

ENTWICKLUNG UND PROZESSINTEGRATION EINES CHEMICAL-LOOPING VERFAHRENS (H₂LOOP) FÜR DIE WASSERSTOFFGEWINNUNG IN INTEGRIERTEN STAHLWERKEN

Julien GÖTHEL^{1*}, Uwe PAHL²

Die Defossilisierung und Dekarbonisierung integrierter Stahlwerke erfordert innovative technologische Integrationen, die die gesamten stofflichen und energetischen Kreisläufe und internen Verwertungspfade der bei der Stahlerzeugung anfallenden Produkt- und Nebenströme berücksichtigen. Insbesondere der Hochofen als primäres Aggregat der etablierten Roheisenerzeugung der kohlenstoffbasierten Eisenerzreduktion bedingt in der metallurgischen Erzeugungskette die Koksproduktion in Kokereien und die Roheisenlogistik mit den Konvertoren für die Rohstahlerzeugung mit sich. Diese Produktionsroute bringt die Erzeugung von quantitativen Mengen an Kuppelgasen (Hochofengas, Konvertergas, Koksofengas) mit sich, die in heutigen integrierten Stahlwerken nahezu vollständig rückverstromt, thermisch verwertet oder stofflich genutzt werden, um die Energieautarkie für prozessbedingte Sekundärenergien (Dampf, Prozesswärme, Strom) zu gewährleisten und den Reduktionsmittelbedarf zu mindern, sodass die Wettbewerbsfähigkeit der Produktion gewährleistet werden kann. Ein Hochofen mit einer Jahresproduktion von 1.5 Mio. Tonnen Roheisen produziert pro Stunde einen Kohlenmonoxid Gasstrom als Bestandteil des Gichtgases von ca. 60.000 Nm³/h. Die Energie des Kohlenmonoxids kann mittels eines Chemical-Looping Verfahrens^[1] durch einen zweistufigen Redoxprozess innerhalb von Festbettreaktoren^[2] auf Wasserstoff übertragen werden. Das hier betrachtete Chemical-Looping-Verfahren basiert auf der sequenziellen Reduktion und Oxidation eines festen Sauerstoffüberträgermaterials aus Eisenoxid^{[3][4]}, dass zwischen den Oxidphasen Magnetit und Wüsttit oszilliert. In den Reduktoren wird das wieder erhitzte Gichtgas verwendet, wobei das enthaltene Kohlenmonoxid das Magnetit bei Temperaturen von > 850 °C nach einer endothermen Bruttoreaktion zu einem Wüstitzustand reduziert. Der Produktgasstrom aus diesem Beladungsprozess der Reaktoren beinhaltet über 40 % Kohlendioxid, welches technologisch effizienter und ökonomisch sparsamer abgetrennt und aufkonzentriert für CCU/CCS-Prozesse verwendet werden kann. Das erhaltene teilreduzierte Eisenoxid wird in den Oxidatoren mit Wasserdampf nach einer exothermen Bruttoreaktion zur chemischen Umwandlung in den Ausgangszustand gebracht. Das reoxidierte Magnetit schließt den Kreislauf durch die Rückführung in den folgenden Reduktionsprozess einer erneuten Konversion.^[5-7] Durch Einstellung der Gaseintrittstemperatur und des Wasserdampfmassenstroms kann ein autothermer Betrieb des Chemical-Looping-Verfahrens für die Wasserstoffproduktion erreicht werden. Die Prozessstabilität des Chemical-Looping-Verfahrens wird maßgeblich durch die morphologische Beständigkeit der Eisenoxid-Kontaktmasse unter den zyklischen thermochemischen Dauerbelastungen bestimmt. Die zentrale Herausforderung im Werkstoffdesign besteht in der Bewahrung der Werkstoffintegrität, die durch die induzierten thermochemischen Spannungen sowie die inhärenten Volumenänderungen während des Sauerstoffein- und -ausbaus hervorgerufen werden. Dazu müssen diffuse Stofftransportvorgänge, wie der Diffusion von Eisenkationen zur Festkörperoberfläche oder der Segregation von Additiven an die Ober- und -grenzflächen unterbunden werden. Diese Migrationsprozesse begünstigen die Ausbildung kohärenter Oberflächenfilme, welche interpartikuläre Bindungen ermöglichen und somit zu Agglomeration und der Bildung von Sinterclustern führen. Die Vermeidung dieser mikro- und makrostrukturellen Degradation ist zwingend erforderlich, um eine hinreichende Reaktionskinetik und eine Zyklenfestigkeit für einen Dauerbetrieb zu ermöglichen. Der in den integrierten Stahlwerken erzeugte Wasserstoff kann unterschiedlichen Verwendungszwecken zugeführt werden.^{[8][9]} Dies betrifft Anwendungen, dargestellt in Abbildung 1, wie

¹ *Julien.Goethel@ambarte.de, AMBARtec AG, Erna-Berger-Straße 17, 01097 Dresden,
+49 152 0807 60 79., www.ambartec.de

