



Can Yilmaz (Autor)

# Maßnahmen zur Dekarbonisierung des Hochofenprozesses durch Einsatz von Wasserstoff

Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen

**efzn**  
Energie-Forschungszentrum  
Niedersachsen



## Maßnahmen zur Dekarbonisierung des Hochofenprozesses durch Einsatz von Wasserstoff

Can Yilmaz  
Promotion an der Technischen Universität Clausthal

Band 54  Cuvillier Verlag Göttingen

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/7789>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany  
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

# 1 Einleitung

Um dem Klimawandel entgegen zu wirken, ist der Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem unvermeidlich. Ein wesentliches Ziel dieses Übergangs, auch Energiewende genannt, ist es, das konventionelle Energiesystem einschließlich Sektoren wie Industrie und Mobilität zu dekarbonisieren. Im Speziellen ist es die Absicht der Europäischen Union (EU), die Treibhausgasemissionen in Europa bis 2030 um mindestens 40 % und bis 2050 um 80 bis 95 % gegenüber dem Stand von 1990 zu senken [1]. Diese Emissionsreduktion wird vor allem durch die Minderung des Energiebedarfs und die Umstellung der Stromerzeugung auf erneuerbare Energiequellen erreicht. Da dieser Wandel der Energieerzeugung hauptsächlich durch den Bau von Photovoltaik- und Windenergieanlagen geschieht, wird Strom in zunehmendem Maße direkt und nicht aus fossilen oder nuklearen Brennstoffen erzeugt. Auf diese Weise wird Strom im Zuge der Energiewende sukzessive konventionelle Primärenergieträger wie Kohle, Erdgas und Erdöl ersetzen.

Die Eisen- und Stahlindustrie hängt in hohem Maße von eben diesen fossilen Energieträgern ab, weil Eisenoxide üblicherweise durch Kohlenstoffmonoxid (CO) aus einer Kohlenstoffquelle zu Eisen reduziert werden. Das CO wird dabei oxidiert und Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) entsteht als unerwünschtes Nebenprodukt. Auf die Stahlproduktion entfallen in der EU jährliche Treibhausgasemissionen von 223 Mt CO<sub>2</sub> – eq/a (EU-27 im Jahr 2010 [2]). Dies entspricht etwa 5 % der gesamten Treibhausgasemissionen der EU-27 in diesem Jahr [3]. Der größte Teil des Rohstahls (61 % im Jahr 2015 in der EU) wird heutzutage über die Hochofen/Konverterroute hergestellt, während die Produktion mit Lichtbogenöfen, hauptsächlich auf der Basis von Stahlschrott, bei 39 % der Produktionsmenge lag [4]. Vor allem die Herstellung von Primäreisen und -stahl führt zu hohen spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Tonne Endprodukt ( $t_{EP}$ ): Für die Hochofen/Konverterroute werden 1816 kgCO<sub>2</sub>/ $t_{EP}$  angegeben [5]. Durch das Recycling von Schrott im Lichtbogenofen werden hingegen lediglich 531 kgCO<sub>2</sub>/ $t_{EP}$  emittiert [5].

Eine umweltfreundlichere Alternative zur Herstellung von Primärstahl sind Direktreduktionsprozesse in Kombination mit Lichtbogenöfen, in denen das direkt reduzierte Eisen (engl.: direct reduced iron, DRI), auch Eisenschwamm genannt, zu Stahl verarbeitet wird. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen können hierbei im Vergleich zur Hochofen/Konverterroute laut Arens et al. [5] um 18 % auf 1487 kgCO<sub>2</sub>/t<sub>EP</sub> reduziert werden. Jedoch sind diese Prozesse heute noch von untergeordneter Bedeutung: Weltweit wurden im Jahr 2015 nur 73 Mt DRI produziert. Diese Menge entspricht etwa 5 % der gesamten Rohstahlproduktion in diesem Jahr [4]. Die heutzutage am meisten verbreiteten Direktreduktionsprozesse, der Midrex- und der Energiron-Prozess [6], sind mit Erdgas betriebene Schachtöfen, in denen eine Mischung aus CO und Wasserstoff als Reduktionsgas eingesetzt wird. Es ist jedoch ebenso möglich, diese Prozesse ausschließlich mit Wasserstoff zu betreiben [7, 8]. Fishedick et al. [9] geben an, dass auf diese Weise eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Tonne Rohstahl (RS) auf 180 kgCO<sub>2</sub>/t<sub>RS</sub> möglich ist<sup>1</sup>.

