

H₂-basierte Stahlherstellung

Alexander Redenius, Martin Zappe

Stahlerzeugung, Dekarbonisierung, Primärstahlherstellung, direkt-reduziertes Eisen, Wasserstoff, Erdgas, Direktreduktionstechnologie

Um eine signifikante Dekarbonisierung der Primärstahlherstellung zu erreichen, nutzt die Salzgitter AG ein Alleinstellungsmerkmal der Eisenmetallurgie: Wasserstoff kann bei der Eisenerzreduktion Kohlenstoff ersetzen, was zur Bildung von Wasser (H₂O) anstelle von Kohlendioxid (CO₂) führt. Dazu hat die Salzgitter AG 2015 das SALCOS®-Programm (SALzgitter CO₂-reduzierte Stahlherstellung) entwickelt, das in diesem Artikel mitsamt der dazugehörigen Verfahren, Konzepte und Herausforderungen vorgestellt wird.

H₂-based steelmaking

To achieve significant decarbonization of primary steel production, Salzgitter AG is exploiting a unique selling point of iron metallurgy: hydrogen can replace carbon in iron ore reduction, resulting in the formation of water (H₂O) instead of carbon dioxide (CO₂). To this end, Salzgitter AG developed the SALCOS® program (SALzgitter Low CO₂ Steelmaking) in 2015, which is presented in this article along with the associated processes, concepts and challenges.

Stahlproduktion

Etwa 60 % der Rohstahlproduktion in Europa werden heute über die Primärstahlerzeugung, die konventionelle Hochofen-Konverter-Route, hergestellt. Die restliche Produktionsmenge entfällt auf die schrottbasierte Sekundärstahlerzeugung über Elektrolichtbogenöfen (im Englischen „Electric Arc Furnace (EAF)“). Die Sekundärstahlerzeugung basiert zu 100 % auf Stahlschrott, der in einem EAF mit elektrischer Energie eingeschmolzen wird. Aufgrund des Einsatzes von Schrott können die Anwendungsbereiche eingeschränkt sein. Darüber hinaus muss die begrenzte Verfügbarkeit von geeignetem Schrott berücksichtigt werden. Trotz der sehr guten Recyclingeigenschaften von Stahl wird auch in Zukunft eine nachhaltige CO₂-arme Primärstahlproduktionsroute notwendig sein.

Die konventionelle Primärstahlerzeugung in einem integrierten Stahlwerk umfasst verschiedene Produktionsanlagen. In der Kokerei wird die Kohle in Koks umgewandelt. Eine Erz-Feinfraktion wird in der Sinteranlage zu stückigem Sinter zusammengebacken. Diese beiden Prozesse sind notwendig, um stückiges Einsatzmaterial für den Hochofen zu erhalten, der im Gegenstromprinzip arbeitet und daher durchströmbar sein muss. Das Einsatzmaterial des Hochofens (im Englischen „Blast Furn-

ace (BF)“), die sogenannte „Möllerung“, bestehend aus Sinter, Pellets, Eisenerz und Zusatzstoffen, wird von oben schichtweise mit Koks in den BF eingebracht. Der Koks dient der Reduktion des sauerstoffhaltigen Eisenerzes, d. h. der Gewinnung von metallischem Eisen aus dem Eisenoxid. Von unten dringt Heißwind in den BF ein. Es findet ein allmählicher Massen- und Wärmeaustausch statt, sodass die eisenhaltigen Einsatzstoffe nach und nach reduziert und geschmolzen werden. Das geschmolzene Roheisen und die Schlacke werden regelmäßig abgestochen und getrennt. Das flüssige Roheisen wird im nächsten Schritt im Sauerstoffeinblas-Konverter (im Englischen „Basic Oxygen Furnace (BOF)“) zu Rohstahl „aufgefrischt“. Der „Frischen“-Prozess ist ein Sauerstoffaufblasverfahren, bei dem technisch reiner Sauerstoff auf das Bad geblasen wird. Diese Verbrennungsreaktion ist stark exotherm. Die überschüssige Wärme wird durch den Einsatz von etwa 20 % Kühltromm reduziert. In den nachfolgenden Behandlungen wird der Stahl entsprechend der gewünschten Zielqualität weiter veredelt und legiert. Die wesentlichen Elemente der konventionellen Hochofenroute sind im oberen Teil von **Bild 1** dargestellt.

