

Wege zu einer klimaneutralen Stahlerzeugung

Dr.-Ing. **Hans Bodo Lungen**, Neuss, und Prof. Dr.-Ing. **Peter Schmöle**, Dortmund

Vorgetragen in der Mitgliederversammlung des Stahlinstituts VDEh in Düsseldorf am 9. Juni 2022

Einleitung

Der Rat der Europäischen Union hat schon 2011 eine Roadmap zum Erreichen einer konkurrenzfähigen „low-carbon economy“ in Europa bis 2050 beschlossen. Daraus geht hervor, dass die europäische Industrie ihre CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2050 im Vergleich zu 1990 um 80 bis 95 % absolut verringern muss. Am 28. November 2018 hat die EU-Kommission im Lichte des UN-Klimaabkommens von Paris eine langfristige strategische Vision für eine klimaneutrale Wirtschaft für 2050 sowie am 11. Dezember 2019 mit dem Green Deal das Ziel veröffentlicht, die Europäische Union bis 2050 zum ersten klimaneutralen Kontinent zu machen und dazu einen Aktionsplan vorgelegt. EU-Rat, Europaparlament und EU-Kommission haben am 21. April 2021 im Rahmen des Trilogs eine vorläufige Einigung verkündet, wonach im Rahmen des Europäischen Klimaschutzgesetzes das Klimaziel für 2030 auf eine Treibhausgasreduzierung um mindestens 55 % gegenüber 1990 angehoben werden soll. Die Erreichung des 55%-Ziels soll durch ein europäisches „Fit for 55“-Gesetzespaket mit einer Revision zahlreicher energie- und klimabezogener EU-Richtlinien umgesetzt werden. Die Stahlindustrie teilt das Ziel, bis 2050 Treibhausgasneutralität zu erreichen, und möchte bereits bis 2030 substantielle CO₂-Einsparungen auf den Weg bringen.

Eine solche weitreichende „Dekarbonisierung“ stellt für die gesamte Industrie eine enorme Herausforderung dar. Um die genannten Ziele zu erreichen, müssen jedoch zeitnah politische Rahmenbedingungen auf den Weg gebracht werden, mit denen die erforderlichen Investitionen in CO₂-arme bzw. langfristig CO₂-freie Produktionsverfahren ermöglicht werden. Die EU-Stahlindustrie steht schon seit Jahren an vorderster Front mit zahlreichen R&D-Projekten bei der Entwicklung von CO₂ Breakthrough Technologien. Eine umweltfreundliche innovative Stahlindustrie spielt eine entscheidende Rolle bei der Erfüllung der langfristigen Klimaziele. Gleichzeitig muss jedoch die europäische Stahlindustrie im weltweiten Vergleich konkurrenzfähig bleiben.

CO₂-Emissionen der Verfahren zur Stahlerzeugung

Der größte Anteil der CO₂-Emissionen bei der Stahlerzeugung entsteht bei der Reduktion der Eisenerze. Für die Reduktion der Eisenerze, das heißt für den Abbau des Sauerstoffes, ist ein gasförmiges Reduktionsmittel erforderlich. Die einzig möglichen gasförmigen Reduktionsmittel sind Kohlenstoffmonoxid (CO) und Wasserstoff (H₂), **Bild 1**. Die thermodynamische Voraussetzung für das Ablaufen der Eisenerzreduktion ist, dass durch das Einstellen eines geeigneten Kohlenstoffmonoxid- zu Kohlenstoffdioxid- oder Wasserstoff- zu Wasser-Verhältnisses der Sauerstoffpartialdruck des Reduktionsmittels kleiner ist als der Dissoziationssauerstoffdruck des Eisenoxids, also ein Potentialgefälle für den Ablauf der Reaktion vorliegt.

Bei der Reduktion mit CO, die exotherm ist, entsteht zwangsläufig das unerwünschte Treibhausgas CO₂. Bei der Reduktion mit H₂, die endotherm ist, entsteht H₂O, in der Regel in Form von Dampf.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass Wasserdampf das wesentliche natürliche Treibhausgas [1] und damit größter Faktor eines Treibhauseffektes ist. Dabei wird die Menge an Wasserdampf in der Atmosphäre überwiegend über die Lufttemperatur statt über Emissionen geregelt. Daher betrachten Wissenschaftler den Wasserdampf eher als Rückkopplungsfaktor denn als einen Antreiber des Klimawandels [2].

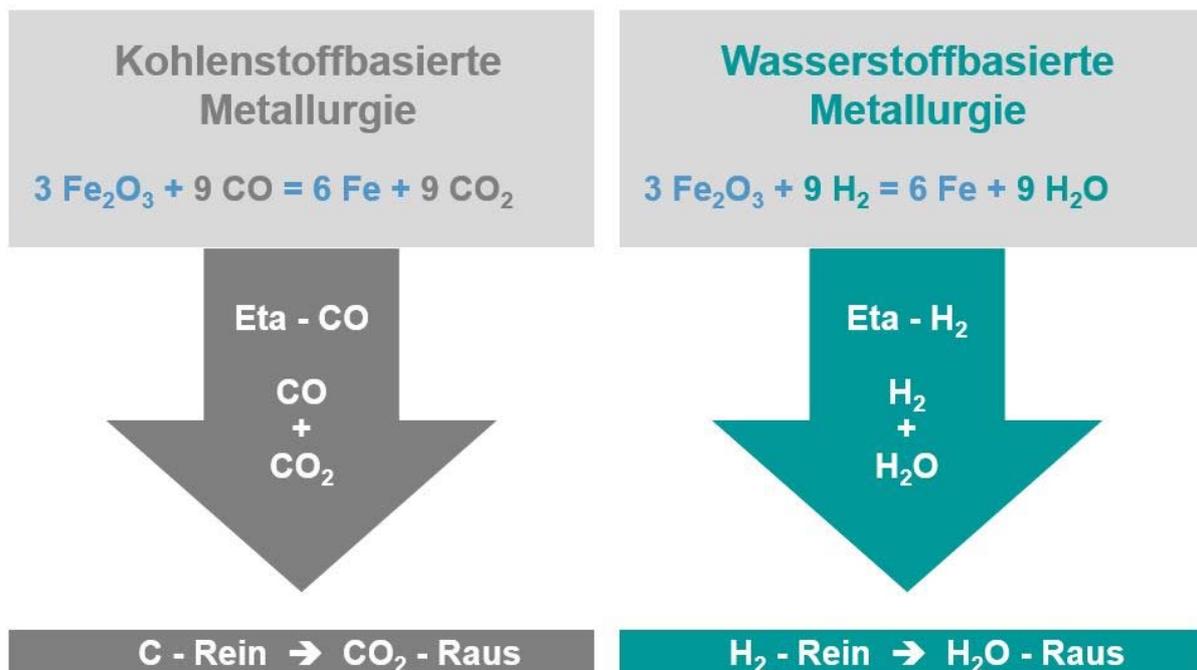


Bild 1: Verfahren zur Reduktion (Sauerstoffabbau) von Eisenerzen

In **Bild 2** sind die in Europa zur Stahlherstellung angewendeten Prozessstufen dargestellt mit den Angaben zu den spezifischen CO₂-Emissionen.

Bei der Hochofen-Konverter-Route (**Bild 2, links**) entstehen die CO₂-Emissionen in Höhe von 1880 kg/t Rohstahl direkt in den Produktionsprozessen Kokerei, Sinteranlage, Hochofen, Konverter, den nachfolgenden Prozessen Gießen und Umformen sowie bei der Verwertung der Prozessgase zum Beispiel in nachgeschalteten Kraftwerken. Den wesentlichen Anteil an diesen CO₂-Emissionen hat im Prinzip der Hochofenprozess. Hier entsteht durch die Reduktion der Eisenerze mit Kohlenstoff bzw. Kohlenstoffmonoxid (CO) unvermeidbar CO₂. Der im Hochofen chemisch genutzte Kohlenstoff wird dann bei der energetischen Verwendung des kohlenstoffmonoxid- und kohlenstoffdioxidhaltigen Hochofengases und bei der Weiterverarbeitung des kohlenstoffhaltigen Roheisens als Kohlenstoffdioxid (CO₂) in die Atmosphäre emittiert. Bei der Hochofen-Konverter-Route wird im Hochofen ein flüssiges, ca. 1500° C heißes Roheisen erzeugt, das von den Gesteinsanteilen (Gangart) der Eisenerze durch Überführung in eine Schlacke befreit wurde. Diese Hochofenschlacke wird in der Regel zu Hüttensand granuliert, der bei der Zementherstellung als Ersatz für Portlandklinker eingesetzt wird und dort zu erheblichen CO₂-Einsparungen führt.