DRI kann jedoch nicht nur im Lichtbogenofen zu Stahl verarbeitet, sondern auch als vorreduzierter Einsatzstoff im Hochofen eingesetzt werden, um andere Eisenträger zu ersetzen [11]. Auf diese Weise wird der Brennstoffbedarf des Prozesses verringert und die Produktivität des Hochofens kann mit zunehmendem Anteil an metallischem Eisen im Möller erhöht werden, wie bereits durch Untersuchungen an verschiedenen Hochöfen gezeigt wurde [12]. Während die genannten Auswirkungen auf den Prozess ausgiebig untersucht wurden [11–14], ist dem Einfluss auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen und die Gesamtenergiebilanz des Prozesses nur geringfügig Beachtung geschenkt worden [15–17]. Außerdem wurde bisher keine vergleichende Untersuchung verschiedener DRI-Arten durchgeführt. Die beschriebene Prozessroute ist in Abbildung 1.1 b) dargestellt. Unter Berücksichtigung einer Wasserelektrolyse, welche mit regenerativ erzeugtem Strom betrieben wird, ist dabei eine deutliche Emissionsreduktion zu erwarten. Nach Fishedick et al. [9] wird eine direkte Reduktion auf Basis von Wasserstoff allerdings nicht vor dem Jahr 2030 marktfähig sein, sodass das vorgeschlagene Konzept eher als mittel- bis langfristige Option angesehen werden kann.

Eine weitere Möglichkeit, die Emissionen der Eisen- und Stahlproduktion zu reduzieren, besteht darin, reinen Wasserstoff als Ersatzreduktionsmittel (ERM) im Hochofen zu verwenden (vgl. Abbildung 1.1 a)). Auf diese Weise kann das durch die

---

<sup>1</sup> Die CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Tonne Rohstahl für die Direktreduktion/Lichtbogenofenroute mit Erdgas betragen unter der Annahme, dass etwa 10 % der Primärenergie für das Gießen und Walzen des Rohstahls aufgewendet wird [10], heute 1338 kgCO<sub>2</sub>/t<sub>RS</sub>.

