

1 Energiesystemmodellierung einer dekarbonisierten Stahlindustrie

Nach den Zielen der EU-Kommission und der Bundesregierung sollen die Treibhausgasemissionen bis 2030 auf mindestens 65 % im Vergleich zu 1990 gesenkt werden, damit im Jahr 2045 Klimaneutralität erreicht werden kann. Im Jahr 2019 verursachte die Stahlindustrie 57 Mio. t CO₂-Äquivalente, wovon 18,1 Mio. t prozessbedingt und 38,9 Mio. t energiebedingt sind. Damit macht die Stahlindustrie 29 % der Industrieemissionen und 6 % der deutschen Gesamtemissionen aus. [vgl. 1, S. 22 f] Um diese Emissionen zu senken, entwickelte die Bundesregierung gemeinsam mit der Stahlindustrie das „Handlungskonzept Stahl“ [2], welches an die „Industriestrategie 2030“ sowie den Klimaschutzplan 2050, das Klimaschutzprogramm 2030 und den European Green Deal anknüpft. Darin werden Ziele für die Transformation der Stahlindustrie benannt, damit weiterhin eine Chancengleichheit auf dem globalen Stahlmarkt besteht und Carbon Leakage vermieden wird. Aufgrund der prozessbedingten Emissionen „sind weitere Fortschritte bei der CO₂-Vermeidung und ein grundlegender klimafreundlicher Umbau der Produktionsstruktur dringend erforderlich.“ [2, S. 9]

1.1 Konzepte der Dekarbonisierung

Laut Wirtschaftsvereinigung Stahl werden in Deutschland rund 42 Millionen Tonnen Stahl pro Jahr hergestellt, wobei zwei Drittel in integrierten Hüttenwerken mit Hochöfen und Stahlwerken und ein Drittel über die Elektrostahlroute hergestellt werden. [vgl. 3, S.7] Die Ressourceneffizienz ist durch eine hohe Recyclingquote und ein umfangreiches Materialmanagement bereits sehr hoch. Auch in anderen Umweltthemen wie Staubemissionen und dem Boden- und Wassermanagement ist die Stahlindustrie in Deutschland weit fortgeschritten. Durch eine hohe Energieeffizienz konnte der spezifische Energieverbrauch der Eisen- und Stahlherstellung seit 1990 um knapp 14 % bezogen auf den Rohstahl gesenkt werden. Möglich macht diese hohe Energieeffizienz die Energieverbundwirtschaft, welche unter anderem die entstehenden Kuppelgase energetisch nutzt. Kuppelgase sind Nebenprodukte der Kokereien, Hochöfen und Konverter und beinhalten brennbare Bestandteile. In Deutschland werden im Schnitt 80 % der Kuppelgase zur Eigenstromerzeugung genutzt, 15 % in den Kokereien, Hochöfen und Konvertern wiederverwendet und 5 % in den Walzwerken eingesetzt. [vgl. 4, S. 57].

In den Hochöfen werden Koks, Kohle und Öl mit dem sogenannten Heißwind zu Kohlenstoffmonoxid umgesetzt, mit dem das Eisenerz reduziert wird. Der Einsatz dieser Reduktionsmittel sank von 1960 bis 1990 von etwa 800 kg/t Roheisen auf 502 kg/t Roheisen ab, seitdem sind kaum weitere Einsparungen erfolgt. Dabei macht Koks 65 % der Reduktionsmittel aus, Kohle 34 % und Öl 1 %. [vgl. 3, S.24] „Mit 502 kg/t Roheisen ist das verfahrenstechnische Minimum unter den gegebenen Rohstoffbedingungen erreicht.“ [3, S. 24] Die Reduktionsmittel sind dabei für einen Großteil der direkten CO₂-Emissionen eines integrierten Hüttenwerks verantwortlich.

Die europäische Stahlindustrie verfolgt unterschiedliche Strategien zur Senkung der CO₂-Emissionen, die in zwei Technologiepfade unterteilt werden können: Smart Carbon Usage (SCU) fasst Technologien zusammen, bei denen die Eisenherstellung weiter kohlenstoffbasiert im Hoch-

1 Energiesystemmodellierung einer dekarbonisierten Stahlindustrie

ofen erfolgt und die CO₂-Emissionen anschließend aufgefangen und genutzt (Carbon Capture and Usage (CCU)) oder gespeichert (Carbon Capture and Storage (CCS)) werden. Die CO₂-Emissionen werden somit nicht in die Atmosphäre entlassen, sondern mittel- bis langfristig in beispielsweise chemischen Produkten oder untertägigen Speichern gebunden. Im Gegensatz dazu vermeidet der Ansatz des Carbon Direct Avoidance (CDA) die Entstehung von CO₂-Emissionen direkt, indem im Prozess dekarbonisierte Reduktionsmittel eingesetzt werden. Anstelle von Koks, Kohle und Öl muss Wasserstoff oder Methan auf der Basis von erneuerbarem Strom oder erneuerbarer Strom direkt eingesetzt werden. [vgl. 5]