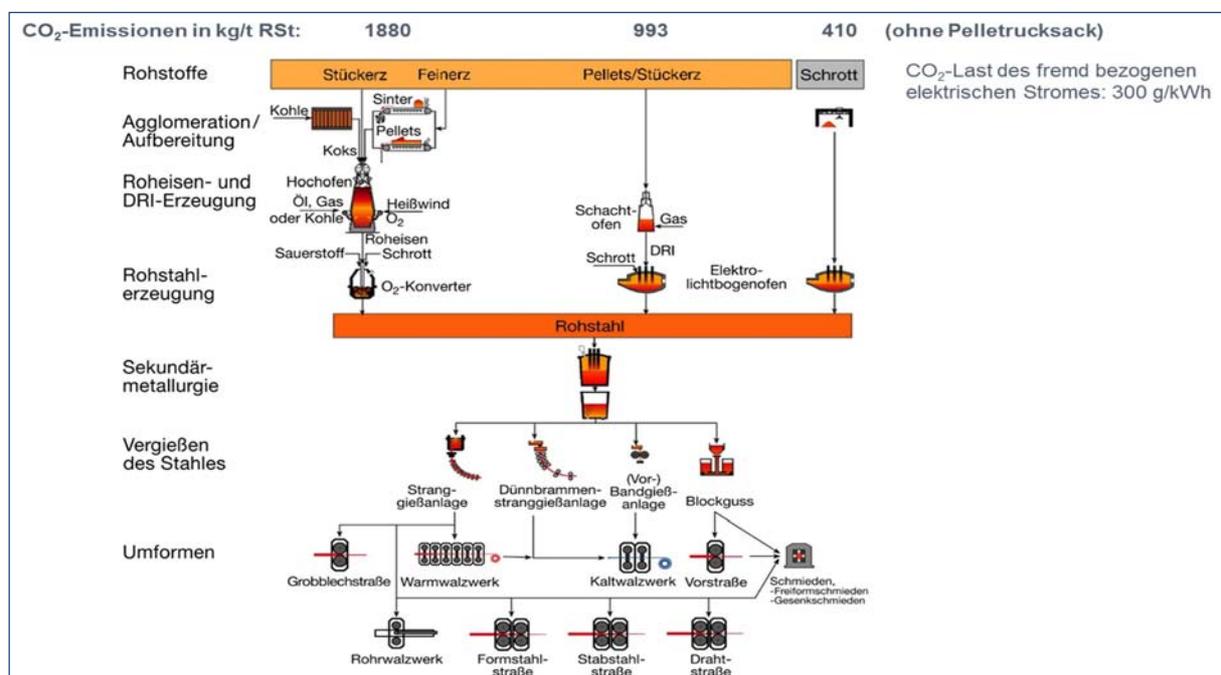


Bild 2: Prozessstufen zur Stahlherstellung in Deutschland und Europa [3]

Ein Betrieb des Hochofens ohne Koks ist aus physikalischen Gründen nicht möglich, **Bild 3**.

Der Koks hat neben chemischen und energetischen Aufgaben auch physikalische Aufgaben zu erfüllen, als Stützgerüst für die Möllersäule, zur Aufrechterhaltung der Permeabilität (Durchgasbarkeit) des Hochofens im Schacht und der Drainage im Gestell [4]. Die Eisenerze verändern durch Erwärmungs- und Reduktionsvorgänge auf dem Weg von der Gicht bis in das Gestell des Hochofens ihre chemische und physikalische Beschaffenheit. Sie dehnen sich aus, nehmen an Volumen zu, erweichen und schmelzen. Der Erweichungsbereich wird „kohäsive Zone“ genannt. Dort bilden die Erze gasundurchlässige Schichten. Der Koks dagegen behält seine feste, körnige Struktur bis in das Gestell des Hochofens bei, mengenmäßig verringert um den Anteil des Boudouard- und Vergasungskohlenstoffes. In der „kohäsiven Zone“ bilden die Koksschichten gasdurchlässige Fenster, die eine ausreichende Permeabilität sicherstellen. Der feste Koks in der „kohäsiven Zone“ dient auch als Stützgerüst für die darüberliegende „trockene“ Möllersäule. Die Form der „kohäsiven Zone“ und die Durchgasung des Hochofens werden vom Hochöfner durch die Schüttgutverteilung an der Gicht gesteuert.

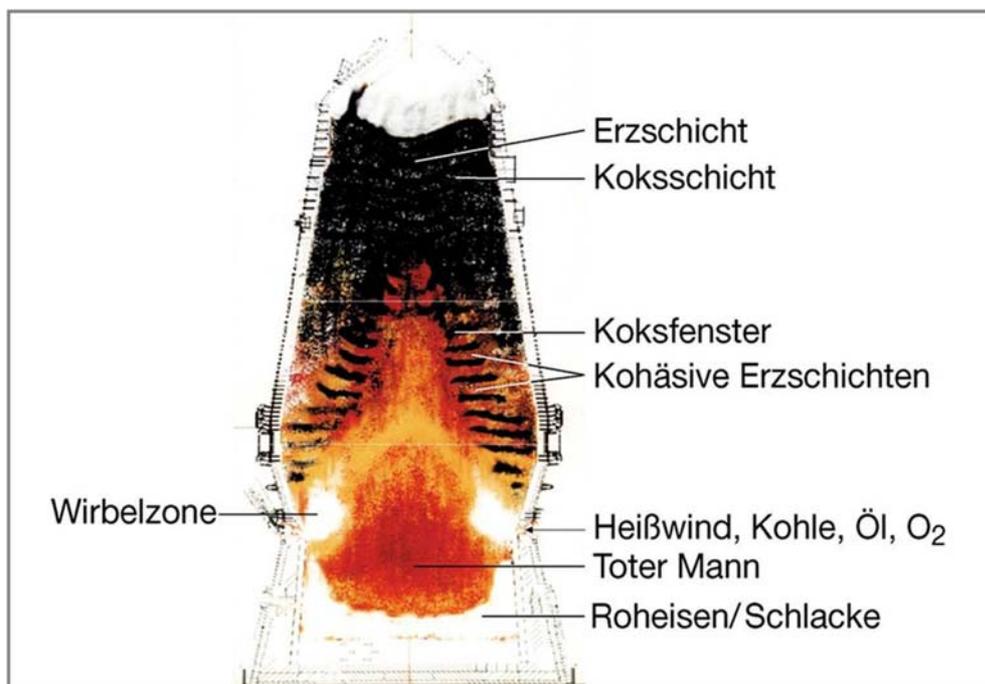


Bild 3: Eisenerzreduktion - Der Hochofen kann aus physikalischen Gründen nicht ohne Koks betrieben werden

Weiterhin bildet der Koks im Gestell des Hochofens einen Kokskegel, den sogenannten „Toten Mann“. Dieser Kokskegel gewährleistet die Durchlässigkeit für die flüssigen Produkte Roheisen und Schlacke sowie für das Reduktionsgas. Die Qualität des Kokses beeinflusst zudem die Haltbarkeit der Feuerfestausmauerung des Hochofengestells. Ein Koks mit sehr

guten Heißstrukturfestigkeiten ermöglicht das Strömen von Roheisen und Schlacke durch das Lückenvolumen des Kokskegels zum Stichloch. Damit wird die für die Ausmauerung verschleißverursachende Randströmung im Übergangsbereich Gestellboden/Gestellwand weitgehend vermieden. Es sind also im Wesentlichen physikalische Gründe, die den Betrieb eines Hochofens ohne eine bestimmte Menge Koks nicht zulassen.

Die Prozessgase der Kokerei, des Hochofens und des Konverterstahlwerks werden u. a. für die Erzeugung von elektrischer Energie in nachgeschalteten Kraftwerken verwendet, wobei auch das in den Gasen enthaltene CO durch Verbrennung als CO₂ emittiert wird. Im idealen Fall ist ein integriertes Werk in der Versorgung mit elektrischer Energie autark.

Wasserstoff ist bei der Eisenerzreduktion als Vorstufe zur Stahlherstellung das einzige alternative Reduktionsmittel zum Kohlenstoffmonoxid. Bei der Direktreduktion von Eisenerzen (**Bild 2, Mitte**) wird in der betrieblichen Praxis schon seit Anfang der 1970er Jahre wasserstoffreiches Erdgas als Reduktionsmittel zur Reduktion der Eisenerze eingesetzt. Dabei wird zum Beispiel unter Einsatz eines Schachtofens fester Eisenschwamm, international als DRI (Direct Reduced Iron) oder in briquetierter Form als HBI (Hot Briquetted Iron) bezeichnet, erzeugt, **Bild 4**. Das wesentliche Ziel bei der Entwicklung von Direktreduktionsverfahren bestand darin, unter Vermeidung des Einsatzes von Koks, wie er für den Hochofen erforderlich ist, Eisenerze zu reduzieren.

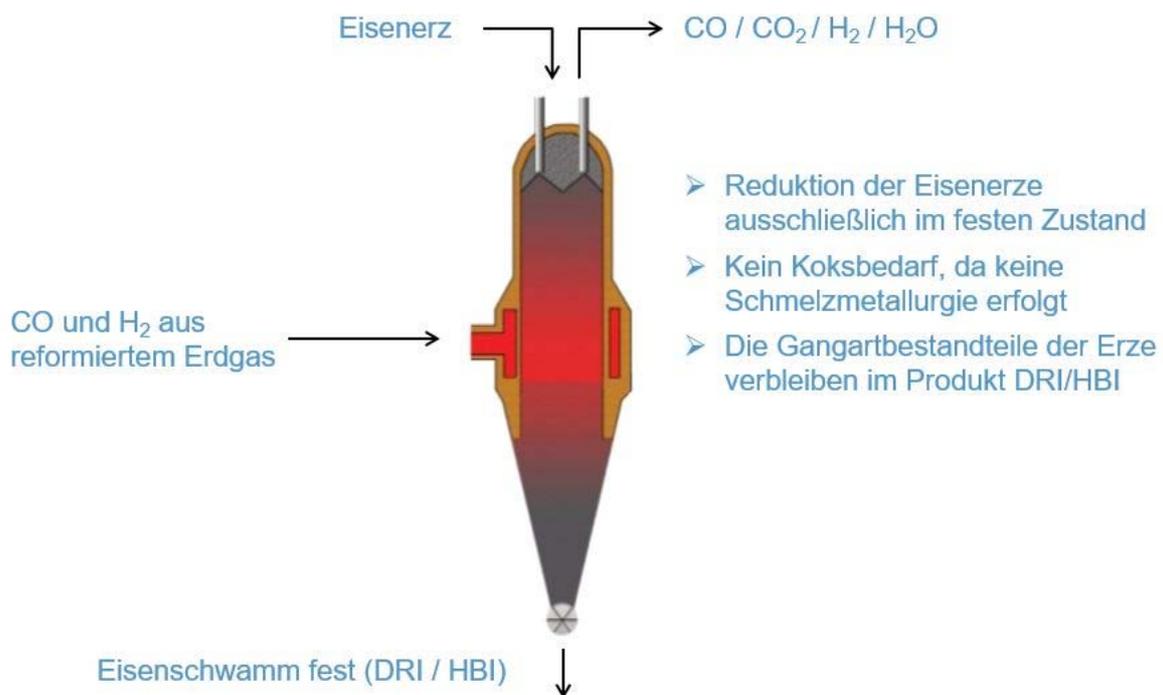


Bild 4: Eisenerzreduktion: Direktreduktion im Schachtofen

Reduktionsgas (CO und H₂) aus reformiertem Erdgas wird in den unteren Teil der Reduktionszone des Direktreduktionsschachtes eingeblasen. Dem DRI wird zwar weitgehend der Sauerstoff der „stückigen“ Eisenerze (Pellets und Stückerze) entzogen, aber es fällt im festen Zustand an und enthält noch die Gangartbestandteile der Eisenerze. Eine Schmelz- und Schlackenmetallurgie findet nicht statt. Die Weiterverarbeitung des DRI zu Rohstahl mit Schmelzen und Schlackenmetallurgie erfolgt im nachgeschalteten Elektrolichtbogenofen. Die CO₂-Emission dieser Route liegt beim Einsatz von Erdgas bei 993 kg/t Rohstahl. Bei dieser Route werden keine energetisch verwendbaren Prozessgase erzeugt. Der gesamte Bedarf an elektrischer Energie auch für alle nachgeschalteten Anlagen muss durch Fremdbezug gedeckt werden.

