

Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen

efzn

Energie-Forschungszentrum
Niedersachsen



TU Clausthal

Energiewirtschaftliche Systemintegration eines CO₂-armen Hüttenwerks unter aktiver Anwendung der Sektorenkopplung

Nils Kreth

Promotion an der Technischen Universität Clausthal

Band 81

 Cuvillier Verlag Göttingen

Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen (EFZN)
(Band 81)

Das EFZN ist ein gemeinsames
wissenschaftliches Zentrum der
Universitäten:



Energiewirtschaftliche Systemintegration eines CO₂-armen Hüttenwerks unter aktiver Anwendung der Sektorenkopplung

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von
Nils Kreth
aus Stuttgart

genehmigt von der
Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften
der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung
25. September 2023

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über

<http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2023

Zugl.: (TU) Clausthal, Univ., Diss., 2023

Dekan

Prof. Dr. mont. Leonhard Ganzer

Vorsitzende der Promotionskommission

Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer

Betreuer

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck

Gutachter

Hon.-Prof. Dr.-Ing. Jens Traupe

Dieses Dokument unterliegt der Lizenz Open Access CC BY 4.0

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2023

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2023

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-7933-8

eISBN 978-3-7369-6933-9

Abstract

Die Stahlindustrie kann technisch und wirtschaftlich derzeit nur mit der Wasserstoffdirektreduktion dekarbonisiert werden, wobei Kohle als Reduktionsmittel durch Wasserstoff substituiert wird. Dafür ersetzt die Direktreduktionsroute bestehend aus Elektrolyse, Direktreduktionsanlage und Elektrolichtbogenofen die heutige Hochofenroute bestehend aus Kokerei, Hochofen und Konverter. Die anschließende Sekundärmetallurgie sowie die Weiterverarbeitung bleiben erhalten, werden jedoch mit Energie aus erneuerbaren Quellen betrieben.

Um die energiewirtschaftlichen Zusammenhänge des Hüttenwerks während der Transformation sowie die zukünftige Energiesystemintegration eines CO₂-armen Hüttenwerks zu untersuchen, wird ein gemischt ganzzahliges lineares Optimierungsmodell des Hüttenwerks mit dem Ziel der Energiekostenminimierung aufgebaut. Das Optimierungsmodell wurde in Kooperation mit der *Salzgitter Flachstahl GmbH* im Rahmen des SACLOS®-Projekts erstellt und validiert.

Im heutigen kohlenstoffbasierten Hüttenwerk wird die eingesetzte Primärenergie bereits mit hoher Effizienz genutzt, indem die entstehenden Kuppelgase energetisch im Hüttenwerk weiterverwendet werden. Dabei sind jedoch die Energiebedarfe sowie die Erzeugung der Kuppelgase über die Produktionsprozesse derart gekoppelt, dass der Einsatz von Erdgas und Fremdstrom kaum variiert oder gesenkt werden kann.

Durch die Transformation des Hüttenwerks sinkt der Primärenergieeinsatz um die Hälfte, indem Kohle mittelfristig durch Erdgas und langfristig durch Wasserstoff aus erneuerbarer elektrischer Energie ersetzt wird. Dabei bleibt das Hüttenwerk jedoch durch die gekoppelten Produktionsprozesse weitestgehend unflexibel. Demgegenüber steht die fluktuierende Erzeugung der erneuerbaren Energien, deren installierten Leistungen aufgrund der niedrigen Volllaststunden das Zwei- bis Sechsfache der Bezugsleistung des Hüttenwerks entsprechen müssen.

Die aktive Anwendung der Sektorenkopplung ermöglicht eine leistungseffiziente Energiesystemintegration, indem erneuerbarer Strom und grüner Wasserstoff bedarfsgerecht erzeugt, genutzt oder gespeichert werden. Um dies zu untersuchen, wurde das Optimierungsmodell über die Bilanzgrenzen des Hüttenwerks um erneuerbare Energiequellen, Elektrolyse, Batterie- und Wasserstoffspeicher erweitert. So wurden verschiedene Integrationsszenarien anhand der spezifischen Energiegestehungskosten bezogen auf die Produktionsmenge Rohstahl verglichen.

