

TEXTE

07/2019

Abwärmennutzungs- potenziale in Anlagen integrierter Hüttenwerke der Stahlindustrie

Abschlussbericht

TEXTE 07/2019

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Projektnummer 74338
UBA-FB 002775

Abwärmenutzungspotenziale in Anlagen integrierter Hüttenwerke der Stahlindustrie

Abschlussbericht

von

Marten Sprecher (Projektleiter), Dr. Ing. Hans Bodo Längen,
Dr. Ing. Bernhart Stranzinger, Dr. Ing. Holger Rosemann, Dr. Ing. Wolfgang Adler
Stahlinstitut VDEh, Düsseldorf

im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

Stahlinstitut VDEh
Sohnstr. 65
40237 Düsseldorf

Abschlussdatum:

November 2018

Redaktion:

Fachgebiet V 2.1 Stahlindustrie, Raffinerien, fachliche Datenkonzeptionen und
zentrale Datenqualitätssicherung
Judith Kaliske, Franca Herold, Alexandra Bornschein

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Januar 2019

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den
Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung

Mit Sinteranlage, Hochofen, Oxygenstahlwerk, Stranggießanlage und Warmwalzwerk wurden fünf Hauptbetriebe integrierter Hüttenwerke im Hinblick auf Abwärme und deren Nutzungsmöglichkeiten untersucht. Der typische Aufbau von Sinteranlage, Hochofen mit Nebenanlagen, Oxygenstahlwerk mit LD-Konverter, Stranggießanlage und Warmwalzwerk, wie er in deutschen integrierten Hüttenwerken zu finden ist, wurde beschrieben. Energie- und Wärmebilanzen zu den Anlagen wurden erstellt und tabellarisch sowie in Form von Sankey-Diagrammen dargestellt. Nutzungsmöglichkeiten für interne und externe, direkte oder indirekte Abwärmennutzung wurden beschrieben. Auf dieser Basis wurden 13 Abwärmeströme zur näheren Betrachtung detailliert untersucht.

In Interviews mit den Anlagenbetreibern der Hüttenwerke und einem Anlagenbauer wurden Hemmnisse identifiziert, die einer möglichen Abwärmennutzung entgegenstehen. Aus den bilanziellen Abwärmeströmen wurden durch Bewertung der zur Verfügung stehenden Technologien und der Rahmenbedingungen Potenziale zur Abwärmennutzung abgeleitet. Als Haupthemmnisse wurden die folgenden Punkte benannt:

- ▶ In den Werken existieren Bestandsanlagen mit begrenztem Raum für Installationen zusätzlicher Anlagentechnik zur Wärmeauskoppelung oder Rückgewinnung.
- ▶ Wechselnde politische Rahmenbedingungen erschweren eine Kalkulation der Wirtschaftlichkeit von Großanlagen.
- ▶ Das zeitliche Profil an Produktionsanlagen anfallender Abwärme ist häufig nicht deckungsgleich mit dem Bedarf möglicher externer Abnehmer.

Berücksichtigt man diese Punkte, so kann ein zusätzlich nutzbares Abwärmepotenzial von 9,45 PJ pro Jahr bzw. 0,322 GJ pro Tonne festem Rohstahl in den integrierten Hüttenwerken in Deutschland abgeschätzt werden.

Abstract

Within the scope of this study, the potential for waste heat use in sinter plants, blast furnace plants, continuous casting plants and hot rolling mills, i.e. the main plant areas of integrated iron and steel works, was investigated. The investigation included the description of the typical design of sinter plants, blast furnace plants and their ancillary facilities, BOF steelmaking plants with LD converters, and hot rolling mills, as existing in integrated iron and steelworks in Germany, was described. Energy and heat balances were calculated and represented in tabular form and in Sankey diagrams. Possibilities of internal and external as well as direct and indirect waste heat uses were described. On this basis 13 waste heat flows were examined in greater detail.

Impediments to possible waste gas uses were identified in interviews with the iron and steelplant operators and a plant manufacturer. Potentials for waste gas use were derived from the waste gas flows in the energy balance against the background of the available technology and general circumstances. As the main impediments, the following issues were put forward:

- ▶ The facilities existing in the works provide only limited space for the installation of additional heat decoupling or heat recovery technology.
- ▶ Lack of stability in political decision-making makes it difficult to calculate the economic efficiency of large-scale plants.
- ▶ The time profile of the waste heat arising in the production plants often does not overlap with the demand by potential external consumers.

Considering the above points, the useful waste heat potential in German integrated iron and steel-works was estimated to amount to 9.45 PJ annually or 0.322 GJ per t of solid crude steel.

Dieser Bericht wurde in Zusammenarbeit zwischen dem Stahlinstitut VDEh und dem VDEh-Betriebsforschungsinstitut erstellt. Neben den aufgeführten Verfassern hat Frau Dr. Sylvia Otto, welche nicht mehr im VDEh-Betriebsforschungsinstitut tätig ist, einen erheblichen Beitrag beim Verfassen des Berichtes geleistet.

Die durchgeführte Arbeit wurde zudem durch die Unternehmen der Eisen- und Stahlindustrie mit integrierten Hüttenwerken in Deutschland unterstützt. Die Unternehmen stellten dem Stahlinstitut VDEh und dem VDEh-Betriebsforschungsinstitut jeweils ihr Expertenwissen sowie notwendige ergänzende Informationen in neutraler Form zur Beschreibung der untersuchten Verfahren und der Hemmnisse zur Verfügung. Eine gezielte Datenerhebung in einzelnen Anlagen der Unternehmen hat in dieser Studie nicht stattgefunden.

Folgende Unternehmen haben sich unterstützend an der vorliegenden Arbeit beteiligt:

AG der Dillinger Hüttenwerke

ArcelorMittal Bremen GmbH

ArcelorMittal Eisenhüttenstadt GmbH

Hüttenwerke Krupp Mannesmann GmbH

Saarstahl AG

Salzgitter Flachstahl GmbH

thyssenkrupp Steel Europe AG

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	8
Tabellenverzeichnis	10
Abkürzungsverzeichnis	12
Glossar	14
Zusammenfassung.....	16
Summary.....	24
1 Aufgabenstellung.....	31
2 Anlagentechnik des integrierten Hüttenwerks.....	33
2.1 Sinteranlage	33
2.2 Hochofen inkl. Nebenanlagen	35
2.3 Oxygen-Stahlwerk (Konverter)	39
2.4 Stranggießanlage	43
2.5 Warmwalzwerk	45
2.6 Verfahrenstechnik von Kühlwasserkreisläufen in Hüttenwerken	48
3 Technologien zur Abwärmernutzung in integrierten Hüttenwerken	49
3.1 Prozessoptimierung	50
3.2 Vorwärmung von Einsatzstoffen.....	51
3.3 Medienvorwärmung	52
3.4 Dampferzeugung	56
3.5 Wärmespeicher.....	57
3.6 Stromerzeugungsverfahren	58
3.6.1 Wasserdampferzeugung mit Wärmekraftmaschine	58
3.6.2 ORC-Prozess	58
3.6.3 Kalina-Prozess	59
3.6.4 Thermoelektrische Generatoren (TEG)	60
3.6.5 Stirlingmotor	61
3.7 Kälteerzeugung	61
3.8 Fernwärme.....	62
4 Energiebilanzen und Abwärmepotenziale der Hauptanlagen.....	64
4.1 Allgemeine Hinweise zur Energiebilanz	64
4.1.1 Bilanzraum der Hauptanlagen.....	64
4.1.2 Enthalpieströme und Energiebilanzen	65
4.1.3 Bereitstellung der Daten für Energiebilanzen	67
4.2 Sinteranlage	68

4.2.1	Energiebilanz einer Sinteranlage.....	68
4.2.2	Möglichkeiten zur Abwärmenutzung.....	72
4.3	LEEP-Sinteranlage	72
4.3.1	Energiebilanz einer LEEP-Sinteranlage.....	72
4.3.2	Möglichkeiten zur Abwärmenutzung.....	75
4.4	Hochofen.....	76
4.4.1	Energiebilanz eines Hochofens mit Nebenanlagen.....	76
4.4.2	Möglichkeiten zur Abwärmenutzung.....	81
4.5	Oxygen-Stahlwerk mit Dampferzeugung.....	81
4.5.1	Energiebilanz eines Oxygenstahlwerks mit Konverter und Dampferzeugung.....	81
4.5.2	Möglichkeiten zur Abwärmenutzung.....	85
4.6	Oxygen-Stahlwerk mit Konvertergasgewinnung	86
4.6.1	Energiebilanz eines Oxygenstahlwerks mit Konverter und Konvertergasgewinnung.....	86
4.6.2	Möglichkeiten zur Abwärmenutzung.....	89
4.7	Stranggießanlage	90
4.7.1	Energiebilanz einer Stranggießanlage.....	90
4.7.2	Möglichkeiten zur Abwärmenutzung.....	93
4.8	Warmwalzwerk	94
4.8.1	Energiebilanz eines Warmwalzwerks.....	94
4.8.2	Möglichkeiten der Abwärmenutzung	98
4.9	Zusammenfassende Analyse der Abwärmepotenziale.....	98
5	Analyse der Einflussfaktoren auf die Abwärmenutzung	100
5.1	Art der Einflussfaktoren.....	100
5.1.1	Technisch.....	100
5.1.2	Wirtschaftlichkeit	103
5.1.3	Politisch / gesellschaftlich / organisatorisch	103
5.2	Clusterung der Nutzungsmöglichkeiten	106
5.2.1	Vorwärmung von Medien und Einsatzstoffen	106
5.2.2	Dampferzeugung.....	106
5.2.3	Verstromung	106
5.2.4	Kälteerzeugung.....	106
5.2.5	Fernwärme	107
5.3	Zusammenfassung der Abwärmenutzungsmöglichkeiten.....	107
6	Ergebnisse und Erkenntnisse der Studie	123

7	Ausblick.....	135
	Quellenverzeichnis	137
	Anhang 1: Stoffdaten.....	140

Abbildungsverzeichnis

Abbildung I:	Energiefließbild eines Hochofens mit Nebenanlagen (Angaben pro t_{RE})	19
Abbildung II:	Spezifische Abwärme an den betrachteten Hauptanlagen integrierter Hüttenwerke	22
Abbildung 1:	Sinteranlage	34
Abbildung 2:	Hochofenanlage mit Nebenanlagen	36
Abbildung 3:	Konverter des Oxygenstahlwerks mit Nebenanlagen	40
Abbildung 4:	LD-Konverter	41
Abbildung 5:	Dampferzeugersystem (eigene Darstellung)	42
Abbildung 6:	Stranggießanlage	44
Abbildung 7:	Warmwalzwerk und Abkühlkurven des Warmbandes	45
Abbildung 8:	Walzen- und Zwischengerüstkühlung	47
Abbildung 9:	Wärmerückgewinnung und Abwärmennutzung	49
Abbildung 10:	LEEP Verfahren	51
Abbildung 11:	Brennstoffersparnis und Brennluftvorwärmung durch rekuperative und regenerative Wärmerückgewinnung bei unterschiedlicher Abgastemperatur	53
Abbildung 12:	Beheizungstechnik mit Regenerator und keramischem Brenner	55
Abbildung 13:	Schema für eine effektive Umsetzung an einem Wärmofen	55
Abbildung 14:	Pilotanlage zur Nutzung der Strahlungswärme von Brammen	57
Abbildung 15:	Schematische Darstellung eines ORC-Prozesses	59
Abbildung 16:	Schematischer Aufbau einer Anlage zur Nutzung des Kalina-Prozesses	60
Abbildung 17:	Aufbau eines thermoelektrischen Generators	61
Abbildung 18:	Verfahrensschema einer Absorptionskältemaschine	62
Abbildung 19:	Fernwärmeschiene Niederrhein	63
Abbildung 20:	Energiefließbild einer Sinteranlage (Angaben pro t_{Sinter})	69
Abbildung 21:	Energiefließbild einer LEEP-Sinteranlage (Angaben pro t_{Sinter})	73
Abbildung 22:	Energiefließbild eines Hochofens mit Nebenanlagen (Angaben pro t_{RE})	76
Abbildung 23:	Energiefließbild eines Oxygenstahlwerks mit Dampferzeugung (Angaben pro $t_{RS,flüssig}$)	83
Abbildung 24:	Energiefließbild eines Oxygenstahlwerks mit Konvertergasgewinnung (Angaben pro $t_{RS,flüssig}$)	87
Abbildung 25:	Energiefließbild einer Stranggießanlage (Angaben pro $t_{RE,fest}$)	91
Abbildung 26:	Energiefließbild eines Warmwalzwerks (Angaben pro t_{WB})	95

Abbildung 27:	Spezifische Abwärme an der Sinteranlage	128
Abbildung 28:	Spezifische Abwärme am Hochofen mit Nebenanlagen	129
Abbildung 29:	Spezifische Abwärme im Oxygenstahlwerk mit Konverter	130
Abbildung 30:	Spezifische Abwärme an der Stranggießanlage.....	131
Abbildung 31:	Spezifische Abwärme im Warmwalzwerk	132
Abbildung 32:	Spezifische Abwärme an den betrachteten Hauptanlagen integrierter Hüttenwerke	133

Tabellenverzeichnis

Tabelle I	Betrachtete Hauptanlagen integrierter Hüttenwerke und deren Produktion in 2015	17
Tabelle II:	Strategien zur Verringerung von Abwärmeverlusten in der Stahlindustrie (beispielhaft)	18
Tabelle III:	Übersicht der ermittelten Nutzungspotenziale	20
Tabelle IV:	Abwärme der betrachteten Hauptanlagen bezogen auf eine Tonne festen Rohstahl (RSfest).....	21
Tabelle 1:	Betrachtete Hauptanlagen integrierter Hüttenwerke und deren Produkte	31
Tabelle 2:	Angaben zu Anlagen und Produktionsdaten integrierter Hüttenwerke in Deutschland im Jahr 2015 (Wirtschaftsvereinigung_Stahl, 2017).....	33
Tabelle 3:	Strategien zur Verringerung von Abwärmeverlusten in der Stahlindustrie (beispielhaft)	50
Tabelle 4:	Optimale Temperaturbereiche verschiedener genutzter Speicherprinzipien	58
Tabelle 5:	Technische Verfahren zur Stromerzeugung aus industrieller Abwärme	58
Tabelle 6:	Temperatur- und Druckbereiche der unterschiedlichen Netztypen	62
Tabelle 7:	Energiebilanz einer Sinteranlage mit Nebenanlagen - Teil 1.....	70
Tabelle 8:	Energiebilanz einer Sinteranlage mit Nebenanlagen - Teil 2.....	71
Tabelle 9:	Energiebilanz einer LEEP-Sinteranlage – Teil 1.....	74
Tabelle 10:	Energiebilanz einer LEEP-Sinteranlage – Teil 2.....	75
Tabelle 11:	Energiebilanz eines Hochofens mit Nebenanlagen – Teil 1.....	77
Tabelle 12:	Energiebilanz eines Hochofens mit Nebenanlagen – Teil 2.....	78
Tabelle 13:	Energiebilanz eines Hochofens mit Nebenanlagen – Teil 3.....	79
Tabelle 14:	Energiebilanz eines Oxygenstahlwerks mit Dampferzeugung – Teil 1	84
Tabelle 15:	Energiebilanz eines Oxygenstahlwerks mit Dampferzeugung – Teil 2	85
Tabelle 16:	Energiebilanz eines Oxygenstahlwerks mit Konvertergasgewinnung – Teil 1	88
Tabelle 17:	Energiebilanz eines Oxygenstahlwerks mit Konvertergasgewinnung – Teil 2	89
Tabelle 18:	Energiebilanz einer Stranggießanlage – Teil 1.....	92
Tabelle 19:	Energiebilanz einer Stranggießanlage – Teil 2.....	93
Tabelle 20:	Energiebilanz eines Warmwalzwerks – Teil 1.....	96
Tabelle 21:	Energiebilanz eines Warmwalzwerks – Teil 2.....	97
Tabelle 22:	Energiebilanz eines Warmwalzwerks – Teil 3.....	98

Tabelle 23:	Anlagenübergreifende Einflüsse auf Abwärmenutzungstechnologien	108
Tabelle 24:	Einflüsse auf Abwärmenutzungstechnologien für das Abgas am Sinterband	110
Tabelle 25:	Einflüsse auf Abwärmenutzungstechnologien für die Abluft am Sinterkühler	111
Tabelle 26:	Einflüsse auf Abwärmenutzungstechnologien für das Abgas am Winderhitzer	112
Tabelle 27:	Einflüsse auf Abwärmenutzungstechnologien für die Schlacke am Hochofen	113
Tabelle 28:	Einflüsse auf Abwärmenutzungstechnologien für das Wasser der Schlackengranulierung.....	114
Tabelle 29:	Einflüsse auf Abwärmenutzungstechnologien für die Fackel am Konverter	115
Tabelle 30:	Einflüsse auf Abwärmenutzungstechnologien für die Schlacke am Konverter	116
Tabelle 31:	Einflüsse auf Abwärmenutzungstechnologien für das Abgas am Konverter	117
Tabelle 32:	Einflüsse auf Abwärmenutzungstechnologien für die Brüden der Stranggießanlage	118
Tabelle 33:	Einflüsse auf Abwärmenutzungstechnologien für Brammenkühlung an der Stranggießanlage nach der Brennschneidmaschine	119
Tabelle 34:	Einflüsse auf Abwärmenutzungstechnologien für das Abgas am Wärmofen.....	120
Tabelle 35:	Einflüsse auf Abwärmenutzungstechnologien für das Kühlwasser am Wärmofen.....	121
Tabelle 36:	Einflüsse auf Abwärmenutzungstechnologien für die Restwärme des Warmbandes	122
Tabelle 37:	Übersicht der ermittelten Nutzungspotenziale	124
Tabelle 38:	Verwendete Temperaturwerte in der Betrachtung der Abwärmeströme	125
Tabelle 39:	Abwärme der betrachteten Hauptanlagen bezogen auf eine Tonne festen Rohstahl (RSfest).....	127

Abkürzungsverzeichnis

BFI	VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BREF	Best Available Techniques Reference; BVT-Merkblatt
bzw.	beziehungsweise
chem.	chemisch
c_{pm}	mittlere isobare spezifische Wärmekapazität
DEHSt	Deutsche Emissionshandelsstelle im Umweltbundesamt
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
E_{el}	elektrische Energie
ETS	Emissionshandelspflichtig (wortwörtlich: Emission Trading System)
GR	Gasreinigung
h	spezifische Enthalpie
$\dot{H}$	Enthalpiestrom
HKM	Hüttenwerke Krupp Mannesmann
h_u	(unterer) Heizwert
i.d.R.	in der Regel
i.N.	im Normzustand
inkl.	inklusive
KG	Konvertergas
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LD	Linz-Donawitz Verfahren (Sauerstoffaufblasverfahren)
LEEP	Low Emission and Energy optimised sintering Process
L_{min}	Mindestluftbedarf
$\dot{m}$	Massenstrom
Mio.	Millionen
n	negativ
OBM	Oxygen-Bottom-Maxhütte Verfahren (Sauerstoffbodenblasverfahren)
ORC	Organic Rankine Cycle
p	positiv
PAK	polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
RE	Roheisen
RS	Rohstahl
TA Lärm	Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz)

TA Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz)
TEG	Thermoelektrische Generatoren
TEHG	Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz
V	Volumenstrom
VDEh	Verein Deutscher Eisenhüttenleute
Vol. %	Volumenprozent
WB	Warmband
WÜ	Wärmeübertrager
ZTU	Zeit-Temperatur-Umwandlungsdiagramm
ZuV	Zuteilungsverordnung
λ	Luftzahl
ϑ	Temperatur

Glossar

Ausbringen	Wertstoffnutzung in einem Prozess: Verhältnis zwischen dem Wertstoff-Massenstrom im Produkt zum Wertstoff-Massenstrom der Rohstoffe
Blasform	Blasformen werden in Hochöfen oder Kupolöfen eingesetzt und führen dem Ofen über düsenartige Öffnungen heißen Wind zu, der den Erschmelzungsprozess unterstützen soll.
Bramme	Als Brammen werden die aus flüssigem Stahl gegossenen Blöcke bezeichnet. In diesem Bericht werden darunter folgende Zwischenprodukte zusammengefasst: Bramme (wenige 100 mm dick, bis zu wenige Meter breit, einige Meter lang), Dünnbramme (unter 100 mm dick), Knüppel (quadratischer Querschnitt), Rundstahl (runder Querschnitt).
Brüden	Nicht gefasster Wasserdampf in dampfgesättigter Luft, der z.B. bei der Spritzwasserkühlung von Brammen entsteht.
Coil	Bandstahlrolle; als Rolle aufgewickelter Warmband
Emissionsgrad	Der Emissionsgrad ist der Anteil der emittierten Strahlung in Bezug zur Gesamtstrahlung.
Enthalpie	Die Enthalpie ist eine thermodynamische Zustandsgröße. Sie ist eine Bezeichnung für die abgegebene bzw. aufgenommene Wärmemenge einer Reaktion.
Fluid	Das Fluid (vom lateinischen <i>fluidus</i> für „fließend“) ist eine gemeinsame Bezeichnung für Gase und Flüssigkeiten.
Frischen	Entkohlung und Mischen des Roheisens im Konverter mittels Sauerstoff/Luft.
gefasst	Medienströme, die kontrolliert und gezielt über Rohrleitung bzw. über den Kamin geleitet werden.
Heißwind	Im Winderhitzer vorgewärmte Luft („Wind“), die in den Hochofen eingeblasen wird.
Hüttensand	Hüttensand ist ein feinkörniges, glasiges Nebenprodukt der Roheisenherstellung im Hochofen mit einer Korngröße von bis 5 mm. Er entsteht durch das schlagartige Abkühlen der Hochofenschlacke mit Wasser.
Kaltwind	Kalte Umgebungsluft, die dem Winderhitzer zugeführt wird.
Luftzahl	Das Verbrennungsluftverhältnis, auch Luftzahl λ genannt, gibt als dimensionslose Kennzahl das Massenverhältnis von tatsächlich eingesetzter Luft zu der minimal benötigten Luft für eine vollständige Verbrennung.
$L_{\min}$	Der Mindestluftbedarf ist das Massenverhältnis von Luft zu Brennstoff für eine vollständige Verbrennung.

	nung.
Nutzenergie	Nutzenergie ist ein unscharf verwendeter Begriff für Energie, die Endnutzern für ihre Bedürfnisse zur Verfügung steht. Hier wird insbesondere die Energie so bezeichnet, die einem Produkt oder Verfahren zugeführt wird.
Möller	Der Möller (althochdeutsch für <i>Gemisch</i>) ist ein Gemisch aus metallhaltigen Erzen, Kohlenstoff und Zuschlagsstoffen, die zur Gewinnung des Eisens aus dem Erz im Hochofenprozess benötigt werden.
Sattdampf	Wird Wasser unter Druck bis zur Sättigung der Atmosphäre verdampft, wird der entstehende Dampf als Sattdampf bezeichnet.
Schlacke	Hochofen- und Stahlwerkschlacke sind anorganische nichtmetallische Schmelzen. Chemisch betrachtet sind Schlacken Steine, die im Wesentlichen aus den Oxiden von Silizium, Kalzium und Magnesium bestehen.
tuyere	Blasform.
überhitzter Dampf	Wird Sattdampf ohne Wasserzufuhr weiter erhitzt, wird der entstehende Dampf als überhitzter Dampf bezeichnet.
ungefasst	ohne Eingrenzung beispielsweise durch Rohrleitungen, Kanäle oder Kamine.
$V_{\min}$	Volumenstrom, der sich aus $L_{\min}$ ergibt.
Warmband	in diesem Bericht verwendet für Warmbreitband und Quartoblech.
Wind	Luft, die im Winderhitzer erwärmt und dann als Heißwind in den Hochofen eingeblasen wird.

Zusammenfassung

Rohstahl wird in Deutschland nach dem Oxygenstahl- oder dem Elektrostahlverfahren produziert. Der Verfahrensweg der Oxygenstahl-Produktion basiert auf Verwendung natürlicher Erze, die in integrierten Hüttenwerken zunächst im Hochofen zu Roheisen und nachfolgend im Sauerstoffkonverter zu Rohstahl verarbeitet werden. In Deutschland wurden in 2015 rd. 30,0 Mio. t Rohstahl bzw. 70,4 % des insgesamt erzeugten Rohstahls in der „Hochofen-Route“ erzeugt.

Die Herstellung von Stahl ist unter anderem aufgrund der Hochtemperatur-Verfahrenstechnik bei Prozesstemperaturen von über 1.700 °C sehr energieintensiv. Die Stahlindustrie ist auch deswegen bestrebt, den Energiebedarf kontinuierlich zu senken, die zugeführten Energieträger und die erzeugte Abwärme bestmöglich zu nutzen und verbleibende „Restenergien“ des Hüttenwerks zu verwerten.

Bei der Stahlherstellung in integrierten Hüttenwerken entstehen neben den Zwischenprodukten ebenfalls sogenannte Kuppelgase. Hierzu gehören das Koksofen-, Gicht- und Konvertergas. Die Energieflüsse der Kuppelgase können nahezu vollständig innerhalb des Hüttenwerks genutzt werden (inklusive der Kraftwerke), da eine regelmäßige Optimierung der teilweise kontinuierlich oder diskontinuierlich arbeitenden Anlagen stattfindet. Die Kuppelgase werden zur Substitution von Erdgas z. B. zur Beheizung der Winderhitzer von Hochöfen, zur Unterfeuerung der Koksöfen, zur Beheizung von Walzwerksöfen und auch zur Eigenstromerzeugung in Kraftwerken genutzt. Auf diese Weise kann der Bezug an Erdgas minimiert werden. Integrierte Hüttenwerke erzeugen durch Nutzung der Kuppelgase den größten Teil ihres Strombedarfs selbst und sind deshalb nur in geringem Maße auf externen Strombezug angewiesen. Hüttenwerke besitzen ebenfalls eine integrierte Verbundstruktur für Prozessdampf. Das Dampfnetz ermöglicht es, den Dampf von den Orten der Erzeugung an die Nutzer von Dampf zu verteilen. Über eine Umwandlung in Dampf kann auch Abwärme in nutzbare Energie überführt werden. Zur bestmöglichen Nutzung der Exergie steht der Dampf dabei oft auch in mehreren unterschiedlichen Druckstufen zur Verfügung.

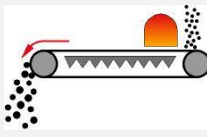
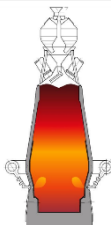
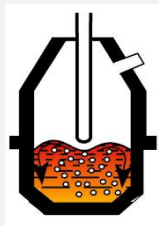
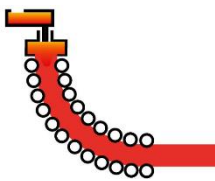
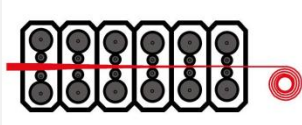
In dem vorliegenden Projekt werden die Potenziale zur Nutzung von Abwärme integrierter Hüttenwerke in Deutschland ermittelt. Dafür wird die Prozesskette der Roheisen- und Stahlherstellung bis zum Walzstahl in einem integrierten Hüttenwerk an den Hauptaggregaten dargestellt und mit Energiebilanzen des jeweiligen Verfahrens der Hauptaggregate inklusive relevanter Nebenanlagen beschrieben. Im Vordergrund steht dabei eine in sich schlüssige Verfahrensbeschreibung und Analyse der Abwärmeströme für die Hauptanlagen der integrierten Hüttenwerke in Deutschland im Mittel, jedoch nicht die spezielle Datenerhebung in einzelnen Werken der Industrie.

Die Hauptanlagen integrierter Hüttenwerke sind die Kokerei, die Sinteranlage, der Hochofen, das Stahlwerk, die Stranggießanlage und das Warmwalzwerk. In der Studie wird die Kokerei aus Zeit- und Kostengründen nicht betrachtet, weshalb sie in Tabelle I nicht enthalten ist.

Im Rahmen dieses Projekts werden die o.g. Hauptanlagen des integrierten Hüttenwerks bis zur Herstellung von Warmwalzstahl energetisch bilanziert. Dem Warmwalzwerk nachgeschaltete Anlagen wie Kaltwalzwerk, Oberflächenveredelungsanlagen wie Verzinkungsanlagen sowie andere Weiterverarbeitungsanlagen werden nicht betrachtet. Energetisch relevante Nebenanlagen wie z. B. Granulationsanlagen zur Herstellung von Hüttensand werden berücksichtigt.

Der Aufbau der integrierten Hüttenwerke in Deutschland ist sehr unterschiedlich. Bei grundsätzlich gleichen Anlagentypen kommen verschiedene Verfahren zur Anwendung. In der vorliegenden Studie werden maximal zwei besonders relevante Verfahrensvarianten des gleichen Anlagentyps betrachtet.

Tabelle I Betrachtete Hauptanlagen integrierter Hüttenwerke und deren Produktion in 2015

Piktogramm	Anlage	Produkt	Jahresproduktion der deutschen Hüttenwerke in 2015
	Sinteranlage	Sinter	26.405.272 t
	Hochofen	Roheisen	27.583.029 t
	Oxygenstahlwerk	Rohstahl flüssig	30.053.873 t
	Stranggießanlage	Rohstahl fest	29.347.607 t
	Warmwalzwerk	Warmband	21.300.000 t

Die Beschreibung und Erläuterung von Technologien in dieser Studie erfolgt mit Blick auf das Ziel, Abwärmenutzungspotenziale in integrierten Hütten der Stahlindustrie zu untersuchen. Daher erheben die Darstellungen keinen Anspruch auf Vollständigkeit für andere Anwendungsgebiete. Stattdessen werden lediglich die Sachverhalte dargestellt, die für das Verständnis der später dargestellten Abwärmenutzungspotenziale von Bedeutung sind.

In den integrierten Hüttenwerken erfolgt die Wärmebereitstellung für die jeweiligen Prozesse meist durch Verbrennung von festen Brennstoffen und/oder Erdgas bzw. Nutzung der bei der Stahlherstellung entstehenden Kuppelgase. Abwärme fällt in den Prozessen z. B. an als

- ▶ sensible Wärme in Abgasen, Kühlwässern, Produkten und Nebenprodukten,
- ▶ latente Wärme der unvollständig gekühlten Produkte und Nebenprodukte.

Tabelle II zeigt, welche Strategien zur prozessinternen und/oder –externen Nutzung bzw. zur Verringerung von Abwärmeverlusten in der Stahlindustrie angewendet werden können.

Tabelle II: Strategien zur Verringerung von Abwärmeverlusten in der Stahlindustrie (beispielhaft)

Strategie	Anwendungsbeispiele aus integrierten Hütten
Prozessoptimierung	Vermeidung von Abwärme
Prozessinterne Nutzung der Abwärme	Vorwärmung von Einsatzstoffen Schrott, Brammen Medienvorwärmung Brennluft, Brenngas, Blaskohle Dampferzeugung Wärmespeicher
Betriebsinterne Verwendung der Abwärme	Vorwärmung von Einsatzstoffen Sinter, Schrott, Brammen Medienvorwärmung Brennluft, Brenngas, Blaskohle Dampferzeugung Wärmespeicher
Umwandlung in andere Energieformen	Stromerzeugungsverfahren Dampfturbine (Kraftwerk), ORC, TEG Kälteerzeugung Absorptionskältemaschine, Adsorptionskältemaschine
Betriebsexterne Nutzung der Abwärme	Fernwärme Warmwasser, Dampf

Mit dem Ziel der Potenzialabschätzung werden typische Energiebilanzen von den Hauptanlagen der in Deutschland in integrierten Hüttenwerken eingesetzten Verfahren zur Roheisen- und Stahlherstellung dargestellt. Standort- und werksspezifische Besonderheiten der Unternehmen werden in der Bilanzierung durch eine Mittelwertbildung bei der Datenerfassung und Darstellung der jeweiligen Verfahren berücksichtigt. Die in dieser Studie ermittelten Prozessdaten und Abwärmepotenziale beschreiben daher nicht ein existierendes integriertes Hüttenwerk, sondern sind als Mittelwerte der verschiedenen Anlagen in Deutschland zu verstehen.

Vorgelagerte Prozesse und Transporte sowie die Anlagen zur Koksherstellung werden aus den o.g. Gründen nicht berücksichtigt.

Die Verfahren werden dargestellt jeweils mittels

- ▶ einer tabellarischen Energiebilanz mit den ein- sowie austretenden Bilanzgrößen und
- ▶ einem Sankey-Diagramm der Energieflüsse mit Darstellung möglicher Abwärmepotenziale.

Um die betrachteten Hauptanlagen werden Bilanzräume definiert, die teilweise in Prozessstufen oder Nebenanlagen unterteilt werden. Die Nebenanlagen werden dann jeweils einzeln bilanziert und zur Gesamtbilanz zusammengeführt.

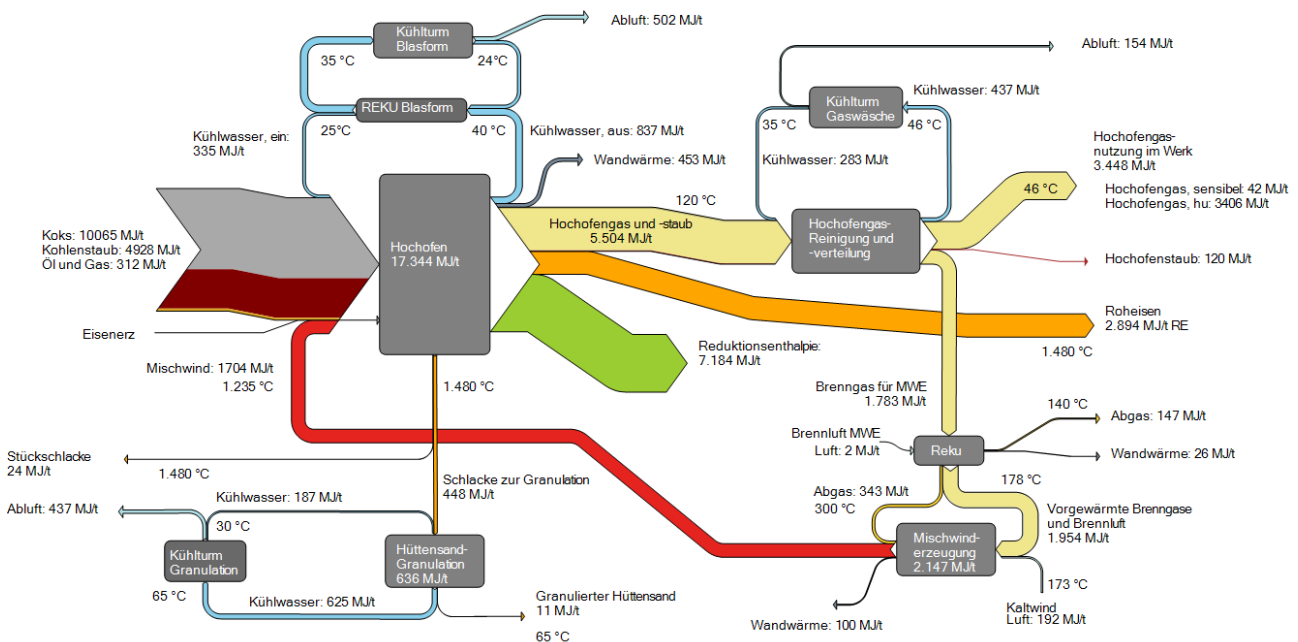
Die Datenbereitstellung für die Bilanzräume der Anlagen erfolgte durch das Stahlinstitut VDEh auf der Basis von Statistiken, technischen Dokumentationen des Stahlinstituts VDEh sowie national und international verfügbaren Publikationen der Eisen- und Stahlindustrie. Zusätzlich wurden Interviews mit Fachleuten aus Hüttenwerken durchgeführt, die weitere Informationen für diese Untersuchung bereitgestellt haben.

Für die einzelnen Positionen der Energieausgaben von Energiebilanzen existiert keine Statistik der Branche in Deutschland. Diese Daten wurden deshalb auf Basis des Prozesswissens sowie der Zusam-

menhänge von Wärmeübertragung, Thermodynamik und Hüttentechnik sowie aus der Logik von Bilanzen nach bestem Wissen ermittelt.

Abbildung I zeigt beispielhaft die Energiebilanz des Hochofens mit den angeschlossenen Nebenanlagen.

Abbildung I: Energiefließbild eines Hochofens mit Nebenanlagen (Angaben pro t_{RE})



Eigene Darstellung, Stahlinstitut VDEh

Die Energieeinnahmen einer Hochofenanlage werden durch die Brennstoffenergie der Reduktionsmittel Koks, Kohle, Öl und Gas aufgebracht. Zusätzlich wird dem Hochofen Heißwind zugeführt, der zuvor durch Beheizung von Winderhitzern mit Brenngasen erzeugt wurde.

Die Energieausgaben des Hochofens werden vor allem für Stoffumwandlungen im Hochofen aufgewendet. So wird zur Reduktion des Roheisens in diesem Beispiel eine endotherme Reaktionsenthalpie benötigt und weitere Energie für die Reduktion der im Roheisen gelösten Nebenelemente Si, Mn, P und Ti aufgewendet.

Zu den Haupt-Energieausgaben des Hochofens zählen die schmelzflüssigen Produkte Roheisen und Schlacke sowie das Hochofengas.

So werden für diese Studie die Energiebilanzen für die Sinteranlage, den Hochofen, den Konverterbetrieb, die Stranggießanlage und das Warmwalzwerk aufgestellt.

Für eine detaillierte Betrachtung werden aus den in der Studie ermittelten Abwärmeströmen 13 Einzelströme als theoretisch nutzbar identifiziert und anschließend bewertet. Daraus werden Nutzungspotenziale bestimmt, die in Tabelle III detailliert aufgelistet sind. Für die in dieser Studie betrachteten fünf Hauptanlagen (Sinteranlage, Hochofen inklusive Nebenanlagen, Oxygenstahlwerk mit Konverter, Stranggießanlage und Warmwalzwerk) werden die Potenziale aufsummiert und in Tabelle IV dargestellt.

Tabelle III: Übersicht der ermittelten Nutzungspotenziale

	Jahresproduktion aller deutschen Hüttenwerke in Summe		¹ ausgewählte Abwärme, Bezug 15°C	² Abwärmepotenzial, bei minimaler Prozesstemp.	³ bereits genutzt	Abwärmepotenzial, verbleibend	⁴ Abwärmepotenzial, betrieblich nutzbar		nutzbarer Temperaturgradient	Medium	Bemerkung
							%	GJ / Jahr			
Abgas am Sinterband (vor Gasreinigung)	26.405.272	Sinter (Si)	8.366.468	1.720.208	29	1.221.040	75	915.780	22	Abgas	abrasiv bei geringem Teperaturniveau
Abluft am Sinterkühler	26.405.272	Sinter (Si)	5.536.520	4.208.273	11	3.724.898	75	2.793.673	110	Abluft	abrasive und korrosive Bedingungen
Abgas am Winderhitzer	27.583.029	Roheisen (RE)	9.460.979	6.758.267	58	2.810.247	50	1.405.123	200	Abgas	an einigen Anlagen besteht nicht das nötige Bauvolumen zur Verfügung
Schlacke am Hochofen	27.583.029	Roheisen (RE)	12.357.197	12.062.391	0	12.062.391	0	0	1.430	Schlacke	keine Technologie bekannt, die großtechnisch genutzt werden kann
Granulierwasser der Schlackengranulation	27.583.029	Roheisen (RE)	12.081.367	5.171.071	0	5.171.071	0	0	15	Abwasser	abrasiv bei geringem Teperaturniveau; nicht nutzbar
Abgas der Fackel am Konverter	22.477.587	Rohstahl (RS _{flüssig})	876.626	800.978	0	800.978	0	0	950	Abgas	hoch instationär, maximal wenige Minuten pro Stunde; nicht nutzbar
Schlacke am Konverter	30.053.873	Rohstahl (RS _{flüssig})	7.333.145	7.180.371	0	7.180.371	0	0	1.645	Schlacke	keine Technologie bekannt, die großtechnisch genutzt werden kann
Abgas am Konverter ohne / mit Konvertergasgewinnung:	ohne	7.576.286	Rohstahl	2.144.089	1.290.274	0	1.290.274	0	500	Abgas	derzeitige Anlagen: Anlagenumbau erforderlich; nur bei Neuanlagen nutzbar
	mit	22.477.587	Rohstahl (RS _{flüssig})	2.697.310	1.591.311	20	1.278.671	0	500	Abgas	
Brüden an der Sekundärkühlung der Stranggießanlage	29.347.607	Rohstahl (RS _{fest})	11.240.133	7.823.241	0	7.823.241	0	0	15	ungefasste Brüden	ungefasster instationärer Strom bei geringer Temperatur; nicht nutzbar
Brammenkühlung an der Stranggießanlage nach Brennschneidmaschine	29.347.607	Rohstahl (RS _{fest})	18.899.859	6.272.035	30	4.415.825	65	2.882.810	494	Bramme	geringe Wärmestromdichte; Einfluss auf Produktqualität (teils positiv, teils negativ)
Abgas am Wärmofen nach dem Dampfkessel	21.300.000	Warmband (WB)	4.110.900	1.740.721	39	1.056.563	100	1.056.563	120	Abgas	nutzbar
Kühlwasser tragender Ofenelemente im Warmwalzwerk	kalt	15.176.258	Warmband	1.851.503	925.752	55	419.862	25	35	Kühlwasser	zum Teil Temperatur zu gering teils bis Mitteldruckdampf
	heiß	6.123.742	Warmband (WB)	747.097	747.097	100	0	100	0	Dampf	
Restwärme des Warmbandes	21.300.000	Warmband (WB)	6.283.500	5.863.038	0	5.863.038	5	293.152	450	Coil	geringe Wärmestromdichte, daher sehr lange Prozesszeit und sehr große Lager

¹ bilanzielle Abwärme bezogen auf 15 Grad Celsius² bezogen auf individuelle minimal zulässige Temperatur im Prozessschritt; Abgas: 100 °C bei Erdgas, 180 °C bei Koksofengas, 400°C bei O₂-Mangel ; sonst: 50 °C³ an Einzelanlagen bereits in den Hütten genutzt⁴ betrieblich nutzbar: Unter den vorhandenen Rahmenbedingungen sind die Potenziale technisch, organisatorisch und wirtschaftlich an den Bestandsanlagen erschließbar, siehe Kapitel 5 des Berichtes.

Auf Basis der 13 identifizierten Abwärmeströme werden detaillierte Analysen durchgeführt sowie die Einflussfaktoren auf die Nutzung und eine mögliche Nutzung diskutiert. Bei den Einflussfaktoren werden einerseits technische Randbedingungen betrachtet (Temperaturniveau, Transportmedium, Druckniveau, Verschmutzung, Skalierbarkeit, Regelbarkeit) und andererseits die Wirtschaftlichkeit einer Maßnahme sowie die politischen, gesellschaftlichen und organisatorischen Randbedingungen der Umsetzung.

Für die Anwendung der Abwärmenutzungstechnologien und die jeweiligen Einflussfaktoren werden jeweils die Hemmnisse eingestuft und beschrieben. Aus der Auswertung ergeben sich für die integrierten Hüttenwerke in Deutschland die in Tabelle IV dargestellten Ergebnisse, welche in Abbildung II visualisiert sind.

Tabelle IV: Abwärme der betrachteten Hauptanlagen bezogen auf eine Tonne festen Rohstahl (RSfest)

⁰ : gesamte Abwärme ^{1...4} : für die Nutzung identifizierte Anteile	⁰ bilanzielle Abwärme, Bezug 15 °C	¹ ausgewählte Abwärme, Bezug 15°C	² Abwärmepotenzial, bei minimaler Prozesstemp.	³ Abwärmepotenzial, verbleibend	⁴ Abwärmepotenzial, betrieblich nutzbar
	GJ / t RSfest	GJ / t RSfest	GJ / t RSfest	GJ / t RSfest	GJ / t RSfest
Sinteranlage	0,928	0,474	0,202	0,169	0,126
Hochofen	3,006	0,739	0,524	0,389	0,048
Konverter	2,165	0,445	0,370	0,359	0,000
Stranggießanlage	1,253	1,027	0,480	0,417	0,098
Warmwalzwerk	1,112	0,443	0,316	0,250	0,050
gesamt	8,463	3,127	1,892	1,585	0,322

⁰ Gesamtsumme der bilanziellen Abwärme, bezogen auf 15 °C.

¹ bilanzielle Abwärme der zur Nutzung identifizierten 13 Abwärmeströme, bezogen auf 15 °C.

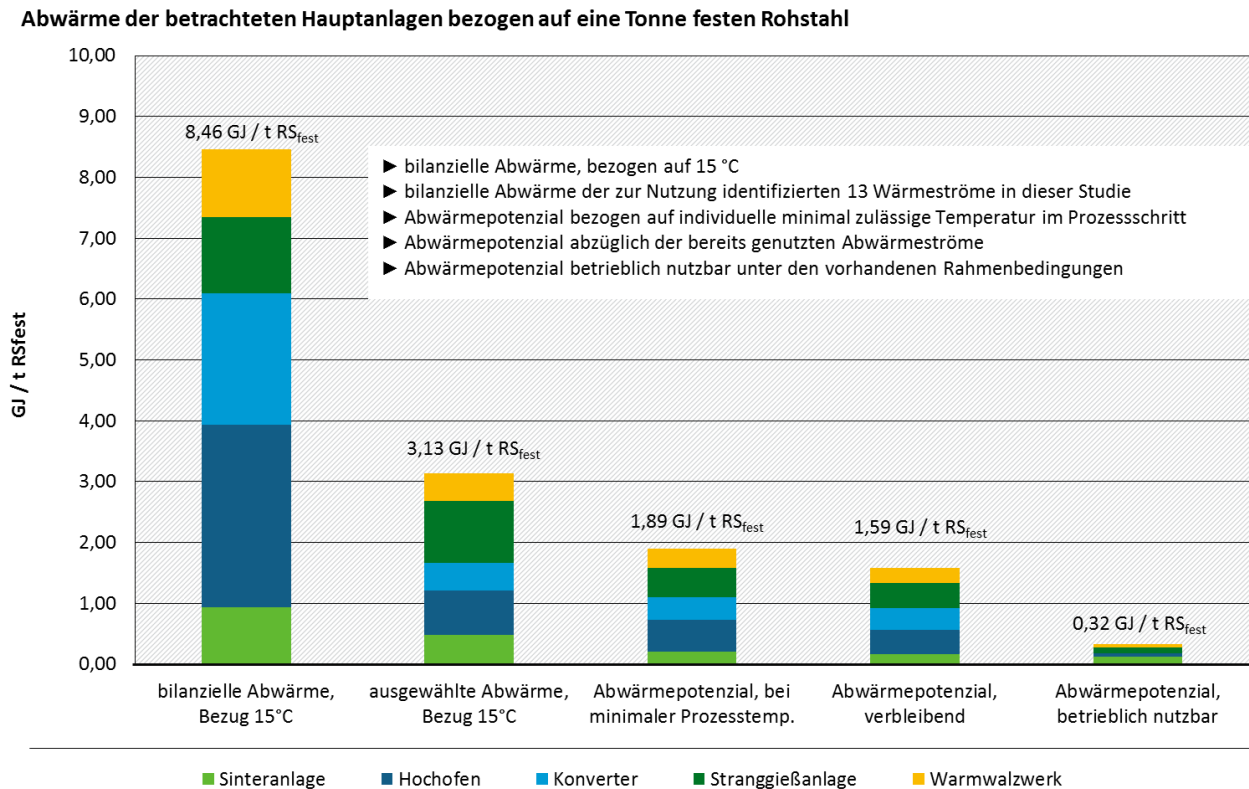
² Abwärme der vorherigen Spalte, nun bezogen auf individuelle minimal zulässige Temperatur im Prozessschritt; Abgas: 100 °C bei Erdgas, 180 °C bei Koksofengas, 400°C bei O₂-Mangel ; sonst: 50 °C (beispielsweise aus verschleiß-, korrosions- und sicherheitstechnischen Gründen sonst nicht nutzbar).

³ Abwärme der vorherigen Spalte, nun verringert um die an Einzelanlagen in den Hütten bereits genutzten Abwärmeströme.

⁴ Abwärme der vorherigen Spalte, nun verringert auf die betrieblich nutzbare Menge: Unter den vorhandenen Rahmenbedingungen sind die Potenziale technisch, organisatorisch und wirtschaftlich an den deutschen Bestandsanlagen erschließbar.

Für die in dieser Studie betrachteten fünf Hauptanlagen Sinteranlage, Hochofen inklusive Nebenanlagen, Oxygenstahlwerk mit Konverter, Stranggießanlage und Warmwalzwerk wurden die Potenziale aufsummiert. Die jeweiligen Spalten beschreiben die Abwärmeströme bezogen auf die Tonne Rohstahl fest, siehe Tabelle IV und Abbildung II.

Abbildung II: Spezifische Abwärme an den betrachteten Hauptanlagen integrierter Hüttenwerke



Eigene Darstellung, Stahlinstitut VDEh

Der erste Balken beschreibt die bilanzielle Abwärme aus den Sankeydiagrammen bezogen auf eine Umgebungstemperatur von 15 °C, was näherungsweise der durchschnittlichen Einsatztemperatur der Eingangsstoffe entspricht. Der zweite Balken beschreibt die 13 für eine eingehendere Untersuchung in dieser Studie ausgewählten Abwärmeströme. Dabei werden zum Beispiel Wärmeverluste der Prozesse durch Strahlung und Wärmeleitung bzw. Konvektion sowie die Rückkühlung in Kühlwasserkreisläufen nicht betrachtet.

Balken drei beschreibt eine minimale Prozesstemperatur der Abkühlung, welche durch den jeweiligen Produktionsprozess vorgegeben ist. Dabei werden jeweils die Mindesttemperatur im betrachteten Produktionsschritt und die Anforderungen für die nachfolgenden Schritte betrachtet. Balken vier beschreibt die noch erschließbaren Abwärmepotenziale, da ein Teil der Abwärme bereits in den integrierten Hüttenwerken ausgekoppelt und genutzt wird.

Zusammenfassend beschreibt Balken fünf, dass nach den Ergebnissen der durchgeführten Hemmnisanalyse noch 0,322 GJ/t RS_{fest} thermisch an den 13 betrachteten Abwärmequellen erschlossen werden können. Dies entspricht hochgerechnet ca. 9,45 PJ/a für die Stahlproduktion der deutschen Hüttenwerke. Des Weiteren ist aufgeführt, dass bereits 0,302 GJ/t RS_{fest} (8,86 PJ/a) an thermischer Abwärme von der Stahlindustrie weiteren Nutzungszwecken zugeführt wird bzw. bereits erschlossen ist.

Als Haupthemmnisse wurden die folgenden Punkte identifiziert:

- ▶ In den Werken existieren Bestandsanlagen mit begrenztem Raum für Installationen zusätzlicher Anlagentechnik zur Wärmeauskoppelung oder Rückgewinnung.
- ▶ Wechselnde politische Rahmenbedingungen erschweren eine Kalkulation der Wirtschaftlichkeit von Großanlagen.
- ▶ Das zeitliche Profil der an Produktionsanlagen anfallenden Abwärme ist häufig nicht deckungsgleich mit dem Bedarf möglicher externen Abnehmer.

In die Zukunft geblickt, verfolgen die integrierten Hüttenwerke in Deutschland aktuell unterschiedliche Lösungsansätze zur Minderung der CO₂-Emissionen im Stahlherstellungsprozess. Dabei spielt die effiziente Abwärmenutzung zunächst eine untergeordnete Rolle, da diese keinen großen Beitrag zur Minderung der CO₂-Emissionen im Stahlherstellungsprozess beiträgt, verglichen mit dem Klimaschutzziel von mindestens 80 % Emissionsminderung bis zum Jahr 2050.

Durch den erforderlichen Umbau der integrierten Hüttenwerke werden zum einen Anlagen wegfallen und zum anderen neue Anlagen hinzukommen. Dadurch werden sich auf längere Sicht bei der Abwärme auf der Wärme-Erzeugerseite und auf der Wärme-Abnehmerseite drastische Änderungen ergeben. Diese Änderungen betreffen die Temperaturniveaus, die Verschiebung von kontinuierlichen und diskontinuierlichen Wärmeströmen sowie die Erzeugung von Nebenprodukten (wie z. B. die Hochofenschlacke).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich die Stahlindustrie im Umbruch befindet. Ob und inwieweit Abwärmepotenziale auch über 2030 hinaus zur Verfügung stehen oder ob ggf. weitere Potenziale entstehen, muss individuell von Standort zu Standort betrachtet werden.

Eine allgemeine Aussage, insbesondere hinsichtlich von Energie- und Wärmemanagement, ist nicht möglich.

Summary

In Germany, crude steel is produced via the basic oxygen furnace (BOF) and the electric arc furnace (EAF) process routes. BOF steelmaking is based on the use of natural ores. In integrated iron and steelmaking plants these ores are first processed into hot metal in blast furnaces and in a subsequent step into crude steel in the BOF meltshop. In 2015, approx. 30 million t of crude steel or 70.4% of the entire crude steel output in Germany were produced via the “blast furnace route”.

Steel production is very energy-intensive last but not least due to the extremely high process temperatures of more than 1,700°C it requires. For this reason alone, steel producers have always strived to reduce energy consumption by making maximum use of the input energy and the generated waste heat, and exploiting the “residual energy” of the iron and steelworks as best as possible.

In addition to intermediate products, process gases arise along the steelmaking route in integrated iron and steelworks. These include coke oven gas, blast furnace gas and converter gas. The energy flows of these gases can be almost completely used within the works (inclusive the power plants) thanks to the ongoing optimization of the continuously or discontinuously operating plants. The process gases are used as a substitute for natural gas, e.g. to heat the hot blast stoves of the blast furnaces, as fuel for the underfiring of coke ovens, for heating furnaces in the rolling mills and for electricity generation in power plants operated by the steelworks. All these measures contribute to minimizing the amount of procured natural gas. As integrated iron and steelworks cover most of their electricity requirements internally via the use of process gases for the production of electricity, their dependence on external electricity supplies is very low.

Iron and steelworks also feature integrated networks for the use of process steam because waste heat can also be transferred into useable energy by conversion into steam. Within the networks the steam is distributed from steam producing locations to steam consuming locations. In order to maximize the use of exergy, the steam is often available in several different pressure stages.

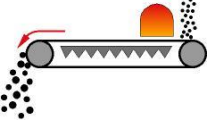
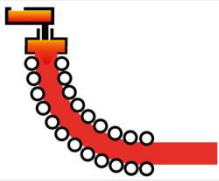
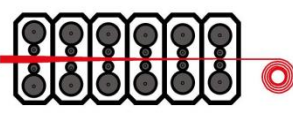
The objective of this project was to determine the potentials provided by the use of waste heat in integrated iron and steelworks. For this purpose, the process chain in integrated iron and steelworks from hot metal and steel production down to the rolling mills was illustrated and described based on energy balances of the main production areas and their relevant ancillary facilities. The aim was not to collect specific data in individual works, but to provide a conclusive description and analysis of waste heat flows on average for the main facilities of the German integrated iron and steelworks.

The main production areas are the coking plant, the sinter plant, the blast furnace plant, the steel meltshop, the continuous casting plant and the hot rolling mill. For time and cost reasons, the coking plant was not part of the study. Therefore it is not included in Table 1.