Bei der schrottbasierten Elektroofenroute (**Bild 2, rechts**) entsteht nur ein Teil der CO₂-Emission bei den Produktionsprozessen selbst. Der Großteil der CO₂-Emissionen kommt von der CO₂-Last der fremd bezogenen elektrischen Energie für den Schmelzprozess im Elektrolichtbogenofen und die nachgeschalteten Prozessstufen, da die Elektroofenroute selbst keine energetisch verwertbaren Prozessgase erzeugt. Die CO₂-Emission dieser Route liegt bei einer CO₂-Last der elektrischen Energie von 300 g/kWh bei 410 kg/t Rohstahl.

CO₂-Emissionen der EU Stahlindustrie in 1990 und 2015

Die spezifischen und die gesamten CO₂-Emissionen der EU 28 Stahlindustrie wurden zunächst für 1990 berechnet, um für das Bezugsjahr 1990 eine repräsentative Größe zu erhalten. Zudem wurden die CO₂-Emissionen für 2015 berechnet, um die schon erreichten Verminderungen der CO₂-Emissionen im Vergleich zu 1990 zu ermitteln [5].

Die Ergebnisse der Berechnungen weisen den nach der Produktion gewichteten jährlichen Durchschnitt der spezifischen CO₂-Emissionen bezogen auf eine Tonne Rohstahl der in Europa betriebenen integrierten Hüttenwerke bzw. Elektrostahlwerke aus.

Die Berechnung der CO₂-Emissionen der EU 28 Stahlindustrie zwischen 1990 und 2015 ergibt eine Verminderung der gesamten CO₂-Emissionen um 28 % von 298 Mio. t auf 216 Mio. t, **Tabelle 1**. Im gleichen Zeitraum ist allerdings auch die Stahlerzeugung in der EU 28 von 197 Mio. t auf 166 Mio. t um 16 % zurückgegangen.

Die spezifischen CO₂-Emissionen je Tonne Rohstahl konnten in diesem Zeitraum um 14 % von 1,5 auf 1,3 t CO₂/t Rohstahl verringert werden. Diese Zahlen ergeben sich aus den spezifischen Emissionen der integrierten Route und der Elektroofenroute sowie deren Anteil an der Gesamtstahlerzeugung der jeweiligen Jahre.

Die CO₂-Emission der integrierten Hochofen-Konverter-Route ist in den 25 Jahren nur um 5 % zurückgegangen, was auch ein Indiz dafür ist, dass diese Route am verfahrenstechnischen und wirtschaftlichen Optimum betrieben wird.

Tabelle 1: Ergebnisse der Ermittlung der CO₂-Emissionen der Europäischen Stahlindustrie in 1990 und 2015 [5]

		1990	2015	Veränderung
Rohstahlerzeugung	Mio. t	197	166	- 16 %
Anteil integrierte Route ^{*)}	%	66	61	- 5 %
Anteil Elektroofenroute ^{*)}	%	28	39	+ 11 %
CO₂-Emissionen Stromerzeugung	g/kWh	585	300	- 49 %
CO₂-Emissionen integrierte Route	kg/t RSt	1.968	1.876	- 5 %
CO₂-Emissionen Elektroofenroute ^{**)}	kg/t RSt	667	410	- 39 %
Spez. CO₂-Emissionen Stahlerzeugung	kg/t RSt	1.508	1.304	- 14 %
CO₂-Emissionen der Stahlindustrie	Mio. t	298	216	- 28 %

^{*)} in 1990 gab es noch 6 % Anteil Siemens-Martin-Stahl

^{**)} Bei stromintensiven Routen führen niedrigere Emissionen bei der Stromerzeugung zu massiv geringeren CO₂-Emissionen

Der Anteil der Elektrostahlerzeugung an der Stahlerzeugung stieg von 28 % in 1990 auf 39 % in 2015. Im selben Zeitraum wurde auch die CO₂-Last der aus dem öffentlichen Netz bezogenen elektrischen Energie von 585 g CO₂/kWh auf 300 g CO₂/kWh verringert, was ein wesentlicher Beitrag zur Verringerung der CO₂-Emissionen der schrottbasierten Elektroofen-Route um 39 % war.

Als Fazit bleibt festzustellen, dass die CO₂-Minderung in Europa von 28 % in den 25 Jahren zwischen 1990 und 2015 zur Hälfte durch den Rückgang der Stahlerzeugung erreicht wurde.

Das Erreichen einer CO₂-Minderung von über 95 % in 2050 gegenüber 1990 bedeutet eine Verminderung der spezifischen CO₂-Emissionen auf unter 90 kg/t Rohstahl oder auf unter 15 Mio. t CO₂/Jahr unter der Annahme einer Rohstahlerzeugung in der EU von 166 Mio. t in 2050.

Projekte zur weiteren Verminderung der CO₂-Emissionen

Die „Schlüsselwege“ zur CO₂-Minderung der Stahlindustrie können in zwei Säulen zusammengefasst werden: Smart Carbon Usage (SCU) und Carbon Direct Avoidance (CDA), **Bild 5**. SCU beinhaltet neben inkrementellen Maßnahmen bei der konventionellen Hochofen-Konverter-Route die CO₂-Minderung durch die Anwendung von sogenannten „end-of-pipe“ Technologien wie CCS (CO₂ Capture and Storage) und CCU (Carbon Capture and Usage). Die Säule CDA beinhaltet die schrottbasierte Elektroofenroute und die auf Eisenerz basierende Direktreduktion-Elektroofen-Route mit Erdgas und/oder Wasserstoff als Reduktionsmittel, also die Vermeidung des Einsatzes von Kohle bzw. Koks und damit die Vermeidung der Bildung von CO₂.

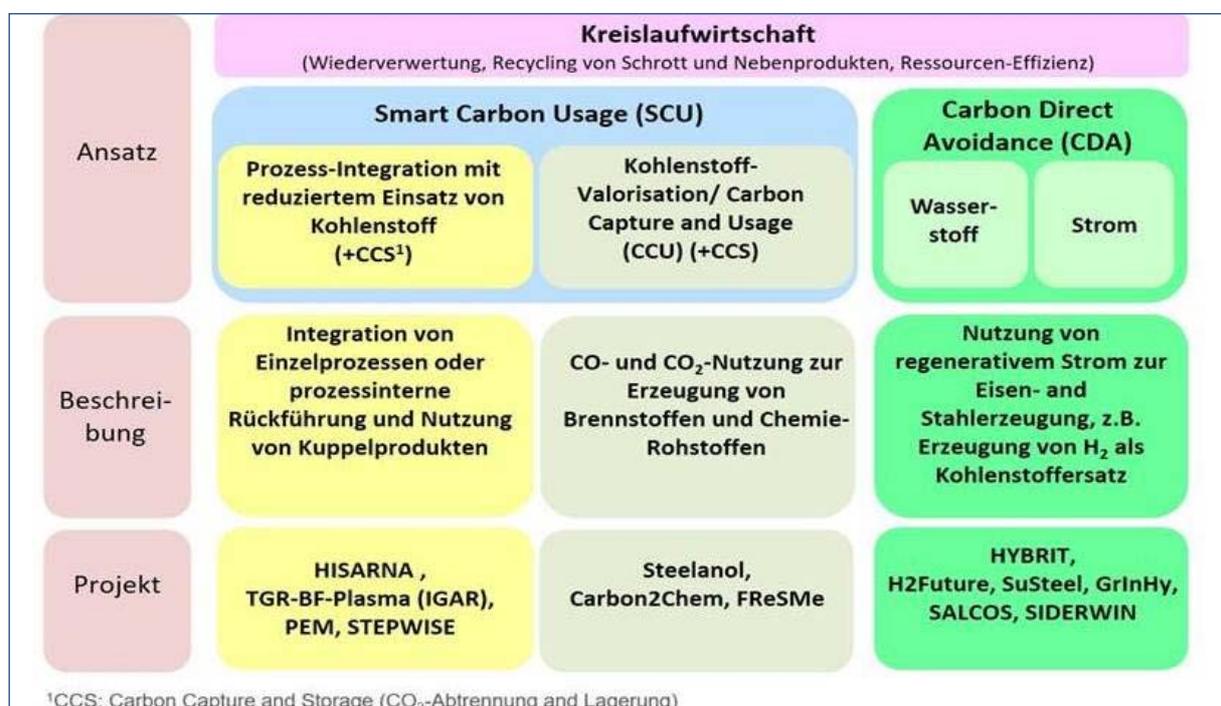


Bild 5: Projekte und Initiativen zur Verminderung von CO₂-Emissionen bei der Stahlerzeugung in der EU (Quelle: EUROFER, 2017)

Bei einem Wechsel bei den auf Eisenerz basierten Routen von Hochofen-Konverter auf Direktreduktion-Elektroofen kann künftig auf Koks und damit auf Kokereien verzichtet werden, dafür sind allerdings große Mengen Erdgas und/oder Wasserstoff und CO₂-freie elektrische Energie erforderlich.