Der Fokus der Stahlindustrie liegt dabei auf drei innovativen Stahlherstellungsverfahren, durch die eine deutliche CO₂-Emissionsreduzierung möglich ist:

Hochofen mit CCS/CCU Durch die CO₂-Abscheidung kann der Hochofen weiterhin eingesetzt werden, wobei das CO₂ dann entweder in einer Lagerstätte gasförmig oder fest gelagert oder in der Chemieindustrie genutzt wird. Dadurch steigt der Energieverbrauch um 20 % an. Diese Technologie ist vermutlich aufgrund der hohen Investitionskosten bei gleichzeitigen Umwelt- und Sicherheitsbedenken eine Brückentechnologie. [vgl. 6, S.35]

Direktreduktion mit Wasserstoff In einer Direktreduktionsanlage wird das Eisenerz im festen Aggregatzustand mit Wasserstoff als Reduktionsmittel zu Eisenschwamm reduziert. Dieser wird dann in einem Elektrolichtbogenofen eingeschmolzen und zu Rohstahl weiterverarbeitet. Durch den Einsatz von „grünem“ Wasserstoff können erneuerbare Energien zur nahezu vollständigen CO₂-Vermeidung genutzt werden. [vgl. 6, S.37]

Eisenerzelektrolyse Vergleichbar zur Schmelzflusselektrolyse von Aluminium wird durch elektrischen Strom in einer Elektrolytlösung gelöstes Eisenoxid reduziert. Dabei entstehen an der Kathode Roheisen und an der Anode Sauerstoff. Dies ermöglicht theoretisch eine CO₂-freie Stahlerzeugung, wenn erneuerbare Energien eingesetzt werden. Die industrielle Marktreife wird jedoch voraussichtlich nicht vor 2040 erreicht werden. [vgl. 6, S.39]

Zwar kann die Hochofenroute mit CCS besser in das bestehende System der Hüttenwerke integriert werden, sie ist jedoch weiterhin von Energieimporten abhängig und benötigt umfangreiche CO₂-Speichermöglichkeiten. Die Wasserstoffdirektreduktion und die Eisenerzelektrolyse erfordern zwar einen Umbau der Hüttenwerke, durch den Einsatz kohlenstofffreier Reduktionsmittel können jedoch direkte CO₂-Emissionen und damit die Abhängigkeit von ausreichenden CO₂-Speichern vermieden werden. Da die Wasserstoffdirektreduktion technisch am ausgereiftesten ist, stellt sie aus ökonomischer und technischer Sicht das bevorzugte zukünftige Stahlherstellungsverfahren dar. [7]

Gegenüber der Eisenerzelektrolyse bietet die Wasserstoffdirektreduktion außerdem den Vorteil der zeitlichen Entkopplung von Stahlherstellung und erneuerbaren Strombedarf über die Speicherung des Wasserstoffs ohne zusätzliche Verluste bei der Rückverstromung. Dadurch können erneuerbare Erzeugungsspitzen und die damit verbundenen niedrigen Energiepreise effizienter genutzt werden. [8]

Mittelfristig stellt die erdgasbasierte Direktreduktion wegen ihrer hohen technischen Reife, potenziell guten Wirtschaftlichkeit und schnelleren Verfügbarkeit eine Brückentechnologie dar. Es können direkte CO₂-Einsparpotenziale von bis zu 60 % erreicht werden. [9] Anschließend kann schrittweise Erdgas durch Wasserstoff ersetzt werden. Damit dabei die CO₂-Emissionen sinken, muss dieser Wasserstoff mit erneuerbaren Energien erzeugt werden. Die installierte Leistung der erneuerbaren Energien und der Elektrolyse muss gleichermaßen erhöht werden, bevor der

Wasserstoffanteil in der Direktreduktion erhöht wird. [10]

Die Investitionskosten für die Elektrolysen und erneuerbaren Energien können minimiert werden, wenn die Integration der Wasserstoffdirektreduktion in das Energiesystem energetisch und ökonomisch optimiert wird. Des Weiteren bieten Hüttenwerke mit Wasserstoffdirektreduktionen und Elektrolichtbogenöfen verschiedene systemdienliche Flexibilitätsoptionen. [11] Dennoch erfordert die Umstellung der Hüttenwerke Investitionen in Milliardenhöhe. So liegt in Deutschland der Reinvestitionsbedarf bei 18,2 Mrd. € bis 2030 und 49,5 Mrd. € bis 2050 [vgl. 4, S. 67].