Energy balances were calculated for the above-mentioned main production areas of integrated iron and steelworks down to the hot rolling mills. Facilities downstream of the hot rolling mills, e.g. cold rolling mills, surface finishing lines such as galvanizing lines, and other further processing facilities, were outside the scope of this project. Included, however, were ancillary facilities of energetic relevance, such as slag granulation plants.

Integrated iron and steelworks in Germany feature very different set-ups. Same plant types use different processes. This study was limited to examining not more than two of the most relevant process variants for each plant type.

Table 1: Investigated main production areas of integrated iron and steelworks and their respective production outputs in 2015

symbol	facility	product	annual production of German steel mills in 2015
	sinter plant	sinter	26.405.272 t
	blast furnace	hot metal	27.583.029 t
	basic oxygen furnace	crude steel (liquid)	30.053.873 t
	continuous casting plant	crude steel (solid)	29.347.607 t
	hot rolling mill	hot strip	21.300.000 t

In integrated iron and steelworks the heat input for the respective processes generally is based on the combustion of solid fuels and/or natural gas, and the use of process gases from steelmaking. In the processes, waste heat is available, for example, as

- ▶ sensitive heat in flue gases, cooling water, products and by-products,
- ▶ latent heat in not yet completely cooled products and by-products.

Table 2 sets out strategies available to exploit the potentials of waste heat in internal and/or external processes and to reduce the loss of waste heat arising in steel production processes.

The assessment of the available waste heat potential starts out from typical energy balances of the processes applied in the main production areas of hot metal and steel making in German integrated iron and steelworks. Location- and site-specific differences between the companies are taken into account in the balance calculation by averaging the acquired data and in the presentation of the respective processes. Process data and waste heat potentials identified in this study do not describe an existing integrated iron and steel works, they are to be understood as average values for the different plants in Germany. Upstream processes and transports as well as cokemaking facilities are not part of the examination for the reasons outlined above.

Table 2: Strategies aimed at reducing waste heat losses in the steel industry (examples)

strategy	examples of measures applied in integrated works
process optimization	avoiding waste heat
use of waste heat within the process	preheating of input materials scrap, slabs preheating of process media combustion air, combustion gas, PCI coal steam generation heat accumulators
use of waste heat within the plant	preheating of input materials sinter, scrap, slabs preheating of process media combustion air, combustion gas, PCI coal steam generation heat accumulators
conversion of waste heat into other forms of energy	electricity generation steam turbine (power plant), ORC, TEG cooling absorption refrigeration systems adsorption refrigeration systems
external use of waste heat	district heating hot water, steam

The processes are illustrated by way of

- ▶ an energy balance in tabular form giving the input and output quantities, and
- ▶ a Sankey diagram of the energy flows including the indication of potentials for waste heat usage.

Balance entities have been defined around the examined main production units. Some of these balance entities have been subdivided into process steps or ancillary facilities. In this case, separate balances have been calculated for each of the ancillary facilities and summed up to the total balance.

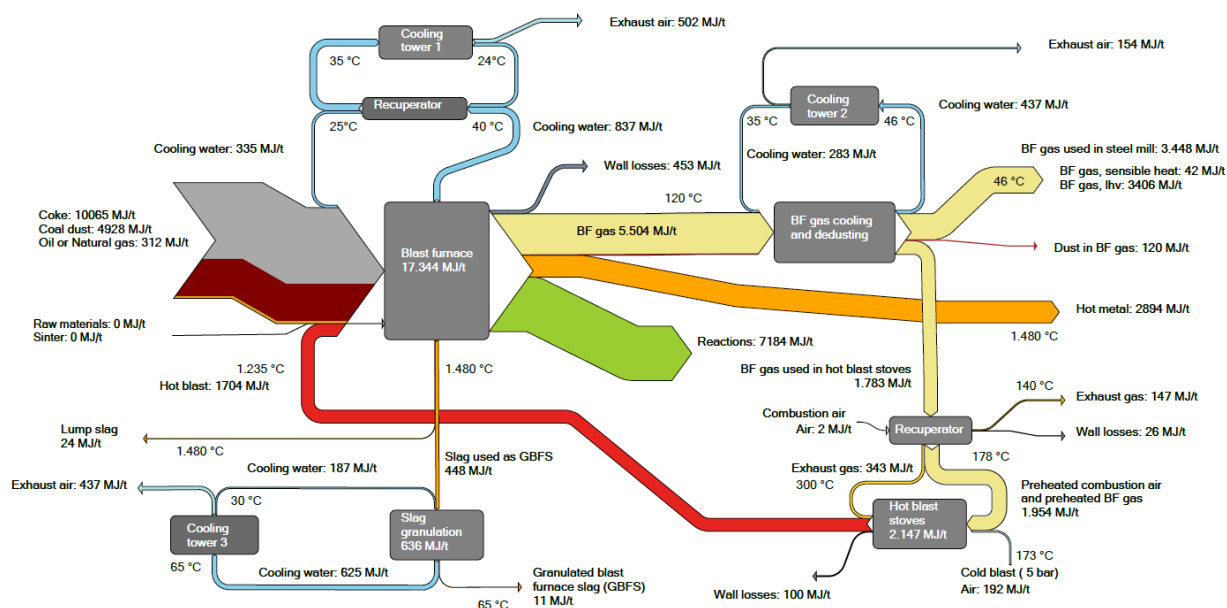
The data for the balance entities of the plants was provided by Steel Institute VDEh. The data is based on statistics and technical documentations compiled by Steel Institute VDEh as well as national and international publications on iron and steelmaking. Interviews with experts in the iron and steelworks provided additional information to the study.

Statistical data based on which it would have been possible to itemize the energy output in the energy balances is not available in the German steel industry. Therefore the corresponding data was determined to the best of our knowledge based on process know-how, the correlations between the processes of heat transfer, thermodynamics and metallurgical plant technology as well as the inherent logic of balances.

As an example, Figure 1 shows the energy balance of a blast furnace complete with its associated ancillary facilities.

The energy inputs in a blast furnace plant come from the fuel energy of the reduction agents coke, coal, oil and gas. Additionally, hot blast is fed into the blast furnace. The hot blast is produced in hot blast stoves fired by fuel gases.

Figure 1: Energy flow chart of a blast furnace and its ancillary facilities (quantities per t_{HM})



Own figure, Steel Institute VDEh

The energy outputs of the blast furnace originate primarily from the chemical reactions in the blast furnace. In the above example, an endothermal reaction enthalpy is required for the reduction of the hot metal, and additional energy is needed for the reduction of the ancillary elements Si, Mn, P and Ti dissolved in the hot metal.

The main energy outputs of the blast furnace are the molten products hot metal and slag as well as the blast furnace top gas.

For this study, energy balances were set up for the sinter plant, the blast furnace plant, the BOF meltshop, the continuous casting plant and the hot rolling mill.

From the determined waste heat flows, 13 individual flows were seen as theoretically usable and have been evaluated to allow a more detailed analysis. The potentials calculated for these individual flows have been listed in detail in Table 3. The individual potentials were summed up to represent the five main production units examined in this study, namely the sinter plant, the blast furnace including its associated ancillary facilities, the BOF meltshop, the continuous casting plant and the hot rolling mill. The respective results are given in Table 4.

Detailed analyses were performed on the basis of the 13 identified waste heat flows. Additionally, factors that may influence the use and possible ways of usage were discussed. Influencing factors considered included - in addition to aspects of technological nature (temperature level, conveying medium, pressure level, contamination as well as flexibility of design, scalability, controllability) - the efficiency of an identified measure as well as the political, social and organizational conditions relevant for its implementation.

The impediments to the use of the various technologies of waste heat usage and the respective influencing factors were categorized and described. The results for the integrated iron and steelworks in Germany derived from the evaluation are given in Table 4 and visualized in Figure 2.

Table 3: Overview of the determined potentials of waste heat usage

	sum of annual production of German integrated iron and steel mills		¹ identified waste heat, reference temperature 15°C	² referred to the minimum permissible process temperature	³ already exploited	remaining waste heat	⁴ waste heat suitable for operational use		usable temperature gradient	medium	remarks	
	t / year		GJ / year	GJ / year	%	GJ / year	%	GJ / year	K			
flue of sinter belt (before gas purification)	26.405.272	sinter (Si)	8.366.468	1.720.208	29	1.221.040	75	915.780	22	flue	abrasive at low temperature	
exhaust air of sinter cooler	26.405.272	sinter (Si)	5.536.520	4.208.273	11	3.724.898	75	2.793.673	110	exhaust air	abrasive and corrosive conditions	
flue of hot blast stove	27.583.029	hot metal (hm)	9.460.979	6.758.267	58	2.810.247	50	1.405.123	200	flue	at some plants is the necessary construction volume not available	
slag of blast furnace	27.583.029	hot metal (hm)	12.357.197	12.062.391	0	12.062.391	0	0	1.430	slag	no known technology for large-scale implementation	
granulating water of slag granulation	27.583.029	hot metal (hm)	12.081.367	5.171.071	0	5.171.071	0	0	15	waste water	abrasive at low temperature; unusable	
flue of torch at BOF	22.477.587	crude steel (CS _{liquid})	876.626	800.978	0	800.978	0	0	950	flue	transient, maximum few minutes per hour; unusable	
slag of BOF	30.053.873	crude steel (CS _{liquid})	7.333.145	7.180.371	0	7.180.371	0	0	1.645	slag	no known technology for large-scale implementation	
flue of BOF without / with gas production:	w/o	7.576.286	crude steel	2.144.089	1.290.274	0	1.290.274	0	500	flue	only usable for new plants	
	with	22.477.587	(CS _{liquid})	2.697.310	1.591.311	20	1.278.671	0	500	flue		
vapours of secondary cooling at continuous casting plant	29.347.607	crude steel (CS _{solid})	11.240.133	7.823.241	0	7.823.241	0	0	15	vapours	diffuse and transient flow at low temperature; unusable	
slab cooling at continuous casting plant after flame-cutting machine	29.347.607	crude steel (CS _{solid})	18.899.859	6.272.035	30	4.415.825	65	2.882.810	494	slab	low heat flux density; influence on product quality (partly positive, partly negative)	
flue of reheating furnace after steam boiler	21.300.000	hot strip (hs)	4.110.900	1.740.721	39	1.056.563	100	1.056.563	120	flue	usable	
cooling water of load-bearing structure at hot rolling mill	cold	15.176.258	hot strip	1.851.503	925.752	55	419.862	25	104.965	35	water	partly temperature too low
	hot	6.123.742	(hs)	747.097	747.097	100	0	100	0	steam	partly up to medium-pressure steam	
residual heat of hot rolled strip	21.300.000	hot strip (hs)	6.283.500	5.863.038	0	5.863.038	5	293.152	450	coil	low heat flux density, thus long process time and large warehouse	

¹ waste heat in the energy balance, reference temperature 15°C (technically not feasible)

² referred to the minimum permissible process temperature; waste gas: 100°C with natural gas, 180°C with coke oven gas, 400°C with O₂ deficit; otherwise: 50°C

³ already used at individual plants

⁴ suitable for operational use: under the current circumstances, these identified potentials can be tapped from the existing iron and steel works in a technically, organizationally and economically feasible way

Table 4: Waste heat from the examined main production areas per t of solid crude steel (CSsolid)

⁰ : total waste heat ^{1...4} : quantities identified for recovery	⁰ waste heat in the energy balance, reference temp. 15°C	¹ selected waste heat flows, reference temp. 15°C	² waste heat potential at minimal process temp.	³ remaining waste heat potential	⁴ waste heat potential suitable for operational use
	GJ / t CSsolid	GJ / t CSsolid	GJ / t CSsolid	GJ / t CSsolid	GJ / t CSsolid
sinter plant	0.928	0.474	0.202	0.169	0.126
blast furnace	3.006	0.739	0.524	0.389	0.048
converter (BOF)	2.165	0.445	0.370	0.359	0.000
continuous casting plant	1.253	1.027	0.480	0.417	0.098
hot rolling mill	1.112	0.443	0.316	0.250	0.050
total	8.463	3.127	1,892	1.585	0.322

⁰ total sum of waste heat in the energy balance, reference temp. 15°C

¹ waste heat in the energy balance of the heat flows identified for waste heat recoverys, reference temp. 15°C.

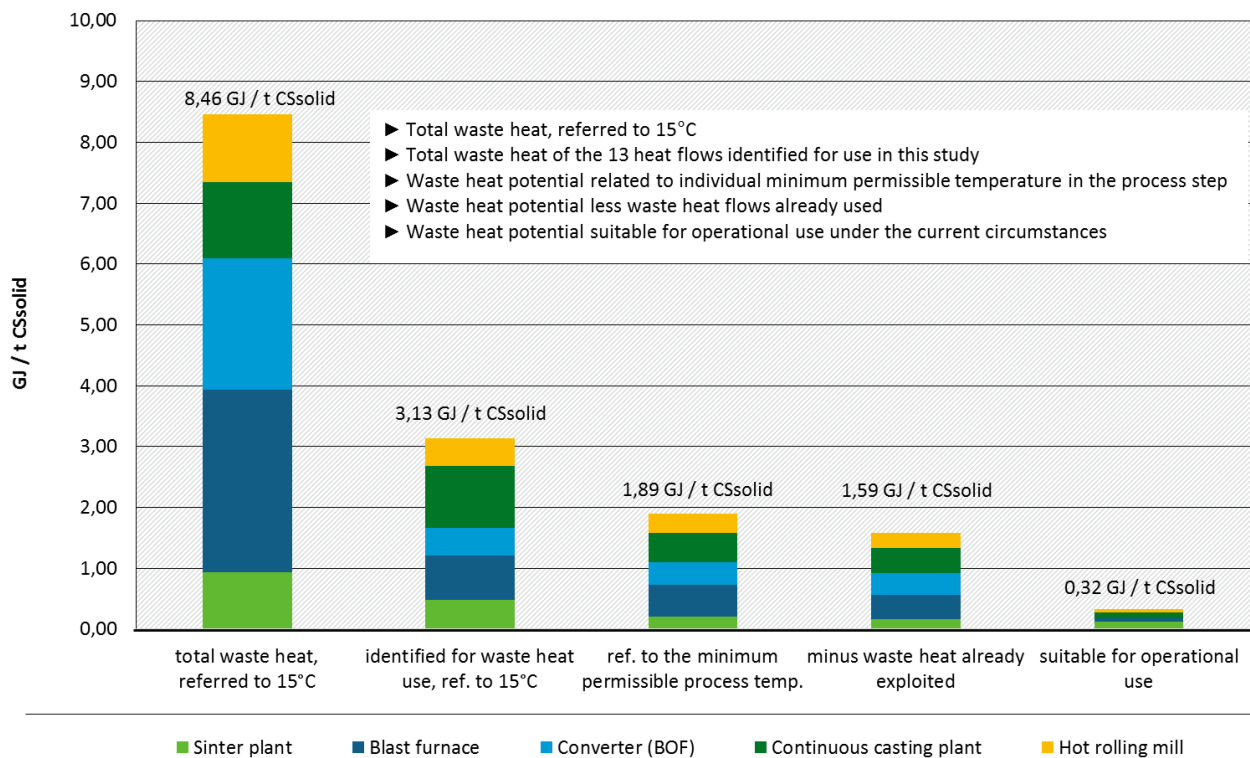
² waste heat of previous column, now referred to the minimum permissible process temperature applicable in each individual case; waste gas: 100°C with natural gas, 180°C with coke oven gas, 400°C with O₂ deficit; otherwise: 50°C (not usable otherwise, for example, due to wear-, corrosion- and safety-related reasons).

³ waste heat of previous column, now minus the waste gas flows already exploited in the works.

⁴ waste heat of previous column, now minus amount of not suitable for operational use: under the current circumstances, these identified potentials can be tapped from the existing German iron and steelworks in a technically, organizationally and economically feasible way.

Figure 2: Waste heat from the examined main production areas per t of solid crude steel (CSsolid)

Waste heat of the regarded main plants referred to one ton of solid crude steel



Own figure, Steel Institute VDEh

The first column in the figure represents the waste heat in the energy balance shown in the Sankey diagrams and referred to an ambient temperature of 15°C. This temperature corresponds approximately to the average temperature of the input materials. The second column gives the selected 13 waste heat flows examined in this study. Not considered have been heat losses due to radiation, heat conduction and convection during the processes as well as due to recooling in cooling water circuits.

Column three represents the waste heat potential at minimum process temperature. This temperature depends on the respective production process. Here both the respective minimum temperature of the examined production stage and the requirements for the downstream stages have been taken into consideration. Column four shows the potentially remaining exploitable waste heat, given the measures already in place in German integrated iron and steelworks for internal and external uses of waste heat.

In conclusion, column five shows that, considering the influencing factors, for the examined 13 waste heat sources there is still an exploitable thermal potential of 0.322 GJ/t CSsolid or approx. 9.45 PJ/a for steel production of the German integrated iron and steelworks. On the other hand, it can also be derived from the plot that 0.302 GJ/t CSsolid (8.86 PJ/a) of waste heat is already being recovered and actively used.

The main impediments to heat waste usage were identified to be the following issues:

- ▶ The facilities existing in the works provide only limited space for the installation of additional heat decoupling or heat recovery technology.
- ▶ Lack of stability in political decision-making makes it difficult to calculate the economic efficiency of large-scale production plants.
- ▶ The time profile of the waste heat arising in the production plants often does not overlap with the demand by potential external consumers.

With a view to the future, the integrated iron and steelworks in Germany are adopting different strategies to reduce the CO₂ footprint of steelmaking. Here waste heat use is of minor importance because it will not substantially contribute to meet the imposed climate protection goal of the steelworks, compared to CO₂ reduction target of 80% up to 2050.

In the wake of the required modifications to take place in the iron and steelworks, certain plants will disappear and new plants will be added. This will result, in the long run, in dramatic changes in the waste heat situation on both the heat producing and the heat consuming side. These changes will come in the form of changing temperature levels, result in a shifting of continuous and non-continuous heat flows and affect the production of by-products (such as blast furnace slag).

In summary one can say that the steel industry is going through a phase of radical change. Only by analyzing the specifics of each individual steelmaking location will it be possible to predict whether and to which degree waste heat potential will continue to exist beyond 2030 or whether new potentials will become available.

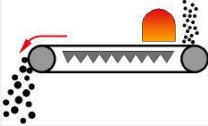
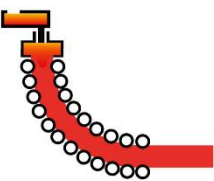
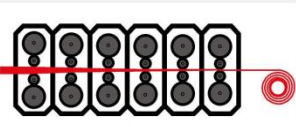
It is impossible to make a general statement, especially not regarding the energy and heat management in iron and steelworks.

1 Aufgabenstellung

In dem vorliegenden Projekt werden die Potenziale zur Nutzung von Abwärme integrierter Hüttenwerke in Deutschland ermittelt. Dafür wird die Prozesskette der Roheisen- und Stahlherstellung bis zum Walzstahl in einem integrierten Hüttenwerk beispielhaft dargestellt und mit Energiebilanzen des jeweiligen Verfahrens der Hauptaggregate inklusive relevanter Nebenanlagen beschrieben. Im Vordergrund steht dabei eine schlüssige Verfahrensbeschreibung für die Hauptanlagen eines integrierten Hüttenwerks, jedoch nicht die spezielle Datenerhebung in einzelnen Werken der Industrie.

Die Hauptanlagen integrierter Hüttenwerke sind die Kokerei, die Sinteranlage, der Hochofen, das Stahlwerk, die Stranggießanlage und das Warmwalzwerk. In der Studie wird die Kokerei aus Zeit- und Kostengründen nicht betrachtet, weshalb sie in Tabelle 1 nicht enthalten ist.

Tabelle 1: Betrachtete Hauptanlagen integrierter Hüttenwerke und deren Produkte

Piktogramm	Anlage	Produkt	Jahresproduktion der deutschen Hüttenwerke in 2015
	Sinteranlage	Sinter	26.405.272 t
	Hochofen	Roheisen	27.583.029 t
	Oxygenstahlwerk	Rohstahl flüssig	30.053.873 t
	Stranggießanlage	Rohstahl fest	29.347.607 t
	Warmwalzwerk	Warmband	21.300.000 t

Im Rahmen dieses Projekts werden die Hauptanlagen des integrierten Hüttenwerks bis zur Herstellung von Warmwalzstahl beispielhaft energetisch bilanziert. Dem Warmwalzwerk nachgeschaltete Anlagen wie Kaltwalzwerk, Oberflächenveredelungsanlagen wie Verzinkungsanlagen sowie andere Weiterverarbeitungsanlagen werden nicht betrachtet. Energetisch relevante Nebenanlagen wie z. B. die Granulationsanlage zur Herstellung von **Hüttensand** werden berücksichtigt.

Der Aufbau der integrierten Hüttenwerke in Deutschland ist sehr unterschiedlich. Bei gleichen Anlagentypen kommen verschiedene Verfahren zur Anwendung. In der vorliegenden Studie werden maximal zwei besonders relevante Verfahrensvarianten des gleichen Anlagentyps betrachtet.

Die Beschreibung und Erläuterung von Technologien in dieser Studie erfolgt immer mit Blick auf das Ziel, Abwärmenutzungspotenziale in integrierten Hütten der Stahlindustrie zu untersuchen. Daher erheben die Darstellungen keinen Anspruch auf Vollständigkeit für andere Anwendungsgebiete. Stattdessen werden lediglich die Sachverhalte umrissen, die für das Verständnis der später dargestellten Abwärmenutzungspotenziale von Bedeutung sind.

2 Anlagentechnik des integrierten Hüttenwerks

In den integrierten Hüttenwerke in Deutschland werden Koks, Sinter, Roheisen und Rohstahl in den Anlagen der jeweiligen Prozessstufe erzeugt. Die Anzahl der Anlagen und die entsprechenden Produktionskapazitäten sind in Tabelle 2 aufgetragen.

Tabelle 2: Angaben zu Anlagen und Produktionsdaten integrierter Hüttenwerke in Deutschland im Jahr 2015 (Wirtschaftsvereinigung_Stahl, 2017)

Produkt	Hauptanlage	Anlagenanzahl	Produktion in Mio. t/a
Koks	Kokerei	8 Batterien	7,7
Sinter	Sinteranlage	9	31,3
Roheisen	Hochofen	17	27,8
Rohstahl flüssig	Konverter	21	30,7
Rohstahl fest	Stranggießanlage	16	30,1
Warmband	Warmwalzanlage	7	≈ 21,3 *

* Die Angabe zu **Warmband**-Erzeugnissen innerhalb der integrierten Hüttenwerke wird statistisch nicht einzeln erfasst. Deshalb hier abgeschätzte Angabe unter Einbeziehung des Stahlinstitut-VDEh-Expertenwissens. Angabe für Gesamtdeutschland 21,3 Mio. t/a für 2015 (Wirtschaftsvereinigung_Stahl, 2017).

2.1 Sinteranlage

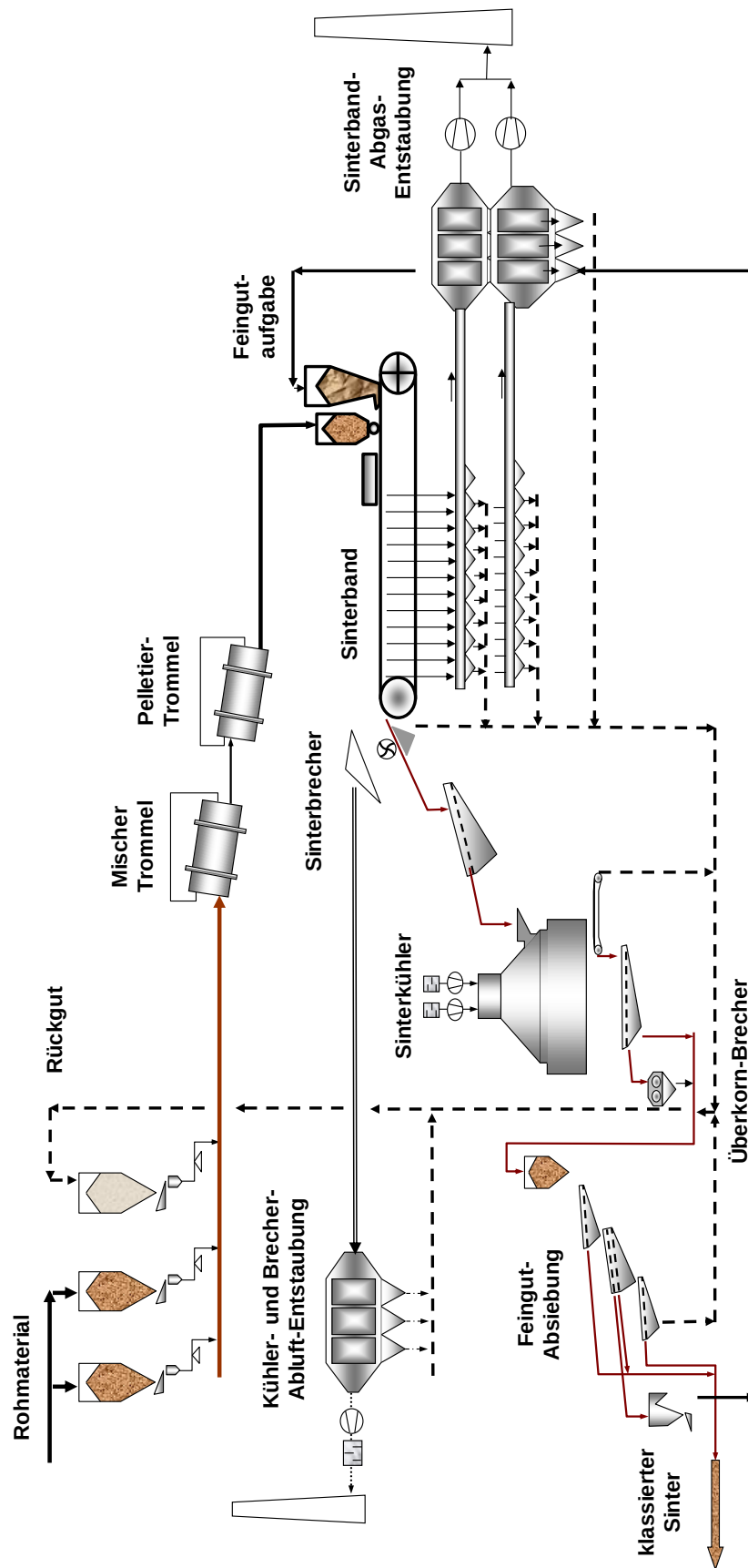
Die bei der Aufbereitung der Eisenerze bei den Eisenerzminen anfallenden Feinerze, Konzentrate und sogenanntes Pelletfeed müssen für eine Verwendung im Hochofen „stückig gemacht“ werden. Die wichtigsten Verfahren hierfür sind das Sintern und das Pelletieren. In Deutschland verfügen alle integrierten Hüttenwerke über eine oder mehrere Sinteranlagen, um das Feinerz durch Sintern stückig zu machen. Pellets werden in der Regel direkt bei den Eisenerzproduzenten hergestellt. In Deutschland werden keine Anlagen zur Herstellung von Eisenerzpellets betrieben.

Sinteranlagen benötigen meist relativ große Betriebsflächen. Die Herstellung der Eisenerz-Mischung erfolgt heute i.d.R. mit Mischbetten, in denen Erze unterschiedlicher Provenienz zu einem Erzgemisch homogenisiert werden.

Für das Sinterverfahren werden Erze der Kornklasse x mit $0,2 < x < 6,3$ mm eingesetzt. Feinstkonzentrate mit Korngrößen $< 0,2$ mm müssen pelletiert werden (Autorenkollektiv, Stahlfibel, 2015).

Sinteranlagen (siehe Abbildung 1) sind im Allgemeinen unmittelbar den Hochofenwerken zugeordnet. Der Anteil agglomerierter Erzmöllerstoffe am Hochofeneinsatz liegt heute i. d. R. zwischen 80 und 100 %, der Rest ist Stückerz.

Abbildung 1: Sinteranlage



Quelle: (Knoop, 2017)

Die Sinterung wird auf Bandsinteranlagen durchgeführt, die mehr als 4 m breit und bis zu 100 m lang sein können. Für die Sinterung wird Rohmaterial, eine Mischung aus angefeuchtetem Feinerz zusammen mit Koksgrus, den Zuschlägen wie Kalkstein, Branntkalk, Olivin oder Dolomit, Kreislaufmaterialien und Rückgut (abgesiebter Feinsinter, der für den Einsatz im Hochofen ungeeignet ist) in einer Mischertrommel gemischt, anschließend in der Pelletiertrommel agglomeriert und auf ein umlaufendes Rost, das Sinterband, gegeben und von oben gezündet. Der in der Oberfläche der Mischung enthaltene feste Brennstoff (in der Regel Koksgrus oder Anthrazit) wird in einem Zündofen mit Gas gezündet und damit der Sintervorgang eingeleitet. Durch Anlegen eines Unterdruckes unter dem Rost wird gleichzeitig ein Gas- bzw. Luftstrom von oben nach unten durch die Mischung gesaugt. Die in der oberen Sinterschicht freigesetzte Wärme, die zum Zusammenbacken der Mischung führt, wird mit dem Gasstrom in die tiefergelegenen Schichten geführt und zündet den dort enthaltenen festen Brennstoff. Die oberste Zone des Sinters wird nach Verlassen des Zündofens durch die angesaugte Kaltluft abgekühlt. Dabei heizt sich die Luft auf und dient sowohl als Sauerstofflieferant und auch als Wärmeübertragungsmittel für die unteren Schichten. Während des Transportes auf dem Sinterband wird die gesamte Schicht von oben nach unten gesintert. Das Sinterbandabgas wird einer Entstaubung zugeführt.

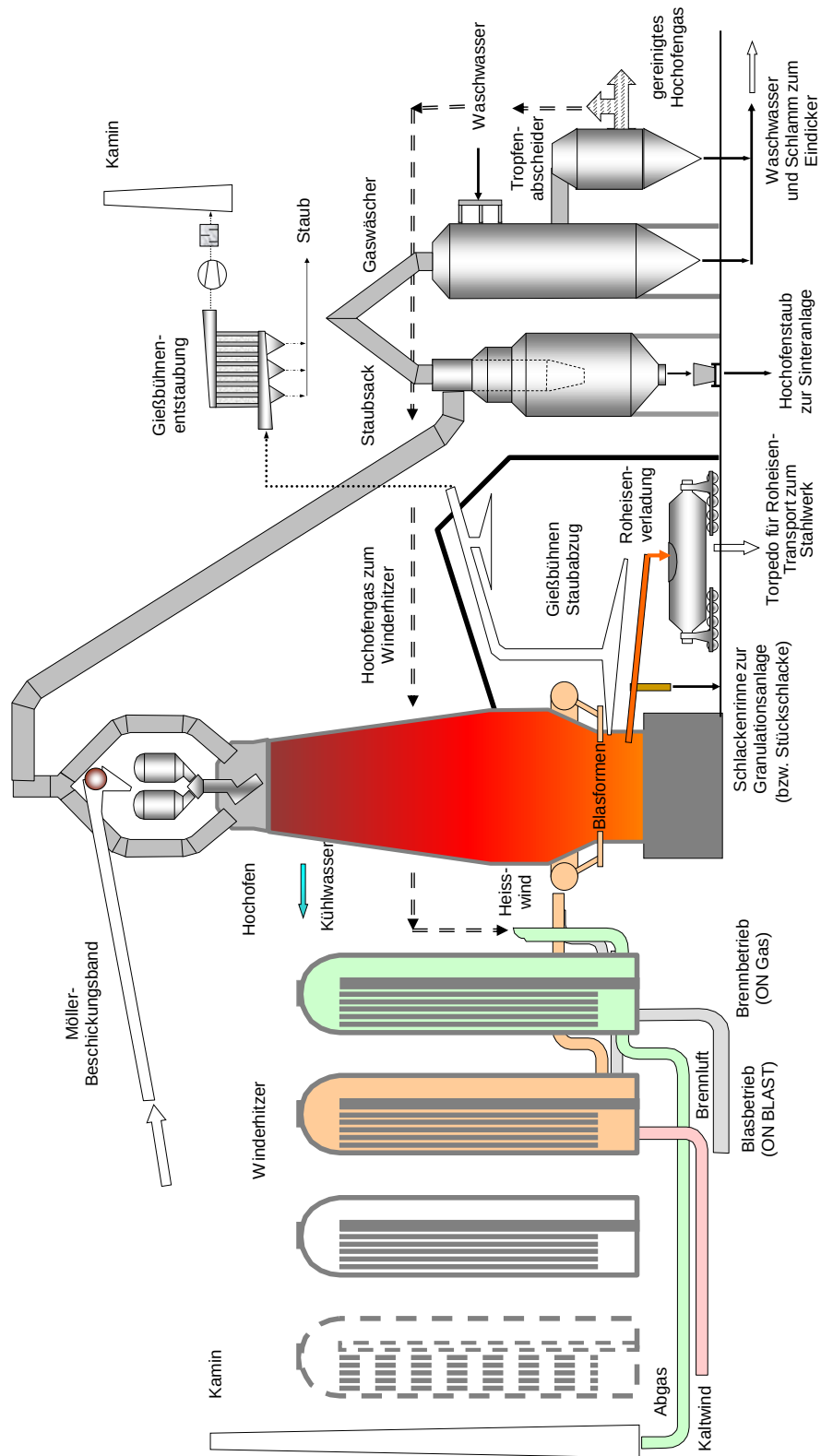
Das so entstandene Agglomerat wird beim Umlenken des Rostes abgeworfen, durch einen Sinterbrecher grob gebrochen und von der Aufgabevorrichtung nach dem Absieben feinsten Bestandteile dem Sinterkühler zugeführt. Der glühende Sinter wird mit definiertem Gradienten gekühlt, sodass seine Festigkeit nicht beeinträchtigt wird. Die abgesiebten Feinanteile werden der Sintermischung als Rückgut wieder zugeführt. Anschließend ist der klassierte Sinter wegen seiner großen Gasdurchlässigkeit und guten Reduzierbarkeit zum direkten Einsatz im Hochofen geeignet.

2.2 Hochofen inkl. Nebenanlagen

Der Hochofen ist eine großtechnische Anlage zur Herstellung von Roheisen. Im Hochofen wird aufbereitetes Eisenerz (Stückerz, Sinter und Pellets) zusammen mit Zuschlägen und Koks in einem kontinuierlichen Prozess zu Roheisen reduziert und geschmolzen. Abbildung 2 zeigt eine schematische Darstellung einer Hochofenanlage mit Nebenanlagen. Der Hochofen wird nach dem Gegenstromprinzip betrieben, bei dem die festen Einsatzstoffe von oben nach unten im Gegenstrom zu den gasförmigen Reaktionsprodukten strömen.

Die Einsatzstoffe werden in bestimmten Korngrößen verwendet, um eine optimale Durchgasung der Schüttgutsäule zu erreichen. Im unteren Teil des Hochofens wird **Heißwind** eingeblasen. Über die wassergekühlten **Blasformen (Tuyere)** können zusätzliche Reduktionsmittel, wie beispielsweise Kohlenstaub, Öl oder Erdgas, eingeblasen werden. Aus der Reaktion von Heißwind und Koks sowie den Ersatzreduktionsmitteln entsteht Kohlenmonoxid, welches das Eisenerz reduziert. Der Koks hat mehrere Funktionen. Er liefert die Reduktionsgase und durch die freigesetzte Reaktionswärme die notwendige Energie zur Erhitzung und Aufschmelzung der Erze und Zuschlagstoffe. Darüber hinaus dient der Koks als Stützgerüst und Durchgasungssystem. Die Produkte des Hochofens sind flüssiges Roheisen und **Schlacke** sowie Hochofengas und Hochofenstaub. Aufgrund der hohen Prozesstemperatur muss der äußere Stahlmantel (Panzer) des Hochofens mittels Wasser gekühlt werden.

Abbildung 2: Hochofenanlage mit Nebenanlagen



Quelle: (Knoop, 2017)

Winderhitzer

Winderhitzer dienen dazu, den Heißwind für den Hochofenprozess bereitzustellen. Vom Funktionsprinzip her sind Winderhitzer Regeneratoren mit ortsfester Speichermasse. Winderhitzer sind stahlummantelte Zylinder, die neben den Hochöfen stehen. Sie sind mit feuerfesten Silikatsteinen gitterartig ausgekleidet. Winderhitzer haben zwei Betriebsphasen, die Aufheizphase und die Windphase. Aufheizen und Windblasen sind diskontinuierliche Prozesse mit einer Zyklusdauer von bis zu 60 bzw. 120 Minuten. Während ein Winderhitzer den Hochofen mit Heißwind versorgt, werden die anderen aufgeheizt. Es werden üblicherweise drei Winderhitzer pro Hochofen eingesetzt. Durch Vermischen von Heißwind mit geringer Menge Kaltwind vom Verdichter kann während der Windphase die Temperatur auf einen nahezu konstanten Wert geregelt werden.

In der Aufheizphase wird z. B. Hochofengas aus dem Hochofen mit Erdgas oder anderen Kuppelgasen gemischt, als Brennstoff von unten in die Winderhitzer eingespeist und unter Luftzufuhr verbrannt. Hierbei heizt sich das keramische Gitterwerk bis auf eine Temperatur von ca. 1.350 °C in der Kuppel auf. Das Abgas verlässt den Winderhitzer am kalten Ende des Gitterwerkes mit ca. 300 °C. Mit Wärmeübertragern wird dort ein Teil der Abgasenthalpie zurückgewonnen und zur Gasvorwärmung prozessintern oder zur Thermoölvorwärmung im externen Thermoölprozess genutzt.

In der Windblasphase wird anschließend verdichteter Kaltwind mit einem Überdruck von bis zu 4 bar in den Winderhitzer eingeblasen, um Heißwind mit bis zu 1.300 °C zu erzeugen. Der Heißwind wird vom Winderhitzer über eine Heißwindringleitung durch Blasformen in den unteren Teil des Hochofens eingeblasen. Um ausreichend hohe Temperaturen des Heißwindes erzeugen zu können, wird die Brennluft und/oder das Hochofengas durch Nutzung der Abwärme in den Winderhitzern durch Wärmeübertrager vorgewärmt. Ist dies nicht möglich, wird ggf. eine Zumischung eines heizwertstärkeren Brenngases wie z. B. Koksofengas oder Erdgas benötigt, um eine ausreichend hohe Heizleistung zu erreichen.

Hochofen zur Roheisenerzeugung

Der **Möller** (Gemisch aus Erzen und Zuschlägen) und der Koks werden schichtweise von oben über das Möllerbeschickungsband in den Hochofen gegeben, siehe Abbildung 2.

Die im Hochofen ablaufenden Prozesse lassen sich in verschiedene Temperaturzonen aufteilen. In jeder Zone laufen unterschiedliche Reaktionen ab. Die Temperatur steigt von der Zugabestelle bis zu den Blasformen durch exotherme Zersetzung des Kokes und durch die sensible Wärme des Heißwindes an. Dabei werden die Feuchtigkeit und das Hydratwasser aus den Einsatzstoffen ausgetrieben. Die oxidischen Eisenträger werden zu metallischem Eisen reduziert, aufgekohlt und geschmolzen. Die Begleitelemente, wie z. B. Siliziumoxid, reagieren ebenfalls, werden geschmolzen und bilden zusammen mit den Zuschlagstoffen eine Schlacke.

Die höchsten Temperaturen werden in der Zone vor den Blasformen erreicht. Dieser Bereich wird als Wirbelzone bezeichnet. Durch die exotherme Reaktion von Kohlenstoff und Sauerstoff liegen hier Temperaturen von bis zu 2200 °C vor. Zur Erreichung dieser hohen Temperatur wird dem Heißwind im Winderhitzer oder an der Blasform reiner Sauerstoff zugegeben. Auf Grund des Boudouard-Gleichgewichts setzt sich das entstehende Kohlendioxid (CO₂) endotherm zu Kohlenmonoxid (CO) um. Das CO reduziert die Erze und wird dabei zu CO₂ oxidiert. Die heißen Gase steigen auf und geben dabei im Gegenstrom ihre Wärme zu einem großen Teil an den von oben herabfallenden Möller ab. Das Hochofengas verlässt den Hochofen mit etwa 90 °C – 150 °C. Es besitzt allgemein folgende Zusammensetzung: 20 – 25 Vol.-% CO, 20 – 25 Vol.-% CO₂, 2 – 4 Vol.-% H₂ und 46 – 58 Vol.-% N₂. (Autorenkollektiv, Stahlbibel, 2015),

Die Schlacke bindet unerwünschte Begleitelemente. Im Gestell des Hochofens sammeln sich das flüssige Roheisen und die flüssige Schlacke. Die Schlacke schwimmt auf Grund der geringeren Dichte auf dem Roheisen. Das Roheisen und die Schlacke werden bei einer Temperatur von ca. 1.500 °C „abgesto-

chen“. Der Transport des heißen flüssigen Roheisens zur Weiterverarbeitung wird mit Torpedopfan-
nenwagen und/oder kübelartigen Transportpfannen durchgeführt. Die Schlacke wird flüssig abge-
kippt oder einer Schlackengranulationsanlage zugeführt.

Schlackengranulationsanlage

In integrierten Hüttenwerken fallen rund 230 – 300 kg Schlacke pro Tonne erzeugtem Roheisen als
Nebenprodukt an. Sie wird zusammen mit dem Roheisen über ein Stichloch bei einer Temperatur von
ca. 1.460 – 1.500 °C abgestochen. Die flüssige Schlacke wird in der Abstichrinne vom flüssigen Rohei-
sen getrennt. Ein Abstich bei kleineren Hochöfen erfolgt in der Regel nach 1 bis 1,5 Stunden, an größe-
ren Hochöfen kann auch an mehreren Abstichlöchern zeitversetzt, laufend abgestochen werden.

Damit die Hochofenschlacke ihre hydraulischen Eigenschaften für eine spätere Nutzung als Roh- oder
Baustoff erhält, muss sie äußerst schnell gekühlt werden und als „Glas“ erstarren. Dies wird in Granu-
lationsanlagen durch Abschrecken der flüssigen Schlacke mit Wasser erzielt. Dabei entstehen glasige
Strukturen, der sogenannte Hüttensand. Der Einsatz dieses Sandes führt beispielsweise bei der Ze-
mentherstellung zu einer deutlichen Absenkung des dortigen CO₂-Ausstoßes.

Der Vorgang der Granulation beginnt mit der Einleitung der flüssigen Schlacke in die Granulierstation.
Durch Eindüsen von Wasser und die damit verbundene schlagartige Abkühlung wird die Schlacke gra-
nuliert. Der gesamte bei der Granulation entstehende Dampf wird anschließend in der Kondensiersta-
tion kondensiert und zusammen mit dem überschüssigen eingedüsten Wasser gesammelt.

Das abrasiv wirkende Hüttensand-Wasser-Gemisch wird danach durch unterschiedliche Verfahren,
wie z. B. Siebtrommeln oder Entwässerungssilos, von dem Granulierwasser getrennt.

Der kondensierte Dampf und das aus dem Hüttensand-Wasser-Gemisch abgetrennte Wasser werden
zusammengeführt, in Kühlanlagen rückgekühlt und anschließend erneut als kaltes Granulierwasser
verwendet.

Die wasserfreie Trockengranulation wird seit Jahrzehnten untersucht. Damit wäre eine Wärmerück-
gewinnung aus der heißen Schlacke theoretisch möglich. Ein Beispiel (in der Entwicklung) ist das "Ro-
tating-Cup"-Verfahren, bei dem die schmelzflüssige Schlacke auf einen sich schnell drehenden Teller
aufgebracht und in kleine Tröpfchen zerrissen wird. Bisher konnte jedoch noch keine großtechnisch
einsetzbare Technik zur Trockengranulation entwickelt werden. Die bekannten Techniken eignen sich
lediglich für deutlich kleinere Massenströme, als sie in der Sinteranlage anfallen. Eine großtechnische
Nutzung der Wärme aus der heißen Schlacke ist derzeit nicht absehbar.

Hochhofengasaufbereitung und -nutzung

Das Hochhofengas muss entstaubt und gereinigt werden, um die Staubemission zu minimieren und die
mit Hochhofengas betriebenen Anlagen, wie Brenner, Gasmotoren und Turbinen, vor Schäden durch
Abrasion zu schützen. Bei den Reinigungsverfahren wird zwischen Grob- oder Vorreinigung und Fein-
reinigung unterschieden. Die Grobreinigung erfolgt sofort, nachdem das Gas den Ofen verlässt. Das
staubbeladene Gas wird zunächst in den Staubsack geführt. Der Staubsack ist ein großes Gefäß, in den
das Gas mit hoher Geschwindigkeit eintritt. Durch die Querschnittserweiterung von der Rohrleitung in
den Staubsack wird die Strömungsgeschwindigkeit des Hochhofengases erheblich vermindert. Die gro-
ben Staubteilchen fallen auf den Boden des Staubsackes und können dort abgezogen werden.

Zur Verbesserung der Grobreinigung wird häufig noch ein Wirbler oder Zyklon nachgeschaltet. In die-
sen tritt das Gas tangential mit großer Geschwindigkeit ein und der Staub wird durch Fliehkraft abge-
schieden.

Im Anschluss wird das Gas zur Feinreinigung weitergeleitet. Die Feinreinigung erfolgt meistens mit
Venturi-Wäschern. Dabei wird Wasser unter starkem Druck (bis 2 bar) senkrecht zu Gasströmung
eingedüst. Durch die sehr hohen Gasgeschwindigkeiten wird das Wasser zu feinstem Nebel zerschla-

gen und kann so die feinsten Staubteilchen benetzen. Diese mit Wasser benetzten Staubteilchen werden dann mechanisch abgeschieden.

Das Hochofengas besitzt am Hochofenaustritt bei den meisten Öfen einen Überdruck von etwa 2,5 – 3 bar. Bei 75 % dieser Öfen in Deutschland wird es in einer Hochofengasentspannungsturbine bis auf den Druck im Hüttennetz entspannt und so zur Stromerzeugung genutzt. Im Gasnetz beträgt der Überdruck rund 50 bis 100 mbar. Die anderen Öfen werden drucklos betrieben. Die Hochofengasentspannungsturbine wird in dieser Studie nicht weiter betrachtet, da das Augenmerk auf den Potenzialen der Abwärmenutzung liegt.

2.3 Oxygen-Stahlwerk (Konverter)

Das im Hochofen hergestellte Roheisen wird im Stahlwerk zu Rohstahl verarbeitet. Abbildung 3 zeigt den Konverter des Stahlwerks mit den Einrichtungen zur Roheisen-Chargierung. Ferner sind die Anlagen zur Gewinnung des Konvertergases und der Kühlwasser-Aufbereitung dargestellt.

Das flüssige Roheisen wird mit Hilfe von Transportpfannen wie Torpedopfannenwagen ins Stahlwerk befördert. Dabei kann dem Roheisen bereits ein Teil seines Schwefels durch Zugabe von Schlackenbildnern entzogen werden. Im Stahlwerk wird das Roheisen in den Konverter chargiert. Optional kann ein Roheisenmischer zwischengeschaltet werden zur Pufferung der Massenströme und Homogenisierung der transportierten Chargen.

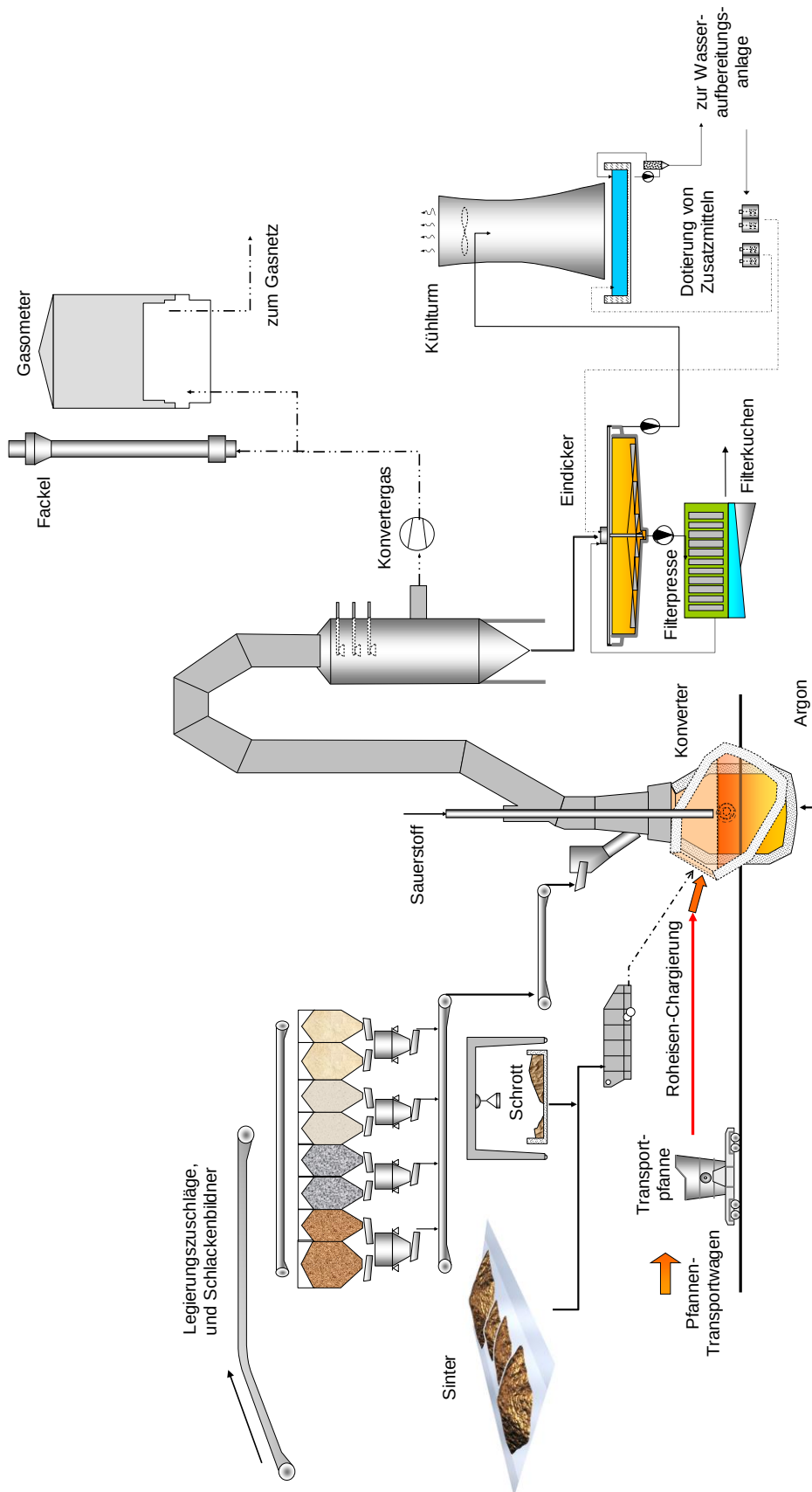
In den Konvertern wird im Wesentlichen der im Roheisen enthaltene Anteil an Kohlenstoff und unerwünschten Begleitelementen gesenkt und einige Legierungsbestandteile werden zugegeben. Der so aus dem Roheisen gewonnene Rohstahl mit seinen spezifischen Eigenschaften wird anschließend nach der sekundärmetallurgischen Behandlung in Stranggießanlagen zu Brammen, Dünnbrammen, Knüppeln oder Rundstahl vergossen, die in diesem Bericht unter dem Begriff „**Brammen**“ zusammengefasst sind. Des Weiteren wird ein kleiner Anteil des Rohstahls zu Blöcken vergossen.

Konverter

Im Konverter wird mittels Sauerstoffzuführung entkohlt und gemischt. Dieser Vorgang wird als **Frischen** bezeichnet. Der im Roheisen enthaltene Kohlenstoff wird dabei mit dem zugeführten Sauerstoff fast vollständig oxidiert zu 90 Vol.-% CO und 10 Vol.-% CO₂. Bei der Absaugung dieses Gases tritt über eingesaugte Umgebungsluft weiterer Sauerstoff hinzu, der umgesetzt wird. Es entsteht das CO-reiche Kuppelgas Konvertergas mit ca. 65 - 70 Vol. % CO. Das Frischen und die damit verbundene Konvertergasentstehung sind diskontinuierliche Prozesse.

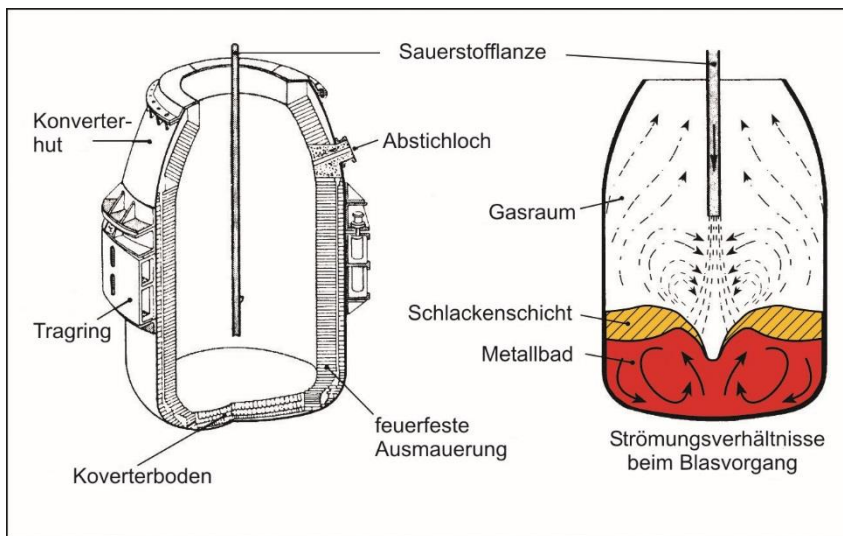
Bei der Sauerstoffzuführung wird zwischen Sauerstoffaufblasverfahren (LD-Verfahren), Sauerstoffbodenblasverfahren (OBM-Verfahren) und Mischungen aus beiden unterschieden. In Deutschland wird ausschließlich das LD-Verfahren eingesetzt, bei dem der Sauerstoff mit einer Sauerstofflanze zugeführt wird, siehe Abbildung 4. Der Zusatz von Schlackenbildnern sorgt für das Abbinden von Begleitelementen und der Schrottzusatz dient der Temperaturregulierung. Am Ende des Prozesses wird der Rohstahl mit einer Temperatur von 1.650 – 1.750 °C abgestochen. In Abbildung 4 wird ein Schnitt durch einen LD-Konverter gezeigt.

Abbildung 3: Konverter des Oxygenstahlwerks mit Nebenanlagen



Quelle: (Knoop, 2017)

Abbildung 4: LD-Konverter



Quelle: (Autorenkollektiv, Stahlfibel, 2015)

Durch Kippen des Konverters wird Schlacke ausgeleert. Da die Schlacke eine geringere Dichte als die Stahlschmelze aufweist, schwimmt sie auf der Oberfläche und verbleibt während des Abstichs im Konverter.

Das Konvertergas tritt im Mittel mit ca. 1.500 °C aus dem Konverter aus und wird mittels einer Haube kanalisiert. Es muss im Anschluss gekühlt und gereinigt werden.

