

# Disruptive Dekarbonisierung in der Industrie: Flexibilität und Kreislaufwirtschaft bei der Erzeugung von Roheisen

Andreas Pastowski

Eine zentrale Anforderung für die zukünftige Industrieproduktion ist die Klimaneutralität. Dekarbonisierte Prozesse beruhen häufig auf der direkten oder indirekten (z.B. mittels  $H_2$ ) Elektrifizierung. Dabei stellen sich Fragen nach der energetischen Effizienz dieser Prozesse, nach ihren Potenzialen für einen flexiblen Betrieb sowie nach der Erfüllung kreislaufwirtschaftlicher Anforderungen wie Materialeffizienz und Schließung von Stoffkreisläufen. Der Artikel betrachtet die disruptiv dekarbonisierte Erzeugung von primärem Roheisen und bewertet drei Produktionstechniken dazu.

## Herausforderungen

Der Übergang zu einer dekarbonisierten Grundstoffindustrie erfordert entsprechend Alter und technischer Zusammensetzung der Produktionsanlagen eine Kombination aus konventionelle Prozesse optimierenden und disruptiv dekarbonisierten technischen Ansätzen. Letztere werden als disruptiv bezeichnet, weil sie konventionelle, auf Kohlenstoff basierte Prozesse komplett ablösen, was für das Erreichen ambitionierter Klimaschutzziele unverzichtbar ist.

Disruptiv wirken vielfach auch die ausgelösten Veränderungen im Bereich der Energie- und Rohstoffversorgung. Diese Transformation erfordert ein auf regenerativer Energiebereitstellung basierendes Energiesystem. Sie steigert die Nachfrage nach Strom teilweise dramatisch und für die inländische Produktion müssen womöglich regenerativ erzeugte Energieträger wie  $H_2$  in großem Maßstab importiert werden. Rohstofflich ist eine zentrale Nebenbedingung, dass der Einsatz effizient erfolgt und dass Neben- und Abfallprodukte auch anderer Prozesse sinnvollen Verwendungen zugeführt werden können.

## Betrachtete Produktionstechniken für die Erzeugung von primärem Roheisen

Im Falle der disruptiv dekarbonisierten Erzeugung von primärem Roheisen stehen verschiedene Produktionstechniken zur Auswahl, von denen drei einer sondierenden Betrachtung unterzogen worden sind (siehe Abb. 1). Der sondierend limitierte Charakter



Abstich am Hochofen in der Eisenproduktion

Bild: Adobe Stock

betrifft neben den nachfolgend vorgenommenen vorläufigen Bewertungen wegen weiterer in der Entwicklung befindlicher Verfahren auch die Zahl der mittel- bis langfristig als relevant einzustufenden Produktionstechniken.

Die Betrachtungen wurden auf Roheisen beschränkt und nicht auf die Erzeugung von Stahl ausgedehnt, um die Komplexität zu begrenzen. In Abhängigkeit von der gewünschten Qualität des Stahls (Legierung) und dem Einsatz von Schrott sowie von Elektrolichtbogen- oder Induktionsöfen können sich für Stahl hinsichtlich Effizienz und THG-Emissionen abweichende relative Bewertungen ergeben. Eine weitergehende

vergleichende Bewertung von Stahl für das konventionelle Verfahren und die alkalische Elektrolyse findet sich in [1].

## Reduktion von Eisenerz mit unterschiedlichem Einsatz von $H_2$

Grundsätzlich kann auch im Hochofen Wasserstoff als Reduktionsmittel beigemischt werden. Dabei wird Kohlenstoff teilweise durch Wasserstoff ersetzt. Dies baut auf der mit fast 5 % Anteil an der globalen Erzeugung [2] etablierten Direktreduktion mit Erdgas auf und kann somit für Altanlagen als Brückentechnologie dienen [3]. Die hier im Mittelpunkt stehende disruptive Variante der Direktreduktion mit zu 100 % regenerativ erzeugtem Wasserstoff als Reduktionsmittel erfordert dage-

