

Energiewende in der Industrie

Potenziale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor

Branchensteckbrief der Eisen- und Stahlindustrie

Bericht an:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

von:

Jannik Schlemme, Navigant
Matthias Schimmel, Navigant
Christian Achtelik, Navigant

in Zusammenarbeit mit:

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung
Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft
BBG und Partner

Vorhaben: I C 4 – 80 14 38/42; Projekt-Nr. 42/17
Projektnummer: SISDE17915
27.08.2019

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für beiderlei Geschlecht.

INHALTSVERZEICHNIS

1. Eisen- & Stahlindustrie	1
1.1 Übersicht über die Eisen- & Stahlindustrie	1
1.2 Produktionsprozesse in der Eisen- und Stahlindustrie	5
1.3 Auswahl relevanter Prozesse.....	5
1.3.1 Primärstahlerzeugung	5
1.3.2 Sekundärstahlerzeugung.....	8
1.3.3 Weiterverarbeitung von Rohstahl	10
1.4 Chancen und Herausforderungen in der Eisen- und Stahlindustrie	13
2. Literaturverzeichnis	15

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BWS	Bruttowertschöpfung
CAGR	Jährliche Wachstumsrate (engl. compound annual growth rate)
CCU/CCS	Carbon Capture and Utilisation, Carbon Capture and Storage
CH ₄	Methan
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DRI	Direct Reduced Iron
EAF	Electric Arc Furnace
EU	Europäische Union
GJ	Gigajoule
H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
HBI	Hot Briquetted Iron
kA	Kiloampere
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
MWh	Megawattstunde
NACE	System zur Klassifizierung von Wirtschaftszweigen (frz. Nomenclature statistique des activités économiques dans la Communauté européenne)
TWh	Terawattstunde

1. EISEN- & STAHLINDUSTRIE

1.1 Übersicht über die Eisen- & Stahlindustrie

Branche. Die Eisen- und Stahlindustrie umfasst zwei Pfade der Stahlerzeugung: den Primärpfad und den Sekundärpfad. In der Primärerzeugung wird Rohstahl auf der Basis von Eisenerz erzeugt, während Sekundärstahl aus Stahlschrott erzeugt wird. Im Jahr 2015 wurden in etwa 70 Prozent des in Deutschland hergestellten Rohstahls über die Primärroute erzeugt, während 30 Prozent über die Sekundärroute aus Stahlschrott gewonnen wurden. Des Weiteren ist die direkte Weiterverarbeitung des Flüssigstahls in Stranggießanlagen (96 Prozent) und im Blockguss sowie Walz- und Schmiedewerken und die daraus resultierenden Zwischenerzeugnisse, wie Flachstahl- und Langstahlprodukte, Teil der Eisen- und Stahlindustrie.

2015 wurden in Deutschland 42 Mio. Tonnen Stahl produziert. Dies entspricht etwa einem Viertel der Produktion in der EU und etwas unter 3 Prozent der weltweiten Produktion. Mit rund 30 Mrd. Euro Umsatz und einer Bruttowertschöpfung von 6 Mrd. Euro im Jahr 2015 repräsentiert die deutsche Eisen- und Stahlindustrie knapp 1 Prozent der Bruttowertschöpfung des verarbeitenden Gewerbes in Deutschland. Tabelle 1-1⁴ führt zentrale Kennzahlen der Eisen & Stahlindustrie in Deutschland auf.

Energiebilanz. Fast die gesamte Primärenergienutzung im Jahr 2015 für die NACE Codes 24.10 – 24.30 der Eisen- und Stahlindustrie ist auf die drei Energieträger Kohle, Gas und Strom zurückzuführen. Abbildung 1-1 veranschaulicht, dass etwa $\frac{3}{4}$ aus Kohle bereitgestellt wird. Die bei den Prozessen der Primärroute entstehenden Kuppelgase werden zum Teil verstromt, wodurch der Eigenproduktionsanteil am Stromeinsatz in der Stahlindustrie relativ hoch ist im Vergleich zu anderen Industrien. Der Stromverbrauch entspricht etwa 16 Prozent des Primärenergiebedarfs und beläuft sich auf ca. 25,3 TWh wovon 12,3 TWh aus Eigenstromerzeugung stammen und knapp 13 TWh aus dem öffentlichen Netz bezogen werden. Tabelle 1-1 zeigt zentrale Energiekennzahlen in absoluten Werten auf.

Tabelle 1-1. Kennzahlen Eisen & Stahlindustrie (2015)⁴

Produktionsstandorte	Ca. 30	
Arbeitsplätze	Ca. 85,000	
Jährlicher Umsatz	30 Mrd. €	
Jährliche Produktionsmengen	42,1 Mio. t	
CAGR BWS (2008-2015)	-5,9 % ¹	
Gesamtenergieverbrauch	166,8 TWh	
Stromverbrauch	25,3 TWh (Davon 12,3 TWh aus Eigenproduktion)	
Erdgasverbrauch	20,8 TWh	
Kohleverbrauch	133 TWh	
CO ₂ -Gesamtemissionen ²	59 Mt CO ₂ e ³	
Eigenproduktions- & KWK-Anteil	N.A.	N.A.



¹ Berechnung nach Destatis (2010), Destatis (2017), der kumulierten Bruttowertschöpfung der NACE Codes 24.10-24.30.

² Destatis (2018).

³ DEHSt/UBA (2016), 37,08 Mio. t. prozessbedingt., zusätzlich 21,9 Mio. t. aus eigenen Kuppelgas-Kraftwerken.

⁴ WV Stahl (2017); DEHSt/UBA (2016).

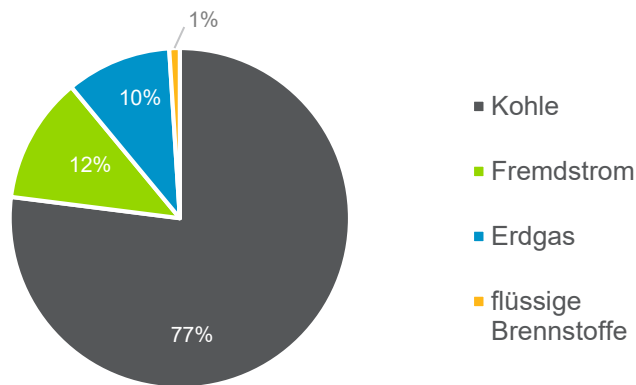


Abbildung 1-1. Energieverbrauch der Stahlindustrie in Deutschland 2015, gesamt ca.170 TWh⁵

Zuordnung zu amtlicher Statistik. In der amtlichen Statistik ist die Eisen- und Stahlindustrie zu einem Großteil im NACE Code 24.10 „Erzeugung von Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen“ abgebildet. 33 Unterkategorien (6-Steller) verfeinern die Einteilung in unterschiedliche Produkte wie z. B. diverse Blöcke und Flachstähle. Auch die NACE Codes 24.20 (Herstellung von Stahlrohren) sowie 24.31–24.34 (Blankstahl, Kaltband, Kaltprofile, kaltgezogener Draht) sowie 24.51 und 24.52 (Eisen- und Stahlgießereien) beinhalten Stahlprodukte. Der Großteil des Energieverbrauchs und der Emissionen sind jedoch NACE 24.10 zuzuordnen, weshalb dieser die Grundlage für die folgende Analyse bildet.

Geographische Aufteilung.⁶ Die deutsche Stahlproduktion über die Primär- und Sekundärrouten findet an etwa 30 Standorten in Deutschland statt. Duisburg sticht dabei als wichtiger Standort deutlich heraus. Etwa 35 Prozent der gesamten deutschen Produktionsmenge an Rohstahl entstehen in den dortigen integrierten Hüttenwerken. Weitere große Hochofen-Standorte sind Salzgitter (ca.11 Prozent), das Saarland (ca.11 Prozent) und Bremen (ca. 8 Prozent).⁷ Die Bundesländer mit der höchsten Elektro Stahlproduktion sind Niedersachsen (ca. 6 Prozent), Brandenburg (ca. 4 Prozent) und Baden-Württemberg (ca. 6 Prozent). In Kehl (BW) befindet sich das größte Elektro Stahlwerk Deutschlands mit einer Jahresproduktion von über 2 Mio. Tonnen. Abbildung 1-2 stellt die Standorte der Stahlerzeugung in der Bundesrepublik dar und markiert die Bundesländer farblich nach den erzeugten Stahlmengen.

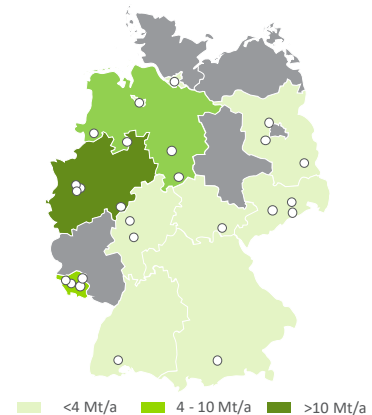


Abbildung 1-2. Standorte der Stahlerzeugung in Deutschland⁶

Branchenstruktur. Die deutsche Eisen- und Stahlindustrie erzeugt mehr als 2.400 unterschiedliche Stahlsorten in Deutschland.⁸ Dabei stehen kundenspezifische Lösungen und Produkte im Fokus. Trotz dieser Vielfalt ist die Branche bzgl. der Grundstruktur der Produktionsprozesse vergleichsweise homogen. In Deutschland sind im Wesentlichen zwei Verfahren der Stahlproduktion vertreten: (1) das Oxygenstahlverfahren zur Herstellung von Stahl aus Roheisen von Hochofen und Schrott und (2) das Elektro Stahlverfahren zum Einschmelzen und Wiederverwerten von vorzugsweise Stahlschrotten. An

⁵ *WV Stahl* (2017). Gemäß Rückmeldung vom VDEh.

