

—

NICHTINVASIVE VORHERSAGE DER SCHMELZE-
TEMPERATUR IN ECHTZEIT

Intelligente Ableitung

In einer gezielten Studie hat ABB ein fortschrittliches KI-Modell entwickelt und erfolgreich getestet, das die Temperatur der Stahlschmelze in einem Lichtbogenofen anhand des Kühlwassertemperaturanstiegs kontinuierlich und präzise vorhersagt. Die Weiterentwicklung dieser Innovation soll der Stahlindustrie dabei helfen, den Stahlherstellungsprozess zu optimieren, die Nachhaltigkeit zu verbessern, Energie einzusparen und Emissionen zu reduzieren.

—

Subhashish Desgupta
Vishal Jana
Dinesh Patil
ABB Corporate Research
Process Automation
Bangalore, Indien

subhashish.dasgupta@
in.abb.com
vishal.jana@in.abb.com
dinesh.patil@in.abb.com

Es ist hinlänglich bekannt, dass die Stahlherstellung mit hohen Treibhausgas-(THG-)Emissionen verbunden ist. Stahlwerke produzieren weltweit rund 1,78 Gt Abgase im Jahr [1]. Zweifellos ist der CO₂-Fußabdruck von Stahl groß: Im Jahr 2018 lag der CO₂-Ausstoß pro Tonne produziertem Stahl bei durchschnittlich 1,85 t – das entspricht rund 8 Prozent der weltweiten CO₂-Emissionen in dem Jahr [2]. Dem gegenüber stehen die zunehmende Forderung seitens der Kunden nach einer weniger kohlenstoffintensiven Stahlherstellung, strengere Vorschriften für CO₂-Emissionen und ein wachsendes Interesse von Investoren und der Öffentlichkeit für das Thema Nachhaltigkeit [2].

Kurzum, trotz beträchtlicher Herausforderungen muss die Stahlherstellung grüner werden. Das heißt, es sind entsprechende Anstrengungen zur Dekarbonisierung, Optimierung des

—

Kunden und Investoren fordern eine weniger kohlenstoffintensive Stahlherstellung.

Energieverbrauchs und andere Maßnahmen notwendig.

Der Einsatz fortschrittlicher digitaler Technologien könnte dabei helfen, diese Herausforderungen zu bewältigen. Mit über 100 Jahren Erfahrung befasst sich ABB schwerpunktmäßig mit Elektrifizierungs-, Automatisierungs- und digitalen Lösungen, die fortschrittliche Datenanalysen, maschinelle Lernverfahren (ML) und andere KI-Technologien nutzen, um Metallproduzenten dabei zu helfen, die an sie gestellten





Eine bessere Temperaturregelung beim Stahlschmelzen kann Energie, Emissionen und Kosten sparen.

Bei Temperaturen von über 1.630 °C ist eine direkte Kontaktmessung nicht möglich.



ABB nutzt KI zur genauen Bestimmung der Temperatur.

Herausforderungen zu meistern, also Emissionen zu reduzieren, den Energieverbrauch zu optimieren und gleichzeitig die Produktivität zu verbessern und Kosten zu senken. Damit ist ABB in der Lage, die digitale Transformation der Stahlindustrie zu unterstützen, um den Weg in Richtung Nachhaltigkeit zu beschleunigen. Im Rahmen dieser Arbeit untersucht ABB die Möglichkeit zur Anwendung mechanistischer und KI-basierter Modelle, insbesondere Modelle neuronaler Netze (NN), um die Temperatur der Stahlschmelze in einem Elektrolichtbogenofen (Electric Arc Furnace, EAF) auf nichtinvasive Weise mit dem Ziel zu messen, die Abgase und den Energieverbrauch durch Optimierung zu reduzieren.