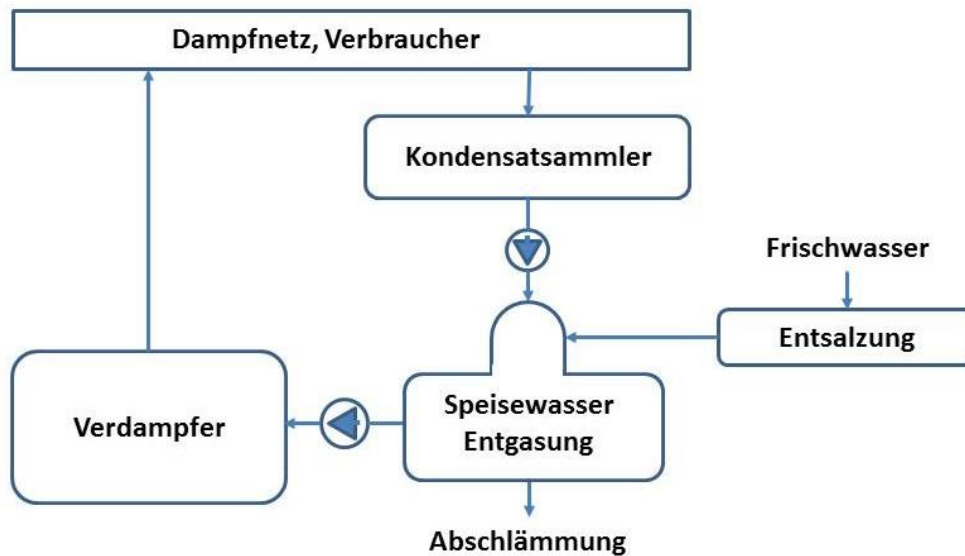
Es schließt sich der Prozessschritt der Sekundärmetallurgie an. Ziel ist eine Erhöhung der Stahlqualität durch Homogenisierung, gegebenenfalls Entfernung unerwünschter Begleitelemente wie Schwefel, Legierungsmittelzugabe, Entgasung und teilweise Reinheitsgradspülen. Die findet in den deutschen Hüttenwerken überwiegend in Vakuumanlagen vom Typ RH oder VD statt, seltener auch in Pfannenöfen. Ca. die Hälfte des am Konverter erzeugten Dampfes wird im Stahlwerk eingesetzt als Vakuum-, Sperr- und Treibdampf. Der Rest wird ins Werksnetz eingespeist.

Abhitzekeessel mit Dampferzeugung und Speisewasseraufbereitung

Das CO-haltige Konverterabgas kann durch Luftzufuhr verbrannt und die dabei frei werdende Wärme in einem Abhitzekeessel zur Dampferzeugung genutzt werden. Der gesamte Energieinhalt in Form von chemisch gebundener Energie (überwiegend in Form von CO) und sensibler Wärme (Abwärme) wird dann zur Dampferzeugung genutzt. Das gereinigte und abgekühlte Abgas wird über den Kamin abgeführt.

Ein Prinzipbild eines Dampferzeugersystems ist in Abbildung 5 dargestellt. Das System besteht aus den energetisch relevanten Komponenten Verdampfer, Dampfnetz, Kondensatsammler (nicht überall vorhanden), Kesselspeisewasserbehälter mit Entgasung, und Frischwasserentsalzung, sowie der Möglichkeit zur Abschlammung. Die Kondensatrückführung erfolgt, sofern der Dampf in der Produktion kondensiert und nicht im Produkt aufgenommen wird. Zum Ausgleich von Verlusten wird Frischwasser zugesetzt. Speisewasserentgaser und Frischwasserenthärter dienen der Aufbereitung des frisch zugesetzten Kesselspeisewassers, um Korrosion und Ablagerungen auf den Heizflächen zu vermeiden. Die Abschlammung wird periodisch durchgeführt, um Salzurückstände abzuleiten, die im Kessel abgeschieden wurden (Reichert & Eichhammer, 1994).

Abbildung 5: Dampferzeugersystem (eigene Darstellung)



Eigene Darstellung, Stahlinstitut VDEh

Das Speisewasser muss zur Verhinderung von Korrosion und Ablagerungen eine bestimmte Qualität besitzen, um einen störungsfreien langjährigen Betrieb für Dampfkessel und Dampfkraftwerke zu ermöglichen. Dazu wird das Speisewasser aufbereitet. Im Wasser enthaltene Salze wie z. B. Erdalkalien, welche bei höheren Temperaturen auf den Heizflächen ausfallen und eine Isolierschicht bilden würden, werden mit Ionenaustauschern aus dem Frischwasser abgetrennt. Auch gelöste Gase wie O_2 und CO_2 können zu Korrosionen führen und werden durch Erhitzen des Speisewassers abgetrennt.

Konvertergas-Rückgewinnung

Der Blasvorgang ist ein Batchprozess. Zu Beginn des Blasprozesses steigt der CO-Gehalt von 0 auf ca. 70 Vol.-% an, zum Ende des Blasvorganges sinkt er wieder auf 0 Vol.-% ab. Das Konvertergas wird genutzt und rückgewonnen, wenn der CO-Gehalt 25 Vol.-% übersteigt. In diesem Zeitraum wird der Zutritt von Luft in den Abgasweg mit einem Stelling am Konverterausgang unterdrückt, die Verbrennung wird unterbunden und das CO-reiche Konvertergas kann gesammelt und nach Abkühlung sowie Reinigung in das Gasnetz der Hütte eingespeist und als Brenngas genutzt werden. In diesem Fall wird lediglich die sensible Wärme des Konverterabgases im Abhitzekeessel zur Dampferzeugung genutzt (reine Abwärmenutzung).

Der verbleibende Anteil des Konvertergases am Anfang und Ende des Blasvorgangs besteht zu großen Teilen aus Inertgasen. Es hat für eine energetische Nutzung einen zu geringen Heizwert und wird daher über eine Fackel verbrannt.

In Deutschland wird Konvertergas an vier von sechs Standorten rückgewonnen, an den anderen wird das gesamte Konverterabgas zur Dampferzeugung genutzt. Die hohen Schwankungen in Volumenstrom und Zusammensetzung erfordern große Gasometer zur Zwischenspeicherung und Homogenisierung des gewonnenen Gases, bevor es einer Nutzung zugeführt werden kann. Es fallen hohe Investitionen für Gasometer und Gasnetz an. Daher wird nicht an allen Standorten rückgewonnen.

2.4 Stranggießanlage

Beim Stranggießen gelangt der flüssige Stahl unter Luftabschluss aus der Gießpfanne in den sogenannten Verteiler (Tundish) und von hier aus über Tauchausgüsse, welche z. B. mit Erdgas vorgeheizt werden, in die wassergekühlten Kupferkokillen der einzelnen Stränge. Dabei bestimmt die Form der Kokille die Form des Stranges. Vor dem eigentlichen Gießbeginn wird die Kokille mit dem sogenannten Kaltstrang, einer Gliederkette, verschlossen. Nach Erreichen der Badspiegelhöhe im Verteiler wird die Kokille in senkrechte Schwingungen (Oszillation) versetzt, um ein Anhaften des Stranges an der Kokillenwand zu verhindern.

Der rotglühende Strang wird zu Beginn mit Hilfe des Kaltstranges und später mit den Treibrollen aus der Kokille gezogen. Wegen seines flüssigen Kerns muss der Strang so lange sorgfältig mit Wasser und/oder Luft bedüst und gekühlt sowie allseits mit Rollen abgestützt werden, bis er vollständig erstarrt ist (vgl. Abbildung 6). Bei hochfesten Stählen wird auf eine moderate schonende Abkühlung geachtet und mit Luft gekühlt. Zu hohe Temperaturgradienten würden zu Rissen im Strang und in den Brammen führen und damit die Produktgüte unzulässig beeinträchtigen.

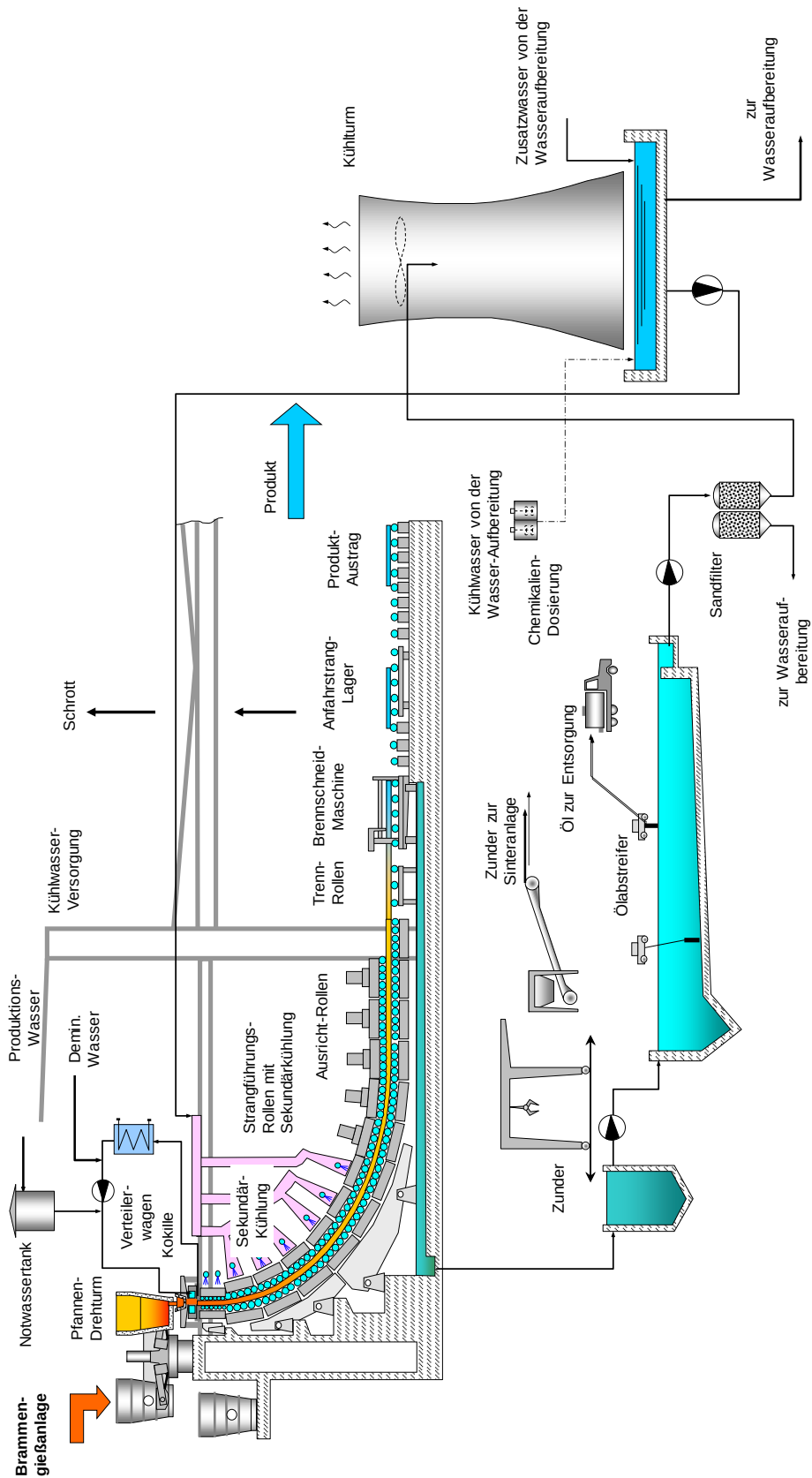
Überwiegend werden in Deutschland mittels Strangguss Brammen gefertigt, die für die Blecherzeugung benötigt werden.

Abbildung 6 zeigt ebenfalls die Kühlwasseranlagen einer Stranggießanlage. In der Stranggießanlage wird Kühlwasser zur Kokillenkühlung, zur Brammenkühlung sowie zur Maschinenkühlung, beispielsweise in Form von Rollen- und Rahmenkühlung, eingesetzt. Das Kühlwasser wird in Absetzbecken vom Zunder getrennt und dann im Kühlturm rückgeköhlt.

Nach dem Verlassen der Strangführung ist der Stahl in durcherstarrtem Zustand und die stranggegosenen Formate werden auf eine definierte Länge geschnitten. Hierfür werden üblicherweise autogene Brennschneidmaschinen verwendet. Nach dem Strangschneiden und vor der Übergabe an das Walzwerk erfolgt eine Kennzeichnung durch Stempel- oder Signiermaschinen.

Nach vollständiger Erstarrung wird der Strang am Auslaufröllgang durch mitfahrende Schneidbrenner oder Scheren auf die gewünschte Länge zerteilt.

Abbildung 6: Stranggießanlage

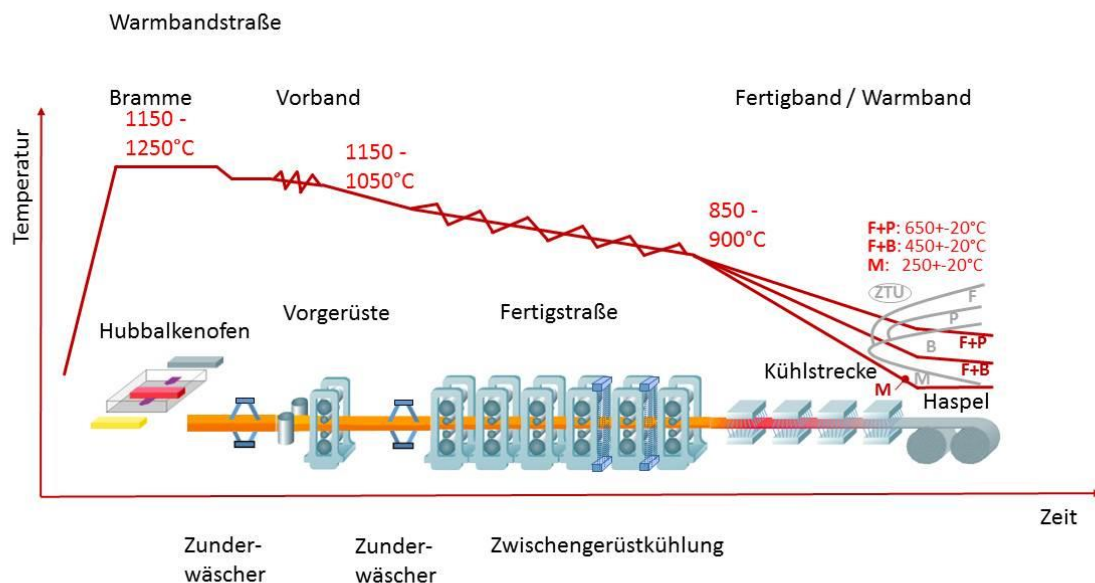


Quelle: (Knoop, 2017)

2.5 Warmwalzwerk

In einem Walzwerk sind alle Betriebsanlagen zusammengefasst, die zur Herstellung von Walzerzeugnissen erforderlich sind. Warmwalzwerke gliedern sich im Allgemeinen in die Bereiche Wärmofen (hier Hubbalkenofen), Zunderwäscher, Vorgerüst, Fertigstraße, Kühlstrecke und Haspel, siehe Abbildung 7. Die Darstellung enthält auch ein kontinuierliches Zeit-Temperatur-Umwandlungsdiagramm (**ZTU-Diagramm**) mit drei Abkühlkurven unterschiedlicher Abkühlgeschwindigkeit. Die Abkühlgeschwindigkeit bestimmt die Anteile von Ferrit (F), Perlit (P), Bainit (B) und Martensit (M) im Gefüge des abgekühlten Stahls und damit die Eigenschaften des Materials.

Abbildung 7: Warmwalzwerk und Abkühlkurven des Warmbandes



Quelle: Primetals (Autorenkollektiv, Stahlbibel, 2015)

In Wärmöfen (Wiedererwärmungsöfen) werden die Brammen auf die erforderliche Walztemperatur erwärmt. Für das Warmwalzen wird ein Material benötigt, welches gleichmäßig auf die jeweilige Temperatur zur Warmumformung vorgewärmt ist. Abhängig von Materialwerkstoff und -querschnitt ist im Ofen eine Temperatur von bis zu 1.350 °C einzustellen. Die Brammen müssen am Ofenaustritt ca. 1.250 °C erreicht haben.

Die Durchlaufzeiten der Brammen durch den Ofen sowie die Heizleistungen der Einzelzonen und des Gesamtofens sind dementsprechend zu regeln. In den energieintensiven Wärmzonen wird die Heizleistung durch eine Verbrennung von heizwertreichem Erdgas und/oder Koksgas erreicht. In den Ausgleichszonen, die zur Vergleichmäßigung der Temperatur in den Brammen dient, ist keine hohe Heizleistung erforderlich. Hier werden auch Mischungen mit dem heizwertarmen Hochofengas eingesetzt.

Im integrierten Hüttenwerk wird der Rohstahl nach Güte, d. h. chemischer Zusammensetzung, über die Route Hochofen, Oxygenstahlwerk und Stranggießanlage hergestellt und als Bramme vergossen. Über diesen Weg kann direkt mit Nutzung der **Enthalpie** des Materials aus der jeweiligen Vorstufe produziert werden. Das Walzen erfolgt nach Abmessung des Walzproduktes (unterschiedliche Güten werden zu einer Walzkampagne einer Abmessung zusammengefasst) und Qualitätsmerkmalen (Walzen von breit nach schmal wegen Oberflächenqualität und Toleranzen). Walzphasen werden durch Wal-

zenumbauphasen unterbrochen. Es ergeben sich Restriktionen im Materialfluss. Ein wesentlicher Teil der Brammen wird daher nach Verlassen der Stranggießanlage und vor Eintritt in das Warmwalzwerk zwischengelagert und verliert dort einen Teil seiner sensiblen Wärme an die Umgebung. Aufgabe der Produktionsplanung und der Logistik ist es, einen möglichst hohen Anteil der Brammenwärme über einen Wärmeinsatz (Heißeinsatz) in den Ofen mitzubringen. Wärmeinsatz verringert den Brenngasbedarf, die Durchlaufzeit und die Zunderbildung (Materialverlust) im Ofen.

Wiedererwärmungsöfen sind konstruktiv als Hubbalken- oder seltener als Stoßofen ausgelegt. Das Material wird schrittweise durch den Ofenraum befördert und lagert dabei auf schmalen Reitern oder Tragschienen, um eine allseitige Erwärmung zu gewährleisten. Diese tragenden Elemente im Ofen müssen gekühlt werden, um die Tragfähigkeit aufrecht zu erhalten.

Der durch den Aufwärmvorgang im Ofen auf dem Material entstandene Zunder (Eisenoxid) wird unmittelbar nach dem Ofen und vor Eintritt des Materials in die Walzgerüste im sogenannten Zunderwäscher entfernt. Der Zunderwäscher wird mit Wasser betrieben, welches unter hohem Druck (100 bis zu 400 bar) auf die verzunderte Bramme gedüst wird. Durch verschiedene Mechanismen (durch den Aufprall des Strahls, die Temperaturdifferenz und das Verdampfen) bricht der Zunder auf. Der gelöste Zunder wird mit Wasser abgespritzt. Das flüssig gebliebene Wasser wird gesammelt, gereinigt und dann wieder dem Wäscher zugeführt. Zunder ist extrem abrasiv und würde im Wasserkreislauf die Armaturen zerstören.

Die entzündete Bramme läuft über einen Rollgang in die Vorstraße ein. Die Bramme wird in mehreren Stichen (Durchlauf durch ein Walzenpaar, dessen Abstand bei jedem Durchlauf geringer ist) gestreckt und zum Vorband ausgewalzt. Dies geschieht in der Regel reversierend, d. h. die Transportrichtung wird nach jedem Stich gewechselt.

Das Vorband weist eine wesentlich größere Oberfläche als die Bramme auf und kühlt daher stärker ab als die Bramme. Vor dem Einlauf in die Fertigstraße wird erneut entzündet. Mit Presswasser wird die neu gebildete Zunderschicht entfernt. Ausschlaggebend ist die Qualität der Materialoberfläche. Eingewalzter Zunder führt zum Ausfall des Produktes.

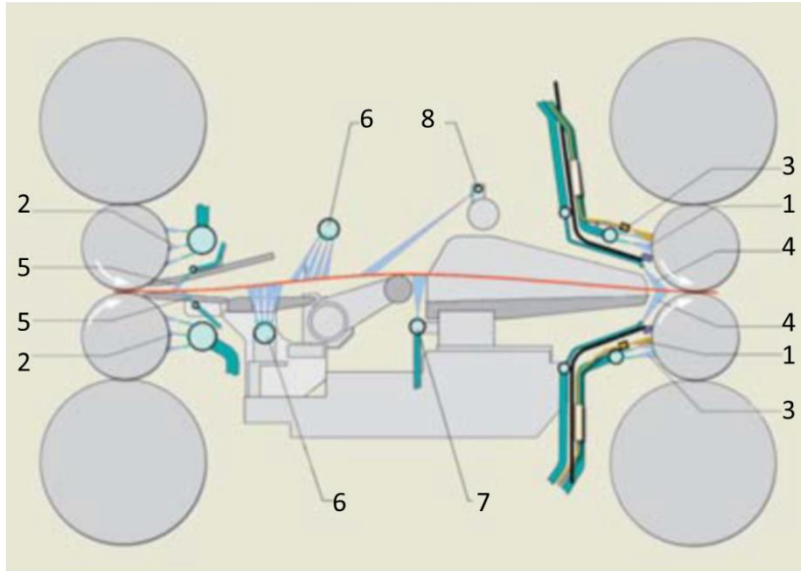
In den Walzgerüsten wird der Stahl zwischen zwei sich entgegengesetzt drehenden Walzen (Arbeitswalzen) hindurchgeführt und durch hohe Druckkräfte hauptsächlich in Längsrichtung auf das Zielmaß (Banddicke) gewalzt. Üblich sind Quarto-Gerüste, in denen die Arbeitswalzen durch je eine Stützwalze stabilisiert werden. Die Arbeitswalzen werden so durch die Druckkräfte weniger durchgebogen und können dünner ausgelegt werden. Das gewalzte Band ist somit formstabiler.

Die Fertigstraße besteht aus fünf bis sieben dicht hintereinander angeordneten Walzgerüsten. Das Band befindet sich während der Umformung gleichzeitig in allen Gerüsten. In den Gerüsten der Fertigstraße wird das Vorband auf die Zieldicke von 3 – 25 mm heruntergewalzt. Dabei wird Wasser für die Walzenkühlung und die sogenannte Zwischengerüstkühlung eingesetzt. Letztere ist nur zwischen einigen Walzgerüsten installiert. Die Komplexität der Zwischengerüstkühlung ist in Abbildung 8 dargestellt. Alle dargestellten Ströme werden einzeln geregelt nach Anforderung an den Walzprozess des jeweiligen Nutzgutes. Der Nutzgutqualität werden andere Prozessparameter untergeordnet. Die Temperaturführung von Walzen und Band, eine zunderarme Verarbeitung, geringer Verschleiß und Antriebskraft sind hier maßgebliche Randbedingungen. Es bestehen starke Schwankungsbreiten von Durchsatzraten und Temperaturen für die eingesetzten jeweiligen Medien. Anzahl und Ausstattung derartiger Ausrüstungen sind vom jeweiligen Walzprozess abhängig.

Bei der Walzenkühlung handelt es sich um eine kontinuierliche lokale Kühlung der Arbeitswalzen mit Wasser, welche eingeschaltet wird, sobald die Walzen in Kontakt mit dem heißen Band kommen. Die mit dem Band eingebrachte Wärme wird der Walze entzogen, so dass die Walzen prozesssicher auf einem definierten Temperaturniveau betrieben werden können. Walzenkühlung ist ebenfalls notwendig, um die Toleranzen insbesondere der Banddicke über Bandbreite und Bandlänge als auch die Ober-

flächenqualität des Bandes gewährleisten zu können. Durch segmentierte Walzenkühlung kann die Verteilung der Oberflächentemperatur der Arbeitswalzen so geregelt werden, dass das Band-Dickenprofil gezielt beeinflusst werden kann.

Abbildung 8: Walzen- und Zwischengerüstkühlung



Mögliche Komponenten der Walzen- und Zwischengerüstkühlung:

- 1: Arbeitswalzenkühlung an Einlaufseite
- 2: Arbeitswalzenkühlung an Auslaufseite
- 3: Arbeitswalzensmierung
- 4: Bandoberflächenkühlung
- 5: Dampfunterdrückung
- 6: Zwischengerüstkühlung
- 7: Bandunterseitenkühlung
- 8: Bandabspritzung

Quelle: SMS

Die Zwischengerüstkühlung erfolgt zwischen einigen Gerüsten der Fertigstraße. Dabei wird die Bandoberfläche mit Wasser gekühlt. Einerseits kann durch die verringerte Oberflächentemperatur des Bandes die Bildung von (schwerhaftendem) Tertiärzunder unterdrückt werden, andererseits werden damit auch die Walz-Endtemperatur, das Gefüge und die Eigenschaften des gewalzten Bandes eingestellt.

Das Band verlässt das letzte Gerüst der Fertigstraße mit einer Auslaufgeschwindigkeit von ca. 15 m/s. Auf dem Auslaufrollgang wird das Band zu den Haspeln transportiert. In den Auslaufrollgang ist die Kühlstrecke integriert. Auf der Kühlstrecke wird das Band mit exakt vorgegebener Abkühlgeschwindigkeit auf die Wickeltemperatur, die typischerweise zwischen 200 und 700 °C liegt, abgekühlt. Das Band wird zur Kühlung sowohl von der Oberseite als auch von der Unterseite mit Wasser beaufschlagt. Die Dosierung der Wassermenge ist von Banddicke und Bandgeschwindigkeit sowie von der Länge der Kühlstrecke abhängig.

Werkstoffkundlich gesehen durchläuft der Stahl dabei Phasenumwandlungen bei definierten materialabhängigen Umwandlungstemperaturen. Diese Zusammenhänge werden in Zeit-Temperatur-Umwandlungsdiagrammen dargestellt. Ein solches ZTU-Diagramm ist in Abbildung 7 am Ende der Temperaturverläufe skizziert.

Moderne Stahlgüten erfordern einen hohen Automatisierungsgrad. Heute werden an Warmbandstraßen zunehmend Online-Kühlmodelle eingesetzt. Diese setzen aggregatübergreifend bereits an der Vorstraße auf und berechnen Bandtemperatur, Phasenanteile und Gefüge auf Basis eines thermodynamischen Ansatzes vom Vorgerüst bis zur Haspel in Echtzeit. Alle Wassermengen für Vorbandkühlung (extra Kühlung zur Einstellung einer definierten Vorbandtemperatur vor der Fertigstraße), Zwischengerüstkühlung, Power Cooling (extra starke Kühlvorrichtung direkt nach dem letzten Gerüst der Fertigstaffel) und Laminarkühlung (klassische Kühlstrecke) werden von Modellen mit großer Dynamik gesteuert. Folglich haben zu- wie abgeführte Kühlwässer starke Schwankungen in Durchfluss und

Temperatur. Im Kreislauf geführte Wässer werden sorgfältig gereinigt, um Schäden an Band und Walzen zu vermeiden.

Abschließend wird das Warmband auf der Haspel zum **Coil** aufgerollt (Aufhaspeln des Warmbandes). Das Coil wird zum Warmbandlager abtransportiert und kühlt dort an der Umgebung weiter ab.

2.6 Verfahrenstechnik von Kühlwasserkreisläufen in Hüttenwerken

Die Abwärme aus der notwendigen Kühlung der Prozesse des Hüttenwerks wird üblicherweise über Wasserkühlkreisläufe und Luft an die Umgebung abgeführt. Die Kühleinrichtungen stellen wesentliche Nebenanlagen für den Betrieb des Hüttenwerks dar. Dabei wird der Bedarf an Kühlwasser meist durch Kreislaufführung derart optimiert, dass möglichst wenig Frischwasser benötigt und möglichst wenig Abwasser erzeugt wird.

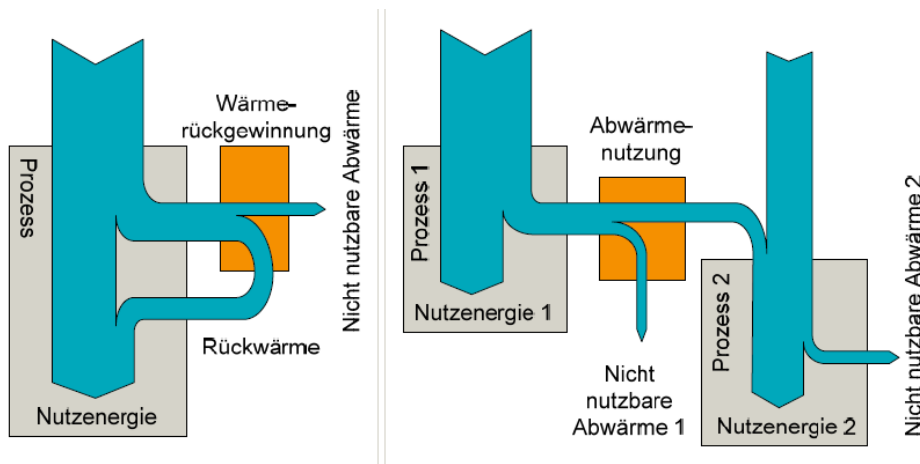
Im Hüttenwerk kann zwar die Frischwasserversorgung meist zentral durchgeführt werden, aber es ergeben sich unterschiedliche Anforderungen und Technologien für die Reinigung von Abwasser der jeweiligen Betriebsbereiche. Dabei sind im Allgemeinen die nachfolgenden verfahrenstechnischen Merkmale zur Gestaltung von Kühlwasserkreisläufen von besonderer Bedeutung:

- ▶ An vielen Anlagen wird deionisiertes Wasser in geschlossenen Systemen zur Maschinenkühlung sowie als Speisewasser für die Dampferzeugung benötigt. Da in den Rohrleitungen Ablagerungen von Kalk und anderen Stoffen sicher unterbunden und eine Korrosion der jeweils verwendeten Metalle verhindert werden müssen, ist die Ionenbeladung des Wassers speziell auf die elektrochemischen Anforderungen und Temperaturzonen einzustellen. Dies erfordert eine besondere Aufbereitung und Steuerung der Qualität des Kühlwassers in den Kreisläufen.
- ▶ Zusätzliche biologische Anforderungen an den Betrieb von Warmwasserkreisläufen sind zu beachten. Zur Unterbindung einer gefährlichen Keimbelastung müssen einigen Kühlwasserkreisläufen ggf. Chemikalien zugesetzt werden. Ggf. sind auch die für den Gesundheits- und Arbeitsschutz wichtigen Qualitätsparameter des Kühlwassers mit einem regelmäßigen Monitoring zu überprüfen.
- ▶ Die Aufbereitung von frischem Kühlwasser sowie die Bereitstellung von deionisiertem Wasser als Speisewasser bzw. Kühlwasser erfolgt i.d.R. in zentralen Wasseraufbereitungsanlagen des Hüttenwerks. Demgegenüber werden austretende Wässer aus den Prozessen oft in dezentralen Aufbereitungsanlagen gereinigt, da diese dezentralen Anlagen besser auf die jeweils erforderliche Technologie zur Abtrennung von Nebenprodukten und/oder Feststoffen hin ausgelegt werden können.
- ▶ Prozess-Kühlwasser wird in mehreren Prozessen für einen direkten Kontakt mit den zu kühlenden Stoffen benötigt. Dies ist z. B. der Fall bei der Schlackengranulation, der Nasswäsche von Konverterabgas im Stahlwerk, sowie bei der Strangguss- und Brammenkühlung in der Stranggießanlage und im Warmwalzwerk. Die aus dem direkten Kontakt mit den zu kühlenden Stoffströmen anfallenden Feststoffpartikel oder Begleitelemente sind jeweils mit speziellen Verfahren aus dem Kühlwasser abzutrennen. Beispiele hierfür sind der Hochofenstaub bei der Hochofengaswäsche, der Hüttensand bei der Granulation und der Zunderschlamm im Walzwerk.
- ▶ Diskontinuierlich arbeitende Kreisläufe für Kühlwasser und Dampf erfordern ggf. eine zusätzliche Pufferung der Medien, z. B. Dampfspeicher beim Konverter-Prozess oder Pufferbecken für Granulationswasser bei der Schlackengranulation.
- ▶ Bei Kühlwasser- und Dampfkreisläufen treten auch Wasserverluste auf, die jeweils durch Frischwasser ausgeglichen werden müssen. Dies ist z. B. der Fall bei:
 - Verdampfung von Kühlwasser in Verdampfungskühlern bzw. in Abgasen,
 - Anhaftungen von Kühlwasser an Feststoffen (z. B. Schlacke),
 - Verdunstung von Spritzwasser bzw. Rieselwasser in Luftkühlern.

3 Technologien zur Abwärmennutzung in integrierten Hüttenwerken

Energieeffizienz ist das Maß für den Energieaufwand zur Erreichung eines festgelegten Nutzens. Sie ist umso höher, je geringer die Energieverluste für das Erreichen des jeweiligen Nutzens sind. Rund 30 % des Endenergiebedarfs der Bundesrepublik Deutschland entfallen auf den Industriesektor, davon werden über 60 % zur Bereitstellung von Prozesswärme genutzt (UBA, 2018). In integrierten Hüttenwerken ist die Prozesswärme erforderlich für die chemische Reduktionsenthalpie, die Schmelzwärme sowie die weitere Erwärmung von Einsatzstoffen und Materialien oder auch die Dampferzeugung. Am Ende der jeweiligen Prozesse verlässt die Energie den Bereich als diffuse (**ungefasste**) oder **gefasste** Abwärme. Technologien zur Nutzung dieser Abwärme beinhalten das Ziel, die Abwärme der Industrieprozesse teilweise wieder für den Prozess zurückzugewinnen und als „Rückwärme“ erneut dem Prozess zur Verfügung zu stellen. Dies ist schematisch in Abbildung 9 links dargestellt. Abwärme, die nicht mehr für den Prozess rückgewonnen werden kann, lässt sich ggf. in einem anderen Prozess weiter nutzen oder als nutzbare Abwärme anderen Nutzern zur Verfügung stellen. Dies ist schematisch in Abbildung 9 rechts dargestellt. Eine mögliche Nutzung kann gleichzeitig oder ggf. nach Speicherung auch mit Zeitverschiebungen erfolgen.

Abbildung 9: Wärmerückgewinnung und Abwärmennutzung



Quelle: (Hirzel, Sontag, & Rohde, 2013)

Im integrierten Hüttenwerk erfolgt die Wärmebereitstellung für die jeweiligen Prozesse meist durch Verbrennung von festen Brennstoffen und/oder Erdgas bzw. Nutzung der bei der Stahlherstellung entstehenden Kuppelgase. Die **Nutzenenergie** der einzelnen Prozessschritte beinhaltet z. B. die Enthalpie der hergestellten Produkte sowie die Reaktions- und Stoffumwandlungsenthalpien. So ist z.B. bei der Stahlverarbeitung mit nachgeschalteter Warmumformung z.B. durch Walzen oder Schmieden das Erwärmen des Stahls auf die jeweils benötigte Umformtemperatur erforderlich und als Teil der Nutzenenergie zu betrachten.

Abwärme fällt in den Prozessen z. B. an als:

- ▶ sensible Wärme in Abgasen, Kühlwässern und Produkten,
- ▶ latente Wärme der unvollständig gekühlten Produkte und Nebenprodukte,

Dabei ist Wärme, die zu einer Veränderung der Temperatur eines Gegenstandes führt die sensible oder auch fühlbare Wärme. Die Wärme, die zu einer Änderung des Aggregatzustands führt, wird latente Wärme genannt.

Aktuell verfügbare Technologien zur Nutzung von Abwärme werden z. B. in den Übersichtsbeiträgen (Meinert, 2016) und (Hirzel, Sontag, & Rohde, 2013) dargestellt. Tabelle 3 zeigt, welche Strategien zur

prozessinternen und/oder -externen Nutzung bzw. zur Verringerung von Abwärmeverlusten in der Stahlindustrie derzeit angewendet werden können. In der rechten Spalte sind einige der bereits in der Stahlindustrie umgesetzten Anwendungsbeispiele genannt.

Tabelle 3: Strategien zur Verringerung von Abwärmeverlusten in der Stahlindustrie (beispielhaft)

Strategie	Anwendungsbeispiele aus integrierten Hütten
Prozessoptimierung	Vermeidung von Abwärme Luftzahlregelung, LEEP, Wärmeinsatz
Prozessinterne Nutzung der Abwärme	Vorwärmung von Einsatzstoffen Schrott, Brammen Medienvorwärmung Brennluft, Brenngas, Blaskohle Dampferzeugung Wärmespeicher
Betriebsinterne Verwendung der Abwärme	Vorwärmung von Einsatzstoffen Sinter, Schrott, Brammen Medienvorwärmung Brennluft, Brenngas, Blaskohle Dampferzeugung Wärmespeicher
Umwandlung in andere Energieformen	Stromerzeugungsverfahren Dampfturbine (Kraftwerk), ORC, TEG Kälteerzeugung Absorptionskältemaschine, Adsorptionskältemaschine
Betriebsexterne Nutzung der Abwärme	Fernwärme Warmwasser, Dampf

3.1 Prozessoptimierung

Die erste Priorität der energetischen Optimierung von Hüttenwerken liegt in der Optimierung der Einzelprozesse mit Minimierung der Abwärmeströme. Ferner bieten sich vielfältige weitere technische Möglichkeiten zur Prozessoptimierung und Vermeidung von Abwärme. Bei Feuerungen kann z. B. der erzeugte Abgas-Enthalpiestrom durch Regelung der **Luftzahl** vermindert werden. Weitere Beispiele von Prozessoptimierungen und Maßnahmen zur Effizienzverbesserung der Prozesse zeigen u.a. (Lamberterie & et.al., 2014) auf. Nachfolgend werden einige Beispiele detailliert dargestellt.

Beispiel Sinteranlage

An der Sinteranlage kann die in den Abgasen enthaltene Enthalpie zum Teil genutzt werden. Allerdings ist das Abgas des Sinterbandes ohne weitere Abgasbehandlung nicht für eine Wärmenutzung geeignet. Enthaltene Schadstoffe wie beispielsweise Salzbildner und polyzyklische Kohlenwasserstoffe sowie Stäube müssen vorher weitgehend abgereinigt werden. Der Gesamtabgasstrom des Sinterbandes kühlt dabei im Mittel von über 120 °C auf ca. 65 °C ab.

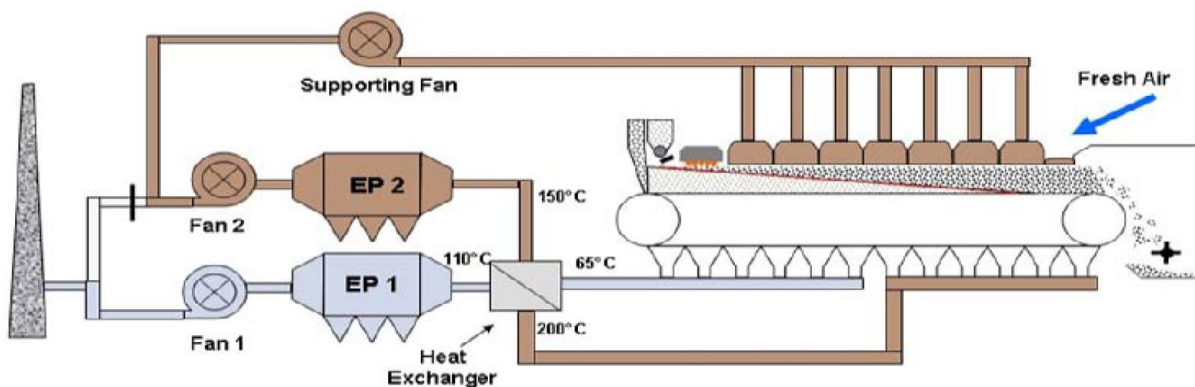
Zur Teilrückführung warmer Abgase an Sinteranlagen sind in den letzten Jahren einige Verfahren entwickelt worden. Bei diesen Verfahren wird ein Teil der warmen Abluft des Sinterbandes hinter dem Zündofen abgesaugt, über Elektrofilter gereinigt und zum Sinterband zurückgeführt. Dieser rückgeführte Abluftstrom ersetzt einen Teil der Frischluft. Der spezifische Abgasvolumenstrom und der Bedarf an Koksgrus sinken dadurch. Staub im Abgas wird teilweise im Sinter gebunden, Kohlenwasserstoffe werden aufoxydiert und so abgebaut. Es sind in der Literatur mehrere Verfahren beschrieben,

die sich im Wesentlichen durch die Orte der Absaugung und der Rückführung der Abluft sowie die Einbindung zusätzlicher Wärmeübertrager unterscheiden. Die genannten Verfahren führen zu vergleichbaren Einsparungen des Koksgruses zwischen 5 und 15 %. Diese Einsparung führt zur Senkung der Mengenströme für Frischluft und Abluft am Kamin und zur Minderung der Emissionswerte. Beispiele dafür sind im BREF 2013 (Remus, Monsonet, Roudier, & Sancho, 2013) aufgeführt:

- ▶ Low Emission and Energy optimised sintering Process (LEEP, HKM), s. Abbildung 10. Hier wird von einer Senkung des Brennstoffenergiebedarfs um 200 MJ/t_{Sinter} berichtet (Remus, Monsonet, Roudier, & Sancho, 2013)
- ▶ Emission Optimised Sintering (EOS; entwickelt von Outotec, im Einsatz bei Corus, NL, heute Tata Steel)
- ▶ Environmental Process Optimised SINTering (EPOSINT; entwickelt von Voestalpine, Österreich)
- ▶ Selective Waste Gas Recirculation (betrieben bei NSC, Japan, heute NSSMC)

Für die ersten beiden Verfahren werden Einsparungen des Koksbedarfs von 12,5%, bei den anderen beiden von 6% berichtet.

Abbildung 10: LEEP Verfahren



Quelle: BREF 2013 (Remus, Monsonet, Roudier, & Sancho, 2013)

Beispiel Warmeinsatz von Brammen aus Gießwärme

Ein anderes Beispiel für eine Prozessoptimierung stellt die Logistik bei der Weiterverarbeitung heißer Brammen dar. Die sensible Wärme der Brammen beim Verlassen der Stranggießanlage wird zu einem geringen Teil genutzt, um in der nachgeschalteten Warmwalzanlage den Brennstoffbedarf der Wärmöfen zu senken (Warmeinsatz). Werden die Brammen über Magnetkräne transportiert, ist die Temperatur auf 500°C begrenzt. Da sich der Produktionsprozess bis zur Stranggießanlage an der chemische Zusammensetzung des Materials orientiert und ab dem nachgeschalteten Warmwalzprozess am Gefüge und an der Geometrie, besteht in der Regel die Notwendigkeit einer Zwischenlagerung. Damit werden die Prozesse der Flüssigphase (Konverter, Stranggießanlage) und derjenigen der Warmumformung (Warmwalzwerk) entkoppelt. Zudem können äußere Rahmenbedingungen, wie durch Kunden gestellte Anforderungen (Liefertermin, Losgröße Qualität usw.), zu einer geringeren Warmeinsatzquote führen. Aktuell werden etwa 20 % der in Deutschland hergestellten Brammen warm im nachfolgenden Walzprozess eingesetzt.

3.2 Vorwärmung von Einsatzstoffen

Mit Einsatzstoffen sind hier ver- oder bearbeitete Rohstoffe gemeint, welche als Ausgangsstoffe für weitere Prozesse eingesetzt werden. Im Bereich der Hochofenroute zur Stahlherstellung sind dies z. B.

der Sinter für den Hochofen, der Schrott für den Konverter oder auch die Brammen für das Walzwerk.

Nachfolgend werden einige Beispiele für die Vorwärmung von Einsatzstoffen als Technologie zur Abwärmenutzung aufgeführt.

Beispiel Warmeinsatz von Sinter am Hochofen

Es ist denkbar, durch eine Nutzung der Restwärme des Sinters den Energiebedarf des Hochofens zur Roheisenherstellung zu senken. Praktisch gibt es in Deutschland diese Restwärmenutzung nur in einem von sechs Hüttenwerken. Hemmnisse hierfür sind die Schwierigkeiten in der Logistik innerhalb der Werke, die Temperaturbeständigkeit der verwendeten Transportbandmaterialien und vor allem die Auswirkungen auf die Verschiebung der Temperaturzonen innerhalb des Hochofens. Ob der Warmeinsatz von Sinter mit einer Effizienzsteigerung des Hochofens verbunden ist, muss gesondert diskutiert werden und ist nicht Bestandteil dieser Arbeit.

Beispiel Schrottvorwärmung

Bei der Schrottvorwärmung außerhalb des Konverters könnten Abwärmeströme eingesetzt werden. Der zur Kühlung des Konverterprozesses eingesetzte Schrott hat vorgewärmt eine geringere spezifische Kühlwirkung. Daher könnte mit externer Vorwärmung der Schrottanteil in der Konverterfüllung gesteigert werden. Aus metallurgischen Gründen ist der Schrottanteil und damit die Steigerungsrate begrenzt. Sie ist von einer Reihe von Parametern wie Schrottqualität und Produktprogramm anhängig und nicht allgemein quantifizierbar.

Beispiel Vorwärmung im Walzwerk

Zum Vorwärmen von Brammen besitzen Walzwerksöfen seit den 1970er Jahren eine sogenannte Konvektionszone. In diesen Bereichen der Öfen sind keine Brenner eingebaut. Heiße Ofenatmosphäre aus den aktiv befeuerten Zonen wird im Gegenstrom zum kalt eintretenden Nutzgut durch den Ofen geführt. In der nicht beheizten Konvektionszone gibt das Abgas einen Teil seiner Wärme an das kalte Nutzgut ab.

3.3 Medienvorwärmung

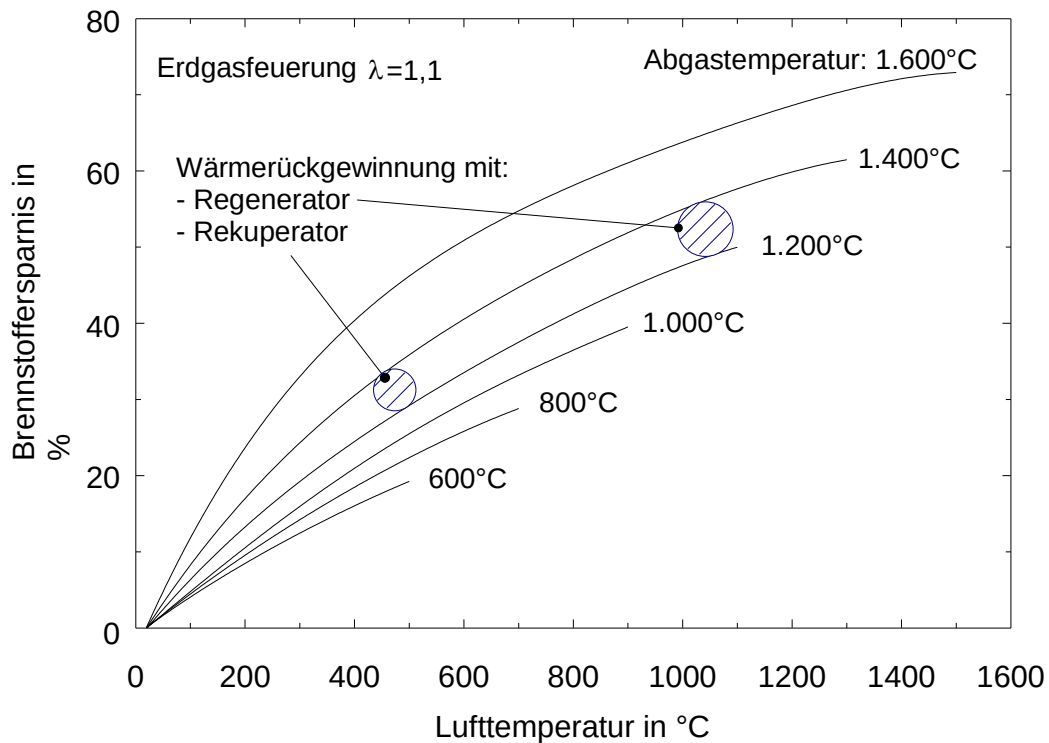
Die Abwärme von Abgasen unterschiedlicher Prozesse kann zur Vorwärmung der eingesetzten Brenngase und der Verbrennungsluft verwendet werden. Die dafür eingesetzten Apparate benötigen gefasste Abwärmeströme. Diese Technologie wird als Medienvorwärmung bezeichnet. Dabei wird zwischen regenerativen und rekuperativen Techniken unterschieden.

Rekuperativ bedeutet, dass die Wärme eines **Fluids** über die wärmeübertragende Wand an ein anderes Fluid übertragen wird. Beide Fluide befinden sich gleichzeitig im Rekuperator. Die wärmeübertragende Wand ist gasdicht zu gestalten und wird daher überwiegend metallisch ausgeführt. Die Einsatztemperatur ist auf ca. 800 °C begrenzt. Das Kapazitätsstromverhältnis der beiden Fluide zueinander beeinflusst maßgeblich die am Eintritt und Austritt des Rekuperators erzeugten Temperaturen der Fluide. In Rekuperatoren kann idealisiert betrachtet ein Gleichstrom, Gegenstrom oder Kreuzstrom der beiden Fluidströme zueinander vorliegen, was Einfluss auf die Wärmeübertragung hat.

Regeneratoren werden i.d.R. diskontinuierlich betrieben. Die übertragene Wärme wird in einem geeigneten Wärmespeicher, z. B. Steine im Winderhitzer oder Wabenkörper im Regenerativbrenner, zwischengespeichert. Der Wärmespeicher wird zeitlich getrennt vom heißeren oder kälteren Medium umströmt. Dabei wird im ersten Schritt der Speicher durch ein umströmendes heißes Medium erwärmt. Nach Umschaltung wird im zweiten Schritt der Speicher von einem kalten Medium umströmt, das dem Speicher die Wärme entzieht und dabei selbst erwärmt wird. Beide Schritte finden abwechselnd statt.

Abbildung 11 zeigt die Brennstoffeinsparung abhängig von der Brennlufttemperatur für einen erdgasbeheizten Ofen. Mit dem Regenerator, $T_{BL} = 1.100\text{ °C}$, werden rd. 55 % des Brennstoffes eingespart, mit Rekuperator, $T_{BL} = 450\text{ °C}$, rd. 30 %, jeweils im Vergleich zu Anlagen ohne Wärmerückgewinnung. Bezogen auf den Rekuperator werden mit thermischen Regeneratoren rd. 30 % Brennstoff eingespart. Durch die Medienvorwärmung wird ein Teil der Abgasenthalpie einem Prozess zugeführt. Der Abgasverluststrom und der Brennstoffbedarf sinken.

Abbildung 11: Brennstoffersparnis und Brennluftvorwärmung durch rekuperative und regenerative Wärmerückgewinnung bei unterschiedlicher Abgastemperatur



Quelle: (Adler, Bender, Marion, Hirz, & Eberwein, 2011)

Mit einer Medienvorwärmung kann bei bestehendem Brenngaseinsatz die Prozesstemperatur angehoben werden. Es können auch wertvolle Brenngase wie Erdgas und Koksofengas durch heizwertarme Kuppelgase wie Hochofengas ersetzt werden (Adler, Bender, Marion, Hirz, & Eberwein, 2011). Verschiedene Beispiele für Medienvorwärmung im integrierten Hüttenwerk werden nachfolgend erläutert.

Beispiel Nutzung des Abgases am Sinterband und der Abluft am Sinterkühler

Von einer Sinteranlage in Deutschland ist bekannt, dass die Wärme aus der Sinterabluft mit Thermalöl ausgekoppelt und zur Vorwärmung von Brennluft und Brenngas eines Winderhitzers verwendet wird. Beim Sinterkühler beträgt die Temperatur der gefassten Abluft vor dem Filter ca. 160 °C, ist trocken und enthält keine Rauchgasbestandteile, jedoch stark abrasiv wirkende Stäube. Eine weitere bereits umgesetzte Möglichkeit ist die Nutzung eines Teils der Wärme des gefassten Abgases am Sinterband, z. B. zur Vorwärmung von Verbrennungsluft für die Brenner des Zündofens. Wärmeübertrager zur Auskopplung dieser Abwärmeströme aus Abgas und Abluft sind für staubbeladene, abrasive Bedingungen ausgeführt und daher kostenintensiv und vom Wirkungsgrad begrenzt. Vor Eintritt in nachgeschalteten Ventilatoren müssen die Gasströme durch Filter gereinigt werden, wobei die Temperatur weiter abgesenkt wird.

Beispiel Medientvorwärmung am Winderhitzer

Die Winderhitzer des Hochofens sind technisch gesehen regenerativ arbeitende Wärmeübertrager, die es ermöglichen, den Heißwind auf eine Temperatur bis 1.300 °C zu erwärmen. Um die notwendige Wärme bereitzustellen, werden in Winderhitzern Gase verbrannt (i.d.R. Hochofengas). Die Abgaswärme von Winderhitzern wird derzeit in unterschiedlicher Weise und unterschiedlichem Umfang zurückgewonnen. Zum einen wird die Abgasenthalpie z. B. über eine Thermalölerhitzung zur Vorwärmung der Brenngase eingesetzt, zum anderen werden Wärmerohre (Heatpipes) verwendet. An einigen Standorten kann die Abwärme nicht ausgekoppelt werden, da das Bauvolumen für die erforderlichen Anlagenteile nicht zur Verfügung steht.

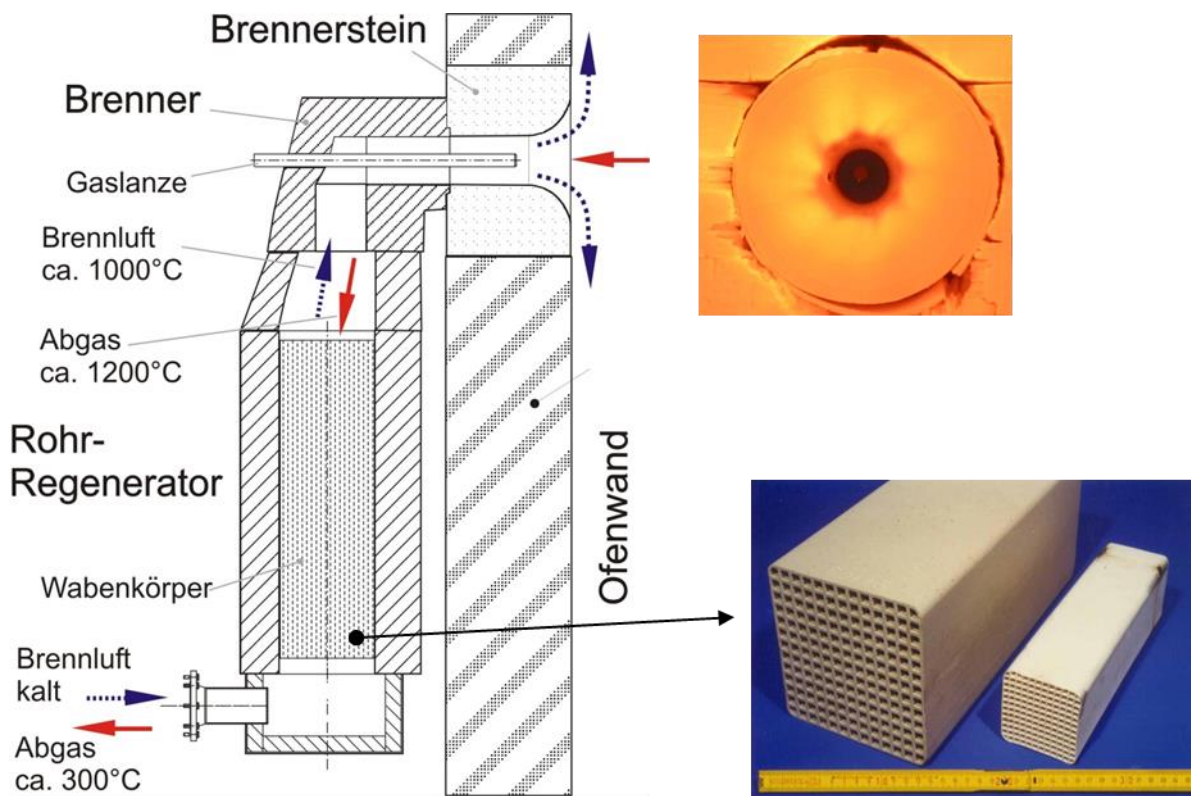
Beispiel Medientvorwärmung an Wärmöfen

In Wärmöfen der Warmwalzwerke wird in allen deutschen Hüttenwerken das Abgas nach Verlassen des Ofengefäßes über Zentralrekuperatoren geführt, in denen die Brennluft des Ofens vorgewärmt wird. Diese vorgewärmte Brennluft wird über Sammel- und Verteilleitungen zu den Brennern geführt. Zusammen mit der Brammenvorwärmung in der Konvektivzone wird ca. 50 % der Abgasenthalpie wieder in den Prozess zurückgeführt und so über 30 % Brenngas eingespart.