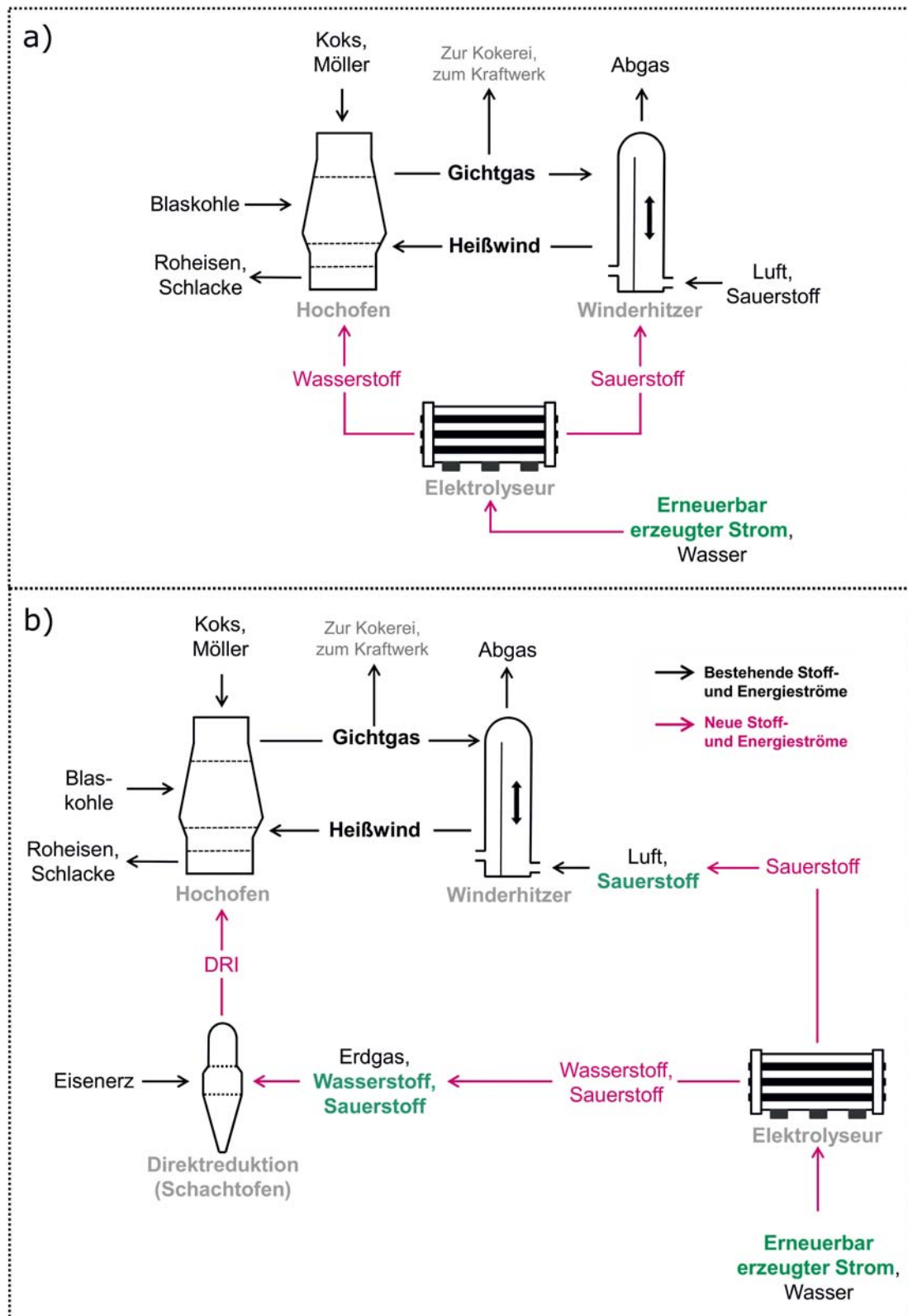
Verbrennung von Blaskohle, Koks und anderen Brennstoffen generierte CO teilweise ersetzt werden. Ein solches Einblasen von Wasserstoff als ERM wurde bereits in unterschiedlichen Arbeiten theoretisch betrachtet [17–20], jedoch wurden meist nur wenige Betriebsfälle untersucht und die vorherrschenden Randbedingungen nicht ausführlich dargestellt. Außerdem wurden der Einfluss auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen und die Gesamtenergiebilanz des Hochofens nicht oder nur sehr kurz betrachtet.

Auch für dieses Konzept ist bei Nutzung einer Wasserelektrolyse, welche mit erneuerbar erzeugtem Strom betrieben wird, eine deutliche Emissionsminderung zu erwarten. Ein weiterer Aspekt dieser Prozessroute, der bisher nur untergeordnet adressiert wurde, ist der Einfluss der Einblastemperatur des Wasserstoffs auf den Brennstoffbedarf des Hochofens. Sauerstoff als Nebenprodukt der Wasserelektrolyse könnte in beiden Konzepten ebenfalls in den Prozess integriert werden, und zwar als Oxidationsmittel im Heißwind des Hochofens oder im Schachtofen.

In der vorliegenden Arbeit werden also die beiden in Abbildung 1.1 dargestellten Konzepte mit dem Ziel untersucht, hinsichtlich des Wasserstoffbedarfs effiziente Betriebsfälle zur Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen zu ermitteln. Dabei werden außerdem weitere bisher nicht oder nur wenig betrachtete Aspekte untersucht.

Zuerst werden dazu in Kapitel 2 die erforderlichen Grundlagen dargestellt. Darin wird nach einer allgemeinen Einführung in die heutigen Technologien der Eisen- und Stahlherstellung insbesondere der Hochofenprozess sowie die vorhandene Prozessmodellierung dieses Verfahrens detailliert erläutert. Danach wird auf Direktreduktionsprozesse zur Herstellung von DRI sowie die Wasserelektrolyse als Technologie zur Wasserstoffproduktion eingegangen.