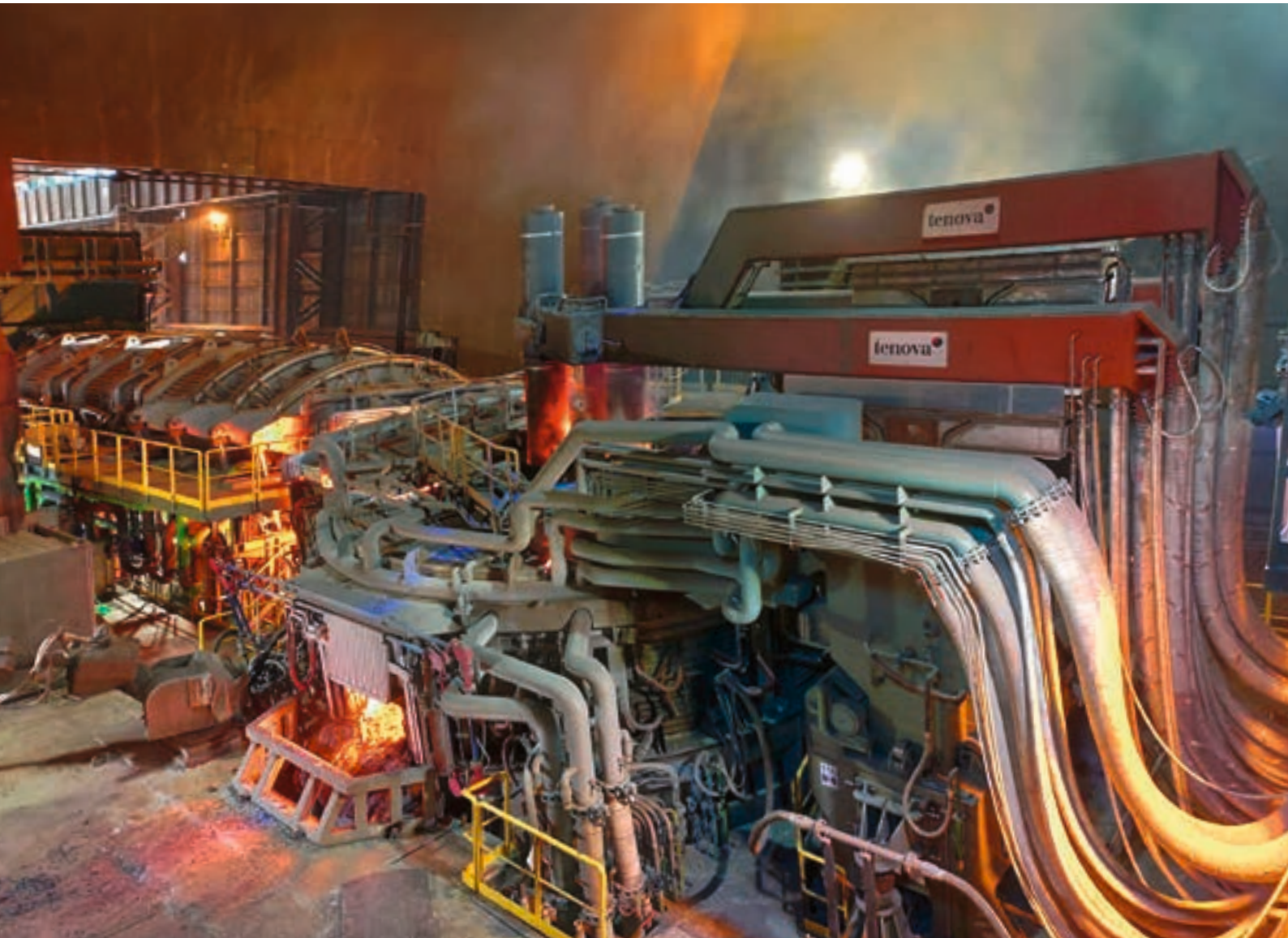
Wahl des richtigen Ofens

Der Weg zu einer kohlenstoffarmen Zukunft

in der Stahlindustrie beginnt mit der Wahl des Schmelzofens. Bei der Stahlherstellung kommen vornehmlich zwei Technologien zum Einsatz: die zurzeit in Europa hauptsächlich verwendete

—
ABB hilft Metallproduzenten dabei, die an sie gestellten Herausforderungen zu meistern.

integrierte Hochofen-Konverter-Route und der zunehmend populäre EAF →01. Während bei der Hochofen-Konverter-Route Stahl aus Rohstoffen wie Eisenerz unter Verwendung von Kohle (oder



01

— 01 Technologien von ABB tragen bereits zur Verbesserung der Effizienz in einigen der größten Elektrolichtbogenöfen der Welt bei. Der größte EAF von Acciaieria Arvedi hat ein Abstichgewicht von 300 t und nutzt einen Chargenmix mit heiß brikettiertem Eisen (HBI), einer hochwertigen Form von Eisenschwamm.