An wenigen Wärmöfen werden lokale Regeneratoren an den Brennern eingesetzt. Diese führen bei Einsatz an Altanlagen zur Leistungssteigerung. Bei Neuanlagen kann das Ofengefäß kompakter ausgeführt werden, da die Konvektivzone nicht erforderlich ist. Bei Alt- und Neuanlagen führt dies zu einer Einsparung des spezifischen Brennstoffbedarfs von 5 bis 10 %.

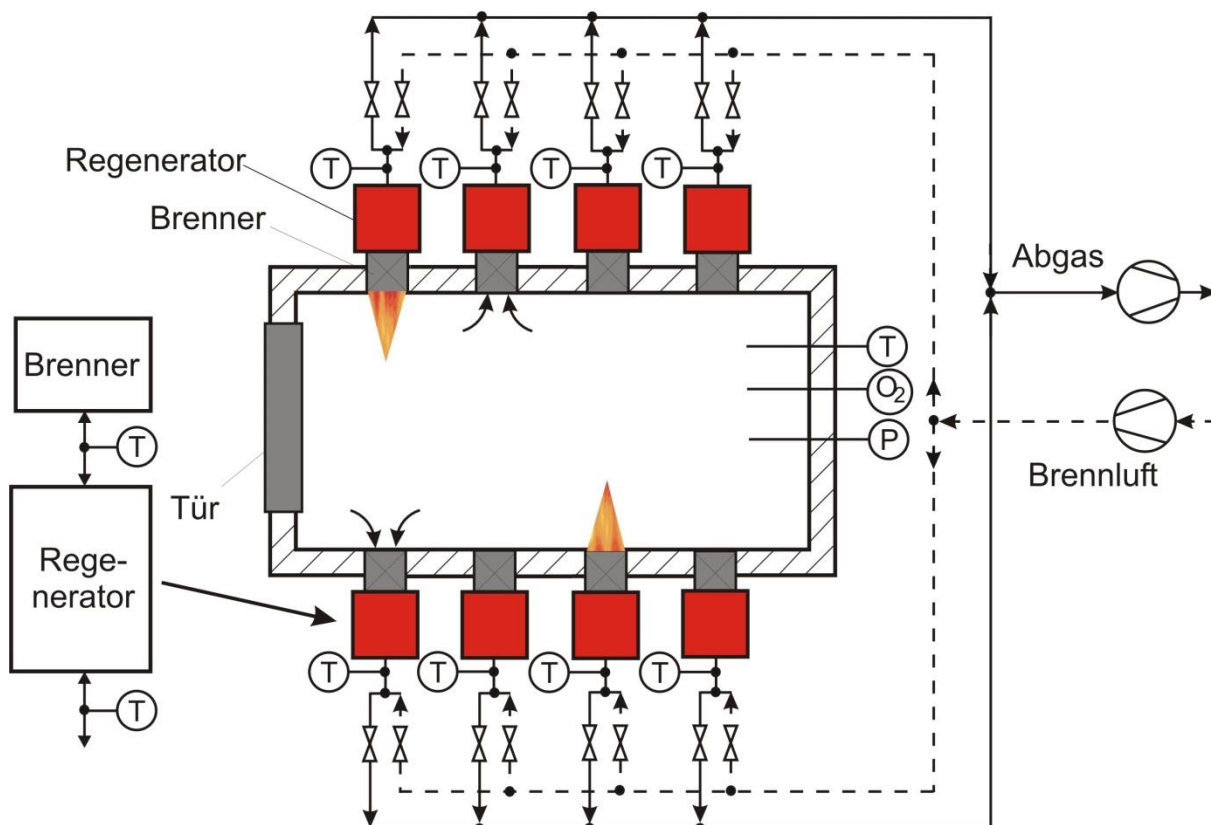
Der Einsatz thermischer Regeneratoren kann an Wärmöfen von Warmwalzwerken auch zur Substitution hochwertiger Energieträger, wie z. B. Erdgas, durch niederkalorige Kuppelgase genutzt werden. Ein Beheizungssystem, z. B. bestehend aus einem Regenerator und keramischem Hochtemperaturbrenner, ist in Abbildung 12 im Detail dargestellt. Heißes Abgas wird vom Ofenraum über den Brenner zum Wärmespeicher des Regenerators geführt. Dort gibt das Abgas den Großteil seiner Wärme ab und verlässt den Regenerator am unteren Ende mit ca. 300 °C. Im Gegenteil wird die Abgasabsaugung abgeschaltet und am Regeneratorfuß tritt nun kalte Brennluft ein. Diese wird durch den Wärmespeicher geleitet und auf ca. 1.000 °C aufgeheizt. Als Wärmespeicher dienen keramische Wabenkörper. Die heiße Brennluft wird im direkten Anschluss in den Brenner geleitet. Bei dieser Art der Beheizung werden in der Regel gleichzeitig ebenso viele Regeneratoren be- wie entladen (s. Abbildung 13), um möglichst wenig Abgas ungenutzt über einen Kamin abzuführen. Daher sind bei Regenerativsystemen mehr Brenner installiert als an konventionellen Öfen.

Abbildung 12: Beheizungstechnik mit Regenerator und keramischem Brenner



Quelle: (von Gersum, Adler, & Bender, 2011, S. 34-37)

Abbildung 13: Schema für eine effektive Umsetzung an einem Wärmofen



Quelle: (von Gersum, Adler, & Bender, 2011, S. 34-37)

Beispiel Warmwassererzeugung

Für die Bauteilkühlung in Wärmöfen von Walzwerken kann eine Kaltkühlung eingesetzt werden. Dafür wird Kühlwasser verwendet, das bei Austritt eine Temperatur zwischen 35 und 85 °C aufweist. Dieses Niveau ist lediglich zur Vorwärmung anderer Ströme nutzbar, wie einer Vorwärmung des Speisewassers für den Kessel am Kamin.

3.4 Dampferzeugung

Abwärme von Anlagen kann über das Medium Dampf nutzbar gemacht werden. Dampf wird in integrierten Hüttenwerken über vorhandene Dampfnetze zu den Verbrauchern geführt. Durch einen nachgeschalteten Überhitzer können auch der Druck und die Temperatur angehoben werden. In der Regel sind zwei unterschiedliche Dampfnetze in Betrieb, ein Hochdruck-Dampfnetz bis 40 bar mit **überhitztem Dampf** und ein Niederdruck-Dampfnetz mit **Sattdampf** bis 20 bar. Der Dampf kann zur Gewinnung von mechanischer bzw. elektrischer Energie genutzt oder als Heizmedium direkt eingesetzt werden. Bei Dampfnetzwerken ist zu beachten, dass das verwendete Speisewasser enthärtet werden muss und dass – wenn möglich – auch eine Kondensatrückführung stattfinden sollte. Speisewasser kann durch Abwärme vorgewärmt in den Prozess eingeleitet werden. Einige Stahlgüten erfordern geringe Abkühlgradienten. Die resultierende geringe Wärmestromdichte erschwert eine Nutzung.

Beispiel Dampferzeugung im Oxygenstahlwerk

Das aus dem Konverter austretende Konvertergas, im Mittel mit einer Temperatur von ca. 1.500 °C (siehe Kapitel 4.5.1), wird mit Hilfe einer Haube kanalisiert. Anschließend muss es sicher gekühlt und gereinigt werden. Ein Teil des bei der Kühlung mit Wasser entstehenden Dampfes wird für den Betrieb der Konverter- und Vakuumanlagen (Sekundärmetallurgie) im Stahlwerk als Vakuum-, Sperr- und Treibdampf genutzt, der übrige Dampf kann ins Werksnetz eingespeist werden.

Beispiel Dampferzeugung in Stranggieß- und Walzwerksanlagen

An einigen Stranggieß- und Walzwerksanlagen werden sogenannte Kühltunnel eingesetzt. Dabei wird die Abstrahlung und somit die Kühlung der Bramme durch die Umgebungsluft verringert. Zudem kann ein kleiner Teil der sensiblen Wärme von Brammen zur Dampferzeugung genutzt werden (SMS, 2017). In einer Pilotanlage (s. Abbildung 14) wurde dazu nachgewiesen, dass die Strahlungswärme aus heißen Brammen zurückgewonnen und zu Sattdampf umgewandelt werden kann. Es wurden ca. 3 % der in den Brammen gespeicherten Energie zurückgewonnenen (Witterstein, 2015).

Die Brammen strahlen abhängig von ihrer Oberflächentemperatur zwischen 45 bis 70 kW je Quadratmeter ab. Die Wärmeübertrager nehmen die Strahlungsenergie auf und wandeln diese mit Wasser in ein Dampf-Wasser-Gemisch um. In der angeschlossenen Dampftrommel wird das Gemisch getrennt und der Dampf an das Werksnetz abgegeben. Die Wärmestromdichte ist begrenzt, daher besteht ein größerer Platzbedarf für die Anlagentechnik. Beachtet werden müssen die Auswirkungen der veränderten Abkühlgeschwindigkeit bei Installation einer Abwärmenutzung auf die Materialqualität und auf den Produktdurchsatz.

Abbildung 14: Pilotanlage zur Nutzung der Strahlungswärme von Brammen



Quelle: (Witterstein, 2015)

Beispiel Dampferzeugung in Walzwerksöfen

In Wärmöfen der Warmwalzwerke wird das heiße Abgas in den Zentralrekuperatoren zur Brennluftvorwärmung und im Anschluss zur Dampferzeugung genutzt.

Für die Bauteilkühlung in Wärmöfen von Walzwerken kann eine Heißkühlung eingesetzt werden. Dafür wird heißes Kesselwasser mit Siedetemperatur, beispielsweise aus einer Dampftrommel, der Bauteiltrommel zugeführt und dort verdampft (Verdampfungskühlung) (Reining, 2017). Der Dampf wird in die Dampftrommel zurückgeführt, direkt zu einem lokalen Verbraucher geleitet oder in das werksinterne Dampfnetz eingespeist.

3.5 Wärmespeicher

Wärmespeicher sind dann notwendig, wenn Wärme zeitlich versetzt zum Wärmebedarf erzeugt wird. Bei betriebsinternen Prozessen beträgt die Speicherzeit meistens nur Stunden bzw. Tage für die Abwärmennutzung. Die Speicherzeit beeinflusst die Größe und Ausführungsform des Speichers, d. h. je länger gespeichert werden soll, umso größer ist der Speicher auszulegen.

Je nach Art der Speicherung werden sensible Speicher, Latentwärmespeicher und thermochemische Speicher unterschieden. Sensible Speicher ändern beim Be- und Entladen ihre fühlbare Temperatur. Hier ist die Speicherkapazität abhängig von der Wärmekapazität und Masse des Speichermediums sowie von der nutzbaren Temperaturdifferenz. Latentwärmespeicher ändern zur Wärmespeicherung den Aggregatzustand des Speicherstoffs. Damit ist die Speicherkapazität von der notwendigen Energie zur Zustandsänderung abhängig. Bei thermochemischen Speichern wird die volumenspezifische Speicherkapazität von endo- und exothermen chemischen Reaktionen des Speichermediums bestimmt. Die jeweiligen Speichersysteme unterscheiden sich hinsichtlich ihrer erzielbaren Energiedichten und Temperaturbereiche voneinander, siehe Tabelle 4.

Tabelle 4: Optimale Temperaturbereiche verschiedener genutzter Speicherprinzipien

Speicherart	Speichermedium	Anwendungsbeispiel	Temperaturbereich
Sensibel	Wasser	Wärmofen im Warmwalzwerk	0-100 °C
	Thermoöl	Hochofen	bis 350 °C
	Keramiksteine	Cowper	bis 1.500 °C
	Wabenkörper, Kugeln	Regenerator	bis 1.300 °C
Phasenwechsel	Dampf	Konverter	bis 300 °C

Quelle: nach (Ausfelder & u.a., 2015)

3.6 Stromerzeugungsverfahren

Industrielle Abwärme kann zur Stromerzeugung genutzt werden. Verschiedene technische Verfahren, die sich u.a. im Temperaturniveau der bereitgestellten Abwärme unterscheiden, können zur Stromerzeugung eingesetzt werden. Einen Überblick gibt Tabelle 5.

Tabelle 5: Technische Verfahren zur Stromerzeugung aus industrieller Abwärme

Techn. Verfahren	Temperaturniveau
Wasserdampferzeugung mit Wärmekraftmaschine	250 – 540 °C
ORC-Prozess	70 – 500 °C
Kalina-Prozess	um 90 °C
Stirlingmotor	650 – 1.000 °C
TEG	200 – 650 °C

Die Angaben für die Kreisprozesse (Wasserdampf, ORC) beziehen sich auf das Arbeitsmittel. Für eine auszukoppelnde Wärme sollte ein Temperaturgradient von mindestens 20 K vorliegen.

Nachfolgend werden die in Hüttenwerken derzeit einsetzbaren Technologien näher beschrieben.

3.6.1 Wasserdampferzeugung mit Wärmekraftmaschine

Dampfturbine

Eine Dampfturbine wird angetrieben, indem heißer, unter hohem Druck stehender Dampf entspannt wird. Dabei wird das Arbeitsmedium Dampf auf ein niederes Druck- und Temperaturniveau entspannt. Die gewonnene Arbeit der Turbine wird zur elektrischen Energieerzeugung durch einen Generator genutzt. Nach der Turbine wird das Arbeitsmedium vollständig kondensiert und auf Umgebungstemperatur abgekühlt. Danach wird das Arbeitsmittel komprimiert, erwärmt und verdampft und der Kreislauf beginnt erneut (Pribe, 2008). Turbinen werden kontinuierlich betrieben.

Dampfmotor

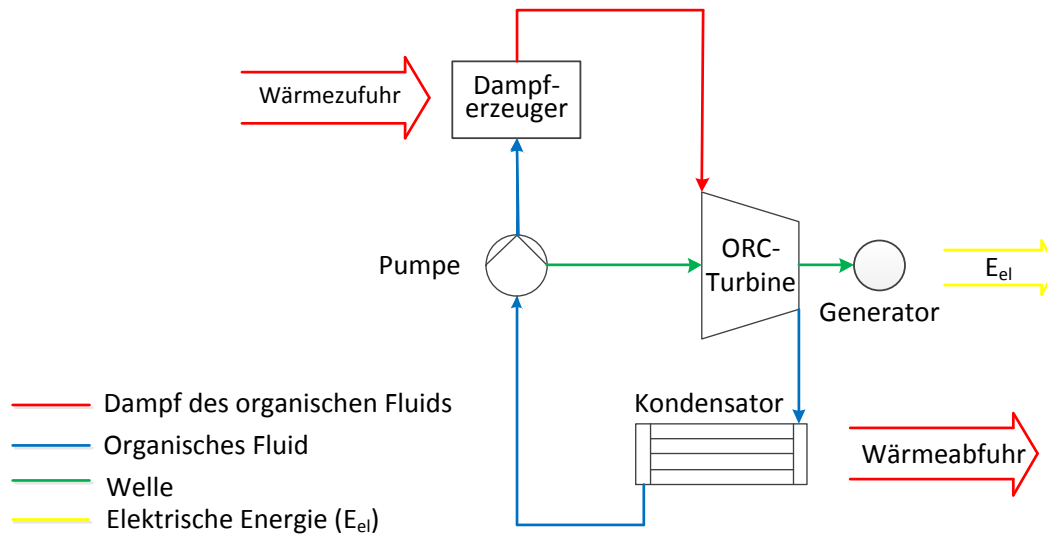
Statt in einer Turbine kann die Expansion des Arbeitsmittels auch in einem Dampfmotor erfolgen, der ebenfalls Strom erzeugen kann. Dampfmotoren werden häufig im Bereich kleinerer Leistungen eingesetzt. Motoren sind besser regelbar als Turbinen, sollten jedoch ebenfalls kontinuierlich betrieben werden.

3.6.2 ORC-Prozess

Ist die Abwärmtemperatur für eine Wasserdampferzeugung zu niedrig, so können organische Arbeitsmittel statt des Wassers eingesetzt werden. Diese Arbeitsmittel werden nach Wert ihres Siede-

punktes ausgewählt. Die Kombination mit Wärmekraftmaschinen zur Stromerzeugung ist, wie in Kap. 3.6.1 beschrieben, möglich. Der Prozess wird als ORC-Prozess bezeichnet (Abbildung 15).

Abbildung 15: Schematische Darstellung eines ORC-Prozesses

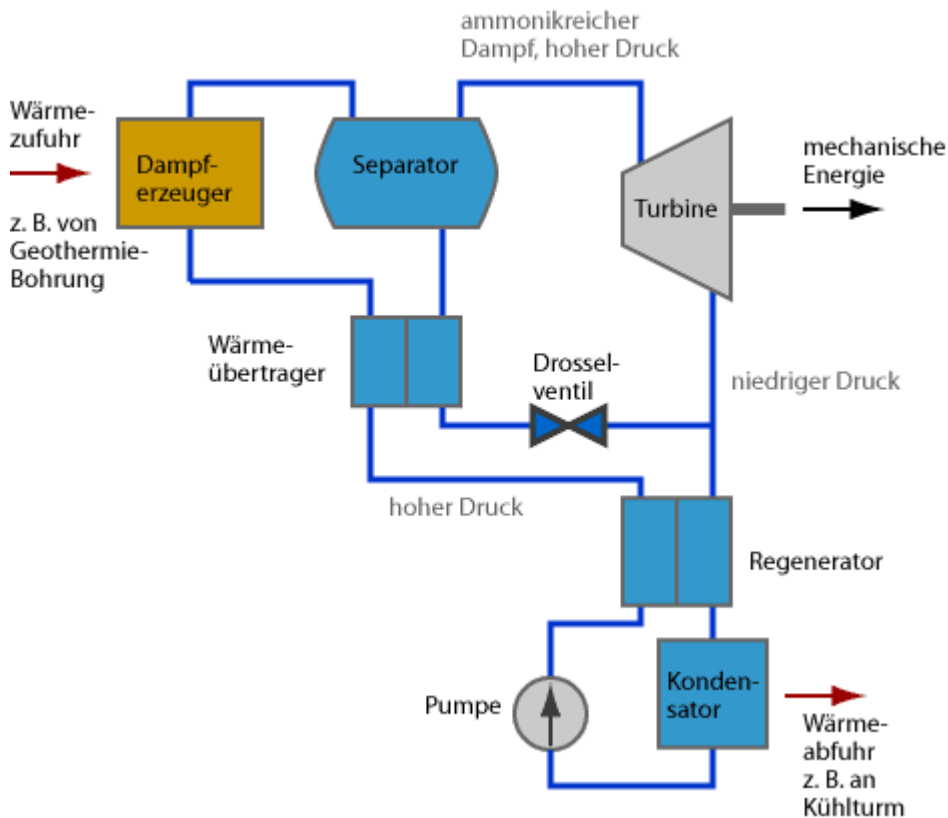


Quelle: (Werschky, 2010)

3.6.3 Kalina-Prozess

Der Kalina-Prozess arbeitet mit einem Wasser-/Ammoniak-Gemisch als Arbeitsmittel. In Abbildung 16 ist der schematische Aufbau einer Kalina-Anlage dargestellt. Im Verdampfer wird das flüssige Arbeitsmittel unter Volumenzunahme zu gasförmigem Ammoniak-Wasserdampf-Gemisch verdampft. Anschließend wird in einem Separator der ammoniakreiche Dampf von der ammoniakarmen flüssigen Phase getrennt. Der Dampf wird in eine Turbine geleitet und entspannt. Die abgetrennte heiße Flüssigkeit wird in einem Wärmeübertrager abgekühlt und dann dem von der Turbine kommenden entspannten Dampf wieder zugeführt. Dabei reduziert sich der Druck des Dampfes weiter. In einem Kondensator wird der Dampf vollständig verflüssigt. Danach wird die Flüssigkeit über eine Pumpe wieder auf einen höheren Druck verdichtet und dem Verdampfer zugeführt. Um den Wirkungsgrad des Prozesses zu verbessern, kann ein Regenerator eingesetzt werden, der dem Dampf vor dem Kondensator einen Teil der Wärme entzieht und damit die Flüssigkeit auf dem Weg zum Verdampfer vorwärmt.

Abbildung 16: Schematischer Aufbau einer Anlage zur Nutzung des Kalina-Prozesses



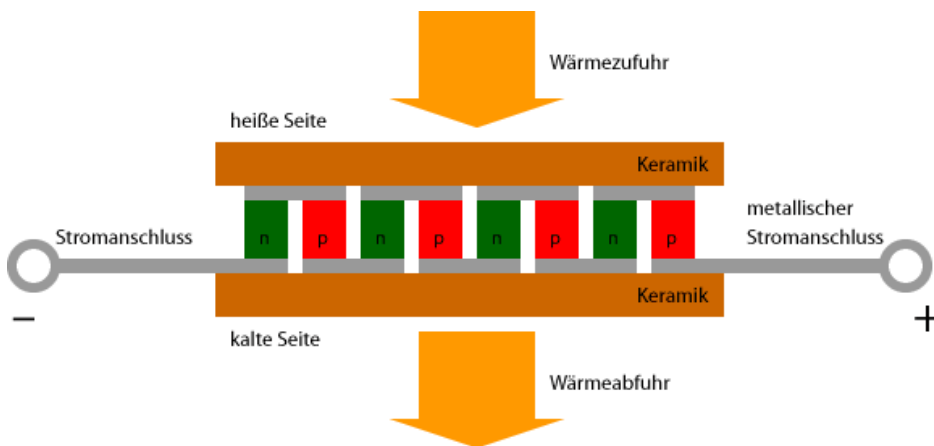
Quelle: (Paschotta, https://www.energie-lexikon.info/kalina_kreisprozess.html, 2014)

3.6.4 Thermoelektrische Generatoren (TEG)

Thermoelektrische Generatoren gewinnen elektrische Energie direkt aus Wärme. Im Gegensatz zu Motoren und Turbinen enthalten sie keine beweglichen Teile. Funktionsgrundlage ist ein thermoelektrischer Effekt in Halbleitern, der Seebeck-Effekt. Hierbei müssen zwei unterschiedlich dotierte Halbleitermaterialien über metallische elektrische Kontakte miteinander verbunden werden (siehe Abbildung 17). Wenn sich die Temperatur der oberen und unteren Seiten erheblich unterscheidet, entsteht eine elektrische Spannung zwischen den Stromanschlüssen links und rechts. Dabei findet ein Wärmefluss von der heißen zur kalten Seite statt, der von der Temperaturdifferenz angetrieben wird. TEG sind wartungsarm und liefern eigenständig elektrische Energie, direkt abhängig von der anliegenden Temperaturdifferenz.

Im Kühltunnel von Stranggieß- und Walzwerksanlagen kann beispielsweise ein kleiner Teil von ca. 0,3 % der sensiblen Wärme von Brammen zur direkten Stromerzeugung mittels TEG genutzt werden. Eine technische Begrenzung stellt hier die zulässige Temperatur für die TEG-Module dar. Z. Zt. gibt es noch keine großtechnische Anwendung von TEG in der Eisen- und Stahlindustrie. Die Standzeit verfügbarer Module ist zu gering, die spezifischen Investitionskosten sind zu hoch.

Abbildung 17: Aufbau eines thermoelektrischen Generators



Quelle: (Paschotta, https://www.energie-lexikon.info/thermoelektrischer_generator.html)

3.6.5 Stirlingmotor

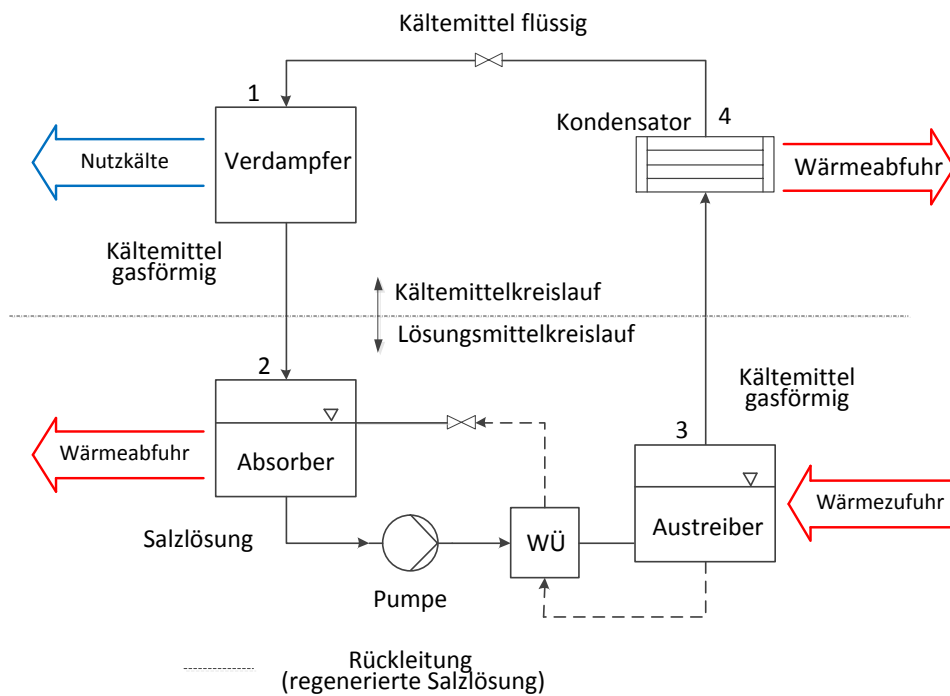
Der Stirlingmotor ist ein Heißgasmotor mit einer äußeren kontinuierlichen Wärmezufuhr bzw. -abfuhr. Er ist aus zwei beweglichen Kolben aufgebaut. Der Arbeitskolben ist dabei für die Nutzung der technischen Arbeit und der Verdrängerkolben für die Verschiebung des Arbeitsgases verantwortlich (z. B. Wasserstoff oder Helium). Im Unterschied zu Verbrennungsmotoren (z. B. Otto- oder Dieselmotor) findet die Wärmezufuhr nicht über einen Verbrennungsvorgang im Inneren von Zylindern statt. Es kann somit beliebiger Brennstoff oder auch Abwärme als Wärmequelle genutzt werden. Die Problematik der Emission von beispielsweise NO_x , CO oder Partikeln von Verbrennungsmotoren stellt sich nicht. Der Motor läuft zudem ruhiger und hat einen geringeren Verschleiß. Andererseits führen die schlechtere Regelbarkeit, der geringere Wirkungsgrad und die geringere Leistungsdichte zu einer geringeren Wirtschaftlichkeit. Der Stirlingmotor findet deshalb bisher keine großtechnische Verwendung.

3.7 Kälteerzeugung

Eine weitere Möglichkeit zur Nutzung industrieller Abwärme ist die Kälteerzeugung. Es wird zwischen Adsorptions- und Absorptionskältemaschinen unterschieden. Diese sind überwiegend thermisch und zu einem geringeren Anteil über Leistung einer Pumpe angetrieben. Für die Ad- und Absorptionsprozesse kann Abwärme genutzt werden. Das Verfahrensprinzip ist bei beiden Kältemaschinen gleich. Es wird ein Kältemittel bei niedriger Temperatur verdampft. Damit entzieht es der Umgebung Energie und erzeugt nutzbare Kälte. Das Kältemittel kondensiert entweder an einem Feststoff aus (Adsorptionskältemaschine) oder wird in einem Lösungsmittel gelöst (Absorptionskältemaschine). Die Abwärme wird zum Austreiben des Kältemittels genutzt, also um den Feststoff bzw. das Lösungsmittel wieder zu regenerieren.

Die Arbeitsweise einer Absorptionskältemaschine ist exemplarisch in Abbildung 18 dargestellt. Ein Kältemittel wird bei niedriger Temperatur verdampft (1). Dabei wird die „Nutzkälte“ erzeugt, also der Umgebung Wärme entzogen. Das verdampfte Kühlmittel wird in einem Lösungsmittel (im Bild die Salzlösung) absorbiert (2), frei werdende Wärmeenergie wird abgeführt. Das mit dem Kältemittel gesättigte Lösungsmittel wird durch eine Pumpe in den Austreiber (3) gefördert, wo das Kühlmittel durch Wärmezufuhr (z. B. Abwärme) ausgetrieben wird. Das aufbereitete Lösungsmittel wird zurück in den Absorber gefördert, der Kühlmitteldampf wird im Kondensator (4) unter Wärmeabfuhr vollständig auskondensiert (Wersch, 2010).

Abbildung 18: Verfahrensschema einer Absorptionskältemaschine



Quelle: (Werschy, 2010)

3.8 Fernwärme

Fernwärme bietet die Möglichkeit, Wärme für Heizzwecke mit großer Einspeiseleistung zentral bereitzustellen und mittels eines leitungsgebundenen Verteilsystems, z. B. zur Beheizung von größeren Wohnquartieren, zu nutzen. Die thermische Energie wird über wärmegeämmte Rohrsysteme transportiert. Fernwärmesysteme bieten die Möglichkeit, mehrere industrielle Abwärmequellen zu verbinden und für Heizzwecke von Gebäuden zu nutzen. Die Fernwärmebereitstellung erfolgt z. B. in der Fernwärmeschiene Niederrhein auf einem Temperaturniveau von 180 °C (Buchner, 2017). An Fernwärmesysteme können auch Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)-Anlagen angeschlossen werden. Hier wird Wärme parallel zur Stromproduktion erzeugt, um die Energieeffizienz zu erhöhen.

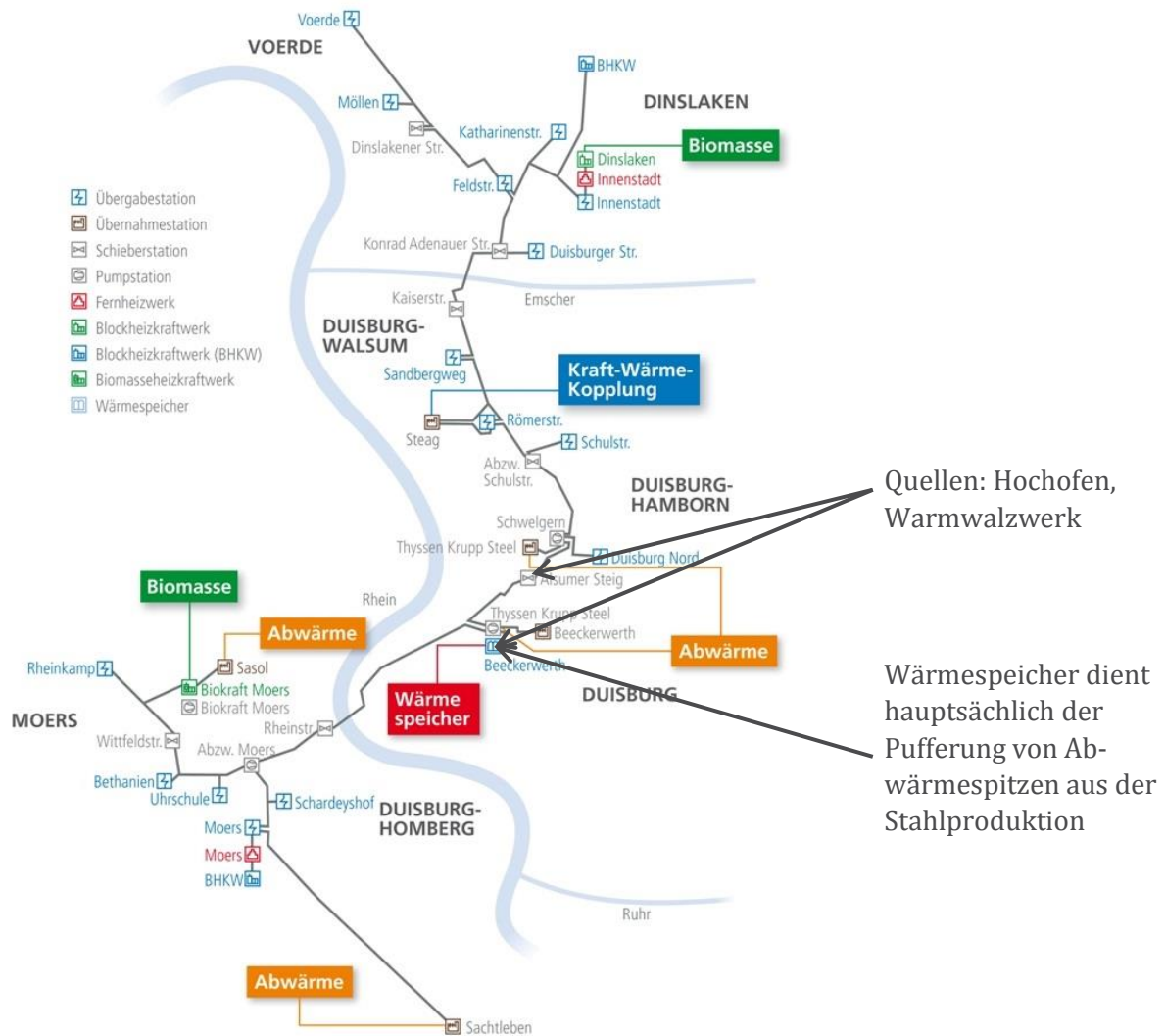
Fernwärme kann direkt über Dampf oder Wasser oder indirekt über Wärmeübertrager an das Netz übergeben werden. Im niedrigen Temperaturbereich unter 100 °C wird Wasser für Heizung und Warmwasserbereitstellung eingespeist. Weiterhin kann es in die Rückführung des Netzes eingekoppelt werden. Bei höherer Temperatur wird Dampf als Wärmeträger eingesetzt. Ähnlich wie bei Windkraft- und Solaranlagen zur Stromerzeugung liegen schwankende Randbedingungen in den Hüttenwerken bei den Abwärmeströmen vor. Die Abwärmeströme sind von der Produktion vorgegeben.

Tabelle 6: Temperatur- und Druckbereiche der unterschiedlichen Netztypen

Netztyp	Überdruck in bar	Temperatur in °C
Hochdruckdampfnetz	2 - 15	120 - 160
Hochdruckheißwasser	6 - 20	120 - 180
Niederdruckheißwasser	4 - 6	70 - 120
Warmwasser	4 - 10	< 100

Quelle: (Junge, 2013)

Abbildung 19: Fernwärmeschiene Niederrhein



Quelle: (Lutsch, 2016)

4 Energiebilanzen und Abwärmepotenziale der Hauptanlagen

4.1 Allgemeine Hinweise zur Energiebilanz

4.1.1 Bilanzraum der Hauptanlagen

In Kapitel 4 werden typische Energiebilanzen von Hauptanlagen der in Deutschland in integrierten Hüttenwerken eingesetzten Verfahren zur Roheisen- und Stahlherstellung dargestellt. Standortspezifische Besonderheiten der Unternehmen wurden in der Bilanzierung durch eine Mittelwertbildung bei der Datenerfassung und Darstellung der jeweiligen Verfahren berücksichtigt. Vorgelagerte Prozesse und Transporte sowie die Anlagen zur Koksherstellung wurden nicht berücksichtigt.

Die Verfahren werden dargestellt jeweils mittels:

- ▶ eines Sankey-Diagramms der Energieflüsse mit Darstellung möglicher Abwärmepotenziale und
- ▶ einer Tabelle über die Energiebilanz mit den ein- und austretenden Bilanzgrößen.

Um die betrachteten Hauptanlagen wurden Bilanzräume definiert, die teilweise in Prozessstufen oder Nebenanlagen unterteilt wurden. Die Nebenanlagen wurden dann jeweils einzeln bilanziert und zur Gesamtbilanz zusammengeführt. Eingabewerte sind rot hinterlegt, die für Gasvolumenströme verwendeten spezifischen Daten wurden blau gekennzeichnet zur Unterscheidung gegenüber Feststoffen und Flüssigkeiten.

Die Energiebilanzen werden auf den Produktmassenstrom der jeweiligen Anlagen bezogen und als spezifische Größen pro t Produkt der Anlagen angegeben (Sinter, Roheisen RE, flüssiger Rohstahl RSflüssig, fester Rohstahl RSfest, Warmband WB). Für die Gesamtsumme über die Anlagen werden die Einzelenergieströme addiert und die Summe wird auf den Massenstrom RSfest bezogen. Die Produktionsmassenströme sind dem Jahrbuch Stahl 2015 und Experteninterviews entnommen. RSfest ist dabei geringer als RSflüssig, da durchschnittlich 2,35 Massenprozent des Flüssigstahl-Massenstroms bei oder nach dem Gießen des Stahls innerhalb des Produktionsprozesses rezirkuliert werden müssen, z.B. als Stahlschrott von Kopfenden der Brammen, Schlacke oder Staub.

Brammen sind Zwischenprodukte der Stahlherstellung, die auch über die Werksgrenze gehandelt werden. Ein Teil der in der Stranggießanlage hergestellten Brammen wird auch an externen Standorten gewalzt, zum Teil aber auch als Zwischenprodukte zum Walzen von extern bezogen.

Unter Warmband (WB) werden die Massenströme der am Standort warm ausgewalzten Produkte wie Warmbreitband und Quartobleche zusammengefasst. Die Massenströme sind Expertenwissen entnommen (Wirtschaftsvereinigung_Stahl, 2017).

4.1.2 Enthalpieströme und Energiebilanzen

Fühlbare Wärme

Die Energiebilanzen der Anlagen werden in Anlehnung an (Grassmann, 1970) ermittelt. Die Enthalpieströme für die sensible Energie werden gemäß Formel (1) bestimmt. Die Bezugstemperatur beträgt 15 °C. Dies ist die angenommene mittlere Temperatur der Einsatzstoffe.

$$\dot{H} = \dot{m} \cdot c_{pm} \cdot (\vartheta - \vartheta_{Bezug}) \quad (1)$$

$\dot{H}$: Enthalpiestrom

$\dot{m}$: Massenstrom

c_{pm} : mittlere isobare spezifische Wärmekapazität

ϑ : Temperatur

ϑ_{Bezug} : Bezugstemperatur

Dabei wird die fühlbare Wärme der ein- und austretenden Stoffströme $\dot{m}$ mit der mittleren spezifischen Wärmekapazität c_{pm} (bei konstantem Druck) der jeweiligen Stoffe für eine Bezugstemperatur von 15 °C berechnet.

Viele Rohstoffe besitzen bei der Chargierung zu den jeweiligen Prozessen Umgebungstemperatur. Bei der Bilanzierung ihrer Enthalpieströme wird von einer mittleren Umgebungstemperatur von 15 °C ausgegangen. Daraus ergibt sich in Verbindung mit der vorherigen Festlegung die Enthalpie-Bezugstemperatur von 15 °C, dass diese Rohstoffe bei der Umgebungstemperatur von 15 °C definitionsgemäß eine fühlbare Wärme (Enthalpie) von „Null“ besitzen.

Anhang 1 gibt einen Überblick über die verwendeten Stoffdaten der relevanten Stoffe im Hüttenwerk inkl. der verwendeten Ausgleichpolynome zur Bestimmung der Temperaturabhängigkeit dieser Größen. Die mittlere Temperatur eines Massenstroms wird ermittelt aus der Summe der einzelnen Enthalpieströme dividiert durch den Gesamtmassenstrom.

Brennstoffenergie

Die Enthalpie der Brennstoffenergieströme wird an den Bilanzgrenzen aus der Summe der fühlbaren Wärme und des unteren Heizwerts h_u berechnet.

$$\dot{H}_B = \dot{m}_B \cdot c_{pm} \cdot (\vartheta - \vartheta_{Bezug}) + \dot{m}_B \cdot h_u \quad (2)$$

h_u : unterer Heizwert

Auch Nebenprodukte der Hüttenwerksprozesse wie z. B. Hochofengas oder darin enthaltene Stäube besitzen brennbare Komponenten. Der Energieanteil dieser Stoffe wird innerhalb des Hüttenwerks verwertet und ihre Enthalpieströme sind ebenfalls entsprechend obiger Gleichung zu bilanzieren.

Enthalpien bei Phasenübergang, Mischungsenthalpie

Bei der Erstellung der Energiebilanzen ist bei einigen Stoffen ebenfalls der Phasenübergang fest/flüssig bzw. flüssig/gasförmig zu berücksichtigen.

Schmelzenthalpie

Schmelzpunkte sind abhängig von der chemischen Zusammensetzung. Für die in dieser Studie betrachteten Schmelzen gelten im Mittel die nachfolgenden Werte. Roheisen beginnt unterhalb von 1.250 °C zu erstarren. Rohstahl schmilzt oberhalb von 1.450 °C. Bei der energetischen Bilanzierung ist die Schmelzenthalpie zu berücksichtigen, die mit folgenden Daten in die Bilanzierung aufgenommen wurde (Pfeifer, 2017):

Schmelzenthalpie von Roheisen: 243 kJ/kg_{RE}

Schmelzenthalpie von Rohstahl: 280 kJ/kg_{RS}

Mischungsenthalpie des Roheisens

Bei der Erzeugung von Roheisen ist zusätzlich die Mischungsenthalpie $\Delta H_{M,i}$ für die Mischung von Kohlenstoff und anderen Nebenelementen wie Silizium, Phosphor und Schwefel im flüssigen Roheisen zu berücksichtigen. Die Mischungsenthalpie beträgt nach (Bönisch & Hauck, 2013) bei üblicher Zusammensetzung des Roheisens mit ca. 4,7 % C, 0,5 % Si, 0,08 % P und 0,04 % S:

$$\text{Mischungsenthalpie: } \sum_{i=1}^{i=n} x_i \cdot \Delta H_{M,i} \quad 94 \text{ kJ/kg}_{\text{RE}}$$

Sie wird in der beim Roheisen ausgewiesenen fühlbaren Wärme berücksichtigt.

Enthalpien von Wasser und Dampf

Die durch den Phasenübergang von Wasser zu Dampf und die Kompression von Dampf zusätzlich zu berücksichtigende Enthalpie kann der Dampftafel entnommen werden. Verdampft Wasser drucklos, wird der entstehende Dampf als **Brüden** bezeichnet. Wird Wasser unter Druck bis zur Sättigung der Atmosphäre verdampft, wird der entstehende Dampf als Sattedampf bezeichnet. Wird der Sattedampf ohne Wasserzufuhr weiter erhitzt, wird der entstehende Dampf als überhitzter Dampf bezeichnet.

Da das Dampfnetz im Hüttenwerk üblicherweise mit zwei Druckstufen betrieben wird, ist Dampf mit folgenden Enthalpien bezogen auf 15 °C zu bilanzieren:

Enthalpie von Brüden bei 1 bar (z. B. aus Spritzwasser): 2.675 kJ/kg_{Wasser}

Enthalpie von Sattedampf bei ca. 10 bar, 200 °C: 2.820 kJ/kg_{Wasser}

Enthalpie von überhitztem Dampf bei 25 bar, 300 °C: 3.010 kJ/kg_{Wasser}

Reaktionsenthalpien ausgewählter Reaktionen

Bei der Roheisen- und Stahlherstellung ergeben sich endotherme und exotherme Reaktionen der Rohstoffe in den jeweiligen Bilanzräumen der Anlagen. Dabei entstehen neben Roheisen und Stahl auch gasförmige und feste Nebenprodukte wie Kuppelgase und Schlacken. Die jeweiligen Reaktionsenthalpien werden als Standardreaktionsenthalpien der Reaktionen (Bönisch & Hauck, 2013), (Rosemann, 1987) ermittelt und in den Bilanzräumen berücksichtigt. Exothermen Reaktionsenthalpien werden als Bilanzennahmen (negativ) der Energiebilanz dargestellt, positive Reaktionsenthalpien von endothermen Reaktionen werden als Bilanzausgaben der Energieverwendung gezeigt. Sie wurden summarisch in folgender Größenordnung berücksichtigt:

Sinteranlage

z. B. Zersetzungsenthalpie von CaCO_3 : 272 MJ/t_{Sinter}
(ca. 152 kg_{Kalkstein} pro t Sinter, 1.788 kJ/kg _{CaCO_3}) (Rosemann, 1987)

Bei einigen Sinteranlagen kann eine Vorreduktion von Eisenerz stattfinden. Der Umfang konnte nicht genau ermittelt werden und wird vernachlässigt.

Hochofen

Reduktion des Eisenerzes zu Eisen: + 7.389 MJ/t_{Fe}

Reduktion der Begleitelemente Si, Mn, P, Ti im Roheisen: + 215 MJ/t_{RE}

Konverter

Oxidation von Fe zu FeO (in Staub und Schlacke): - 5.033 kJ/kg_{Fe}

Oxidation der Begleitelemente Si, Mn, P, Ti im Roheisen: - 215 MJ/t_{RE}

(Die im Hochofen zunächst endotherm benötigte Reaktionsenthalpie zur Reduktion der Begleitelemente wird im Konverter durch die Oxidationsreaktionen exotherm freigesetzt.)

Wandwärmeverluste

Wärmeverluste der Prozesse durch Strahlung und Wärmeleitung bzw. Konvektion werden in den Bilanzen überwiegend als Schätzwert oder basierend auf Literaturquellen angegeben. Die Durchführung von Messungen war nicht Teil des Auftrags.

Elektrische Energie sowie Energiebedarf für Medien

Der elektrische Energiebedarf der einzelnen Prozesse beeinflusst maßgeblich die Herstellkosten, ist allerdings für eine Analyse von Wärmebilanzen und Abwärmepotenzialen nicht relevant. In der vorliegenden Untersuchung wird deshalb auf eine Darstellung des elektrischen Energiebedarfs verzichtet.

Auch technische Gase wie z. B. Druckluft, Sauerstoff, Stickstoff und Argon werden üblicherweise in Energiebilanzen integrierter Hüttenwerke betrachtet. Sie sollen hier nicht in die ermittelten Wärmebilanzen der Hüttenwerksbetriebe einbezogen werden, da sie als Nebenanlage innerhalb bzw. außerhalb des Werksbereiches separat bilanziert werden können. Luftzerlegungsanlagen werden i.d.R. von Dritten betrieben.

Die Abwärme bei der Erzeugung von Druckluft und bei der Verdichtung von Kaltwind wird nicht betrachtet. Für die Kaltwindkompression werden ca. 70 kWh/t_{RE} benötigt. Geht man von 90 % Wärmeerzeugung und 10 % Verdichtungsarbeit bei der Kompression aus, so ergibt sich eine Abwärmeezeugung von ca. 220 MJ/t_{RE}. Durch Kompression wird der Kaltwind bereits auf ca. 173 °C erwärmt, dies wird in der Energiebilanz des Hochofens berücksichtigt.

4.1.3 Bereitstellung der Daten für Energiebilanzen

In Kapitel 4 werden die Energiebilanzen typischer Hauptanlagen des integrierten Hüttenwerks in prinzipieller Form dargestellt. Dabei konnten standortspezifische Unterschiede in der Struktur einzelner Hüttenwerke und der werkspezifischen Einbindung von Nebenanlagen nicht in beliebiger Detailschärfe angegeben werden. Vielmehr wurden die Darstellungen so aufgebaut, dass ein Durchschnitt der Branche und des technischen Status in Deutschland wiedergegeben wird. Auftragsgemäß lag dabei der Schwerpunkt der Betrachtung auf einer Bewertung von Abwärmepotenzialen.

Die Datenbereitstellung für die Bilanzräume der Anlagen erfolgte durch das Stahlinstitut VDEh auf der Basis von Statistiken, technischen Dokumentationen des Stahlinstituts VDEh sowie national und international verfügbaren Publikationen der Eisen- und Stahlindustrie. Zusätzlich wurden Interviews mit Fachleuten aus Hüttenwerken durchgeführt, die weitere Informationen für diese Untersuchung bereitgestellt haben.

Eine wesentliche Datengrundlage stellt das statistische Jahrbuch der Stahlindustrie dar (Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2017), das viele Produktionsdaten der integrierten Hüttenwerke nennt. Zusätzlich verfügt das Stahlinstitut VDEh über eine nicht publizierte Betriebsstatistik der Mitgliedsunternehmen des Stahlinstituts VDEh, die auf einer jährlichen Meldung der Jahresmittelwerte von wichtigen technischen Prozess-Kenngrößen der Hauptanlagen der integrierten Hüttenwerke basiert. In dieser Statistik werden:

- ▶ spezifische Massenströme der eingesetzten Rohstoffe, Brennstoffe und Reduktionsmittel,
- ▶ Heizwerte der Brennstoffe und Reduktionsmittel,
- ▶ typische Prozesstemperaturen und Analysen, z. B. vom Roheisen und Rohstahl und
- ▶ relevante Energiedaten der Hauptprozesse

als Input und Produktionsleistung der Hauptprozesse des Hüttenwerks erfasst. Auf diese Weise war es in dieser Ausarbeitung möglich, den Energieinput der Hauptanlagen als statistisch gesicherten Jah-

resmittelwert der integrierten Hüttenwerke in Deutschland darzustellen. Als Basis diene dabei die Statistik des Jahres 2015. Auf diese Weise ließen sich die Einnahmen der Energiebilanz (=100 % der Bilanzsumme) auf Basis der Mittelwerte der Betriebsstatistik korrekt bilanzieren.

Für die einzelnen Positionen der Energieausgaben von Energiebilanzen existiert keine Statistik der Branche in Deutschland. Diese Daten wurden deshalb auf Basis des Prozesswissens sowie der Zusammenhänge von Wärmeübertragung, Thermodynamik und Hüttentechnik und aus der Logik von Bilanzen nach bestem Wissen ermittelt.

4.2 Sinteranlage

4.2.1 Energiebilanz einer Sinteranlage

Die Energiebilanz einer typischen Sinteranlage wird in Abbildung 20, Tabelle 7 und Tabelle 8 dargestellt.