Überdimensionierte und teure Batteriespeicher können durch eine flexible Elektrolyse vermieden werden, sodass der kostengünstigere Wasserstoffspeicher als saisonaler Energiespeicher genutzt werden kann. Darüber hinaus kann kostengünstigere Photovoltaikenergie zur Wasserstoffherzeugung genutzt werden und so die Energiegestehungskosten weiter gesenkt werden. Die Weiternutzung eines integrierten Wasserstoff-Kraftwerks minimiert den elektrischen Speicherbedarf weiter, indem Wasserstoff im Hüttenwerk rückverstromt werden kann.

Durch die grundsätzliche Lagerfähigkeit des direkt reduzierten Eisens können die Produktionsprozesse der Direktreduktionsanlage und des Elektrolichtbogenofens entkoppelt und somit flexibilisiert werden. Das Lager kann so als saisonaler Energiespeicher genutzt werden und minimiert insbesondere den Wasserstoffspeicherbedarf. Dadurch produziert die Direktreduktionsanlage in den Sommermonaten mit günstigem Wasserstoff direkt aus Photovoltaikenergie, während der Elektrolichtbogenofen in den Wintermonaten Windenergie nutzt, um Stahl zu produzieren. So können die Energiegestehungskosten um bis zu 15 % gesenkt werden.

Zusammenfassend kann durch die aktive Anwendung der Sektorenkopplung ein CO₂-armes Hüttenwerk effizient und kostengünstig in das zukünftige Energiesystem integriert werden. Durch eine hohe Energieeffizienz und eine flexibilisierte Produktion kann das zukünftige Hüttenwerk die Transformation unterstützen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	ix
Abkürzungsverzeichnis	xi
Formelverzeichnis	xiii
1 Energiesystemmodellierung einer dekarbonisierten Stahlindustrie	1
1.1 Konzepte der Dekarbonisierung	1
1.2 Das SALCOS®-Projekt der Salzgitter AG	3
1.3 Bisherige Untersuchungen zur Dekarbonisierung eines Hüttenwerks	3
1.4 Lineare Modellierung integrierter Hüttenwerke	5
1.5 Ziel und Methodik der Arbeit	7
I Energiewirtschaft eines kohlenstoffbasierten Hüttenwerks	11
2 Modellierung der Energiewirtschaft eines Hüttenwerks	13
2.1 Kokerei	13
2.2 Hochofenanlage	15
2.2.1 Hochöfen	15
2.2.2 Windgebläse	18
2.2.3 Kohlenstoffeinblasanlage	19
2.3 Stahlwerk	20
2.4 Walzwerke und Oberflächenbehandlung	22
2.4.1 Warmwalzwerk	22
2.4.2 Kaltwalzwerk und Oberflächenveredelung	24
2.5 Kraftwerk	25
2.5.1 Dampferzeuger	28
2.5.2 Turbinen und Maschinen	30
2.5.3 Fernwärme	33
2.6 Sonstige Komponenten	33
2.6.1 Erzvorbereitung	34
2.6.2 Wasserstoffherzeuger	34
2.7 Übergeordnetes Modell des kohlenstoffbasierten Hüttenwerks	36
2.7.1 Produktbilanzen	36
2.7.2 Brennstoffbilanzen	37
2.7.3 Dampfbilanzen	39
2.7.4 Bilanzen der technischen Gase	41
2.7.5 Elektrische Leistungsbilanz	41