⁶ *WV Stahl* (2016).

⁷ *WV Stahl* (2016).

⁸ *WV Stahl* (2018d).

beiden Anlagentypen sind oftmals Walz- und/oder Schmiedewerke zur direkten Weiterbearbeitung sowie Anlagen zur Oberflächenbeschichtung angeschlossen.

Wertschöpfungskette. Die Wertschöpfungskette der Eisen- und Stahlindustrie, skizziert in Abbildung 1-3, beginnt mit der Gewinnung von Eisenerzen sowie Kohle in Minen. In beiden Fällen ist die hiesige Stahlwirtschaft seit 2018 vollständig auf Importe angewiesen. Besonders aus Australien, den USA und Kanada wird Koks-kohle bezogen.⁹ Kohle wird nach dem Import in Kokereien zu Koks verarbeitet, diese sind meist in die Standorte der Stahlerzeuger integriert oder befinden sich in räumlicher Nähe. Eisenerz wird zu einem Großteil aus Brasilien (ca. 50 Prozent) eingeführt.¹⁰ In Deutschland findet Eisenerzabbau nur in geringem Maße statt. 2015 wurden insgesamt etwa 500 kt Eisenerz aus zwei Tiefbauminen in Nordrhein-Westfalen sowie einer Mine in Sachsen-Anhalt abgebaut. Das in Deutschland gewonnene Eisenerz hat jedoch nur einen geringen Eisengehalt (ca. 14,5 Prozent), sodass es nicht für die Roheisenerzeugung genutzt wird, sondern als Zuschlagsstoff in der Bauindustrie. Eisenerze werden teilweise noch an der Mine zu Pellets oder aber in integrierten Stahlhütten mit Koksgrus¹¹ zu Sinter weiterverarbeitet. Aus den Eisenerzen (Eisenoxid) wird im nächsten Schritt der Sauerstoff entfernt (Reduktion). Die Eisenerzreduktion geschieht im Hochofen im Wesentlichen mittels Zugabe von Koks über die Bildung von Kohlenstoffmonoxid. Das resultierende, flüssige Roheisen wird in einem Konverter durch Aufblasen von Sauerstoff zu Stahl weiterverarbeitet. Mit Hilfe des Sauerstoffs werden störende Begleitelemente wie Kohlenstoff, Silicium, Schwefel und Phosphor oxidiert und aus der Schmelze entfernt. Anschließend findet eine Weiterverarbeitung in Walz- und Schmiedewerken zu einer breiten Palette an Stahlprodukten, oftmals noch vor Ort, statt.

Anstelle von Eisenerz können auch ausschließlich Stahlschrotte den Ausgangspunkt der Wertschöpfungskette bilden. Diese fallen bei der Stahlerzeugung, Weiterverarbeitung und bei den Kunden der Stahlindustrie an oder bestehen aus recycelten Stahlprodukten nach deren vollendetem Lebenszyklus. In einem Elektrolichtbogenofen werden die Schrotte eingeschmolzen und oftmals vor Ort direkt weiterverarbeitet. Auch in den Convertern der Primärstahlerzeugung können Schrotte bis zu einem Gewichtsanteil von 25 Prozent zur Kühlung eingesetzt werden (siehe Kapitel 1.2.2). Allerdings erlaubt die weltweit verfügbare Menge und Qualität des Stahlschrotts zurzeit keinen wesentlich höheren Anteil der Elektrostahlproduktion an der gesamten erzeugten Stahlmenge. Verschiebungen sind hier langfristig zu erwarten, wenn der weltweite Stahlbedarf insgesamt sinkt und die Menge an Stahlschrott für ein Recycling ansteigt.

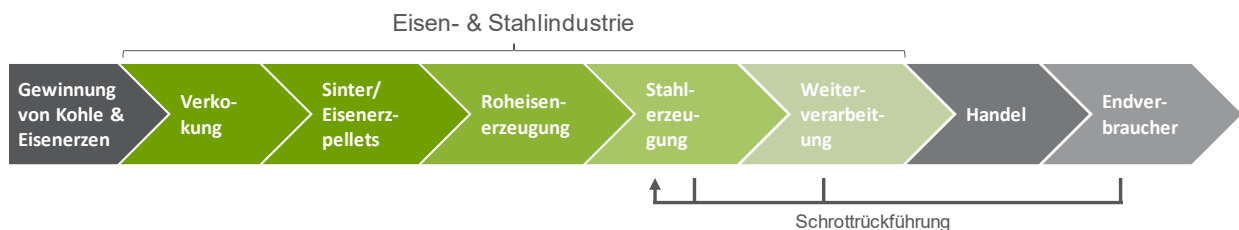


Abbildung 1-3. Vereinfachte Wertschöpfungskette der Stahlindustrie¹²

Flexibilität. Bei der Primärstahlerzeugung bestehen negative und positive Flexibilitätspotenziale durch die Verstromung von Prozessgasen in eigenen Kraftwerken, sodass integrierte Hüttenwerke aktuell Minutenreserveleistung am Regelleistungsmarkt anbieten.¹³

Bei der Sekundärstahlerzeugung bestehen durch die Verschiebung des Schmelzprozesses im Lichtbogenofen um wenige Minuten ebenfalls hohe negative Potenziale, jedoch mit geringerer Abrufdauer und Abrufhäufigkeit. Integrierte Hüttenwerke (Primärroute) und Elektrostahlwerke (Sekundärroute) nutzen bereits heute Flexibilitätspotenziale von integrierten Walzwerken zur

⁹ *WV Stahl* (2016).

¹⁰ *BMWi* (2015).

¹¹ Koksgrus ist fein zerbröckelter Koks.

¹² Eigene Darstellung.

¹³ *50Hertz Transmission GmbH u. a.* (26.04.2018).

Höchstlastbegrenzung, um Netzentgelte einzusparen. Walzwerke nutzen die Lagerfähigkeit von Rohstahl aus und können durch den verzögerten Prozessbeginn ein hohes negatives Flexibilitätspotenzial schaffen. Zusätzliche Lager (z. B. Bandlager) auf Walzstraßen erlauben es, den stromintensiven Betrieb der Walzen zu verlangsamen oder zu beschleunigen. Dadurch können sowohl kurzzeitig negative als auch positive Flexibilitätspotenziale nutzbar gemacht werden.

Kreislaufwirtschaft.¹⁴ Stahl wird oftmals als das weltweit am meisten recycelte Material bezeichnet. Durch die Einschmelzung ist Stahl wiederkehrend zu 100 Prozent wiederverwertbar, wobei die inhärenten Eigenschaften vollständig erhalten bleiben. Der zentrale Prozess der Sekundärstahlherstellung im Lichtbogenofen wird in Kapitel 1.2.3 beschrieben. Jedoch wird auch den Prozessen der Primärstahlerzeugung Stahlschrott beigefügt. Im Jahr 2015 betrug das Verhältnis Schrotteinsatz/Rohstahlerzeugung in etwa 43 Prozent.^{15,16} Vor dem Einschmelzvorgang steht eine lange Kette der Schrott-Recyclingwirtschaft, angefangen mit der Sammlung und der ersten Verarbeitung in Sortieranlagen, Schrottpressen, -scheren und Schreddern.

In Deutschland ist der Anteil der Sekundärstahlherstellung etwas geringer als im europäischen Vergleich. Etwa 30 Prozent der deutschen Rohstahlproduktion wird über die Sekundärstahlroute gewonnen, während in der Europäischen Union etwa 40 Prozent der jährlichen Rohstahlmengen über diesen Weg produziert werden. Hintergründe sind, neben der Historie der Primär- und Sekundärerzeugung in Deutschland, z. B. die spezifische Nachfrage und daraus entstandene Produktportfolien der Unternehmen sowie Nachhaltigkeitskriterien, Bedarf und Verfügbarkeiten.

Die Kreislaufwirtschaft beschränkt sich in der Stahlindustrie jedoch nicht auf die Wiederverwertung der Stahlprodukte am Ende ihres Produktlebenszyklus und das direkte Rückführen von Stahlschrotten aus verschiedenen Produktionsschritten der Wertschöpfung. Es werden auch Nebenprodukte der Primär- und Sekundärstahlherstellung in den Materialkreislauf zurückgeführt. Beispiele sind die chemischen Nebenprodukte der Kokereien als Rohstoff für die Chemieindustrie, oxidische Metalle für die NE-Metallindustrie, Säuren und Laugen bzw. Regenerate sowie die Kuppelgase aus Kokerei, Hochofen und Konverter. Auch werden z. B. Schlacken im Straßenbau und bei der Zementherstellung (zur Verminderung des Klinkereinsatzes und damit Vermeidung der CO₂-Freisetzung bei der Klinkerherstellung) eingesetzt. Düngemittel sind ebenfalls wichtige Schlackeerzeugnisse der Stahlindustrie. Des Weiteren werden z. B. Eisenoxide in der Lackindustrie als Pigmente oder Farbstoff in der Baustoffindustrie und als magnetisierbares Material für Festplatten verwendet.