Abbildung 20: Energiefließbild einer Sinteranlage (Angaben pro t_{Sinter})

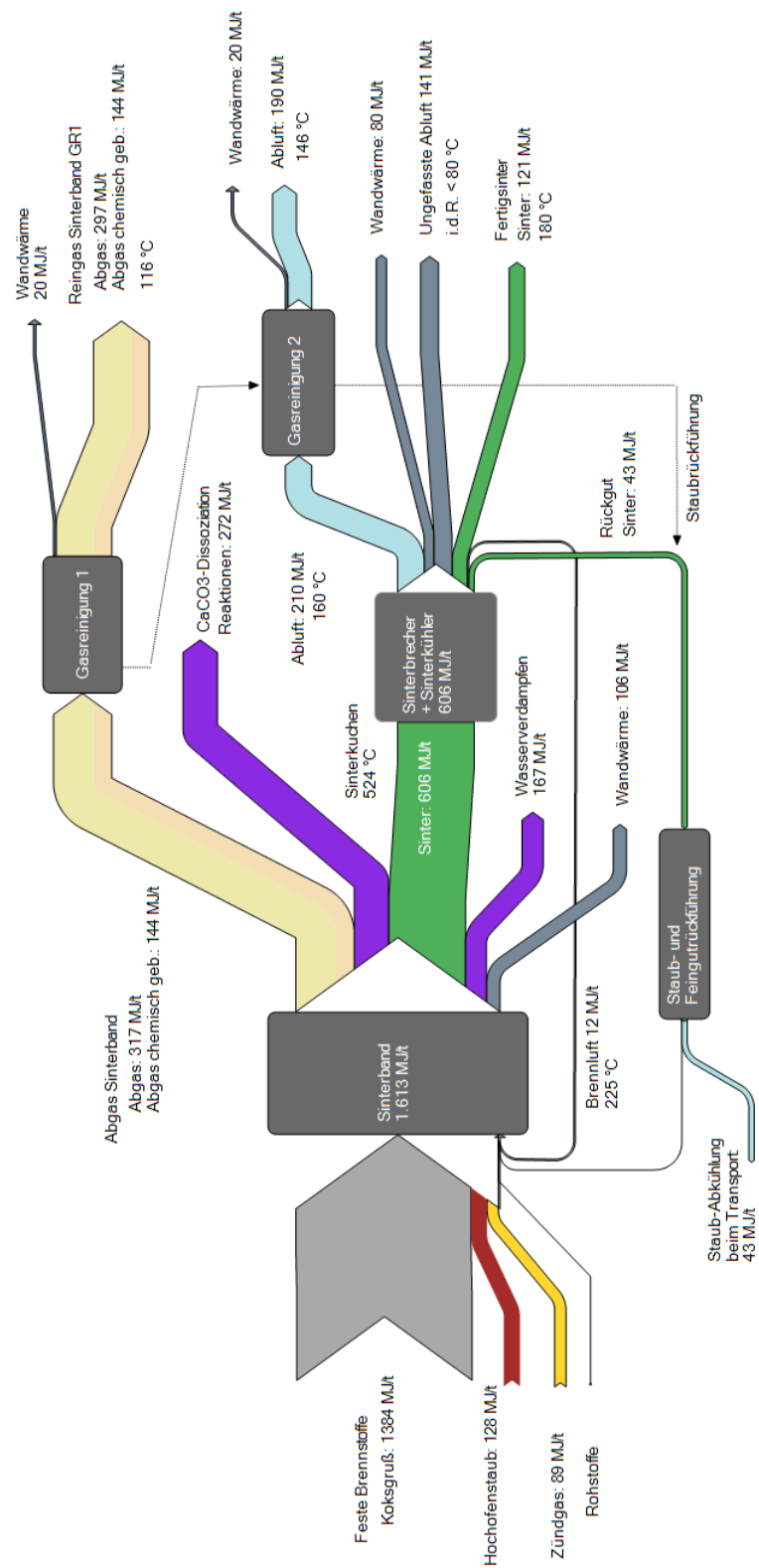


Tabelle 7: Energiebilanz einer Sinteranlage mit Nebenanlagen - Teil 1

Produkt: Sinter

Einnahmen Sinterbandinterband								
No.	Bilanzgröße	Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie	% Energie
		kg/t Si	m3 i.N./t Si	kJ/m3 i.N.*K kJ/kg*K	°C	kJ/m3 i.N. kJ/kg	MJ/t Si	
1	Erz	875		0,651	15		0	0,0%
2	Kalk/ Kalkstein	178		0,825	15		0	0,0%
3	Sinteranlagen-Rückgut	355		0,651	15		0	0,0%
4	Sinter-Rückgut vom Hochofen	90		0,651	15		0	
5	Hochofengasstaub	9				14.196	128	7,9%
6	Feste Brennstoffe	49				28.245	1.384	85,8%
7	Zündgase		4,4			20.273	89	5,5%
8	Brennluft, vorgewärmt		43,9	1,317	225		12	0,8%
Summe		-					1.613	100,0%
Ausgaben Sinterband								
No.	Bilanzgröße	Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie	% Energie
		kg/t Si	m3 i.N./t Si	kJ/m3 i.N.*K kJ/kg*K	°C	kJ/m3 i.N. kJ/kg	MJ/t Si	
1	Sinterkuchen (Heiss)	1.355		0,879	524		606	37,6%
2	Abgas Sinterband, kalte Seite		1.200	1,339	65		80	5,0%
3	Abgas Sinterband, heisse Seite		1.000	1,355	190		237	14,7%
4	Abgas Sinterband - chem. geb.		11			12.623	144	9,0%
5	CaCO3 - Dissoziation	152				1.788	272	16,9%
6	Wasserverdampfen (5%)	68				2.465	167	10,4%
7	Wandwärmeverluste						106	6,6%
Summe		-					1.613	100,0%
Einnahmen Sinterbrecher, Sinterkühler								
No.	Bilanzgröße	Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie	% Energie
		kg/t Si	m3 i.N./t Si	kJ/m3 i.N.*K kJ/kg*K	°C	kJ/m3 i.N. kJ/kg	MJ/t Si	
1	Sinterkuchen (Heiss)	1.355		0,879	524		606	100,0%
Summe							606	100,0%
Ausgaben Sinterbrecher, Sinterkühler								
No.	Bilanzgröße	Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie	% Energie
		kg/t Si	m3 i.N./t Si	kJ/m3 i.N.*K kJ/kg*K	°C	kJ/m3 i.N. kJ/kg	MJ/t Si	
1	Fertigsinter	1.000		0,731	180		121	19,9%
2	Rückgut Feinsinter	355		0,731	180		43	7,1%
3	Abluft Sinterkühler (gefasst)		1.103	1,311	160		210	34,6%
4	Wandwärme Sinterbrecher /-Kühler				180		80	13,2%
5	Brennluft, vorgewärmt		44	1,317	225	0	12	2,0%
6	Ungefasste Abluft Sinterkühler		1.657	1,305	80		141	23,2%
Summe							606	100,0%
							0	
Einnahmen Gasreinigung 1 (GR1)								
No.	Bilanzgröße	Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie	% Energie
		kg/t Si	m3 i.N./t Si	kJ/m3 i.N.*K kJ/kg*K	°C	kJ/m3 i.N. kJ/kg	MJ/t Si	
1	Abgas Sinterband, kalte Seite		1.200	1,339	65		80	17,4%
2	Abgas Sinterband, heisse Seite		1.000	1,355	190		237	51,3%
3	Abgas Sinterband - chem. geb.		11	0	0	12.623	144	31,3%
Summe			2.200		122		462	100,0%
Ausgaben Gasreinigung 1 (GR1)								
No.	Bilanzgröße	Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie	% Energie
		kg/t Si	m3 i.N./t Si	kJ/m3 i.N.*K kJ/kg*K	°C	kJ/m3 i.N. kJ/kg	MJ/t Si	
1	Reingas Sinterband GR1		2.200	1,345	116		297	64,4%
2	Reingas Sinterband GR1 - chem geb		11	0	0	12.623	144	31,3%
3	Wandwärme Gasreinigung		0				20	4,3%
Summe							462	100,0%

123 gewichteter Jahresmittelwert der Hüttenwerke in Deutschland (2014)

123 frei gewählter Parameter der Bilanz, Eingabegröße

123 Stoffdaten gasförmiger Stoffe, die Einheit ist auf m³ i.N. bezogen

123 Daten aus eigenen Untersuchungen

123 mit Bilanzgleichungen und Stoffdaten berechnete Zwischenergebnisse

Tabelle 8: Energiebilanz einer Sinteranlage mit Nebenanlagen - Teil 2

Produkt: Sinter

Einnahmen Gasreinigung 2 (GR2)							
No.	Bilanzgröße	Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie
		kg/t Si	m³ i.N./t Si	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.} \cdot ^\circ\text{K}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}}$	°C	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{MJ}}{\text{t Si}}$
1	Abluft Sinterkühler (gefasst)		1.103	1,311	160	0	210
	Summe		1.103				210
							100,0%
							100,0%
Ausgaben Gasreinigung 2 (GR2)							
No.	Bilanzgröße	Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie
		kg/t Si	m³ i.N./t Si	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.} \cdot ^\circ\text{K}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}}$	°C	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{MJ}}{\text{t Si}}$
1	Abluft Sinterkühler GR2		1.103	1,310	146		190
2	Wandwärme Gasreinigung						20
	Summe		1.103				210
							100,0%

123 gewichteter Jahresmittelwert der Hüttenwerke in Deutschland (2014)

123 frei gewählter Parameter der Bilanz, Eingabegröße

123 Stoffdaten gasförmiger Stoffe, die Einheit ist auf m³ i.N. bezogen

123 Daten aus eigenen Untersuchungen

123 mit Bilanzgleichungen und Stoffdaten berechnete Zwischenergebnisse

Dem Sinterband werden rund $1.473 \text{ MJ/t}_{\text{Sinter}}$ an Energieeinnahmen durch Brennstoffenergie zugeführt. Die Energie wird für die Erhitzung der Rohmaterialien auf die Sintertemperatur von 1.400°C benötigt. Als feste Brennstoffe werden Koksgrus und Anthrazit verwendet, die mit dem Eisenerz vermischt und auf dem Sinterband abgelegt werden. Die Zündung der Brennstoffe erfolgt durch einen mit Brenngasen beheizten Zündgasbrenner. Auch Stäube des Hochofens, die noch geringe Anteile an brennbaren Komponenten enthalten, werden im Sinterprozess verwertet. Ihr Energieinhalt wurde in den Energieeinnahmen des Sinterbandes mit $128 \text{ MJ/t}_{\text{Sinter}}$ berücksichtigt. In einigen Werken wird die für den Zündbrenner benötigte Verbrennungsluft mit Abwärme des Sinterbandes vorgewärmt (vgl. Kap. 3.3). In der vorliegenden Bilanz wurde angenommen, dass die Brennluft der Zündbrenner am Sinterkühler auf ca. 225°C vorgewärmt und die Sinterwärme dadurch geringfügig rekuperiert wird.

Von den Energieausgaben des Sinterbandes entfällt ein relativ hoher Anteil auf das Abgas, das unterhalb des Sinterbandes abgesaugt wird. Das Abgas enthält auch geringe Anteile an Kohlenmonoxid (CO) (Hensmann, Haardt, & Ebert, 2012), deshalb ist in der Energiebilanz der chemisch gebundener Energieinhalt zu berücksichtigen. Bei den Energieausgaben des Sinterbandes sind auch endotherme Reaktionen von Mineralstoffen zu berücksichtigen. So wird dem Eisenerz z. B. zur Schlackenbildung auch Kalkstein (CaCO_3) zugesetzt, der im Verlauf des Sinterprozesses oberhalb 800°C entsäuert. Für die endotherme Reaktion der Kalksteindissoziation mit $272 \text{ MJ/t}_{\text{Sinter}}$ kann die Abwärme des Sinterprozesses teilweise genutzt werden. Dadurch wird eine energieintensivere prozesseexterne Kalksteinentsäuerung vermieden. Ferner wurde in der Energiebilanz auch berücksichtigt, dass der Sinter vorher bei der Pelletierung befeuchtet wurde. Beim Sintern sind folglich auch die Energieausgaben für das Wasserverdampfen vor Beginn der Sinterung auf dem Sinterband zu berücksichtigen.

Die Temperatur des Abgases ist unterhalb des Sinterbandes unterschiedlich hoch. Durch Mischung der Teilströme wird vor Filter im Mittel eine Temperatur von ca. 122°C erzielt. Zur Emissionsminderung wird das Abgas des Sinterbandes in einigen Werken zusätzlich auch durch Eindüsung von Wasser gekühlt. Das Abgas wird schließlich im Elektro- oder Tuchfilter (Gasreinigung 1) entstaubt.

Der erzeugte Sinterkuchen fällt nach der Sinterung mit einer Temperatur von ca. 524°C in einen Brecher, wird dort zerkleinert und anschließend mit Luft gekühlt. In der Bilanz wird angenommen, dass der Sinter im Sinterkühler soweit mit Luft abgekühlt wird, dass er anschließend auf Gummigurten mit einer zulässigen Temperatur von max. 180°C transportiert werden kann. Die Abluft wird teilweise gefasst, abgesaugt und zusammen mit anderen Abluftströmen z. B. aus der Hallenentstaubung der Sinteranlage in einem gemeinsamen Filter (Gasreinigung 2) entstaubt. In dieser Bilanz wird angenom-

men, dass die Temperatur der gefassten Kühlerabluft vor Filter 160 °C beträgt. Diese Abluft ist trocken und enthält keine Rauchgasbestandteile, sie kann deshalb aus technischer Sicht in einer nachgeschalteten Abwärmenutzungsanlage energetisch verwertet werden.

Der Sinter kühlt auch durch freie Konvektion weiter an der Luft ab und gibt dabei seine Wärme an **nicht gefasste Kühlluft** ab. Die Temperatur der ungefassten Abluft ist niedriger und beträgt 80 °C.

4.2.2 Möglichkeiten zur Abwärmenutzung

An der Sinteranlage kann die in den Abgasen enthaltene Enthalpie zum Teil genutzt werden. Allerdings ist das Abgas des Sinterbandes (GR1) meist nicht für eine Wärmenutzung geeignet (siehe Kap. 3.1), da es oft zu kalt ist und seine Feuchte und der erforderliche Abstand zum Taupunkt eine ausreichend hohe Abgastemperatur erfordern. Deshalb kommt i.d.R. vor allem die gefasste Abluft des Sinterkühlers (GR2) für eine nachgeschaltete Nutzung in Betracht. Abrasive und korrosive Bestandteile stellen an der Sinteranlage hohe Anforderungen an die Wärmeübertrager zur Auskopplung von Abwärme.

Die auf Basis dieser Energiebilanz bestimmte rein rechnerische bilanzielle Abwärme (nicht komplett technisch nutzbar) beträgt

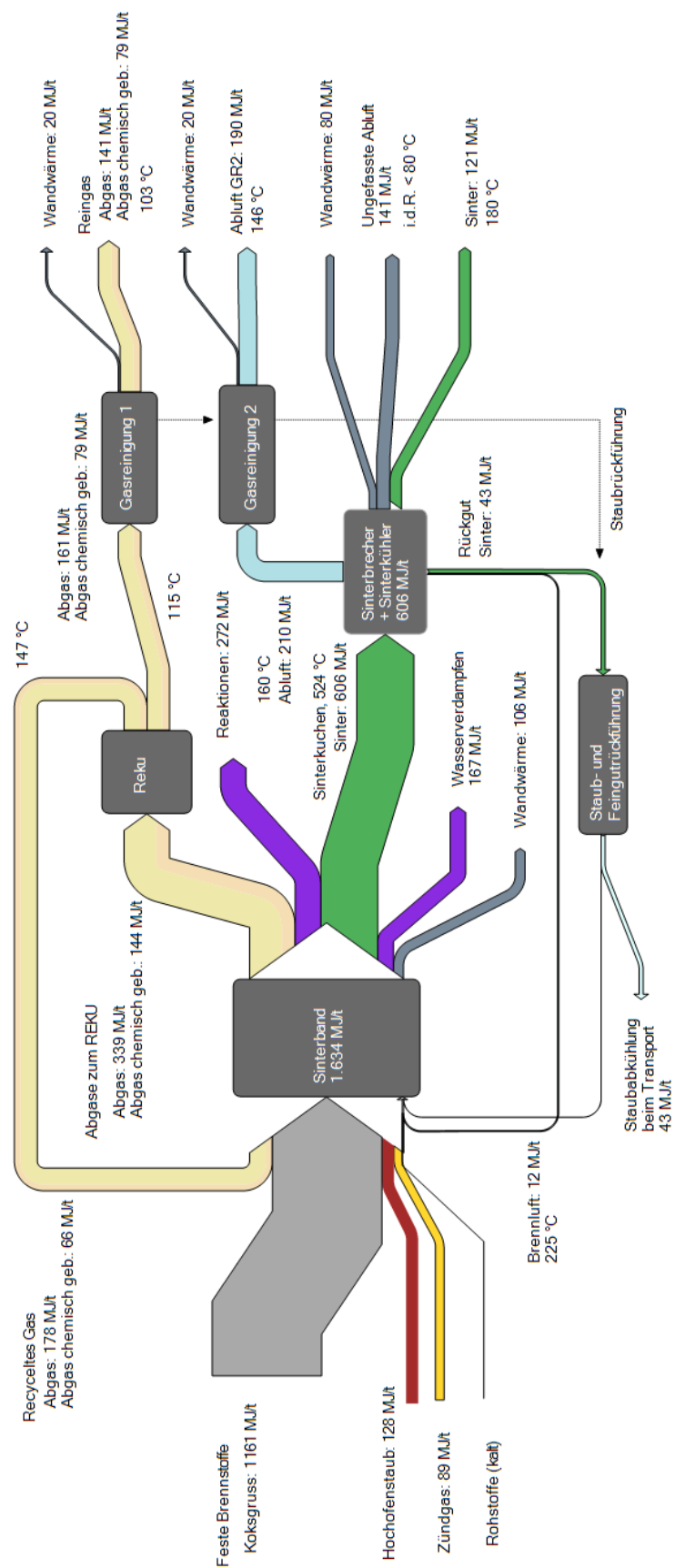
- Fühlb. Wärme des Abgases des Sinterbandes (Austritt Sinterband) 317 MJ/t Sinter
- Fühlb. Wärme der Sinterkühler-Abluft (Austritt Sinter-Kühler) 210 MJ/t Sinter

4.3 LEEP-Sinteranlage

4.3.1 Energiebilanz einer LEEP-Sinteranlage

Die Energiebilanz einer typischen LEEP-Sinteranlage (vergl. Kap. 3.1 und Abbildung 10) wird in Abbildung 21, in Tabelle 9 und in Tabelle 10 dargestellt.

Abbildung 21: Energiefließbild einer LEEP-Sinteranlage (Angaben pro t_{Sinter})



Eigene Darstellung, Stahlinstitut VDEh

Tabelle 9: Energiebilanz einer LEEP-Sinteranlage – Teil 1

Produkt: Sinter

Einnahmen Sinterband								
No.	Bilanzgröße	Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie	% Energie
		kg/t Si	m3 i.N./t Si	kJ/m3 i.N.*K kJ/kg*K	°C	kJ/m3 i.N. kJ/kg	MJ/t Si	
1	Erz	875		0,651	15		0	0,0%
2	Kalkstein	178		0,825	15		0	0,0%
3	Sinteranlagen-Rückgut	355		0,651	15		0	0,0%
4	Sinter-Rückgut vom Hochofen	90		0,651	15		0	
5	Hochofengasstaub	9				14.196	128	7,8%
6	Feste Brennstoffe	41				28.245	1.161	71,1%
7	Zündgase		4			20.273	89	5,4%
8	Recyceltes Gas		1.000	1,349	147		178	10,9%
9	Recyceltes Gas - chem. geb.		5		0	12.623	66	4,0%
10	Brennluft, vorgewärmt		43,9	1,317	225		12	0,7%
Summe							1.634	100,0%
Ausgaben Sinterband								
No.	Bilanzgröße	Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie	% Energie
		kg/t Si	m3 i.N./t Si	kJ/m3 i.N.*K kJ/kg*K	°C	kJ/m3 i.N. kJ/kg	MJ/t Si	
1	Sinterkuchen (Heiss)	1.355		0,879	524		606	37,1%
2	Abgas Sinterband, fühlbar, kalt		1.200	1,339	70		88	5,4%
3	Abgas Sinterband, fühlbar, heiss		1.000	1,357	200		251	15,4%
4	Abgas Sinterband - chem. geb.		11			12.623	144	8,8%
5	CaCO3 - Dissoziation	152				1.788	272	16,6%
6	Wasserverdampfen (5%)	68				2.465	167	10,2%
7	Wandwärmeverluste						106	6,5%
Summe							1.634	100,0%
Einnahmen Sinterbrecher, Sinterkühler								
No.	Bilanzgröße	Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie	% Energie
		kg/t Si	m3 i.N./t Si	kJ/m3 i.N.*K kJ/kg*K	°C	kJ/m3 i.N. kJ/kg	MJ/t Si	
1	Sinterkuchen (Heiss)	1.355		0,879	524		606	100,0%
Summe							606	100,0%
Ausgaben Sinterbrecher, Sinterkühler								
No.	Bilanzgröße	Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie	% Energie
		kg/t Si	m3 i.N./t Si	kJ/m3 i.N.*K kJ/kg*K	°C	kJ/m3 i.N. kJ/kg	MJ/t Si	
1	Fertigsinter	1.000		0,731	180		121	19,9%
2	Rückgut Feinsinter	355		0,731	180		43	7,1%
3	Abluft Sinterbrecher /-Kühler		1.103	1,311	160		210	34,6%
4	Wandwärme Sinterbrecher						80	13,2%
5	Brennluft, vorgewärmt		44	1,317	225		12	2,0%
6	Ungefasste Abluft Sinterkühler			1,305	80		141	23,2%
Summe							606	100,0%
Einnahmen Gasreinigung 1								
No.	Bilanzgröße	Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie	% Energie
		kg/t Si	m3 i.N./t Si	kJ/m3 i.N.*K kJ/kg*K	°C	kJ/m3 i.N. kJ/kg	MJ/t Si	
1	Abgas REKU zur GR 1		1.200	1,345	115	0	161	67,2%
2	Reingas GR 1 - chem. gebunden		6			12.623	79	32,8%
Summe			1.200	1,345	115		240	100,0%
Ausgaben Gasreinigung 1								
No.	Bilanzgröße	Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie	% Energie
		kg/t Si	m3 i.N./t Si	kJ/m3 i.N.*K kJ/kg*K	°C	kJ/m3 i.N. kJ/kg	MJ/t Si	
1	Reingas GR 1		1.200	1,345	103		141	58,9%
2	Reingas GR 1 - chem. gebunden		6				79	32,8%
3	Wandwärme Gasreinigung						20	8,3%
Summe							240	100,0%

123 gewichteter Jahresmittelwert der Hüttenwerke in Deutschland (2014)

123 frei gewählter Parameter der Bilanz, Eingabegröße

123 Stoffdaten gasförmiger Stoffe, die Einheit ist auf m³ i.N. bezogen

123 Daten aus eigenen Untersuchungen

123 mit Bilanzgleichungen und Stoffdaten berechnete Zwischenergebnisse

Tabelle 10: Energiebilanz einer LEEP-Sinteranlage – Teil 2

Produkt: Sinter

Einnahmen REKU							
No.	Bilanzgröße	Massenstrom kg/t Si	Volumenstrom m ³ i.N./t Si	cp kJ/m ³ i.N.*K kJ/kg*K	Temp. °C	ΔhR bzw. hu kJ/m ³ i.N. kJ/kg	Energie MJ/t Si
1	Abgas Sinterband, kalte Seite		1.200	1,339	70	0	88
2	Abgas Sinterband - chem. geb.		11	0	0	12.623	144
3	Abgas Sinterband, heiße Seite		1.000	1,357	200	0	251
Summe			2.200				484
LEEP-Betrieb							
ja							
No.	Bilanzgröße	Massenstrom kg/t Si	Volumenstrom m ³ i.N./t Si	cp kJ/m ³ i.N.*K kJ/kg*K	Temp. °C	ΔhR bzw. hu kJ/m ³ i.N. kJ/kg	Energie MJ/t Si
1	Abgas REKU zur GR 1		1.200	1,345	115		161
2	Abgas Sinterband - chem. geb.		11	0,000	0	12.623	144
3	Recyceltes Gas		1.000	1,349	147		178
Summe			2.200				484
100,0%							
Einnahmen Gasreinigung 2							
No.	Bilanzgröße	Massenstrom kg/t Si	Volumenstrom m ³ i.N./t Si	cp kJ/m ³ i.N.*K kJ/kg*K	Temp. °C	ΔhR bzw. hu kJ/m ³ i.N. kJ/kg	Energie MJ/t Si
1	Abluft Sinterbrecher /-Kühler		1.103	1,311	160	0	210
Summe			1.103				210
100,0%							
Ausgaben Gasreinigung 2							
No.	Bilanzgröße	Massenstrom kg/t Si	Volumenstrom m ³ i.N./t Si	cp kJ/m ³ i.N.*K kJ/kg*K	Temp. °C	ΔhR bzw. hu kJ/m ³ i.N. kJ/kg	Energie MJ/t Si
1	Reingas GR2		1.103	1,310	146		190
2	Wandwärme Gasreinigung						20
Summe			1.103				210
100,0%							

123 gewichteter Jahresmittelwert der Hüttenwerke in Deutschland (2014)

123 frei gewählter Parameter der Bilanz, Eingabegröße

123 Stoffdaten gasförmiger Stoffe, die Einheit ist auf m³ i.N. bezogen

123 Daten aus eigenen Untersuchungen

123 mit Bilanzgleichungen und Stoffdaten berechnete Zwischenergebnisse

Bei der LEEP-Sinteranlage wird nur ein Teil der Abgase des Sinterbandes über die Gasreinigung 1 in die Umgebung abgeleitet. Dazu wird der kältere Teil des Abgases eines Sinterbandes erfasst und im Rekuperator zur Vermeidung einer Kondensatbildung im Filter zunächst weiter erwärmt und dann der Gasreinigung 1 zugeführt. Der wärmere Teil des Sinterband-Abgases wird hingegen nach Nutzung der Abwärme im Rekuperator erneut als Umluft dem Sinterband zugeführt. Auf diese Weise wird ein Teil des Abgases zum Sinterband rückgeführt und ein Teil der Abwärme im Produktionsprozess genutzt (vgl. Darstellung in Kapitel 3.1). Dadurch können in der dargestellten Bilanz rd. 178 MJ/t Sinter der sensiblen Abgasenthalpie sowie 66 MJ/t Sinter der chemisch gebundenen Abgasenthalpie (CO) rückgeführt und am Sinterband genutzt werden. Dementsprechend ist der Abgasenthalpiestrom der Gasreinigung 1 bei diesem Verfahren kleiner als bei dem üblichen Sinterverfahren.

4.3.2 Möglichkeiten zur Abwärmenutzung

Hinsichtlich der Möglichkeiten zur Abwärmenutzung wird auf Kapitel 4.2.2 verwiesen. Auch bei der LEEP-Sinteranlage kommt eine Nutzung des Abgases der Gasreinigung 1 (GR1) wegen zu niedriger Temperatur nicht in Frage. Deshalb kommt i.d.R. vor allem die Abluft des Sinterkühlers nach GR2 für eine nachgeschaltete Nutzung der Abgaswärme in Betracht.

Die auf Basis der Bilanz bestimmte rechnerische bilanzielle Abwärme beträgt:

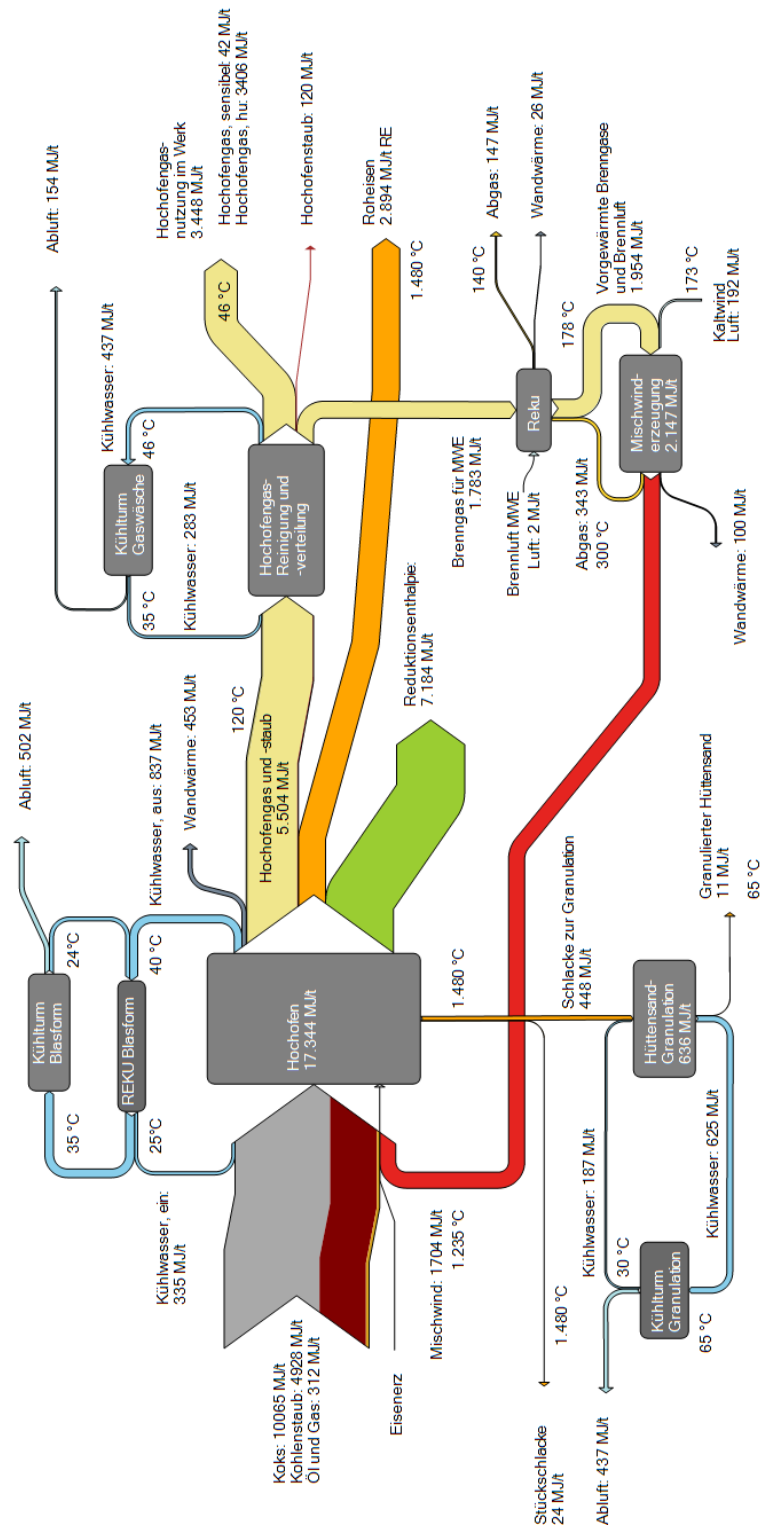
- ▶ Fühlb. Wärme des Abgases des Sinterbands (Austritt REKU) 161 MJ/t Sinter
- ▶ Fühlb. Wärme der Sinterkühler-Abluft (Austritt Sinterkühler) 210 MJ/t Sinter

4.4 Hochofen

4.4.1 Energiebilanz eines Hochofens mit Nebenanlagen

Die Energiebilanz eines typischen Hochofens mit Nebenanlagen ist in Abbildung 22 sowie in den Tabellen 11 bis 13 dargestellt.

Abbildung 22: Energiefließbild eines Hochofens mit Nebenanlagen (Angaben pro t_{RE})



Eigene Darstellung, Stahlinstitut VDEh

Tabelle 11: Energiebilanz eines Hochofens mit Nebenanlagen – Teil 1

Produkt: Roheisen

Einnahmen Mischwinderzeugung							
No.	Bilanzgröße	Massenstrom kg/t RE	Volumenstrom m ³ i.N./t RE	cp kJ/m ³ i.N.*K kJ/kg*K	Temp. °C	ΔhR bzw. hu kJ/m ³ i.N. kJ/kg	Energie MJ/t RE
1	Kaltwind		927	1,312	173		192
2	Hochofengas (warm)		507	1,405	178		116
3	Hochofengas, Heizwert		507			3.470	1.761
4	Brennluft, vorgewärmt	0	361	1,313	178	0	77
5	Dampf						0,0%
6	O ₂		48	1,306	15		0
Summe							2.147
Ausgaben Mischwinderzeugung							
No.	Bilanzgröße	Massenstrom kg/t RE	Volumenstrom m ³ i.N./t RE	cp kJ/m ³ i.N.*K kJ/kg*K	Temp. °C	ΔhR bzw. hu kJ/m ³ i.N. kJ/kg	Energie MJ/t RE
1	Abgas Winderhitzer		804	1,496	300		343
2	Mischwind		975	1,432	1.235		1.704
3	Wandwärme						100
Summe							2.147
Einnahmen Hochofen							
No.	Bilanzgröße	Massenstrom kg/t RE	Volumenstrom m ³ i.N./t RE	cp kJ/m ³ i.N.*K kJ/kg*K	Temp. °C	ΔhR bzw. hu kJ/m ³ i.N. kJ/kg	Energie MJ/t RE
1	Rohstoffe (Erz, Pellets, Sinter)	1.640		0,651	15		0
2	Kohlenstaub	158		1,151	60	31.100	4.928
3	Koks	334		0,719	50	30.100	10.065
4	Öl + Erdgas	8				40.000	312
5	Mischwind		975	1,432	1.235	0	1.704
6	Kühlwasser, ein	8.000		4,187	25		335
Summe							17.344
Ausgaben Hochofen					Parameter:	C-Gehalt Roheisen in %:	
						Anteil Schlacken-Granulation:	
						5,7%	
						92,0%	
No.	Bilanzgröße	Massenstrom kg/t RE	Volumenstrom m ³ i.N./t RE	cp kJ/m ³ i.N.*K kJ/kg*K	Temp. °C	ΔhR bzw. hu kJ/m ³ i.N. kJ/kg	Energie MJ/t RE
1	Hochofengas, fühlbare Wärme		1.489	1,391	120		217
2	Hochofengas, Heizwert		1.489			3.470	5.167
3	Roheisen, fühlbar	1.000			1.480		1.302
4	Roheisen, C-Gehalt	47				33.800	1.592
5	Hochofenschlacke, zur Granulation	270		1,131	1.480		448
6	Hochofenschlacke, stückig	14		1,131	1.480		24
7	Reduktion Eisenerz (je kg Fe)	943				7.389	6.969
8	Reduktion Si, Mn, P, Ti	1.000				215	215
9	Hochofengasstaub, Heizwert	8				14.634	120
10	Kühlwasser, aus	8.000		4,187	40		837
11	Wandwärmeverlust (Rest)						453
Summe							17.344

123 gewichteter Jahresmittelwert der Hüttenwerke in Deutschland (2014)

123 frei gewählter Parameter der Bilanz, Eingabegröße

123 Stoffdaten gasförmiger Stoffe, die Einheit ist auf m³ i.N. bezogen

123 Daten aus eigenen Untersuchungen

123 mit Bilanzgleichungen und Stoffdaten berechnete Zwischenergebnisse

Tabelle 12: Energiebilanz eines Hochofens mit Nebenanlagen – Teil 2

Produkt: Roheisen

Einnahmen Granulationsanlage								
No.	Bilanzgröße	Massenstrom kg/t RE	Volumenstrom m ³ i.N./t RE	cp kJ/m ³ i.N.*K kJ/kg*K	Temp. °C	ΔhR bzw. hu kJ/m ³ i.N. kJ/kg	Energie MJ/t RE	% Energie
1	Hochofenschlacke (90%)	270		1,131	1.480		448	70,5%
2	Granulierwasser, ein	2.985		4,187	30		187	29,5%
Summe							636	100,0%
Ausgaben Granulationsanlage								
No.	Bilanzgröße	Massenstrom kg/t RE	Volumenstrom m ³ i.N./t RE	cp kJ/m ³ i.N.*K kJ/kg*K	Temp. °C	ΔhR bzw. hu kJ/m ³ i.N. kJ/kg	Energie MJ/t RE	% Energie
1	Granulierter Hüttensand	270		0,786	65		11	1,7%
2	Granulierwasser, aus	2.985		4,187	65		625	98,3%
Summe							636	100,0%
Einnahmen Hochofengasreinigung und -verteilung								
No.	Bilanzgröße	Massenstrom kg/t RE	Volumenstrom m ³ i.N./t RE	cp kJ/m ³ i.N.*K kJ/kg*K	Temp. °C	ΔhR bzw. hu kJ/m ³ i.N. kJ/kg	Energie MJ/t RE	% Energie
1	Hochofengas, fühlbare Wärme		1.489	1,391	120		217	3,8%
2	Hochofengas, Heizwert		1.489			3.470	5.167	89,3%
3	Kühlwasser, ein	3.380		4,1868	35		283	4,9%
4	Hochofengasstaub, Heizwert	8	0	0	0	14.634	120	2,1%
Summe							5.787	100,0%
Ausgaben Hochofengasreinigung und -verteilung								
No.	Bilanzgröße	Massenstrom kg/t RE	Volumenstrom m ³ i.N./t RE	cp kJ/m ³ i.N.*K kJ/kg*K	Temp. °C	ΔhR bzw. hu kJ/m ³ i.N. kJ/kg	Energie MJ/t RE	% Energie
1	Hochofengas MWE, fühlbare Wärme		507	1,372	46		22	0,4%
2	Hochofengas MWE, Heizwert		507			3.470	1.761	30,4%
3	Hochofengas, fühlbare Wärme		982	1,372	46		42	0,7%
4	Hochofengas, Heizwert		982			3.470	3.406	58,9%
5	Hochofengasstaub, Heizwert	8	0	0	0	14.634	120	2,1%
6	Kühlwasser, aus	3.380		4,1868	46		437	7,6%
Summe							5.787	100,0%
Einnahmen REKU am Winderhitzer								
No.	Bilanzgröße	Massenstrom kg/t RE	Volumenstrom m ³ i.N./t RE	cp kJ/m ³ i.N.*K kJ/kg*K	Temp. °C	ΔhR bzw. hu kJ/m ³ i.N. kJ/kg	Energie MJ/t RE	% Energie
1	Abgas Winderhitzer vor REKU		804	1,496	300		343	16,1%
2	Hochofengas MWE, fühlbare Wärme		507	1,372	46	0	22	1,0%
3	Hochofengas MWE, Heizwert		507	0	0	3.470	1.761	82,8%
4	Brennluft MWE		361	1,302	20		2	0,1%
Summe							2.128	100,0%
Ausgaben REKU am Winderhitzer								
No.	Bilanzgröße	Massenstrom kg/t RE	Volumenstrom m ³ i.N./t RE	cp kJ/m ³ i.N.*K kJ/kg*K	Temp. °C	ΔhR bzw. hu kJ/m ³ i.N. kJ/kg	Energie MJ/t RE	% Energie
1	Abgas nach REKU		804	1,466	140		147	6,9%
2	Hochofengas MWE, fühlbare Wärme		507	1,405	178		116	5,5%
3	Hochofengas MWE, Heizwert		507			3.470	1.761	82,8%
4	Brennluft MWE		361	1,313	178		77	3,6%
5	Wandwärme						26	1,2%
Summe							2.128	100,0%

123 gewichteter Jahresmittelwert der Hüttenwerke in Deutschland (2014)

123 frei gewählter Parameter der Bilanz, Eingabegröße

123 Stoffdaten gasförmiger Stoffe, die Einheit ist auf m³ i.N. bezogen

123 Daten aus eigenen Untersuchungen

123 mit Bilanzgleichungen und Stoffdaten berechnete Zwischenergebnisse

Tabelle 13: Energiebilanz eines Hochofens mit Nebenanlagen – Teil 3

Produkt: Roheisen

Einnahmen Kühlturm Granulationsanlage							
No.	Bilanzgröße	Massenstrom kg/t RE	Volumenstrom m ³ i.N./t RE	cp kJ/m ³ i.N.*K kJ/kg*K	Temp. °C	ΔhR bzw. hu kJ/m ³ i.N. kJ/kg	Energie MJ/t RE % Energie
1	Granulierwasser, aus	2.985		4,187	65		625 100,0%
2	Kühlluft, ein		17.438	1,301	15		0 0,0%
Summe							625 100,0%
Ausgaben Kühlturm Granulationsanlage							
No.	Bilanzgröße	Massenstrom kg/t RE	Volumenstrom m ³ i.N./t RE	cp kJ/m ³ i.N.*K kJ/kg*K	Temp. °C	ΔhR bzw. hu kJ/m ³ i.N. kJ/kg	Energie MJ/t RE % Energie
1	Kühlluft, Austritt	0	16.792	1,302	35		437 70,0%
2	Granulierwasser, gekühlt	2.985		4,187	30		187 30,0%
Summe							625 100,0%
Einnahmen Kühlturm Blasform							
No.	Bilanzgröße	Massenstrom kg/t RE	Volumenstrom m ³ i.N./t RE	cp kJ/m ³ i.N.*K kJ/kg*K	Temp. °C	ΔhR bzw. hu kJ/m ³ i.N. kJ/kg	Energie MJ/t RE % Energie
1	Kühlwasser, warm	11.000	0	4,187	35	0	921 100,0%
2	Kühlluft, ein		19.271	1,301	15		0 0,0%
Summe							921 100,0%
Ausgaben Kühlturm Blasform							
No.	Bilanzgröße	Massenstrom kg/t RE	Volumenstrom m ³ i.N./t RE	cp kJ/m ³ i.N.*K kJ/kg*K	Temp. °C	ΔhR bzw. hu kJ/m ³ i.N. kJ/kg	Energie MJ/t RE % Energie
1	Kühlluft, Austritt		19.271	1,302	35		502 54,5%
2	Kühlwasser, kalt	11.000	0	4,187	24	0	419 45,5%
Summe							921 100,0%
Einnahmen Kühlturm Gaswäsche							
No.	Bilanzgröße	Massenstrom kg/t RE	Volumenstrom m ³ i.N./t RE	cp kJ/m ³ i.N.*K kJ/kg*K	Temp. °C	ΔhR bzw. hu kJ/m ³ i.N. kJ/kg	Energie MJ/t RE % Energie
1	Kühlwasser, aus	3.380	0	4,187	46	0	437 100,0%
2	Kühlluft, ein		5.957	1,301	15		0 0,0%
Summe							437 100,0%
Ausgaben Kühlturm Gaswäsche							
No.	Bilanzgröße	Massenstrom kg/t RE	Volumenstrom m ³ i.N./t RE	cp kJ/m ³ i.N.*K kJ/kg*K	Temp. °C	ΔhR bzw. hu kJ/m ³ i.N. kJ/kg	Energie MJ/t RE % Energie
1	Kühlluft, Austritt		5.921	1,302	35		154 35,3%
2	Kühlwasser, ein	3.380	0	4,187	35	0	283 64,7%
Summe							437 100,0%
Einnahmen REKU Blasform							
No.	Bilanzgröße	Massenstrom kg/t RE	Volumenstrom m ³ i.N./t RE	cp kJ/m ³ i.N.*K kJ/kg*K	Temp. °C	ΔhR bzw. hu kJ/m ³ i.N. kJ/kg	Energie MJ/t RE % Energie
1	Kühlwasser, kalt	11.000		4,187	24	0	419 95,833,4%
2	Blasform-Rücklauf	8.000		4,187	40		837 66,6%
Summe							1.256 162,5100%
Ausgaben REKU Blasform							
No.	Bilanzgröße	Massenstrom kg/t RE	Volumenstrom m ³ i.N./t RE	cp kJ/m ³ i.N.*K kJ/kg*K	Temp. °C	ΔhR bzw. hu kJ/m ³ i.N. kJ/kg	Energie MJ/t RE % Energie
1	Kühlwasser, warm	11.000		4,187	35		921 73,3%
2	Blasform-Vorlauf	8.000	0	4,187	25		335 36,7%
Summe							1.256 100,0%

123 gewichteter Jahresmittelwert der Hüttenwerke in Deutschland (2014)

123 frei gewählter Parameter der Bilanz, Eingabegröße

123 Stoffdaten gasförmiger Stoffe, die Einheit ist auf m³ i.N. bezogen

123 Daten aus eigenen Untersuchungen

123 mit Bilanzgleichungen und Stoffdaten berechnete Zwischenergebnisse

Bilanz des Hochofens

Die Energieeinnahmen einer Hochofenanlage werden durch die Brennstoffenergie der Reduktionsmittel Koks, Kohle, Öl und Gas mit insgesamt ca. 15,3 GJ/t_{RE} aufgebracht. Zusätzlich wird dem Hochofen

Heißwind zugeführt, der zuvor durch Beheizung von Winderhitzern mit Brenngasen erzeugt wurde. Insgesamt ergibt sich daraus eine Bilanzsumme der Energiebilanz in Höhe von 17,3 GJ/t_{RE}.

Die Energieausgaben des Hochofens werden vor allem für Stoffumwandlungen im Hochofen aufgewendet. So wird zur Reduktion des Roheisens in diesem Beispiel eine endotherme Reaktionsenthalpie in Höhe von 6.969 MJ/t_{RE} benötigt. Weitere 215 MJ/t_{RE} sind für die Reduktion der im Roheisen gelösten Nebenelemente Si, Mn, P, Ti aufzuwenden. Diese endothermen Reaktionen benötigen somit ca. 41 % der Bilanzsumme.

Zu den Energieausgaben des Hochofens zählen weiterhin die schmelzflüssigen Produkte Roheisen und Schlacke. Sie werden beim Abstich mit einer Temperatur von ca. 1.480 °C abgezogen. Der Abstich des Hochofens erfolgt diskontinuierlich. Der im Roheisen mit einem Massenanteil von ca. 4,7 % C gelöste Kohlenstoff führt zu einem bedeutenden Anteil an chemisch gebundener Energie im Roheisen. Als Nebenprodukt entstehen 284 kg/t_{RE} an Hochofenschlacke, davon werden im Mittel ca. 270 kg/t_{RE} zu Hüttensand granuliert. Für die schmelzflüssigen Produkte des Hochofens, Roheisen und Schlacke, ergibt sich insgesamt eine spez. Enthalpie in Höhe von rund 3.366 MJ/t_{RE} bzw. 20 % der Bilanzausgaben.

Hochofenschlacke wird in Deutschland zu rund 95 % durch Granulation zu Hüttensand verarbeitet und für eine glasige Erstarrung der Schlacke mit Wasser gekühlt (hier 270 kg/t_{RE}). Der verbleibende Anteil der Hochofenschlacke (hier 14 kg/t_{RE}) wird meist aus Gründen der Qualitätssteuerung und Logistik zu Stückschlacke verarbeitet, die im Schlackenbeet abgekippt und nach Abkühlung für die Baustoffproduktion weiterverarbeitet wird.

Bei der Eisenerzreduktion entsteht als gasförmiges Nebenprodukt des Hochofens das Hochofengas, das als brennbare Bestandteile ca. 23 Vol.-% Kohlenmonoxid (CO) sowie 3 – 5 Vol.-% Wasserstoff (H₂) enthält. Daraus ergibt sich ein Heizwert dieses Schwachgases von 3.406 kJ/m³ i. N. Spezifisch beträgt die im Hochofengas fühlbar und chemisch gebundene Energie 5.231 MJ/t_{RE}. Der Hochofenstaub enthält ferner noch brennbare Anteile, die energetisch genutzt und im Hüttenwerk recycelt werden.

Ferner sind die an der Hochofenanlage entstehenden Wärmeverluste durch Wandwärme (Strahlung und Konvektion) sowie durch Kühlwasser zu berücksichtigen, die zusammen 7,4 % der Energieausgaben verursachen.

Bilanz der Mischwinderzeugung

Etwa ein Drittel des Hochofengases wird zur Beheizung der regenerativ betriebenen Winderhitzer genutzt und dort zur Aufheizung der Brennschächte genutzt. Der erzeugte Mischwind besitzt im Mittel eine Temperatur von 1.235 °C, die Temperatur der Verbrennungsabgase verändert sich zyklisch und beträgt am Austritt der Winderhitzer im Mittel 300 °C. Die Abwärme dieser Abgase kann zusätzlich in einem Rekuperator (s. Teilbilanz REKU) zur Vorwärmung der Brenngase und/oder der Brennluft genutzt werden. Das Abgas im Rekuperator wird dann auf eine Temperatur von ca. 140 °C abgekühlt. Auf diese Weise wird ein thermischer Wirkungsgrad der Winderhitzer von bis zu 85 % erzielt.

Die Abgaswärme von Winderhitzern wird in den Hüttenwerken in Deutschland unterschiedlich genutzt. An einigen Hochöfen wird die Abgasenthalpie z. B. über eine Thermalölerhitzung auf die Brenngase übertragen, während in anderen Werken Heatpipes zur direkten Wärmeleitung zwischen den gasförmigen Medien verwendet werden. Einzelne Anlagen sind auch an ein Fernwärmenetz angeschlossen, dies wurde nicht in der gewählten Bilanz des Winderhitzers dargestellt.

Kühlwasser-Kreisläufe am Hochofen

An der Hochofenanlage werden mehrere Kühlwasserkreisläufe betrieben, die in unterschiedlicher Weise sowohl kontinuierlich als auch diskontinuierlich Abwärme der jeweiligen Prozesse aufnehmen und aus dem Prozess ableiten. Zum Teil werden Feststoffe in Absetzbecken und Filtern abgetrennt, bevor das Wasser in Kühltürmen zur Ableitung der Abwärme an die Umgebungskühlluft rückgekühlt

werden kann. Deshalb sind im Bereich des Hochofens drei Kühlwasser-Kreisläufe zu nennen mit folgenden charakteristischen Merkmalen:

- ▶ Kühlwasser des Hochofenmantels (Blasform)
 1. hohe Sicherheitsrelevanz für die Kühlung der Blasformen und des Mantels,
 2. Verwendung von demineralisiertem Wasser in eigenem, geschlossenem Kreislauf,
 3. indirekte Wärmeabgabe über Wärmeübertrager (WÜ) an Kühlturmkreislauf,
 4. Massenstrom: bis 11 t/t_{RE} bei einer Vor-/Rücklauftemperatur von 24 °C/35 °C.
- ▶ Gaswaschwasser
 1. Kontinuierlicher Betrieb des Gaswäschers zur Kühlung u. Reinigung von Hochofengas,
 2. Massenstrom: 3,4 t/t_{RE} bei einer Vor-/Rücklauftemperatur von 35 °C/46 °C,
 3. enthält Hochofenstaub durch direkten Kontakt mit Hochofengas,
 4. Kreislaufwasser wird in Absetzbecken vom Hochofenstaub (-Schlamm) gereinigt und anschließend im Kühlturm gekühlt.
- ▶ Granulationswasser
 1. wird diskontinuierlich nur während des Abstichs am Spritzkopf der Granulationsanlage auf die flüssige Schlacke gespritzt,
 2. Massenstrom: 3 t/t_{RE} bei einer Vor-/Rücklauftemperatur von 35 °C/65 °C,
 3. muss anschließend in Entwässerungströmmeln oder –silos von der Schlacke separiert und zwischen den Abstichen in Auffangbecken zwischengepuffert werden,
 4. enthält weiterhin noch feine, abrasiv wirkende Schlackenpartikel.

4.4.2 Möglichkeiten zur Abwärmenutzung

Die Kühlwasserströme der einzelnen Anlagen (Hochofen, Gasreinigung, Schlackengranulation) haben eine Temperatur von unter 70 °C und besitzen ein sehr geringes Potenzial zur Wärmerückgewinnung. Bei der Schlackengranulierung laufen seit vielen Jahren Entwicklungsarbeiten für einen trockenen Betrieb, bei dem eine Wärmerückgewinnung umsetzbar wäre. Derzeit sind jedoch keine großtechnischen Umsetzungen derartiger Anlagen in Sicht oder gar im Regelbetrieb.

Möglichkeiten zur Nutzung von Abwärme bestehen in folgenden Bereichen:

- ▶ Abwärme der Hochofenschlacke, z. B. bei Trockengranulation und Abwärme der 1.400 °C heißen Schlacke beim Abkippen im Schlackenbeet,
- ▶ Abwärme des 65 °C heißen Granulationswassers,
- ▶ Abwärme aus dem Abgas von Winderhitzern.

Die auf Basis dieser Energiebilanz bestimmte rechnerische bilanzielle Abwärme (nicht komplett technisch nutzbar) beträgt:

- | | |
|---|-------------|
| ▶ Abwärme der Hochofenschlacke (vor Granulation) | 448 MJ/t RE |
| ▶ Abwärme von Granulierwasser (Wärmeabgabe im Kühler) | 437 MJ/t RE |
| ▶ Abwärme des Abgases von Winderhitzern (vor REKU) | 343 MJ/t RE |

4.5 Oxygen-Stahlwerk mit Dampferzeugung

4.5.1 Energiebilanz eines Oxygenstahlwerks mit Konverter und Dampferzeugung

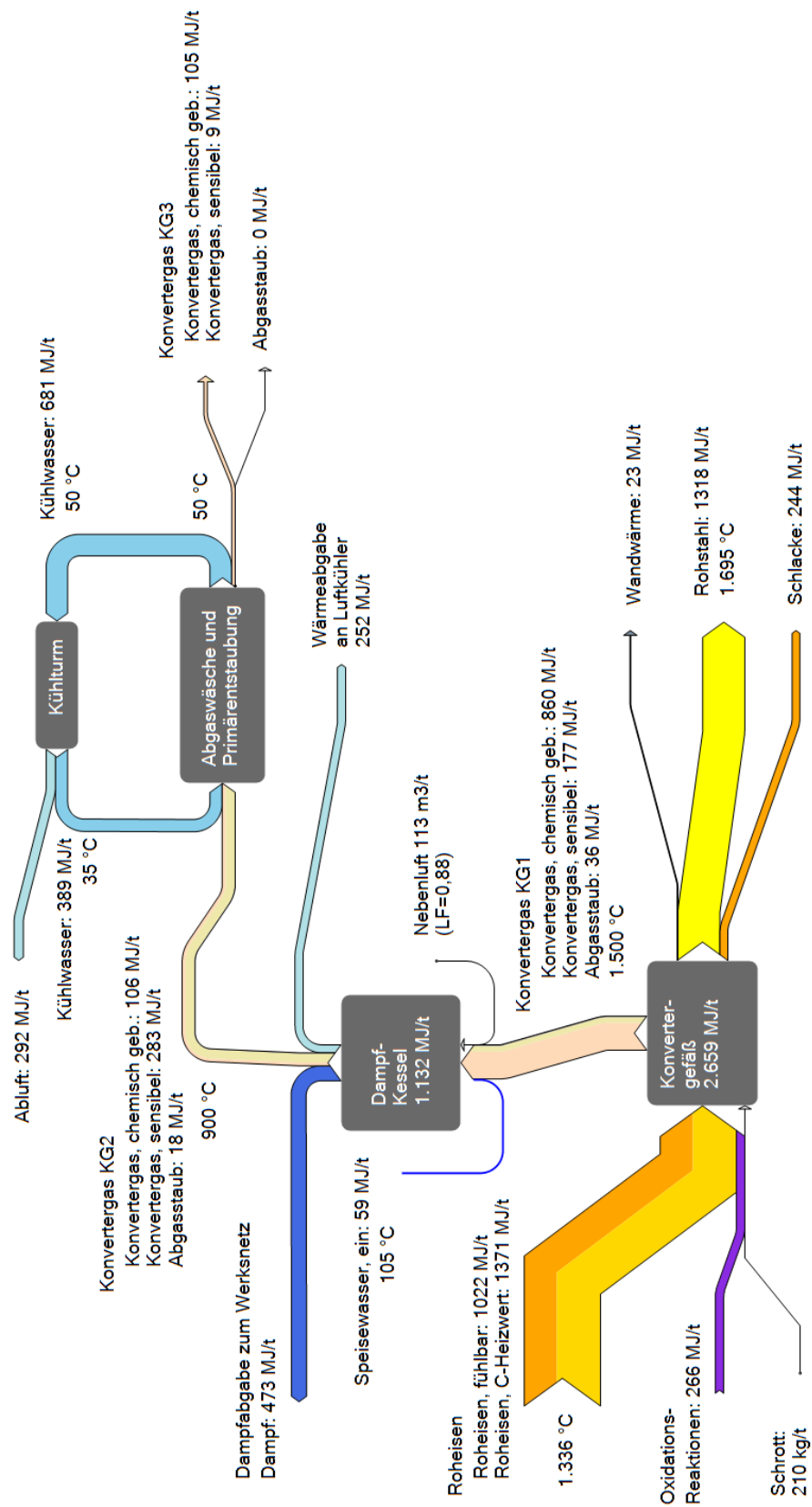
Nachfolgend wird die Energiebilanz eines Oxygenstahlwerks erläutert, bei dem das erzeugte Konvertergas zur Erzeugung von Prozessdampf genutzt wird. Diese Verfahrensvariante wird in Deutschland in zwei Stahlwerken praktiziert. Eine typische Bilanz dieses Verfahrens ist in Abbildung 23 sowie in Tabelle 14 und Tabelle 15 dargestellt. In Kapitel 4.6 wird die Verfahrensvariante mit Konvertergasrückgewinnung bilanziert.

Tabelle 14 zeigt die Energiebilanz des Konvertergefäßes und des Dampfkessels. Dem Konverter werden pro t flüssigem Rohstahl 861 kg Roheisen sowie 210 kg Schrott zugeführt. Beim Frischen des Stahls mit Sauerstoff wird der im Roheisen enthaltene Kohlenstoff zu Kohlenmonoxid oxidiert, dies ist eine exotherme Reaktion. Zusätzlich oxidieren 16 kg Eisen sowie die im Roheisen enthaltenen Nebenelemente des Roheisens exotherm zu Oxiden, die mit der Schlacke und dem Staub aus dem Konverter ausgetragen werden. Infolge der exothermen Reaktionen wird der flüssige Stahl beim Frischen mit Sauerstoff auf 1.695 °C erhitzt. Es entsteht dabei Konvertergas, das am Austritt des Konverters einen Heizwert von 11.361 kJ/m³ i. N. sowie eine Temperatur von im Mittel 1.500 °C besitzt.

Im nachgeschalteten Abhitze-(Dampf)-kessel wird das Konvertergas weitestgehend mit Umgebungsluft verbrannt. Die dabei entstehende Wärme wird im Kessel zur Dampferzeugung genutzt. Im dargestellten Fall werden 473 MJ/t_{RS,flüssig} an Dampf im Abhitzekessel erzeugt. Zusätzlich wird der Kessel am Eintritt mit Kühlwasser gekühlt, das in einem Luftkühler rückgeköhlt wird. Hier werden schätzungsweise 252 MJ/t_{RS,flüssig} in einem Luftkühler an die Umgebungsluft abgegeben.

Nach Nutzung der Abgaswärme zur Dampferzeugung und Abköhlung auf 900 °C wird das Konverterabgas mit Wasser im Gaswäscher abgeköhlt. Dies geschieht sehr schnell, um die Bildung von zyklischen Kohlenwasserstoffen zu unterbinden. Anschließend wird es in einer Nassentstaubung gereinigt. Das benötigte Kühlwasser zirkuliert insgesamt mit einem Massenstrom von 4,65 t/t_{RS}, die abzuführende Abwärme von 292 MJ/t_{RS,flüssig} wird über einen Kühlturm an die Umgebungsluft abgegeben.