² Uwe.Pahl@rgh2.com, Rouge H2 Engineering AG, Puntigamer Str. 127, 8055 Graz,
+49 162 90 97 006, https://rgh2.com/

- 1) die eigene Wasserstoffbereitstellung für Prozesse der Wärmebehandlung, Oberflächentechnik und Sekundärmetallurgie, um den externen Zukauf von Wasserstoff zu vermindern,
- 2) die Injektion von Wasserstoff im Hochofen, um den Koksbedarf zu senken,^{[10][11]}
- 3) die wasserstoffbasierte Direktreduktionsverfahren Midrex und ENERGIRON/HyL III, indem Wasserstoff in der Übergangszeit von sowohl parallelem Hochofen- als auch DRI-Betrieb aus dem Hochofengas gewonnen wird, der DRI-Anlage zugeführt und resultierender Wasserdampf wieder dem Chemical-Looping Verfahren zugeführt wird

Für die Integrationsmöglichkeit 3) liegen die modellierten Wasserstoffgestehungskosten im Bereich von 2–3 €/kg und damit unter den prognostizierten Wasserstoffbezugskosten aus der Wasserstoffpipeline, wodurch die Standortresilienz und die Wettbewerbsfähigkeit durch die Wasserstoffeigenproduktion gestärkt werden. Die Integration dieses Chemical-Looping Verfahrens in den Hüttenverbund erfordert eine Reorganisation der bestehenden Kreisläufe, da ein substantieller Anteil des Hochofengases künftig nicht mehr primär verbrannt, sondern stofflich für die Wasserstoffproduktion verwertet wird. Dies beinhaltet die Optimierung der Gasverteilung des Gichtgases zwischen Kraftwerksanlagen, Prozesswärmebereitstellung und der Wasserstoffeigenproduktion sowie die Festlegung eines robusten und flexiblen Wasserstoffnutzungskonzepts. Im EU-Projekt H2Loop^[12] wird das Chemical-Looping Verfahrens erstmals im industriellen Umfeld (TRL 7) demonstriert. Die vorgesehene Demonstrationsanlage ist direkt an die Gichtgasleitung gekoppelt und hat zum Ziel im Dauerbetrieb > 100 kg Wasserstoff pro Tag zu produzieren. Der Fokus dieser Integration liegt auf der Überprüfung der Prozessstabilität unter realen Hüttenwerksbedingungen, insbesondere im Hinblick auf schwankende Gaszusammensetzungen, Staubfrachten^[13], Erprobung des Langzeitbetriebs mit Zykluszeiten von 20 Minuten^[14] und einem KI-gestützten Regelkonzept, das die Reaktor- und Prozesszustände mittels modellbasierter Steuerung überwacht und prognostiziert. Zur Sicherstellung der industriellen Durchführbarkeit und der nachhaltigen Integration in den Hüttenverbund sind zusätzlich eine Lebenszyklusanalyse (LCA) zur ökologischen Bewertung sowie die Entwicklung eines umfassenden Businessplanes zur ökonomischen Validierung und Kommerzialisierung vorgesehen. Dieses Chemical-Looping Verfahrens verbindet die Vorteile einer wettbewerbsfähigen Produktion von Wasserstoff aus Hüttingasen und der Möglichkeit einer günstigen Abscheidung von CO₂ für eine weitere Wertschöpfungskette. Durch die Kombination aus realer industrieller Erprobung, materialwissenschaftlicher Innovation und fortschrittlicher Prozessregelung liefert das EU-Projekt H2Loop wesentliche Erkenntnisse für die Ausgestaltung der nächsten Technologiegeneration, die einen Beitrag zur großskalige Eisenerzreduktionsprozesse in Richtung einer klimaneutralen Stahlproduktion setzt.