Produktionstechnik *	Bezeichnung / Projekt / Unternehmen / Standort	Einsatzreife / Verfügbarkeit	Spez. Energieverbrauch / THG-Minderung (Scope 1 u. 2) gegenüber HKR <sup>1</sup>
Direktreduktion mit H <sub>2</sub>	DRI (Direct Reduced Iron), HYBRIT, Lulea (Schweden)	TRL 6-8 * Kommerzielle Verfügbarkeit 2025 *** / 2028 ****	63 kg H <sub>2</sub> pro t (je nach Eisenerzqualität) -95% THG gegenüber HKR *** (0,1 t CO <sub>2</sub> /t) ****
Alkalische Elektrolyse	Electrowinning, SIDERWIN, Arcelor Mittal, Maizières-lès-Metz (Frankreich)	TRL 4 / 6* Kommerzielle Verfügbarkeit 2035 *** / ****	Rd. 12 GJ Strom pro t 15-30% weniger Strom pro t Stahl als DRI * -95% THG gegenüber HKR *** (0,1 t CO <sub>2</sub> /t) ****
Hochtemperatur-Elektrolyse	MOE (Molten Oxide Electrolysis), Boston Metal, Woburn (MA USA) **	TRL 4 * Kommerzielle Verfügbarkeit 2035 *** / ****	Rd. 13 GJ Strom pro t 15-30% weniger Strom pro t Stahl als DRI * -95% THG gegenüber HKR *** (0,1 t CO <sub>2</sub> /t) ****

<sup>1</sup> Scope 1 u. 2 einschließlich Veredelung zu Rohstahl im Lichtbogenofen, bei 100% regenerativer Energie, HKR = Hochofen-Konverter-Route.  
\* [6, 7], \*\* [8], \*\*\* [9], \*\*\*\* [10].

Abb. 1 Art, Einsatzreife und Treibhausgas-Minderung der betrachteten Produktionstechniken

gen eine grundlegend neue Anlagentechnik, wie sie etwa bei thyssenkrupp in Duisburg eingesetzt werden soll.

### Reduktion von Eisenerz mittels alkalischer Elektrolyse

Das als Electrowinning bezeichnete elektrolitische Verfahren zur Produktion von primärem Roheisen verwendet eine alkalische Lösung von Eisenerz bei rund 110°C. Diese Produktionstechnik ist das Ergebnis einer Reihe von Forschungsprojekten der Europäischen Kommission [4] und die daran beteiligten Forschungs- und Industriepartner treiben die Entwicklung zur Marktreife voran.

### Reduktion von Eisenerz mittels Hochtemperatur-Elektrolyse

Ein Nebenprodukt der Raumfahrttechnik ist die elektrolitische Schmelzreduktion von

Eisenerz bei rd. 1.550°C (Molten Oxide Electrolysis – MOE). Das ursprüngliche Entwicklungsziel war die Freisetzung von Sauerstoff sowie die Erzeugung von Silizium und Metallen für die Versorgung von stationären extraterrestrischen Missionen. Auf der Basis von entsprechenden Projekten der NASA [5] erfolgte 2013 mit Boston Metal eine Ausgründung des MIT mit dem Ziel, diese Produktionstechnik zunächst für Roheisen marktreif zu machen.

### Eigenschaften der betrachteten Produktionstechniken zur Erzeugung von primärem Roheisen

Hinsichtlich der technischen Einsatzreife ist die Direktreduktion mit H<sub>2</sub> deutlich weiter fortgeschritten als die elektrolitischen Ver-

fahren, was ihr eine herausragende Rolle für anstehende Neuinvestitionen in der Stahlindustrie verleiht. Entsprechend gibt es seitens führender Hersteller für diese Produktionstechnik bereits diverse Absichtserklärungen und Investitionsplanungen.

Grundsätzlich können mit den drei betrachteten disruptiv dekarbonisierten Produktionstechniken für Roheisen sehr hohe Minderungsraten bei Treibhausgasen erzielt werden. Erwartbare Unterschiede bestehen bei der Energieeffizienz zugunsten der elektrolitischen Verfahren, bei denen auf die elektrolitische Erzeugung von Wasserstoff verzichtet werden kann. Dies hat bei ausschließlichem Einsatz von regenerativ erzeugtem Strom aber keinen relevanten Einfluss auf die THG-Minderung gegenüber der Hochofen-Konverter-Route.