1.2 Das SALCOS®-Projekt der Salzgitter AG

Ziel des SALCOS®-Projekts (Salzgitter Low CO₂ Steelmaking) ist die Transformation des Hüttenwerks der *Salzgitter Flachstahl GmbH* zur Herstellung CO₂-armen Stahls. In drei Ausbaustufen ersetzen Direktreduktionsanlagen und Elektrolichtbogenöfen die bestehenden Hochöfen und Konverter. In den Direktreduktionsanlagen soll zunächst Erdgas als Reduktionsmittel eingesetzt und schrittweise durch Wasserstoff ersetzt werden. Der Wasserstoff wird von Elektrolysen auf dem Hüttenwerksgelände produziert und über eine Pipeline bezogen.

Derzeit erzeugen drei Hochöfen Roheisen, das in drei Konvertern zu Rohstahl weiterverarbeitet wird. Hinzu kommen zwei Kokereibatterien, die Koks für die Hochöfen bereitstellen. An die Konverter schließen sich die Sekundärmetallurgie und Stranggießanlage sowie die Walzwerke und Oberflächenbehandlung an. Diese Komponenten zur Weiterverarbeitung des Rohstahls werden weiterhin genutzt.

Die ersten SALCOS®-Anlagen sollen Ende 2025 in Betrieb gehen, die zweite Ausbaustufe ist für Ende 2030 und die dritte für Ende 2033 geplant. Durch den Zukauf erneuerbarer Energien und grünen Wasserstoffs soll dann die gesamte Stahlherstellung nahezu CO₂-frei erfolgen.

1.3 Bisherige Untersuchungen zur Dekarbonisierung eines Hüttenwerks

Das Potenzial der CO₂-Emissionsreduzierung untersuchen Otto, Robinius, Grube u. a. in [12] für verschiedene alternative Stahlherstellungsprozesse. So könnten die Emissionen des Hochofens um 46 % bis 82 % gegenüber den Werten von 1990 gesenkt werden, wobei der Brennstoffbedarf sinkt, aber der elektrische Energiebedarf steigt. Durch Einsatz einer Direktreduktionsanlage und eines Elektrolichtbogenofens sei mit erneuerbaren Energien eine Reduzierung der Emissionen um bis zu 95 % möglich. Die Kopplung erneuerbarer elektrischer Energie mit der Stahlproduktion, von den Autoren „Power-to-Steel“ genannt, erfordere 274 TWh zusätzliche erneuerbare Energieerzeugung zur Deckung der deutschlandweiten Stahlherstellung. [vgl. 12]

Für den Direktreduktionsprozess vergleichen Sasiain, Rechberger, Spanlang u. a. die CO₂-Emissionen beim Einsatz von Erdgas und von Wasserstoff in [13]. Da sich durch die Nutzung von Wasserstoff zur Reduktion des Eisenerzes das benötigte Gasvolumen vervierfache, müsste das Prozessdesign der Direktreduktionsanlage auf die höheren Geschwindigkeiten und Druckverhältnisse ausgelegt werden. Dafür erstellen Sasiain, Rechberger, Spanlang u. a. ein Prozessmodell, welches die Direktreduktionsanlage und ihre Peripherie umfasst. Den Wasserstoffbedarf für die Reduktion schätzen Sasiain, Rechberger, Spanlang u. a. mit 482 bis 525 Nm³/t_{DRI} ab, wobei aufgrund der endothermen Reaktion weitere 242 Nm³/t_{DRI} benötigt würden. Aufgrund des hohen Wasserstoffbedarfs könnten die CO₂-Emissionen pro Tonne Rohstahl im Vergleich zum Hochofenprozess

1 Energiesystemmodellierung einer dekarbonisierten Stahlindustrie

erst gesenkt werden, wenn die CO₂-Intensität der elektrischen Energie unter 125 gCO₂/kWh sinkt. [vgl. 13]

Die Direktreduktion mit Wasserstoff analysieren Vogl, Åhman und Nilsson und bewerten den Energiebedarf, die CO₂-Emissionen, die Wirtschaftlichkeit und die Flexibilitätsoptionen in [14]. So liege der spezifische Energiebedarf für das untersuchte System bei 3,48 MWh pro Tonne flüssigen Rohstahls, wobei die Elektrolyse zwei Drittel dieser Energie benötige. Daher sinke der spezifische Energiebedarf des Hüttenwerks, je mehr DRI im Elektrolichtbogenofen (EAF) durch Schrott ersetzt werde. Erneuerbarer Strom ermögliche eine starke Reduktion der CO₂-Emissionen, da jedoch Kohlenstoff in der Direktreduktionsanlage (DRP) oder dem EAF hinzugegeben werden müsse, sei CO₂-freier Stahl nicht möglich. Insgesamt sei aber eine Reduktion auf unter 3 % der CO₂-Emissionen der herkömmlichen Hochofenroute möglich. [vgl. 14, S. 740]

