

Wege zur Minderung von CO₂-Emissionen in der Eisen- und Stahlindustrie in Europa

Dr.-Ing. Hans Bodo Lungen, Geschäftsführendes Vorstandsmitglied,
Stahlinstitut VDEh, Düsseldorf

Kurzfassung

Die „Schlüsselwege“ zur CO₂-Minderung der Stahlindustrie können unter den beiden Begriffen „Smart Carbon Usage“ (SCU) und „Carbon Direct Avoidance“ (CDA) zusammengefasst werden. SCU beinhaltet u.a. auf Basis von Kohlenstoffträgern zur Eisenerzreduktion neben inkrementellen Maßnahmen bei der konventionellen Hochofen-Konverter-Route auch die CO₂-Minderung durch Anwendung von sogenannten „end-of-pipe“ Technologien wie CCS (CO₂ Capture and Storage) und CCU (Carbon Capture and Usage). Zu CDA zählen die auf Schrott basierende Elektroofenroute und die auf Eisenerz basierende Stahlerzeugungsroute Direktreduktion-Elektroofen unter Verwendung von Erdgas und/oder Wasserstoff als Reduktionsmittel, also die vollständige Vermeidung des Einsatzes von Kohle oder Koks zur Reduktion der Eisenerze. Die Anwendung von CCU bei der konventionellen Hochofen-Konverter-Route, d.h., die Umwandlung der Prozessgase in Chemierohstoffe, sowie die Einführung der Direktreduktion mit Wasserstoff und anschließendem Erschmelzen des Eisenschwamms (DRI=Direct Reduced Iron) im Elektrolichtbogenofen führen zu einem Bedarf an großen Mengen Wasserstoff und CO₂-freier elektrischer Energie.

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 veröffentlicht. Am 11. Dezember 2019 hat die Europäische Kommission mit dem Green Deal das Ziel verkündet, 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 Treibhausgasreduzierungen um mindestens 55 % gegenüber 1990 angehoben werden soll. Die Umsetzung des 55%-Ziels soll durch ein europäisches „Fit for 55“-Gesetzespaket mit einer Revision zahlreicher energie- und klimabezogener EU-Richtlinien umgesetzt werden, die die EU-Kommission im Juni 2021 vorstellen will. Die Stahlindustrie teilt das Ziel, bis 2050 Treibhausgasneutralität zu erreichen und möchte bereits bis 2030 substanzielle CO₂-Einsparungen auf den Weg bringen.

Eine solche weitreichende Dekarbonisierung stellt für die gesamte Industrie eine enorme Herausforderung dar. Um dies 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 und konkurrenzfähige Stahlindustrie spielt eine entscheidende Rolle zur Erfüllung der langfristigen Klimaziele. Gleichzeitig muss die europäische Stahlindustrie im weltweiten Vergleich konkurrenzfähig sein.

Vor diesem Hintergrund hatte der europäische Stahlverband EUROFER das Stahlinstitut VDEh beauftragt, eine „Steelroadmap“ aus dem Jahre 2013 [1], an der seinerzeit der VDEh auch beteiligt war, zu aktualisieren. Die Arbeiten zu der Studie wurden von März bis Dezember 2018 durchgeführt und wesentliche Ergebnisse bei den 4. European Steel Technology and Application Days im Juni 2019 in Düsseldorf vorgestellt [2].

1. CO₂-Emissionen der Verfahren zur Stahlerzeugung

In **Bild 1** sind die in Europa zur Stahlherstellung angewendeten Prozessstufen dargestellt.

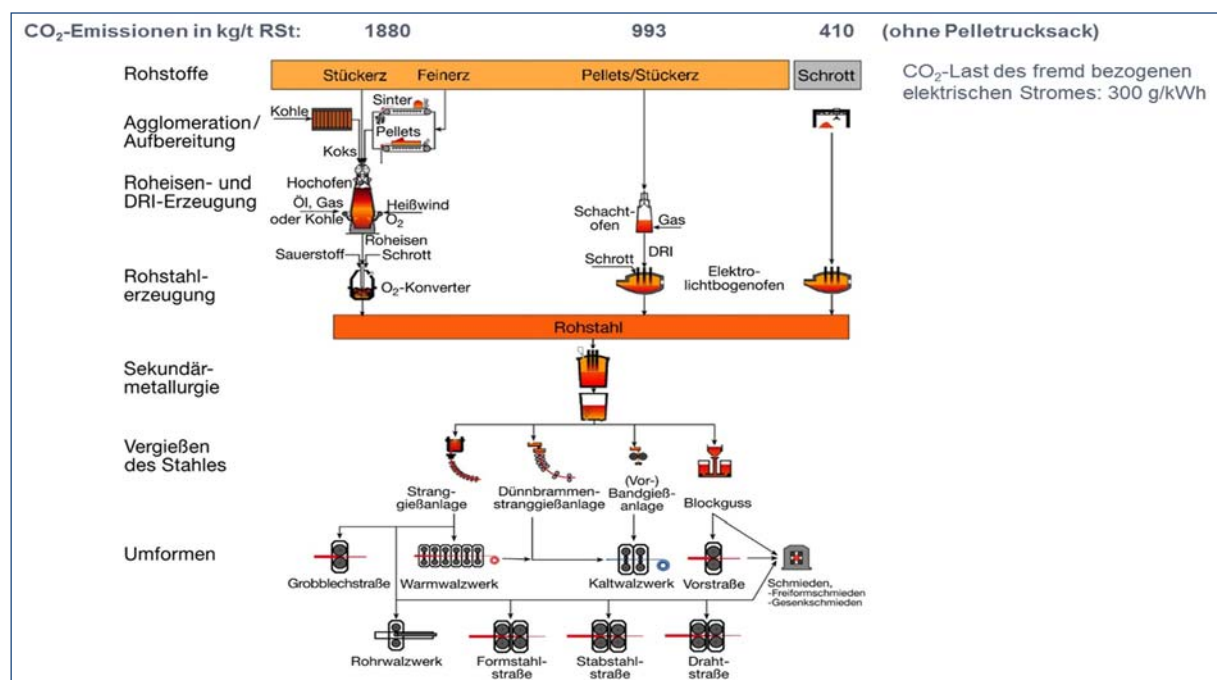


Bild 1: Prozessstufen zur Stahlherstellung in Europa [3]

Bei der Hochofen-Konverter-Route entstehen die CO₂-Emissionen in Höhe von 1880 kg/t Rohstahl direkt in den Produktionsprozessen Kokerei, Sinteranlage, Hochofen, Konverter und den nachfolgenden Prozessen Gießen und Umformen. 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 schon weitgehend von den Gesteinsanteilen (Gangart) der Eisenerze über eine Schlacke befreit wurde. Die dabei anfallende Hochofenschlacke wird in der Regel zu Hüttsand granuliert, der bei der Zementherstellung als Ersatz für Portlandklinker eingesetzt wird und dort zu erheblichen CO₂-Einsparungen führt. Ein Betrieb des Hochofens ohne Koks ist aus physikalischen Gründen nicht möglich. Der Koks garantiert

die Aufrechterhaltung der Durchgasung (Permeabilität) im Bereich der Erweichungs- und Schmelzzone der Eisenerze im Hochofen (kohäsive Zone), er ermöglicht die Drainage im Gestell für Roheisen und Schlacke und er bildet ein Stützgerüst für die Möllersäule oberhalb der kohäsiven Zone [18].

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. Diese Route ist in der Versorgung mit elektrischer Energie autark.

Bei der schrottbasierten Elektroofenroute entsteht nur ein Teil der CO₂-Emission bei den Produktionsprozessen. Der Großteil der CO₂-Emissionen kommt von der CO₂-Last der fremd bezogenen elektrischen Energie für die Prozesse, 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.