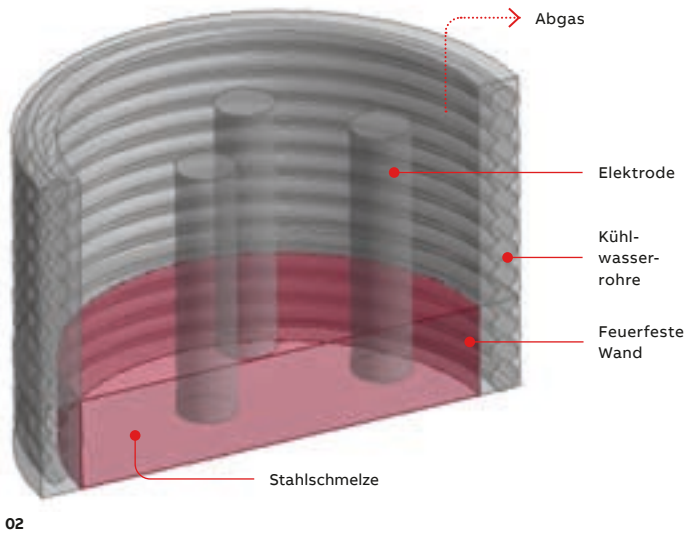
Koks) als Reduktionsmittel hergestellt wird, kann in EAFs eine breitere Palette von Rohstoffen wie Schrott, Eisenschwamm und Flüssigroheisen verwendet werden – unabhängig von Kohle. EAFs sind nicht nur flexibler und können die Marktnachfrage schneller bedienen, wenn sich die Verfügbarkeit der Rohstoffe ändert, sie zeichnen sich auch durch geringere CO₂-Emissionen, eine höhere Ressourceneffizienz und bessere Recyclingmöglichkeiten aus. Als innovativer Partner der Metallindustrie untersucht und entwickelt ABB richtungsweisende Technologien für EAFs mit dem Ziel, einen effizienteren Betrieb zu ermöglichen und die Stahlindustrie in ihren Bemühungen um eine nachhaltige, CO₂-arme Stahlproduktion zu unterstützen.

Effizienz im Blick

Wie bei allen Chargenprozessen spielt die Regelung von Prozessvariablen wie der Temperatur in jeder Phase des Stahlherstellungsprozesses eine entscheidende Rolle, wenn es darum geht, eine maximale Produktivität sicherzustellen

und gleichzeitig den Energieeinsatz und die Betriebskosten zu reduzieren. Der Einsatz einer nichtinvasiven Temperaturmessung kann dabei helfen, diese Ziele zu erreichen.

Um die Effizienz des EAF-Prozesses zu erhöhen und eine bessere Kontrolle der erzeugten Abgase zu ermöglichen, muss die Temperatur der Stahlschmelze während des Prozesses genau überwacht werden, was aber nicht so einfach ist. Da die Schmelze Temperaturen von 1.630 °C und mehr erreichen kann, ist die Installation einer permanenten Temperatursonde innerhalb des Ofens unmöglich. Gängige Praxis ist es, einen „Opfersensor“ in die Schmelze einzuführen, die Temperatur momentan zu erfassen und den Sensor anschließend zu entsorgen. Dieser Vorgang wird einmal pro Produktionslauf durchgeführt. Der Temperatursensor wird in einem Schutzrohr eingeführt, und die Elektroden werden während des Messvorgangs abgeschaltet, was die Effizienz mindert und sich auf die Kosten und auch die Sicherheit auswirkt.