Es folgt die Erläuterung der durchgeführten Modellierung des Hochofenprozesses sowie ihre Parametrierung und Validierung in Kapitel 3. Die Vorgehensweise und Annahmen der Simulationen aus den Kapiteln 4 und 5 sind anschließend beschrieben, bevor schließlich der Einfluss einiger grundlegender Annahmen mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse untersucht wird. Zusätzlich werden u. a. die Methoden zur Bewertung der Simulationsergebnisse und die betrachteten Bilanzräume dargestellt. Bei dem eingesetzten Prozessmodell handelt es sich um ein mit Aspen Plus erstelltes Energie- und Stoffbilanzmodell, welches mit den Stoffdatenbanken und Gleichgewichtsberechnungen von FactSage und ChemApp verknüpft wird.



**Abbildung 1.1.:** Schematische Darstellung der betrachteten Konzepte: Durch Wasserelektrolyse erzeugter Wasserstoff als a) Ersatzreduktionsmittel im Hochofen und b) als Reduktionsmittel zur Produktion von direkt reduziertem Eisen (DRI), das als Einsatzstoff im Hochofen genutzt wird [21, 22]

Schließlich wird zunächst das Einblasen von reinem Wasserstoff in den Hochofen unter verschiedenen Betriebsbedingungen anhand von Simulationen mit dem entwickelten Prozessmodell untersucht (Kapitel 4). Dabei ist das wesentliche Ziel, den am besten geeigneten Betrieb im Hinblick auf eine effiziente Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen zu ermitteln. Gleichmaßen wird eingehend analysiert, welche weiteren Auswirkungen diese veränderte Betriebsweise auf wichtige Prozessparameter wie z. B. die Gichtgaszusammensetzung hat. Für diese Zwecke wird das Einblasen unterschiedlicher Mengen von Wasserstoff in die Formenebene bei verschiedenen Temperaturen mit und ohne gleichzeitigen Einsatz von Blaskohle simuliert. Genauso wird das Einblasen von Wasserstoff in den Schacht des Hochofens sowie unter angepassten Betriebsbedingungen mit einer niedrigeren minimalen adiabaten Flammentemperatur (AFT) betrachtet. Die jeweils resultierende Reduktion der Emissionen wird mit einem Referenzfall unter Einsatz von ausschließlich Koks und Blaskohle verglichen und dann in Bezug auf den spezifischen Wasserstoffbedarf pro vermiedener Tonne CO<sub>2</sub> ausgewertet. Ergänzend erfolgt eine Untersuchung des Einflusses der vorgegebenen unteren Grenze der AFT, bevor danach eine Diskussion der Auswirkung der verschiedenen veränderten Betriebsbedingungen auf die Gesamtenergiebilanz des Hochofens stattfindet.

Im Anschluss wird die Verwendung von DRI in einem Hochofen ebenfalls mittels Simulationen untersucht (Kapitel 5). Dabei werden unterschiedliche Mengen von vier verschiedenen DRI-Arten eingesetzt, welche teilweise nahezu vollständig mit Wasserstoff produziert werden. Es folgen Simulationen sowohl mit konstanter Menge an Blaskohle und variabler Koksrates sowie umgekehrt. In erster Linie wird die daraus jeweils resultierende Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen mit dem gleichen Referenzfall wie zuvor verglichen und in Bezug auf den spezifischen DRI- sowie den Wasserstoffbedarf pro vermiedener Tonne CO<sub>2</sub> ausgewertet, um effiziente Betriebsfälle zur Minderung der Emissionen zu ermitteln. Ebenso werden weitere aus den veränderten Betriebsbedingungen resultierende Auswirkungen auf den Prozess detailliert analysiert, insbesondere bezüglich der Gichtgaszusammensetzung und der Gichtgastemperatur. Schließlich wird analog zu zuvor der Einfluss der modifizierten Betriebsweisen auf die Gesamtenergiebilanz des Hochofens untersucht. Der Aspekt der integrierten Nutzung des anfallenden Sauerstoffs wird in dieser Arbeit lediglich oberflächlich betrachtet.

Zum Abschluss werden die wesentlichen Ergebnisse dieser Arbeit zusammenfassend dargestellt, Schlussfolgerungen abgeleitet und ein Ausblick gegeben. Die in



Kapitel 3 erläuterten Methoden sowie die in den Kapiteln 4, 5 und 6 beschriebenen Ergebnisse wurden in Teilen bereits in Yilmaz et al. [21] sowie Yilmaz und Turek [22] publiziert.