2.7.6	Optimierungsziel	42
2.8	Modellvalidierung	43
3	Potenziale zur Energiekostenminimierung	49
3.1	Datengrundlage des Basisszenarios	49
3.2	Brennstoff- und Kraftwerkseinsatz	50
3.3	Bewertung der Flexibilitätsoptionen	55
II	Flexibilitätsoptionen eines Hüttenwerks im Transformationsprozess	57
4	Modellierung der Komponenten einer CO₂-armen Eisenerzeugung	59
4.1	Elektrolyse	59
4.2	Direktreduktionsanlage	60
4.3	Elektrolichtbogenofen	65
4.4	Übergeordnetes Modell des Hüttenwerks in der Transformation	68
4.4.1	Produktbilanzen	68
4.4.2	Brennstoffbilanzen	69
4.4.3	Dampfbilanzen	69
4.4.4	Bilanzen der technischen Gase	70
4.4.5	Elektrische Leistungsbilanz	70
4.4.6	Optimierungsziel	70
5	Flexibilitätpotenziale der Energieverbundwirtschaft	71
5.1	Szenarienerstellung	71
5.1.1	Produktionsplanung	71
5.1.2	Entwicklung der Energiepreise	72
5.2	Auswirkungen der Transformation auf die Brennstoffverteilung	73
5.2.1	SALCOS [®] 1. Ausbaustufe	73
5.2.2	SALCOS [®] 2. Ausbaustufe	78
5.2.3	SALCOS [®] 3. Ausbaustufe	82
5.3	Entwicklung des Energiebedarfs	85
III	Energiesystemintegration eines CO₂-armen Hüttenwerks	93
6	Modell eines zukünftigen Hüttenwerks	95
6.1	Abstraktion des Modells	95
6.2	Modellierung der externen Energiebereitstellung	99
7	Möglichkeiten der Systemintegration	103
7.1	Untersuchte Integrationszenarien	103
7.2	Systemintegration einer konstanten Stahlproduktion	104
7.2.1	8000 h-Elektrolyse	104
7.2.2	5000 h-Elektrolyse	107
7.2.3	5000 h-Elektrolyse und integriertes Kraftwerk	110
7.3	Systemintegration einer flexiblen Stahlproduktion	112
7.3.1	8000 h-Elektrolyse	113
7.3.2	5000 h-Elektrolyse	116

7.3.3	5000 h-Elektrolyse und integriertes Kraftwerk	119
7.4	Vergleich verschiedener Integrationsszenarien	124
7.5	Schlussfolgerungen am Beispiel des SALCOS®-Projekts	131
8	Zusammenfassung	135
	Literatur	139