Internationaler Handel. Mit 42,1 Mio. Tonnen Stahl wurde im Jahr 2015 und 2016 über ein Viertel des europäischen und etwas unter 3 Prozent des weltweiten Stahls in Deutschland produziert.¹⁷ Im Jahr 2017 war ein leichter Anstieg auf 43,4 Mio. Tonnen zu verzeichnen.¹⁸ Exporte von Halb- und Fertigzeugnissen aus Deutschland überstiegen im Jahr 2017 27 Mio. Tonnen. Gleichzeitig wurden knapp 28 Mio. Tonnen Halb- und Fertigzeugnisse importiert. Dieses Gleichgewicht besteht seit 2007 unter Abweichungen der Höhe, mit leicht stärkerem Anstieg der Importe in den Jahren 2016 und 2017.¹⁹ In der EU sind die Mengen der Importe aus Drittländern stark angestiegen in den letzten Jahren, von 25,4 Mio. Tonnen Halb- und Fertigerzeugnisse im Jahr 2012 auf 40,5 Mio. Tonnen im Jahr 2017. Über 70 Prozent dieser Importe stammen aus sechs Ländern: Auf Russland entfallen 7,7 Mt, auf die Ukraine 5,1 Mt, auf die Türkei 4,9 Mt, auf China 4,4 Mt, auf Indien 4,1 Mt und auf Südkorea 3,3 Mt.²⁰

Die deutsche Stahlbranche ist für ihre benötigten Einsatzstoffe zu einem Großteil von Importen abhängig. 100 Prozent der Eisenerze müssen importiert werden und in etwa 95 Prozent der

¹⁴ *WV Stahl/VDEh* (2018).

¹⁵ *Hiebel/Nühren* (2016).

¹⁶ *WV Stahl* (2016): 2016 rund 43 %; *STIL* (2017): 2017 rund 45 %.

¹⁷ *World Steel Association* (2016).

¹⁸ *World Steel Association* (2018).

¹⁹ *WV Stahl* (2018a).

²⁰ *WV Stahl* (2018b).

eingesetzten Kohlemengen. Nur der Stahlschrottbedarf kann vollständig durch inländische Quellen gedeckt werden, im Jahr 2017 wurden im Saldo 4 Mt exportiert.²¹

1.2 Produktionsprozesse in der Eisen- und Stahlindustrie

1.2.1 Auswahl relevanter Prozesse

Die energieintensivsten Prozesse der Stahlindustrie in Deutschland umfassen die Primärstahlerzeugung, Sekundärstahlerzeugung und die nachgelagerten Umformungsprozesse des Walzens und Schmiedens. Aktuell basiert die Herstellung von Stahl über die Primärstahlerzeugung auf dem direkten Einsatz fossiler Energieträger, wodurch sie höhere direkte Emissionen als die Sekundärstahlerzeugung verursacht. Bis heute wird der meiste Stahl in Deutschland über den Weg der Primärstahlerzeugung erzeugt. In den letzten Jahren gewinnt die strombasierte Sekundärroute zunehmend an Bedeutung. In Abbildung 1-4 sind diese beiden Routen und ihre einzelnen Schritte schematisch dargestellt.

1.2.2 Primärstahlerzeugung

Prozess. Der Prozess der Primärstahlerzeugung kann in drei Schritte eingeteilt werden: (1) Vorbereitung, (2) Roheisenerzeugung und (3) Stahlerzeugung. Der erste Schritt beinhaltet die Vorbereitung der zwei Haupteinsatzstoffe Kohle und Eisenerz. Kohle wird in Form von Koks als Reduktionsmittel in der Roheisenherstellung verwendet. In Kokereien wird Kohle unter Luftausschluss auf über 1.000 °C erhitzt. Dadurch werden flüchtige Bestandteile entfernt und der Kohlenstoff mit der verbleibenden Asche verbacken. Das entstandene Agglomerat ist, verglichen mit Kohle, deutlich poröser und hat eine erhöhte Festigkeit, um die Schichtung (Möllersäule)²² im Hochofen zu tragen.

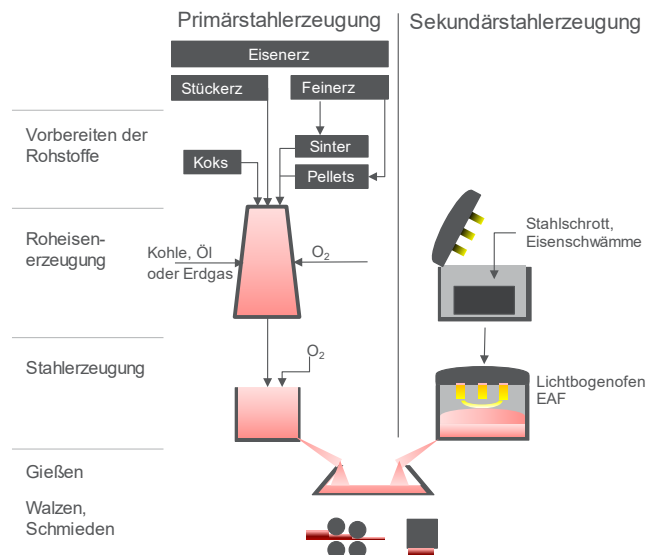


Abbildung 1-4. Prozessrouten Primär- und Sekundärstahlerzeugung

Neben Kohle sind Eisenerze die Haupteinsatzstoffe in der primären Stahlproduktion. Von den in den Minen gewonnenen Erzen sind nur die gröberen Stückerze direkt einsetzbar. Feinerze müssen zunächst entweder zu Pellets oder zu Sinter verarbeitet (agglomeriert) werden. Pellets haben einen Durchmesser von 10–15 mm und werden aus besonders feinen (<1mm Korngröße) Eisenerzen unter Einsatz von Wasser und einem Bindemittel geformt, getrocknet und bei über 1.000 °C gebrannt. Das Pelletieren geschieht zumeist noch am Minenstandort. Sinter hingegen wird im integrierten Hüttenwerk selbst produziert. Feinerze werden zusammen mit Zuschlägen und Koksgrus auf ein umlaufendes Rostwagenband gegeben. Der Koksgrus in der oberen Schicht wird in einem Zündofen mit Hilfe von Gasbrennern gezündet. Unter dem Rostwagenband ist ein Saugzug angelegt. Durch den Zug wird ein Unterdruck erzeugt, der dafür sorgt, dass eine Verbrennungsfront vertikal durch die Schüttung gesaugt wird. Der Brennfront folgt die

²¹ WV Stahl (2016)

²² Möllersäule bezeichnet die abwechselnde Schichtung von Koks und Möller. Möller ist eine Mischung aus Eisenerz, Zuschlägen und Schrott. (INTERSTAHL).

angesaugte Luft zur Kühlung. Die feinen Erze erweichen in der Brennfront oberflächlich und backen mit den Zuschlägen zu grobkörnigen, porösen Agglomeraten (sog. Sinterkuchen) zusammen.

Im Hochofen wird der Sauerstoff aus dem Eisenerz entfernt. Dazu wird der Kohlenstoff im Koks durch Einblasen heißer Luft (ca. 1.200 ° bis 1.300 °C) und Zusatzsauerstoff unterstöchiometrisch²³ zu einem Reduktionsgas aus größtenteils Kohlenstoffmonoxid (CO) vergast. Das Eisenerz in Form von Sinter, Pellets und Stückerzen sowie der Koks sind durch die großen Korngrößen luftdurchlässig und dennoch stabil, somit kann das Reduktionsgas von unten durch sie hindurchströmen. Der Koks gewährleistet im Hochofen die Durchströmung der Gase in dem Bereich, wo die Erze erweichen und schmelzen. Der im Eisenerz enthaltene Sauerstoff reagiert mit dem Kohlenstoffmonoxid zu Kohlenstoffdioxid; das Erz wird also reduziert. Während des Prozesses entstehen Temperaturen bis zu 2.200 °C (Formgastemperatur). Flüssiges Roheisen und Schlacke sammeln sich im unteren Bereich des Hochofens. Dort werden sie abgestochen und können über ihren Dichteunterschied separiert werden. Durch den Dichteunterschied schwimmt die Schlacke auf dem flüssigen Roheisen. Abbildung 1-5 zeigt eine vereinfachte Darstellung eines Hochofens.

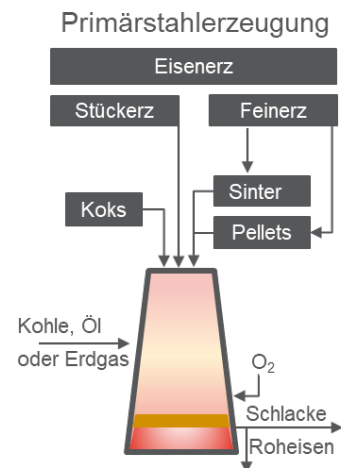


Abbildung 1-5.
Vereinfachte Darstellung
der Roheisenherstellung
im Hochofen

Im letzten Schritt wird im Oxygenkonverter des Blaststahlwerks der Kohlenstoffgehalt des Roheisens gesenkt und weitere Verunreinigungen wie Silicium, Schwefel und Phosphor über die Schlacke entfernt. Bei einem Kohlenstoffgehalt unter 2 Prozent wird das Roheisen als Rohstahl bezeichnet. Für die Reduktion von ca. 300 t Roheisen wird für etwa 20 Minuten Sauerstoff auf das flüssige Metallbad geblasen. Da die entsprechenden Reaktionen unter starker Wärmeentwicklung verlaufen, wird der Schmelze bis zu 25 Prozent Stahlschrott zur Kühlung hinzugefügt. Die Zugabe von Kalk unterstützt die Schlackenbildung auf dem Metallbad. Nach Abschluss des Prozesses wird der Konverter gekippt, bis der flüssige Rohstahl durch ein Abstichloch in eine Stahlpfanne abfließt. Die Schlacke verbleibt im Konverter und wird anschließend weiterverwertet.²⁴