---

## 2 Grundlagen

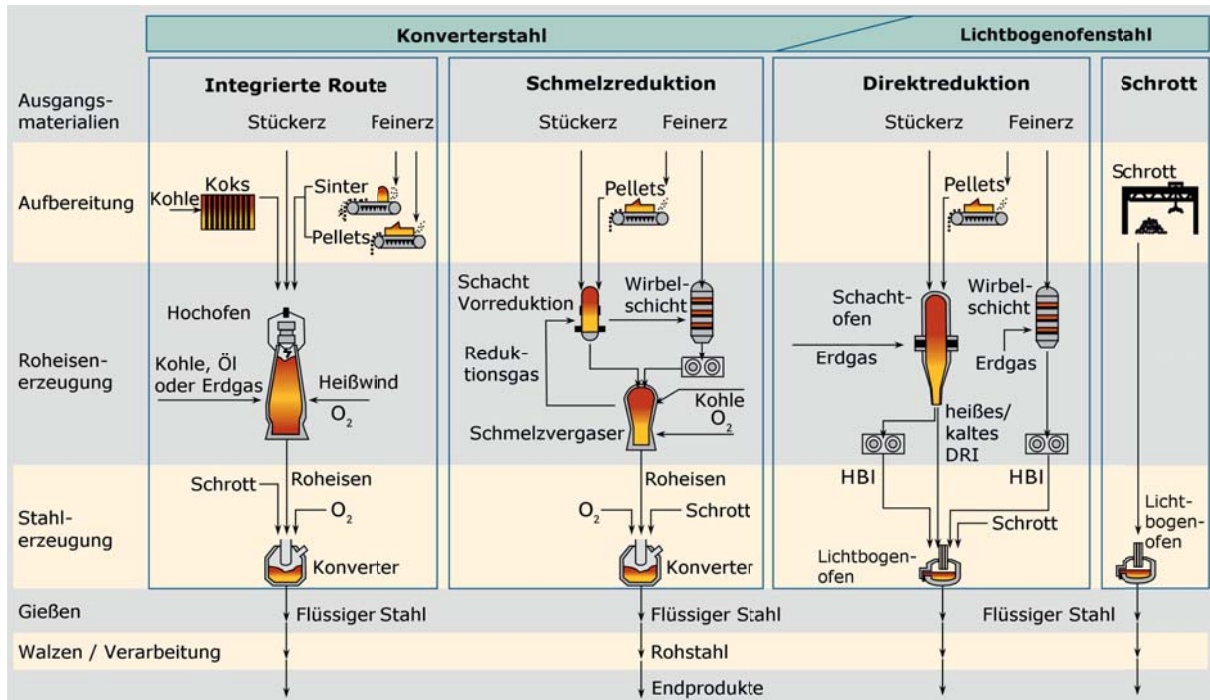
Ein detailliertes Verständnis des gesamten Prozesses und aller ablaufenden Vorgänge und Reaktionen bildet die Grundlage der Modellierung des Hochofens. Daher werden der Hochofenprozess, die eingesetzten Reduktionsmittel sowie existierende Prozessmodelle des Hochofens im vorliegenden Kapitel ausführlich beschrieben. Einleitend wird der Stand der Technik der Eisen- und Stahlherstellung dargestellt, während anschließend hinsichtlich der skizzierten Fragestellungen dieser Arbeit auf die Produktion sowie die Nutzung von DRI bei der Eisen- und Stahlherstellung eingegangen wird. Der Fokus liegt dabei auf gasbasierten Direktreduktionsprozessen. Abschließend wird die Wasserelektrolyse als Technologie zur Erzeugung von Wasserstoff mit Strom erläutert. Im Mittelpunkt steht dabei die Produktion großer Mengen an Wasserstoff und somit die alkalische Elektrolyse, welche die heute am meisten verbreitete Elektrolyse-Technologie darstellt.

### 2.1 Stand der Technik der Eisen- und Stahlherstellung

Heutzutage werden zur Eisen- und Stahlherstellung neben der integrierten Route auf Basis des Hochofens und des Blasstahlkonverters (kurz: Konverter) sowie Direktreduktionsprozessen auch Elektrolichtbogenöfen bzw. Lichtbogenöfen (engl.: electric arc furnace, EAF) und Schmelzreduktionsprozesse genutzt [2]. Diese vier Prozessrouten sind vergleichend in Abbildung 2.1 dargestellt.