Wasserstoff ist bei der Eisenerzreduktion als Vorstufe zur Stahlherstellung das einzige alternative Reduktionsmittel zum Kohlenstoffmonoxid. Bei der Direktreduktion von Eisenerzen wird schon in der betrieblichen Praxis seit Anfang der 1970er Jahre wasserstoffreiches Erdgas als Reduktionsmittel zur Reduktion der Eisenerze eingesetzt. Dabei wird zum Beispiel unter Einsatz eines Schachtofens Eisenschwamm, international als DRI (Direct Reduced Iron) bezeichnet, erzeugt. Dem DRI wurde zwar weitgehend der Sauerstoff der Eisenerze entzogen, aber es fällt im festen Zustand an und enthält noch die Gangartbestandteile der Eisenerze. Die Weiterverarbeitung zu Rohstahl mit Schmelzen und Schlackenmetallurgie erfolgt im Elektrolichtbogenofen. Die CO₂-Emission dieser Route liegt bei 993 kg/t Rohstahl.

2. CO₂-Emissionen der EU 28 Stahlindustrie in 2015 im Vergleich zu 1990

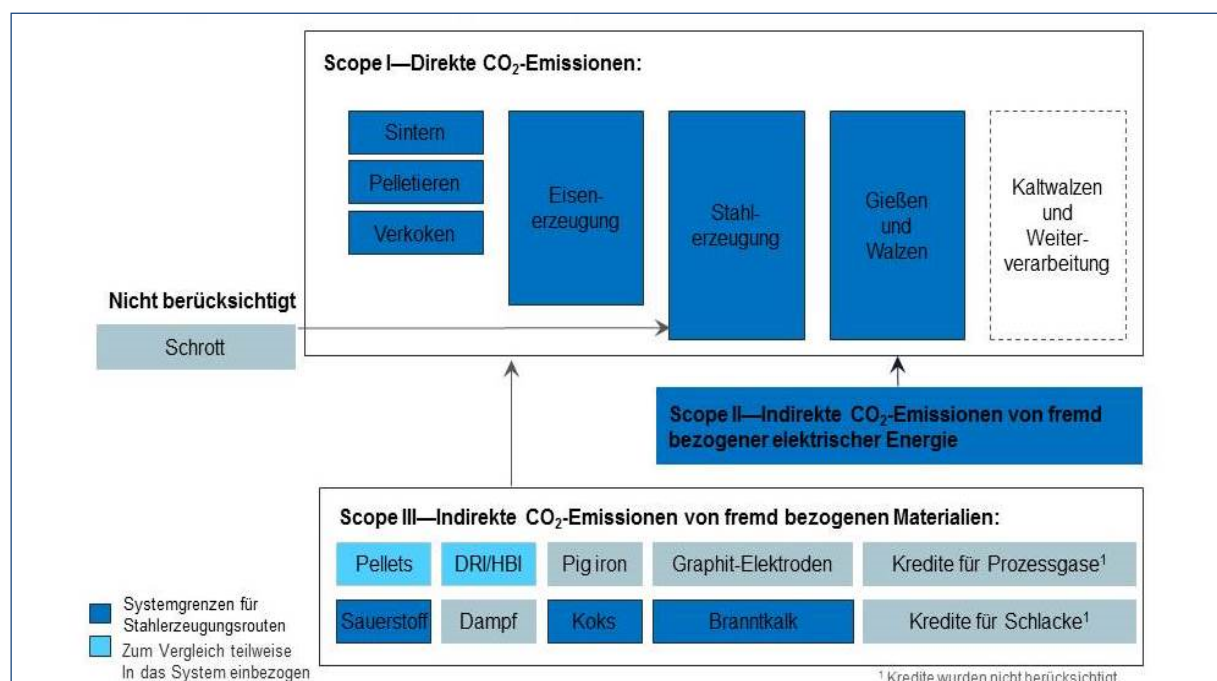


Bild 2: Systemgrenzen zur Ermittlung des CO₂-Fußabdrucks der EU 28 Stahlindustrie [2]

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 die Jahre 2010 und 2015 berechnet, um die schon erreichten Verminderungen der CO₂-Emissionen im Vergleich zu 1990 zu ermitteln.

Die Systemgrenzen für die Berechnung der CO₂-Emissionen der Stahlindustrie in Europa wurden so festgelegt, dass die bei den Prozessen entstehenden CO₂-Emissionen direkt in die Bilanz eingehen (Scope I), **Bild 2**. Die bei der energetischen Nutzung der Prozessgase der integrierten Route entstehenden CO₂-Emissionen sind also schon in der Bilanz der jeweiligen Prozessstufe enthalten.

Bei der schrott- und auch der DRI- basierten Elektroofenroute geht mit dem Verbrauch an fremd bezogenem Strom dessen CO₂-Emission als indirekte Emissionen in die Bilanz ein (Scope II).

Zum Vergleich wurden teilweise in bestimmten Szenarien die CO₂-Emissionen fremd bezogener Materialien, wie z.B. Eisenerzpellets oder fremd bezogenes DRI, in der Bilanz berücksichtigt (Scope III). Prozessgase der integrierten Route werden zur Erzeugung elektrischer Energie und von Wärme genutzt und decken den Bedarf der Route (Annahme der Selbstversorgung). Hierfür werden in der Bilanz auch keine Gutschriften berücksichtigt. Ebenso wurde auch nicht der Aspekt der CO₂-Minderung durch den Einsatz granulierter Hochofenschlacke in der Zementherstellung als Gutschrift gewertet, um Doppelberechnungen zu vermeiden.

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

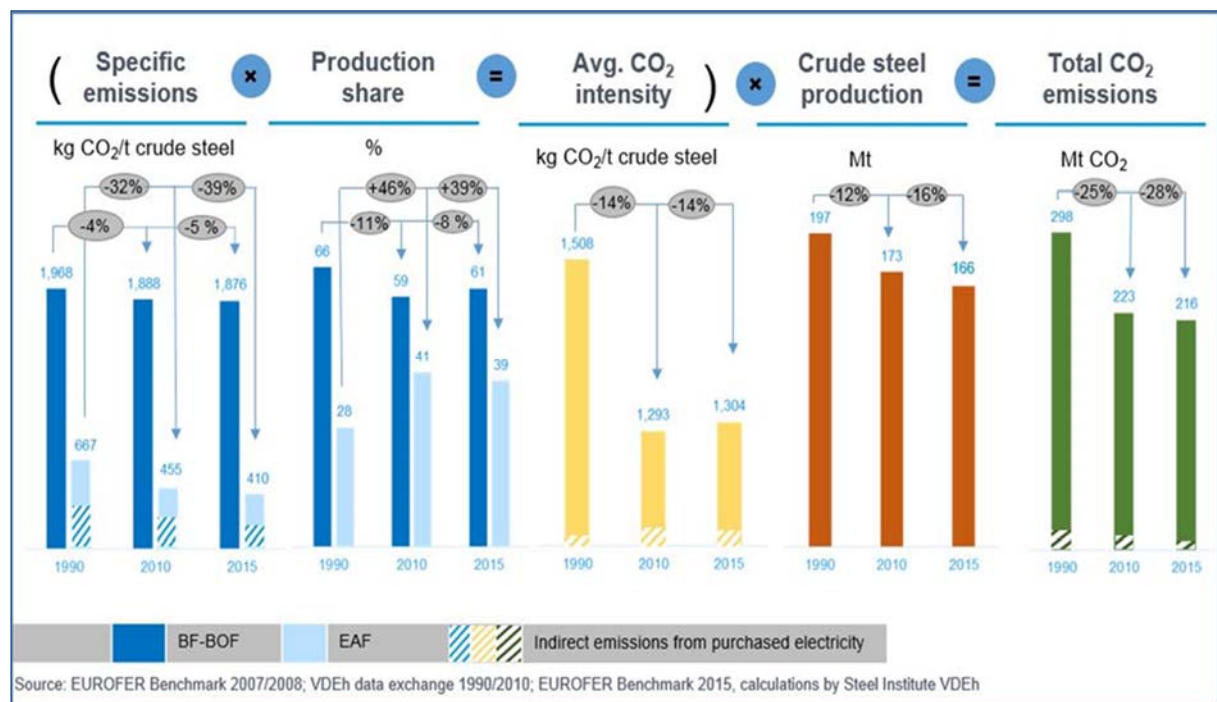


Bild 3: Ergebnisse der Ermittlung der CO₂-Emissionen der Europäischen Stahlindustrie in 1990, 2010 und 2020 [2]

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, zu erkennen an den rechten drei Balken unter „Total CO₂-emissions“, **Bild 3**.