Abbildung 23: Energiefließbild eines Oxygenstahlwerks mit Dampferzeugung (Angaben pro t_{RS,flüssig})



Eigene Darstellung, Stahlinstitut VDEh

Tabelle 14: Energiebilanz eines Oxygenstahlwerks mit Dampferzeugung – Teil 1

Produkt: Rohstahl flüssig

Einnahmen Konvertergefäß		Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie	% Energie
No.	Bilanzgröße	kg/t RS	m³ i.N./t RS	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.} \cdot \text{K}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	°C	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	MJ/t RS	
1	Roheisen, fühlbare Wärme	861		0,898	1.336		1.022	38,4%
2	Roheisen, kalt	7		0,560	15		0	0,0%
3	Roheisen, C-Heizwert	41				33.800	1.371	51,6%
4	Sauerstoff		51	1,306	15		0	0,0%
5	Schrott	210		0,560	15		0	0,0%
6	Kalk/Dolomit	53		0,759	15		0	0,0%
7	Oxidation von Fe (zu FeO)	16				5.033	81	3,0%
8	Oxidation von Si, Mn, P, Ti	s. RE-Analyse				215	185	7,0%
Summe							2.659	100,0%
Ausgaben Konvertergefäß						CO2-Anteil im KOG:		15,0%
No.	Bilanzgröße	Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie	% Energie
		kg/t RS	m³ i.N./t RS	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.} \cdot \text{K}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	°C	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	MJ/t RS	
1	Konvertergas KG1, Heizwert		76			11.361	860	32,4%
2	Konvertergas KG1, fühlbare Wärme		76	1,577	1.500		177	6,7%
3	Staub im Konvertergas	21		1,169	1.500		36	1,4%
4	Schlacke	111		1,310	1.695		244	9,2%
5	Rohstahl	1.000		0,785	1.695		1.318	49,6%
6	Wandwärmeverlust						23	0,8%
Summe							2.659	100,0%
Einnahmen Dampfkessel						Teilverbrennung d. Nebenluft		81,7%
No.	Bilanzgröße	Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie	% Energie
		kg/t RS	m³ i.N./t RS	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.} \cdot \text{K}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	°C	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	MJ/t RS	
1	Konvertergas KG1, Heizwert	0	76			11.361	860	76,0%
2	Konvertergas KG1, fühlbare Wärme	0	76	1,577	1.500		177	15,7%
3	Staub im Konvertergas KG1	21		1,169	1.500		36	3,2%
4	Speisewasser (für Dampf)	157		4,184	105		59	5,2%
5	Nebenluft (für CO-Verbrennung)		142	1,301	15		0	0,0%
Summe							1.132	100,0%
Ausgaben Dampfkessel								
No.	Bilanzgröße	Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie	% Energie
		kg/t RS	m³ i.N./t RS	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.} \cdot \text{K}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	°C	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	MJ/t RS	
1	Konvertergas KG2, CO-Heizwert	0	188			562	106	9,3%
2	Konvertergas KG2, fühlbare Wärme		188	1,700	900		283	25,0%
3	Staub im Konvertergas KG2	21		1,013	900		18	1,6%
4	Dampferzeugung (zum Werksnetz)	157				3.010	473	41,8%
5	Wärmeabgabe an Luftkühler						252	22,3%
Summe							1.132	100,0%

123 gewichteter Jahresmittelwert der Hüttenwerke in Deutschland (2014)

123 frei gewählter Parameter der Bilanz, Eingabegröße

123 Stoffdaten gasförmiger Stoffe, die Einheit ist auf m³ i.N. bezogen

123 Daten aus eigenen Untersuchungen

123 mit Bilanzgleichungen und Stoffdaten berechnete Zwischenergebnisse

Tabelle 15: Energiebilanz eines Oxygenstahlwerks mit Dampferzeugung – Teil 2

Produkt: Rohstahl flüssig

Einnahmen Gaswäsche und Primärenstaubung							
No.	Bilanzgröße	Massenstrom kg/t RS	Volumenstrom m ³ i.N./t RS	cp kJ/m ³ i.N.*K kJ/kg*K	Temp. °C	ΔhR bzw. hu kJ/m ³ i.N. kJ/kg	Energie MJ/t RS
1	Konvertergas KG2, CO-Heizwert		188	0	0	562	106
2	Konvertergas KG2, fühlbare Wärme		188	1,700	900	0	283
3	Staub im Konvertergas KG2	21		1,013	900		18
4	Kühlwasser	4.650		4,187	35		389
Summe							797
Ausgaben Gaswäsche und Primärenstaubung							
No.	Bilanzgröße	Massenstrom kg/t RS	Volumenstrom m ³ i.N./t RS	cp kJ/m ³ i.N.*K kJ/kg*K	Temp. °C	ΔhR bzw. hu kJ/m ³ i.N. kJ/kg	Energie MJ/t RS
1	Konvertergas KG3, CO-Heizwert		188			562	106
2	Konvertergas KG3, fühlbare Wärme		188	1,437	50		9
3	Abgasstaub	21		0,669	50		0
4	Kühlwasser	4.650		4,187	50		681
Summe							797
Einnahmen Kühlturm							
No.	Bilanzgröße	Massenstrom kg/t RS	Volumenstrom m ³ i.N./t RS	cp kJ/m ³ i.N.*K kJ/kg*K	Temp. °C	ΔhR bzw. hu kJ/m ³ i.N. kJ/kg	Energie MJ/t RS
1	Kühlwasser	4.650	0	4,187	50	0	681
2	Kühlluft, ein		19.411	1,301	15		
Summe							681
Ausgaben Kühlturm							
No.	Bilanzgröße	Massenstrom kg/t RS	Volumenstrom m ³ i.N./t RS	cp kJ/m ³ i.N.*K kJ/kg*K	Temp. °C	ΔhR bzw. hu kJ/m ³ i.N. kJ/kg	Energie MJ/t RS
1	Kühlluft, Austritt		19.411	1,302	35		292
2	Kühlwasser	4.650		4,187	35		389
Summe							681

123 gewichteter Jahresmittelwert der Hüttenwerke in Deutschland (2014)

123 frei gewählter Parameter der Bilanz, Eingabegröße

123 Stoffdaten gasförmiger Stoffe, die Einheit ist auf m³ i.N. bezogen

123 Daten aus eigenen Untersuchungen

123 mit Bilanzgleichungen und Stoffdaten berechnete Zwischenergebnisse

4.5.2 Möglichkeiten zur Abwärmenutzung

Bei dem Verfahren mit Dampferzeugung wird die thermische Energie des Konvertergases im Dampfkessel zu Dampf umgewandelt. Dieser Dampf kann anderen Nutzern von Prozessdampf über das werksinterne Dampfnetz zugeführt werden.

Darüber hinaus wird die überschüssige Abwärme vorwiegend als Kühlwasser aus dem Prozess abgeleitet, das wie bereits dargestellt derzeit nicht weiter genutzt wird.

Weitere Möglichkeiten zur Abwärmenutzung bestehen in folgenden Bereichen:

- Erweiterung des Dampfkessels von 900 °C des Gases am Kesselaustritt auf den Temperaturbereich von 400 – 600 °C und Nutzung des produzierten Dampfes (wird bereits zu 50 % am Konverter und an Vakuumanlagen eingesetzt als Vakuum-, Sperr- und Treibdampf)
- Nutzung der Abwärme der mit 1.695 °C abgekippten Konverterschlacke

Die auf Basis dieser Energiebilanz bestimmte rechnerische bilanzielle Abwärme (nicht komplett technisch nutzbar) beträgt:

- Fühlbare Wärme des Konverterabgases (bei 900 °C, vor Gaswäsche) 283 MJ/t RS
- Fühlbare Wärme der Konverterschlacke 244 MJ/t RS

4.6 Oxygen-Stahlwerk mit Konvertergasgewinnung

4.6.1 Energiebilanz eines Oxygenstahlwerks mit Konverter und Konvertergasgewinnung

Abbildung 24 sowie Tabelle 16 und Tabelle 17 zeigen die Energiebilanz eines Oxygenstahlwerks mit Konvertergasgewinnung. Im dargestellten Fall wird der Konverter pro t flüssigem Rohstahl mit rund 861 kg Roheisen und 210 kg Schrott beschickt. Über den Blasvorgang ergibt sich für das Konvertergas am Austritt des Converters eine Abgastemperatur von im Mittel 1.500 °C, der flüssige Rohstahl und die Schlacke erreichen zum Ende des Blasvorgangs eine Temperatur von rund 1.695 °C.

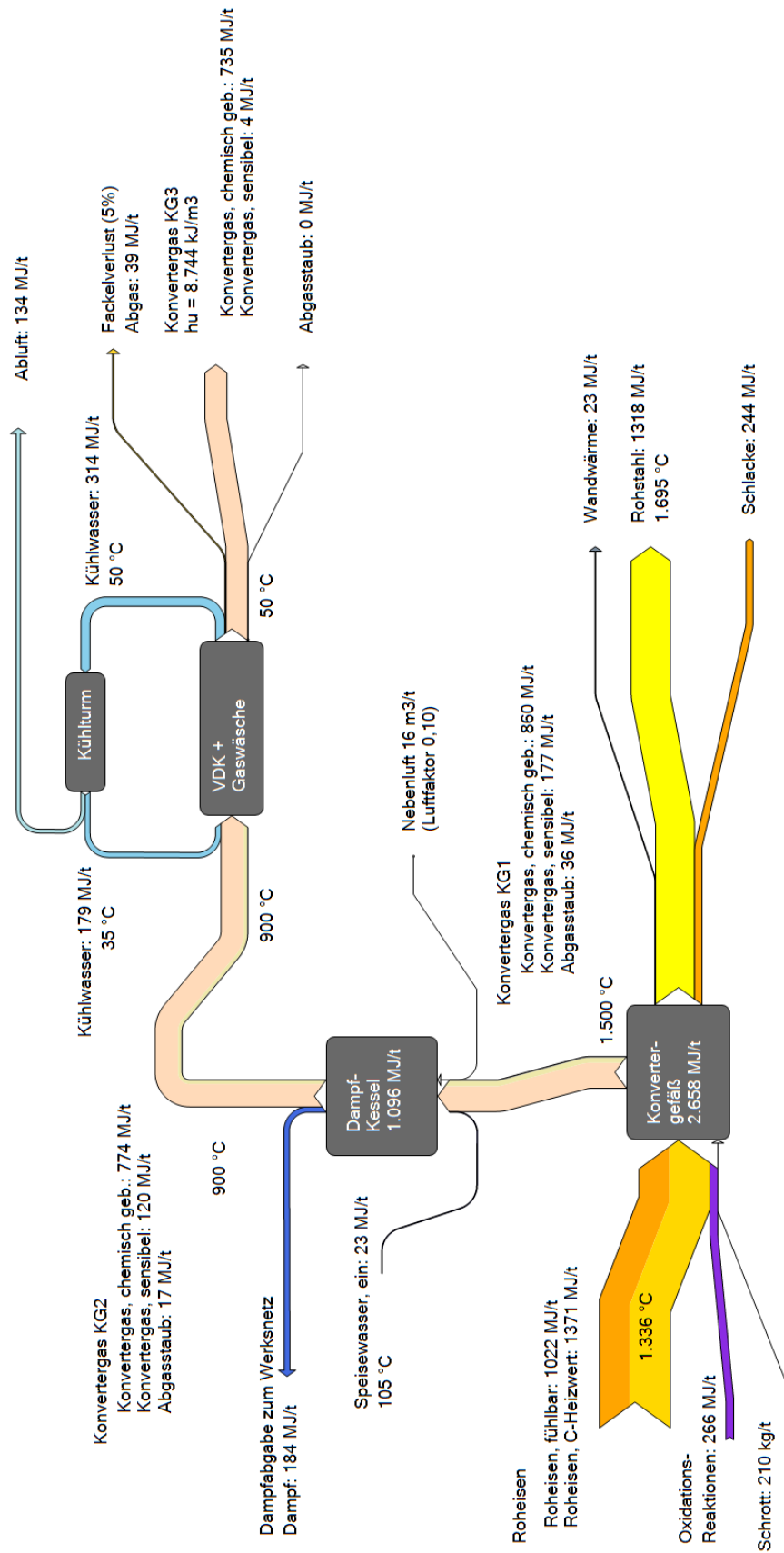
Das heiße Konvertergas wird zunächst im Dampfkessel von 1.500 °C auf rund 900 °C abgekühlt, gleichzeitig wird die sensible Wärme des Abgases zur Erzeugung von 184 MJ/t_{RS,flüssig} an Dampf genutzt. Im Anschluss wird das Konverterabgas durch Eindüsung und Verdampfung von Wasser auf 50 °C gequenchet und in einer Gaswäsche gereinigt. Das Wasch-/Kühlwasser wird in einem Absetzbecken von den Stäuben gereinigt bevor es anschließend im Kühlturm rückgekühlt wird.

Im Ergebnis wird mit dem o.g. Verfahren ein gereinigtes, CO-haltiges Konvertergas mit einem Heizwert von 8.744 kJ/m³_{i.N.} erzeugt. Ein geringer Anteil des Konvertergases von ca. 5 %, der aus An- und Abfahrvorgängen stammt, muss aus Sicherheitsgründen abgefackelt werden. Es verbleibt dann eine nutzbare Konvertergasenergie von 735 MJ/t_{RS,flüssig}, die nach Zwischenspeicherung des Konvertergases in einem Gasspeicher (Gasometer) weiteren Anlagen des Hüttenwerks als Brenngas zur thermischen Nutzung zugeführt wird.

Bei der Berechnung der Gasbilanz in Tabelle 16 und Tabelle 17 wurden folgende Annahmen getroffen:

- ▶ beim Frischen im Konverter entsteht bereits ca. 10 % CO₂ im Konvertergas,
- ▶ beim Übergang zum Dampfkessel verbrennen ca. 10 % des Konvertergases durch Falschluftritt,
- ▶ vom gekühlten Konvertergas werden zu Beginn und zum Ende des Frischens insgesamt ca. 5 % minderwertiges Gas als Fackelverlust abgezweigt.

Abbildung 24: Energiefließbild eines Oxygenstahlwerks mit Konvertergasgewinnung (Angaben pro t_{RS,flüssig})



Eigene Darstellung, Stahlinstitut VDEh

Tabelle 16: Energiebilanz eines Oxygenstahlwerks mit Konvertergasgewinnung – Teil 1

Produkt: Rohstahl flüssig

Einnahmen Konvertergefäß					Roheisen-C-Gehalt:		4,7%	
No.	Bilanzgröße	Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie	% Energie
		kg/t RS	m3 i.N./t RS	kJ/m3 i.N.*K kJ/kg*K	°C	kJ/m3 i.N. kJ/kg	MJ/t RS	
1	Roheisen, fühlbare Wärme	861		0,888	1.336		1.022	38,4%
2	Roheisen, kalt	7		0,560	15		0	0,0%
3	Roheisen, C-Heizwert	41				33.800	1.371	51,6%
4	Sauerstoff		51	1,306	15		0	0,0%
5	Schrott	210		0,560	15		0	0,0%
6	Kalk/Dolomit	53		0,759	15		0	0,0%
7	Oxidation von Fe (zu FeO)	16				5.033	81	3,0%
8	Oxidation von Si, Mn, P, Ti	s. RE-Analyse				215	185	7,0%
Summe							2.658	100,0%
Ausgaben Konvertergefäß						CO2-Anteil im COG:		10,8%
No.	Bilanzgröße	Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie	% Energie
		kg/t RS	m3 i.N./t RS	kJ/m3 i.N.*K kJ/kg*K	°C	kJ/m3 i.N. kJ/kg	MJ/t RS	
1	Konvertergas KG1, Heizwert		76			11.361	860	32,4%
2	Konvertergas KG1, fühlbare Wärme	0	76	1,577	1.500		177	6,7%
3	Staub im Konvertergas KG1	21		1,169	1.500		36	1,3%
4	Schlacke, fühlbare Wärme	111		1,310	1.695		244	9,2%
5	Rohstahl	1.000		0,785	1.695		1.318	49,6%
6	Wandwärmeverlust						23	0,9%
Summe							2.658	100,0%
Einnahmen Dampfkessel						Teilverbrennung d. Nebenluft		10%
No.	Bilanzgröße	Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie	% Energie
		kg/t RS	m3 i.N./t RS	kJ/m3 i.N.*K kJ/kg*K	°C	kJ/m3 i.N. kJ/kg	MJ/t RS	
1	Konvertergas KG1, Heizwert		76			11.361	860	78,5%
2	Konvertergas KG1, fühlbare Wärme		76	1,577	1.500		177	16,2%
3	Staub im Konvertergas	21		1,169	1.500		36	3,3%
4	Speisewasser (für Dampf)	61		4,187	105		23	2,1%
5	Nebenluft		16	1,301	15		0	0,0%
Summe							1.096	100,0%
Ausgaben Dampfkessel								
No.	Bilanzgröße	Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie	% Energie
		kg/t RS	m3 i.N./t RS	kJ/m3 i.N.*K kJ/kg*K	°C	kJ/m3 i.N. kJ/kg	MJ/t RS	
1	Konvertergas KG2, CO-Heizwert	0	89			8.744	774	70,6%
2	Konvertergas KG2, fühlbare Wärme		89	1,535	900		120	11,0%
3	Staub	21		1,013	900		17	1,6%
4	Dampferzeugung	61				3.010	184	16,8%
Summe							1.096	100,0%

123 gewichteter Jahresmittelwert der Hüttenwerke in Deutschland (2014)

123 frei gewählter Parameter der Bilanz, Eingabegröße

123 Stoffdaten gasförmiger Stoffe, die Einheit ist auf m³ i.N. bezogen

123 Daten aus eigenen Untersuchungen

123 mit Bilanzgleichungen und Stoffdaten berechnete Zwischenergebnisse

Tabelle 17: Energiebilanz eines Oxygenstahlwerks mit Konvertergasgewinnung – Teil 2

Produkt: Rohstahl flüssig

Einnahmen VDK+Gaswäsche							
No.	Bilanzgröße	Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie
		kg/t RS	m ³ i.N./t RS	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.} \cdot \text{K}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	°C	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{MJ}}{\text{t RS}}$
1	Konvertergas KG2, CO-Heizwert	0	89			8.744	774
2	Konvertergas KG2, fühlbare Wärme	0	89	1,535	900		120
3	Staub im Rohgas	21		1,013	900		18
4	Kühlwasser zum VDK	2.140		4,187	35		179
Summe							1.092
Ausgaben VDK+Gaswäsche							
No.	Bilanzgröße	Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie
		kg/t RS	m ³ i.N./t RS	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.} \cdot \text{K}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	°C	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{MJ}}{\text{t RS}}$
1	Konvertergas KG3, CO-Heizwert		84			8.744	735
2	Konvertergas KG3, fühlbare Wärme	0	84	1,363	50		4
3	Staub	21		0,669	50		0
4	Kühlwasser	2.140		4,187	50		314
5	Fackelverlust						39
Summe							1.092
Einnahmen Kühlturm							
No.	Bilanzgröße	Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie
		kg/t RS	m ³ i.N./t RS	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.} \cdot \text{K}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	°C	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{MJ}}{\text{t RS}}$
1	Kühlwasser	2.140		4,187	50		314
2	Kühlluft, ein		5.161	1,301	15		0
Summe							314
Ausgaben Kühlturm							
No.	Bilanzgröße	Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie
		kg/t RS	m ³ i.N./t RS	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.} \cdot \text{K}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	°C	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{MJ}}{\text{t RS}}$
1	Kühlluft, Austritt		5.161	1,302	35		134
2	Kühlwasser zum VDK	2.140	0	4,187	35		179
Summe							314

123 gewichteter Jahresmittelwert der Hüttenwerke in Deutschland (2014)

123 frei gewählter Parameter der Bilanz, Eingabegröße

123 Stoffdaten gasförmiger Stoffe, die Einheit ist auf m³ i.N. bezogen

123 Daten aus eigenen Untersuchungen

123 mit Bilanzgleichungen und Stoffdaten berechnete Zwischenergebnisse

4.6.2 Möglichkeiten zur Abwärmenutzung

Möglichkeiten zur Abwärmenutzung bestehen beim Oxygenstahl-Konverter in folgenden Bereichen:

- Nutzung der Fackelverluste von Konvertergas zur Wärmeerzeugung,
- Nutzung der Abwärme der mit 1.600 °C abgekippten Konverterschlacke.
- Abgas am Konverter: Erweiterung des Dampfkessels und Nutzung des produzierten Dampfes (wird bereits zu 50 % am Konverter und an Vakuumanlagen eingesetzt als Vakuum-, Sperr- und Treibdampf),

Es gelten ähnliche Verhältnisse wie in Kapitel 4.5.2 beschrieben.

Die auf Basis dieser Energiebilanz bestimmte rechnerische bilanzielle Abwärme (nicht komplett technisch nutzbar) beträgt:

- Fühlbare Wärme des Konverterabgases (bei 900 °C, vor Gaswäsche) 120 MJ/t RS
- Fühlbare Wärme der Konverterschlacke 244 MJ/t RS
- Fackel-Energieverlust (bei 5 %) 39 MJ/t RS

4.7 Stranggießanlage

4.7.1 Energiebilanz einer Stranggießanlage

Abbildung 25 sowie die Tabelle 18 und die Tabelle 19 zeigen das Energiefließbild mit Energiebilanz einer Stranggießanlage.

Die Herstellung von Strangguss wurde idealisiert in drei Teilbereichen dargestellt. Dabei verläuft die Abkühlung von der Gießtemperatur des flüssigen Rohstahls in Höhe von 1.550 °C zur Temperatur der festen Bramme in folgenden Schritten:

1. Erstarren des äußeren Mantels der Bramme in der Kokille,
2. Abkühlung beim weiteren Erstarren in der Sekundärkühlung auf 994 °C (überwiegend mit Wasserkühlung; bei einigen Güten muss mit Luft gekühlt werden),
3. Abkühlung der Bramme an Luft im Kühltunnel auf 500 °C.

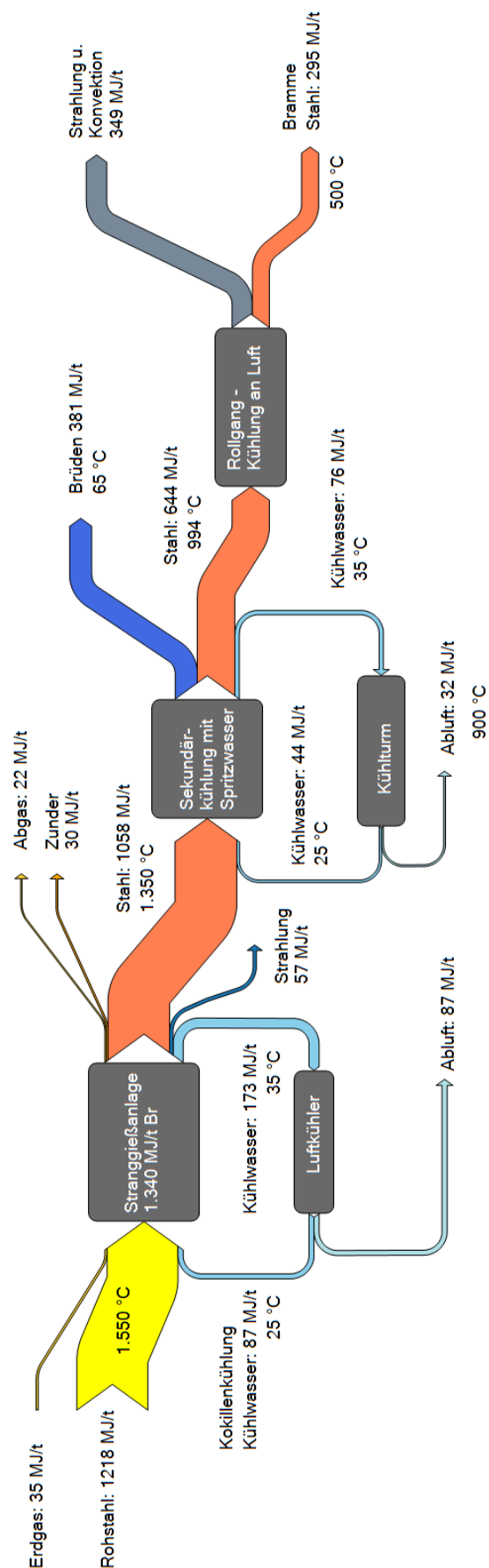
Als Endtemperatur der Kühlung wird ein Zielwert für die Temperatur der Bramme von 500 °C angenommen, da unterhalb dieser Temperatur der feste Rohstahl magnetisch ist und mit dafür geeigneten Fördereinrichtungen bewegt werden kann. Das Ausbringen von festem Rohstahl beträgt 97,65 % des Einsatzes von flüssigem Rohstahl, der Rest verbleibt produktionsbedingt in den Anlagenteilen.

Während der Kühlschritt 3 an Luft erfolgt, wird bei den o.g. Kühlvorgängen 1 und 2 überwiegend Kühlwasser verwendet. Allerdings muss das Kühlwasser qualitativ unterschieden werden in

- Kühlwasser zur Kokillenkühlung
 1. Verwendung von demineralisiertem Wasser in eigenem, geschlossenem Kreislauf,
 2. hohe Sicherheitsrelevanz, deshalb zusätzlich mit Notwasser abgesichert,
 3. indirekte Wärmeabgabe über Wärmeübertrager (WÜ) an Kühlturm-Kreislauf,
 4. Massenstrom des demineralisierten Wassers: 2 t/t_{RS,fest} bei einer Vor-/ Rücklauftemperatur von 25 °C/35 °C.
- Spritzwasser und Kühlwasser der Sekundärkühlung
 1. Massenstrom: 1,04 t/t_{RS,fest} Spritzwasser bei einer Vor-/Rücklauftemperatur von 25 °C/35 °C,
 2. Verdampfung von 13 % des Spritzwassers als Brüden (Tabelle 18),
 3. mit dem Kühlwasser wird Zunder ausgetragen, Abtrennung im Absetzbecken,
 4. anschließend wird das Kühlwasser im Kühlturm rückgeköhlt auf 25 °C.

Die Brammen werden im nächsten Schritt dem Warmwalzwerk zugeführt. Häufig ist eine Zwischenlagerung erforderlich (vgl. Darstellung in Kap. 3.1). Deshalb wird die Restwärme der Brammen nur zum Teil bei einem Wärmeinsatz im Walzwerk genutzt.

Abbildung 25: Energiefließbild einer Stranggießanlage (Angaben pro t_{RE,fest})



Eigene Darstellung, Stahlinstitut VDEh

Tabelle 18: Energiebilanz einer Stranggießanlage – Teil 1

Produkt: Rohstahl fest

Einnahmen Stranggießanlage							
No.	Bilanzgröße	Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie
		kg/t Br	m ³ i.N./t Br	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.} \cdot \text{K}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	°C	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	MJ/t Br
1	Brennluft		10	1,301	15		0
2	Brenngas		1		15	35.900	35
3	Rohstahl flüssig	1.020		0,778	1.550		1.218
4	Kühlwasser Kokille+Maschine	2.070		4,1868	25		87
Summe							1.340
No.	Bilanzgröße	Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie
		kg/t Br	m ³ i.N./t Br	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.} \cdot \text{K}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	°C	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	MJ/t Br
1	Abgas		11	1,610	1.300		22
2	Bramme	1.000		0,792	1.350		1.058
3	Kühlwasser Kokille	2.070		4,187	35		173
4	Zunder	20		1,137	1.350		30
5	Strahlungsverlust						57
Summe							1.340
Einnahmen Sekundärkühlung							
No.	Bilanzgröße	Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie
		kg/t Br	m ³ i.N./t Br	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.} \cdot \text{K}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	°C	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	MJ/t Br
1	Bramme	1.000			1.350		1.058
3	Kühl-/Spritzwasser, Vorlauf	1.043		4,187	25		44
Summe							1.101
Ausgaben Sekundärkühlung							
No.	Bilanzgröße	Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie
		kg/t Br	m ³ i.N./t Br	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.} \cdot \text{K}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	°C	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	MJ/t Br
1	Bramme	1.000		0,658	994		644
2	Brüden	143				2.676	381
3	Kühl-/Spritzwasser, Rücklauf	900		4,184	35		75
Summe							1.101
Einnahmen Rollgang							
No.	Bilanzgröße	Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie
		kg/t Br	m ³ i.N./t Br	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.} \cdot \text{K}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	°C	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	MJ/t Br
1	Bramme	1.000			994		644
Summe							644
Ausgaben Rollgang							
No.	Bilanzgröße	Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie
		kg/t Br	m ³ i.N./t Br	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.} \cdot \text{K}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	°C	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	MJ/t Br
1	Bramme	1.000		0,609	500		295
2	Strahlung						349
Summe							644
Einnahmen Luftkühler							
No.	Bilanzgröße	Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie
		kg/t Br	m ³ i.N./t Br	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.} \cdot \text{K}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	°C	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	MJ/t Br
1	Kühlwasser Kokille	2.070	0	4,187	35	0	173
2	Kühlluft ein		3.215	1,301	15		0
Summe							173
Ausgaben Luftkühler							
No.	Bilanzgröße	Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie
		kg/t Br	m ³ i.N./t Br	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.} \cdot \text{K}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	°C	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	MJ/t Br
1	Kühlwasser Kokille+Maschine	2.070	0	4,187	25	0	87
2	Kühlluft, aus		4.437	1,302	30		87
Summe							173

123 gewichteter Jahresmittelwert der Hüttenwerke in Deutschland (2014)

123 frei gewählter Parameter der Bilanz, Eingabegröße

123 Stoffdaten gasförmiger Stoffe, die Einheit ist auf m³ i.N. bezogen

123 Daten aus eigenen Untersuchungen

123 mit Bilanzgleichungen und Stoffdaten berechnete Zwischenergebnisse

Tabelle 19: Energiebilanz einer Stranggießanlage – Teil 2

Produkt: Rohstahl fest

Einnahmen Kühlturm							
No.	Bilanzgröße	Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie
		kg/t Br	m ³ i.N./t Br	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.} \cdot \text{K}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	°C	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	MJ/t Br
1	Kühl-/Spritzwasser, Rücklauf	900	0	4,187	35	0	75
2	Kühlluft ein		1.620	1,301	15		0
3	Speisewasser	143		4,187	15		0
Summe							75
Ausgaben Kühlturm							
No.	Bilanzgröße	Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie
		kg/t Br	m ³ i.N./t Br	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.} \cdot \text{K}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	°C	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	MJ/t Br
2	Kühl-/Spritzwasser, Vorlauf	1.043	0	4,187	25	0	44
3	Kühlluft, aus		1.621	1,302	30		32
Summe							75

123 gewichteter Jahresmittelwert der Hüttenwerke in Deutschland (2014)

123 frei gewählter Parameter der Bilanz, Eingabegröße

123 Stoffdaten gasförmiger Stoffe, die Einheit ist auf m³ i.N. bezogen

123 Daten aus eigenen Untersuchungen

123 mit Bilanzgleichungen und Stoffdaten berechnete Zwischenergebnisse

4.7.2 Möglichkeiten zur Abwärmenutzung

An der Stranggießanlage bestehen theoretisch folgende Möglichkeiten zur Nutzung von Abwärme:

- Nutzung der mit Spritzwasser erzeugten Brüden,
- Nutzung der Restwärme der Brammen.

Die Kühlwässer der Stranggießanlage haben mit bis zu 35 °C ein sehr niedriges Temperaturniveau und sind daher kaum nutzbar. Die Brüden der Spritzwasserkühlung können nur teilweise gefasst werden und sind ebenfalls vom Temperaturniveau sehr gering.

Die auf Basis dieser Energiebilanz bestimmte rechnerische bilanzielle Abwärme (nicht komplett technisch nutzbar) beträgt:

- Fühlbare u. latente Wärme der Brüden aus der Sekundärkühlung 381 MJ/t Br
- Fühlbare Wärme der heißen Brammen (bei 994 °C) 644 MJ/t Br

4.8 Warmwalzwerk

4.8.1 Energiebilanz eines Warmwalzwerks

Nachfolgend wird eine typische Energiebilanz eines Warmwalzwerks mit Produktion von Warmband erläutert, bei dem die eingesetzten Brammen ohne Restwärme vom Gießen zum Einsatz kommen. Typische Bilanzen sind in Abbildung 26 sowie in Tabelle 20 bis Tabelle 22 dargestellt.

Die Bilanzen zeigen die Energieeinnahmen und –ausgaben eines Warmwalzwerks für Warmband. Die Warmbandproduktionsmenge unterscheidet sich deutlich von der in der Stranggießanlage erzeugten Menge an festem Rohstahl, denn Brammen werden als Produkte über Standortgrenzen der Werke hinaus gehandelt.

Die Energiezufuhr für den Prozess erfolgt über den Erwärmungssofen, dessen spezifischer Brenngasenergiebedarf in Tabelle 20 mit einem Zahlenwert in Höhe von $1,5 \text{ GJ/t}_{\text{WB}}$ dargestellt ist. Der spez. Brennstoffenergiebedarf hängt von vielen Faktoren ab. So wird er zunächst vom Wirkungsgrad des Rekuperators beeinflusst, der einen Teil der Abgasenergie zur Vorwärmung der Verbrennungsluft nutzt. Die verbleibende Abgasabwärme wird bei einigen Ofenanlagen noch zur Erzeugung von Dampf oder für andere Zwecke genutzt. In der dargestellten Bilanz wird eine Dampferzeugung betrachtet, bei der schon ein Teil des Speisewassers als Kühlwasser der Ofenanlage vorgewärmt wird.

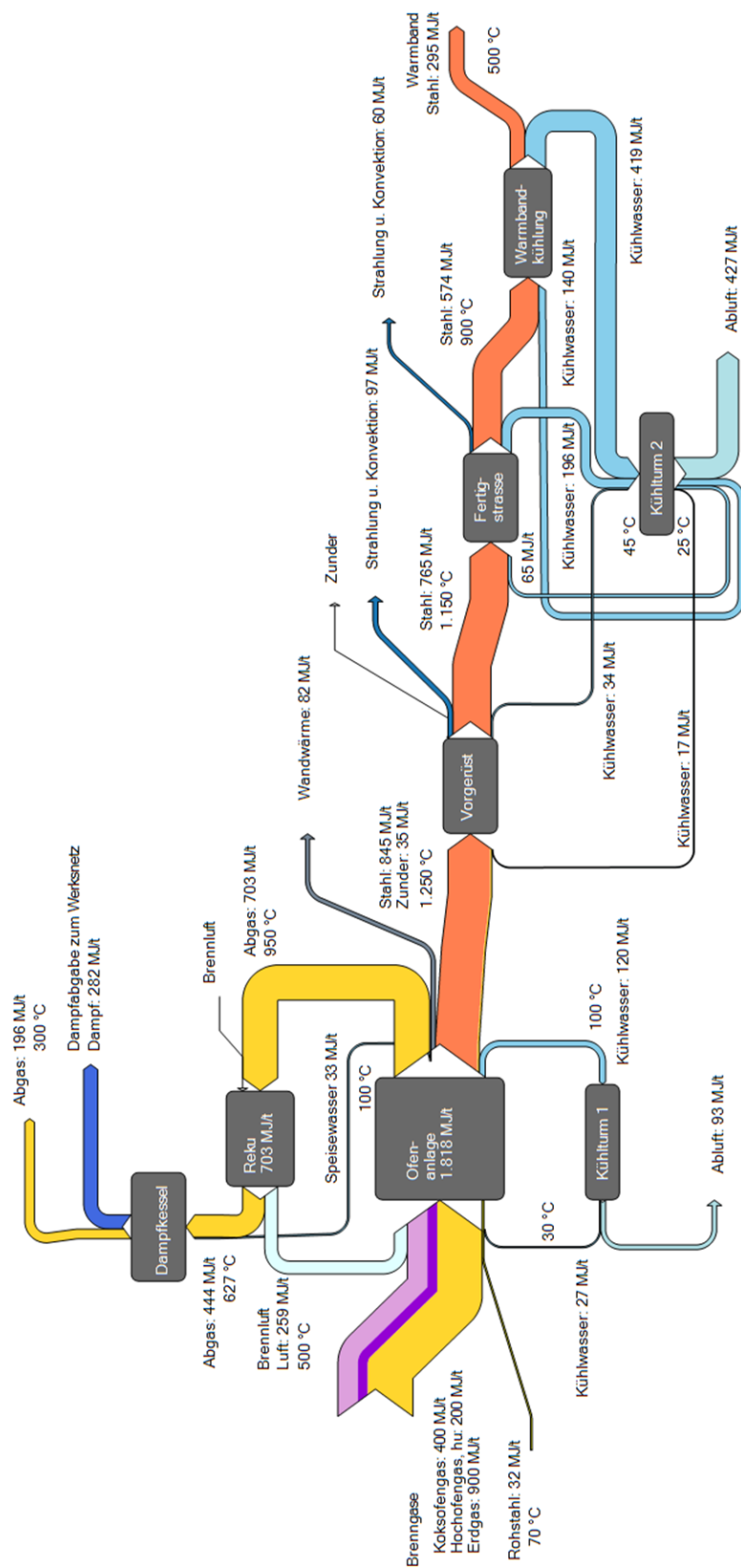
Tatsächlich kann der Energiebedarf verschiedener Erwärmungsöfen stark variieren. Er hängt z. B. vom technischen Zustand der Ofenanlage, den jeweiligen Bedingungen hinsichtlich Luftüberschuss und Falschlufte der Feuerungen, der gewählten feuerfesten Auskleidung und Dämmung, den Kühleinrichtungen des Ofens und der Ofenbeladung ab. Ferner kann bei Warmeinsatz von Brammen ebenfalls eine Verminderung des Energiebedarfs erzielt werden. Der Energiebedarf ist ferner direkt von der Aufheizzeit der betrachteten Formate des Einsatzmaterials abhängig. Aus diesen Parametern ergibt sich eine Bandbreite für den spezifischen Brennstoffenergiebedarf einzelner Aufwärmöfen von $1,4 - 2,0 \text{ GJ/t}_{\text{WB}}$.

Die Bilanzen zeigen, dass in Warmwalzwerken aus der Nutzung des Ofenabgases im Mittel $282 \text{ MJ/t}_{\text{WB}}$ an Dampf erzeugt werden können. Es verbleibt im Abgas eine bilanzielle Abwärmemenge in Höhe von $196 \text{ MJ/t}_{\text{WB}}$ bei einem Temperaturniveau von 300°C .

Innerhalb des Walzprozesses wird die Bramme von einer Temperatur in Höhe von 1.250°C am Ofenaustritt nach Entzunderung auf dem Vorgerüst im Temperaturbereich oberhalb 900°C umgeformt zu Warmband. Das Warmband wird dann im Bereich der Warmbandkühlung gezielt einer zeitlich genau zugeordneten Umwandlung der Phasen unterzogen und hierfür mit Wasser bis auf 500°C abgekühlt. Das Warmband wird dann im Coil aufgerollt und anschließend zur weiteren Abkühlung an der Luft gelagert.

Zwischen den Walzgerüsten und der Haspel wird das Warmband bei einer durch die Produkteigenschaften definierten Temperatur gezielt abgekühlt. Dieser Prozess ist entscheidend für die Produktqualität. Eine Wärmeauskopplung ist hier kritisch in Bezug auf Gefügeausbildung und Formtreue. Aus den Abkühlkurven der zugrundeliegenden ZTU-Diagrammen sind die eng gesteckten Kühlbedingungen gut ersichtlich (siehe Abbildung 7 rechts unten).

Abbildung 26: Energiefließbild eines Warmwalzwerks (Angaben pro t_{WB})



Eigene Darstellung, Stahlinstitut VDEh

Tabelle 20: Energiebilanz eines Warmwalzwerks – Teil 1

Produkt: Warmband

Einnahmen Ofen		Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie	% Energie
No.	Bilanzgröße	kg/t WB	m ³ i.N./t WB	kJ/m ³ i.N.*K kJ/kg*K	°C	kJ/m ³ i.N. kJ/kg	MJ/t WB	
1	Bramme	1.020		0,566	70		32	1,7%
2	Koksofengas		22			17.900	400	22,0%
3	Hochofengas		58			3.470	200	11,0%
4	Erdgas		25			35.900	900	49,5%
5	Brennluftbedarf		398	1,343	500		259	14,2%
6	Kühlwasser Vorlauf	430		4,187	30		27	1,5%
Summe							1.818	100,0%
Ausgaben Ofen		Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie	% Energie
No.	Bilanzgröße	kg/t WB	m ³ i.N./t WB	kJ/m ³ i.N.*K kJ/kg*K	°C	kJ/m ³ i.N. kJ/kg	MJ/t WB	
1	Bramme	1.000		0,684	1.250		845	46,5%
2	Zunder	26		1,113	1.250		35	1,9%
3	Abgas Koksofengas		119	1,539	950		171	9,4%
4	Abgas Hochofengas		89	1,667	950		139	7,7%
5	Abgas Erdgas		273	1,539	950		393	21,6%
6	Wandwärmeverlust / Öffnungen						82	4,5%
7	Speisewasser, heiss	94		4,187	100		33	1,8%
8	Kühlwasser Rücklauf	336		4,187	100		120	6,6%
Summe			208				1.818	100,0%
Einnahmen Vorgerüst		Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie	% Energie
No.	Bilanzgröße	kg/t WB	m ³ i.N./t WB	kJ/m ³ i.N.*K kJ/kg*K	°C	kJ/m ³ i.N. kJ/kg	MJ/t WB	
1	Bramme	1.000		0,684	1.250		845	94,1%
2	Zunder ex Ofen	26		1,113	1.250		35	3,9%
3	Zunder-Waschwasser	10		4,187	25		0	0,0%
4	Kühlwasser Vorgerüst	400		4,187	25		17	1,9%
Summe							897	100,0%
Ausgaben Vorgerüst		Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie	% Energie
No.	Bilanzgröße	kg/t WB	m ³ i.N./t WB	kJ/m ³ i.N.*K kJ/kg*K	°C	kJ/m ³ i.N. kJ/kg	MJ/t WB	
1	Bramme	1.000		0,674	1.150		765	85,3%
2	Zunder ex Zunderwäscher	26		0,661	35		0	0,0%
3	Kühlwasser Vorgerüst	410		4,187	35		34	3,8%
4	Abstrahlung						97	10,8%
Summe							897	100,0%
Einnahmen Fertigstrasse		Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie	% Energie
No.	Bilanzgröße	kg/t WB	m ³ i.N./t WB	kJ/m ³ i.N.*K kJ/kg*K	°C	kJ/m ³ i.N. kJ/kg	MJ/t WB	
1	Bramme	1.000		0,674	1.150		765	92,1%
2	Kühlwasser Fertigstrasse	1.560		4,187	25		65	7,9%
Summe							830	100,0%
Ausgaben Fertigstrasse		Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie	% Energie
No.	Bilanzgröße	kg/t WB	m ³ i.N./t WB	kJ/m ³ i.N.*K kJ/kg*K	°C	kJ/m ³ i.N. kJ/kg	MJ/t WB	
1	Warmband	1.000		0,649	900		574	69,2%
2	Kühlwasser Fertigstrasse	1.560		4,187	45		196	23,6%
3	Abstrahlung						60	7,2%
Summe							830	100,0%

123 gewichteter Jahresmittelwert der Hüttenwerke in Deutschland (2014)

123 frei gewählter Parameter der Bilanz, Eingabegröße

123 Stoffdaten gasförmiger Stoffe, die Einheit ist auf m³ i.N. bezogen

123 Daten aus eigenen Untersuchungen

123 mit Bilanzgleichungen und Stoffdaten berechnete Zwischenergebnisse

Tabelle 21: Energiebilanz eines Warmwalzwerks – Teil 2

Produkt: Warmband

Einnahmen Warmbandkühlung		Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie	% Energie
No.	Bilanzgröße	kg/t WB	m ³ i.N./t WB	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.} \cdot \text{K}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	°C	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	MJ/t WB	
1	Warmband	1.000		0,649	900		574	80,4%
2	Kühlwasser Warmbandkühlung	3.335		4,187	25		140	19,6%
Summe							714	100,0%
Ausgaben Warmbandkühlung		Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie	% Energie
No.	Bilanzgröße	kg/t WB	m ³ i.N./t WB	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.} \cdot \text{K}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	°C	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	MJ/t WB	
1	Warmband	1.000		0,609	500		295	41,3%
2	Kühlwasser Warmbandkühlung	3.335		4,187	45		419	58,7%
Summe							714	100,0%
Einnahmen Rekuperator		Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie	% Energie
No.	Bilanzgröße	kg/t WB	m ³ i.N./t WB	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.} \cdot \text{K}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	°C	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	MJ/t WB	
1	Abgas		481	1,563	950		703	100,0%
2	Brennluft (kalt)		398	1,301	15		0	0,0%
Summe							703	100,0%
Ausgaben Rekuperator		Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie	% Energie
No.	Bilanzgröße	kg/t WB	m ³ i.N./t WB	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.} \cdot \text{K}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	°C	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	MJ/t WB	
1	Abgas		481	1,495	632		444	63,2%
2	Brennluft (vorgewärmt)		398	1,343	500		259	36,8%
Summe							703	100,0%
Einnahmen Dampfkessel		Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie	% Energie
No.	Bilanzgröße	kg/t WB	m ³ i.N./t WB	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.} \cdot \text{K}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	°C	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	MJ/t WB	
1	Abgas		481	1,495	632		444	93,0%
2	Speisewasser für Dampfkessel	94	0	4,187	100		33	7,0%
Summe							478	100,0%
Ausgaben Dampfkessel		Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie	% Energie
No.	Bilanzgröße	kg/t WB	m ³ i.N./t WB	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.} \cdot \text{K}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	°C	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	MJ/t WB	
1	Abgas nach Kessel		481	1,428	300		196	41,0%
2	Dampf, 25 bar	94	0			3.010	282	59,0%
Summe							478	100,0%
Einnahmen Kühlturm 1		Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie	% Energie
No.	Bilanzgröße	kg/t WB	m ³ i.N./t WB	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.} \cdot \text{K}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	°C	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	MJ/t WB	
1	Kühlwasser Rücklauf	336	0	4,187	100	0	120	100,0%
2	Speisewasser, kalt	94		4,187	15		0	0,0%
Summe							120	100,0%
Ausgaben Kühlturm 1		Massenstrom	Volumenstrom	cp	Temp.	ΔhR bzw. hu	Energie	% Energie
No.	Bilanzgröße	kg/t WB	m ³ i.N./t WB	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.} \cdot \text{K}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	°C	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ i.N.}}$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	MJ/t WB	
1	Kühlwasser Vorlauf	430	0	4,187	30		27	22,6%
2	Abluft		3.558	1,302	35		93	77,4%
Summe							120	100,0%

123 gewichteter Jahresmittelwert der Hüttenwerke in Deutschland (2014)

123 frei gewählter Parameter der Bilanz, Eingabegröße

123 Stoffdaten gasförmiger Stoffe, die Einheit ist auf m³ i.N. bezogen

123 Daten aus eigenen Untersuchungen

123 mit Bilanzgleichungen und Stoffdaten berechnete Zwischenergebnisse

Tabelle 22: Energiebilanz eines Warmwalzwerks – Teil 3

Produkt: Warmband

Einnahmen Kühlturm 2							
No.	Bilanzgröße	Massenstrom kg/t WB	Volumenstrom m ³ i.N./t WB	cp kJ/m ³ i.N.*K kJ/kg*K	Temp. °C	ΔhR bzw. hu kJ/m ³ i.N. kJ/kg	Energie MJ/t WB
1	Kühlwasser Vorgerüst	410	0	4,187	35	0	34
2	Kühlwasser Fertigstrasse	1.560	0	4,187	45	0	196
3	Kühlwasser Warmbandkühlung	3.335	0	4,187	45	0	419
Summe							649
Ausgaben Kühlturm 2							
No.	Bilanzgröße	Massenstrom kg/t WB	Volumenstrom m ³ i.N./t WB	cp kJ/m ³ i.N.*K kJ/kg*K	Temp. °C	ΔhR bzw. hu kJ/m ³ i.N. kJ/kg	Energie MJ/t WB
1	Kühlwasser Vorgerüst	410	0	4,187	25		17
2	Kühlwasser Fertigstrasse	1.560	0	4,187	25		65
3	Kühlwasser Warmbandkühlung	3.335	0	4,187	25		140
4	Abluft		16.394	1,302	35		427
Summe							649
							100,0%

123 gewichteter Jahresmittelwert der Hüttenwerke in Deutschland (2014)

123 frei gewählter Parameter der Bilanz, Eingabegröße

123 Stoffdaten gasförmiger Stoffe, die Einheit ist auf m³ i.N. bezogen

123 Daten aus eigenen Untersuchungen

123 mit Bilanzgleichungen und Stoffdaten berechnete Zwischenergebnisse

4.8.2 Möglichkeiten der Abwärmenutzung

Im Warmwalzwerk bestehen folgende Potenziale für eine weitere Nutzung von Abwärme:

- ▶ Nutzung der Abgase des Ofens im Temperaturbereich unterhalb 300 bis 200 °C,
- ▶ Nutzung des Kühlwassers; die Temperatur ist davon abhängig, ob Kalt- oder Heißkühlung eingesetzt wird,
- ▶ Nutzung der Wärme aus der Temperatur des Coils von 500 °C.

Die auf Basis dieser Energiebilanz bestimmte rechnerische bilanzielle Abwärme (nicht komplett technisch nutzbar) beträgt:

- ▶ Fühlbare Wärme der Abgase von Wärmöfen (300 °C, nach Dampfkessel) 196 MJ/t WB
- ▶ Kühlwasser der tragenden Ofenelemente des Warmwalzwerks (100 °C) 120 MJ/t WB
- ▶ Fühlbare Wärme des gekühlten Warmbands (bei 500 °C) 295 MJ/t WB

4.9 Zusammenfassende Analyse der Abwärmepotenziale

Auf Grundlage der Energiebilanzen zu den jeweiligen Hauptanlagen eines integrierten Hüttenwerks können mögliche Abwärmequellen identifiziert werden (vergl. Kapitel 4.2.2, 4.3.2, 4.4.2, 4.5.2, 4.6.2, 4.7.2 und 4.8.2). Im Rahmen diess Gutachtens können aus Kostengründen jedoch nicht alle möglichen Abwärmeströme detaillierter bewertet werden. Deshalb wird Abwärme im Temperaturbereich < 50 °C sowie ungefasste Wärmeverluste der Anlagen durch Strahlung und Konvektion nicht weiter analysiert. Dies betrifft vor allem auch die Abwärme von Kühlwasser der einzelnen Prozesse, deren Temperatur unter 50 °C liegt. Diese Energien sind in integrierten Hüttenwerken derzeit kaum wirtschaftlich nutzbar.

Unter diesen Voraussetzungen wurden die folgende Abwärmequellen für die weitere Analyse ausgewählt:

- ▶ Sinteranlage:
 1. Abgas am Sinterband (Austritt Sinterband)
 2. gefasste Abluft des Sinterkühlers (Austritt Sinterkühler)
- ▶ Hochofen:
 1. Abwärme aus dem Abgas von Winderhitzern,
 2. Abwärme der Hochofenschlacke, z. B. bei Trockengranulation,
 3. Abwärme des 65 °C heißen Granulatierswassers,
- ▶ Konverter:
 1. Nutzung der Fackelverluste von Konvertergas zur Wärmeerzeugung,
 2. Nutzung der Abwärme der abgekippten Konverterschlacke,
 3. Abgas am Konverter: Erweiterung des Dampfkessels von 900 °C des Gases am Kesselaustritt auf den Temperaturbereich von 400 – 600 °C und Nutzung des produzierten Dampfes (wird bereits zu 50 % am Konverter und an Vakuumanlagen eingesetzt als Vakuum-, Sperr- und Treibdampf),
- ▶ Stranggießanlage:
 1. Nutzung der mit Spritzwasser erzeugten Brüden,
 2. Nutzung der Restwärme der Brammen,
- ▶ Warmwalzwerk:
 1. Nutzung der Abgase des Ofens im Temperaturbereich unterhalb 300 bis 200 °C,
 2. Nutzung des Kühlwassers tragender Ofenelemente; die Temperatur ist davon abhängig, ob Kalt- oder Heißkühlung eingesetzt wird,
 3. Nutzung der Wärme aus der Temperatur des Coils von 500 °C.

Aufgrund des Temperaturniveaus wird bei den o.a. Enthalpieströmen eine Nutzung als möglich angesehen. Im Folgenden werden diese 13 Abwärmeströme deshalb eingehender untersucht.

Zusätzlich zu den in den Energiebilanzen ausgewiesenen Enthalpieströmen, die auf eine Umgebungstemperatur von 15 °C bezogen sind, werden in den folgenden Kapiteln auch die real nutzbaren Enthalpieströme abgeschätzt, die sich netto bei den jeweiligen Nutzungsoptionen übertragen lassen. Dabei sind zusätzlich Wirkungsgrade der Energieübertragung und -umwandlung zu berücksichtigen, insbesondere bei der Stromerzeugung aus Abwärme und der Wärmeübertragung auf andere Medien. Daraus wurden thermisch nutzbare Potenziale abgeleitet sowie mögliche Technologien für deren Nutzung und deren Risiken benannt.

In den folgenden Kapiteln wird die Möglichkeit einer Anwendung der weiter oben beschriebenen Abwärmenutzungstechnologien auf die ausgewählten Abwärmeströme betrachtet und hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit bewertet. Daraus ergeben sich Bewertungen der real zu erwartenden Nutzungspotenziale. Ferner werden wesentliche Einflussfaktoren und mögliche Hemmnisse ermittelt, die einer betrieblichen Umsetzung der identifizierten Nutzungsoptionen gegenüberstehen.

5 Analyse der Einflussfaktoren auf die Abwärmenutzung

Im Folgenden werden zu den identifizierten Abwärmeströmen die Einflussfaktoren auf eine mögliche Nutzung identifiziert, beschrieben und analysiert.

5.1 Art der Einflussfaktoren

5.1.1 Technisch

Temperaturniveau, Medium

Die Temperatur eines Abwärmestroms ist stets als mittlere Temperatur zu verstehen. Zum einen werden, wie in Kapitel 1 beschrieben, je nach Anlagenbetreiber die Prozesse leicht unterschiedlich geführt. Zusammensetzungen der Einsatzstoffe und Produkte variieren ebenfalls. Zum anderen sind viele der betrachteten Prozesse nicht stationär. Satzweiser Betrieb oder schwankende Anlagendurchsatz wirken sich auf Menge und Temperatur der abgeführten Ströme aus. Eine detaillierte Betrachtung der Temperaturbänder und zeitlichen Verläufe der jeweiligen Abwärmeströme ist für eine Betrachtung der hebbaren Potentiale zur Abwärmenutzung nicht zielführend. Daher werden Mittelwerte zugrunde gelegt, die aus den einzelnen Enthalpieströmen bestimmt wurden. Der Einfluss zeitlich und örtlich unterschiedlicher Temperaturwerte wurde im Rahmen der Hemmnisanalyse und Auswertung in Kapitel 5 und 6 berücksichtigt.

Abwärmeströme geben in der Regel indirekt mittels Wärmeübertrager (Gase, Flüssigkeiten) oder direkt über Strahlung (Festkörper) Wärme ab. Dafür sind ein treibendes Temperaturgefälle und ausreichende Übertragungsflächen erforderlich. Je näher die Nutztemperatur an der Temperatur der Abwärmequelle liegt, desto größer müssen die Übertragungsflächen gestaltet werden. Wird ein Gasstrom unter seine Taupunkttemperatur abgekühlt, so ist auf Kondensatabfuhr und Vermeidung von Verschmutzung und Korrosion im Abgasweg zu achten.