02

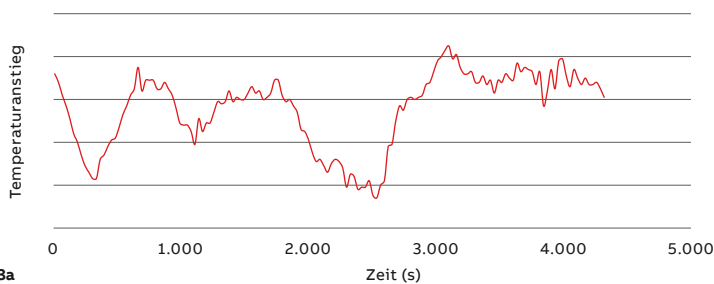
— 02 Schematische Darstellung eines typischen EAF.

— 03 Vergleich verschiedener Temperaturmessungen und -schätzungen. Die Einheiten auf der Temperaturachse sind aus Datenschutzgründen nicht dargestellt.

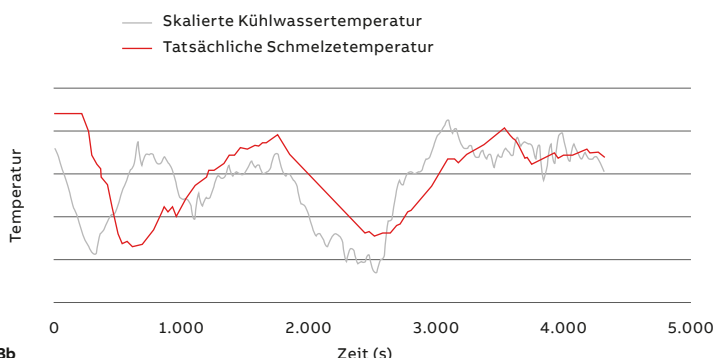
03a Der Anstieg der Kühlwassertemperatur T_{cw} in Abhängigkeit von der Zeit.

03b Vergleich der skalierten T_{cw} mit der Schmelztemperatur T_m , die mithilfe einer Wärmebilanzgleichung geschätzt wurde.

Um die verschiedenen Betriebsparameter so aufeinander abzustimmen, dass Energie eingespart und gleichzeitig die erforderliche Qualität sichergestellt wird, wäre eine Überwachung der Temperatur in Echtzeit und nicht nur einmal pro Durchlauf erforderlich. Dazu hat ABB im Rahmen des Process Automation Hackathon 2022 eine Methode untersucht, die eine kontinuierliche Schätzung der Schmelztemperatur mithilfe externer Temperaturmessungen und KI-Verfahren ermöglicht. Der PA Hackathon ist eine jährliche Veranstaltung von ABB zur Entwicklung innovativer Ideen auf dem Gebiet der Prozessautomatisierung.



03a



03b

EAF-Aufbau und Schmelzprozess

Bevor wir uns mit den untersuchten Methoden befassen, soll kurz die Funktionsweise eines EAF →01 erläutert werden. In einem EAF wird Stahl zusammen mit anderen Einsatzstoffen mithilfe der von Lichtbogenelektroden erzeugten Wärme in einer geschlossenen Kammer geschmolzen. Die Kammer aus Schamottestein besitzt eine feuerfeste Auskleidung, in die ein Mantel aus Wasserrohren zur Kühlung und zum Schutz der Auskleidung installiert ist →02. Die beim Prozess entstehenden Gase werden durch eine Öffnung oben am EAF abgeführt.