Die inkrementellen Maßnahmen bei den bestehenden integrierten Hüttenwerken mit Hochofen und Konverter, wie zum Beispiel das Einblasen von wasserstoffreichen Gasen oder reinem Wasserstoff als Ersatz von Einblaskohlen in den Hochofen, führen zwar zu CO₂-Minderungen

von bis zu 20 % beim Hochofen, haben aber nicht die Wirkung einer massiven CO₂-Minderung ohne die Anwendung von CCS oder CCU. Projekte zur Stahlerzeugung auf Basis Kohlenstoff bei der Eisenerzreduktion in Kombination mit CCU sind Carbon2Chem [6] und Steelanol [7], ein Projekt in Verbindung mit CCS ist der Hlsarna Schmelzreduktionsprozess [8].

Für die CCU Projekte IGAR/Steelanol von ArcelorMittal und Carbon2Chem von thyssenkrupp können die spezifischen CO₂-Emissionen auf unter 600 kg CO₂/t Rohstahl abgesenkt werden [5]. Man muss dabei allerdings berücksichtigen, dass der Kohlenstoff der Prozessgase der Stahlindustrie nach wie vor in den CCU-Produkten enthalten ist. Die Hlsarna-Prozess-Route von Tata Steel Europe in Kombination mit Konverter kann in Verbindung mit CCS auch CO₂-Emissionen von unter 600 kg/t Rohstahl ermöglichen [5].

Da das Ziel einer weitgehenden klimaneutralen Stahlerzeugung voraussichtlich nur mit den Initiativen zu Carbon Direct Avoidance (CDA) zu erreichen ist, wird im Folgenden der Fokus des Berichtes auf diese Verfahrensrouten gelegt.

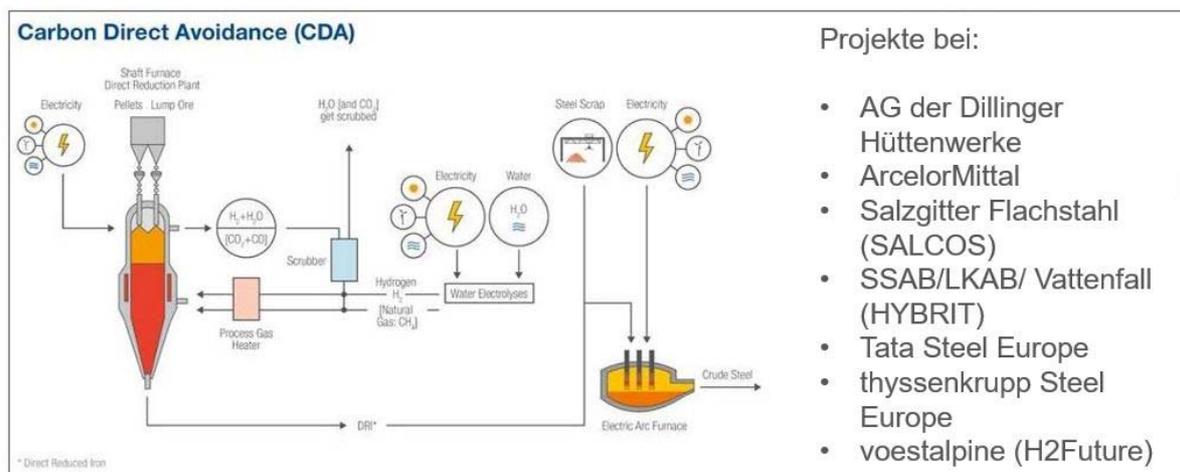


Bild 6: Erzeugung von „grünem Stahl“ mit Wasserstoff als Reduktionsmittel

Die Schwerpunkte bei der Säule CDA (Carbon Direct Avoidance) im Bild 5 liegen beim Einsatz von CO₂-freier elektrischer Energie und CO₂-freiem, grünem Wasserstoff bei der Stahlerzeugung und hierbei insbesondere bei der eisenerzbasierten Direktreduktion und dem Einschmelzen des dabei erzeugten DRI zur Stahlerzeugung im Elektrolichtbogenofen, **Bild 6**.

Bei der DRI-Erzeugung mit Wasserstoff sollen nach derzeitiger Planung überwiegend Schachtöfen zum Einsatz kommen. In solchen Direktreduktions-Schachtofenanlagen werden - wie bereits erwähnt - im Wesentlichen Eisenerzpellets durch Reformieren von Erdgas unter

Bildung der Reduktionsmittel CO und H₂ im „trockenen“ Zustand ohne Schmelzmetallurgie reduziert, d. h. vom Sauerstoff befreit. Es findet keine Erzeugung eines flüssigen Eisens und keine Schlackenmetallurgie statt; es wird daher auch kein Koks wie beim Hochofen benötigt.

Das erzeugte DRI enthält allerdings noch sämtliche Gangartbestandteile (Gesteinsanteile) der Eisenerze. Eine im Vergleich zum Konverter „eingeschränkte“ Schlackenmetallurgie erfolgt in der nachgeschalteten Stahlerzeugungsstufe Elektrolichtbogenofen. Die Schlackenmenge ist beim Elektrolichtbogenofen verfahrenstechnisch begrenzt. Um die Schlackenmenge möglichst niedrig zu halten, werden deshalb bei der DR-Anlage sogenannte DR-Pellets, die im Vergleich zu Hochofenpellets deutlich geringere Gangartbestandteile und somit höhere Fe-Gehalte haben, eingesetzt, **Tabelle 2**. Die bei der DR-Pelletherstellung eingesetzten Feinerze müssen dementsprechend intensiver aufbereitet werden.

Tabelle 2: Am Markt verfügbare Hochofen- und Direktreduktionspellets (Quelle: R. Jonckbloed, VDEh Stahllakademie, Seminar Iron Ores 2022, eigene Ergänzungen)

		Hochofenpellets		Direktreduktionspellets		
		min	max	min	max	Soll
Fe_{total}	% d.b.	61	67	67	68	>67
SiO₂	% d.b.	1,6	10,0	0,75	1,6	Summe <2,0
Al₂O₃		0,2	3,0	0,2	0,5	
TiO₂	% d.b.	0,01	0,04	0,01	0,15	<0,15
CaO	% d.b.	<1,0	4,0	0,2	2,0	Summe <3,0
MgO		<0,5	2,0	0,2	1,5	
CaO/SiO₂	-	<0,2	>0,4	0,27	1,25	

Als Vorgaben für die chemische Zusammensetzung von DR-Pellets sind Eisengehalte von größer 67 %, die Summe der Gehalte von SiO₂ und Al₂O₃ von kleiner 2,0 % und die Summe der Gehalte von CaO und MgO von kleiner 3,0 % hervorzuheben.

Die Schlacke des Elektrolichtbogenofens ist weit von der chemischen Zusammensetzung eines Hochofen-Hüttensandes entfernt und eignet sich nicht für eine Granulation zu Hüttensand, **Tabelle 3**. Die Basizität CaO/SiO₂ muss bei ca. 1 liegen, um eine glasige Schlacke zu erzeugen. Eine auf dem Einsatz von DRI und ca. 20 % Schrott basierende

Schlacke dürfte bei Chromgehalten von über 0,06 % aus Umweltgründen kritisch gesehen werden. Eine unzureichende Reduktion führt zu hohen FeO-Gehalten, die die hydraulischen und optischen Eigenschaften des Sandes beeinträchtigen. Die Al₂O₃-Gehalte müssen durch Zugabe von z.B. Bauxit bei gleichzeitig steigender Schlackenmenge auf ca. 11 % erhöht werden, um eine ausreichende Frühfestigkeit des Hüttensandes zu erreichen.

Tabelle 3: Schlackenzusammensetzung Hochofen-Hüttensand, Konverter- und Elektrolichtbogenofenschlacke (Quelle: Institut für Baustoff-Forschung e.V., 2022)

	HO-Hütten-sand	Konverter-schlacke	E-Ofen-Schlacke (Schrotteinsatz)
SiO ₂ , %	36,9	12,0	13,3
Al ₂ O ₃ , %	11,6	2,3	8,0
FeO, %	0,3	24,0	33,4
MnO, %	0,3	2,7	6,2
CaO, %	41,0	45,2	24,0
MgO, %	7,3	3,6	6,7
P ₂ O ₅ , %	0,01	1,45	0,30
Cr, %	0,003	0,230	1,620
B1 (CaO/SiO ₂)	1,1	3,8	1,8

Eine weitere Verfahrensvariante bei der Nutzung der Direktreduktionstechnologie auf Wasserstoffbasis ist das Einschmelzen des DRI in einem Elektroniederschachtofen (SAF - Submerged Arc Furnace oder OSBF - Open Slag Bath Furnace) zu flüssigem Roheisen mit entsprechender Schlackenmetallurgie und die Umwandlung des Roheisens zu Rohstahl im Sauerstoffkonverter [9, 10], **Bild 7**. Diese Option ermöglicht es, das vorhandene Oxygenstahlwerk mit seinen metallurgischen Vorteilen weiter zu betreiben und somit die bisher hergestellten Stahlqualitäten auch in Zukunft herstellen zu können.

Elektroniederschachttöfen oder Submerged Arc Furnaces oder Open Slag Bath Furnaces kommen im Wesentlichen bei der Erzeugung bzw. Erschmelzung von Ferrolegierungen (FeNi, FeMn) zum Einsatz [11]. Bei Steel Dynamics in Buttler, USA, wurde ein SAF zur Erzeugung

von Roheisen aus DRI eines Drehherdes mit einer Kapazität von 350.000 t/ Jahr betrieben [12].