Ein weiteres, in Deutschland angewendetes, Verfahren zur Entfernung von Sauerstoff aus dem Eisenerz ist die Direktreduktion. Die Produktionsmenge von direktreduziertem Eisen, sogenannter Eisenschwamm (engl. DRI/HBI)²⁵, liegt bei knapp 0,6 Mio. t. pro Jahr²⁶ und wird nur in einer Anlage in Hamburg durchgeführt. Die Anlage in Hamburg setzt das Midrex-Direktreduktionsverfahren ein und reformiert Erdgas (CH₄) mit Kohlendioxid (CO₂) und Wasser (H₂O) zu einem Reduktionsgas aus Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H₂).²⁷ Die Direktreduktion kann in verschiedenen Ofentypen vorgenommen werden. Je nach Ofentyp können die Direktreduktionsverfahren voneinander abweichen. Die Anlage in Hamburg verfügt über Schachtofen. Zur Direktreduktion wird der Schachtofen von oben mit dem Eisenerz in Form von Pellets oder Stückerzen befüllt. Während das Eisenerz zum Boden des Ofens fällt, wird es mit dem von unten kommenden Reduktionsgas umströmt und reduziert. Der Prozess findet bei hohen Drücken und unterhalb der Schmelztemperatur des Eisenerzes, bei etwa 1.050 °C, statt. Das Produkt schmilzt nicht auf und wird deshalb als „direkt“-reduziert bezeichnet.²⁸ Als Produkt entsteht Eisenschwamm, der im noch heißen oder abgekühlten Zustand im Elektrolichtbogenofen eingeschmolzen und zu Rohstahl verarbeitet wird. Die Stahlherstellung im Lichtbogenofen ist im Kapitel 1.2.3 näher beschrieben. Die Direktreduktion kann

²³ Es ist weniger Sauerstoff in der Luftzufuhr als für die Reaktion von Kohlenstoff und Sauerstoff zum chemischen Gleichgewicht (hier CO₂) notwendig wäre.

²⁴ WV Stahl (2018c).

²⁵ HBI (Hot Briquetted Iron) ist heißgepresstes DRI (Direct Reduced Iron). Durch die kompaktere Form ist es reaktionsärmer als DRI und weist bessere Transporteigenschaften und Lagerfähigkeit auf.

²⁶ WV Stahl (2016), Produktionskapazitäten bis 0,7 Mio. t. nach (ArcelorMittal Hamburg GmbH, 2018).

²⁷ Slaby (2017); Midrex (2014).

²⁸ Kempe (2005).

mit verschiedenen Reduktionsgasen wie Prozessgasen aus der Hochofen-Konverter-Route oder mit ausschließlich Wasserstoff durchgeführt werden. Eine Wasserstoff-Direktreduktion weist geringe CO₂-Emissionen auf, aufgrund des Verzichts auf kohlenstoffhaltige Reduktionsgase.²⁹ Ein kommerzieller Betrieb einer Wasserstoff-Direktreduktionsanlage findet momentan jedoch nicht statt, allerdings gibt es Bestrebungen diese Technik in der Zukunft einzusetzen.³⁰

Technische Parameter. Die Herstellung von Koks geschieht bei Temperaturen über 1.000 °C. Während der Reduktion des Eisenerzes findet die Koksvergasung bei etwa 1.200 °C statt. Im weiteren Prozess werden im Bereich vor den Blasformen des Hochofens, der sog. Wirbelzone, Temperaturen von bis zu 2.200 °C erreicht. Große Hochofen können in etwa 13 kt Roheisen am Tag erzeugen. Ein Hochofen hat heute eine Lebensdauer von mehr als 20 Jahren. Dieser Zeitraum wird als „Ofenreise“ bezeichnet und beschreibt die Zeit bis zur nächsten Erneuerung der Feuerfestauskleidung. Diese Lebensdauer wird hauptsächlich durch das Design, die feuerfeste Ausmauerung und die Kühlung des Hochofens sowie die Stichlochpflege bestimmt.³¹ Das Direktreduktionsverfahren erreicht Temperaturen von etwa 1.050 °C.

Produktionsstandorte Deutschland. Die Oxygenstahlproduktion konzentriert sich zum größten Teil auf den Westen Deutschlands, besonders auf Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen und auf das Saarland. Die Produktionsstandorte von Oxygenstahl befinden sich in Duisburg (50 Prozent), dem Saarland (16 Prozent), Salzgitter (ca. 15 Prozent), Bremen (12 Prozent) und in Eisenhüttenstadt (7 Prozent).³²

Bedarf an Rohstoffen und Zwischenprodukten. Eisenerz dient als primärer Rohstoff. Weitere sind kohlenstoffhaltige Rohstoffe, darunter Kohle, Erdgas, Erdöl sowie Einsatzstoffe wie Altkunststoffe. Ebenso wird Wasserstoff und Sauerstoff eingesetzt. Zuschlagsstoffe wie Kalk werden bereits den Pellets und dem Sinterkuchen beigemischt oder direkt dem Hochofen und Konverter zugeführt.

Brennstoffbedarf. Der spezifische Brennstoffbedarf beläuft sich auf etwa 18,13 GJ³³, bezogen auf die Tonne Oxygenstahl. Dampf wird zum Teil über Abhitze von der Stahlindustrie eigenerzeugt.³⁴

Strombedarf. Bei einem spezifischen Strombedarf von 0,39 MWh pro Tonne Oxygenstahl ergibt sich ein Strombedarf von etwa 12 TWh, bezogen auf die Ausbringungsmenge von 30 Mio.³⁵ Tonnen Oxygenstahl im Jahr 2015. Die Eigenstromerzeugung aus Prozessabgasen i. H. v. 12,3 TWh reicht aus, um diesen Bedarf theoretisch zu decken.³⁶ Die Kokereien verbrauchten 0,3 TWh Strom im Jahr 2015.

Emissionen. Im Jahr 2015 entstanden direkte CO₂-Emissionen von 59 Mio. Tonnen CO₂e.³⁷ bei der Erzeugung und Bearbeitung von Roheisen und Stahl. Kokereierzeugnisse verursachten knapp 5 Mio. Tonnen direkte CO₂e. Emissionen. Bei der Herstellung von Oxygenstahl fallen spezifische Emissionen von rund 1,725 Tonnen CO₂e. pro Tonne Rohstahl an.³⁸ Indirekte (Scope 2) Emissionen über den Fremdbezug von Strom fallen bei der Primärerzeugung, wenn überhaupt, nur in geringem Maße an, da der Strombedarf bei der Herstellung von Oxygenstahl hauptsächlich aus Eigenstrom gedeckt wird.

KWK. An einigen Standorten in Deutschland wird durch die Verbrennung von Kuppelgasen, (insbesondere Gichtgas) in Kraftwerken sowohl Strom als auch Wärme erzeugt. Zum Teil wird die

²⁹ Hölling/Weng/Gellert (2017).

³⁰ voestalpine AG (2016); Knitterscheidt (2019).

³¹ WV Stahl (2018c).

³² Prozentangaben beziehen sich ausschließlich auf die Oxygenstahlproduktion, vgl. S.4 stellt den Anteil an der Stahlproduktion der gesamten Branche dar.

³³ Brunke (2016).

³⁴ WV Stahl (2016).

³⁵ Brunke (2016).

³⁶ WV Stahl (2016).

³⁷ DEHSt/UBA (2016).

³⁸ WV Stahl (2016).

Wärme an ein Fernwärmenetz abgegeben.³⁹ Abwärmenutzung in der Primärstahlroute stellt in direkter Nachbarschaft der Hüttenwerke oftmals einen wesentlichen Faktor in der Fernwärmeversorgung dar.

1.2.3 Sekundärstahlerzeugung

Die Menge an produziertem **Sekundärstahl** (Elektrostahl) hat sich seit den 1990er Jahren in Deutschland mehr als verdoppelt.⁴⁰ In Europa wird das Elektrostahlverfahren bei 40 Prozent der europäischen Stahlproduktion angewandt.⁴¹ In Deutschland besteht der Großteil an Stahlwerken aus Elektrostahlwerken. Durch ihre geringeren Kapazitäten produzieren sie jedoch nur etwa 30 Prozent des deutschen Rohstahls. Zumeist wird dabei Stahlschrott mittels eines Lichtbogens eingeschmolzen, jedoch kann auch Eisenschwamm aus der Direktreduktion (DRI, HBI) als Einsatzmittel verwendet werden. Ebenso kann grundsätzlich auch festes oder flüssiges Roheisen aus dem Hochofen eingesetzt werden. Flüssiges Roheisen wird jedoch nur in wenigen Fällen (in Deutschland überhaupt nicht) eingesetzt.

Prozess. Abbildung 1-6 zeigt den vereinfachten Prozess der Stahlherstellung im Lichtbogenofen (engl. electric arc furnace – EAF) mit dem Drehstromverfahren. Zunächst wird der Lichtbogenofen von oben mit dem Schmelzmaterial (Stahlschrott, Eisenschwamm) befüllt und anschließend mit einem Deckel verschlossen. An dem Deckel befinden sich drei Graphitelektroden. Diese leiten Strom und entzünden einen Lichtbogen zwischen den Elektroden und dem Schmelzmaterial.⁴² Dabei wird elektrische Energie mit einem hohen Wirkungsgrad in Schmelzwärme umgewandelt. Hohe Spannungen (kV Bereich) dienen dem Erhalt des Lichtbogens. Die hohen Stromstärken (kA Bereich) des Lichtbogens sorgen für die Schmelzwärme. Sie ionisieren das Gasgemisch zwischen den Graphitelektroden, sodass durch nachfolgende elektrische Gasentladung thermische Energie abgegeben wird. Während des Vorgangs brennen die Graphitelektroden ab.