Um diese CO₂-Reduktion zu erreichen, müsse zukünftig die gesamte Energie über erneuerbaren Strom bezogen werden, sodass die Betriebskosten besonders abhängig vom Strompreis seien. Der Wirkungsgrad der Elektrolyse habe das größte Einsparungspotenzial, wobei hier die Investitionskosten für höhere Wirkungsgrade abgewogen werden müssen. [vgl. 14, S. 742] Großes Potenzial sehen die Autoren bei der Flexibilisierung der Produktion, um beispielsweise durch eine höhere Elektrolyseleistung in Verbindung mit einem Wasserstoffspeicher günstigere Strompreise zu nutzen. Hier seien aber noch weitere Untersuchungen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit einer Flexibilisierung erforderlich. [vgl. 14, S. 744]

Zu vergleichbaren Ergebnissen kommen Bhaskar, Assadi und Somehsaraei in [15], wobei sie einen etwas höheren Energiebedarf der Wasserstoffdirektreduktion von 3,72 MWh pro Tonne flüssigen Rohstahls ermitteln. In ihren Sensitivitätsanalysen identifizieren auch Bhaskar, Assadi und Somehsaraei den Wirkungsgrad der Elektrolyse als größten Einfluss auf den Energiebedarf und den CO₂-Emissionsfaktor des Strommixes als größten Einfluss auf die Gesamtemissionen des Prozesses. [vgl. 15]

Eine wirtschaftliche Abschätzung der wasserstoffbasierten Stahlherstellung führen Bhaskar, Abhishek, Assadi u. a. am Beispiel der norwegischen Stahlindustrie in [16] durch. Das untersuchte Modell umfasst eine Elektrolyse mit Wasserstoffspeicher, eine DRP und einen EAF. Anhand der Investitionskosten und des Strompreises berechnen die Autoren die Produktionskosten pro Tonne Stahl für verschiedene Hüttenwerkskonfigurationen mit unterschiedlich großen Elektrolyseuren und Wasserstoffspeichern. Ein flexibler Elektrolysebetrieb senke zwar bei Teilnahme am Strommarkt die Kosten der Wasserstoffherstellung, die Einsparungen seien aber zu gering im Vergleich zu den Mehrkosten der größeren Elektrolyse. [vgl. 16]

Den Einfluss der Elektrolysetechnologie auf die Produktionskosten untersuchen Jacobasch, Herz, Rix u. a. anhand eines ökonomischen Modells in [17]. Kurzfristig sei zwar die alkalische Elektrolyse die günstigste Variante der Wasserstofferzeugung, langfristig wäre hingegen die Hochtemperatorelektrolyse durch die Möglichkeit der Abwärmenutzung des Hüttenwerks eine günstigere Alternative. [vgl. 17]

Für die detaillierte Untersuchung einer besseren Integration der Elektrolyse in den Stahlherstellungsprozess mittels DRP und EAF modellieren Müller, Herz, Reichelt u. a. in [18] diesen in einer Prozess-Simulationssoftware. Sie vergleichen die Integration einer Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyse (PEM) und einer Hochtemperatorelektrolyse (HTE) in den Gesamtprozess, insbesondere im Hinblick auf die Wärmeverteilung und -nutzung. So könne durch die Abwärmenutzung der DRP in der HTE die Gesamteffizienz der Direktreduktionsprozesse mit Wasserstoff gesteigert werden. Dadurch liege das CO₂-Einsparpotenzial im Vergleich zum Hochofenprozess bei 97,8 %. [vgl. 18]

Neben der Nutzung des Wasserstoffs als Energiespeicher zeigen Haendel, Hirzel und Süß in [19], dass auch durch die Lagerung des DRI die Wasserstoff- und Stahlherstellung entkoppelt werden können. Ihr lineares Optimierungsmodell umfasst die Elektrolyse, einen Wasserstoffspeicher, die DRP und ein DRI-Lager. Als Eingangsdaten werden die erneuerbare Energieerzeugung und der DRI-Bedarf des EAF vorgegeben. Dabei gleicht der Wasserstoffspeicher die kurzfristigen Fluktuationen der erneuerbaren Energien aus, während das DRI-Lager die Produktion langfristig ausbalanciert. Die Nutzung der Speicher sei dabei kaum von den Wetterdaten abhängig. Haendel, Hirzel und Süß weisen auf den Bedarf weiterer Untersuchungen hin, welche über den gewählten Bilanzbereich der Elektrolyse und DRP hinausgehen und beispielsweise den EAF und die erneuerbaren Energien einschließen. [vgl. 19]