Submerged Arc Furnaces oder Open Slag Bath Furnaces können rund oder rechteckig gebaut werden, die Bauhöhen betragen bis zu 10 m. Die Elektroden tauchen tief in die Beschickung ein, der Wärmeübergang erfolgt durch die Schlacke. Diese Verfahren arbeiten in reduzierender Atmosphäre und eignen sich daher gut zur Reduktion der FeO-Gehalte des DRI und zum Aufkohlen der Schmelze zu Roheisen. Es sind kontinuierlich und gleichmäßig arbeitende Prozesse, wodurch bei der Stromversorgung das typische „Flimmern“ des Elektrolichtbogenofens nicht auftritt.

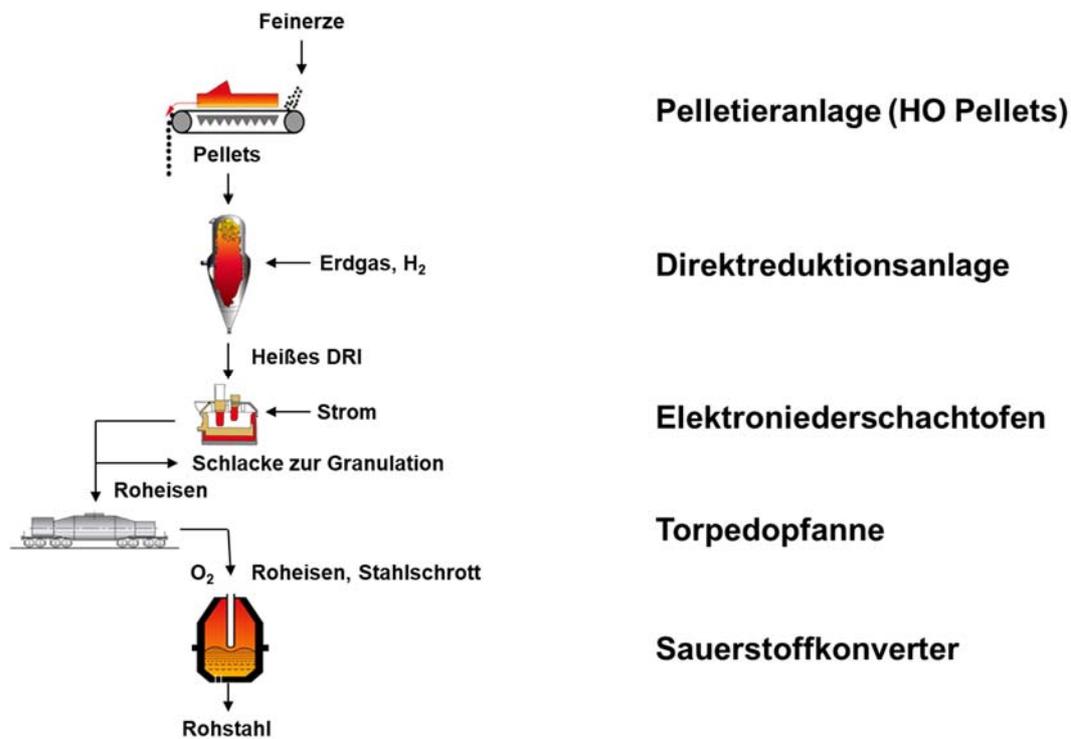


Bild 7: CO₂-freie Stahlerzeugung über Elektrorroheisen

Darüber hinaus sollte es möglich sein, mit einer angepassten Schlackenmetallurgie im Elektroniederschachtofen eine für die Hüttensanderzeugung geeignete Schlacke in vergleichbarer Qualität zur Hochofenschlacke herzustellen, um somit auch weiterhin bei der Zementproduktion mit Einsatz von Hüttensand unter Verdrängung von Portlandklinker weitere CO₂-Einsparpotenziale nutzen zu können. Bei dieser Verfahrensvariante mit Erzeugung eines Roheisens im Elektroniederschachtofen und nachfolgendem Einsatz im Oxygenstahlkonverter können übliche Hochofenpellets in der Direktreduktionsanlage eingesetzt werden.

Bei den heute weltweit angewendeten Verfahren zur Erzeugung von Stahl auf Basis von Eisenerzen hat die Hochofen-Konverter-Route den dominanten Anteil. Die für diese Route verfügbaren Eisenerze sind im Wesentlichen verschiedene Sinterfeed-Qualitäten und Stückerze mit Eisengehalten von bis zu 65%, **Bild 8**, bei der Direktreduktions-Elektrolichtbogenofenroute müssen dagegen Eisenerze mit Eisengehalten $>65\%$ zum Einsatz kommen. Bei nur begrenzter Verfügbarkeit dieser Fe-reichen Eisenerze ist deshalb weltweit eine Transformation von der Hochofen-Konverter- auf die Direktreduktion-Elektroofen-Route nicht darstellbar. Eine mögliche Lösung wäre ein signifikanter Anteil an Transformation zur Direktreduktion-Elektroniederschachtofen-Blasstahlkonverter-Route.

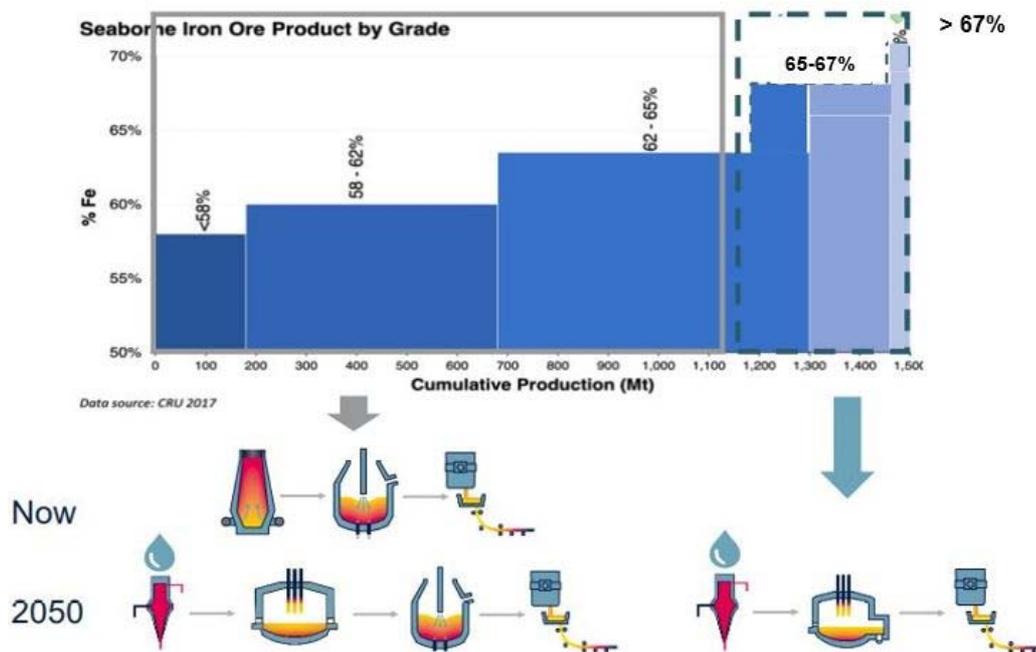


Bild 8: Die Eisenerzverfügbarkeit für die Route Direktreduktion-Elektrolichtbogenofen ist begrenzt (Quelle: Christian Böhm, VDEh Stahl-Akademie, Seminar Hydrogen-based reduction of iron ores 2022)

Tabelle 4 zeigt beispielhaft die Durchrechnung der CO_2 -Emissionen der Route H_2 -basierte Direktreduktion und Elektrolichtbogenofen. Als Rahmenbedingungen hierfür wurden festgelegt: Verfügbare CO_2 -freie elektrische Energie, verfügbarer grüner Wasserstoff als Reduktionsmittel, keine CO_2 -Belastung der am Weltmarkt bezogenen Eisenerzpellets und Erzeugung von DRI ohne Kohlenstoffgehalt. Die resultierenden CO_2 -Emissionen liegen bei ca. 200 kg/t Warmbreitband und stammen vom Elektrodenabbrand, den eingesetzten Zuschlagstoffen und den Legierungselementen sowie dem Kohlenverbrauch zur Schaumslaggenbildung im Elektrolichtbogenofen sowie dem Erdgasverbrauch im Elektrolichtbogenofen, der Stranggießanlage und dem Warmwalzwerk. Die Berechnung der

CO₂-Emission für die ausschließlich schrottbasierte Elektroofenroute kommt unter der Voraussetzung verfügbarer CO₂-freier elektrischer Energie zu dem gleichen Ergebnis. Ersetzt man darüber hinaus Kohle und Erdgas durch CO₂-neutrale Bio-Brennstoffe, verringert sich die CO₂-Emission auf ca. 60 kg/t Warmbreitband.