Nichtinvasive Temperaturschätzung

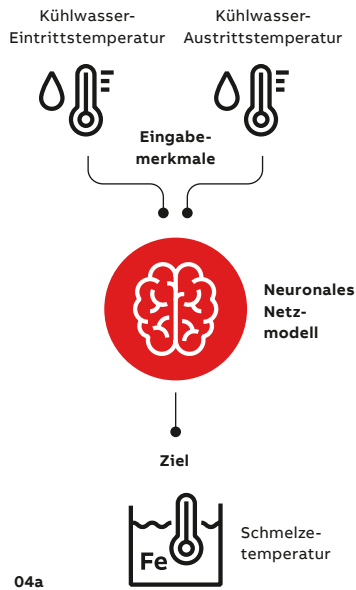
Beim PA Hackathon 2022 sind ABB und die Teilnehmer der Idee nachgegangen, ob sich die Schmelztemperatur anhand von äußeren Anzeichen, speziell dem Temperaturanstieg des in den Rohren der Auskleidung zirkulierenden Kühlwassers, bestimmen lässt. Dazu wurde eine erste Proof-of-Concept-Studie unter Verwendung von Messdaten eines Kunden durchgeführt. Der Anstieg der Kühlwassertemperatur T_{cw} , der sich aus der Differenz zwischen der Eintritts- und Austrittstemperatur bestimmen lässt, wurde direkt an der Anlage gemessen →03a. Anlagendaten wie die Lichtbogenleistung, der Sauerstoffdurchsatz usw. wurden ebenfalls bereitgestellt. Die Schmelztemperatur T_m wurde in Echtzeit mithilfe eines in Python implementierten Wärmebilanzmodells geschätzt →03b. Die Skalierung von T_{cw} mithilfe einer nichtlinearen mathematischen Funktion ergab eine gute Übereinstimmung zwischen den skalierten T_{cw} -Werten und T_m etwa 1.000 s (ca. 16 Minuten) nach Initiierung des Prozesses. Dieses positive Ergebnis der Studie veranlasste das Team dazu, zu untersuchen, ob sich die Schmelztemperatur mithilfe fortschrittlicher KI-Verfahren auf nichtinvasive Weise schätzen lässt.

Dazu wurde ein Modell eines tiefen neuronalen Netzes (Deep Neural Network, DNN) in Python entwickelt, das die Kühlwassertemperatur mit der Schmelztemperatur verknüpft →04a. Das mit historischen Daten trainierte DNN-Modell war in der Lage, die Schmelztemperatur aus dem Anstieg der Kühlwassertemperatur mit akzeptabler Genauigkeit vorherzusagen →04b. Durch weitere Modifikationen der Analyse und Verbesserungen der Datenerfassung ist bei nachfolgenden Untersuchungen eine noch bessere Genauigkeit der Vorhersage zu erwarten. Zurzeit arbeitet ABB daran, den Code der nichtinvasiven Temperaturschätzung als Option für metallverarbeitende Prozesse in ihre Leittechnikplattform zu integrieren.

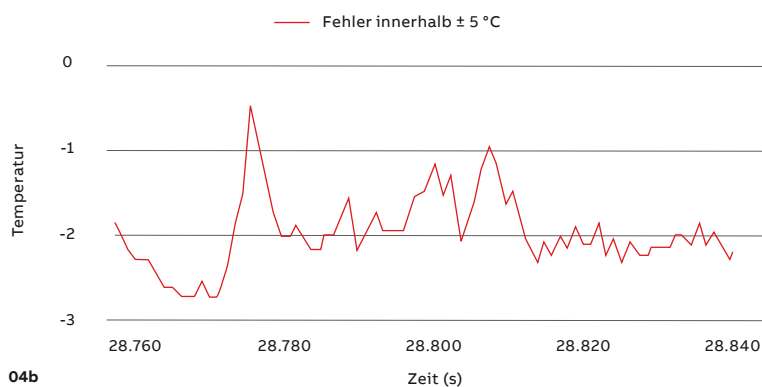
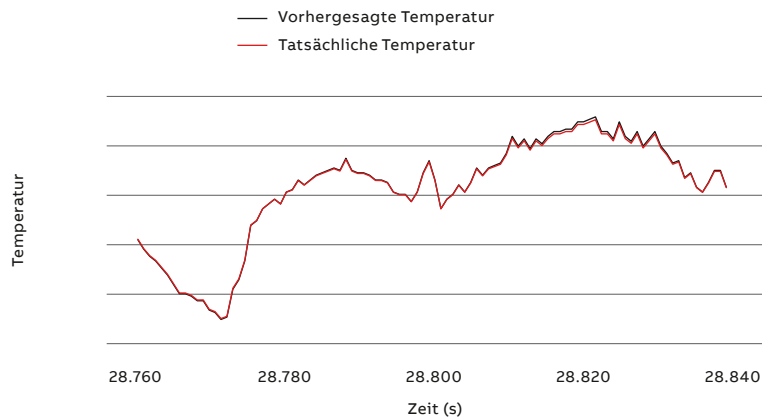
04 Ergebnisse des NN-Modells.