Produktionstechnik *	Anbindung an das Stromnetz	Theoretische Flexibilität: Reduktion Eisenerz und Weiterverarbeitung zu Roheisen
Direktreduktion mit H <sub>2</sub>	Indirekt über H <sub>2</sub> -Produktion national / extern bei H <sub>2</sub> -Importen / perspektivisch solarthermische H <sub>2</sub> O-Spaltung ohne Strom möglich **	Hoch bei der H <sub>2</sub> -Produktion und Weiterverarbeitung des Roheisens (Batch-Prozess beim Elektrofen)
Alkalische Elektrolyse	Direkt, nationales / kontinentales Netz, Interkontinental Beispiel: Xlinks-Projekt Marroko / UK ***	Möglich (110°C u. modular) sowie hoch bei der Weiterverarbeitung des Roheisens (Batch-Prozess beim Elektrofen)
Hochtemperatur-Elektrolyse	Direkt, nationales / kontinentales Netz, Interkontinental Beispiel: Xlinks-Projekt Marroko / UK ***	Möglich (rd. 1.600°C u. modular) aber effizientere Weiterverarbeitung aus „einer Wärme“

\* [6], \*\* [11], \*\*\* [12]

Abb. 2 Netzanbindung und theoretische Flexibilität der betrachteten Produktionstechniken

Produktionstechnik *	KW Einsatzstoffe	KW Nebenprodukte	Trade-offs (KW und Klima)	Kostenänderung 2030 ****1)	Herausforderungen
Direktreduktion mit H <sub>2</sub>	Hohe Qualität des Eisenerzes erforderlich	Nebenprodukt Wasser, kein Hüttensand	Hüttensand in der Zementproduktion	+ 23-48% 2030 / HKR	H <sub>2</sub> -Bedarf, Energieeffizienz <sup>2)</sup> , Qualität Eisenerz, Kosten
Alkalische Elektrolyse	Alternativer Einsatzstoff Rotschlamm aus der Aluminiumproduktion	Nebenprodukt Sauerstoff, kein Hüttensand	Hüttensand in der Zementproduktion	2030 nicht verfügbar	TRL, Strombedarf, Flexibilität, Kosten
Hochtemperatur-Elektrolyse	Mittlere bis hohe Eisenerzqualitäten erforderlich **	Nebenprodukt Sauerstoff, kein Hüttensand	Hüttensand in der Zementproduktion	2030 nicht verfügbar	TRL, Strombedarf, Flexibilität, Kosten

KW = Kreislaufwirtschaft

<sup>1)</sup> Ohne Berücksichtigung von Kostensteigerungen bei Energieträgern in 2022.

<sup>2)</sup> Bei elektrolytischer Bereitstellung von H<sub>2</sub>.

\* [6], \*\* [8], \*\*\*\* [9].

Abb. 3 Kreislaufwirtschaft (KW), Wechselwirkungen und Herausforderungen bei den betrachteten Produktionstechniken

Während Stromeinsatz und Flexibilität bei der Direktreduktion mit Wasserstoff indirekt vorgelagert und räumlich getrennt bei der Erzeugung von H<sub>2</sub> realisiert werden können, sind die Elektrolysen direkt an das regionale Stromnetz angeschlossen.

Damit entsteht für den Betrieb der elektrolytischen Produktionstechniken unmittelbar eine deutlich erhöhte Nachfrage nach regenerativ erzeugtem Strom in einem Sektor, der bislang lediglich für die Erzeugung von sekundärem Stahl aus Schrott in größerem Umfang Strom eingesetzt hat. Auf der Seite der Stromerzeugung bedeutet dies, dass für den kontinuierlichen Einsatz der elektrolytischen Verfahren mehr Flexibilität bereitgestellt werden muss, wenn diese ihrerseits keine entsprechenden Potenziale für Flexibilität aufweisen.