Die Lagerfähigkeit des DRI kann auch genutzt werden, um DRI anstelle von Wasserstoff zu importieren, wie Gielen, Saygin, Taibi u. a. anhand des Beispiels Australien in [20] zeigen. So sei die Verlagerung der energieintensiven Eisenreduzierung zur Nutzung günstigen Wasserstoffs ökonomisch vergleichbar oder besser im Vergleich zu alternativen Stahlherstellungsverfahren wie CCS. Der Transport des DRI sei anschließend einfacher als der Transport grünen Wasserstoffs. Dies führt bei großen Entfernungen zu geringeren Kosten, beispielsweise beim Transport von Australien nach Ostasien. Auf kurzen Entfernungen müssen hingegen Effizienzgewinne durch den Einsatz von heißem DRI im EAF und damit verbundene Kosteneinsparungen abgewogen werden. [vgl. 20]

Alle Autoren schließen ihre Studien und Untersuchungen mit der Frage, wie die Integration der zusätzlichen erneuerbaren Energieerzeugung und der neuen Hüttenwerke in das Energiesystem erfolgen kann. Insbesondere der technische und wirtschaftliche Einsatz von Flexibilitäten und Energiespeichern muss untersucht werden. Dabei sei eine effiziente und wirtschaftliche Energiesystemintegration zukünftiger Hüttenwerke elementar für wettbewerbsfähigen CO₂-armen Stahl.

1.4 Lineare Modellierung integrierter Hüttenwerke

Die Energiewirtschaft ist zentraler Bestandteil der Energieversorgung integrierter Hüttenwerke. Um die komplexen Zusammenhänge zu untersuchen, muss die Energiewirtschaft in einem linearen mathematischen Modell abgebildet werden.

„Ein (mathematisches) Modell repräsentiert ein reales Problem in der Sprache der Mathematik, d. h. unter Verwendung von mathematischen Symbolen, Variablen, Gleichungen, Ungleichungen und anderen Relationen.“ [21, S. 6] Die lineare Optimierung als Unterkategorie der mathematischen Optimierung bestimmt das Maximum oder Minimum einer linearen Zielfunktion in einem durch lineare Zulässigkeitsbedingungen definierten Zustandsraum. Die Zulässigkeitsbedingungen verknüpfen die Variablen des Optimierungsproblems, welches gelöst werden soll. Die Zielfunktion wiederum gewichtet die zu optimierenden Variablen, deren Summe minimiert oder maximiert wird.

Um nichtlineare Zusammenhänge und Null-Eins-Entscheidungen abzubilden, werden die Lösungswerte einzelner Variablen auf ganzzahlige oder binäre Werte beschränkt. Diese Einschränkung mancher Variablen führt zur gemischt ganzzahligen linearen Optimierung, deren Lösung deutlich aufwändiger ist. Über binäre Variablen können der Betrieb verschiedener Komponenten eingeschränkt werden und lineare Zusammenhänge schrittweise abgebildet werden. Besteht eine Anlage zum Beispiel aus einer festen Anzahl einzelner identischer Komponenten, kann deren Betrieb mithilfe ganzzahliger Variablen abgebildet werden. [vgl. 21, S. 10] Die mathematische

Optimierung wird bereits seit vielen Jahren in der Kraftwerkseinsatzplanung verwendet und inzwischen auf Gesamtprozesse erweitert. [vgl. 21, S. 203]

Graef zeigt in [22], warum es sinnvoll ist, mithilfe der linearen Programmierung die Betriebsweise eines integrierten Hüttenwerks zu optimieren. Dabei „erweist sich die lineare Programmierung als vorteilhaft gegenüber herkömmlichen Rechenverfahren, weil eine Vielzahl von Abhängigkeiten bei gleichzeitiger Interdependenzen der Variablen zu berücksichtigen sind“ [22, S. 223]. Die Energiewirtschaft eines Hüttenwerks befasse sich mit Brennstoffen wie Kohle und Gas sowie mit verschiedenen Formen der Energie. Hierbei unterscheidet Graef die Energieformen in die Primärenergien Strom, Dampf und Gebläsewind und die Sekundärenergien Sauerstoff und Druckluft. Diese Primärenergien seien für das Optimierungsproblem relevant und der Fokus der Energiewirtschaft, während die Sekundärenergien nur einen geringen Anteil am Gesamtenergieaufwand hätten oder nicht optimiert werden könnten. [vgl. 22, S. 223]

Graef definiert als Optimierungsproblem die Verteilung der Produktion und der Primärenergien auf die Anlagen und das Verhältnis der eingesetzten Fremd- und Eigenbrennstoffe sowie des eingesetzten Fremd- und Eigenstroms. [vgl. 22, S. 224] Es „kann nur bei simultaner Lösung aller Einzelprobleme optimiert werden.“ [22, S. 225] Die Einzelprobleme hingen dabei zum einen über den teilweise eingeschränkten Brennstoffeinsatz in den Anlagen und zum anderen über die Kopplung der Energieformen in den Maschinen und Anlagen zusammen. [vgl. 22, S. 225]