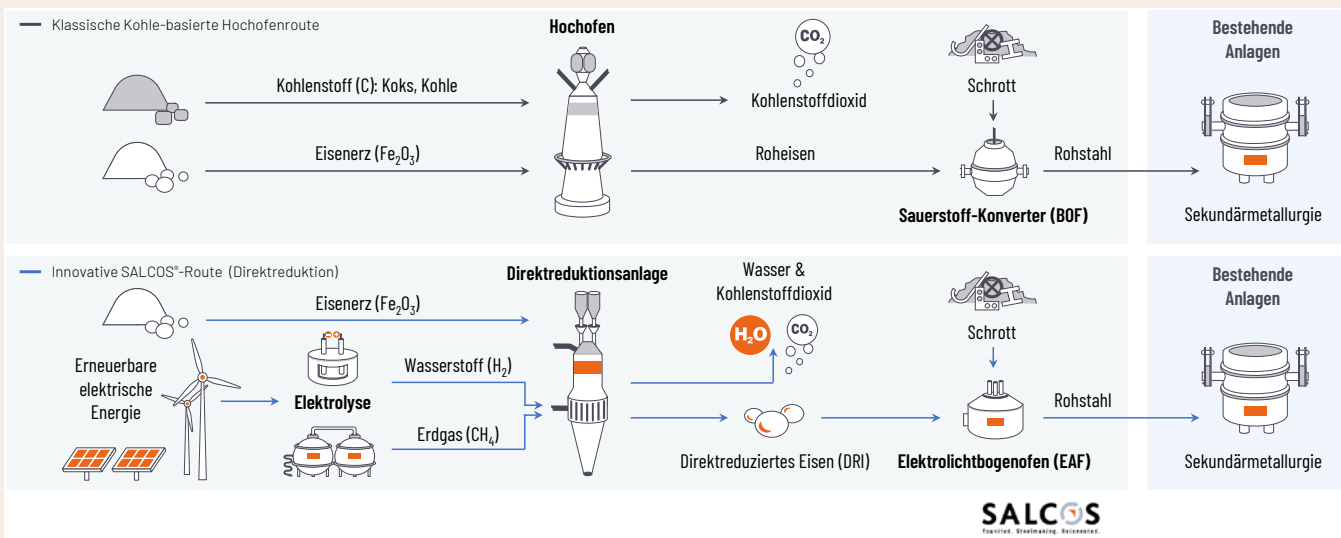


Bild 1: Klassische Kohle-basierte Hochofenroute und innovative H₂-basierte SALCOS®-Route (Quelle: Salzgitter AG)

SALCOS®

Der untere Teil der Abbildung stellt das SALCOS®-Konzept dar. Für eine signifikante Dekarbonisierung der Primärstahlerzeugung will die Salzgitter AG ein Alleinstellungsmerkmal der Eisenmetallurgie nutzen: Wasserstoff kann bei der Eisenerzreduktion Kohlenstoff ersetzen, was zur Bildung von Wasser (H₂O) anstelle von Kohlendioxid (CO₂) führt. Dazu hat die Salzgitter AG 2015 das SALCOS®-Programm entwickelt – Salzgitter Low CO₂-Steelmaking. Die große Stärke von SALCOS® liegt in der Nutzung, Anpassung und Integration bestehender Technologien, um deren technologischen Reifegrad für eine kurzfristige Umsetzung zu nutzen und damit auch zukünftigen Herausforderungen gerecht zu werden. Dies bietet die Möglichkeit, direkt großtechnische Anlagen einzusetzen und die Notwendigkeit langwieriger Studien im Labormaßstab zu vermeiden. So kann bereits im Hinblick auf die anspruchsvollen Klimaziele eine schnelle und signifikante Minderung der CO₂-Erzeugung und somit des CO₂-Ausstoßes erreicht werden.