Ein Vorteil der Direktreduktion mit Wasserstoff ist also, dass die dafür erforderliche Stromproduktion auf regenerativer Basis nicht zwingend im Inland oder im benachbarten europäischen Ausland erfolgen muss. Vielmehr kann Wasserstoff prinzipiell interkontinental gehandelt und importiert werden. So lassen sich in der Standortregion erhöhte absolute Flexibilitätsbedarfe einer gesteigerten regenerativen Stromproduktion vermeiden (siehe Abb. 2).

Während bei der Hochofen-Konverter-Route vor allem das unerwünschte CO<sub>2</sub> als Nebenprodukt anfällt, liefert die Direktreduktion von Eisenerz mit Wasserstoff Wasser, das

u.U. keinen relevanten wirtschaftlichen Wert hat. Dagegen erzeugen die elektrolytischen Reduktionstechniken beträchtliche Mengen Sauerstoff, der für bestimmte Produktionen einsetzbar wäre (siehe Abb. 3).

Die Hochofen-Konverter-Route produziert als Nebenprodukt erhebliche Mengen an Hüttensand. Bei den betrachteten dekarbonisierten Produktionstechniken wird Hüttensand in der gewohnten Zusammensetzung nicht mehr anfallen. Hüttensand wird gegenwärtig in der Zementproduktion eingesetzt und ersetzt dort andere CO<sub>2</sub>-intensive Rohstoffe. Ohne Ausweichstrategien entstehen kreislaufwirtschaftlich wie klimapolitisch kontraproduktive Effekte. Diesen ist primär in der Zementindustrie zu begegnen.

### Fazit

Die drei betrachteten disruptiv dekarbonisierten Produktionstechniken zur Erzeugung von primärem Roheisen unterscheiden sich vor allem hinsichtlich der folgenden Eigenschaften:

- Gegenüber dem Hochofen nimmt vor allem die Bedeutung von Strom zu, sei es indirekt bei der Erzeugung von H<sub>2</sub> per Elektrolyse, sei es direkt durch die elektrolytische Reduktion des Eisenerzes.
- Elektrolytische Verfahren beanspruchen die regionale Stromerzeugung dabei stärker als die Direktreduktion insbesondere mit importiertem H<sub>2</sub>.

- Die deutsche Roheisenproduktion steht somit vor der Restriktion, dass die inländische regenerative Stromproduktion nicht ausreichen dürfte, viele Nachbarländer für die Dekarbonisierung ebenfalls einen stärkeren Einsatz von regenerativem Strom anstreben und somit für Stromexporte nach Deutschland nur eingeschränkt zur Verfügung stehen.
- Bei der Direktreduktion mit H<sub>2</sub> gibt es Flexibilitätspotenziale bei der inländischen Erzeugung des H<sub>2</sub>, während die Roheisenerzeugung bei ausreichenden H<sub>2</sub>-Speichern kontinuierlich betrieben werden kann.
- Bei H<sub>2</sub>-Importen aus Ländern außerhalb des europäischen Stromnetzes werden zusätzlicher Stromverbrauch und Flexibilität jenseits dieses Netzgebietes in den Exportländern wirksam.
- Kreislaufwirtschaftlich relevant sind die Anforderungen und Potenziale bei den einsetzbaren Rohmaterialien. Dabei geht es um Eisenerzqualitäten und alternative Einsatzstoffe (z.B. Rotschlamm aus der Aluminiumproduktion).
- Die Direktreduktion mit H<sub>2</sub> erfordert hohe Eisenerzqualitäten, die aber nur 5 % vom globalen Angebot ausmachen [13]. Den qualitativen Anforderungen kann teilweise im Rahmen der notwendigen Pelletierung des Eisenerzes entsprochen werden.
- Zudem fallen bei der dekarbonisierten Erzeugung von Roheisen Nebenprodukte neu an (H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>) oder fallen weg (Hüttensand). Wasser als Nebenprodukt dürfte

in nicht ariden Gebieten nur von geringem Interesse sein. Sauerstoff könnte dagegen abhängig von der Reinheit industriell genutzt werden.