Abbildungsverzeichnis

2.1	Validierung Modell Kokerei	43
2.2	Validierung Modell Hochöfen	44
2.3	Validierung Modell Windgebläse	44
2.4	Validierung Modell Stahlwerk	44
2.5	Validierung Modell Warmwalzwerk	45
2.6	Validierung Modell Kaltwalzwerk und Oberflächenveredelung	45
2.7	Validierung Modell Kraftwerk	45
2.8	Validierung Gesamtmodell anhand des Erdgasbezugs	46
2.9	Validierung Gesamtmodell anhand des el. Leistungsaustausches	47
3.1	Erdgas- und Strompreise im Basisszenario	49
3.2	Erdgaseinsatz im Hüttenwerk im Basisszenario	51
3.3	Wasserstoffeinsatz im Hüttenwerk im Basisszenario	51
3.4	Hochofengaseinsatz im Hüttenwerk im Basisszenario	52
3.5	Konvertergaseinsatz im Hüttenwerk im Basisszenario	52
3.6	Koksgaseinsatz im Hüttenwerk im Basisszenario	54
3.7	Elektrische Leistung im Hüttenwerk im Basisszenario	54
4.1	Aufbau einer Direktreduktionsanlage	61
5.1	Erdgaseinsatz im Hüttenwerk während der ersten Ausbaustufe	74
5.2	Wasserstoffeinsatz im Hüttenwerk während der ersten Ausbaustufe	74
5.3	Hochofengaseinsatz im Hüttenwerk während der ersten Ausbaustufe	75
5.4	Konvertergaseinsatz im Hüttenwerk während der ersten Ausbaustufe	75
5.5	Koksgaseinsatz im Hüttenwerk während der ersten Ausbaustufe	76
5.6	Elektrische Leistung im Hüttenwerk während der ersten Ausbaustufe	77
5.7	Erdgaseinsatz im Hüttenwerk während der zweiten Ausbaustufe	79
5.8	Wasserstoffeinsatz im Hüttenwerk während der zweiten Ausbaustufe	79
5.9	Hochofengaseinsatz im Hüttenwerk während der zweiten Ausbaustufe	80
5.10	Konvertergaseinsatz im Hüttenwerk während der zweiten Ausbaustufe	80
5.11	Koksgaseinsatz im Hüttenwerk während der zweiten Ausbaustufe	81
5.12	Elektrische Leistung im Hüttenwerk während der zweiten Ausbaustufe	82
5.13	Erdgaseinsatz im Hüttenwerk während der dritten Ausbaustufe	83
5.14	Wasserstoffeinsatz im Hüttenwerk während der dritten Ausbaustufe	84
5.15	Elektrische Leistung im Hüttenwerk während der dritten Ausbaustufe	85
5.16	Vergleich der Energieflüsse im Hüttenwerk während der Transformation	86
5.17	Entwicklung des Primärenergiebedarfs des Hüttenwerks	90
5.18	Dauerlinie des zukünftigen Energiebezugs	92
6.1	Aufbau eines zukünftigen Hüttenwerks	97
6.2	Tagesmittelwerte der modellierten erneuerbaren Energieerzeugung	100

7.1	Energiegestehungskosten pro produzierter Tonne Rohstahl bei konstanter Stahlproduktion und Elektrolyse mit 8000 Volllaststunden	105
7.2	Kostengünstigste Nutzung der erneuerbaren Energien sowie der Speicher bei konstanter Stahlproduktion und Elektrolyse mit 8000 Volllaststunden	106
7.3	Energiegestehungskosten pro produzierter Tonne Rohstahl bei konstanter Stahlproduktion und Elektrolyse mit 5000 Volllaststunden	108
7.4	Kostengünstigste Nutzung der erneuerbaren Energien sowie der Speicher bei konstanter Stahlproduktion und Elektrolyse mit 5000 Volllaststunden	109
7.5	Energiegestehungskosten pro produzierter Tonne Rohstahl bei konstanter Stahlproduktion, Elektrolyse mit 5000 Volllaststunden und integriertem Kraftwerk	110
7.6	Kostengünstigste Nutzung der erneuerbaren Energien sowie der Speicher bei konstanter Stahlproduktion und Elektrolyse mit 5000 Volllaststunden und integriertem Kraftwerk	111
7.7	Energiegestehungskosten pro produzierter Tonne Rohstahl bei flexibler Stahlproduktion und Elektrolyse mit 8000 Volllaststunden	113
7.8	Kostengünstigste Nutzung der erneuerbaren Energien sowie der Speicher bei flexibler Stahlproduktion und Elektrolyse mit 8000 Volllaststunden	115
7.9	Energiegestehungskosten pro produzierter Tonne Rohstahl bei flexibler Stahlproduktion und Elektrolyse mit 5000 Volllaststunden	117
7.10	Kostengünstigste Nutzung der erneuerbaren Energien sowie der Speicher bei flexibler Stahlproduktion und Elektrolyse mit 5000 Volllaststunden	118
7.11	Energiegestehungskosten pro produzierter Tonne Rohstahl bei flexibler Stahlproduktion, Elektrolyse mit 5000 Volllaststunden und integriertem Kraftwerk	119
7.12	Kostengünstigste Nutzung der erneuerbaren Energien sowie der Speicher bei flexibler Stahlproduktion und Elektrolyse mit 5000 Volllaststunden und integriertem Kraftwerk	121
7.13	Energieflüsse pro Tonne Rohstahl der untersuchten Integrationsszenarien	122
7.14	Vergleich installierte Leistung und Abregelung erneuerbarer Energien	125
7.15	Vergleich des Batterie- und Wasserstoffspeicherbedarfs	128
7.16	Vergleich der Energiegestehungskosten	130

