LD-Schlacke führen. Jedoch kann in Abhängigkeit der zu produzierender Stahlgüte nicht vollständig auf den Einsatz von LD-Konvertern verzichtet werden, sodass auch hier zukünftig gewisse Mengen an LD-Schlacke erzeugt werden. Aufgrund der unterschiedlichen Produktportfolios und interner Daten können dazu jedoch nur schwer Abschätzungen getroffen werden.

4. Stäube

Neben Schlacken stellen auch Stäube und Schlämme mit etwa 2,2 Millionen Tonnen in 2018 in Deutschland einen großen Teil an erzeugten Nebenprodukten dar [5]. Dabei wird ähnlich wie bei der Schlacke zwischen den Stäuben aus der Primärstahlerzeugung (Gichtgas- und Konverterstaub) und der Elektrostahlerzeugung unterschieden. Während heutzutage knapp 50 % aller Stäube über die Sinteranlage intern recycelt werden können, werden Elektroofenstäube heute meist von externen Recyclingfirmen aufgenommen, um das darin enthaltene Zink zurück zu gewinnen. Dieses stammt aus den Schrotten, welche aus verzinkten Blechen, Autokarosserien, etc. bestehen und aufgrund wachsender Anforderungen an den Korrosionsschutz die Zinkgehalte im Schrott seit Jahren ansteigen lassen, Bild 2.

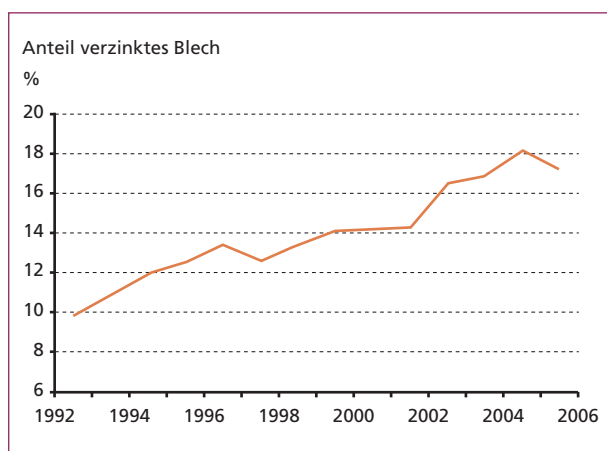


Bild 2:

Anteil von verzinktem Blech an der gesamten Sauerstahlproduktion

Quelle: Stubbe, G.; Harp, G.; Hillmann, C.; Scholl, W.: Stahl und Eisen (2008), Vol. 128, Nr. 2, S. 56-60

Die Rückgewinnung der Elektroofenstäube verläuft üblicherweise über Drehrohröfen, in welchen das Zink in die Gasphase oxidiert wird, um anschließend über Kondensation zurückgewonnen zu werden. Dieser Prozess bedarf einen gewissen Mindest-Zinkgehalt von etwa 17 Ma.-% [15]. Für Stäube mit sehr geringen Zinkgehalten bis etwa 3 Ma.-% wäre dann wiederum die Rezyklierung über den DK-Prozess möglich, welcher es seit vielen Jahren ermöglicht, Stäube aus der integrierten Hochofen-Konverter-Stahlerzeugung aufzunehmen. Mittels Sinteranlage und Schachtofen sowie einer aufwändiger Gichtgasreinigung können so Zink und Eisen zurückgewonnen werden, um dieses in die Industrie zurück zu führen.

Durch den Einsatz von Eisenschwamm werden die Zinkgehalte in den Elektroofenstäuben voraussichtlich sinken, sodass diese unter die kritische Grenze des Drehrohr-Prozesses fallen könnten. Da jedoch auch weiterhin Schrott eingesetzt wird, werden die Zinkgehalte aber auch über der Grenze des DK-Prozesses liegen. Da es in diesem Zwischenraum bisher kein Verfahren im großtechnischen Betrieb gibt, könnte dies dazu führen, dass metallurgisch die Stäube nicht mehr rezykliert werden können und andere Verwertungswege, gegebenenfalls sogar eine Deponierung notwendig wären.