Im Hochofen werden Stückerze sowie Sinter und Pellets meist mit Hilfe von Koks, Blaskohle und anderen kohlenstoffhaltigen Brennstoffen wie Erdgas und Erdöl zu flüssigem Roheisen reduziert. Das Eisen wird in einem zweiten Schritt in einem Konverter unter Zufuhr von Sauerstoff aufgereinigt und zu Stahl weiterverarbeitet, der in Gieß- und Walzprozessen zu Halbzeugen und Fertigerzeugnissen bzw. Endprodukten wie Blech, Band oder Draht verarbeitet wird [23, 24].





**Abbildung 2.1.:** Überblick über die Prozessrouten zur Eisen- und Stahlherstellung (entnommen aus Wörtler et al. [2] und übersetzt aus dem Englischen; DRI: direct reduced iron, HBI: hot briquetted iron)

In Abbildung 2.1 ist auch ein zweistufiger Schmelzreduktionsprozess dargestellt. Darin wird das Eisenerz (Stückerz und/oder Pellets) in einem ersten Schritt mit den in einem Einschmelzvergaser erzeugten Reduktionsgasen vorreduziert. Anschließend wird das vorreduzierte Erz in diesem Einschmelzvergaser aufgeschmolzen und mit Hilfe von Kohle weiter zu Roheisen reduziert. Das Roheisen wird dann, wie bei der Hochofenroute, in einem Konverter zu Stahl verarbeitet. Heute befinden sich der Corex- sowie der Finex- Prozess als Verfahren mit Einschmelzvergaser in industrieller Anwendung [25, 26]. Neben diesen Verfahren gibt es auch Schmelzreduktionsprozesse auf Basis eines Eisenbadreaktors (bspw. der Hismelt Prozess [25]), welche allerdings heutzutage nicht kommerziell betrieben werden [26].

In Direktreduktionsverfahren wird das Eisenerz im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Prozessen im festen Zustand zu Eisen reduziert [24]. Hier kommen, je nach Prozess, sowohl Stückerze als auch Feinerze sowie Pellets zum Einsatz. Das Produkt, der sogenannte Eisenschwamm bzw. das DRI, enthält noch Reste von Sauerstoff sowie die gesamte Gangart, sodass das DRI, je nach Art des Prozesses, direkt oder in brikettierter Form (engl.: hot briquetted iron, HBI) im EAF zu Stahl

verarbeitet werden muss [24]. Dabei wird teilweise auch Schrott hinzugegeben, um das Betriebsverhalten des Ofens zu verbessern [2]. Die Direktreduktionsverfahren von größter Bedeutung sind der Midrex- und der Energiron-Prozess [6, 26]. Eine ausführliche Erläuterung von Direktreduktionsverfahren ist in Abschnitt 2.3 zu finden. Das Recycling von Schrott im EAF selbst stellt eine weitere Prozessroute zur Stahlerzeugung dar.

Im Jahr 2015 wurden weltweit 1621 Mt Rohstahl erzeugt, wovon 1201 Mt oder 74,1 % durch die Hochofen/Konverter-Route und 403 Mt oder 24,9 % im EAF produziert wurden [4]. Ungefähr 1 % des Rohstahls wurde durch andere Prozesse erzeugt. Zum Vergleich: Im Jahr 2005 wurden weltweit 1147 Mt Rohstahl erzeugt [27], sodass der jährliche Zuwachs im Mittel 4,1 % betrug. Auf Europa (EU-28) entfielen davon in 2015 166 Mt, wovon 65 Mt oder 39,3 % im EAF produziert wurden [4]. Dort nimmt die Stahlproduktion aus Schrott somit einen deutlich höheren Stellenwert ein als im Rest der Welt. Weltweit wurde dabei in EAFs aus 73 Mt DRI [4] und in Konvertern aus 6 Mt Roheisen aus Schmelzreduktionsprozessen [26] Stahl erzeugt, sodass diese Technologien nur einen sehr kleinen Anteil an der Rohstahlerzeugung einnahmen.

Je nach Prozessroute unterscheidet sich der Energieeinsatz und es werden dementsprechend unterschiedliche Mengen an  $\text{CO}_2$  pro Tonne Endprodukt emittiert (Tabelle 2.1). Die Hochofen/Konverterroute bringt erwartungsgemäß am meisten Emissionen hervor ( $1816 \text{ kg}_{\text{CO}_2}/\text{t}_{\text{EP}}$ ), während diese beim Einsatz von Schrott im EAF am geringsten sind ( $531 \text{ kg}_{\text{CO}_2}/\text{t}_{\text{EP}}$ ).