Tabelle 4: Berechnung der CO₂-Emissionen der Verfahrensrouten wasserstoffbasierte Direktreduktion und Elektrolichtbogenofen

Process step	Unit	Data		Total emissions kg CO ₂ / t product	
		Process Data Unit / t product	Carbon-Content kgC/unit		
Direct Reduction	Lump Ore	kg	0		
	Pellets	kg	1.400		
	Hydrogen	GJ	9,0		
	Electricity	kWh	80		
	Oxygen	m ³ _N	30		
	Electrolyzer		3.650		
	DRI (Output)	kg	1.000		
Net				0,00	
EAF	DRI	kg	911	0	
	Scrap	kg	200	0,0004	0,29
	Burnt lime	kg	32	0,0085	37,56
	Alloys	kg	30	0,0750	8,24
	Graphite electrodes	kg	3,0	0,989	13,02
	Coal for EAF	kg	8	0,819	24,01
	Natural Gas	GJ	0,35	15,28	19,60
	Electricity	kWh	410		
	Oxygen	m ³	25		
	Liquid steel (output)	kg	1.000	0,0004	1,47
Net				101,26	
Casting	Liquid steel	kg	1.024	0,0004	105,20
	Electricity	kWh	12,3		0,00
	Oxygen	m ³	1,18		0,00
	Natural gas	m ³	0,62	15,28	34,72
	Cast steel	kg	1.000	0,0004	1,47
	Scraps	kg	24	0,0004	0,04
Net				136,42	
Hot rolling	Cast steel	kg	1.020	0,0004	142,74
	Natural gas	m ³	31	0,576	64,88
	Electricity	kWh	107		
	Oxygen	m ³	1,77		
	Hot rolled steel	kg	1.000	0,0004	1,47
	Scrap	kg	20	0,0004	0,04
Net				206,12	

Randbedingungen

- 100% CO₂-freie elektrische Energie
- „Grüner“ H₂ als Reduktionsmittel
- Keine CO₂-Belastung bei Pellets
- C-freies DRI (Direct Reduced Iron)

Ergebnisse

- **206 kg CO₂/t Warmbreitband**
- **63 kg CO₂/t Warmbreitband bei Ersatz von Kohle und Erdgas durch Bio-Brennstoffe**

Tabelle 5 fasst die Ergebnisse der Berechnung von CO₂-Minderungen für die eisenerzbasierten Routen und die schrottbasierte Route zusammen. Die erreichbaren CO₂-Minderungen werden dabei in Relation zu den Emissionen des Jahres 2015 gesetzt. Im Vergleich zur konventionellen Hochofen-Konverter-Route ist durch Transformation auf die gänzlich grüne DR-EAF-Route eine CO₂-Minderung von 89 % und mit Einsatz von Bio-Brennstoffen sogar von 97 % möglich.

Bei der Elektroofenroute mit ausschließlichem Schrotteinsatz wird eine CO₂-Minderung zwischen 51 und 85 % im Vergleich zu der schon in 2015 sehr niedrigen CO₂-Emission erreicht.

Tabelle 5: Verringerung der CO₂-Emissionen in der Stahlindustrie durch die Optionen Direktreduktion, grüner Wasserstoff und grüne elektrische Energie

Iron ore based steelmaking			CO ₂ mitigation
BF-BOF-Route with pellet CO ₂ load (Baseline 2015)	kg CO ₂ /t CS	1.921	
"Classic" NG-based DR-EAF-Route with 300 g/kWh CO ₂ load of electric energy and pellet CO ₂ load	kg CO ₂ /t CS	1.098	-43%
H ₂ -based DR-EAF-Route with CO ₂ -free electric energy and pellet CO ₂ load	kg CO ₂ /t CS	339	-82%
H ₂ -based DR-EAF-Route with CO ₂ -free electric energy and pellets without CO ₂ load	kg CO ₂ /t CS	206	-89%
H ₂ -based DR-EAF-Route with CO ₂ -free electric energy, pellets without CO ₂ load and use of CO ₂ neutral fuels	kg CO ₂ /t CS	60	-97%
Scrap based steelmaking			CO ₂ mitigation
Scrap-EAF-Route with 300 g/kWh CO ₂ load of electric energy (Baseline 2015)	kg CO ₂ /t CS	410	
Scrap-EAF-Route with CO ₂ -free electric energy	kg CO ₂ /t CS	200	-51%
Scrap-EAF-Route with CO ₂ -free electric energy and use of CO ₂ neutral fuels	kg CO ₂ /t CS	60	-85%

Tabelle 6 enthält eine Übersicht der aktuellen CO₂-Minderungsprojekte der Stahlindustrie in Europa.

IGAR/Steelanol wendet das Lanzatech-Verfahren zur Fermentation des CO in den Prozessgasen der Stahlerzeugung zur Erzeugung von Bio-Ethanol an [7, 13]. Dabei entsteht ein CO₂-reicher Abgasstrom, der in einem Plasmabrenner zum Cracken von CH₄ und Umsetzung in die Reduktionsgase CO und H₂ genutzt wird. Die Reduktionsgase werden in den Hochofen eingeblasen. Die Gasfermentation wird anhand einer Versuchsanlage bei ArcelorMittal in Gent erprobt.

Tata Steel Europe, IJmuiden, hat das Hlsarna-Schmelzreduktionsverfahren auf Basis eines Eisenbadreaktors zusammen mit anderen Partnern entwickelt und fünf erfolgreiche Versuchskampagnen durchgeführt [8]. Der Hlsarna-Prozess wird mit Feinerzen und Feinkohle betrieben und kann somit auf Agglomerationsstufen wie Kokerei, Sinter- und Pelletanlage verzichten. CO₂-Minderungen im Prozess von 20 % gegenüber dem Hochofen und seiner Vorstufen sollen möglich sein. Massive CO₂-Minderungen sind jedoch nur in Verbindung mit CCS möglich.

Thyssenkrupp betreibt im Projekt Carbon2Chem eine Versuchsanlage in Duisburg zur Erzeugung von Chemierohstoffen aus den Prozessgasen von Kokerei, Hochofen und Konverter unter Einsatz von Wasserstoff [6].

Tabelle 6: Projekte in der EU-Stahlindustrie zur CO₂-Minderung

Smart Carbon Usage	ArcelorMittal	IGAR/Steelanol	CO/H ₂ als Reduktionsmittel (CCU)	[7]
	Tata Steel Europe	Hlsarna	CO als Reduktionsmittel (CCS)	[8]
	thyssenkrupp	Carbon2Chem Wasserelektrolyse	CO/H ₂ als Reduktionsmittel (CCU)	[6]
Carbon Direct Avoidance	AG der Dillinger Hütte	COG in BF DR (H ₂)/EAF	H ₂ als Reduktionsmittel	[16, 17]
	ArcelorMittal	DR (H ₂)/EAF Wasserelektrolyse	H ₂ als Reduktionsmittel	[13, 14, 15]
	Salzgitter Flachstahl	DR (NG, H ₂)/BF/EAF Wasserelektrolyse	H ₂ als Reduktionsmittel	[18]
	SSAB/LKAB/Vattenfall	DR (H ₂)/EAF Wasserelektrolyse	H ₂ als Reduktionsmittel	[22, 23]
	Tata Steel Europe	DR (NG, H ₂)/EAF	H ₂ als Reduktionsmittel	[21]
	thyssenkrupp Steel Europe	H ₂ in BF DR (NG, H ₂)/BF/SAF Wasserelektrolyse	H ₂ als Reduktionsmittel	[10, 19, 20]
	voestalpine	DR (NG, H ₂)/BF/EAF Plasmaschmelzen Wasserelektrolyse	H ₂ als Reduktionsmittel	[24]

Die wasserstoffbasierte DRI/EAF-Route wird in Deutschland bei ArcelorMittal in Hamburg [13, 14, 15], Bremen und Eisenhüttenstadt [13], bei der AG der Dillinger Hüttenwerke [16, 17], bei Salzgitter Flachstahl [18], bei thyssenkrupp Steel Europe in Duisburg [10, 19, 20], bei Tata Steel Europe in IJmuiden in den Niederlanden [21], bei SSAB/LKAB/Vattenfall in Schweden [22, 23] und bei voestalpine in Österreich [24] entwickelt. ArcelorMittal plant im Projekt „H₂H“ die Umstellung der DRI-Anlage in Hamburg von Erdgas auf Wasserstoff ab 2025. Der Einsatz von Wasserstoff für die Eisenerzreduktion im Direktreduktionsschacht wird in einer Pilotanlage mit einer Kapazität von 100.000 t/ Jahr untersucht.

Salzgitter Flachstahl plant im Rahmen des Salcos-Projektes im Jahr 2025 den Ersatz einer der drei Hochöfen durch die Inbetriebnahme eines Direktreduktionsschachtes (Tenova) und eines Elektrolichtbogenofens. Im Jahr 2033 soll der Transfer der Hochofen-Konverter-Route auf die Direktreduktion-Elektrolichtbogenofen-Route abgeschlossen sein [25].

SSAB, LKAB und Vattenfall betreiben im Projekt „Hybrit“ in Lulea eine Pilot-DR-Anlage (Tenova) zur Erprobung der Reduktion von Eisenerzen mit Wasserstoff. Der Hochofen in Lulea soll 2030 außer Betrieb gehen.

Voestalpine plant in 2027 die Inbetriebnahme eines Elektrolichtbogenofens in Linz und eines Elektrolichtbogenofens in Donawitz [26] als Ersatz von Hochofenkapazitäten. Damit sollen die CO₂-Emissionen um insgesamt 30 % verringert werden.

Thyssenkrupp will am Standort Duisburg im Jahr 2025 eine DR-Anlage und einen Elektrolichtbogenofen mit einer Kapazität von 1,2 Mio. t DRI und 1,2 Mio. t Rohstahl in Betrieb nehmen [27].

Stand der Verfahren zur Direktreduktion

Weltweit wurden im Jahr 2020 104,4 Mio. t DRI/HBI erzeugt [28], **Bild 9**.

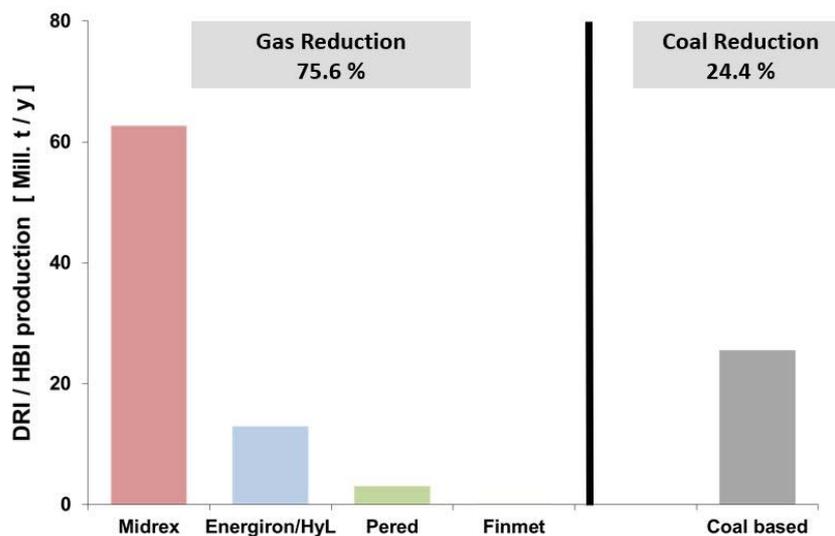


Bild 9: Anteil der Verfahren der Direktreduktion im Jahr 2020 [28]

Die Direktreduktionsverfahren lassen sich nach Art des Reduktionsmittels in Gasreduktions- und Feststoffreduktionsverfahren unterteilen. Der Anteil der gasbasierten Verfahren lag 2020 bei 75,6 %, wobei die Schachtofenverfahren Midrex mit 62,6 Mio. t und Energiron/HyL mit 12,9 Mio. t die größten Anteile hatten.