Im gleichen Zeitraum ist allerdings auch die Stahlerzeugung in der EU 28 von 197 Mio. t auf

166 Mio. t um 16 % zurückgegangen, zu sehen anhand der Balken unter „Crude steel production“.

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, zu sehen anhand der Balken unter „Avg. CO₂ intensity“. Diese Zahlen ergeben sich aus den spezifischen Emissionen der integrierten Route und der Elektroofenroute sowie deren Anteil an der Gesamtstahlerzeugung der jeweiligen Jahre, zu sehen anhand der Balken unter „Specific emissions“ und „Production share“.

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.

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.

3. Optionen zum Erreichen des CO₂-Minderungsziels in 2050

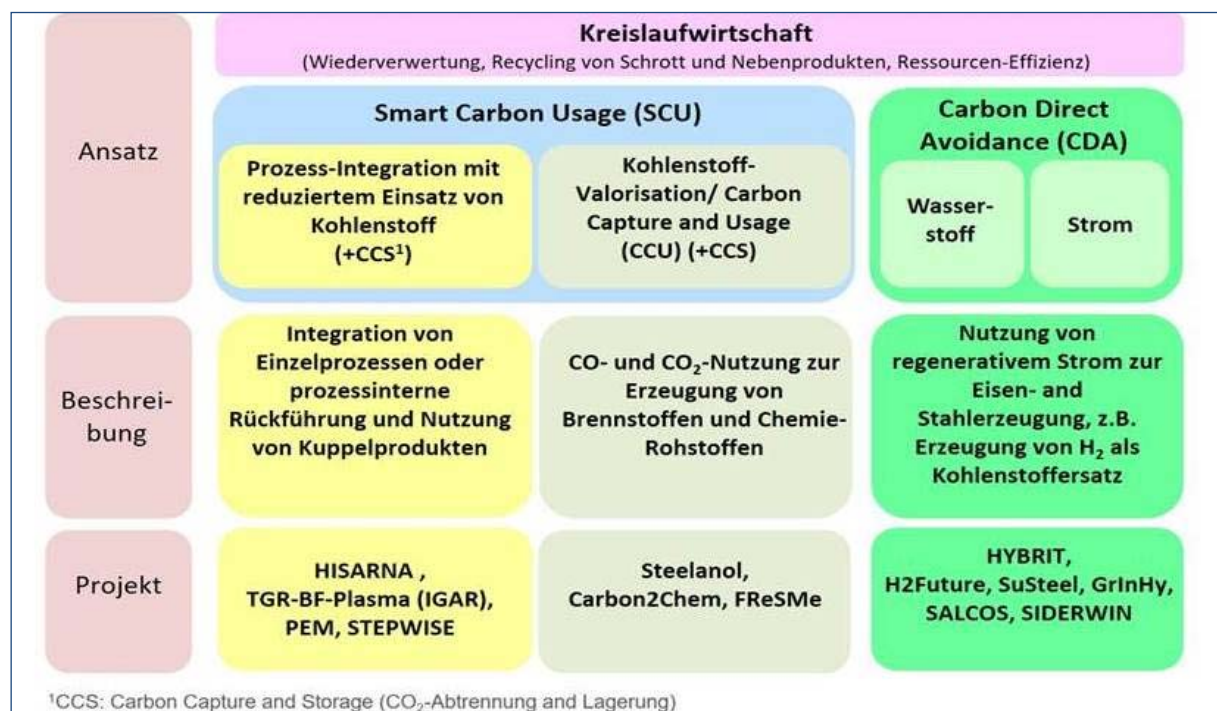


Bild 4: Projekte und Initiativen zur Verminderung von CO₂-Emissionen bei der Stahlerzeugung in der EU (Quelle: EUROFER, 2017)

Die „Schlüsselwege“ zur CO₂-Minderung der Stahlindustrie können in zwei Säulen zusammengefasst werden: Smart Carbon Usage (SCU) und Carbon Direct Avoidance (CDA), **Bild 4**. SCU beinhaltet neben inkrementellen Maßnahmen bei der konventionellen Hochofen-Konverter-Route auch 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.

Bei einem Wechsel bei den auf Eisenerz basierten Routen von Hochofen-Konverter auf Direktreduktion-Elektroofen kann künftig auf Kokereien verzichtet werden, dafür sind

allerdings große Mengen Erdgas und/oder Wasserstoff und CO₂-freie elektrische Energie erforderlich.

Eine grundsätzliche Vorgabe für die Studie war, dass zur CO₂-Minderung bei der Stahlerzeugung in der EU 28 kein sogenannter „Carbon leakage“-Effekt erfolgt, also zur CO₂-Minderung die Verlagerung von CO₂-intensiver Produktion in Regionen außerhalb Europas. Demnach wird bei dieser Studie bei Verfahrenswechseln die Erzeugung von agglomerierten Eisenerzen in Form von Pellets anstatt Sinter in Europa stattfinden und entsprechend fließen die CO₂-Emissionen in die Bilanz ein.

4. Smart Carbon Usage

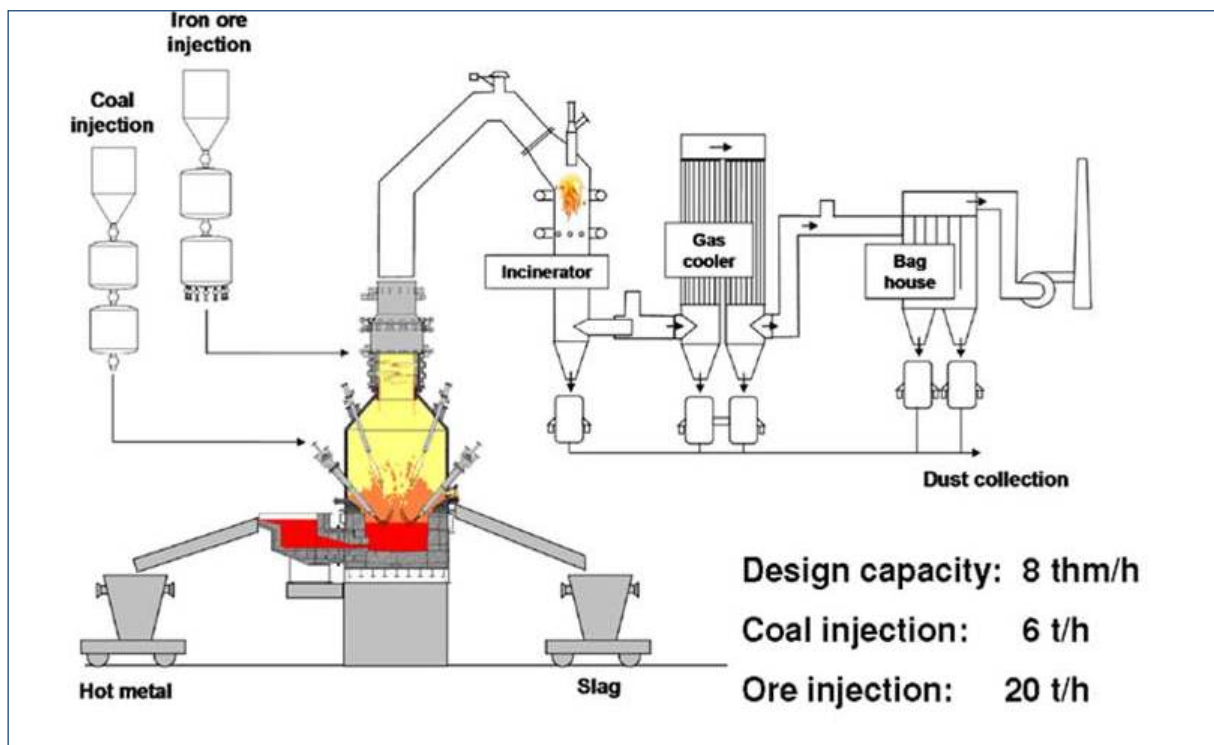


Bild 5: HIsarna Schmelzreduktionsverfahren bei Tata Steel in IJmuiden [4]