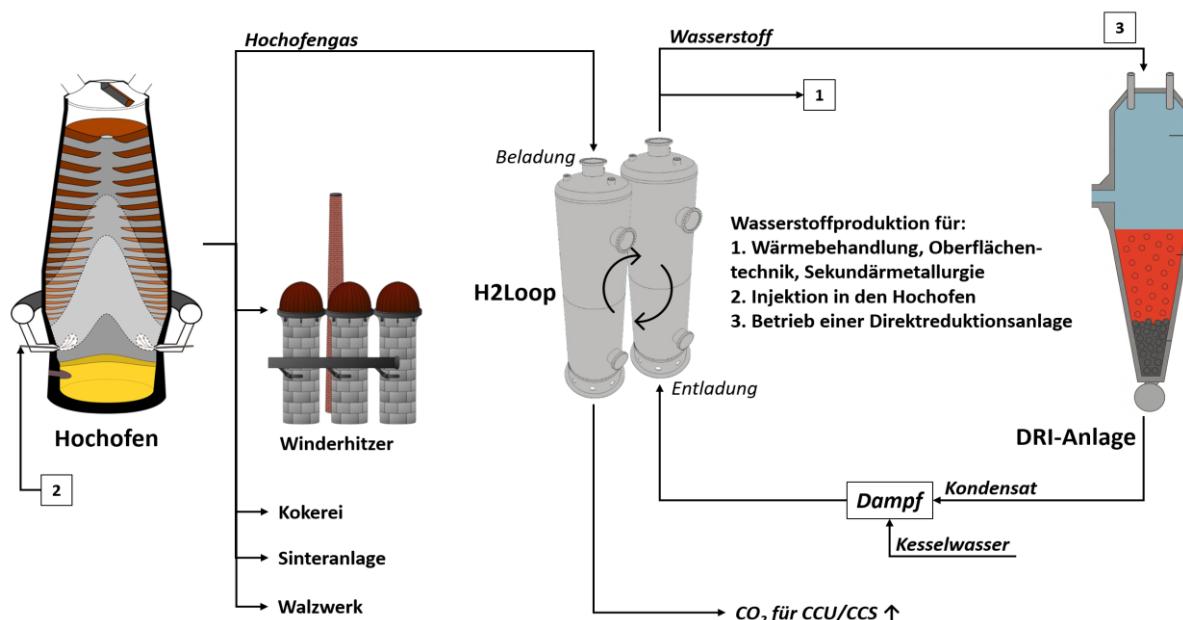


Abbildung 1: Integrationsmöglichkeit des Chemical-Looping Verfahrens an einen Hochofen zur Erzeugung von Wasserstoff aus Gichtgas.

Referenzen

- [1] B. Moghtaderi, "Review of the chemical looping process for hydrogen production," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 1, pp. 397–414, 2012.
- [2] S. Noorman, J. Van Sint Annaland, and J. A. M. Kuipers, "Packed bed chemical-looping processes: Thermodynamic analysis and reactor simulations," *Chemical Engineering Science*, vol. 66, pp. 200–210, 2011.
- [3] J. Göthel, K. J. Burkemann, and O. Volkova, "Review and Evaluation of Ceramic-Stabilized Iron Oxides for Use as Energy Storage Based on Iron-Steam Process," *Steel Research Int.*, vol. 96, no. 5, Art. no. 2400265, 2025.
- [4] M. Fernández-Téllez, et al., "Iron-based oxygen carriers for hydrogen production via chemical looping: Review and evaluation," *Fuel Processing Technology*, vol. 213, 106658, 2021.
- [5] S. Farooq et al., "Chemical looping for hydrogen generation from industrial waste gases: Process feasibility and integration," *Energy Conversion and Management*, vol. 252, 115012, 2022.
- [6] C. Pfeifer and H. Hofbauer, "Integrating chemical-looping processes into industrial gas networks: Exergy analysis and system optimization," *Journal of Cleaner Production*, vol. 308, 127302, 2021.
- [7] R. Knöldseder, W. Hofbauer, and M. Fuchs, "Evaluation of iron-oxide-based oxygen carriers for chemical looping gas conversion: Reaction kinetics, stability and sulphur tolerance," *Energy Technology*, vol. 9, no. 11, 2100555, 2021.
- [8] M. Larsson, M. Ryman, and K. Wang, "Energy system modelling of integrated steel plants: Options for hydrogen integration," *Journal of Sustainable Metallurgy*, vol. 5, pp. 345–358, 2019.
- [9] A. Rechberger, R. Kunde, and H. Rechberger, "Carbon and energy flows in the integrated steel mill: Potential for hydrogen-based transition," *Metallurgical Research & Technology*, vol. 117, no. 1, 109, 2020.
- [10] A. Babich and D. Senk, "Hydrogen injection into blast furnaces: Operational limits, reduction behaviour, and industrial experience," *Ironmaking & Steelmaking*, vol. 48, no. 6, pp. 581–590, 2021.
- [11] K. Meijer, "Blast furnace operation with H₂-rich gas injection: A thermodynamic and kinetic analysis," *Steel Research International*, vol. 92, no. 10, 2100178, 2021.
- [12] Europäische Kommission (2025): Sustainable decarbonisation of integrated steel plants by hydrogen production from chemical looping (H2loop, ID: 101193354). EU Funding & Tenders Portal. Verfügbar unter: <https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/portal/screen/opportunities/projects-details/43252449/101193354/RFCS2027?isExactMatch=true&frameworkProgramme=43252449&order=DESC&pageNumber=1&pageSize=50&sortBy=title> (Aufgerufen am 30. November, 2025)
- [13] Y. Sun, Z. Wu, X. Li, and K. Cen, "Effect of dust and impurities in steelworks gases on performance of iron-based oxygen carriers," *Fuel*, vol. 244, pp. 337–348, 2019.
- [14] H. Wang, X. Li, and J. Xu, "Long-term cycling stability of iron oxide oxygen carriers under high-frequency redox operation," *Chemical Engineering Journal*, vol. 428, 131103, 2022.