Das Reoxidationsverhalten von DRI macht besondere Vorsichtsmaßnahmen bei Transport und Lagerung notwendig. DRI ist daher bezüglich des Transportes als gefährliche Chemikalie eingestuft, da DRI pyrophor ist und in Kontakt mit Luftsauerstoff zum Brennen neigt. Reduziertes Eisen reagiert zudem mit Feuchtigkeit und Wasser, bildet dabei Wassergas, was zu Explosionen führen kann. Um dies zu verhindern, wird DRI, das die Form der eingesetzten Eisenerze hat, in inerter Atmosphäre gelagert und transportiert oder zur Verkleinerung der

spezifischen Oberfläche zu HBI (Hot Briquetted Iron) brikettiert. Der Anteil HBI lag 2020 bei 9,0 Mio. t.

Im Jahre 2020 wurden nur ca. 20 Mio. t DRI/HBI auf dem Land- oder Seeweg zu externen Abnehmern transportiert, d.h., der Hauptanteil wurde in den den Direktreduktionsanlagen angeschlossenen Elektrostahlwerken verarbeitet.

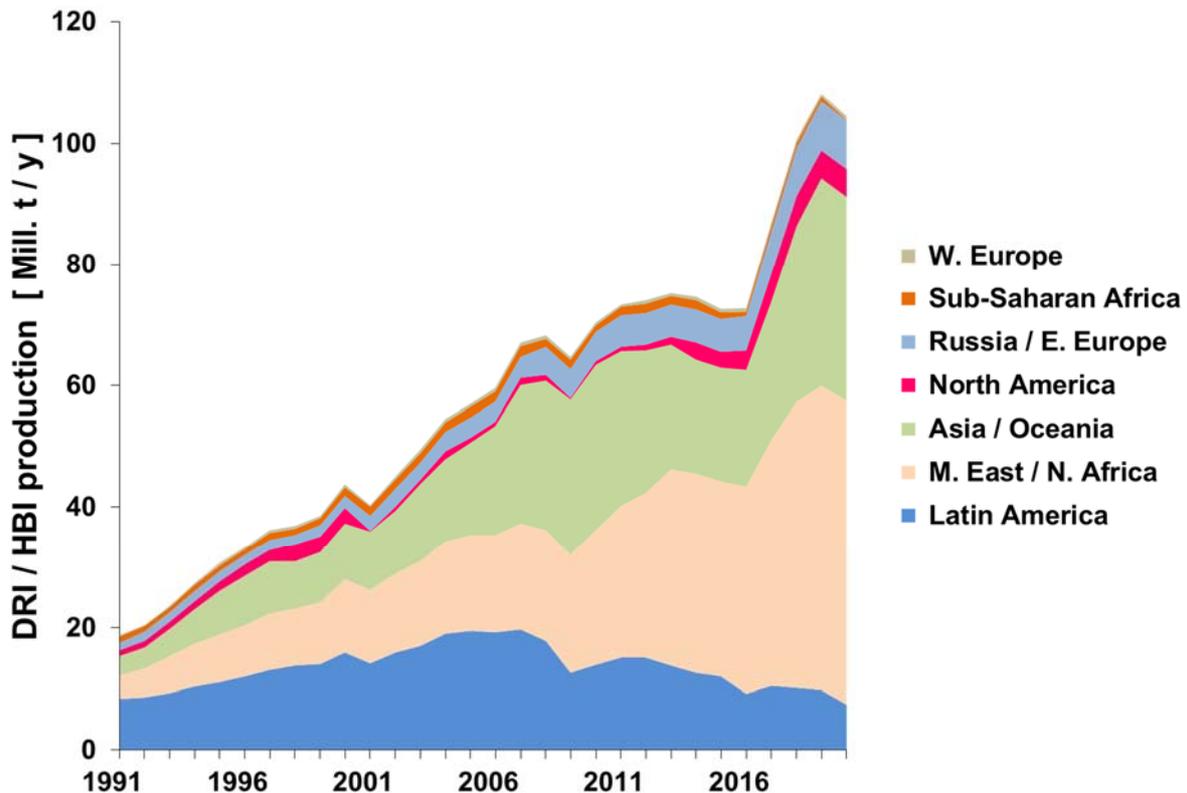


Bild 10: Welt DRI/HBI Erzeugung nach Regionen (Quelle: Midrex World Direct Reduction Statistics)

In den 1970er Jahren wurde den Direktreduktionsverfahren von vielen Fachleuten eine schnelle wirtschaftliche Verbreitung vorausgesagt, die allerdings nicht eingetreten ist. Insbesondere für die auf Erdgas basierenden Verfahren erlaubte die Energiesituation in der Welt den wirtschaftlichen Betrieb solcher Anlagen nur an wenigen Standorten mit verfügbarer preiswerter Energie, insbesondere preiswertem Erdgas, **Bild 10**. Dementsprechend fand die Zunahme der DRI/HBI-Erzeugung im Wesentlichen im mittleren Osten/Nordafrika und Asien/Ozeanien statt [27]. Die größten DRI/HBI-Produzenten waren in 2020 die Länder Indien (33 Mio. t), Iran (30 Mio. t), Russland (8 Mio. t) sowie Saudi-Arabien und Mexiko mit jeweils 5,2 Mio. t) [28].

Die „Marktführer“ bei der DRI-Produktion sind die gasbasierten Schachtofenverfahren Midrex und HyL/Energiron.

Weltweit sind 77 Midrex-Anlagen in Betrieb, drei befinden sich im Bau [28]. Die im **Bild 11** dargestellte Anlage von voestalpine und ArcelorMittal in Texas hat eine jährliche Kapazität von 2,0 Mio. t DRI und ging 2016 in Betrieb. Das größte Midrex-Modul der Algerien Qatari Steel verfügt über eine Kapazität von 2,5 Mio. t DRI/Jahr. Die einzige in der EU betriebene Direktreduktionsanlage ist die Midrex-Anlage von ArcelorMittal in Hamburg, die im Jahre 1971 angefahren wurde und jährlich etwa 400.000 bis 600.000 t DRI erzeugt.



Bild 11: Midrex-Anlage von voestalpine/ArcelorMittal in Corpus Christi, Texas, USA (Quelle: voestalpine)

Von dem HyL/Energiron-Schachtofenverfahren sind weltweit 16 Anlagen in Betrieb und zwei im Bau [28]. Die in **Bild 12** gezeigte Anlage von Nucor Steel in Louisiana, USA, hat eine Kapazität von jährlich 2,5 Mio. t DRI und wurde 2013 in Betrieb genommen. HyL/Energiron-Anlagen werden heute schon in der betrieblichen Praxis mit Wasserstoffgehalten im Reduktionsgas von 80 % betrieben.



Bild 12: Energiron-Anlage von Nucor Steel in Convent, Louisiana, USA (Quelle: Tenova)

Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Stahlerzeugung und die Stahlindustrie in Europa wird weitgehend klimaneutral werden müssen. Die neuen Wege zum Erreichen massiver CO₂-Minderungen lassen sich unterteilen in „Smart Carbon Usage“ (SCU) mit Prozessen, die Kohlenstoff zur Stahlerzeugung weiter nutzen, und „Carbon Direct Avoidance“ (CDA), die vorwiegend elektrische Energie und Wasserstoff unter Vermeidung von Kohle für die Stahlerzeugung einsetzen. Der Königsweg wird im Ersatz der CO₂-intensiven Hochofen-Konverter-Route durch die H₂-basierte Direktreduktion-Elektroofen-Route gesehen.

Tabelle 7: Zuwachsender Strombedarf für die Stahlerzeugung in Deutschland

	Per t DRI		Per t Crude steel	
Hydrogen	9,00	GJ	8,94	GJ
	75,02	kg	74,49	kg
	834,64	m ³ (STP)	828,80	m ³ (STP)
Electric power	75,00	kWh	74,48	kWh
DRI charge			993,00	Kg
Electric power			495,00	kWh
Total electric power w/o H ₂ production			569,48	kWh
H ₂ production			3.936,79	kWh
Additional green power downstream			777,80	kWh
Crude steel production via BF/BOF (2019)			27,760	Mill. t / y
DRI production			27,566	Mill. t / y
Total electric power w/o H ₂ production			15,81	TWh / y
Electric power for H ₂ generation			109,29	TWh / y
Additional green power downstream			21,59	TWh / y
Total electric power with H₂ production			146,69	TWh / y
CO ₂ emission conventional BF route			1.765	kg / t CS
CO ₂ emission hydrogen based route			154	kg / t CS
Electric power per t CO ₂ abatement			2.797,19	kWh / t CO ₂
H ₂ electrolysis	4,75	kWh / m ³ (STP)		

In der **Tabelle 7** ist der zuwachsende Strombedarf für die Stahlindustrie in Deutschland unter der Annahme, dass die gesamte integrierte Hochofen-Konverter-Route mit einer Erzeugung von 27,76 Mio. t Rohstahl (2019) auf die Direktreduktion-Elektrolichtbogenofen-Route transformiert wird. Dabei wird der Elektroofen mit einem metallischen Einsatz von 80 % DRI und 20 % Schrott betrieben. Der zuwachsende Bedarf an „grüner“ elektrischer Energie liegt bei jährlich 147 TWh. Wasserstoff wird in der Größenordnung von ca. 2,0 Mio.t/Jahr oder 22,8 Mrd. m³/Jahr benötigt

Mit der Transformation der Stahlerzeugung wäre in Deutschland die Schließung von fünf Kokereien (9,7 Mio. t Koks/a), 9 Sinterbändern (31,1 Mio. t Sinter/a), 15 Hochofen (32,5 Mio. t/a Roheisen) und (teilweise) von Oxygenstahlkonvertern sowie ein Neubau von ggf. Pelletanlagen (ca. 42 Mio. t/a Pellets), Schachtofen-Direktreduktionsanlagen (ca. 30 Mio. t/a DRI) und Elektrolichtbogenöfen oder ggf. Elektroniederschachtofen verbunden, **Bild 13**. Mit der schrottbasierten Elektrostahlroute besteht zwar bei Verwendung von CO₂-freiem Strom bereits eine weitgehend klimaneutrale Herstellungsrute, es können aber in der Regel nicht alle Stahlsorten mit ausschließlich Stahlschrott hergestellt werden und zudem ist die Verfügbarkeit von Stahlschrott begrenzt.