Das SALCOS®-Konzept stützt sich auf erneuerbare Energien und ein flexibles Reduktionsgasgemisch aus Erdgas und grünem Wasserstoff. Der Wasserstoff wird in einer Wasserelektrolyse erzeugt und in dem Direktreduktionsverfahren „ENERGIRON ZR“ der Firma Tenova gemeinsam mit Erdgas eingesetzt. Reine Erdgas-basierte Direktreduktionsanlagen (im Englischen „Direct Reduction Plant (DRP)“) werden bereits weltweit in großem Maßstab betrieben, insbesondere dort, wo Erdgas vergleichsweise günstig zur Verfügung steht, wie z. B. im Mittleren Osten, Nordamerika und Mexiko. Weltweit wurden 2021 rund 102,8 Mio. t direkt-reduziertes Eisen (im

Englischen „Direct Reduced Iron (DRI)“) pro Jahr produziert (Worldsteel, 2022). Ohne große Anpassungen kann die heute industriell etablierte DR-Technologie auf einen Betrieb mit großen Anteilen an Wasserstoff umgestellt werden. Damit wird SALCOS® einerseits dazu beitragen, die Nachfrage nach grünem Wasserstoff zu steigern und damit den Markt dafür zu etablieren, zum anderen ist die DRP-Flexibilität ein Schlüsselpunkt für eine effiziente Sektorenkopplung und ein unterstützendes Element der Energiewende.

Zu Beginn wird der SALCOS®-Direktreduktionsprozess mit hauptsächlich Erdgas und einem geringen Anteil an Wasserstoff betrieben. Der Wasserstoffanteil kann, soweit verfügbar und wirtschaftlich sinnvoll, mit der gleichen Ausrüstung kontinuierlich auf bis zu 100 % erhöht werden.

Die schrittweise Umstellung der integrierten Stahlerzeugung in Salzgitter auf eine mit Wasserstoff angereicherte DRP-/EAF-Produktion ist in drei Stufen geplant (**Bild 2**), wobei SALCOS® die konventionelle BF-/BOF-Route kontinuierlich durch die neue DRP-/EAF-Route ersetzen wird.

Für die wachsende Wasserstoffindustrie ist die SALCOS®-Transformation eine große Chance auf Synergien. Die Wasserstoffindustrie wird den grünen Wasserstoff zu Beginn nur nach Verfügbarkeit des Stroms aus erneuerbaren Quellen erzeugen und bereitstellen können. Der in industriellem Großmaßstab für SALCOS® notwendige Wasserstoff soll über Langzeitliefervereinbarungen sowohl regional als auch überregional erzeugt und beschafft werden. Dies macht eine Umwidmung der Erdgasinfrastruktur in Form von Pipelines unabdingbar.