**Tabelle 2.1.:** Primärenergiebedarf und  $\text{CO}_2$ -Emissionen pro Tonne Endprodukt (EP) verschiedener Prozessrouten zur Stahlerzeugung (entnommen aus Arens et al. [5], zugrunde liegende Daten aus den Jahren 2008 bis 2016)

	Steinkohle	Koks	Öl	Erdgas	Strom	$\text{CO}_2$ -Emissionen
	$\text{GJ}/\text{t}_{\text{EP}}$	$\text{GJ}/\text{t}_{\text{EP}}$	$\text{GJ}/\text{t}_{\text{EP}}$	$\text{GJ}/\text{t}_{\text{EP}}$	$\text{kWh}/\text{t}_{\text{EP}}$	$\text{kg}_{\text{CO}_2}/\text{t}_{\text{EP}}$
Hochofen/Konverter	4,03	10,79	0,44	1,71	115	1816
Schrott/EAF	0,12	0,00	0,00	1,19	739	531
DRI/EAF	0,10	0,00	0,00	17,40	819	1487
Schmelzreduktion	11,86	0,00	0,36	1,37	92	1349



## 2.2 Der Hochofenprozess

### 2.2.1 Prozessbeschreibung und Stand der Technik

Wie zuvor dargelegt, ist der Hochofenprozess heutzutage das am weitesten verbreitete Verfahren zur Herstellung von Eisen und Stahl in Europa und weltweit. Die ersten Hochöfen wurden schon im 14. Jahrhundert betrieben und dennoch ist dieser Prozess noch heute Thema der Forschung [25].

Das Hochofenverfahren wird in der Literatur aufgrund seiner langen Geschichte vielfältig und ausführlich beschrieben. Von Bogdandy und Engell [28] bspw. behandeln es mit dem Fokus auf die thermodynamischen und reaktionskinetischen Grundlagen der Erzreduktion sowie die Gesetze der Gasströmung und der Wärmeübertragung in Schüttschichten. Geerdes et al. [29] und Taube [23] geben einen sehr praxisorientierten Überblick über alle Aspekte der Eisenerzeugung mit dem Hochofen, während Babich et al. [25] das Hochofenverfahren insgesamt behandeln und dabei die eingesetzten Rohstoffe und ihre Aufbereitung sowie den Einsatz von ERMs sehr detailliert adressieren. VDEh [24] sowie Ghosh und Chatterjee [30] behandeln über das Hochofenverfahren hinaus auch die anschließende Weiterverarbeitung zu Stahl und den entsprechenden Endprodukten eingehend. Im Folgenden werden die wesentlichen Aspekte und Eigenschaften moderner Hochöfen zusammengefasst. An dieser Stelle wird für detailliertere Informationen auf die genannte Literatur verwiesen, in der einzelne Themen und Phänomene ausführlicher diskutiert werden.

Der Hochofen ist ein Verfahren zur Verhüttung von Eisenerzen zu flüssigem Roh-eisen: oxidische Eisenerze werden mit Hilfe von fossilen Brennstoffen wie u. a. Koks und Kohle zu Eisen reduziert [23]. Dies geschieht nach dem Schachtofenprinzip im Gegenstrom: Feststoffe sinken innerhalb des Ofens ab, während Gas, das als Reduktionsmittel fungiert, aufsteigt (vgl. Abbildung 2.3 (links)). Der Hochofen gehört also zu den Wanderbettreaktoren, in denen sich eine Schüttung aufgrund der Schwerkraft durch den Schacht bewegt [32]. In dem Reduktionsgas, das auch Schachtgas oder Rastgas genannt wird, befinden sich u. a. die Gase  $H_2$  und  $CO$ , welche durch die Verbrennung und Vergasung der Brennstoffe entstehen bzw. darin enthalten sind und als Reduktionsmittel fungieren.

Eine typische Hochofenanlage ist in Abbildung 2.2 inklusive der Winderhitzer dargestellt. Von oben, der sogenannten Gicht, wird der Hochofen abwechselnd mit