In [23] legt Graef das lineare Optimierungsmodell detailliert dar. Mit Verbrauchs- und Leistungsfunktionen beschreibt er die Energiewirtschaft des Hüttenwerks, wobei in horizontale, vertikale, gekoppelte und konkurrierende Produktionen zu unterscheiden sei, um den Einfluss der verschiedenen Komponenten des Hüttenwerks aufeinander abzubilden. „Die Konstruktion des betrieblichen Vektorsystems zwingt zu einer neuen gedanklichen Durchdringung der technischen und wirtschaftlichen Zusammenhänge und ist auch leicht auf ihre Richtigkeit zu prüfen. Das Vektorsystem ist die Grundlage des linearen Programms.“ [23, S. 6] Die gemischt-ganzzahlige Programmierung erlaube die Abbildung nicht linearer Prozesse durch ganzzahlige Prozess- und Hilfsvariablen. Die Zielfunktion könne schließlich mit dem Kostenvektor, dem Einflussgrößenvektor und dem betrieblichen Vektorsystem mathematisch gelöst werden. Hierbei verbinde der Einflussgrößenvektor die Kosten mit den jeweiligen Größen im Hüttenwerk. [vgl. 23, S. 10]

Die Möglichkeit der Modellierung der Stoff- und Energieströme eines Hüttenwerks mithilfe linearer mathematischer Modell stellen auch Szargut und Ziebik in [24] vor. Darin greifen sie auf die *Theorie von Leontieff* zurück, mit welcher Produktionsprozesse linearisiert und vereinfacht werden können. Die Produktionsprozesse können in einzelne Zweige mit Zwischen-, Neben- und Endprodukten unterteilt und die benötigten Rohstoffe und Halbprodukte über Proportionalitätsfaktoren zeitunabhängig bestimmt werden. Dies setze einen stationären Prozess wie beispielsweise in einem Hüttenwerk voraus. Sie empfehlen, bei gekoppelten Prozessen ein Hauptprodukt festzulegen, anhand dessen die weiteren Nebenprodukte berechnet werden können, um den Aufwand der Lösung des linearen Modells zu vereinfachen. Stochastische Faktoren können in den durchschnittlichen Produktionskoeffizienten berücksichtigt werden, indem genügend lange Zeiträume betrachtet werden. [vgl. 24, S. 68]

Larsson analysiert in [25] die Möglichkeiten, den spezifischen Energiebedarf sowie die Umweltauswirkungen eines Stahlwerks zu minimieren. Durch Modellierung der Prozesse im Hüttenwerk der *SSAB Tunplåt AB* zeigt er Möglichkeiten auf, wie die Energie- und Materialeffizienz gesteigert werden können. Sein gemischt ganzzahliges Optimierungsmodell des Hüttenwerks beinhaltet die Stoff- und Energieströme des betrachteten Hüttenwerks, welches aus Kokerei, Hochofen, Konverter und Stahlwerk besteht. Im Vergleich der Ergebnisse mit dem realen Betrieb stellen Larsson und Dahl in [26] fest, dass mit diesem Ansatz die Prozesse und der Betrieb gut abgebildet

werden können. So könnte das Modell neue Erkenntnisse für das Energiesystem der Hütte liefern. Beispielsweise sei eine Reduzierung des spezifischen Energieeinsatzes durch einen angepassten Betrieb möglich, wobei die CO₂-Emissionen nur bedingt linear zum Energieeinsatz sinken. [vgl. 26] Ein detailliertes Modell des Hochofens erstellen Ryman, Larsson, Niemi u. a. in [27], um verschiedene Betriebsarten und zukünftige experimentelle Arbeiten untersuchen zu können. Die Ergebnisse für definierte Betriebsarten integrierten die Autoren anschließend in das Modell von [25] und analysierten den Einfluss der Betriebsart des Hochofens auf den Gesamtenergieeinsatz. Die Ergebnisse liegen im untersuchten Beispiel zwischen 5 % höheren bis 10 % niedrigeren Energiebedarfen. [vgl. 27]

In [28] zeigen Larsson, Sandberg, Dahl u. a. den Einfluss der Systemgrenzen auf die Gesamtsystemkosten bei der gemischt ganzzahligen Optimierung. So verbessere der Einbezug aller Komponenten, einschließlich des integrierten Kraftwerks, die Optimierung des Betriebs der Kokerei hinsichtlich der Gesamtkosten. Hintergrund seien die Wechselwirkungen zwischen den Komponenten über die Haupt- und Nebenprodukte. Die Ansätze der Kostenoptimierung der Energie- und Materialströme wenden Larsson, Wang, Dahl u. a. in [29] auf die Reststoffströme wie Schlacke, Schlamm, Staub und Walzzunder an, welche teilweise im Hüttenwerk wiederverwendet, teilweise als Baumaterial und teilweise speziell gelagert werden. Dadurch könnten die ökologische und ökonomische Auswirkungen des Betriebs des Hüttenwerks verbessert werden. [vgl. 29]