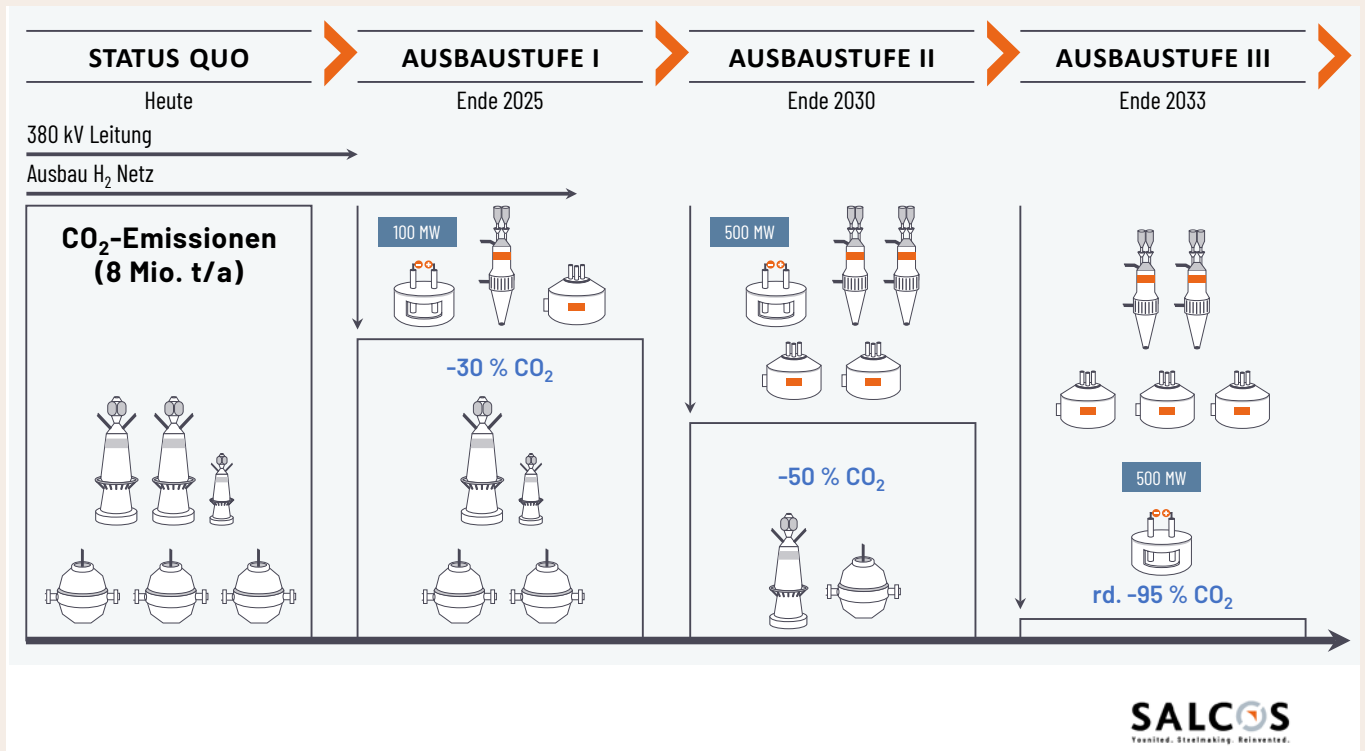


Bild 2: Stufenweise Transformation der Primärstahlproduktion in Salzgitter (Quelle: Salzgitter AG)

Die damit einhergehende Folge von nicht hochreinem Wasserstoff und fluktuierenden Mengen kann aufgrund des flexiblen Verfahrens nutzerseitig bei SALCOS® gut eingesetzt und mit Erdgas ergänzt werden.

Bewertung verschiedener Verfahrensalternativen

Der TRL (Technology Readiness Level) ist eine Methode zur Einschätzung des Reifegrads von Technologien. Der Reifegrad wird nicht nur durch den Entwicklungsstand der Technologie, sondern auch durch ihren Einsatz charakterisiert.

Roland Berger hat das Potenzial und die Zukunftsaussichten verschiedener Optionen der CO₂-armen Stahlerzeugung bewertet und dabei eine für die kurz- bis mittelfristige Umsetzung am besten geeignete Route identifiziert: die Stahlerzeugung über eine H₂-basierte Direktreduktionsroute wie SALCOS. Diese Route bietet den höchsten Grad an technologischer Reife (TRL geschätzt 8-9) und eine kurzfristige Brownfield-Implementierungsfähigkeit mit vergleichsweise wettbewerbsfähigen CAPEX- und OPEX-Anforderungen.

Die Realisierung von Carbon-Capture and Usage/Storage (CCUS)-Optionen (TRL geschätzt 5-7) ist mit höheren Entwicklungskosten verbunden, benötigt deutlich

mehr Entwicklungszeit und hat eine deutlich geringere öffentliche Akzeptanz. Alle alternativen Direktreduktionsverfahren, Plasmadirektstahlerzeugung oder elektrolytische Verfahren (TRL zwischen 2 und 7), befinden sich mehr oder weniger in einem frühen Entwicklungsstadium und benötigen bis zu 20 Jahre und mehr, um industriell einsetzbar zu sein. Dies erschwert auch die Bewertung der ausgewählten Kriterien [1].

ENERGIRON-Verfahren

Die Anfänge der Tenova-Direktreduktionstechnologie gehen auf das Jahr 1957 zurück, als die weltweit erste kommerziell erfolgreiche Direktreduktionsanlage auf Erdgasbasis in Betrieb genommen wurde, die bereits mit einem Elektrostahlwerk verbunden war. Das Direktreduktionsverfahren „ENERGIRON ZR“ wurde in den 1980er-Jahren als Pilotanlage entwickelt und 1998 erfolgreich in den industriellen Vollbetrieb überführt. Die strategische Allianz zwischen Tenova HYL und Danieli (italienischer Stahlwerkshersteller) vereinte das Know-how der beiden Partner. Heute sind „ENERGIRON-ZR“-DRPs im Großmaßstab im Einsatz, z. B. bei Suez Steel in Ägypten (2,0 Mio. t DRI pro Jahr) und Nucor, USA (2,5 Mio. t DRI pro Jahr). Darüber hinaus betreibt Emirates Steel in Abu Dhabi seit 2009 zwei „ENERGIRON ZR“-Anlagen mit einer Kapazität