Während des Einschmelzvorgangs entstehen Temperaturen bis zu 3.500 °C im Lichtbogen. Dieser gibt thermische Energie an das Schmelzmaterial (Stahlschmelze) ab, welches Temperaturen bis zu 1.800 °C erreicht. Je nach Schmelzphase bezieht der Ofen unterschiedlich viel elektrische Leistung. Die Zugabe von Zuschlagstoffen (Schlackenbildung), Sauerstoff, Kohlenstoff oder anderen brennbaren Gasgemischen unterstützen den Schmelzprozess. Bei dem Schmelzprozess kann durch Zuführen weiterer Stoffe und in Abhängigkeit der Qualität der Ausgangsstoffe (Schrott, DRI) nahezu jede Stahlart hergestellt werden. Schließlich wird der Ofen in der Regel gekippt, sodass der flüssige Stahl in eine Stahlpfanne abfließt.⁴³ Seltener ist der Abstich des Rohstahls über einen zentralen Bodenabstich.

Der Prozess im Lichtbogenofen verwendet Dreh- oder Gleichstrom. Drehstrom-Lichtbogenöfen (AC-EAF) sind in Deutschland weiter verbreitet als Gleichstrom-Lichtbogenöfen (DC-EAF). Sie sind direkt über Transformatoren an das Stromnetz angeschlossen und verfügen über drei Elektroden am Ofendeckel, über die der Lichtbogen entzündet wird und durch die der Strom sowohl zu- als auch abfließt. Gleichstrom-Lichtbogenöfen erzeugen den Lichtbogen von einer Elektrode am Ofendeckel durch den Stahlschrott zu einer oder mehreren Bodenanoden am Ofengrund. Durch die Strom-

Sekundärstahlerzeugung

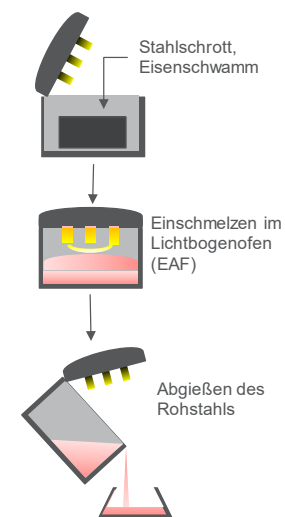


Abbildung 1-6.
Vereinfachte Darstellung
der Stahlherstellung im
Lichtbogenofen

³⁹ UBA (2018); Gores u. a. (2014); STEAG New Energies GmbH.

⁴⁰ Hiebel/Nühlen (2016).

⁴¹ Eurofer .

⁴² Joos (2016).

⁴³ WV Stahl (2018e).

Gleichrichteranlage sind sie nahezu vom Netz abgekoppelt und weisen bessere Eigenschaften bezüglich der Netzzurückwirkungen auf. Sie verursachen weniger Lärm und haben einen geringeren Elektrodenverschleiß, was allerdings mit einem höheren Wartungsaufwand einhergeht. Gleichstromöfen arbeiten mit Sumpffahrweise, d. h., nach dem Abstich verbleibt eine Restmenge Flüssigstahl (sog. Sumpf) im Ofen, um die Anode zu schützen. Dieser Sumpf darf nicht einfrieren bzw. erstarren.

Technische Parameter. Das Elektrostahlverfahren weist einen Stromverbrauch von durchschnittlich 530 kWh und einen Brennstoffbedarf von etwa 84 kWh⁴⁴ pro Tonne Rohstahl (Gussstahl)⁴⁵ auf. Der Lichtbogenofen als größter Verbraucher im Elektrostahlwerk weist spezifische Energieverbräuche von 350 bis 550 kWh je Tonne Rohstahl⁴⁶ auf, davon etwa 48 kWh für den Einsatz von Erdgas. Hinzu kommen weitere Verbraucher, wie die Pfannenmetallurgie und das Gussverfahren, die in Kapitel 1.2.4 näher beschrieben sind. Der Elektrodenverbrauch (Kohlenstoffabbrand) liegt zwischen 1 bis 5 kg je Tonne Rohstahl. Die Durchlaufzeiten, die Zeit zwischen zwei Abstichen, auch tap-to-tap genannt, liegen zwischen 45 und 90 Minuten.³¹⁴⁷ Die reine Schmelzzeit (Power-On-Time), bei denen der Lichtbogen eingeschaltet ist, beträgt 30 bis 70 Minuten. Die Stromstärken im Lichtbogenofen befinden sich im Hochamperebereich bis zu 130 kA. Elektrodenlichtbogenöfen weisen Kapazitäten von 5 – 300 Tonnen Rohstahl pro Durchlauf auf, was Produktionskapazitäten mittelgroßer Blasstahlwerken entspricht.

Produktionsstandorte Deutschland. Das größte Elektrostahlwerk befindet sich in Kehl (BW) und hatte 2015 eine Jahresproduktion von etwa 2,2 Mio. Tonnen, was etwa 17,5 Prozent der gesamten deutschen Elektrostahlproduktion entspricht.⁴⁸ Weitere große Elektrostahlwerke befinden sich in Brandenburg an der Havel (BB) mit ca. 11 Prozent und in Georgsmarienhütte (NI) mit ca. 10 Prozent.⁴⁹ Die restlichen Elektrostahlwerke sind über ganz Deutschland verteilt. Eine stärkere lokale Konzentration auf ein oder mehrere bestimmte Gebiete, wie bei der Oxygenstahlerzeugung, ist nicht gegeben.

Bedarf an Rohstoffen und Zwischenprodukten. Haupteinsatzstoffe sind Stahlschrotte, zu einem geringeren Teil Eisenschwamm oder andere Formen von Roheisen.

Brennstoffbedarf. Die Energiebilanz eines Elektrolichtbogenofens zur Herstellung einer Tonne Elektrostahl ist in Tabelle 1-2 dargestellt. Als Kohlenstoffträger und für die Erdgasbrenner werden meist 10 – 20 kg Kohle und etwa 4 kg bzw. 48 kWh Erdgas pro Tonne Elektrostahl benötigt.⁵⁰ Für die Folgeprozesse in der Sekundärmetallurgie und Weiterverarbeitung wird zusätzlich Erdgas benötigt. Anstelle von Erdgas wird teilweise auch Sauerstoff zur Erwärmung des Schrottes eingesetzt.

⁴⁴ Eigene Berechnung nach (Heußner/Markus, 2013), Annahme 12,6 Mio. t. Elektrostahl nach (WV Stahl, 2017).

⁴⁵ Eine Tonne Rohstahl inkl. der Pfannenmetallurgie und dem Gussverfahren, die prozessbedingt direkt im Anschluss an das Verfahren im Lichtbogenofen stattfinden.

⁴⁶ Entspricht dem noch flüssigen Rohstahl aus dem Lichtbogenofen ohne nachfolgender Prozessschritte.

⁴⁷ WV Stahl (2018c).

⁴⁸ WV Stahl (2016).

⁴⁹ Prozentangaben beziehen sich ausschließlich auf die Elektrostahlherstellung, vgl. S.4 stellt den Anteil an der Stahlproduktion der gesamten Branche dar.

⁵⁰ Berechnung basieren auf den Annahmen: Erdgas bei durchschnittlichem Brennwert.

Tabelle 1-2. Energiebilanz des Elektrolichtbogenofens bezogen auf eine Tonne Elektro Stahl⁵¹

Input	kWh/t	Prozent	Output	kWh/t	Prozent
Elektrische Energie	393	48,5	Fühlbare Wärme und chemischer Energieinhalt des Abgases	169	20,7
Kohlenstoffträger	191	23,6	Gefäßkühlung	71	8,8
Erdgas-Sauerstoffbrenner	50	6,2	Deckelkühlung	37	4,6
Chemische Reaktionen	123	15,2	Schlacke	31	3,8
Elektrodenabbrand	28	3,4	Abstrahlung, Wärmedurchgang	69	8,5
Entkohlung	25	3,1	Bilanzdifferenz	37	4,6
			Nutzenergie (Stahl)	397	49
Gesamt	810				

Strombedarf. Der spezifische Strombedarf für die Herstellung einer Tonne Rohstahl in einem Elektro Stahlwerk⁵² liegt im Durchschnitt bei 0,530 MWh/t.⁵³ Anhand der jährlichen Produktionsmenge von 12,6 Mio. t. Elektro Stahl ergibt sich ein Stromverbrauch in Deutschland von etwa 6,68 TWh pro Jahr. Elektro Stahlwerke nutzen bisher keine nennenswerten Mengen Eigenstrom.

Emissionen. Durch die deutsche Elektro Stahlherstellung entstehen in etwa 3,5 Mio. Tonnen indirekte CO₂-Emissionen über den deutschen Strommix.⁵⁴ Zudem ist der Einsatz von Anoden sowie die Zuführung von anderen Energieträgern, wie Erdgas und/oder Kohle, in der CO₂-Bilanz zu berücksichtigen. Die direkten Emissionen liegen demnach bei etwa 0,2 Mio. t. CO₂ pro Jahr.⁵⁵

KWK. Es ist kein Einsatz von KWK in der Sekundärstahlherstellung bekannt.