Die inkrementellen Maßnahmen bei den bestehenden integrierten Hüttenwerken mit Hochofen und Konverter führen zwar zu CO₂-Minderungen, 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 und Steelanol, ein Projekt in Verbindung mit CCS ist der HIsarna Schmelzreduktionsprozess, **Bild 5** [4].

Beim HIsarna-Prozess werden Feinerze und Kohle zur Erzeugung von flüssigem Roheisen unter Einsatz von reinem Sauerstoff eingesetzt. Das HIsarna-Verfahren benötigt keine Voragglomerationsstufen wie Kokerei, Sinter- oder Pelletanlage. Die hohe CO₂-Konzentration des Abgases ermöglicht die Anwendung von CCS.

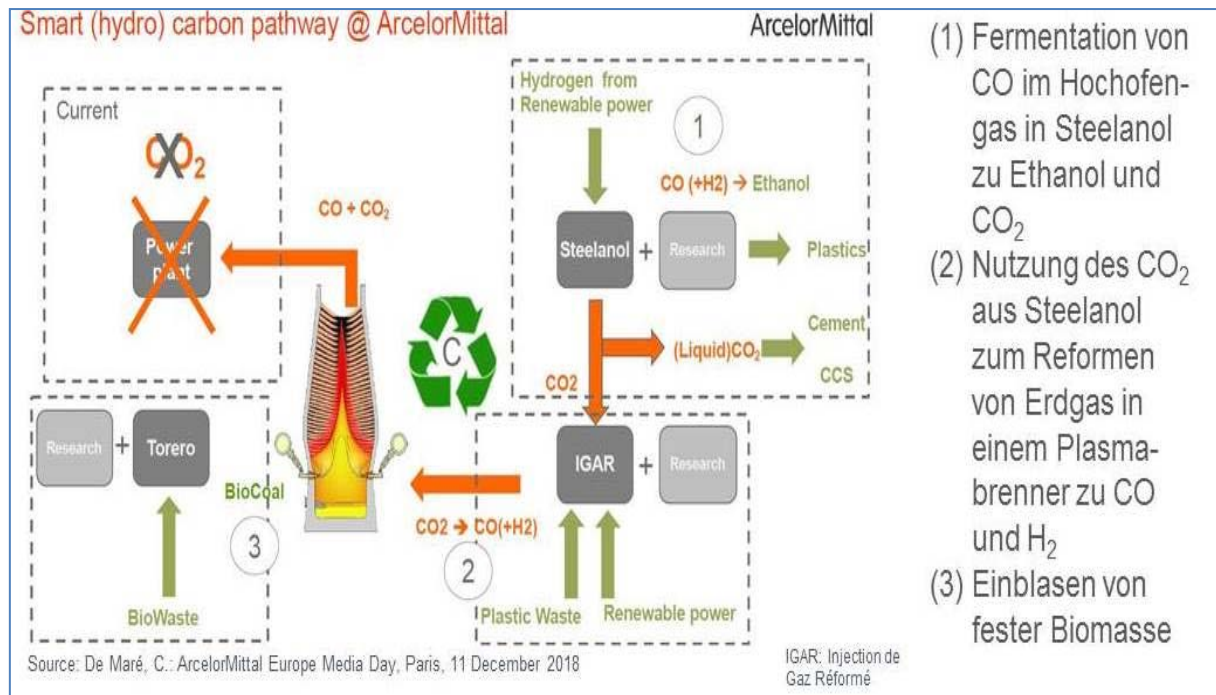


Bild 6: IGAR Steelanol Verfahrens-Kombination [5]

Beim Steelanol-Verfahren werden CO und H₂ im Hochofengas mit Hilfe von Mikroben in Ethanol umgewandelt, **Bild 6** [5]. Damit wird der Kohlenstoff aus dem CO des Prozessgases im Rohstoff Ethanol gebunden. Nach dem Steelanol-Prozess verbleibt ein CO₂-reicher Gasstrom, der direkt in der IGAR-Hochofentechnologie (IGAR = Injection de Gaz Réformé) genutzt wird, indem mit dem CO₂ in einem Plasmabrenner Erdgas in ein heißes Reduktionsgas bestehend aus CO und H₂ reformiert wird. Dieses Reduktionsgas wird über Windformen in den Hochofen eingeblasen. Für die Erzeugung des Plasmagases wird CO₂-freie elektrische Energie verwendet.

Der IGAR-Hochofenprozess wird mit Sauerstoff betrieben. Hohe Einblasraten von Kohle und Kohlenstoffträgern wie Biomasse und Kunststoffe in Kombination mit dem heißen Reduktionsgas ermöglichen sehr niedrige Koksverbräuche.

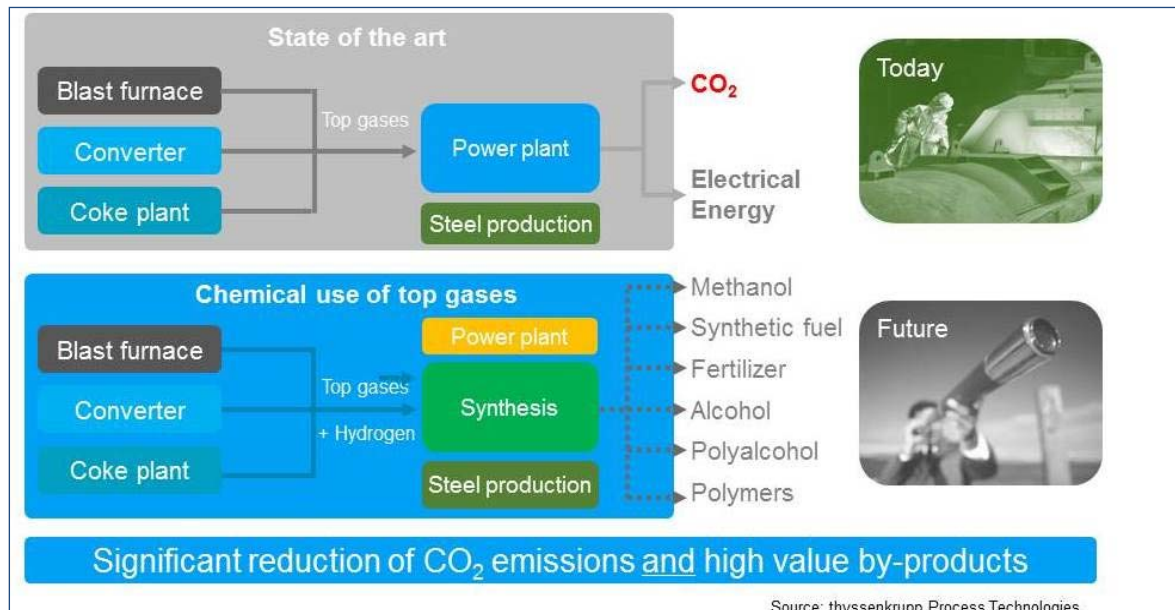


Bild 7: thyssenkrupp-Projekt Carbon2Chem – Chemische Nutzung von Prozessgasen [6]

Die Carbon2Chem Initiative von thyssenkrupp nutzt die Prozessgase eines integrierten Hüttenwerkes, wie Koksofengas, Hochofengas und Konvertergas, als Grundlage für die Erzeugung von chemischen Rohstoffen, **Bild 7** [6]. Die bei Carbon2Chem umgewandelten Hüttengase stehen allerdings nicht mehr zur Erzeugung von elektrischer Energie zur Verfügung. Der fehlende Strombedarf des Hüttenwerkes muss aus Gründen der CO₂-Wirksamkeit von Carbon2Chem fremd aus CO₂-freien Stromquellen bezogen werden. Das Carbon2Chem-Konzept benötigt für die Umwandlung der Hüttengase zusätzlichen Wasserstoff, der CO₂-frei hergestellt werden muss.