Die Auswirkungen einer Mehrzieloptimierung analysieren Sandberg und Larsson in [30]. Dafür minimieren sie mithilfe des Optimierungsmodells aus [25] gleichzeitig die Kosten und den Energiebedarf und vergleichen die Ergebnisse mit der Optimierung lediglich einer Zielfunktion. Dadurch ließen sich Zielkonflikte identifizieren, wobei diese bei gleichzeitiger Reduzierung der CO₂-Emissionen und des Energieaufwands sehr gering seien. Allerdings werde die Optimierung dadurch aufwändiger. Einfacher wäre die Zusammenfassung mehrerer Ziele in einer Zielfunktion, indem beispielsweise die CO₂-Emissionen über einen CO₂-Preis bewertet und dann die Gesamtkosten minimiert würden. [vgl. 30]

1.5 Ziel und Methodik der Arbeit

Gegenstand dieser Arbeit ist die Abbildung der energiewirtschaftlichen Zusammenhänge eines integrierten Hüttenwerks vor, während und nach der Transformation zu einem CO₂-armen Hüttenwerk. Ziel sind dabei minimale Energiekosten für Erdgas, elektrische Energie und zukünftig Wasserstoff. Das zu entwickelnde Optimierungsmodell soll die Kuppelgase so verteilen, dass eine hohe Energie- und Kosteneffizienz erreicht wird. Dabei wird der zu deckende Energiebedarf anhand der vorgegebenen Produktionszeitreihen berechnet.

Die Daten und Prozessabläufe für die Modellierung stellte die *Salzgitter Flachstahl GmbH* bereit. Im ersten Teil der Arbeit wird ein gemischt ganzzahliges Optimierungsmodell der energiewirtschaftlichen Zusammenhänge des Hüttenwerks der *Salzgitter Flachstahl GmbH* erstellt. Das Hüttenwerk am Standort Salzgitter besteht aus folgenden Komponenten:

- Die Kokerei besteht aus zwei Batterien und erzeugt im Jahr 1,4 Mio. t Koks für die Hochofen.
- Das Eisenerz wird in drei Hochofen reduziert, wobei zwei je etwa 1,8 Mio. t Roheisen und einer 0,6 Mio. t Roheisen pro Jahr produzieren. Zur Hochofenanlage gehören außerdem die Erzvorbereitung, die Kohlenstoffeinblasanlage und vier Windgebläse, die erhitzte Luft durch die Hochofen blasen.
- Im Stahlwerk wird das Roheisen in drei Konvertern zu Rohstahl weiterverarbeitet, in der anschließenden Sekundärmetallurgie veredelt und in den Stranggießanlagen zu Brammen gegossen.

1 Energiesystemmodellierung einer dekarbonisierten Stahlindustrie

- Die Brammen werden im Warmwalzwerk erhitzt und zu Flachstahl gewalzt und anschließend im Kaltwalzwerk und der Oberflächenveredelung zum gewünschten Endprodukt weiterverarbeitet.
- Die in der Kokerei, den Hochöfen und den Konvertern entstehenden Abgase enthalten noch brennbare Bestandteile und werden Kuppelgase genannt. Sie werden in den Komponenten selbst, in den Walzwerköfen und im integrierten Kraftwerk genutzt. Das Kraftwerk besteht aus fünf Dampferzeugern und sieben Maschinen zur gekoppelten Stromerzeugung. Es kann Prozessdampf auf vier Druckniveaus an das Hüttenwerk abgeben. Außerdem stellt es Fernwärme für benachbarte Energieversorger und Industrie bereit.

Das Optimierungsmodell beinhaltet die herkömmliche Hochofenroute sowie die Walzwerke und das integrierte Kraftwerk. Mithilfe von Brennstoff-, Dampf- und elektrischen Leistungsbilanzen bildet dieses Modell die energiewirtschaftlichen Zusammenhänge ab, damit diese auf bereits bestehende Flexibilitätsoptionen untersucht werden können. Das Gesamtmodell wird dabei in Untermodelle je Komponente aufgeteilt, in denen die Zusammenhänge zwischen Produktion und Energiebedarf sowie -erzeugung mit linearen Gleichungen, Ungleichungen und binären Variablen definiert werden. Eingangsdaten des Modells sind die zu produzierenden Zwischen- und Endproduktmengen Koks, Roheisen, Rohstahl und Flachstahl. Ausgehend von diesen Daten werden im ersten Schritt der Modellierung die für das Optimierungsmodell benötigten Eingangsgrößen berechnet. Mithilfe dieser Eingangsdaten und den spezifischen Parametern können die Zulässigkeitsbedingungen des Optimierungsmodells formuliert werden.