1.2.4 Weiterverarbeitung von Rohstahl

Sowohl bei der Primär- als auch bei der Sekundärstahlerzeugung erfolgt ein Teil der **Sekundärmetallurgie** bereits während der Stahlschmelze (z. B. Entkohlung im Sauerstoffblaskonverter). Die Verfahren der Sekundärmetallurgie werden nach dem Abstich des Rohstahls in der Stahlpfanne, im Pfannenofen und in der Vakuumanlage durchgeführt und stellen die gewünschte Legierung durch Zugabe und Entfernung bestimmter Stoffe ein.

Abbildung 1-7 veranschaulicht allgemeine Prozesse nach dem Abstich des Rohstahls. Nach der sekundärmetallurgischen Behandlung wird der noch flüssige Stahl vergossen und erstarrt. In Deutschland wird zum größten Teil das Stranggussverfahren (96 Prozent)⁵³ angewandt, bei dem Stahl in Form von Tafeln oder Zylindern (Brammen oder Knüppel) in einem kontinuierlichen Prozess hergestellt werden. Im Blockgussverfahren dagegen wird der flüssige Stahl in eine Form gegossen

⁵¹ Ausfelder/Seitz/Roon (2018).

⁵² Stromverbrauch im Elektro Stahlwerk beinhaltet Elektrolichtbogenofen, Anlagen wie Kräne und Folgeprozesse der Sekundärmetallurgie und Gießen.

⁵³ Gemäß Rückmeldung vom VDEh.

⁵⁴ Umweltbundesamt (2018).

⁵⁵ Bei einem Erdgasverbrauch von 84 kWh, nach Heußen/Markus (2013) pro Tonne Rohstahl/Gußstahl einem Emissionsfaktor von 201g CO₂/kWh nach Jurich (2016) und einer Ausbringungsmenge von 12,6 Mio. t. nach WV Stahl (2016), WV Stahl (2017).

und erstarrt dort. Er wird für kleine Mengen an Spezialstählen eingesetzt, sowie für Stahlerzeugnisse mit großem Querschnitt.

Ein weiteres Gussverfahren ist das endabmessungsnahe Gießen, welches je nach Produkt als Dünnbrammen, Vorband oder Bandgießen bezeichnet wird. Durch diese Gusstechnik entfällt das energieintensive Warmwalzen. Allerdings beschränkt der fehlende Schritt der Warmverformung die herstellbare Produktbreite und Qualität und kann nur bei bestimmten Verfahren eingesetzt werden.⁵⁶

Nach der Sekundärmetallurgie und dem Gießen erfolgt das Umformen. Dabei wird ein Großteil der Gussteile (z. B. Brammen, Knüppel), bei Temperaturen zwischen 700 und 1.250 °C, zu Blechen, Band oder Langprodukt **warmgewalzt**.⁵⁷ Ein Stoßofen oder Hubbalkenofen erwärmt zunächst die Gussteile auf die spezifische Temperatur des nachfolgenden Warmwalzverfahrens (z. B. Warmbreitbandstraße, Grobblechwalzwerk/Langprodukt). Die Erwärmung kann direkt im Anschluss an das Gussverfahren stattfinden, wenn der Stahl noch nicht vollständig ausgekühlt ist oder als Wiedererwärmung von gelagerten Gussteilen. Nach der Erwärmung wird der Stahl auf einer Walzstraße gewalzt. Beim Warmwalzen werden auch Halbzeuge zur direkten Verwendung hergestellt, z. B. für den Schiffbau und die Schwerindustrie. Neben Tafeln und anderen Produkten werden Bleche und Band (Warmbreitband) zu Stahlcoils aufgewickelt. Die Stahlcoils werden unter anderem beim **Kaltwalzen** weiterverarbeitet. Dazu werden sie wieder abgerollt und über eine Walzstraße zu dünneren Blechen bei Temperaturen unterhalb der Rekristallisationstemperatur des Stahls (ca. 25 – 700 °C) gewalzt. Dem Kaltwalzen sind schließlich noch weitere Prozesse vor- und nachgelagert, beispielweise das Beizen und das Rekristallisationsglühen.

Neben dem Walzen wird das **Schmieden** (Freiformschmieden, Gesenkschmieden) zum Umformen des Stahls angewandt. Es kann den Walzprozessen nachgelagert sein oder direkt zur Massivumformung von beispielweise Blöcken eingesetzt werden. Das Schmieden findet bei unterschiedlichen Arbeitstemperaturen statt. Gängig sind Warmumformung (950 bis 1.250 °C), Halbwarmumformung (750 bis 950 °C), Thixoschmieden (Temperatur zwischen fest und flüssigen Zuständen) und Kaltumformung (meist Raumtemperatur bis hin zu Temperaturen unter der Rekristallisation). Dabei wird der Stahl auf die gewünschte Temperatur in einem Ofen erhitzt und anschließend durch den Druck eines Hammerschlags in seinem Querschnitt plastisch verformt.

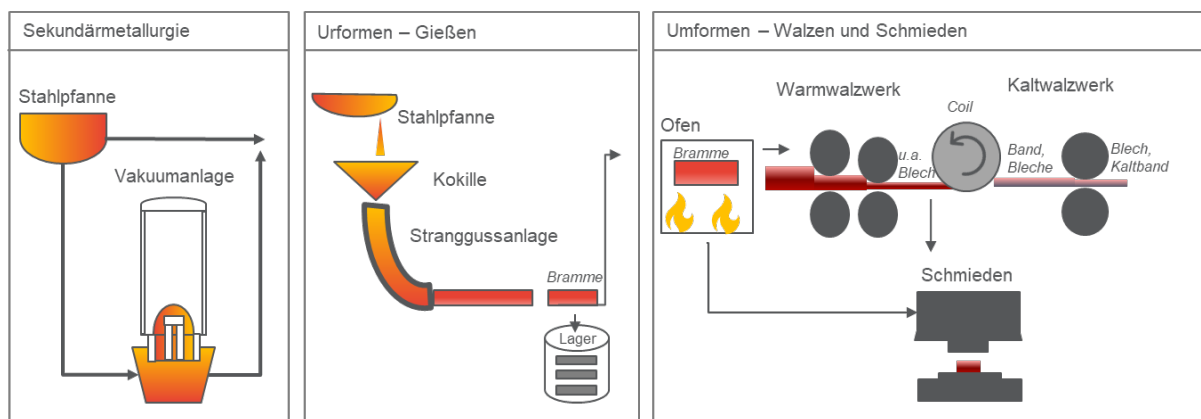


Abbildung 1-7. Vereinfachte Darstellung ausgewählter Prozesse der Weiterverarbeitung von Rohstahl⁵⁸

Weitere Umformungsprozesse sind das Strangpressen, das Tiefziehen und das Biegen. Im Vergleich zum Walzen (und auch Schmieden) sind diese Prozesse aus energetischer Sicht bzw. hinsichtlich der Anwendungshäufigkeit wenig relevant.

⁵⁶ Andermach & Bleck GmbH & Co. KG .

⁵⁷ Puttkammer (2017).

⁵⁸ Eigene Darstellung.

Von den 42,1 Mio. Tonnen hergestelltem Stahl im Jahr 2015 wurden 40,4 Mio. Tonnen zu Walzstahl verarbeitet.⁵⁹

Technische Parameter. Die Warmumformungsprozesse finden bei hohen Temperaturen zwischen 1.200 – 1.280 °C statt. Kalt gewalztes Stahlband wird zum Rekristallisationsglühen auf Temperaturbereiche erhitzt, die je nach Stahlegierung und Beschaffenheit variieren. Beispielsweise wird Normalstahl bei 680 – 760 °C rekristallisiert. Spezialstähle wie austenitischer rostfreier Stahl können auch Rekristallisationstemperaturen von 930 – 1.230 °C erreichen.⁶⁰

Produktionsstandorte Deutschland. Die Sekundärmetallurgie und das Gießen finden direkt in den integrierten Hüttenwerken und den Elektrostahlwerken statt. Walz- und Schmiedewerke befinden sich ebenfalls häufig an den Standorten der Stahlerzeugung, wodurch energetische Wiederaufwärmungsverluste eingeschränkt werden können. Durch die Lager- und Transportfähigkeit der Gussteile müssen Walz- und Schmiedewerke jedoch nicht zwingend an dem Standort der Stahlerzeugung angesiedelt sein. Die Weiterverarbeitung von Eisen und Stahl wird auch in Gießereien vorgenommen. Durch die hohe Produktbreite und dadurch verwendeten Technologien, werden Gießereien an dieser Stelle nicht weiter berücksichtigt.

Bedarf an Rohstoffen und Zwischenprodukten. Die Weiterverarbeitenden Betriebe benötigen Rohstähle als Haupteinsatzstoff. Für die sekundärmetallurgischen Prozesse werden weitere Legierungselemente benötigt.

Energiebedarf. Der spezifische Energiebedarf hängt stark vom angewendeten Verfahren ab. Beispielwerte für das Warmwalzen⁶¹ liegen bei 0,42 GJ/t (0,117 MWh/t) Strom und 1,26 GJ/t (0,35 MWh/t) Gas. Beispielwerte für das Kaltwalzen⁶² liegen bei 0,63 GJ/t (0,175 MWh/t) Strom und 0,113 GJ/t⁶³ (0,03 MWh/t) Gas.⁶⁴

Emissionen. Das Warmwalzen von Stahl weist spezifische direkte Emission von etwa 0,07 Tonnen CO_{2e}. und indirekte von 0,06 Tonnen CO_{2e}. auf.⁶⁵ Insgesamt entfallen etwa 5,5 Mio. Tonnen CO_{2e}. allein auf warmgewalzten Stahl.⁶⁶ Aufgrund der hohen Bandbreite der verschiedenen Produkte ist dieser hochgerechnete Wert jedoch mit großen Unsicherheiten behaftet. Wird der Stahl nach dem Warmwalzen zu kaltgewalztem Stahl weiterverarbeitet, entstehen weitere Emissionen um etwa 0,06 t CO_{2e}. pro Tonne Stahlprodukt.⁶⁷

KWK. Es liegen keine Informationen zum Einsatz von KWK in der Weiterverarbeitung vor.