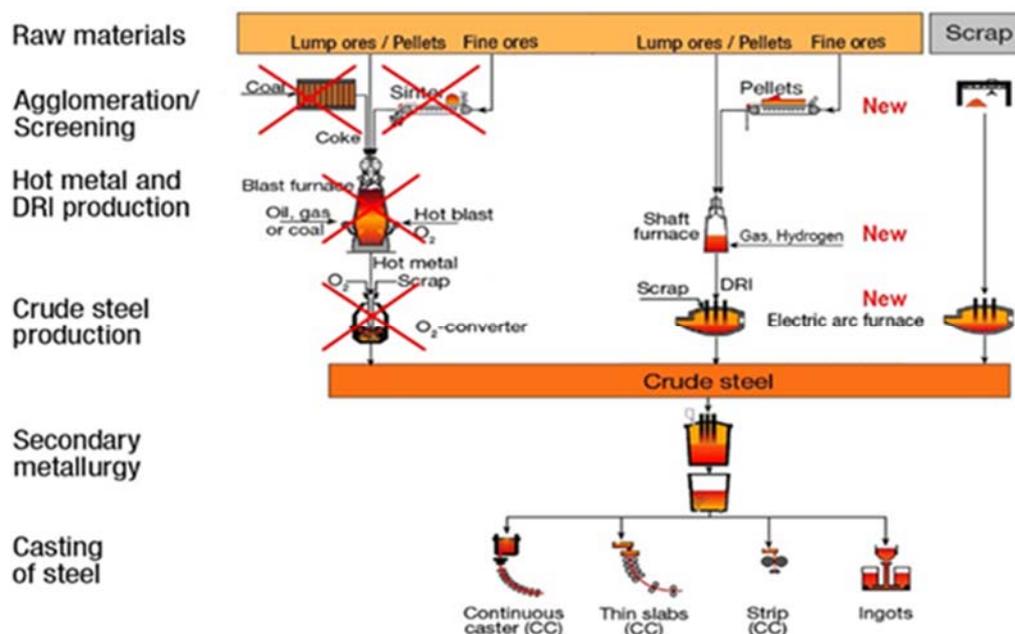


Bild 13: Transformation der Stahlindustrie zum Erreichen einer weitgehend klimaneutralen Stahlerzeugung

Für die Prozesse bzw. Szenarien zum Erreichen eines mindestens 95 % CO₂-Minderungsziels sind ein extrem hoher Bedarf an grüner elektrischer Energie, grünem Wasserstoff und in

Einzelfällen auch Biomasse sowie für die kohlenstoffbasierten Routen die Anwendung von CCS- und CCU-Technologien eine Grundvoraussetzung.

Die „neuen“ Wege zum „Low Carbon Steelmaking“ erfordern erhebliche finanzielle Aufwendungen für „Capex“ und „Opex“, die eine Stahlindustrie im internationalen Wettbewerb nicht stemmen kann, sowie Zeit.

Bisher ungeklärt sind die Themen Verfügbarkeit von Eisenerzen für Direktreduktions-Pellets, Verwendbarkeit metallurgischer Schlacken, Verbleib von Fein- und Kreislaufstoffen sowie Einschränkungen bei der Stahlqualität bei ggf. Entfall der Konvertermetallurgie.

Ungeklärt ist auch das finale Schicksal der Hochöfen:



Sprengen und verschrotten, oder...



...modernes Museum mit erfahrenen Museumsführern [29]

Schrifttum

- [1] Ludwig, K.-H.: Eine kurze Geschichte des Klimas; Verlag C.H. Beck, München, 15. Juli 2021
- [2] IPCC (Hrsg.): Fourth Assessment Report, Working Group I: The physical Science Basis, 2007
- [3] Lünen, H. B.; Schmöle, P.: Wege zur Minderung der CO₂-Emissionen bei der Eisen- und Stahlherstellung; Fachtagung Kokereitechnik, Dortmund, Germany, 23. Mai 2019
- [4] Lünen, H.B.; Schmöle, P.: Hochofenbetrieb ohne Koks und Kohlenstoff? Stahl und Eisen 124 (2004), Nr. 11, S. 63/72
- [5] Dahlmann, P.; Lünen H.B.; Sprecher, M.: Steel Roadmap for a Low Carbon Europe 2050 – Technical Assessment of Steelmaking Routes; Presented at METEC & 4th ESTAD on 25 June 2019, Düsseldorf, Germany
- [6] Oles; M.: Carbon2Chem: Reduce CO₂-emissions in a cross industrial network; METEC & 4th ESTAD, 24-28 June 2019, Düsseldorf, Germany
- [7] De Maré, C.: ArcelorMittal Europe Media Day, Paris, France, 11 December 2018
- [8] Santos, S.; Meijer, K.; van der Stel, J.; Broersen, P.; Moteiro, J.; van Os, P.: CO₂ capture in combination with the Hlsarna process; Proceedings ESTAD 2019, Düsseldorf, Germany, 24 to 28 June 2019
- [9] Erste Direktreduktionsanlage mit Einschmelzer; tk Steel Europe, stahl + eisen, Januar/Februar 2021, S. 16/17
- [10] Suer, J.; Ahrenhold, F.: Integration of DRI plants into classical BOF production sites; Proceedings of 5th ESTAD 2021, Stockholm, Sweden, 30 August to 2 September 2021
- [11] Friedrich, B.; Kalisch, M.; Friedmann, D. Degel, R.: The submerged arc furnace (SAF) – State of art in metal recovery from non-ferrous slags; 5th International slag valorisation symposium, Leuven, Belgium, 3.-5. April 2017
- [12] Carpenter, A.: CO₂ abatement in the iron and steel industry; Copyright IEA Clean Coal Centre, January 2012; ISBN 078-92-9029-513-6
- [13] Mittal, A.: ArcelorMittal seeks technology partners for decarbonization ventures; MPT International, April 2021, p. 24/25
- [14] Hölling, M.; Weng, M.; Gellert, S.: Bewertung der Herstellung von Eisenschwamm unter Verwendung von Wasserstoff; stahl und eisen 137 (2017), Nr. 6, S. 47/53
- [15] Wasserstoff-Stahlproduktion in Hamburg; STAHL + TECHNIK 1 (2019), Nr. 10, S. 21
- [16] Nachhaltige Stahlproduktion an der Saar: Dillinger und Saarstahl setzen erstmalig auf Wasserstoff im Hochofen zur CO₂-Minderung; ROGESA Pressemitteilung vom 24. Mai 2019
- [17] Transformation der Stahlindustrie benötigt industriepolitische Unterstützung; STAHL + TECHNIK 2 (2020), Nr. 3, S. 72/77
- [18] Hille, V.; SALCOS – Sustainable, stepwise and flexible decarbonisation based on proven technology; Proceedings of METEC & 4th ESTAD, 24-28 June 2019, Düsseldorf, Germany
- [19] thyssenkrupp: Unterwegs in eine Zukunft ohne CO₂ (<https://www.thyssenkrupp-steel.com>)
- [20] Knitterscheid, K.: Schluss mit Koksen, Handelsblatt, 21. Januar 2019

- [21] N.N.: Tata Steel entscheidet sich beim Stahlwerk IJmuiden für die Wasserstofftechnologie; Stahl + Technik 3 (2021), Nr. 10, S. 19
- [22] Hybrit JV planning to begin building demo plant for fossil-free steel in 2023; 02 June 2020 (<https://www.greencarcongress.com>)
- [23] Orre, J.; Larsson, M.; Riesbeck, J.; Alatalo, J.; Kumar, S.: Integration possibilities in a H₂-based DR plant; Proceedings of 5th ESTAD 2021, Stockholm, Sweden, 30 August to 2 September 2021
- [24] Buegler, Th.: Technology development hydrogen steelmaking; Proceedings of METEC & 4th ESTAD, 24-28 June 2019, Düsseldorf, Germany
- [25] Interview mit Gunnar Groebler, Vorstandsvorsitzender der Salzgitter AG, anlässlich der „Wire“ Düsseldorf, 15.-19. April 2022
- [26] voestalpine nimmt Milliarde für Klimaschutz in die Hand; Die Presse, 23. März 2022
- [27] Süddeutsche Zeitung vom 21. März 2022 „Steag und thyssenkrupp vereinbaren Wasserstofflieferung“
- [28] 2020 world direct reduction statistics, Midrex (www.midrex.com)
- [29] Längen, H.B.; Peters, M.; Schmöle, P.: Eisenerzeugung im Wandel; stahl und eisen 131 (2011), Nr. 4, S. 39/52