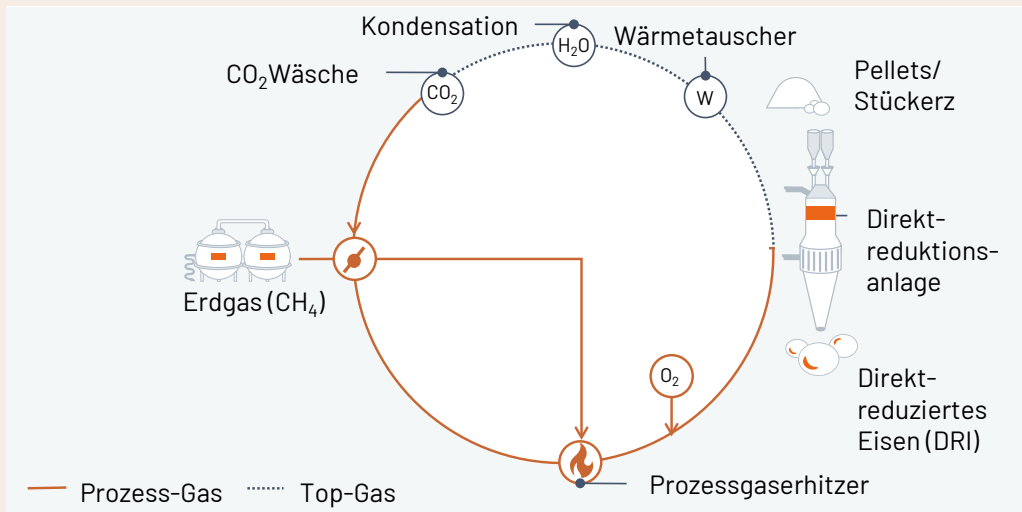


Bild 3: Prinzip der Erdgas-basierten Direktreduktion nach dem ENERGIRON-Verfahren von Tenova (Quelle: Salzgitter AG)

von jeweils 2,0 Mio. t DRI pro Jahr. Die SALCOS®-Stufe I zielt ebenfalls auf eine „ENERGIRON ZR“-Technologie in derselben Größenordnung (2,0 Mio. t DRI pro Jahr) ab [2]. Das ENERGIRON-ZR-Prinzip ist in **Bild 3** dargestellt.

Ein Gemisch aus Erdgas und Wasserstoff wird im Reduktionskreislauf verwendet und mit dem rückgeführten Reduktionsgas vermischt. Das Gemisch wird befeuchtet und anschließend mit einem Prozessgaserhitzer auf die erforderliche Temperatur erhitzt. Kurz vor dem Reaktor wird Sauerstoff in die Zuleitung eingespritzt, um die Temperatur des Reduktionsgases auf das für die In-situ-Reformierung und -Reduktion im Reaktor erforderliche Temperaturniveau zu erhöhen. In der Brennkammer werden partielle Oxidations- und Vorreformierungsreaktionen des Erdgases mit Sauerstoff durchgeführt. Auf diese Weise werden die reduzierenden Gase Wasserstoff und Kohlenmonoxid erzeugt.

Heißes Reduktionsgas wird der Reduktionszone des Reaktors zugeführt und strömt im Gegenstrom aufwärts zum Eisenerz-Wanderbett. Die Prozessgastemperatur in der zentralen Reaktionszone erreicht etwa 1.050 °C, der Reaktordruck 6 bis 8 bar. Die Gasverteilung ist gleichmäßig und es besteht ein hoher Grad an direktem Kontakt zwischen dem Gas und dem Feststoff. Sobald das Gas mit dem Feststoff im Reaktor in Kontakt ist, werden aufgrund der katalytischen Wirkung von metallischem Eisen weitere Spalt- und Reformierungsreaktionen durchgeführt. In der Reaktionszone finden drei verschiedene Schritte gleichzeitig statt: die in-situ-Reformierung von CH_4 , die Reduktion von Eisenerz und die Aufkohlung des erzeugten metallischen Eisens.