Der gesamte Kohlenstoff wird bei den Verfahren mit CCU maximal recycelt und in chemische Rohstoffe umgewandelt. Diese Verfahrensweisen stehen für „circular economy“.

5. Carbon Direkt Avoidance

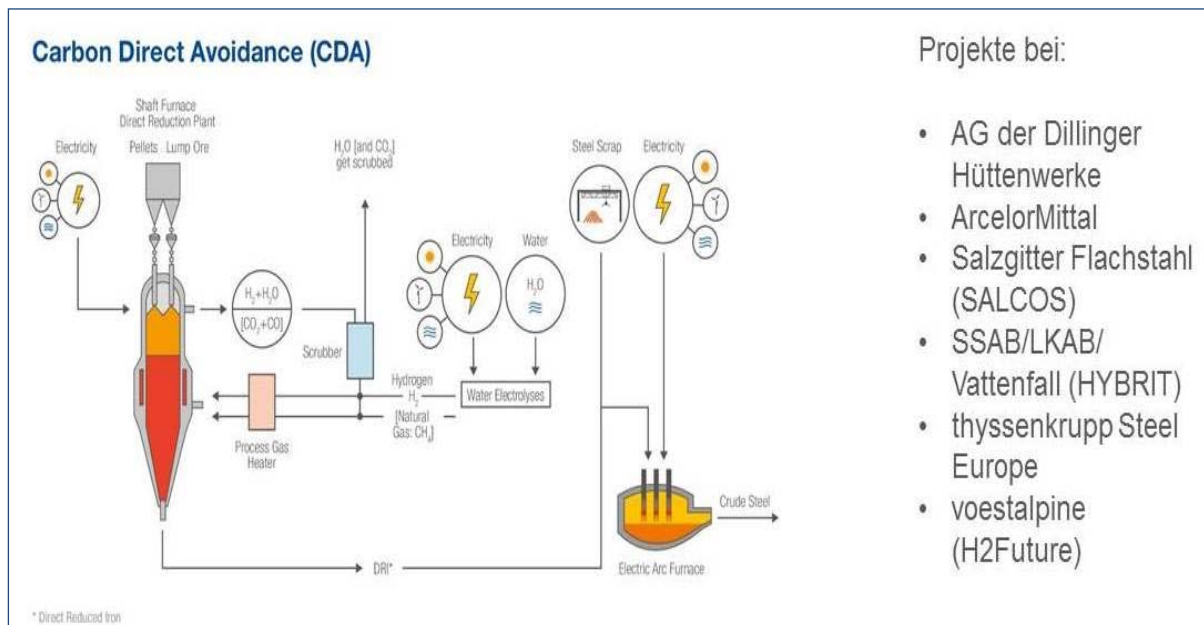


Bild 8: Erzeugung von „grünem Stahl“ mit Wasserstoff als Reduktionsmittel

Der Fokus bei der Säule CDA (Carbon Direct Avoidance) im Bild 4 liegt bei der eisenerzbasierten Direktreduktion und dem Einsatz des dabei erzeugten DRI zur Stahlerzeugung im Elektrolichtbogenofen, **Bild 8**. Bei der DRI-Erzeugung mit Wasserstoff sollen Direktreduktionsschachtöfen zum Einsatz kommen.

Weltweit werden derzeit 110 Direktreduktions-Schachtöfen (Midrex, HyL/Energiron) im industriellen Maßstab betrieben, die 2018 mit 79,4 Mio. t 79 % der weltweiten DRI-Produktion bereitgestellt haben [7]. Die maximale Erzeugungskapazität eines DRI-Schachtöfenmoduls liegt bei 2,5 Mio. t DRI/a. Diese Anlagen werden im Wesentlichen in Regionen/Ländern mit verfügbarem preiswertem Erdgas betrieben. Nur eine Anlage ist in Europa bei ArcelorMittal in Hamburg in Betrieb [7].

In solchen Direktreduktions-Schachtöfenanlagen werden im Wesentlichen Eisenerzpellets durch Reformieren von Erdgas zu den Reduktionsmitteln CO und H_2 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. Die Schlackenmetallurgie erfolgt in der nachgeschalteten Stahlerzeugungsstufe Elektrolichtbogenofen. Um die Schlackenmenge möglichst niedrig zu halten, werden bei der DR-Anlage sogenannte DR-Pellets, die im Vergleich zu Hochofenpellets deutlich geringere Gangartbestandteile enthalten, eingesetzt. Die bei der Pelletherstellung eingesetzten Feinerze haben eine dementsprechende intensivere Aufbereitung erfahren. Die Schlacke des Elektrolichtbogenofens eignet sich anders als die Hochofenschlacke nicht für eine Granulation zu Hüttensand. Eine weitere Verfahrensvariante bei der Nutzung der Direktreduktionstechnologie auf Wasserstoffbasis ist das Einschmelzen des DRI in einem Elektroniederschachtofen (SAF= Submerged arc furnace) zu flüssigem Roheisen mit entsprechender Schlackenmetallurgie und die Umwandlung des Roheisens zu Rohstahl im Sauerstoffkonverter [17]. 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. Darüber hinaus ist es möglich, mit der

Smart Carbon Usage	ArcelorMittal	IGAR/Steelanol	CO/H ₂ als Reduktionsmittel (CCU)	[5]
	Tata Steel Europe	Hisarna	CO als Reduktionsmittel (CCS)	[4]
	thyssenkrupp	Carbon2Chem Wasserelektrolyse	CO/H ₂ als Reduktionsmittel (CCU)	[6]
Carbon Direct Avoidance	AG der Dillinger Hüttenwerke	COG zu BF DR (H ₂)/EAF	H ₂ als Reduktionsmittel	[8, 9]
	ArcelorMittal	DR (H ₂)/EAF Wasserelektrolyse	H ₂ als Reduktionsmittel	[10, 11]
	Salzgitter Flachstahl	DR (NG, H ₂)/BF/EAF Wasserelektrolyse	H ₂ als Reduktionsmittel	[12]
	SSAB/LKAB/ Vattenfall	DR (H ₂)/EAF Wasserelektrolyse	H ₂ als Reduktionsmittel	[13]
	thyssenkrupp Steel Europe	H ₂ zu BF DR (NG, H ₂)/BF/SAF Wasserelektrolyse	H ₂ als Reduktionsmittel	[14, 15, 17]
	voestalpine	DR (NG, H ₂)/BF/EAF Plasma smelting Wasserelektrolyse	H ₂ als Reduktionsmittel	[16]
Projekte der EU-Stahlindustrie zur massiven CO ₂ -Minderung: Stromintensiv				

Bild 9: Projekte in der EU-Stahlindustrie zur CO₂-Minderung

Schlackenmetallurgie im Elektroniederschachtofen eine für die Hüttensanderzeugung geeignete Schlacke in vergleichbarer Qualität zur Hochofenschlacke herzustellen und somit auch weiterhin bei der Zementproduktion mit Einsatz von Hüttensand unter Verdrängung von Portlandklinker weitere CO₂-Einsparpotenziale zu nutzen.