Zum Antrieb von Arbeits- und Kraftmaschinen mittels Dampf ist eine Temperatur von über 100 °C (organische Arbeitsmittel, ORC) oder über 500 °C (Wasser) erforderlich, um einen akzeptablen Wirkungsgrad im Dampferzeuger (Kessel) zu erreichen. Abgasströme oberhalb dieser Temperaturen und in Anlagen erzeugter Dampf sind direkt nutzbar. Abwärmeströme unterhalb dieser Temperatur können beispielsweise zur Arbeitsmittelvorwärmung vor der Dampferzeugung, zur Dampferzeugung selber, zur Brauchwassererwärmung und zur Kälteerzeugung dienen.

Zur direkten Nutzgutvorwärmung eignen sich nur Gasströme. Abwässer würden bei direktem Kontakt dem Produkt schaden (Korrosion bei Eisen und Stahl, Wasseraufnahme bei Sinter).

Für eine direkte oder indirekte Wärmeübertragung mittels Strahlung eignen sich einige Gase und Festkörper, wie beispielsweise Wände oder Nutzgutoberflächen, mit hohem Emissionsgrad von über 0,5. Die übertragene Wärme bei Strahlung eines Gases ist proportional zum Emissionsgrad, zum Partialdruck (Volumenkonzentration) und zur Dicke der Gasschicht. Ist das Gas aus mehreren Gasen zusammengesetzt, so ergibt sich der Gesamtwärmestrom durch Addition der Teilströme. In den betrachteten Abgasen sind für Strahlung lediglich die Komponenten CO₂ und H₂O relevant. Feste Partikel in einem Gas wie Staub und Ruß mit hohem Emissionsgrad von über 0,5 können über die Festkörperstrahlung den übertragenen Wärmestrom erhöhen. Die übertragene Wärme ist bei der Strahlung zudem abhängig von der vierten Potenz der Temperatur in Kelvin. Wärmeübertragung durch Leitung und Konvektion sind linear vom Temperaturgradienten abhängig. Die Wärmeüberträge sind bis ca. 500 °C dominiert durch Leitung und Konvektion, darüber durch Strahlung (Specht E., 2014).

Viele Fördereinrichtungen und Armaturen sind nur bis zu einer Medientemperatur von unter 500 °C verfügbar. Für eine höhere Einsatztemperatur sind keramische oder aktiv gekühlte Bauteile geeignet. Diese unterliegen einem deutlich höheren Verschleiß und sind kostenintensiv in Anschaffung und Wartung.

Druckniveau

Bei Phasenübergängen in Verdampfern und Kondensatoren können unzulässige Druckschwankungen entstehen. Starker Druckanstieg kann zum Platzen, starke Druckabsenkung zu Verformungen von Anlagenteilen führen.

Gase und Flüssigkeiten werden bei der Abwärmenutzung gezielt geleitet. Dafür ist ein entsprechendes Druckgefälle entlang des Strömungsweges nötig. Ist der Austrittsdruck der Medien aus der Anlage zu klein, so ist eine aktive Druckerhöhung beispielsweise mittels Pumpen oder Gebläse erforderlich. Korrosion, Abrasion oder Drucksprünge durch Kondensation und Verdampfung können den Medientransport beschränken oder zum Erliegen bringen.

Verschmutzung

Mit Feststoffen beladene Fluide und mit Flüssigkeiten beladene Gase können in Wärmeübertragern zu einem Verstopfen der Strömungskanäle, zu wärmedämmenden Schichten auf den Übertragungsflächen sowie zu chemischen (Korrosion) und mechanischen (Abrasion) Schäden am Nutzgut und an den Anlagen führen. Korrosion ergibt sich beispielsweise bei Taupunktunterschreitung in Abgasen, Abrasion tritt durch mineralische Partikel im Abgas und in der Abluft der Sinteranlage sowie im Kühlwasser der Schlackengranulation am Hochofen auf. Es ist zumindest mit einem erhöhten Wartungsaufwand zu rechnen. Daher sollte vor einer Wärmeauskopplung das betroffene Fluid gereinigt werden. Dabei geht ein Teil der Abwärme in die Umgebung verloren. Bei Nassreinigung mit flüssigem Wasser wird das Temperaturniveau des Abwärmestromes schnell gesenkt. Dies wird beispielsweise im Oxygenstahlwerk beim Quenchen kohlenwasserstoffhaltiger heißer Gase am Verdampfungskühler eingesetzt, um die Bildung langkettiger und polyzyklischer Kohlenwasserstoffe (PAK) zu verhindern. Die Reinigung mit Tuchanlagen und Elektrofiltern erfordert häufig ebenfalls eine Absenkung der Temperatur.

Flexible Gestaltung, Skalierbarkeit, Regelbarkeit

Zur Nutzung von Abwärmeströmen werden die dafür erforderlichen Anlagen unter anderem nach der Menge und der Temperatur der Abwärmeströme ausgelegt. Bei zeitlich veränderlichen Abwärmeströmen sind die Anlagen dementsprechend zu konfigurieren.

Anlagen wie Winderhitzer, Konverter, Stranggießanlage und Warmwalzstraße werden nicht kontinuierlich betrieben. Wird die Abwärme prozessextern genutzt, können Pufferspeicher zur Vergleichmäßigung oder Regelung eingesetzt werden.

Beim Konverter wird über eine definierte Zeit Sauerstoff aufgeblasen. Dabei entsteht ein Abgasstrom von bis zu $100.000 \text{ m}^3/\text{h}$ i. N., der im ca. 20 Minuten dauernden Blasprozess in Menge, Zusammensetzung und Temperatur stark variiert. Nur in dieser Phase steht ein Abgasstrom zur Verfügung, dessen Wärme genutzt werden kann. Dabei steigt der Gehalt von CO im abgesaugten Gasstrom steil von 0 auf über 70 Vol.-% an und am Ende steil wieder ab. Wird das in weiten Phasen heizwertreiche austretende Gas als Kuppelgas gewonnen (Konvertergas) und ins Werksnetz eingespeist, so muss am Anfang und am Ende des Blasprozesses das Gas über eine Fackel abgeführt und nachverbrannt werden, da in dieser Zeit die Volumenkonzentration des CO zu gering für eine Verwertung ist. Nach dem Blasprozess wird der Konverter entleert und neu befüllt. Die Zeit für den Gesamtzyklus („tap-to-tap time“) beträgt ca. 45 Minuten. Im Abgasstrom nach Konverteraustritt ist in den Hütten ein Dampfkessel installiert, der die Temperatur im Abgasstrom auf ca. 900°C absenkt. Bis zum nachfolgenden Verdampfungskühler könnte weitere Wärme ausgekoppelt und die Temperatur weiter auf 400°C gesenkt werden, die Anlagentechnik ist jedoch sehr voluminös. An den betrachteten Standorten war bei nur einem Konverter das vorhandene Bauvolumen ausreichend, um einen weiteren Kessel zu installieren. Dieser ist dementsprechend bereits in der Vergangenheit installiert worden. Dort wird zusätzlicher Dampf erzeugt und das Abgas auf 600°C gesenkt. An den anderen Bestandsanlagen ist kein erforderliches Bau-

volumen vorhanden. Eine Nachrüstung würde einem Neubau des gesamten Konverterbetriebes gleichkommen und ist daher nicht möglich.

Der Betrieb einer Stranggießanlage wird in Abhängigkeit von den jeweiligen Produktionsbedingungen durch Wechsel der Materialzusammensetzung und/oder Wechsel der Stranggeometrie unterschiedlich stark unterbrochen. Bei günstigen Bedingungen wie bei einer Massenproduktion bleiben Geometrie und Materialzusammensetzung für Wochen gleich, bei flexibler Produktgestaltung können die Umstellungen am Tag zu mehrere Stunden Stillstand führen. Da in Deutschland überwiegend eine flexible Produktion hochwertiger Güten erforderlich ist, nehmen diese Stillstandszeiten seit Jahren zu.

In den Walzgerüsten des Warmwalzwerks wird Stahl als Stückgut in Form einer Bramme zugeführt und als Warmbandcoil entnommen. Abwärme tritt dabei nur zu der Zeit und an dem Ort auf, an dem sich die Bramme/das Warmband befindet. Zwischen den Brammen liegen kurze Pausen. Bei Walzenwechsel (Wechsel der Nutzgutgeometrie, Wechsel verschlissener Rollen) sind diese Pausen länger.

Die Anforderungen an die Flexibilität der Produktion (Qualität und Geometrie der Produkte, Losgrößen) steigen. Auch kontinuierliche Prozesse, wie sie in der Sinteranlage, im Hochofen und in den Wärmöfen des Warmwalzwerks ablaufen, sind immer häufiger Produktionsschwankungen unterworfen, die direkt einen Einfluss auf Menge und Temperatur der Abwärmeströme haben.

Der vom Werk abgeführte Wärmestrom ist daher zeitlich schwankend und kann bei Produktionsstillstand auf null sinken. Der Abwärmestrom richtet sich nach der Produktion. Das Leistungsprofil der werksexternen Wärmeabnehmer deckt sich nicht immer mit diesem Abwärmestrom. Zusätzliche Anpassungen wie Wärmespeicher oder zusätzliche regelbare Wärmeerzeuger sind dann zur Kopplung von Erzeugungs- und Abnahmeprofilen erforderlich.

Einfluss auf Gesamtprozesskette und Produktqualität

Eine energetisch positiv zu wertende Vorwärmung von Einsatzstoffen kann sich negativ auf den Produktionsprozess auswirken. Hochöfen und LD-Konvertern finden chemische Umwandlungen der Einsatzstoffe ab, die unter anderem auch von der Temperaturführung stark abhängig sind. Eine Vorwärmung der Einsatzstoffe beeinflusst daher die Reaktionen bei diesen Prozessen und damit das Produkt selbst.

Definierte / gezielte Abkühlgeschwindigkeiten wie beispielsweise

- ▶ am Sinterbett im Sinterkühler,
- ▶ der Bramme in der Stranggießanlage und der Brammenadjustage sowie
- ▶ am Band in der Walzstraße des Warmwalzwerks (vgl. Abbildung 7)

sind von hoher Bedeutung für die Produktqualität. Die Wärmeabfuhr ist vom Prozess vorgegeben. Eine Abwärmenutzung ist daher so zu gestalten, dass es keine negativen Auswirkungen auf die Prozesskette und die Produktqualität gibt.

Normalerweise ist die Phasenumwandlung vor dem Aufhaspeln im Warmwalzwerk abgeschlossen. Damit ist es unerheblich, mit welcher Geschwindigkeit hinterher die Abkühlung erfolgt.

Für die Abkühlung der Coils muss beachtet werden, dass in nachgelagerten Prozessen wie an der Konteibeize die Coils mit maximal 70 °C eingesetzt werden dürfen, um die dort eingesetzten Gummirollen nicht zu beschädigen. Coils mit hoher Haspeltemperatur kühlen daher über mindestens drei Tage ab. Vermindert sich die Abkühlgeschwindigkeit durch eine Wärmeauskoppelung (Einhausung zur gezielten Nutzung der Abwärme), würde sich die Kühlzeit nochmals verlängern. Eine verringerte Produktionsrate mit höheren Lagerbeständen wäre die Folge.

5.1.2 Wirtschaftlichkeit

Investitionskosten

Die Investitionskosten für eine Abwärmerückgewinnung müssen für den Betreiber in der Höhe tragbar sein (verfügbare Mittel) und sich über einen bestimmten zeitlichen Rahmen amortisieren. Die Bedingungen im Markt, die politischen Vorgaben sowie die jeweiligen firmeninternen Festlegungen bestimmen den Zeitraum, in der eine Investition sich amortisiert. Bei einer Stromerzeugung ist die Abführung des Stromes und eine Abschirmung (sowohl elektrisch als auch im Hinblick auf den Arbeitsschutz) für alle Anlagenzustände sicher zu stellen. Wird der erzeugte Strom an der Werksgrenze nicht abgenommen, so müssen eigene Senken, beispielsweise Speichieranlagen, diesen zuverlässig aufnehmen. Diese Senken müssen geschaffen und eingebunden werden.

Bei der Installation von Technologien rechnet die Stahlindustrie in der Regel mit Einmalinvestitionskosten oder auch Kapitalzuführung (engl. "capital injection"). Dieser Betrag beschreibt den Gesamtumfang der notwendigen Investition in eine Technologie. Dieser kann durch Zuschüsse, Subventionen, Fördermittel oder Bankenkredite in der Höhe aufgefangen oder über einen längeren Zeitraum gestreckt werden.

Betriebskosten (inkl. Wartung, Instandhaltung und Erlöse)

Die Abwärmenutzungstechnologien verursachen eigene Betriebskosten, beispielsweise Energiekosten für die Antriebe von Gebläsen und Pumpen sowie zusätzliche Wartungs- und Instandhaltungsaufwendungen. Durch die Abwärmenutzung werden hingegen die Kosten für zugekaufte Energie verringert oder zusätzlich erzielte Erlöse für den Verkauf von Dampf, Wärme oder elektrischem Strom erzielt. Die Wartungs- und Instandhaltungskosten der bestehenden Anlagenkomponenten werden durch Veränderung von Druck- und Temperaturniveau in der Regel ebenfalls beeinflusst.

Neuanlagenrisiko

Wird ein Anlagentyp erstmals eingesetzt (z. B. neues Verfahren oder andere Leistung), so besteht ein erhöhtes Risiko. Eine verzögerte Inbetriebnahme führt zu einer längeren Amortisationszeit. Nachbesserungen und Anpassungen an der Anlagentechnik erhöhen den Aufwand. Ausfälle beispielsweise am Kühlsystem oder im Abgasstrang können zum Produktionsstillstand führen. Ein Scheitern neuer Anlagentechnik kann nicht ausgeschlossen werden.

5.1.3 Politisch / gesellschaftlich / organisatorisch

Die gesetzlichen Regeln bezüglich Begrenzung von Emissionen und Besteuerung oder Entlastung von Energieströmen werden regelmäßig weiterentwickelt und verändert.

Genehmigungsrecht

Abgasströme unterliegen dem Bundes-Immissionsschutzgesetz, BImSchG, die zulässigen Grenzwerte für abgeführte Stoffe sind in der TA Luft (UBA, Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft vom 24. Juli 2002, 2002) geregelt. Bei Abwärmenutzung wird die Temperatur von Abgasströmen gesenkt. Chemische Reaktionen und Kondensatbildung ändern damit die Höhe und Zusammensetzung der abgeführten Mengenströme. Wird auf die Abkühlgeschwindigkeit Einfluss genommen, beispielsweise bei Umstellung von feuchter Abkühlung (Schlackengranulation) oder Reinigung (Gaswäsche nach Konverter) mit Wasser, auf eine Abkühlung mit Luft, so können aus unverbrannten Bestandteilen polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) gebildet werden. Es ist also zu prüfen, ob insbesondere die Emissionsgrenzwerte für SO_2 , NO_x , CO, PAK und Staub dadurch geändert oder vielleicht auch überschritten werden.

Wesentliche Änderungen der Gesamtanlage können Auswirkungen auf die Betriebsgenehmigung der Anlage haben.

Be- und Entlastungstatbestände bei der Energiebesteuerung

In verschiedenen politischen Zusammenhängen ist die Fragestellung relevant, welche Be- und Entlastungstatbestände in der Energie- und Klimapolitik bei den jeweiligen Unternehmen in Erwägung gezogen werden. Darunter fallen:

- ▶ Eigenstromprivileg des EEG (Industrie)
- ▶ besondere Ausgleichsregelung des EEG für stromintensive Unternehmen und Schienenbahnen,
- ▶ ermäßigte Sätze für Gewerbe und energieintensive Industrie bei der KWK-Umlage.

Relevante Gesetze sind hier:

- ▶ Stromsteuergesetz (StromStG), insbesondere § 10,
- ▶ Energiesteuergesetz (EnergieStG), insbesondere § 55 (Spitzenlastausgleich),
- ▶ Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG),
- ▶ Gesetze für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz, KWKG).

Die Interaktionen zwischen den verschiedenen Gesetzen und Verordnungen sind komplex und können auch wegen der Vielzahl der möglichen Fälle im Rahmen dieser Studie nicht im Detail dargelegt werden, sondern müssen individuell zu den jeweiligen Standorten diskutiert werden. Erläuterungen zu diesen Zusammenhängen finden sich unter (Bundesnetzagentur, 2016).

CO₂-Emissionshandel

In der ZuV 2020 (Verordnung über die Zuteilung von Treibhausgas-Emissionsberechtigungen in der Handelsperiode 2013 bis 2020; kurz Zuteilungsverordnung 2020 oder ZuV 2020) ist geregelt, dass bei einem anlagenübergreifenden Wärmestrom zwischen zwei emissionshandelspflichtigen Anlagen, kurz ETS-Anlagen, die kostenlose Zuteilung grundsätzlich dem Wärmeverbraucher zusteht (siehe hierzu auch (DEHSt, 2011)). Ein Wärmeerzeuger kann nur eine kostenlose Zuteilung von Emissionsrechten erhalten, wenn er die Wärme an Anlagen abgibt, die nicht emissionshandelspflichtig sind. Dies kann beispielsweise ein Fernwärmenetz sein. Wenn ein emissionshandelspflichtiger Wärmenutzer eine kostenlose Zuteilung für die bezogene Wärme erhält, kann dies aber bei den Vertragsverhandlungen mit dem Wärmeerzeuger berücksichtigt werden.

Wird aus einer Produktionsanlage Abwärme ausgekoppelt und an Dritte (nicht-ETS-Anlagen) weitergeleitet, so können grundsätzlich zusätzliche Emissionsberechtigungen zugeteilt werden, sofern die wärmeliefernde Anlage ein Benchmark-Produkt herstellt. Wenn die Anlage eine Fallback-Zuteilung erhält (z. B. für den eingesetzten Brennstoff zur Herstellung eines Produkts), sehen die aktuellen Regelungen keine zusätzliche Zuteilung für genutzte Abwärme vor.

Vergütung durch Dritte

Die externe Vergütung eigenerzeugter Energie (Wärme, Kälte, Dampf, Strom) ist sowohl vom lokalen Markt als auch von den politischen Rahmenbedingungen (z. B. Netzentgelt, EEG) abhängig.

Ähnlich wie bei Windkraft- und Solaranlagen zur Stromerzeugung liegen auch für die Nutzung von Abwärmeströmen (ausgenommen Verstromung) schwankende Randbedingungen vor. Anders als im Strommarkt gibt es im Abwärmemarkt jedoch keine geregelte Einspeisevergütung. Dadurch wird die für die Entwicklung von Techniken und Infrastrukturen erforderliche Planungssicherheit herabgesetzt.

Werksexterne Infra- und Netzstrukturen

Für eine werksexterne Verwendung von Wärme, Kälte, Dampf und elektrischen Strom ist eine dementsprechende Infrastruktur erforderlich. Aufbau zusätzlicher und Anpassung bestehender Netze

müssen koordiniert und finanziert, Speicher und Umwandler zur Anpassung der abgeführten Ströme an die Netzparameter neu errichtet werden. Sind keine Abnehmer werksnah vorhanden, kann die Errichtung neuer Netzstrukturen unter Umständen sehr aufwendig sein.

In den nächsten Jahren werden durch Stilllegung zahlreicher Großkraftwerke im Rahmen der Energiewende relevante Fernwärmeeinspeiser wegfallen. Diese gilt es zu ersetzen. Industrielle Abwärme ist hier eine nicht zu vernachlässigende Option.

Geschäftsmodell

Werksintern wurden Einzelbetriebe in der Vergangenheit oft als eigene Profitcenter geführt. Ein Betrieb verrechnet seine Aufwendungen, beispielsweise für Entnahmen aus dem werksinternen Gasnetz, mit seinen Vergütungen, beispielsweise für Einspeisungen in das werksinterne Dampfnetz. Dafür werden werksinterne Verrechnungspreise verwendet. Eine anlagenexterne Abwärmenutzung erhöht die Aufwendungen (Investition, Wartung, Instandhaltung, ...), teilweise ohne entsprechende Erlöse für den Betreiber der Einzelanlage zu erzielen.

Für eine Abwärmenutzung besteht ein organisatorischer Aufwand zur Identifikation von Wärmequellen und potenziellen Senken. Qualifiziertes Personal für den Aufbau, die Inbetriebnahme und den Betrieb neuer Anlagentechniken muss bereitgestellt werden. Die Anforderungen an die Koordination steigen mit zunehmender Werksgröße. Je größer und komplexer ein Werk ist, umso anspruchsvoller ist die zentrale Koordinierung.

Es hat sich gezeigt, dass die Umsetzung von Abwärmenutzungstechnologien bei der Industrie im Allgemeinen stark vom Engagement der Personen abhängt, die für entsprechende Maßnahmen vor Ort zuständig sind. Dies können Personen in der Wartung, in der Betriebsleitung, in der Geschäftsleitung, im Controlling, im Einkauf oder der Energieverantwortliche sein. Sachkenntnis, zeitliche und finanzielle Ressourcen, Offenheit neuen Technologien gegenüber oder auch ein gutes Image sind wesentliche Einflussfaktoren für den Einsatz von Abwärmenutzung (Pehnt, Bödeker, Arens, Jochem, & Idrissova, 2010). Diese Faktoren gilt es kontinuierlich zu analysieren und durch Maßnahmen positiv zu beeinflussen.

Die energie- und ressourcenintensive Stahlindustrie hat aus wirtschaftlichen Gründen ein Eigeninteresse an effizienter Energieverwendung. Koordinierte Weiterentwicklung der Prozess- und Anlagentechnik sowie einzelner Bauteile und Regelstrukturen, wie sie beispielsweise auch durch zentrale Organisationen wie dem Stahlinstitut VDEh und dem BFI erfolgt, Anpassung der Betriebsstruktur und konsequente Förderung des Personals wurden als wesentliche Parameter erkannt und weitgehend umgesetzt.

Zusätzlich zum Qualitäts- und Umweltmanagement sind alle integrierten Hüttenwerke in Deutschland auch für das Energiemanagement nach ISO 50001 zertifiziert. Das Energiemanagementsystem erfasst systematisch die Energieströme. Es hilft bei der Entscheidung für Investitionen in die Energieeffizienz und somit auch in die Abwärmenutzung.

Firmeninterne Vorgaben zu Amortisationszeiten von Investitionen können die Umsetzung von Abwärmenutzung behindern. Contracting-Modelle können hier interessante Lösungsansätze liefern. Langfristige Verpflichtungen bei starker Dynamik in den Randbedingungen sowie rechtliche Rahmenbedingungen sind im Einzelfall zu prüfen.

Akzeptanz in der Gesellschaft

Abwärmenutzung zur Steigerung der Energieeffizienz und damit zur Senkung des Primärenergiebedarfs befürwortet die Mehrheit der Bevölkerung, einen Wärmespeicher neben seinem Wohnhaus aber nicht. Der Autofahrer, der täglich 100 km pendelt und sich dort für breite Straßen ausspricht, fordert Verkehrslärmschutz im Umfeld seiner Wohnung und am Kindergarten seiner Kinder Verkehrsberuhigung. Dieses Phänomen ist als das Sankt-Florians-Prinzip (englisch: Nimby = not in my backyard) be-

kennt. Auch in den Werken und in den benachbarten Wohngebieten arbeiten und leben Menschen nach diesem Prinzip. Leitungen und Speicher für Kälte, Wärme, Dampf und Strom sowie Verteil- und Konverterstationen könnten daher ggf. auf gesellschaftlichen Widerstand stoßen.

Die Akzeptanz kann sich über die Zeit verändern. Sie wird von gesellschaftlichen und politischen Entwicklungen geprägt und von den Themen beeinflusst, die in den Medien über längere Zeit diskutiert werden.

5.2 Clusterung der Nutzungsmöglichkeiten

Die in Kapitel 3 beschriebenen Nutzungsmöglichkeiten der Abwärme können auf Grund ihrer technischen Voraussetzungen geclustert werden. Dies ist in den fünf nachfolgenden Abschnitten dargestellt.

5.2.1 Vorwärmung von Medien und Einsatzstoffen

Für eine Medienvorwärmung ist in der Regel ein geführter, sauberer Abwärmestrom erforderlich. Partikelbeladungen und stark korrosiv wirkende Komponenten führen sonst in kurzer Zeit zum Versagen (Verstopfungen, Abrasion) der Wärmeübertrager, die zur Überführung der Wärme vom Abgas- an den Nutzmedienstrom erforderlich sind. Phasenübergänge können zu starken Druckänderungen führen. Ausnahmen dieser Einschränkungen:

- ▶ Bei Nutzguterwärmung können Partikelbeladungen und korrosiv wirkende Komponenten teilweise toleriert werden (z. B. Abgasrückführung am Sinterband).
- ▶ In Strahlungswärmeübertragern sind höhere Partikelbeladungen bei geringer Strömungsgeschwindigkeit tolerierbar. Diese Wärmeübertrager besitzen bauartbedingt jedoch einen geringeren Wirkungsgrad, der mit einer Verschmutzung weiter absinkt.

5.2.2 Dampferzeugung

Zur Dampferzeugung ist eine Kesselwasserbereitstellung sowie eine Dampfabnahme erforderlich. In der Regel werden Netze benötigt, um Quellen und Senken zu verbinden. Speicher zur Entkopplung von Einspeisung und Entnahme können fallweise erforderlich werden, um die Ströme zeitlich zu entkoppeln. Lange Rohrleitungssysteme der Netze und Speicher sind kostenintensiv. Sie sind umso verlustträglicher, je weiter Quellen und Senken räumlich (Rohrleitung) und zeitlich (Speicher) entfernt sind.

5.2.3 Verstromung

Für eine Verstromung der Abwärme ist eine Einspeisung der erzeugten elektrischen Leistung erforderlich und eine Abnahme muss gewährleistet sein. Besteht keine Abnahme, so müsste der Stromerzeuger abgeschaltet werden oder die Leistung von einem externen Betreiber in einem Speicher zwischengespeichert oder in einem Konverter in eine andere Energieform (Wärme, Kälte, Dampf, Gas) umgewandelt werden.

Der aktuelle und mittelfristig zu erwartende geringe Marktpreis für ins externe Netz eingespeisten Strom erschwert zusätzlich eine wirtschaftliche Stromerzeugung.

Eine Rentabilität von ORC-Anlagen, wasserdampfgetriebene Kraftmaschinen und ähnlichen Anlagen ist häufig erst durch ergänzende Nutzung von deren Abwärme gegeben. Niedertemperaturabwärme von unter 200 °C ist jedoch in den Werken bereits häufig überschüssig und kann nur noch in seltenen Fällen genutzt werden.

5.2.4 Kälteerzeugung

Zur Kälteerzeugung muss ein Wärmestrom zur Verfügung stehen, der beispielsweise bei einer Absorptionskältemaschine dem Austreiber zugeführt werden kann. Um eine ausreichende Wärmestromdichte bei der Wärmeabgabe zu erreichen, sollte der Wärmestrom in Form von kondensierendem Wasserdampf oder flüssigem Wasser zugeführt werden. Um einen ausreichenden Wärmeübergang zu ge-

währleisten, sollten die Temperatur von flüssigem Wasser mindestens 50 K über der Temperatur im Austreiber und die Temperatur von kondensierendem Dampf mindestens bei 100 °C liegen.

Eine Kälte deutlich unter Umgebungstemperatur sollte zur Vermeidung von Transportwegen am Ort der Nutzung erzeugt werden, sofern die jeweiligen Platzverhältnisse dafür geeignet sind.

5.2.5 Fernwärme

Zur gesicherten Versorgung der Fernwärmekunden sollte abgesichert werden, dass bei Ausfall der industriellen Abwärmequellen eine entsprechende Alternative bereitsteht. Zudem sollte die Abnahme erzeugter Wärme garantiert sein, da nicht abgeführte Wärme den Prozess beeinflussen und zu Anlagenschäden führen kann. Ist beides nicht der Fall, werden Investitionen für Speicher und Kühlanlagen oder einen Abgasbypass (Abnahmемangel) sowie für zusätzliche Wärmeerzeugungsanlagen (Abwärmемangel) zur Sicherstellung der Redundanz erforderlich. Wirtschaftlich ist die Refinanzierung aller Anlagen- und Netzinvestitionen erforderlich.

5.3 Zusammenfassung der Abwärmennutzungsmöglichkeiten

In diesem Kapitel wird bewertet, wie die Einflussfaktoren (vgl. Kapitel 5.1) und die Nutzungsmöglichkeiten (vgl. Kapitel 5.2) für jeden der 13 in Kapitel 4 ausgewählten Abwärmeströme interagieren. Für jeden Einflussfaktor wurde abgeschätzt, welche Auswirkung er auf die jeweilige Nutzungsmöglichkeit hat. Gibt es keinen Einfluss oder gibt es sowohl fördernde als auch hemmende Wirkungen, so wird der Einfluss als neutral eingestuft und mit „o“ gekennzeichnet. Liefert der Einfluss für die Nutzungsmöglichkeit überwiegend Vorteile für ein Hüttenwerk, so wird der Einfluss als positiv eingestuft und mit „+“ gekennzeichnet. Überwiegen hingegen die Hemmnisse, so ist die Einstufung negativ und der Einfluss wird mit „-“ gekennzeichnet. Stellt ein Einfluss ein eindeutiges Ausschlusskriterium dar oder wird als starkes Hemmnis für eine Nutzungsmöglichkeit eingestuft, so wird er mit „- -“ bewertet.

Im Rahmen der Untersuchung wurde deutlich, dass die im Kapitel 5.1.3 genannten politischen, gesellschaftlichen und organisatorischen Einflüsse anlagenübergreifend und damit unabhängig vom betrachteten Abwärmestrom gelten. Daher wird ihr Zusammenwirken mit den in Kapitel 5.2 genannten Nutzungstechnologien gemeinsam und übergeordnet bewertet (vgl. Tabelle 23).

Tabelle 23: Anlagenübergreifende Einflüsse auf Abwärmenutzungstechnologien

Für die politischen, gesellschaftlichen und organisatorischen Einflussfaktoren auf die betrachteten Abwärmeströme gelten überwiegend folgende Bewertungen:

Einfluss auf Umsetzung		Abwärmenutzungsmöglichkeit									Bemerkung
		Prozessinterne Vorwärmung von		Dampf-erzeugung	Stromerzeugungsverfahren				Kälte-erzeugung	Fern-wärme	
Kate-gorie	Größe	Einsatz-stoffen	Medien		ORC	Kalina	TEG	Stirling-motor			
Politisch / gesellschaftlich / organisatorisch	Genehmigungsrecht (TAS, ...)	o	o	o	o	o	o	o	o	o	neutral
	Be- und Entlastungs-tatbestände bei der Energiebesteuerung	o	o	o	o	o	o	o	o	o	Stromerzeugung.: je nach lokalen und politischen Randbedingungen fördernd bis stark hemmend
	CO2-Emissionshandel	o	o	o	o	o	o	o	o	o	neutral
	Vergütung durch Dritte	o	o	o	--	--	--	--	o	--	Vergütung von werksexternen Einspeisungen in Relation zur Investition oft zu gering
	Werksexterne Infra- und Netzstrukturen	o	o	o	+	+	+	+	o	-	
	Geschäftsmodell (Profit Center)										falls mindestens kostendeckend, ist Abwärmenutzung gewollt
	Akzeptanz in der Gesellschaft	+	+	+	+	+	+	+	+	+	gut: bekannte Technologien zur Strom-/Kälte-/Wärme-erzeugung "ohne Kamin"
Einfluss:		+ fördernd		o neutral		- geringes Hemmnis		-- starkes Hemmnis			

Einige der dargestellten Nutzungsmöglichkeiten, wie beispielsweise die Installation einer LEEP-Technik an der Sinteranlage, sind für die Bestandsanlagen so wesentlich, dass bei einer Implementierung bestehende Betriebsgenehmigungen geändert werden müssten. Anforderungen aus dem BIm-SchG (TA Luft, TA Lärm) müssen beachtet werden, sind aber in den meisten Fällen technisch erfüllbar. Bei allen Erweiterungen, die einen Einfluss auf die bestehenden Anlagen haben, muss auch die Risikobeurteilung der bestehenden Anlage überarbeitet werden.

Energiebesteuerung, Emissionshandel und vergleichbare Randbedingungen verändern sich zeitlich immer wieder und sind von den Anlagenbetreibern kaum beeinflussbar. Insgesamt werden diese in dieser Studie für die betrachteten Abwärmeströme und Nutzungsmöglichkeiten eher als neutral angesehen. Bei einer zusätzlichen Stromerzeugung müssten beispielsweise Zuschläge nach dem EEG gezahlt werden, wodurch die Projekte unter den aktuellen Rahmenbedingungen (Strompreis, Vergütung u. s. w.) in der Regel unwirtschaftlich wären. Lokal können die Bewertungen gleicher Lösungen unterschiedlich ausfallen, da einige Hütten heute bereits dampf- und/oder stromüberschüssig sind. Hinsichtlich dieser Rahmenbedingungen sind die Standorte individuell einzeln zu bewerten.

Wesentliches Hemmnis stellen die derzeit erzielbaren geringen Vergütungen für Wärme und Strom dar, wenn sie über die Werkgrenze hinweg genutzt werden sollen. Auskopplung der Ströme und Transport zur Werkgrenze können damit in der Regel nicht kostendeckend betrieben werden. Redundanzen und Speicher zur Kompensation betriebsbedingter Schwankungen bis zum Stillstand sind zudem von Dritten werksextern zu stellen oder müssen selber gestellt werden. Stromnetze stehen bereits intern und extern zur Verfügung, Wärmenetze dagegen müssen in der Regel für eine zusätzliche Abwärmenutzung erweitert oder neu errichtet werden. Speicher und Abführungen bei Abnahmemangel können für Abwärme moderater Temperatur günstig geschaffen werden in Form von Wasserspeichern oder Kavernen. Speicherung von Abwärmen hoher Temperatur sowie Speicherung und Abführungen für Strom sind hingegen kostenintensiv.

Die Produktion richtet sich primär nach Auftragslage, Qualitätsanforderungen und effizienten Betrieb der Produktionsanlagen. Abwärme- und Strom kann aktuell nur als Nebenprodukt abgegeben werden. Fernwärmesysteme sind an den Hütten bereits angeschlossen, Erfahrungen in der Bereitstellung von Wärme liegen in der Stahlindustrie vor. An einigen Standorten könnte bereits heute mehr Wärme bereitgestellt werden, wenn an der Werksgrenze weitere Abnahmekapazitäten geschaffen werden würden. Die zentralen Stellen haben in den deutschen Hüttenwerken unter anderem durch die Installation und Pflege ihrer Energiemanagementsysteme bereits eine Grundlage für die Ermittlung von Strömen, die intern und extern der Werksgrenze genutzt werden können. Intern wurde schrittweise die Nutzung von Medienvorwärmung und Dampferzeugung, auch anlagenübergreifend, vorangetrieben. Über die Werksgrenze wurden Fernwärmelösungen mit Dritten entwickelt und umgesetzt.

Daher sind für den Fall mangelnder Abnahme im externen Netz alternative Senken wie beispielsweise Kamine und Speicher mit entsprechender Einbindung (Regelung, Leitungen) zu schaffen. Für den Fall einer Drosselung oder gar Abschaltung der Produktion sind alternative Quellen wie Heizkraftwerke vorzuhalten. Diese zusätzlichen Quellen und Senken müssen entweder extern bereitgestellt oder intern gegen kostendeckende Vergütung geschaffen werden.

Die Akzeptanz in der Gesellschaft wird jeweils als gut angesehen, wenn für eine Bereitstellung von Wärme oder Strom kein fossiler Brennstoff benötigt wird und damit konventionelle Verbrennungsanlagen entfallen können. Bedingung hierfür ist eine für den Verbraucher zumindest kostenneutrale Lösung. Hilfreich ist zudem, wenn neu zu errichtende Anlagen und Netze von extern nicht oder kaum sichtbar sind, also die Werkssilhouette bestehen bleibt.

Die in den Kapiteln 5.1.1 und 5.1.2 genannten Einflüsse auf die Nutzungstechnologien sind für die in Kapitel 4 identifizierten Abwärmeströme in Tabelle 24 bis Tabelle 36 zusammenfassend aufgelistet. Dabei werden die technischen und wirtschaftlichen Hemmnisse zu den jeweiligen 13 Abwärmequellen in den Tabellen inklusive den Bemerkungen diskutiert und textlich zusammengefasst.

Sinteranlage

Das Abgas am Sinterband ist in Tabelle 24 und die Abluft am Sinterkühler ist in Tabelle 25 dargestellt. Beide Ströme sind vor der jeweiligen Gasreinigung abrasiv und korrosiv, was eine direkte Verrwendung erschwert. Nach der Abgasreinigung steht mit weniger als 20 K (Kondensatvermeidung) ein zu geringes Temperaturgefälle für eine Nutzung zur Verfügung, weshalb die Nutzbarkeit eingeschränkt ist. Technologien wie das LEEP-Verfahren sind sehr aufwendig. Sie benötigen ein hohes Bauvolumen und führen zu hohen Investitionskosten. Zudem ist i. d. R. eine Neugenehmigung der Sinteranlage erforderlich.

Vor der Abluftreinigung (vgl. Tabelle 7) ist aufgrund des höheren nutzbaren Temperaturgefälles von ca. 100 K eine Abwärmeauskopplung deutlich vielversprechender. Bei einigen Anlagen in Deutschland fehlt für die zur Wärmeauskopplung nötige Anlagentechnik jedoch das dazu erforderliche Bauvolumen.

Tabelle 24: Einflüsse auf Abwärmenutzungstechnologien für das Abgas am Sinterband

Zur Verwendung im Hochofen wird Feinerz in Sinteranlagen "stückig gemacht". Im Zündofen und Sinterband mit 122 °C austretende gefasste Abgasströme von ca. 2.200 m³ (i.N.) pro Tonne Sinter werden gereinigt. Der gereinigte Abgasstrom ist mit Wasser gesättigt und abgekühlt auf eine Temperatur von ca. 116 °C.

		Abwärmenutzungsmöglichkeit									
Einfluss auf Umsetzung		Prozessinterne Vorwärmung von		Dampf- erzeugung	Stromerzeugungverfahren				Kälte- erzeugung	Fern- wärme	Bemerkung
Kate- gorie	Größe	Einsatz- stoffen	Medien		ORC	Kalina	TEG	Stirling- motor			
technisch	Temperaturniveau, Medien	+	--	--	-	-	-	--	-	-	Wirkungsgrad für alle Möglichkeiten schlecht, Temperatur zu gering
	Druckniveau	o	o	o	o	o	o	o	o	o	Druckniveau für lokale Nutzung an der Anlage hinreichend
	Verschmutzung	-	-	-	-	-	-	-	-	-	vor Abgasreinigung abrasiver Staub, danach geringere Temperatur
	Flexible Gestaltung, Skalierbarkeit, Regelbarkeit	+	+	+	+	+	+	+	+	+	kontinuierlicher Betrieb, Wärme kann aber muss nicht ausgekoppelt werden
	Einfluss auf Gesamtprozesskette und Produktqualität	o	o	o	o	o	o	o	o	o	ohne Einfluss, solange Mindesttemperatur für Filter nicht unterschritten wird
wirtschaftlich	Investitionskosten	-	-	-	-	-	-	-	-	-	vor Abgasreinigung abrasiver Staub, danach geringere Temperatur
	Betriebskosten (inkl. Wartung und Instandhaltung)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	vor Abgasreinigung abrasiver Staub, danach geringere Temperatur
	Neuanlagenrisiko	o	o	o	o	o	o	o	o	o	Techniken sind bekannt

Einfluss: + fördernd o neutral - geringes Hemmnis -- starkes Hemmnis

→ gefasster Abgasstrom bei mäßiger Temperatur, vor Reinigung abrasiv und staubhaltig, nach Reinigung um 5 % (6 K) geringere Temperatur; hoher Aufwand für Nutzung

Tabelle 25: Einflüsse auf Abwärmenutzungstechnologien für die Abluft am Sinterkühler

Zur Verwendung im Hochofen werden Eisenerze in Sinteranlagen "stückig gemacht". Die Abluft von Sinterbrecher und Sinterkühler treten als gefasster Gasstrom von ca. 1.060 m³ (i.N.) pro Tonne Sinter mit 160 °C in die nachfolgende Gasreinigung ein und mit 146 °C wieder aus.

Einfluss auf Umsetzung		Abwärmenutzungsmöglichkeit									Bemerkung
		Prozessinterne Vorwärmung von		Dampf- erzeugung	Stromerzeugungsverfahren				Kälte- erzeugung	Fern- wärme	
Kate- gorie	Größe	Einsatz- stoffen	Medien		ORC	Kalina	TEG	Stirling- motor			
technisch	Temperaturniveau, Medien	+	+	--	+	+	+	-	-	+	Temperaturschwankungen für manche Nutzungsoptionen nachteilig.
	Druckniveau	o	o	o	o	o	o	o	o	o	Druckniveau für lokale Nutzung an der Anlage hinreichend
	Verschmutzung	-	-	-	-	-	-	-	-	-	vor Luftreinigung abrasiver Staub, danach geringere Temperatur
	Flexible Gestaltung, Skalierbarkeit, Regelbarkeit	+	+	+	+	+	+	+	+	+	kontinuierlicher Betrieb, Wärme kann aber muss nicht ausgekoppelt werden
	Einfluss auf Gesamtprozesskette und Produktqualität	o	o	o	o	o	o	o	o	o	ohne Einfluss, solange Mindesttemperatur für Filter nicht unterschritten wird
wirtschaftlich	Investitionskosten	-	-	-	-	-	-	-	-	-	vor Luftreinigung abrasiver Staub, danach geringere Temperatur
	Betriebskosten (inkl. Wartung und Instandhaltung)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	vor Luftreinigung abrasiver Staub, danach geringere Temperatur
	Neuanlagenrisiko	o	o	o	o	o	o	o	o	o	Techniken sind bekannt

Einfluss: + fördernd o neutral - geringes Hemmnis -- starkes Hemmnis

→ gefasster Abluftstrom bei mäßiger Temperatur, vor Reinigung abrasiv und staubhaltig, nach Reinigung geringere Temperatur (10 %, 14 K); moderater Aufwand für Nutzung nach Reinigung

Hochofen

Das Abgas am Winderhitzer (Tabelle 26) ist als gefasster, sauberer Gasstrom mittlerer Temperatur gut für eine prozessinterne Medienvorwärmung geeignet und wird daher bereits an den Anlagen genutzt, an denen ausreichend Bauraum für die Aus- und Einkopplung der Abwärme vorhanden ist.

Tabelle 26: Einflüsse auf Abwärmenutzungstechnologien für das Abgas am Winderhitzer

Winderhitzer dienen dazu, den Heißwind für den Hochofenprozess bereitzustellen. In der Aufheizphase (bis zu 60 Minuten) wird Brenngas verbrannt. Ca. 800 m³ (i.N.) Abgas pro Tonne Roheisen werden mit 300 °C abgeführt. Der Abgasstrom ist geführt und sauber. Die Temperatur variiert über der Zeit. Der Strom tritt zyklisch (diskontinuierlich) auf.

Einfluss auf Umsetzung		Abwärmenutzungsmöglichkeit									Bemerkung
Kategorie	Größe	Prozessinterne Vorwärmung von		Dampferzeugung	Stromerzeugungungsverfahren				Kälteerzeugung	Fernwärme	
		Einsatzstoffen	Medien		ORC	Kalina	TEG	Stirlingmotor			
technisch	Temperaturniveau, Medien	o	+	+	+	+	+	-	+	+	gutes Temperaturniveau: ausreichend (Wirkungsgrad) aber nicht zu hoch (Kosten)
	Druckniveau	o	+	+	+	+	+	+	+	+	Druckniveau für Nutzung am Winderhitzer hinreichend, mit größeren Strecken nicht.
	Verschmutzung	o	+	+	+	+	+	+	+	+	kein Problem, weil sauber
	Flexible Gestaltung, Skalierbarkeit, Regelbarkeit	o	+	-	-	-	o	-	-	-	diskontinuierlicher Betrieb für manche Nutzungsoptionen nachteilig.
	Einfluss auf Gesamtprozesskette und Produktqualität	o	o	o	o	o	o	o	o	o	ohne Einfluss, solange Mindesttemperatur für Kamin nicht unterschritten wird
wirtschaftlich	Investitionskosten	+	+	-	--	--	--	--	--	+	
	Betriebskosten (inkl. Wartung und Instandhaltung)	o	+	+	+	+	+	+	+	+	
	Neuanlagenrisiko	o	o	o	o	o	o	o	o	o	Techniken sind bekannt

Einfluss: + fördernd o neutral - geringes Hemmnis -- starkes Hemmnis

→ gefasster sauberer Gasstrom mittlerer Temperatur; gut nutzbar, sofern Bauraum vorhanden ist

Zur Abwärmeauskopplung aus der mit 1.500 °C heißen Schlacke (Tabelle 27) ist keine großtechnisch nutzbare Technologie in Sicht. Wird hochwertiger Hüttensand produziert, so muss aus Qualitätsgründen, mit viel Wasser die Schlacke schlagartig gekühlt werden.

Tabelle 27: Einflüsse auf Abwärmenutzungstechnologien für die Schlacke am Hochofen

Am Hochofen fallen rund 230 – 300 kg Schlacke als Nebenprodukt pro Tonne Roheisen an. Sie wird bei einer Temperatur von ca. 1.460 – 1.500 °C abgestochen und diskontinuierlich abgeführt. Dies geschieht ca. über 10 Minuten pro Stunde.

		Abwärmenutzungsmöglichkeit									
Einfluss auf Umsetzung		Prozessinterne Vorwärmung von		Dampf- erzeugung	Stromerzeugungsverfahren				Kälte- erzeugung	Fern- wärme	Bemerkung
Kate- gorie	Größe	Einsatz- stoffen	Medien		ORC	Kalina	TEG	Stirling- motor			
technisch	Temperaturniveau, Medien	-	-	-	--	--	-	--	--	-	Temperatur sehr hoch, für Sandproduktion Quenche mit viel Wasser erforderlich
	Druckniveau	o	o	o	o	o	o	o	o	o	Wärmeauskopplung über Strahlung, daher kein Kontakt zum Wärmeübertrager
	Verschmutzung	o	o	o	o	o	o	o	o	o	Wärmeauskopplung über Strahlung, daher kein Kontakt zum Wärmeübertrager
	Flexible Gestaltung, Skalierbarkeit, Regelbarkeit	-	-	--	--	--	-	--	--	-	überwiegend diskontinuierlicher Betrieb
	Einfluss auf Gesamtprozesskette und Produktqualität	o	o	o	o	o	o	o	o	o	neutral, soweit Granulierung noch möglich ist
wirtschaftlich	Investitionskosten	--	--	--	--	--	--	--	--	--	geringe Wärmestromdichte, damit große Fläche, also große Anlagen erforderlich
	Betriebskosten (inkl. Wartung und Instandhaltung)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	überwiegend diskontinuierlicher Betrieb, hohe Temperatur
	Neuanlagenrisiko	--	--	--	--	--	--	--	--	--	keine großtechnische Lösung bekannt

Einfluss: + fördernd o neutral - geringes Hemmnis -- starkes Hemmnis

→ keine Technologie zur großtechnischen Nutzung verfügbar oder in Aussicht

Das Temperaturniveau von Hüttensand und austretendem Granulierwasser ist sehr gering und daher für eine Abwärmeauskopplung kaum geeignet, siehe Tabelle 28.

Tabelle 28: Einflüsse auf Abwärmenutzungstechnologien für das Wasser der Schlackengranulierung

Am Hochofen fallen rund 285 kg Schlacke als Nebenprodukt pro Tonne Roheisen an. 240 kg pro Tonne Roheisen werden in der Schlackengranulationsanlage mit flüssigem Wasser abgeschreckt und so zu Hüttensand verarbeitet. Der austretende Granulierwasserstrom mit 2985 kg pro Tonne Roheisen ist hoch abrasiv. Es wird gereinigt und mit 65 °C abgeführt.

Einfluss auf Umsetzung		Abwärmenutzungsmöglichkeit									Bemerkung
		Prozessinterne Vorwärmung von		Dampf- erzeugung	Stromerzeugungsverfahren				Kälte- erzeugung	Fern- wärme	
Kate- gorie	Größe	Einsatz- stoffen	Medien		ORC	Kalina	TEG	Stirling- motor			
technisch	Temperaturniveau, Medien	--	+	--	-	-	--	--	-	-	Temperaturschwankungen für manche Nutzungsoptionen nachteilig.
	Druckniveau	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Wasser wird bereits im Kreislauf mit Pumpen im Kreislauf gefördert
	Verschmutzung	-	-	-	-	-	-	-	-	-	abrasive Bestandteile, daher Kostenintensiv bei Anschaffung und Wartung
	Flexible Gestaltung, Skalierbarkeit, Regelbarkeit	-	-	--	--	--	-	--	--	-	überwiegend diskontinuierlicher Betrieb
	Einfluss auf Gesamtprozesskette und Produktqualität	o	o	o	o	o	o	o	o	o	neutral
wirtschaftlich	Investitionskosten	-	-	-	-	-	-	-	-	-	abrasive Bestandteile, hoher Massenstrom und mittlerer Temperaturgradient
	Betriebskosten (inkl. Wartung und Instandhaltung)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	abrasive Bestandteile, hoher Massenstrom und mittlerer Temperaturgradient
	Neuanlagenrisiko	o	o	o	o	o	o	o	o	o	bekannte Anlagentechnik
Einfluss:		+ fördernd		o neutral		- geringes Hemmnis			-- starkes Hemmnis		

→ gefasster, instationärer, abrasiver Wasserstrom mittlerer Temperatur; mit Aufwand nutzbar

Oxygenstahlwerk mit Konverter

Wird am Konverter Konvertergas zur Einspeisung ins Gasnetz gewonnen, so tritt an der erforderlichen Fackel Abgas mit einer Abwärme aus. Die hohen Ansprüche an die Fackel als Sicherheitseinrichtung und die hoch instationäre Betriebsweise sprechen jedoch gegen eine Nutzung dieser Abwärme, siehe Tabelle 29.

Tabelle 29: Einflüsse auf Abwärmenutzungstechnologien für die Fackel am Konverter

Im Konverter werden bei der O₂-Aufblasung 75 m³ (i.N.) CO-haltiges Prozessgas (Konvertergas) pro Tonne Rohstahl freigesetzt. Der Prozess ist instationär in Volumenstrom, Temperatur und Gaszusammensetzung. In wenigen Minuten pro Stunde unterschreitet der CO-Gehalt 25 Vol.-%. Im Fall der Konvertergasgewinnung werden in dieser kurzen Zeitspanne 89 m³ (i.N.) Gas pro Tonne Rohstahl in die Sicherheitseinrichtung Fackel geleitet und dort mit Luft verbrannt. Die Abgastemperatur erreicht dabei 1000 °C.

Einfluss auf Umsetzung		Abwärmenutzungsmöglichkeit									Bemerkung
		Prozessinterne Vorwärmung von		Dampf- erzeugung	Stromerzeugungsverfahren				Kälte- erzeugung	Fern- wärme	
Kate- gorie	Größe	Einsatz- stoffen	Medien		ORC	Kalina	TEG	Stirling- motor			
technisch	Temperaturniveau, Medien	+	+	-	-	-	+	-	-	+	Temperaturschwankungen für manche Nutzungsoptionen nachteilig.
	Druckniveau	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Verschmutzung	-	-	-	-	-	-	-	-	-	für Wärmeauskopplung im Abgasstrom hinreichend sauber
	Flexible Gestaltung, Skalierbarkeit, Regelbarkeit	--	--	--	--	--	--	--	--	--	Sicherheitseinrichtung, die nicht geregelt werden kann
	Einfluss auf Gesamtprozesskette und Produktqualität	o	o	o	o	o	o	o	o	o	neutral
wirtschaftlich	Investitionskosten	--	--	--	--	--	--	--	--	--	Sicherheitseinrichtung; wenige Sekunden pro Stunde nutzbar
	Betriebskosten (inkl. Wartung und Instandhaltung)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	wenige Sekunden pro Stunde nutzbar bei hohem Temperaturgradienten
	Neuanlagenrisiko	o	o	o	o	o	o	o	o	o	Wärmeauskopplung mit bekannten Wärmeübertragern

Einfluss: + fördernd o neutral - geringes Hemmnis -- starkes Hemmnis

→ gefasster, hoch instationärer Gasstrom hoher Temperatur; Sicherheitseinrichtung; mit hohem Aufwand nutzbar

Für die am Konverter mit 1.650 °C anfallende Schlacke gilt das Gleiche wie für die Hochofenschlacke, siehe Tabelle 27.

Tabelle 30: Einflüsse auf Abwärmenutzungstechnologien für die Schlacke am Konverter

Am Konverter fallen rund 115 kg Schlacke als Nebenprodukt pro Tonne Rohstahl an. Sie wird bei einer Temperatur von ca. 1.650 °C ausgeleert und diskontinuierlich abgeführt. Dies geschieht ca. über 3 Minuten pro 45 Minuten Konverterzyklus. Bei Abkühlung erstarrt die Schlacke.

Einfluss auf Umsetzung		Abwärmenutzungsmöglichkeit									Bemerkung
Prozessinterne Vorwärmung von		Dampf- erzeugung	Stromerzeugungsverfahren				Kälte- erzeugung	Fern- wärme			
Kate- gorie	Größe		Einsatz- stoffen	Medien	ORC	Kalina			TEG	Stirling- motor	
technisch	Temperaturniveau, Medien	-	-	-	--	--	-	--	--	-	Temperatur sehr hoch
	Druckniveau	o	o	o	o	o	o	o	o	o	Wärmeauskopplung über Strahlung, daher kein Kontakt zum Wärmeüber-trager
	Verschmutzung	o	o	o	o	o	o	o	o	o	Wärmeauskopplung über Strahlung, daher kein Kontakt zum Wärmeüber-trager
	Flexible Gestaltung, Skalierbarkeit, Regelbarkeit	-	-	--	--	--	-	--	--	-	stark diskontinuierlicher Betrieb
	Einfluss auf Gesamt-prozesskette und Produktqualität	o	o	o	o	o	o	o	o	o	neutral
wirtschaftlich	Investitionskosten	--	--	--	--	--	--	--	--	--	geringe Wärmestromdichte, damit große Fläche, also große Anlagen erforderlich
	Betriebskosten (inkl. Wartung und Instandhaltung)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	diskontinuierlicher Betrieb, hohe Temperatur
	Neuanlagenrisiko	--	--	--	--	--	--	--	--	--	keine großtechnische Lösung bekannt

Einfluss: + fördernd o neutral - geringes Hemmnis -- starkes Hemmnis

→ keine Technologie zur großtechnischen Nutzung verfügbar oder in Aussicht

Tabelle 31: Einflüsse auf Abwärmenutzungstechnologien für das Abgas am Konverter

Im Konverter werden bei der O₂-Aufblasung 75 m³ (i.N.) CO-haltiges Prozessgas (Konvertergas) pro Tonne Rohstahl freigesetzt. Mit Luft wird es bei reiner Dampferzeugung zu 188 m³ (i.N.), bei Konvertergasgewinnung zu 84 m³ (i.N.), Abgas pro Tonne Rohstahl verbrannt und nach dem Dampferzeuger mit 900 °C abgeführt. Der Prozess ist hoch instationär.