Das obere Reduktionsgas verlässt den Reaktor mit einer Temperatur von etwa 490 °C und strömt durch eine Wärmerückgewinnung, wo die Wärmeenergie des Gases

zur Dampferzeugung zurückgewonnen wird. Anschließend folgt ein Quench-/Waschsystem. In dieser Anlage wird das bei der Reduktion anfallende Wasser kondensiert und aus dem Gasstrom entfernt und auch der größte Teil des mit dem Gas mitgeführten Staubs wird abgeschieden. Das gewaschene Gas wird dann durch den Prozessgas-Kompressor geleitet, wo der Druck erhöht wird. Nach der Verdichtung werden die Prozessgase durch eine Amin-Wäsche zum Auswaschen des CO_2 geleitet und dann wieder in den Kreislauf zurückgeführt. Die auf Erdgas-basierende „ENERGIRON ZR“-Technologie hat einen TRL von 9, einschließlich des effizienten Transfers von heißem DRI zu einem EAF.

Vorarbeiten Salzgitter

Trotz der industriell erprobten Technologie treten im Rahmen von SALCOS® Herausforderungen, die insbesondere aus der Brownfield-Implementierung in einem bestehenden Stahlwerk, der flexiblen Nutzung von Erdgas und Wasserstoff in großem Maßstab sowie einem vollständigen Ersatz und der weiteren nachgelagerten Verarbeitung von kohlenstoffarmem DRI zusammenhängen, auf. Die Firma Tenova hat zwar bereits Wasserstoffanteile von bis zu 90 % in einer Prototypenanlage mit guten Ergebnissen getestet, doch müssen weitere Prozessentwicklungen und -anpassungen vorgenommen und Betriebserfahrungen gesammelt werden [3]. Daher wird SALCOS®-Stufe I mit TRL 7-8 beginnen und im Laufe des Projekts TRL 9 erreichen. Unterstützen sollen dabei Erfahrungen aus dem Betrieb einer kleinen Direktreduktionsanlage unter dem Namen μDRAL , welche 2022 in Betrieb genommen wurde.

Mit einem besonderen Fokus auf die Verknüpfung von Stahl- und Wasserstoff-Technologien sowie erneuer-

barer Energien hat die SZAG umfangreiche Erfahrung im Bereich Wasserstoff inkl. einer klaren Positionierung gesammelt. Der Konzern hat seit 2016 fünf Projekte gestartet, die die Grundlage für das DRP-Verfahren (Begleitforschung unter Beteiligung diverser Fraunhofer-Institute in den Projekten MACOR und BeWiSe) und die Elektrolyseur-Technologie (GrInHy, GrInHy2.0, WindH2) bilden. Diese Projekte werden als vorbereitende Bausteine in SALCOS® integriert [4].

Abschluss

Das SALCOS®-Programm ist von großer Bedeutung für die Umweltstrategie und das Energiesystem der Europäischen Union (EU), da es als Blaupause für die Transformation bestehender Hochofenstandorte dienen kann. Mit SALCOS® wird ein innovatives Programm für eine umweltfreundliche Stahlproduktion umgesetzt, wodurch es ein herausragendes Beispiel für die direkte Vermeidung von CO₂ (engl.: Carbon Direct Avoidance, CDA) im Stahlsektor repräsentiert. Neben einer signifikanten CO₂-Reduktion bereits ab Programmstart sowie zukünftig einer fast CO₂-neutralen Primärstahlproduktion bei 100 % H₂-Einsatz ohne große technische Anpassungen fungiert das Projekt als Vorreiter und bewirkt, dass andere Akteure in der Branche diesem Dekarbonisierungsansatz folgen. Zusätzlich wird der Ausbau der Wasserstofferzeugungskapazitäten beschleunigt und SALCOS® bietet ein erhebliches Dekarbonisierungspotenzial für nachgelagerte Märkte wie z. B. die Automobilindustrie. Dem Automobilssektor wird ermöglicht, seine Scope-3- Emissionen erheblich zu

verringern. Das SALCOS®-Programm verfolgt einen ganzheitlichen Ansatz zur Energieversorgung, der das Vorhaben in die europäische H₂-Wertschöpfungskette einbettet.

Literatur

- [1] Berger, R.: Future of Steelmaking. 2020
- [2] Tenova, Online, [https://tenova.com/technologies/energy/], 2022
- [3] Tenova: HYL-News „Technological achievements, experience and trends on H₂-based steelmaking. Dez. 2018
- [4] Salzgitter AG, Online, [salcos.salzgitter-ag.com], 2022

Autoren

Dr.-Ing. **Alexander Redenius**
Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH
Salzgitter
Tel.: +49 5341 21 5352
alexander.redenius@salzgitter-ag.de

Martin Zappe
Salzgitter Flachstahl GmbH
zappe.m@salzgitter-ag.de