Das Reduktionsgas der heute in industrieller Anwendung befindlichen Direktreduktions-Schachtöfen enthält je nach Verfahren schon 60 bis 80 % Wasserstoff. Das Ziel von CDA sind H₂-Anteile im Reduktionsgas von über 95 %.

Bild 9 enthält eine Übersicht der aktuellen CO₂-Minderungsprojekte der Stahlindustrie in Europa. Für die CCU Projekte IGAR/Steelanol von ArcelorMittal und Carbon2Chem von thyssenkrupp können spezifische CO₂-Emissionen von unter 600 kg CO₂/t Rohstahl erreicht werden [2]. Man muss dabei allerdings berücksichtigen, dass der Kohlenstoff der Prozessgase der Stahlindustrie nach wie vor in den CCU-Produkten enthalten ist.

Die Hisarna-Prozess-Route von Tata Steel Europe in Kombination mit Konverter kann in Verbindung mit CCS auch CO₂-Emissionen von unter 600 kg/t Rohstahl erreichen [2].

Die auf Wasserstoff basierte DRI/EAF-Route wird bei ArcelorMittal, Dillingen, Salzgitter und thyssenkrupp in Deutschland, bei SSAB/LKAB/Vattenfall in Schweden und bei voestalpine in Österreich entwickelt. Diese Prozessroute kann CO₂-Emissionen von 339 kg CO₂/t Rohstahl und niedriger erreichen. Voraussetzung für die erwähnten Verfahren ist die Verfügbarkeit großer Mengen von CO₂-freiem Wasserstoff und CO₂-freier elektrischer Energie.

6. Vergleich der Optionen ohne CCU/CCS

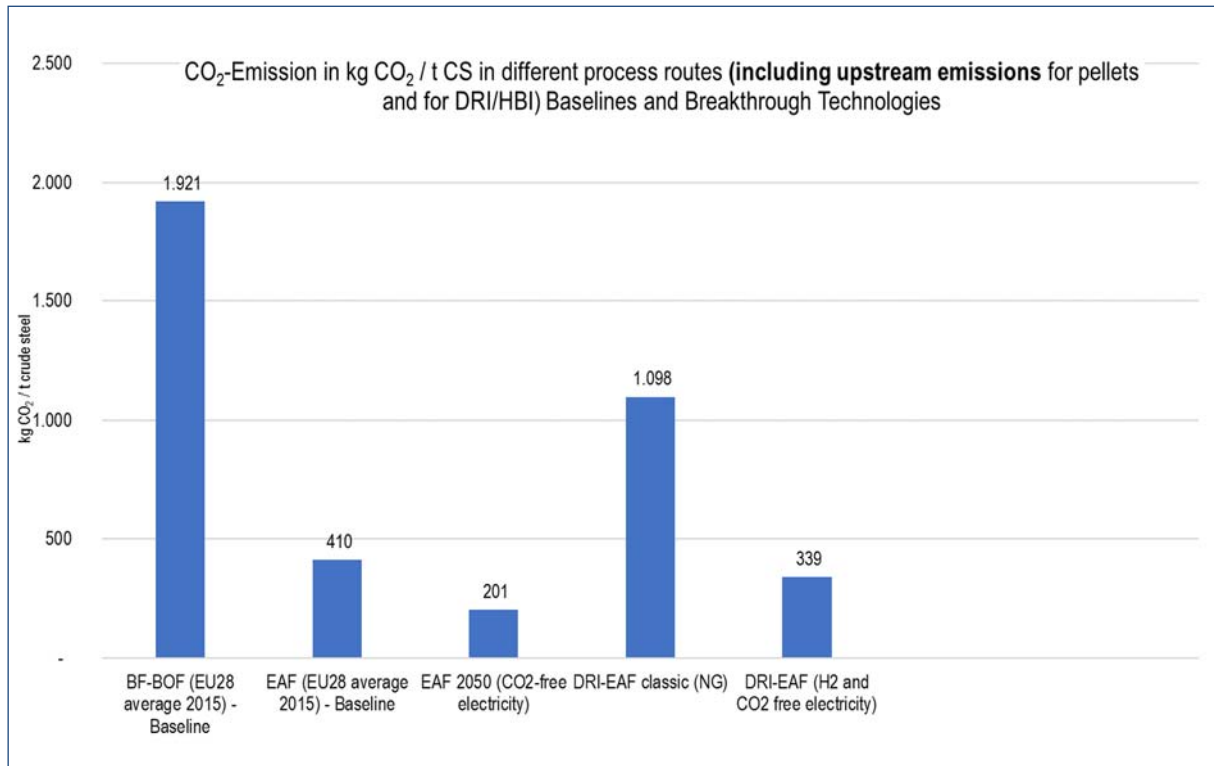


Bild 10: CO₂-Emissionen der Optionen [2]

Bild 10 zeigt die CO₂-Emissionen der alternativen Routen zur konventionellen Hochofen-Konverter-Route und der Schrott basierten Elektroofenroute, wobei die Optionen mit „end-of-pipe-Technologien“ (CCU und CCS) nicht einbezogen wurden. Die Ergebnisse beinhalten auch die CO₂-Emissionen der Pellets, eingesetzt im Hochofen und in der Direktreduktionsanlage. Für alle Routen sind auch die CO₂-Emissionen der nachgeschalteten Stranggießanlage und Walzwerke berücksichtigt.

Die Hochofen-Konverter-Route als Durchschnitt aller Werke in der EU 28 in 2015 liegt bei einer CO₂-Emission von 1921 kg/t Rohstahl. Die schrottbasierte Elektroofenroute hat eine CO₂-Emission von 410 kg/t Rohstahl bei einer CO₂-Last der elektrischen Energie in 2015 von 300 g/kWh.

Bei Annahme einer CO₂-freien elektrischen Energie verringern sich die CO₂-Emissionen dieser Route auf 201 kg/t Rohstahl.

Man sollte daraus allerdings nicht einfach schlussfolgern, dass eine Lösung der CO₂-Problematik bei der Stahlerzeugung der Wechsel von der Hochofen-Konverter-Route auf die schrottbasierte Elektroofenroute ist. Es können nämlich nicht alle Stahlsorten über die schrottbasierte Elektroofen-Route hergestellt werden. Für hochwertige Flachstahlgüten sind als metallische Einsatzstoffe Eisenerze oder sehr „saubere“ Schrotte erforderlich.

Die erdgasbasierte DRI-EAF-Route emittiert bei der aktuellen CO₂-Last der elektrischen Energie 1098 kg CO₂/t Rohstahl. Die Verfügbarkeit von CO₂-freier elektrischer Energie ist auch eine Grundvoraussetzung für die CO₂-Minderung über die wasserstoffbasierte DRI-EAF-Route mit CO₂-Minderungen bis unter 339 kg/t Rohstahl.