⁵⁹ WV Stahl (2016).

⁶⁰ Fishedick/Görner/Thomeczek (2015).

⁶¹ Jin u. a. (2017).

⁶² Rodrigues da Silva/Mathias/Bajay (2018).

⁶³ Jin u. a. (2017).

⁶⁴ Werte können abweichen, da sich die Prozessketten in der Weiterverarbeitung je Werk unterscheiden.

⁶⁵ nach (Jin u. a., 2017) und (Puttkammer, 2017).

⁶⁶ Unter der Annahme von hohen Wärmeverlusten bei Zwischenlagerung der zu walzenden Gussstahlprodukte.

⁶⁷ Eigene Berechnung nach (Puttkammer, 2017).

1.3 Chancen und Herausforderungen in der Eisen- und Stahlindustrie

Im Zuge der Energiewende ergeben sich **Chancen** für die deutsche Eisen- und Stahlindustrie und für Branchen, die mit ihr in Verbindung stehen. Eine enge Verflechtung besteht mit dem deutschen Maschinen- und Anlagenbau. Bei einer Beteiligung dieser Branche an einer zeitnahen Entwicklung und Implementierung von klimafreundlichen Technologien in der Stahlerzeugung ergibt sich für sie eine Chance auf eine Technologieführerschaft in einem neuen Feld. Solche klimafreundlichen Technologien können beispielsweise Eisenerz-Reduktionsanlagen auf Basis von (synthetischem) Erdgas oder Wasserstoff sein. Eine weitere Chance kann sich durch ein stetig steigendes Umweltbewusstsein seitens der Kunden ergeben. Produkte, die eine geringe CO₂-Bilanz bezüglich ihrer Produktion aufweisen, könnten somit zukünftig Wettbewerbsvorteile gegenüber herkömmlichen Produkten aufweisen, wenn auf emissionsärmere Technologien umgestellt wird. Das bisherige Interesse an CO₂-armen Stahl für z. B. den Automobilbau und die Bauindustrie ist aufgrund der Mehrkosten jedoch gering.⁶⁸ Weitere Chancen, Geschäftsmodelle zu ergänzen und zu erweitern ergeben sich in begrenztem Maße durch den flexiblen Bezug von Strom. Die Teilnahme am Regelleistungsmarkt oder Kosteneinsparungen durch ein gezieltes Demand-Side-Management, das sich am Börsenstrompreis orientiert, können zu zusätzlichen Gewinnen bzw. Kosteneinsparungen führen. Besonders in Elektrostahlöfen und in der Weiterverarbeitung bei Umformungsprozessen bestehen nutzbare Flexibilitätspotenziale. Allerdings richtet sich die Produktion eines Stahlwerks bisher nach den Kundenbestellungen und nicht nach dem Strompreis. Der Ausbau erneuerbarer Energien mit sinkenden Stromgestehungskosten könnte die Strompreise insgesamt senken und sich bei entsprechenden Marktmodellen positiv auf die Betriebskosten der Stahlbranche auswirken. Allerdings gehen Prognosen häufig von einem steigendem Strompreis bis 2050 für die energieintensive Industrie aus.⁶⁹ Räumliche Nähe zu erneuerbarem Strom aus Windkraftanlagen in Kombination mit der Anbindung an das Erdgas- bzw. Wasserstoffnetz in Norddeutschland kann insofern ein Vorteil sein, da zum einen technisch die Versorgung mit CO₂-freiem Strom gesichert ist und zum anderen bei geeigneten Marktmodellen der Bezug von Strom als Ausgleichsmaßnahme zur Stabilität des Netzes wirtschaftliche Potenziale birgt.

Durch den erhöhten Einsatz von Strom sinkt auch die Abhängigkeit von Energieimporten (Gas, Kohle und im geringen Maße Öl). Allerdings könnte die Abhängigkeit von Wasserstoffimporten aus dem Ausland steigen, welcher zur Direktreduktion und/oder Energiebereitstellung verwendet wird. Da im globalen Maßstab Kohle immer noch der fossile Energieträger mit den höchsten Reserven sowie logistisch unabhängig von Transportmonopolen wie Pipelines ist, ist die Abhängigkeit der Stahlbranche aus Sicht des globalen Marktes vergleichsweise gering. In Kombination mit CCU/CCS Technologien kann hier die Chance bestehen, diese geringe Abhängigkeit zu erhalten.

Die Energiewende bereitet der deutschen Eisen- und Stahlindustrie nicht nur Chancen, sondern stellt sie auch vor zentrale **Herausforderungen**. Die Stahlbranche verwendet ausgereifte große Anlagen, die hohe Investitionsvolumina binden. Dementsprechend lange Investitionszyklen von etwa 15 bis 20 Jahren bestehen beispielweise bei der Neuauskleidung von Hochöfen. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht sind folglich Ausgaben für Neuinvestitionen in klimafreundliche Technologien stark von der noch erwarteten Anlagenlaufzeit und dem eventuell höheren Betriebsrisiko dieser neuen Verfahren abhängig. Viele CO₂-arme Verfahren sind bisher noch Gegenstand der Forschung und werden je nach Verfahren im Labor bis hin zu Pilotanlagen getestet. Die Stahlindustrie steht in einem intensiven weltweiten Wettbewerb und ist einem hohen Druck zu einer kostengünstigen Produktion ausgesetzt, insbesondere durch steigende Importe aus Ländern, die keinen vergleichbaren Kostenanteil für CO₂-Emissionen tragen. Neue CO₂-arme Verfahren zur Stahlherstellung weisen unter den aktuellen Rahmenbedingungen deutliche Mehrkosten gegenüber den konventionellen Verfahren auf. Des Weiteren bestehen Herausforderungen im Bereich der Infrastruktur und der Erzeugung von CO₂-freiem Strom. Eine direkte oder indirekte Elektrifizierung vieler Prozesse ist bereits heute denkbar. Der Ausbau erneuerbarer Energien ist somit entscheidend, ob eine CO₂-arme Stahlproduktion durch elektrifizierte Prozesse möglich ist. Dabei spielt auch das Potenzial von erneuerbaren Energien für eine totale Elektrifizierung eine Rolle. Sofern der Strom nicht eigens CO₂-frei produziert wird, könnten Abhängigkeiten von Stromimporten steigen. Die deutschen Stromnetze werden bereits ausgebaut

⁶⁸ Dies haben durch den Auftragnehmer geführte Interviews mit Firmen in diesen Branchen ergeben.

⁶⁹ Schlesinger/Lindenberger/Lutz (2014).

und sollen in Zukunft erweitert werden, um die Integration erneuerbarer Energien mit einer sicheren Stromversorgung zu gewährleisten. Durch ein flächendeckendes Erdgasnetz bestehen Möglichkeiten für den Umbau der Netze zu einer Wasserstoffinfrastruktur, diese muss jedoch noch in das bestehende System integriert werden, was mit einem technischen Aufwand für die Netzanpassung einhergeht. Eine umfangreiche Verwendung von Biomasse und Biogas als kohlenstoffhaltiges Reduktionsmittel wird durch die Verfügbarkeit von regionalen Anbauflächen begrenzt. Zusätzlich steht ihre energetische und industrielle Verwertung in Konkurrenz mit anderen Branchen. Gesellschaftlicher Widerstand besteht besonders bei der Flächennutzung für energetische und industrielle Biomasse anstelle von Nahrungsmittelanbau. Ein umfangreicher Einsatz von Biomasse bei der Stahlerzeugung ist demnach nicht realistisch. Zuletzt ist festzuhalten, dass derjenige, der zuerst eine neue Technologie in großem Maßstab testet, sich auch immer technologischen Prozessrisiken aussetzt. Diese Risiken beinhalten unter anderem ein verlorenes Investment, sollte sich die Technologie nicht am Markt beweisen können.