- Letztlich sprechen die unterschiedlichen Profile der betrachteten Produktionstechniken je nach den konkreten Bedingungen für einen komplementären Einsatz, sobald auch die elektrolytischen Verfahren großtechnisch verfügbar sind. Große, weltweit agierende Stahlkonzerne wie ArcelorMittal setzen daher darauf, sämtliche der hier betrachteten Produktionstechniken zur Einsatzreife zu bringen.
- Schließlich könnte durch die neuen Produktionstechniken eine grundsätzlich veränderte Standortwahl ausgelöst werden. War in der Vergangenheit Kokskohle ein wichtiger Standortfaktor, so werden in Zukunft neben Eisenerzlagern kostengünstig erzeugbare regenerative Energieträger über Standorte entscheiden [14].

## Quellen

- [1] Bitar, J.; Kounina, A.: Environmental life cycle assessment intermediary report. Project: SIDERWIN Deliverable: D7.4., 2020.
- [2] World Steel Association: World Steel in Figures 2022. Brussels 2022.
- [3] Arens, M.; Åhman, M.; Vogl, V.: Which countries are prepared to green their coal-based steel industry with electricity? – Reviewing climate and energy policy as well as the implementation of renewable electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 143, June 2021.
- [4] SIDERWIN: Development of new methodologies for Industrial CO<sub>2</sub>-free steel production by electrowinning 2022. <https://www.siderwin-spire.eu>
- [5] Curreri, P.A.; Ethridge, E.C.; Grugel, R.N.; Hudson, S.B.; Miller, T.Y.; Sadoway, D.R.; Sen, S.: Process Demonstration for Lunar in Situ Resource Utilization – Molten Oxide Electrolysis. NASA/TM-2006-214600. National Aeronautics and Space Administration. Alabama 2006.
- [6] IEA: Iron and Steel Technology Roadmap – Towards Sustainable Steelmaking. Paris 2020.
- [7] SIDERWIN: Questions & Answers arisen during the webinar 24 Nov 2021. [https://www.siderwin-spire.eu/sites/siderwin.drupal.pulsartecnia.com/files/documents/SIDERWIN\\_Webinar\\_20211124\\_QuestionsAnswers.pdf](https://www.siderwin-spire.eu/sites/siderwin.drupal.pulsartecnia.com/files/documents/SIDERWIN_Webinar_20211124_QuestionsAnswers.pdf)
- [8] Crownhart, C.: How green steel made with electricity could clean up a dirty industry. *MIT Technology Review*, June 28 2022.
- [9] World Economic Forum: Net-Zero Industry Tracker. Geneva 2022 World Economic Forum.
- [10] MPP Mission Possible Partnership: Net-Zero Steel Initiative. <https://missionpossiblepartnership.org/wp-content/uploads/2021/10/MPP-Steel-Transition-Strategy-Oct-2021.pdf>
- [11] Roeb, M.; Brendelberger, S.; Rosenstiel, A.; Agrafiotis, C.; Monnerie, N.; Budama, V.; Jacobs, N.: Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende. Teil 1: Technologien und Perspektiven für eine nachhaltige und ökonomische Wasserstoffversorgung. Köln 2020.
- [12] Xlinks: The Morocco-UK Power Project 2022. <https://xlinks.co/morocco-uk-power-project/>
- [13] OECD: The Heterogeneity of Steel Decarbonisation Pathways. Paris 2023.
- [14] Samadi, S.; Lechtenböhrer, S.; Viebahn, P.; Fischer, A.: Renewables Pull – Verlagerung industrieller Produktion aufgrund unterschiedlicher Kosten erneuerbarer Energien. 2021 <https://epub.wupperinst.org/frontdoor/index/index/docId/7793>

*A. Pastowski, Wuppertal Institut für Klima Umwelt Energie gGmbH, Wuppertal  
andreas.pastowski@wupperinst.org*

Das diesem Beitrag zugrundeliegende Vorhaben wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03SFK3L0-2 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.