Als Datenbasis werden die Produktions- und Verbrauchsdaten aus dem Jahr 2018 verwendet, da die Produktionsmengen repräsentativ für die Transformation sind. Der Großteil der benötigten spezifischen Parameter werden aus den monatlichen und jährlichen Bilanzen, welche die Produktions- und Energiemengen beinhalten, berechnet. So können die benötigten und erzeugten Mengen Brennstoff, Dampf und technische Gase (Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff) je Tonne Zwischen- oder Endprodukt berechnet werden. Die Bedarfe und Erzeugungen elektrischer Leistungen werden aus den zeitlichen Verläufen für die Komponenten summiert und können so ebenfalls auf die Produktbilanzen bezogen werden. Grenzwerte der Variablen in der Modellierung kommen teilweise aus Datenblättern, mussten aber größtenteils in Gesprächen mit den Mitarbeiter:innen der *Salzgitter Flachstahl GmbH* herausgearbeitet werden. Sie beruhen nicht auf technischen Einschränkungen, sondern auf Erfahrungswerten aus dem Betrieb.

Anschließend wird im zweiten Teil der Arbeit das Modell um die neuen Komponenten des SALCOS®-Projekts erweitert, wobei die geplanten drei Ausbaustufen untersucht werden:

1. Ausbaustufe 30 % CO₂-Einsparungen

- Zubau einer 100 MW_{el}-Elektrolyse, einer Direktreduktionsanlage und eines Elektrolytischen Ofens
- Außerbetriebnahme eines Hochofens und eines Konverters

2. Ausbaustufe 50 % CO₂-Einsparungen

- Erweiterung der Elektrolyse auf 500 MW_{el}, Bau einer zweiten Direktreduktionsanlage und eines zweiten Elektrolytischen Ofens
- Außerbetriebnahme zweiter Hochofen und zweiter Konverter sowie einer Kokereibatterie

3. Ausbaustufe 95 % CO₂-Einsparungen

- Zubau eines dritten Elektrolytischen Ofens
- Außerbetriebnahme dritter Hochofen und dritter Konverter sowie der zweiten Kokereibatterie

Die Modellierung des bestehenden Hüttenwerks bleibt bestehen und wird um die Modelle

der Elektrolyse, der Direktreduktionsanlage und des Elektrolichtbogenofens ergänzt. Die neuen Komponenten werden dabei mithilfe der Datenblätter der geplanten Anlagen modelliert. Teilweise sind hier Annahmen notwendig, die mit den Mitarbeiter:innen der *Salzgitter Flachstahl GmbH* herausgearbeitet werden.

Somit bildet das Modell die parallelen Produktionsrouten Kokerei – Hochofen – Konverter und Elektrolyse – DRP – EAF ab und verknüpft sie über die Gesamtbilanzen. Für die geplante Produktion je Ausbaustufe werden die Energieverteilung und der Einsatz des Kraftwerks simuliert. Anhand der Ergebnisse werden die zukünftige Nutzung und Verteilung der Kuppelgase analysiert und das mögliche Flexibilitätspotenzial abgeschätzt.

Nachdem im ersten und zweiten Teil dieser Arbeit die energiewirtschaftlichen Zusammenhänge des Hüttenwerks vor und während der Transformation im Fokus stehen, soll im dritten Teil die Integration eines zukünftigen Hüttenwerks in ein auf erneuerbaren Energien basierendes Energiesystem untersucht werden. Dafür wird das entwickelte Modell des Hüttenwerks der *Salzgitter Flachstahl GmbH* abstrahiert, um ein allgemeingültiges Modell zu erhalten. Dieses bildet ein CO₂-armes Hüttenwerk ab, welches nur mit Wasserstoff und erneuerbarer elektrischer Energie versorgt wird. Durch den Verzicht auf binäre und ganzzahlige Variablen zugunsten von ausschließlich kontinuierlichen Variablen kann die Komplexität des Modells des Hüttenwerks und damit verbunden der Rechenaufwand reduziert werden.

Mithilfe des abstrahierten Modells soll dann die zukünftige Energieversorgung aus erneuerbaren Energien mit elektrischem und chemischen Speichern kostenoptimiert werden. Dabei werden in sechs Szenarien die Elektrolyseleistung, eine Weiternutzung des Kraftwerks und eine flexible Produktion variiert. Je Integrationszenario wird die kostengünstigste Versorgung mit erneuerbaren Energien für verschiedene Kombinationen von Batterie- und Wasserstoffspeicher untersucht. Für einen besseren Vergleich der Szenarien werden die Energiegestehungskosten pro Tonne produzierten Rohstahls berechnet. Abschließend werden die Ergebnisse auf das SALCOS®-Projekt übertragen und eingeordnet.