Tabellenverzeichnis

2.1	Variablen zur Modellierung der Kokerei	14
2.2	Parameter zur Modellierung der Kokerei	14
2.3	Variablen zur Modellierung der Hochöfen	16
2.4	Parameter zur Modellierung der Hochöfen	17
2.5	Variablen zur Modellierung der Windgebläse	18
2.6	Parameter zur Modellierung der Windgebläse	18
2.7	Variablen zur Modellierung der Kohlenstoffeinblasanlage	19
2.8	Parameter zur Modellierung der Kohlenstoffeinblasanlage	19
2.9	Variablen zur Modellierung des Stahlwerks	20
2.10	Parameter zur Modellierung des Stahlwerks	20
2.11	Parameter zur Modellierung der Konverter	21
2.12	Variablen zur Modellierung des Warmwalzwerkes	23
2.13	Parameter zur Modellierung des Warmwalzwerkes	23
2.14	Variablen zur Modellierung des Kaltwalzwerkes und der Oberflächenveredelung	24
2.15	Parameter zur Modellierung des Kaltwalzwerkes und der Oberflächenveredelung	24
2.16	Variablen zur Modellierung des Kraftwerks	26
2.17	Parameter zur Modellierung des Kraftwerks	27
2.18	Variablen zur Modellierung der Dampferzeuger	28
2.19	Parameter zur Modellierung der Dampferzeuger	29
2.20	Variablen zur Modellierung der Maschinen	31
2.21	Parameter zur Modellierung der Maschinen	32
2.22	Variablen und Parameter der Klasse Fernwärme	33
2.23	Variablen zur Modellierung der Erzvorbereitung	34
2.24	Parameter zur Modellierung der Erzvorbereitung	34
2.25	Variablen zur Modellierung und Optimierung der Wasserstoffherzeuger	35
2.26	Parameter zur Modellierung und Optimierung der Wasserstoffherzeuger	35
2.27	Variablen zur Modellierung der Brennstoffvolumenströme	37
2.28	Variablen zur Modellierung der Dampfmassenströme	40
2.29	Parameter zur Modellierung der Dampfmassenströme	40
2.30	Parameter zur Modellierung der technischen Gase	41
4.1	Variablen zur Modellierung der Elektrolyse	60
4.2	Parameter zur Modellierung der Elektrolyse	60
4.3	Variablen zur Modellierung der Direktreduktionsanlagen	62
4.4	Parameter zur Modellierung der Direktreduktionsanlagen	63
4.5	Variablen zur Modellierung der Elektrolichtbogenöfen	66
4.6	Parameter zur Modellierung der Elektrolichtbogenöfen	67
4.7	Variablen der direktreduziertes Eisen (DRI)-Lagerung	69
5.1	Energiepreise Hochlauf SALCOS	72

Tabellenverzeichnis

6.1 Angenommene Kosten zur Berechnung der Energiegestehungskosten 102

Abkürzungsverzeichnis

SCU	Smart Carbon Usage
CDA	Carbon Direct Avoidance
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Usage
DRP	Direktreduktionsanlage
DRI	direktreduziertes Eisen
EAF	Elektrolichtbogenofen
PEM	Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyse
HTE	Hochtemperaturelektrolyse
EG	Erdgas
KG	Koksgas
HG	Hochofengas
KO	Konvertergas
MG	Mischgas
LCOE	Levelised Cost of Energy