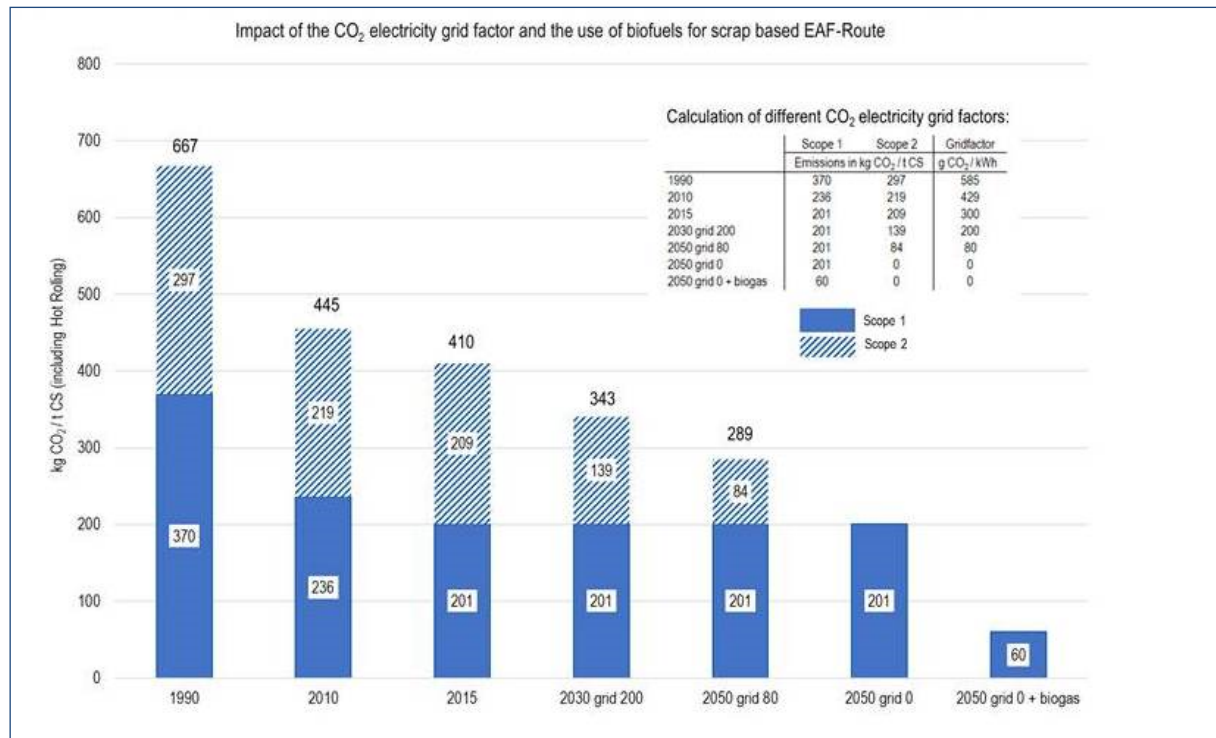


Bild 11: Direkte und indirekte Emissionen der Schrott basierten Elektroofenroute [2]

Der Einfluss des CO₂-Faktors des Stromnetzes über die Jahre von 1990 bis 2050 für die Schrott basierte Elektroofenroute auf die CO₂-Emission lässt sich an **Bild 11** ablesen.

Massive CO₂-Minderungen dieser Route sind direkt verbunden mit der CO₂-Last der elektrischen Energie.

Die „International Energy Agency“ prognostiziert für das Jahr 2050 einen CO₂-Faktor des Netzes in Europa von 80 g/kWh, was für diese Route zu einer CO₂-Minderung auf 289 kg/t Rohstahl führen kann oder zu einem Minus von 57 % in 2050 im Vergleich zu 1990.

Falls die gelieferte Energie durch CO₂-neutrale Brennstoffe oder CO₂-freie elektrische Energie bereitgestellt wird, können die CO₂-Emissionen sogar auf bis zu 60 kg/t Rohstahl verringert werden, die noch unvermeidlich von dem Verbrauch der Graphitelektrode und dem Einsatz von Zuschlagstoffen und Legierungselementen generiert werden. Dies entspricht für die Schrott basierte Elektroofenroute im Vergleich zu 1990 einer CO₂-Minderung von 91 %.

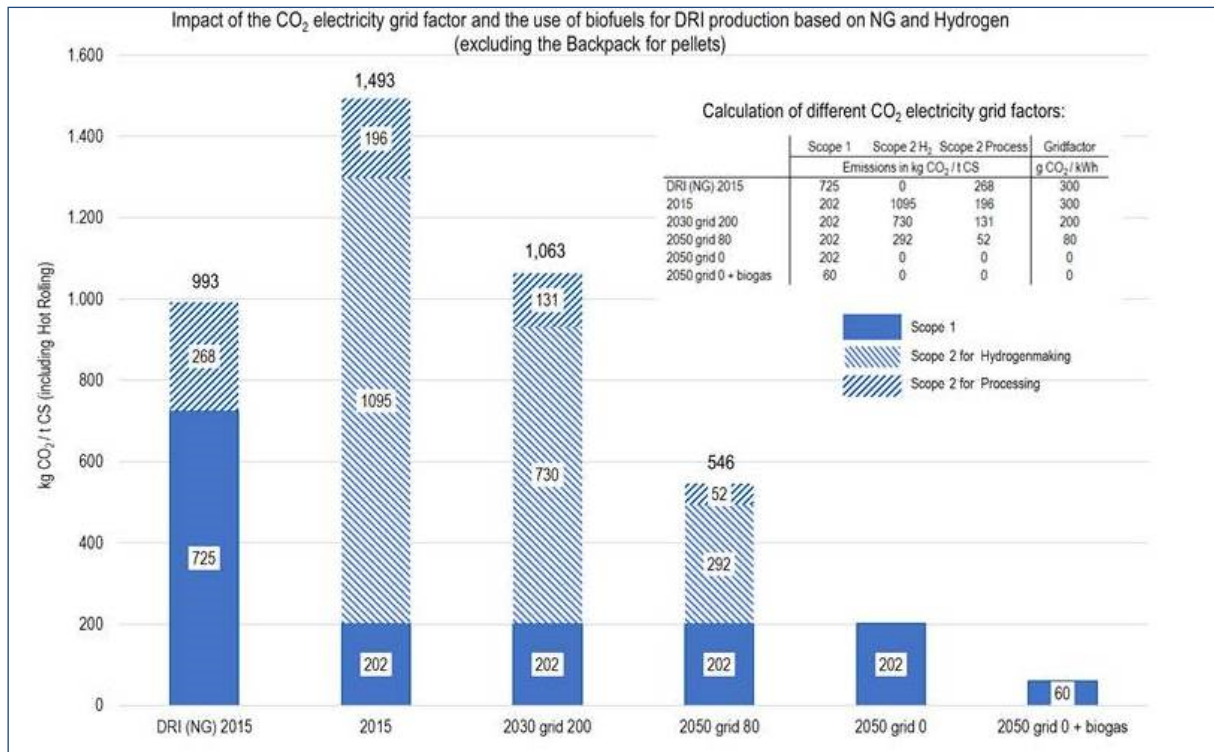


Bild 12: Direkte und indirekte Emissionen der DRI (Erdgas) und DRI (Wasserstoff) basierten Elektroöfenrouten [2]

Derselbe Effekt der CO₂-Intensität der elektrischen Energie ist bei der Erdgas und Wasserstoff basierten DRI-EAF-Route erkennbar, **Bild 12**.

Bei einem CO₂ Netz-Faktor von 80 g CO₂/kWh können die CO₂-Emissionen in 2050 um 72 % im Vergleich zur Hochofen-Konverter-Route von 1990 verringert werden, von 1668 kg CO₂/t Rohstahl (Bild 3) auf 546 kg CO₂/t Rohstahl. Die wasserstoffbasierte DRI-EAF-Route erreicht die gleiche niedrige CO₂-Intensität von 202 kg/t Rohstahl wie die schrottbasierte Elektroöfenroute beim Einsatz von CO₂-freier elektrischer Energie, allerdings nur ohne den „Pelletrucksack“. Beim Einsatz von CO₂-neutralen Brennstoffen lässt sich die CO₂-Emission auch hier auf 60 kg/t Rohstahl ohne „Pelletrucksack“ wie bei der Schrott basierten Elektroöfenroute verringern, welche dann wie erwähnt nur noch von den Kohlenstoffgehalten der Graphitelektrode, den Zuschlägen und den Legierungselementen kommt. Die CO₂-Minderung liegt hier im Vergleich zur Hochofen-Konverter-Route von 1990 immerhin bei 97 %. Pellets müssten zum Erreichen dieses Ziels auch CO₂-frei hergestellt werden.