5. Zusammenfassung

Für die Umstellung der Prozesse in der Stahlindustrie sind noch zahlreiche Teilschritte notwendig, Entwicklungen durchzuführen und die Rahmenbedingungen müssen gesetzt werden. Dabei stehen die Erzeugung und Verfügbarkeit von Wasserstoff bzw. grüner elektrischer Energie in ausreichender Menge im Fokus. Dann könnten Aggregate wie der Hochofen tatsächlich in 30 Jahren verschwunden und ersetzt worden sein. Jedoch ändert sich nicht nur die Prozesskette vor und während der Stahlproduktion, sondern auch dahinter in Bezug auf ihre Nebenprodukte. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Stahl- und Zementindustrie könnte aufgrund der neuen Schlacken beendet sein, mit dem Resultat eines Anstiegs an CO₂ Emissionen in der Zementindustrie, welches sich rohstoffbedingt nicht vermeiden lässt. Aufgrund dessen werden in den letzten Jahren die Forschungsaktivitäten zur Nutzung von Elektroofenschlacke in der Zementindustrie intensiviert, um für beide Industrien aber auch den Standort Deutschland und Europa, einen Benefit zu erwirken. Zudem kann am Beispiel der Stäube aus der Stahlindustrie gezeigt werden, dass aufgrund sinkender Zinkgehalte im Elektrostahlbereich es zu einem Bruch in der Kreislaufwirtschaft an dieser Stelle kommen kann, da bisher kein in Betrieb befindliches Verfahren existiert, um diese Stäube zu verarbeiten.

6. Quellen

- [1] Braun, U. Zukunftsorientiert: Stahlproduktion mit Wasserstoff in Hamburg. Präsentation Hütentag 2019, Essen
- [2] Brinner, A.; Schmidt, M.; Schwarz, S.; Wagener, L.; Zuberbühler, U. : Technologiebericht 4.1 Power-to-gas (Wasserstoff). In: Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken, 2018

- [3] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Kurzinformation Elektromobilität bzgl. Strom- und Ressourcenbedarf, 2018
- [4] Bundesrat: Entwurf eines Gesetzes zu dem Übereinkommen von Paris vom 12. Dezember 2015, Drucksache 427/16, 2016
- [5] Drissen, P.: Aufkommen und Verbleib von Stäuben, Schlämmen und Walzzunder der Eisen- und Stahlindustrie. Report des FEhS-Instituts, 26. Jahrgang Nr. 2, 2019, S.13-17
- [6] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Merkblatt über die Verwendung von Eisenhüttenschlacken im Straßenbau, Köln, 2013
- [7] Grün, R.: Der Hochofenzement und seine Verwendung. 4. Auflage, Berlin, 1928
- [8] Merkel, Th: Daten zur Erzeugung und Nutzung von Eisenhüttenschlacken 2018. Report des FEhS-Instituts, 26. Jahrgang Nr. 1, 2019, S.25-26
- [9] Schubert, M.; Mudersbach, W.; Ehrenberg, A.; Algermissen, D.: Umweltentlastung durch Schonung von Primärressourcen und Vermeidung von Kohlendioxidemissionen bei der Rohstoffaufbereitung sowie Nutzung des Energieinhaltes von flüssiger Elektroofenschlacke bei gleichzeitiger Vermeidung der Deponierung von Reststoffen durch Umwandlung der schmelzflüssigen Elektroofenschlacke in ein Material mit Klinkereigenschaften. DBU-Abschlussbericht 29689-21/2, 2016
- [10] Stubbe, G.; Harp, G.; Hillmann, C.; Scholl, W.: Stahl und Eisen, Vol. 128, Nr. 2, S. 56-60, 2008
- [11] thyssenkrupp Steel Europe AG: Klimastrategie. Abgerufen 17. Februar 2020, von <https://www.thyssenkrupp-steel.com/de/unternehmen/nachhaltigkeit/klimastrategie/>
- [12] Transport & Environment: Roadmap to decarbonising European cars, 2018
- [13] Umweltbundesamt auf Basis AG Energiebilanzen: Auswertungstabellen zur Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2017, Stand 07/2018
- [14] Voestalpine AG: EU Seminar *Steel Industry: The Wind of Change*, Brüssel, 31.01.2018
- [15] von Billerbeck, E.; Ruh, A.; Dae-Soo, K.: Verarbeitung von Filterstäuben aus der Elektrostahlerzeugung im Wälzprozess. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Mineralische Nebenprodukte und Abfälle. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014, S. 387-397
- [16] Worldsteel Association: World Steel in Figures 2019
- [17] Yilmaz, C.: Maßnahmen zur Dekarbonisierung des Hochofenprozesses durch Einsatz von Wasserstoff. In: Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen, Band 54. Göttingen: Cuvillier Verlag, 2018

Ansprechpartner



David Algermissen, M.Sc.

FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e.V.

Abteilungsleiter Sekundärrohstoffe / Schlackenmetallurgie

Bliersheimer Str. 62

47229 Duisburg, Deutschland

+49 2065 9945-12

d.algermissen@fehs.de