04a Ein neuronales Netzmodell verknüpft die Kühlwassertemperatur mit der Schmelztemperatur.

04b Die vorhergesagte Schmelztemperatur stimmt recht genau mit der tatsächlichen Temperatur überein (obere Grafik). Die untere Grafik zeigt die dazugehörigen Fehlerwerte. Die Einheiten auf der Temperaturachse sind aus Datenschutzgründen nicht dargestellt.



04a



04b

Einzigartige Vorteile

Mit der Studie hat ABB gezeigt, dass es möglich ist, das Prozessverhalten, z. B. die Schmelztemperatur, auf nichtinvasive Weise mithilfe von KI-basierten Modellierungsverfahren zufriedenstellend vorherzusagen, solange relevante Prozessbedingungen bekannt sind, Daten in ausreichender Qualität zur Verfügung stehen und Branchenexperten involviert sind. Mit der ABB-Lösung sind Experten in der Lage, interne Parameter auf nichtinvasive Weise zu schätzen. Diese Möglichkeit ist nicht nur begrüßenswert, sie bietet auch eine ganze Reihe praktischer Vorteile. So erlaubt die nichtinvasive Schätzung der Schmelztemperatur eine Temperaturüberwachung in Echtzeit, was wiederum wertvolle Möglichkeiten der betrieblichen Optimierung

Das KI-Modell ermöglicht eine kontinuierliche Vorhersage der Schmelztemperatur.

eröffnet: Der Schmelzprozess kann weiterlaufen, ohne dass die Elektroden vorübergehend abgeschaltet und Sensoren entsorgt werden müssen. Das spart Zeit, Energie und Kosten. Zudem ermöglicht die Echtzeit-Überwachung der Temperatur eine bessere Kontrolle der Abgasemissionen. Dies ist für die Stahlindustrie nicht nur im Hinblick auf einen effizienten Betrieb von Bedeutung, sondern spielt auch für die Bemühungen der Branche um eine Reduzierung der THG-Emissionen eine entscheidende Rolle, wenn es darum geht, den Anforderungen von Kunden, Investoren und gesetzlichen Vorschriften gerecht zu werden.

Ausblick

Während die ursprüngliche Idee der gezielten Studie darin bestand, zu untersuchen, ob die Kühlwassertemperatur als indirektes Maß zur Vorhersage der Schmelztemperatur genutzt werden kann, lassen die bisherigen positiven Ergebnisse darauf schließen, dass auch andere externe Messungen – zum Beispiel der Abgastemperatur – verwendet werden könnten, um die Schmelztemperatur mithilfe fortschrittlicher DNN-Verfahren zu schätzen. Entsprechende Untersuchungen finden bereits statt. So wird ABB mit Blick auf die Metallverarbeitung und digitale Technologien weiter daran arbeiten, der Stahlindustrie durch analysebasierte Innovationen einen Mehrwert zu verschaffen. •



Weitere Informationen

ABB-Website: „SSAB, the Association for Iron & Steel Technology and ABB discussed the journey to fossil-free steel“



ABB-Website: „Enduring electric arc furnace optimization technology plays a part in steel's sustainable future“



Literaturhinweise

[1] J. Kleinikorda et al.: „What Shall We Do with Steel Mill Off-Gas: Polygeneration Systems Minimizing Greenhouse Gas Emission“. *Environmental Science & Technology*, Vol. 56, No. 18 (2022), S. 13.294–13.304.

[2] C. Hoffmann et al.: „Decarbonization challenges for steel“. McKinsey & Company, 03.06.2020. Verfügbar unter: <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/decarbonization-challenge-for-steel> (abgerufen am 05.06.2024).

Diesen Artikel teilen