7. Mögliche maximal zulässige CO₂-Emissionen der EU 28 Stahlindustrie in 2050

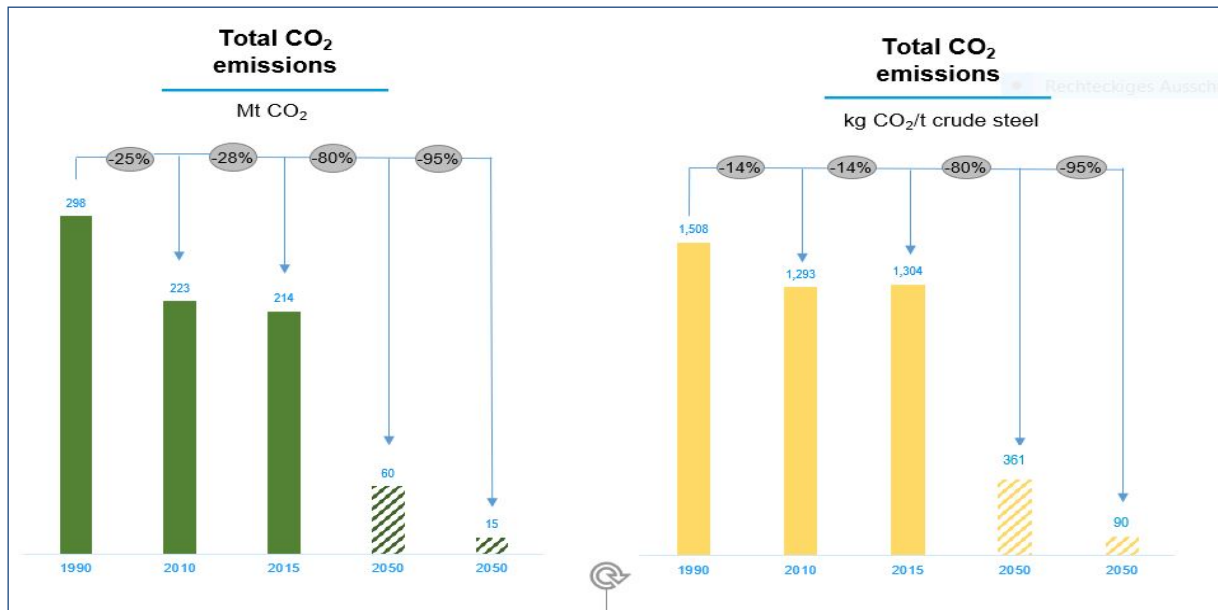


Bild 13: Maximale zulässige CO₂-Emissionen in 2050 zum Erreichen des 80 % und 95 % Minderungsziels bei einer Rohstahlerzeugung von 166 Mio. t

Was bedeuten die Vorgaben der EU nach einer Verringerung der CO₂-Emissionen der EU 28 Stahlindustrie in 2050 um 80 oder 95 % gegenüber 1990?

Wie im **Bild 13** zu sehen, müssen die gesamten CO₂-Emissionen der EU 28 Stahlindustrie von 298 Mio. t in 1990 auf 60 Mio. t in 2050 im 80 %-Szenario und auf nur noch 15 Mio. t im 95 %-Szenario verringert werden. Unter der Annahme, dass die Höhe der Stahlerzeugung in der EU auf dem Niveau von 2015 liegt (166 Mio. t), dann erfordert die Erreichung des Ziels eine Verringerung der spezifischen CO₂-Emissionen auf 361 bzw. 90 kg CO₂/t Rohstahl. Technisch ist dies mit den beschriebenen neuen Verfahrenswegen durchaus erreichbar, allerdings verbunden mit einem Verfahrenswechsel oder Verfahrensanpassungen und mit einem erheblichen finanziellen Aufwand.

Der Bedarf an „grüner“ elektrischer Energie für die Erzeugung von Wasserstoff und die Versorgung der Prozesse für die Stahlerzeugung dürfte ein Niveau von 450 bis 500 TWh/a in 2050 erreichen. Der Erfolg zur Verminderung der CO₂-Emissionen ist auch massiv gekoppelt an den Einsatz und die Verfügbarkeit von Biobrennstoffen als Ersatz von fossilen Rohstoffen.

8. Schlussfolgerungen

Die neuen Wege zum Erreichen massiver CO₂-Minderungen werden unterteilt 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.

Für alle Prozesse bzw. Szenarien zum Erreichen des 80 % oder 95 % CO₂-Minderungsziels sind ein extrem hoher Bedarf an grüner Energie, grünem Wasserstoff und Biomasse sowie für Kohlenstoff basierte Routen die Anwendung von CCS- und CCU-Technologien eine Grundvoraussetzung.

Außerdem erfordern die „neuen“ Wege zum „Low Carbon Steelmaking“ erhebliche finanzielle Mittel für „Capex“ und „Opex“ sowie Zeit.

9. Schrifttum

- [1] Dahlmann, P.; Ghenda, J.-T.; Längen, H. B.; Schuler, F.; Voigt, N.; Wörtler, M.: Steel's contribution to a low-carbon Europe; 2013
- [2] Dahlmann, P.; Längen 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
- [3] Längen, H. B.; Schmöle, P.: Wege zur Minderung der CO₂-Emissionen bei der Eisen- und Stahlherstellung; Fachtagung Kokereitechnik, Dortmund, 23.05.2019
- [4] van der Stel, J.; Meijer, K.; Zeilstra, Ch.; van Boggelen, T.; Dry, R.: HIsarna smelting reduction – a solution for sustainable hot metal production; in: Reducing the carbon footprint of the steel industry, Zaandam and Petten, NL, 19 – 20 April 2017
- [5] De Maré, C.: ArcelorMittal Europe Media Day, Paris, 11 December 2018
- [6] Oles, M.: Carbon2Chem: Reduce CO₂-emissions in a cross industrial network; METEC & 4th ESTAD, 24-28 June 2019, Düsseldorf, GERMANY
- [7] 2018 world direct reduction statistics, Midrex (www.midrex.com)
- [8] Nachhaltige Stahlproduktion an der Saar: Dillinger und Saarstahl setzen erstmalig auf Wasserstoff im Hochofen zur CO₂-Minderung; ROGESA Pressemitteilung vom 24. Mai 2019
- [9] Transformation der Stahlindustrie benötigt industriepolitische Unterstützung; STAHL + TECHNIK 2 (2020), Nr. 3, S. 72/77
- [10] 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
- [11] Wasserstoff-Stahlproduktion in Hamburg; STAHL + TECHNIK 1 (2019), Nr. 10, S. 21
- [12] Hille, V.; SALCOS – Sustainable, stepwise and flexible decarbonisation based on proven technology; Proceedings of METEC & 4th ESTAD, 24-28 June 2019, Düsseldorf, GERMANY
- [13] Hybrit JV planning to begin building demo plant for fossil-free steel in 2023; 02 June 2020 (<https://www.greencarcongress.com>)
- [14] thyssenkrupp: Unterwegs in eine Zukunft ohne CO₂ (<https://www.thyssenkrupp-steel.com>)
- [15] Knitterscheid, K.: Schluss mit Koksen, Handelsblatt, 21.01.2019
- [16] Buergler, Th.: Technology development hydrogen steelmaking; Proceedings of METEC & 4th ESTAD, 24-28 June 2019, Düsseldorf, GERMANY.
- [17] Erste Direktreduktionsanlage mit Einschmelzer; tk Steel Europe, stahl + eisen, Januar/Februar 2021, S. 16/17.
- [18] Längen, H.B.; Schmöle, P.: Hochofenbetrieb ohne Koks und Kohlenstoff? Stahl und Eisen 124 (2004), Nr. 11, S. 63/72