2. LITERATURVERZEICHNIS

- 50Hertz Transmission GmbH u. a.* (26.04.2018): Präqualifizierte Anbieter je Regelenergieart, <<https://www.regelleistung.net/ext/download/anbieterliste>> [Zugriff 2018-06-13]
- Andernach & Bleck GmbH & Co. KG* (Hrsg.): Endabmessungsnahes Gießen, <<http://www.andernachu.bleck.com/glossary/endabmessungsnahes-giessen/>> [Zugriff 2018-11-05]
- ArcelorMittal Hamburg GmbH* (2018): ArcelorMittal Hamburg: Unternehmenspräsentation, <<https://hamburg.arcelormittal.com/icc/arcelor-hamburg-de/med/b00/b0050ed2-707d-b361-249c-a91620ac9e52,11111111-1111-1111-1111-111111111111.pdf>> [Zugriff 2019-03-28]
- Ausfelder, Florian/Seitz, Antje/Roon, Serafin von* (2018): Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie: Methodik Potenziale Hemnisse, <https://www.kopernikus-projekte.de/lw_resource/datapool/systemfiles/agent/news/662EB9A945A57D6EE0539A695E86C80B/live/document/Buch_FLEXIBILITAETSOPTIONEN_aktualisiert.pdf> [Zugriff 2018-06-13]
- BMWi* (2015): Der Bergbau in der Bundesrepublik Deutschland 2015: Bergwirtschaft und Statistik, 67. Aufl., <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/Bergbaustatistiken/bergbau-in-der-brd-bergwirtschaft-statistik-2015.pdf?__blob=publicationFile&v=5>
- Brunke, Jean Christian Ulf* (2016): Energieeinsparpotenziale von energieintensiven Produktionsprozessen in Deutschland: Eine Analyse mit Hilfe von Energieeinsparkostenkurven, Dissertation, 134. Aufl., Stuttgart
- DEHSt/UBA* (2016): Treibhausgasemissionen 2015 - Emissionshandelspflichtige stationäre Anlagen und Luftverkehr in Deutschland: VET-Bericht 2015, <https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/VET-Bericht-2015.pdf?__blob=publicationFile&v=3> [Zugriff 2018-08-21]
- Destatis* (2010): Kostenstruktur der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden: Fachserie 4 Reihe 4.3 - 2008, <https://www.destatis.de/GPStatistik/servlets/MCRFileNodeServlet/DEHeft_derivate_00005022/2040430087004.pdf> [Zugriff 2019-04-02]
- (2017): Kostenstruktur der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden -: Fachserie 4 Reihe 4.3 - 2015, <https://www.destatis.de/GPStatistik/servlets/MCRFileNodeServlet/DEHeft_derivate_00032254/2040430157004.pdf> [Zugriff 2019-04-02]
- (2018): Umweltökonomische Gesamtrechnungen: Direkte und indirekte CO₂-Emissionen in Deutschland 2005 - 2014, <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UmweltökonomischeGesamtrechnungen/CO2EmissionenPDF_5851305.pdf?__blob=publicationFile> [Zugriff 2018-07-13]
- Eurofer*: Steel Recycling scrap is a valuable raw material, <<http://www.eurofer.org/Sustainable%20Steel/Steel%20Recycling.fhtml>> [Zugriff 2018-07-13]
- Fischedick, Manfred/Görner, Klaus/Thomeczek, Margit* (2015): CO₂: Abtrennung, Speicherung, Nutzung: Ganzheitliche Bewertung im Bereich von Energiewirtschaft und Industrie, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2015
- Gores, Sabine u. a.* (2014): KWK-Ausbau: Entwicklung, Prognose, Wirksamkeit der Anreize im KWK-Gesetz unter Berücksichtigung von Emissionshandel, Erneuerbare-Energien-Gesetz und anderen Instrumenten [Zugriff 2018-11-08]
- Heußen, Michael/Markus, Hans-Peter* (2013): Ressourcenmanagement eines Elektrostahlwerks, in: Waste Management (2013), S. 485–505, <http://www.vivis.de/phocadownload/Download/2013_ass/2013_ASS_485_506_Heussen-Markus.pdf> [Zugriff 2019-03-28]
- Hiebel, M./Nühlen, J.* (2016): Technische, ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Faktoren von Stahlschrott (Zukunft Stahlschrott), Oberhausen, <<https://www.umsicht.fraunhofer.de/content/dam/umsicht/de/dokumente/publikationen/2016/stahlrecycling-sichert-stahlproduktion.pdf>> [Zugriff 2018-11-08]
- Hölling, Marc/Weng, Matthias/Gellert, Sebastian* (2017): Bewertung der Herstellung von Eisenschwamm unter Verwendung von Wasserstoff: (Evaluatona von Hydrogen-Based Production of DRI), <<https://germany.arcelormittal.com/icc/arcelor/med/b8e/b8e0c15a-102c-d51d-b2a9-147d7b2f25d3,11111111-1111-1111-1111-111111111111.pdf>> [Zugriff 2018-07-13]
- INTERSTAHL*: Stahl Wiki: Roheisenproduktion, <<https://www.interstahl.com/stahl-wiki/roheisenproduktion>> [Zugriff 2019-03-14]
- Jin, Peng u. a.* (2017): The energy consumption and carbon emission of the integrated steel mill with oxygen blast furnace, in: Resources, Conservation and Recycling 117 (2017), S. 58–65, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.07.008#>
- Joos, Thomas* (2016): Lichtbogen, <<https://www.elektrofachkraft.de/sicher-arbeiten/lichtbogen>> [Zugriff 2018-07-13]
- Jurich, Kristina* (2016): CO₂-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe 2016, <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/co2-emissionsfaktoren_fur_fossile_brennstoffe_korrektur.pdf> [Zugriff 2018-08-31]
- Kempe, Rhett* (2005): Reduktion von Eisenoxid mit Wasserstoff, <http://daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de/cnat/fa_paare/eisenreduktion.htm> [Zugriff 2018-07-17]
- Knitterscheidt, Kevin* (2019): Darum setzt der weltgrößte Stahlkonzern künftig auf Wasserstoff: Der größte Stahlhersteller der Welt wagt einen Versuch – und will durch den Einsatz von Wasserstoff seine Klimabilanz am Standort in Hamburg verbessern., <<https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/arcelor-mittal-darum-setzt-der-weltgroesste-stahlkonzern-kuenftig-auf-wasserstoff/24158332.html?ticket=ST-4304414-PNQduXxAUM1SnIjVeuDC-ap6>> [Zugriff 2019-04-02]
- Midrex* (2014): MIDREX NG: Optimizing DRI production using natural gas, <https://www.midrex.com/assets/user/media/MIDREX_NG.pdf> [Zugriff 2018-08-30]
- Puttkammer, Karen* (2017): Energieorientierte Walzprogrammplanung in der stahlerzeugenden Industrie: Konzeption, Modellierung und Lösung, Wiesbaden: Springer Gabler, 2017
- Rodrigues da Silva, Rafael/Mathias, Flavio Roberto de Carvalho/Bajay, Sergio Valdir* (2018): Potential energy efficiency improvements for the Brazilian iron and steel industry: Fuel and electricity conservation supply curves for integrated steel mills, in: Energy 153 (2018), S. 816–824, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.055#>

- Schlesinger, Michael/Lindenberger, Dietmar/Lutz, Christian* (2014): Entwicklung der Energiemärkte: -
Energierferenzprognose, Basel/Köln/Osnabrück, <<http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/entwicklung-der-energiemaerkte-energiereferenzprognose-endbericht,property%3Dpdf,bereich%3Dbmwi2012,sprache%3Dde,rwb%3Dtrue.pdf>> [Zugriff 2015-04-13]
- Slaby, Peter* (2017): Eisengewinnung durch Direktreduktion, <http://www.chemikus.de/sites/dri_info.htm> [Zugriff 2018-07-13]
- STEAG New Energies GmbH* (Hrsg.): Gichtgaskraftwerk: Dillingen, <<https://www.steag-newenergies.com/de/modalcontent/leistungen/dezentrale-energien/gichtgaskraftwerk-dillingen/>> [Zugriff 2018-11-08]
- STIL* (2017): Das Konzernmagazin der Salzgitter AG: Ausgabe 02/2017, in: STIL 02 (2017)
- UBA* (2018): Kraftwerke mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) in Deutschland, <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/372/bilder/dateien/kwk-karte_2018.pdf> [Zugriff 2018-11-08]
- Umweltbundesamt* (2018): Strom- und Wärmeversorgung in Zahlen, <<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/strom-waermeversorgung-in-zahlen?sprungmarke=Strommix>> [Zugriff 2018-07-13]
- voestalpine AG* (2016): voestalpine startet mit Eröffnung der HBI-Anlage in Texas neue Ära, <<http://www.voestalpine.com/group/de/media/presseaussendungen/2016-10-26-voestalpine-startet-mit-eroeffnung-der-hbi-anlage-in-texas-neue-aera/>> [Zugriff 2018-07-17]
- World Steel Association* (2016): World Steel in Figures 2016, <<https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:1568363d-f735-4c2c-a1da-e5172d8341dd/World+Steel+in+Figures+2016.pdf>> [Zugriff 2018-11-09]
- World Steel Association* (2018): World Steel in Figures 2018, <<https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:f9359dff-9546-4d6b-bed0-996201185b12/World%2520Steel%2520in%2520Figures%25202018.pdf>> [Zugriff 2019-04-04]
- WV Stahl* (2016): Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland: 2016, <http://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2013/12/Fakten_Stahlindustrie_2016_V2.pdf> [Zugriff 2018-07-17]
- (2017): Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie: 2016/2017
 - (2018a): Deutschland: Stahlaußenhandel, <http://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2018/03/Deutschland_Stahlaussenhandel.png> [Zugriff 2018-07-17]
 - (2018b): Einfuhrdruck in die Europäische Union: Dramatische Zunahme der Importe, <<http://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2018/03/Einfuhrdruck-EU.png>> [Zugriff 2018-07-17]
 - (2018c): Stahlerzeugung: Roheisen und Rohstahlerzeugung, <<http://www.stahl-online.de/index.php/themen/stahltechnologie/stahlerzeugung/>> [Zugriff 2018-07-13]
 - (2018d): Statistiken: Stahlmarkt, <<https://www.stahl-online.de/index.php/statistiken/2/>> [Zugriff 2018-06-27]
 - (2018e): Umformtechnik: Walzen von Stahl, <<http://www.stahl-online.de/index.php/themen/stahltechnologie/umformtechnik/>> [Zugriff 2018-07-13]
- WV Stahl/VDEh* (2018): Stahlrecycling: Aus Alt wird Neu, <<http://www.stahl-online.de/index.php/themen/energie-und-umwelt/recycling/>> [Zugriff 2018-07-13]