Einfluss auf Umsetzung		Abwärmenutzungsmöglichkeit									Bemerkung
Prozessinterne Vorwärmung von		Dampf- erzeugung	Stromerzeugungsverfahren				Kälte- erzeugung	Fern- wärme			
Kate- gorie	Größe		Einsatz- stoffen	Medien	ORC	Kalina			TEG	Stirling- motor	
technisch	Temperaturniveau, Medien	+	+	+	+	+	+	+	+	+	diskontinuierlicher Betrieb für manche Nutzungsoptionen nachteilig.
	Druckniveau	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	Verschmutzung	-	-	-	-	-	-	-	-	-	hohe Staubbelastung verschmutzt Wärmeübertrager
	Flexible Gestaltung, Skalierbarkeit, Regelbarkeit	-	-	-	--	--	-	--	--	-	diskontinuierlicher Betrieb für manche Nutzungsoptionen nachteilig.
	Einfluss auf Gesamtprozesskette und Produktqualität	o	o	o	o	o	o	o	o	o	neutral, soweit vor Verdampfungskühler 400 °C nicht unterschritten wird
wirtschaftlich	Investitionskosten	+	+	+	--	--	--	--	--	+	aber: kein Bauvolumen an bestehenden Anlagen vorhanden
	Betriebskosten (inkl. Wartung und Instandhaltung)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	hohe Staubbelastung verschmutzt Wärmeübertrager
	Neuanlagenrisiko	o	o	o	o	o	o	o	o	o	Wärmeauskopplung mit bekannten Wärmeübertragern

Einfluss: + fördernd o neutral - geringes Hemmnis -- starkes Hemmnis

→ gefasster, hoch instationärer, staubbelasteter Gasstrom mit hoher Temperatur, kein Bauraum an Altanlagen

Stranggießanlage

In der Sekundärkühlung der Stranggießanlage wird bei den meisten Güten der flüssige Strang mit Spritzwasser gekühlt. Dabei entstehen ungefasste sog. Brüden bei geringer Temperatur, die aus prozesstechnischen Gründen nur begrenzt kanalisierbar sind. Eine Abwärmenutzung ist kaum möglich, siehe Tabelle 32.

Eine Abwärmeauskopplung aus den festen Brammen nach der Brennschneidmaschine ist nur mit geringer Wärmestromdichte möglich und erfordert daher ein großes Bauvolumen. Zudem beeinflusst eine Wärmeauskopplung an dieser Stelle das Abkühlverhalten der Bramme. Bei harten, spröden Materialgütern kann es beispielsweise zu Rissbildung an der Oberfläche kommen. Eine Überprüfung der Auswirkungen auf die Materialqualität ist daher individuell zu überprüfen, siehe Tabelle 33.

Tabelle 32: Einflüsse auf Abwärmernutzungstechnologien für die Brüden der Stranggießanlage

In der Stranggießanlage wird nach der Kokille in der Sekundärkühlung der Strang mit Spritzwasser gekühlt. Dabei entstehen 143 kg Brüden pro Tonne Bramme mit deutlich unter 100 °C. Diese Brüden entweichen ungeführt dem Prozess. Der Gießprozess erfolgt chargenweise. Innerhalb einer Charge herrschen stationäre Bedingungen.

Einfluss auf Umsetzung		Abwärmernutzungsmöglichkeit									Bemerkung
Kategorie	Größe	Prozessinterne Vorwärmung von		Dampferzeugung	Stromerzeugungungsverfahren				Kälteerzeugung	Fernwärme	
		Einsatzstoffen	Medien		ORC	Kalina	TEG	Stirlingmotor			
technisch	Temperaturniveau, Medien	--	+	--	--	-	--	--	--	-	diskontinuierlicher Betrieb bei geringer Temperatur
	Druckniveau	-	-	-	-	-	-	-	-	-	druckloser, ungenutzter Strom; Erfassung und Absaugung erforderlich
	Verschmutzung	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	Flexible Gestaltung, Skalierbarkeit, Regelbarkeit	-	-	-	--	--	-	--	--	-	diskontinuierlicher Betrieb für manche Nutzungsoptionen nachteilig.
	Einfluss auf Gesamtprozesskette und Produktqualität	o	o	o	o	o	o	o	o	o	neutral
wirtschaftlich	Investitionskosten	-	-	-	-	-	-	-	-	-	großvolumige Absaugung erforderlich
	Betriebskosten (inkl. Wartung und Instandhaltung)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	gemäßigtes Temperaturniveau
	Neuanlagenrisiko	--	--	--	--	--	--	--	--	--	bisher keine großtechnische Umsetzung

Einfluss: + fördernd o neutral - geringes Hemmnis -- starkes Hemmnis

→ ungenutzter, hoch instationärer Dampfstrom geringerer Temperatur, hoher Aufwand für Nutzung

Tabelle 33: Einflüsse auf Abwärmernutzungstechnologien für Brammenkühlung an der Stranggießanlage nach der Brennschneidmaschine

In der Stranggießanlage wird nach der Kokille in der Sekundärkühlung der Strang überwiegend mit Spritzwasser gekühlt. An der Brennschneidmaschine wird der Strang zu Brammen abgelängt und abschließend im Kühltunnel an Luft von 900 °C auf 500 °C gekühlt. Damit wird der Stahl magnetisch und kann der Stahl mit dem Magnetkran transportiert werden. Der Gießprozess erfolgt chargenweise. Innerhalb einer Charge herrschen stationäre Bedingungen.

Abwärmernutzungsmöglichkeit											
Einfluss auf Umsetzung		Prozessinterne Vorwärmung von		Dampf- erzeugung	Stromerzeugungsverfahren				Kälte- erzeugung	Fern- wärme	Bemerkung
Kate- gorie	Größe	Einsatz- stoffen	Medien		ORC	Kalina	TEG	Stirling- motor			
technisch	Temperaturniveau, Medien	+	+	+	+	+	-	+	+	+	gute Arbeitstemperatur, für TEG zu hoch
	Druckniveau	o	o	o	o	o	o	o	o	o	Wärmeauskopplung über Strahlung, daher kein Kontakt zum Wärmeübertrager
	Verschmutzung	o	o	o	o	o	o	o	o	o	Wärmeauskopplung über Strahlung, daher kein Kontakt zum Wärmeübertrager
	Flexible Gestaltung, Skalierbarkeit, Regelbarkeit	-	-	--	--	--	-	--	--	-	diskontinuierlicher Betrieb mit Anforderung an definierte Wärmeabfuhr (Qualität)
	Einfluss auf Gesamtprozesskette und Produktqualität	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Einfluss auf Abkühlgradient (Produktqualität/Rissbildung und Logistig)
wirtschaftlich	Investitionskosten	--	--	--	--	--	--	--	--	--	geringe Wärmestromdichte, damit große Fläche, also große Anlagen erforderlich
	Betriebskosten (inkl. Wartung und Instandhaltung)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	gemäßigte Temperatur
	Neuanlagenrisiko	o	o	o	o	o	o	o	o	o	Wärmeauskopplung mit bekannten Wärmeübertragern

Einfluss: + fördernd o neutral - geringes Hemmnis -- starkes Hemmnis

→ hoch instationäre Strahlungswärme, geringe Wärmestromdichte, Einfluss auf Qualität des Produktes

Warmwalzwerk

An Wärmöfen des Warmwalzwerks kann die Abwärme aus dem Abgasstrom gut genutzt werden, sofern die brenngasabhängigen Taupunkte im Abgasstrang nicht unterschritten werden und das erforderliche Bauvolumen vorhanden ist, siehe Tabelle 34.

Tabelle 34: Einflüsse auf Abwärmenutzungstechnologien für das Abgas am Wärmofen

Im Wärmofen werden Brammen auf die erforderliche Walztemperatur erwärmt. Nach Brennluftrekuperator und Dampfkessel werden ca. 500 m³ (i.N.) Abgas pro Tonne Warmband mit 300 °C dem Kamin zugeführt. Der Prozess ist kontinuierlich, Temperatur und Volumenstrom des Abgases können jedoch Schwankungen unterliegen.

Einfluss auf Umsetzung		Abwärmenutzungsmöglichkeit									Bemerkung
		Prozessinterne Vorwärmung von		Dampf- erzeugung	Stromerzeugungungsverfahren				Kälte- erzeugung	Fern- wärme	
Kate- gorie	Größe	Einsatz- stoffen	Medien		ORC	Kalina	TEG	Stirling- motor			
technisch	Temperaturniveau, Medien	+	+	+	+	+	+	+	+	+	kontinuierlicher Betrieb moderate Temperatur
	Druckniveau	+	+	+	+	+	+	+	+	+	geführter Strom zum Kamin
	Verschmutzung	-	-	-	-	-	-	-	-	-	effiziente Wärmeübertrager mit Rippenrohren setzen sich zu, Glattrohre erforderlich
	Flexible Gestaltung, Skalierbarkeit, Regelbarkeit	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Wärmeauskopplung nach Bedarf möglich
	Einfluss auf Gesamtprozesskette und Produktqualität	o	o	o	o	o	o	o	o	o	neutral, soweit 180 °C nicht unterschritten wird (Kondensatbildung)
wirtschaftlich	Investitionskosten	+	+	o	--	--	--	--	--	+	aber: kein Bauvolumen an einigen bestehenden Anlagen vorhanden
	Betriebskosten (inkl. Wartung und Instandhaltung)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	Neuanlagenrisiko	o	o	o	o	o	o	o	o	o	Wärmeauskopplung mit bekannten Wärmeübertragern

Einfluss: + fördernd o neutral - geringes Hemmnis -- starkes Hemmnis

→ gefasster, staubbeladener Gasstrom mittlerer Temperatur; gut nutzbar, sofern Bauraum vorhanden

Die Abwärme aus der Bauteilkühlung ist ebenfalls gut nutzbar. Ist die Bauteilkühlung als Heißkühlung ausgeführt, so werden erzeugte Dampfmengen zur Nutzung abgeführt, ist sie als Kalkühlung ausgeführt, so bestimmt die Austrittstemperatur des Kühlwassers die Nutzung, siehe Tabelle 35.

Tabelle 35: Einflüsse auf Abwärmenutzungstechnologien für das Kühlwasser am Wärmofen

Im Wärmofen werden Brammen auf die erforderliche Walztemperatur erwärmt. Die tragenden Elemente im Ofen wie Reiter und Tragschienen müssen gekühlt werden. Bei einer Kalkühlung wird Kühlwasser erwärmt und anschließend in externen Kühlern rückgekühlt. Bei einer Heißkühlung (Verdampfungskühlung in den Bauteilen) wird Wasser bei Siedetemperatur zugeführt und Dampf einer Nutzung zugeführt. Der Prozess ist kontinuierlich.

Abwärmenutzungsmöglichkeit											
Einfluss auf Umsetzung		Prozessinterne Vorwärmung von		Dampf- erzeugung	Stromerzeugungverfahren				Kälte- erzeugung	Fern- wärme	Bemerkung
Kate- gorie	Größe	Einsatz- stoffen	Medien		ORC	Kalina	TEG	Stirling- motor			
technisch	Temperaturniveau, Medien	--	+	--	-	-	--	--	--	+	geringes Temperaturniveau; bei Umstellung von Kalt- auf Heißkühlung: Dampferz. "+"
	Druckniveau	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Wasser wird bereits im Kreislauf mit Pumpen im Kreislauf gefördert
	Verschmutzung	+	+	+	+	+	+	+	+	+	sauberes Kreislaufwasser
	Flexible Gestaltung, Skalierbarkeit, Regelbarkeit	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Wärmeauskopplung nach Bedarf möglich
	Einfluss auf Gesamtprozesskette und Produktqualität	o	o	o	o	o	o	o	o	o	neutral
wirtschaftlich	Investitionskosten	+	+	+	--	--	--	--	--	+	sauberes Medium, geringe Temperatur
	Betriebskosten (inkl. Wartung und Instandhaltung)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	sauberes Medium, geringe Temperatur
	Neuanlagenrisiko	o	o	o	o	o	o	o	o	o	bekannte Anlagentechnik

Einfluss: + fördernd o neutral - geringes Hemmnis -- starkes Hemmnis

→ gefasster, stationärer Wasserstrom mittlerer Temperatur; gut nutzbar

Kaum genutzt werden kann hingegen die Restwärme im Warmband. Ähnlich wie bei der Brammenkühlung an der Stranggießanlage ist die Wärmestromdichte für eine Nutzung zu gering, siehe Tabelle 36.

Tabelle 36: Einflüsse auf Abwärmenutzungstechnologien für die Restwärme des Warmbandes

Das Warmband verlässt die Warmwalzstraße aufgewickelt auf einem Coil mit einer Restwärme von 500°C.

Einfluss auf Umsetzung		Abwärmenutzungsmöglichkeit									Bemerkung
		Prozessinterne Vorwärmung von		Dampf- erzeugung	Stromerzeugungsverfahren				Kälte- erzeugung	Fern- wärme	
Kate- gorie	Größe	Einsatz- stoffen	Medien		ORC	Kalina	TEG	Stirling- motor			
technisch	Temperaturniveau, Medien	+	+	+	+	+	+	+	+	+	gute Arbeitstemperatur
	Druckniveau	o	o	o	o	o	o	o	o	o	bisher keine geführte Strömung
	Verschmutzung	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	Flexible Gestaltung, Skalierbarkeit, Regelbarkeit	-	-	--	--	--	-	--	--	-	diskontinuierlicher Betrieb mit Anforderung an Abkühlzeit (Logistik)
	Einfluss auf Gesamtprozesskette und Produktqualität	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Einfluss auf Abkühlzeit (Logistik)
wirtschaftlich	Investitionskosten	--	--	--	--	--	--	--	--	--	geringe Wärmestromdichte, damit große Fläche, also große Anlagen erforderlich
	Betriebskosten (inkl. Wartung und Instandhaltung)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	gemäßigte Temperatur
	Neuanlagenrisiko	o	o	o	o	o	o	o	o	o	Wärmeauskopplung mit bekannten Wärmeübertragern
Einfluss:		+ fördernd		o neutral		- geringes Hemmnis		-- starkes Hemmnis			

→ hoch instationäre Strahlungswärme, geringe Wärmestromdichte, geringer Nutzen

6 Ergebnisse und Erkenntnisse der Studie

Um die Hauptanlagen der deutschen Hüttenwerke wurden Energiebilanzen gezogen und in Kapitel 4 in Form von Tabellen und Sankey-Diagrammen dargestellt. Für eine detaillierte Betrachtung wurden aus den ermittelten Abwärmeströmen 13 Einzelströme ausgewählt und in Kapitel 5 bewertet. Daraus wurden Nutzungspotenziale bestimmt, die in Tabelle 37 detailliert aufgelistet sind.

Tabelle 37: Übersicht der ermittelten Nutzungspotenziale

	Jahresproduktion aller deutschen Hüttenwerke in Summe		¹ ausgewählte Abwärme, Bezug 15°C	² Abwärmepotenzial, bei minimaler Prozess-temp.	³ bereits genutzt	Abwärmepotenzial, verbleibend	⁴ Abwärmepotenzial, betrieblich nutzbar		nutzbarer Temperaturgradient	Medium	Bemerkung
	t / Jahr		GJ / Jahr	GJ / Jahr	%	GJ / Jahr	%	GJ / Jahr	K		
Abgas am Sinterband (vor Gasreinigung)	26.405.272	Sinter (Si)	8.366.468	1.720.208	29	1.221.040	75	915.780	22	Abgas	abrasiv bei geringem Teperaturniveau
Abluft am Sinterkühler	26.405.272	Sinter (Si)	5.536.520	4.208.273	11	3.724.898	75	2.793.673	110	Abluft	abrasive und korrosive Bedingungen
Abgas am Winderhitzer	27.583.029	Roheisen (RE)	9.460.979	6.758.267	58	2.810.247	50	1.405.123	200	Abgas	an einigen Anlagen besteht nicht das nötige Bauvolumen zur Verfügung
Schlacke am Hochofen	27.583.029	Roheisen (RE)	12.357.197	12.062.391	0	12.062.391	0	0	1.430	Schlacke	keine Technologie bekannt, die großtechnisch genutzt werden kann
Granulierwasser der Schlackengranulation	27.583.029	Roheisen (RE)	12.081.367	5.171.071	0	5.171.071	0	0	15	Abwasser	abrasiv bei geringem Teperaturniveau; nicht nutzbar
Abgas der Fackel am Konverter	22.477.587	Rohstahl (RS _{flüssig})	876.626	800.978	0	800.978	0	0	950	Abgas	hoch instationär, maximal wenige Minuten pro Stunde; nicht nutzbar
Schlacke am Konverter	30.053.873	Rohstahl (RS _{flüssig})	7.333.145	7.180.371	0	7.180.371	0	0	1.645	Schlacke	keine Technologie bekannt, die großtechnisch genutzt werden kann
Abgas am Konverter ohne / mit Konvertergasgewinnung:	ohne	7.576.286	Rohstahl	2.144.089*	1.290.274	0	1.290.274	0	500	Abgas	derzeitige Anlagen: Anlagenumbau erforderlich; nur bei Neuanlagen nutzbar
	mit	22.477.587	Rohstahl (RS _{flüssig})	2.697.310	1.591.311	20	1.278.671	0	500	Abgas	
Brüden an der Sekundärkühlung der Stranggießanlage	29.347.607	Rohstahl (RS _{fest})	11.240.133	7.823.241	0	7.823.241	0	0	15	ungefasste Brüden	ungefasster instationärer Strom bei geringer Temperatur; nicht nutzbar
Brammenkühlung an der Stranggießanlage nach Brennschneidmaschine	29.347.607	Rohstahl (RS _{fest})	18.899.859	6.272.035	30	4.415.825	65	2.882.810	494	Bramme	geringe Wärmestromdichte; Einfluss auf Produktqualität (teils positiv, teils negativ)
Abgas am Wärmofen nach dem Dampfkessel	21.300.000	Warmband (WB)	4.110.900	1.740.721	39	1.056.563	100	1.056.563	120	Abgas	nutzbar
Kühlwasser tragender Ofenelemente im Warmwalzwerk	kalt	15.176.258	Warmband	1.851.503	925.752	55	419.862	25	35	Kühlwasser	zum Teil Temperatur zu gering
	heiß	6.123.742	Warmband (WB)	747.097	747.097	100	0	100	0	Dampf	teils bis Mitteldruckdampf
Restwärme des Warmbandes	21.300.000	Warmband (WB)	6.283.500	5.863.038	0	5.863.038	5	293.152	450	Coil	geringe Wärmestromdichte, daher sehr lange Prozesszeit und sehr große Lager

¹ bilanzielle Abwärme bezogen auf 15 Grad Celsius² bezogen auf individuelle minimal zulässige Temperatur im Prozessschritt; Abgas: 100 °C bei Erdgas, 180 °C bei Koksofengas, 400°C bei O₂-Mangel ; sonst: 50 °C³ an Einzelanlagen bereits in den Hütten genutzt⁴ betrieblich nutzbar: Unter den vorhandenen Rahmenbedingungen sind die Potenziale technisch, organisatorisch und wirtschaftlich an den Bestandsanlagen erschließbar, siehe Kapitel 5.

Die minimal und maximal zulässigen Temperaturen für die jeweilige Wärmenutzung sind zusammenfassend in Tabelle 38 aufgeführt.

Tabelle 38: Verwendete Temperaturwerte in der Betrachtung der Abwärmeströme

► Berechnungsbasis für Enthalpie der Abwärme	► $T_{\text{Abwärme}}$	► Bemerkung
	me	
	► °C	►
Bezugstemperatur	15	Basistemperatur; entspricht der mittleren Einsatztemperatur der Rohstoffe und Medien
untere nutzbare Temperatur, wenn keine weiteren Restriktionen vorliegen	50	damit ist lediglich eine sehr geringe Vorwärmung von Medien möglich (Speisewasser, Rücklauf Fernwärme)
► Minimaltemperatur	►	►
Dampferzeugung	500	darunter nur zur Vorwärmung des Speisewassers und Teilverdampfung geeignet, Ziel ist eine Dampftemperatur: zwischen 250 und 540 °C
ORC	100	unterhalb ist der Wirkungsgrad zu schlecht; angeboten werden Anlagen für eine Temperatur des Arbeitsmittels zwischen 70 und 500 °C
Kalina	100	Prozess ist vergleichbar mit ORC, demnach auch die Temperaturen
TEG	200	unterhalb ist der Wirkungsgrad sehr schlecht, oberhalb muss auf die Temperatur des TEG geachtet werden
Stirling	500	unterhalb ist der Wirkungsgrad zu schlecht
Absorptionskältemaschine	100	Prozess ist vergleichbar mit ORC; für eine Zieltemperatur von Minus 50 °C ist eine Abwärme mit über 200 °C erforderlich
Abgas einer Erdgasverbrennung	100	damit wird Taupunkttemperatur für Erdgasverbrennung auch an Wänden und im Kamin nicht unterschritten
Abgas einer Verbrennung mit Schwefel	180	damit wird Taupunkttemperatur für Koksgasverbrennung auch an Wänden und im Kamin nicht unterschritten
Abgas bei understöchiometrischer Verbrennung, mit Salzbildner	400	unterhalb kommt es zur Rekombination langkettiger Kohlenwasserstoffe, es bilden sich PAK
► Maximaltemperatur	►	►
Fluide	500	oberhalb müssen Armaturen aktiv gekühlt oder aus Keramik gefertigt werden, damit steigt der Preis stark an und die Standzeit sinkt

Bei Abgas gilt es, den Taupunkt auch in nachgeschalteten Anlagen, wie beispielsweise trockenen Abgasreinigungsanlagen mit Tuchfiltern, bis zum Austritt aus dem Kamin an allen Wänden nicht zu unterschreiten. Für das Abgas einer Verbrennung von Erdgas, Gichtgas und Konvertergas mit Sauerstoffüberschuss liegt diese Mindesttemperatur bei 100°C. Bei einer Verbrennung von Gasen mit schwefelhaltigen Bestandteilen, wie beispielsweise Koksofengas, liegt sie bei 180 °C, da die Begleitstoffe den Taupunkt anheben. Wird understöchiometrisch verbrannt und liegen Salzbildner vor, so ist bei Unter-

schreiten einer Temperatur von 400 °C mit Wasser zu quench, um eine Rekombination von Kohlenwasserstoffen und die Bildung von PAK zu vermeiden.

Sollen Arbeits- und Kraftmaschinen mit Dampf angetrieben werden, so liegt die Mindesttemperatur für die Anlagen mit organischen Arbeitsmitteln wie ORC-, Kalina- und Kälte-Anlagen bei 70 bis 100 °C, für Wasserdampf bei 500 °C. Für den Stirlingmotor sollte ein Gasstrom mit mindestens 500 °C vorliegen, um einen akzeptablen Wärmestrom einkoppeln zu können. Für TEG sollte die Temperatur zwischen 200 und 500 °C liegen, darüber ist die thermische Belastung zu hoch.

Eine Maximaltemperatur ist bei Armaturen für Rohrleitungen einzuhalten. Diese sind für einen Einsatz oberhalb von 500 °C extrem kostenintensiv in Anschaffung und Wartung, insbesondere wenn Ströme für eine Abwärmenutzungsmöglichkeit mit Hilfe von Automatisierungssystemen geregelt werden müssen.

Für die in dieser Studie betrachteten fünf Bereiche Sinteranlage, Hochofen inklusive Nebenanlagen, Oxygenstahlwerk mit Konverter, Stranggießanlage und Warmwalzwerk wurden die Potenziale aufsummiert (Tabelle 39) und in Abbildung 27 bis Abbildung 32 dargestellt. Die jeweiligen Spalten beschreiben die Abwärmeströme bezogen auf die Tonne Rohstahl fest. Dafür wurde die jeweilige Abwärmemenge der betrachteten Hauptanlage mit der Jahresproduktion multipliziert um den Gesamtwärmestrom zu erhalten. Dieser wurde dann auf die Jahresproduktion festen Rohstahl bezogen. Die zugrunde liegenden Werte sind in Tabelle 37 und den Bilanztabellen in Kapitel 4 aufgeführt. Die Tabelle 39 ist wie folgt zu lesen:

- Spalte 2 bzw. der linke Balken beschreibt die Gesamtsumme der bilanziellen Abwärme aus den Sankeydiagrammen bezogen auf eine Umgebungstemperatur von 15 °C, was näherungsweise der durchschnittlichen Einsatztemperatur der Eingangsstoffe entspricht.
- Die 3. Spalte (Balken 2) beschreibt die innerhalb dieser Studie untersuchten 13 Abwärmeströme. Dabei werden zum Beispiel Wärmeverluste der Prozesse durch Strahlung und Wärmeleitung bzw. Konvektion sowie die Rückkühlung in Kühlwasserkreisläufen nicht betrachtet.
- Spalte 4 (Balken 3) berücksichtigt eine minimale Prozesstemperatur der Abkühlung, welche durch den jeweiligen Produktionsprozess vorgegeben wird. Dabei werden jeweils die Mindesttemperatur im betrachteten Produktionsschritt und die Anforderungen für die nachfolgenden Schritte betrachtet. Die möglichen minimalen Prozesstemperaturen sind in Tabelle 38 beschrieben.
- Abwärme wird bereits in den integrierten Hüttenwerken ausgekoppelt und genutzt. Spalte 5 bzw. der 4. Balken in Abbildung 32 beschreibt die Abwärmepotenziale nach Abzug der bereits genutzten.
- Abwärmen, bei denen in Kapitel 5 ein Einfluss als Ausschlusskriterium identifiziert wurde, sind von den Ergebnissen der fünften Spalte abgezogen. Für die verbleibende Abwärme, dargestellt in Spalte (Balken 5), gibt es jeweils mindestens eine umsetzbare Nutzungsmöglichkeit.

Nach Abzug in einzelnen Betrieben bereits genutzter Abwärmeströme vom Abwärmepotenzial bei minimal möglicher Prozesstemperatur ergibt sich ein verbleibendes Abwärmepotenzial von 1,585 GJ pro Tonne festem Rohstahl, welcher bisher in die Umgebung abgegeben wird.

Zusammenfassend können 0,322 GJ/t_{RSfest} weiterhin thermisch an den 13 betrachteten Abwärmequellen erschlossen werden. Dies entspricht einem kumulierten Potenzial von 9,45 PJ/a. Des Weiteren ist aufgeführt, dass bereits 0,302 GJ/t_{RSfest} (8,86 PJ/a) bereits an thermischer Abwärme von der Stahlindustrie weiteren Nutzungszwecken zugeführt wird bzw. bereits erschlossen ist.

Tabelle 39: Abwärme der betrachteten Hauptanlagen bezogen auf eine Tonne festen Rohstahl (RSfest)

⁰ : gesamte Abwärme ^{1...4} : für die Nutzung identifizierte Anteile	⁰ bilanzielle Abwärme, Bezug 15°C	¹ ausgewählte Abwärme, Bezug 15°C	² Abwärmepotenzial, bei minimaler Prozesstemp.	³ Abwärmepotenzial, verbleibend	⁴ Abwärmepotenzial, betrieblich nutzbar
	GJ / t RSfest	GJ / t RSfest	GJ / t RSfest	GJ / t RSfest	GJ / t RSfest
Sinteranlage	0,928	0,474	0,202	0,169	0,126
Hochofen	3,006	0,739	0,524	0,389	0,048
Konverter	2,165	0,445	0,370	0,359	0,000
Stranggießanlage	1,253	1,027	0,480	0,417	0,098
Warmwalzwerk	1,112	0,443	0,316	0,250	0,050
Gesamt	8,463	3,127	1,892	1,585	0,322

⁰ Gesamtsumme der bilanziellen Abwärme, bezogen auf 15 °C (nicht komplett/nicht alles technisch nutzbar).

¹ bilanzielle Abwärme der für eine potentielle Nutzung identifizierten 13 Abwärmeströme, bezogen auf 15 °C (nicht alles technisch nutzbar).

² Abwärme der vorherigen Spalte, nun bezogen auf individuelle minimal zulässige Temperatur im Prozessschritt; Abgas: 100 °C bei Erdgas, 180 °C bei Koksofengas, 400°C bei O₂-Mangel ; sonst: 50 °C (beispielsweise aus verschleiß-, korrosions- und sicherheitstechnischen Gründen sonst nicht nutzbar).

³ Abwärme der vorherigen Spalte, nun verringert um die an Einzelanlagen in den Hütten bereits genutzten Abwärmeströme.

⁴ Abwärme der vorherigen Spalte, nun verringert auf die betrieblich nutzbare Menge: Unter den vorhandenen Rahmenbedingungen sind die Potenziale technisch, organisatorisch und wirtschaftlich an den deutschen Bestandsanlagen erschließbar.

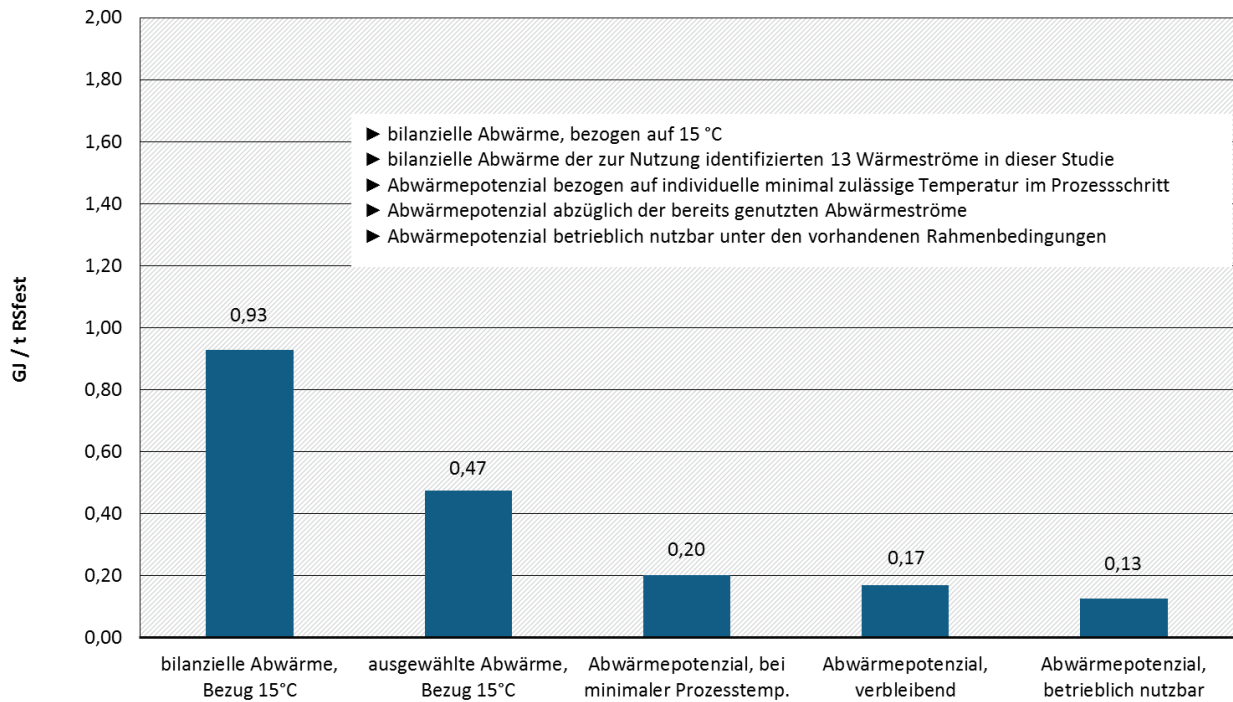
In Folge werden die Einzelanlagen diskutiert und es wird dargestellt, welche betrieblich bereits genutzten und zusätzlich betrieblich nutzbaren Abwärmepotenziale für die Ermittlung des Gesamtpotenzials herangezogen werden. Die hier dargestellten Anteile zur Ermittlung des Gesamtpotenzials sind in Tabelle 39 zusammengefasst.

Sinteranlage

Die Abwärmen von Abgas am Sinterband und Abluft am Sinterband werden zum einen mittels einer LEEP-Anlage und zum anderen zur Medientvorwärmung genutzt. Von den verbleibenden Abwärmeströmen mit $0,13 \text{ GJ}/t_{\text{RS, fest}}$ sind nach Expertenurteil ca. 75 % betrieblich nutzbar, Abbildung 27.

Abbildung 27: Spezifische Abwärme an der Sinteranlage

Abwärme an den Sinteranlagen bezogen auf eine Tonne festen Rohstahl



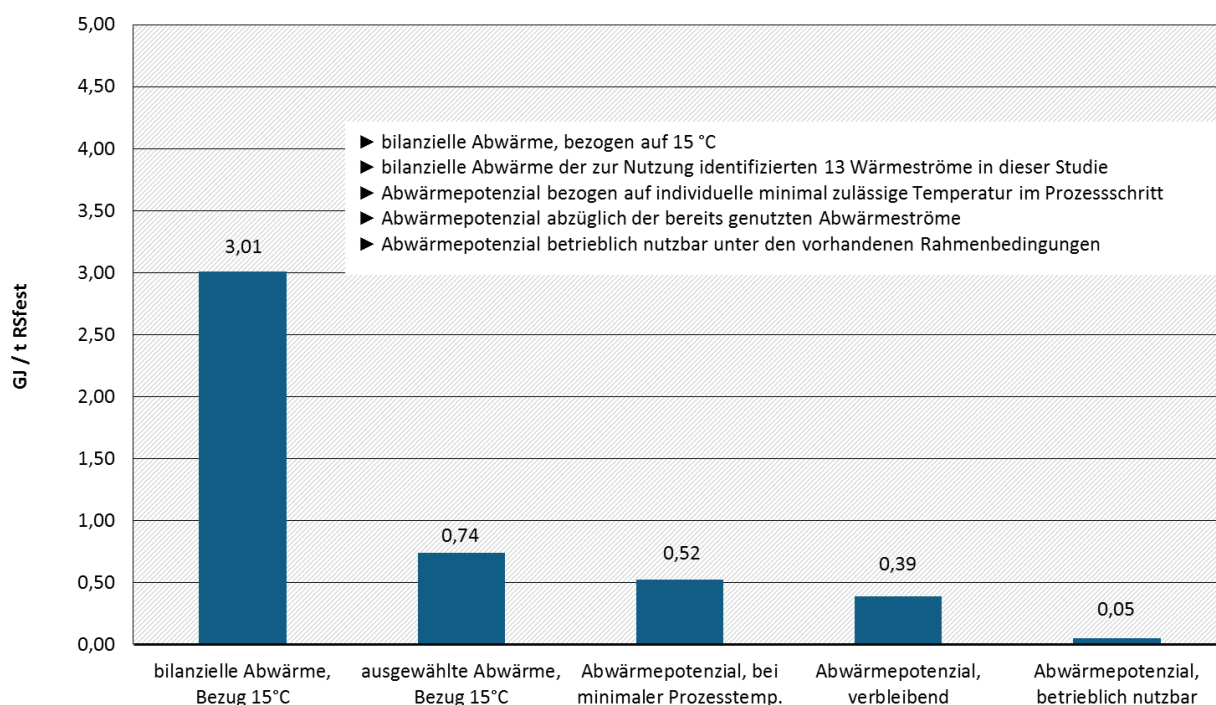
Eigene Darstellung, Stahlinstitut VDEh

Hochofen mit Nebenanlagen

An den Hochöfen mit ihren Nebenanlagen ist lediglich die Abwärme der Abgase am Winderhitzer nutzbar, für die Schlacke steht keine Abwärmennutzungstechnologie zur Verfügung und das Granuliertwasser besitzt kein ausreichendes Temperaturniveau und ist sowohl abrasiv als auch korrosiv. Bei dem kleinsten der drei näher betrachteten Abwärmeströme, der Abgasabwärme der Winderhitzer, wird bereits 58 % einer weiteren Verwendung zugeführt. Bei der Hälfte der verbleibenden Abwärme steht für eine Wärmeauskopplung kein ausreichender Bauraum an den Bestandsanlagen zur Verfügung, der Rest kann zur Nutzung ausgekoppelt werden. Vom verbleibenden Abwärmepotenzial aller drei Ströme mit knapp $0,05 \text{ GJ/t}_{\text{RS,fest}}$ verbleibt somit ein zusätzliches betrieblich nutzbares Potenzial von 7 %, Abbildung 28. Aufgrund der gut nutzbaren Temperatur und hohen Qualität des Abgasstromes könnte jede betrachtete Abwärmennutzungsmöglichkeiten dafür eingesetzt werden.

Abbildung 28: Spezifische Abwärme am Hochofen mit Nebenanlagen

Abwärme an den Hochöfen bezogen auf eine Tonne festen Rohstahl



Eigene Darstellung, Stahlinstitut VDEh

Die Abwärme der Schlacke ist in dieser Betrachtung nur einmal mit jeweiligem gleichem Anteil für eine mögliche Trockengranulation und für eine Abwärmennutzung als Mittelwert aus Wasser bewertet worden, um eine Doppelzählung dieses Potentials zu vermeiden.

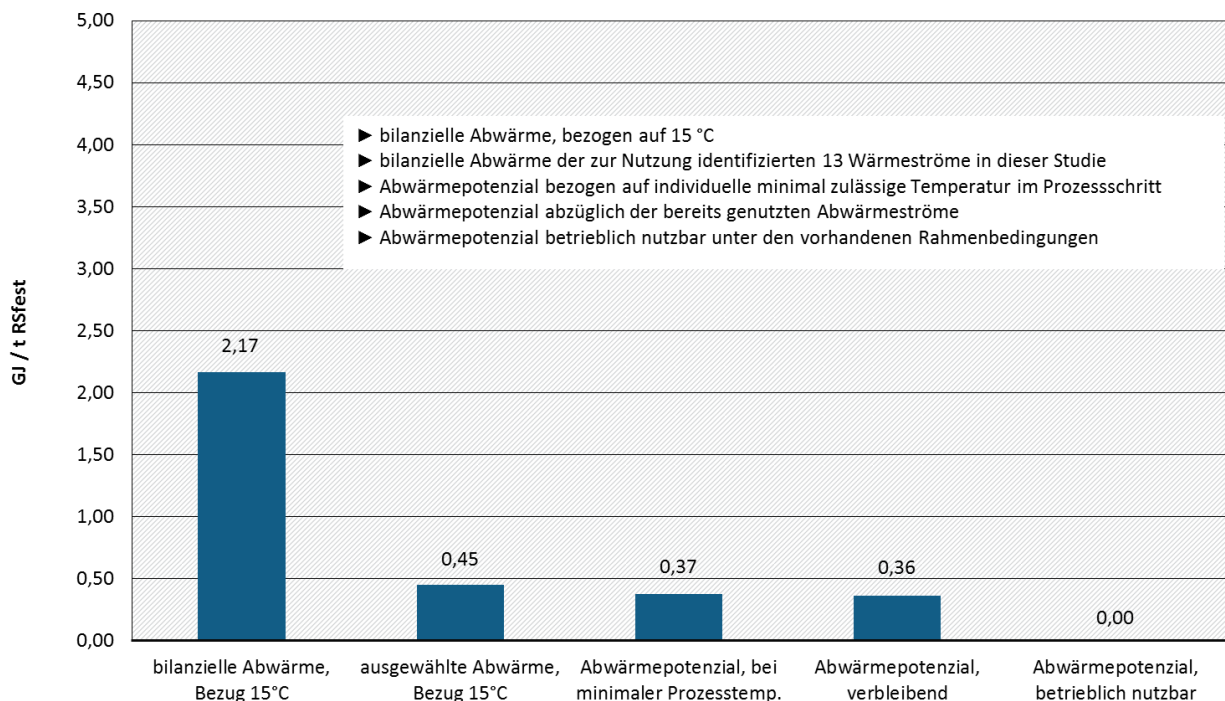
Oxygenstahlwerk mit Konverter

Die Abwärme des am Konverter austretenden Gases nach dem an allen Anlagen vorhandenen Kessel und vor dem Verdampfungskühler wäre über weitere Kessel für eine Nutzung geeignet. Lediglich an einer Anlage ist jedoch ausreichend Bauraum vorhanden, um dort weitere Abwärme für eine Nutzung auszukoppeln. An allen anderen Bestandsanlagen ist kein ausreichender Bauraum vorhanden. Neuanlagen (green field) werden heute mit mehreren Kesseln zur Abwärmenutzung konzipiert.

Für die Schlacke am Konverter gibt es, wie für die des Hochofens, keine verfügbare Abwärmenutzungstechnologie. Die Fackel unterliegt als Sicherheitseinrichtung hohen Anforderungen im Betrieb. Zudem liegt ein hoch instationärer Betrieb von Volumenstromveränderungen um $100.000 \text{ m}^3/\text{h i.N.}$ Brenngas in maximal wenigen Minuten pro Stunde vor. Insgesamt konnte daher kein zusätzliches betrieblich nutzbares Potenzial identifiziert werden, Abbildung 29.

Abbildung 29: Spezifische Abwärme im Oxygenstahlwerk mit Konverter

Abwärme an den Konvertern bezogen auf eine Tonne festen Rohstahl



Eigene Darstellung, Stahlinstitut VDEh

Stranggießanlage

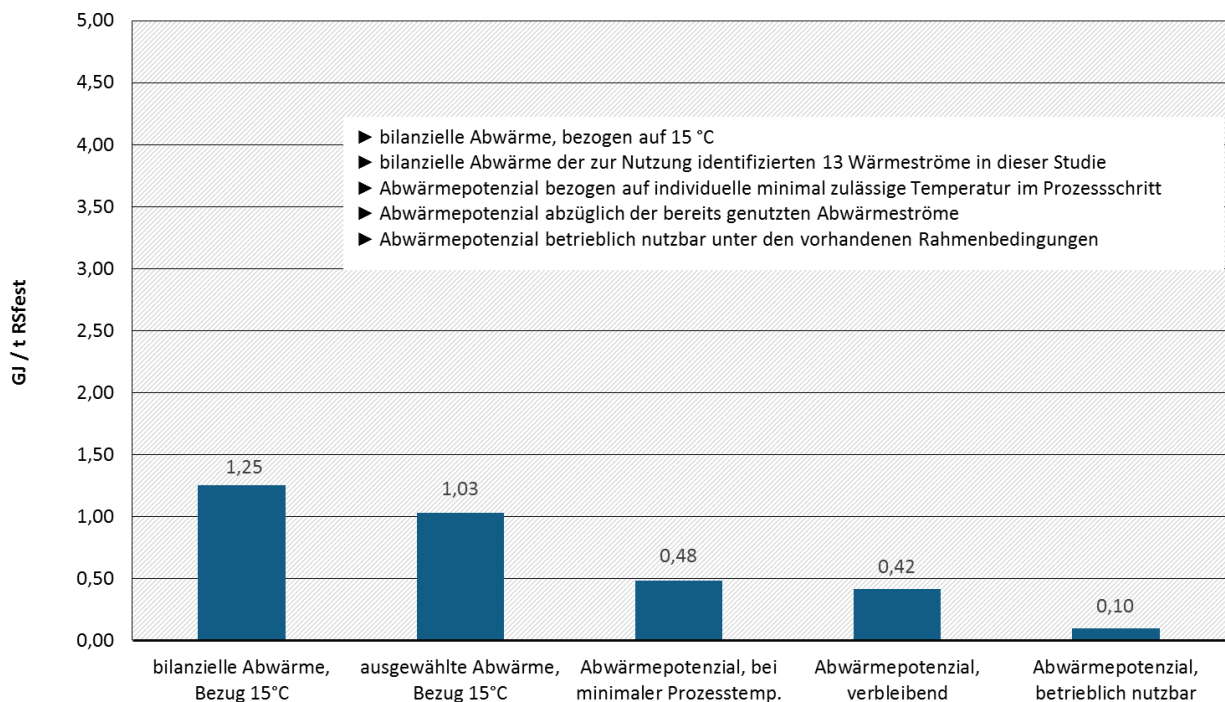
Die Brüden an der Stranggießanlage treten ungefasst an vielen Stellen bei der Sekundärkühlung mit Wasser diffus und mit geringer Temperatur aus. Sie sind daher technisch für eine Abwärmernutzung nicht geeignet.

Die Brammenwärme nach Brennschneidmaschine wird bereits bei 30 % der Produktion genutzt. Eine Abwärmernutzung an dieser Stelle kann bei einigen Güten zu Qualitätsabsenkungen führen, beispielsweise durch Rissbildung. Daher ist nach Expertenurteil nur für 65 % der verbleibenden Produktion ebenfalls eine Nutzung möglich.

Die Brammentemperatur sollte bei der Abwärmeauskopplung jeweils 500 °C (siehe Kapitel 3.1) nicht unterschreiten, um das Potenzial für den Wärmeinsatz im nachgeschalteten Warmwalzwerk heben zu können. Es verbleibt mit knapp 0,10 GJ/t_{RS,fest}, ein nutzbares Potenzial von 24 %, Abbildung 30.

Abbildung 30: Spezifische Abwärme an der Stranggießanlage

Abwärme an den Stranggießanlagen bezogen auf eine Tonne festen Rohstahl



Eigene Darstellung, Stahlinstitut VDEh

Warmwalzwerk

An den Wärmöfen in Warmwalzwerken integrierter Hüttenwerke wird die Abgasabwärme nach Dampfkessel bereits bei 39 % der Produktion genutzt. In den verbleibenden Fällen ist, ähnlich wie beim Abgas der Winderhitzer am Hochofen, eine Abwärmenutzung gut möglich.

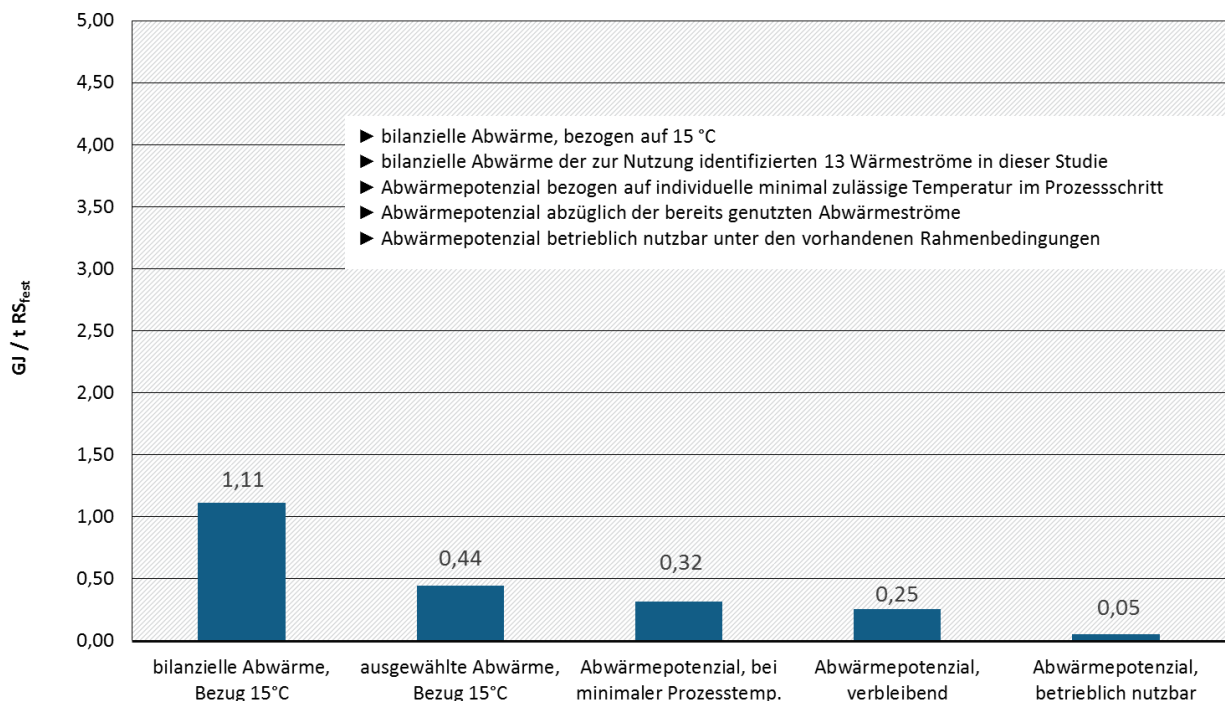
Die Bauteilkühlung der Öfen im Warmwalzwerk wird für 70 % der Warmbandproduktion kalt mit einer Kühlwassertemperatur am Austritt von bis zu 85 °C (siehe Kap: 3.3), durchgeführt. Bei 55 % dieser 70 %, also knapp 40 %, wird bereits die Abwärme zur weiteren Verwendung ausgekoppelt. Somit verbleibt ein Rest von gut 30 % der Abwärme. Diese liegt bei 75 % der Anlagen auf einem zu niedrigen Temperaturniveau für eine Nutzung. Es verbleibt ein Potenzial zur weiteren Nutzung von ca. 6 %. Diese Abwärme bei der Kaltkühlung kann lediglich zur Wasservorwärmung verwendet werden, da das Temperaturniveau gering ist. 30 % des Warmbandes in integrierten Hütten wird an Anlagen mit einer Heißkühlung der tragenden Ofenelemente produziert. Hier wird die Abwärme bereits vollständig genutzt, wie in Kapitel 3.4 beschrieben ist.

Die Restwärme des als Coil vorliegenden Warmbandes kann kaum betrieblich genutzt werden. Die Wärme wird über die äußere Oberfläche des Coils über Strahlung und Konvektion abgegeben. Eine Verbesserung des Wärmeüberganges beispielsweise durch Anströmung ist nahezu ohne Wirkung, da die Wärmeabgabe dominiert wird durch den hohen Wärmeleitungswiderstands innerhalb des Coils. Für eine Wärmeauskopplung wäre eine sehr lange Zeit und damit ein sehr großes Anlagenvolumen erforderlich.

Insgesamt verbleibt mit 0,05 GJ/t_{RS,fest}, ein nutzbares Potenzial von 20 %, Abbildung 31.

Abbildung 31: Spezifische Abwärme im Warmwalzwerk

Abwärme an den Warmwalzwerken bezogen auf eine Tonne festen Rohstahl



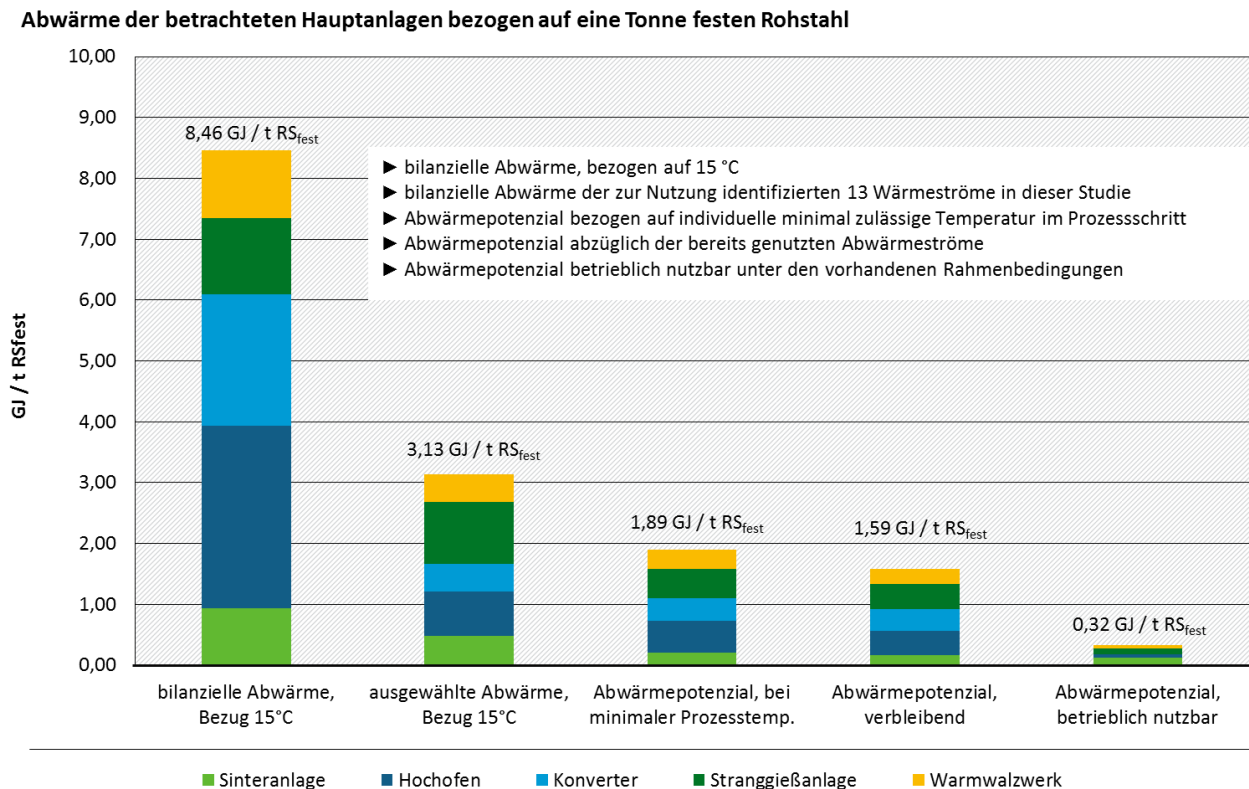
Eigene Darstellung, Stahlinstitut VDEh

Anlagenübergreifend

In Kapitel 5.1 sind Randbedingungen aufgeführt, die zum Ausschluss einer möglichen Abwärmenutzung führen können. Diese Randbedingungen wurden mit den Betreibern der Hüttenwerke am Beispiel der existierenden Anlagen näher betrachtet sowie mit einem großen Anlagenbauer diskutiert. Die betrachteten Hüttenwerke sind über Jahrzehnte gewachsene Anlagenparks. Weiterentwicklung der Prozesse, Kapazitätserweiterungen, Reinigungsanlagen und Komponenten zur Wärmerückfuhr und Wärmeauskopplung haben an vielen Anlagen zu einer räumlichen Verdichtung geführt. Bauvolumen für weitergehende Anlagen ist daher nur noch begrenzt vorhanden. In dieser Studie aufgezeigte Nutzungsmöglichkeiten wurden hinsichtlich der Nutzung an den Bestandsanlagen bewertet (brown field). Daraus wurde das zusätzlich betrieblich nutzbare Abwärmepotenzial von $0,322 \text{ GJ/t}_{\text{RS,fest}}$ ermittelt. Bei einer Rohstahlproduktion von 29,35 Millionen Tonnen festem Rohstahl (Bezugsjahr 2015) ergibt sich ein erschließbares Abwärmepotenzial von 9,45 PJ pro Jahr für die deutschen integrierten Hüttenwerke.

Bei Ersatz von Großanlagen oder Neuanlagen (green field) gleicher Technologie gelten geringere Einschränkungen. Legt man als harte Begrenzung die minimal mögliche Prozesstemperatur zugrunde, so ergibt sich mit den oben ermittelten $1,879 \text{ GJ/t}_{\text{RS,fest}}$ ein um den Faktor sechs höherer Wert, Abbildung 32. Es wird jedoch nicht erwartet, dass die deutschen Hütten in derartige Anlagen investieren.

Abbildung 32: Spezifische Abwärme an den betrachteten Hauptanlagen integrierter Hüttenwerke



Eigene Darstellung, Stahlinstitut VDEh

Zusammenfassend können $0,322 \text{ GJ/t}_{\text{RS,fest}}$ noch thermisch an den 13 betrachteten Abwärmequellen erschlossen werden. Dies entspricht ca. 9,45 PJ/a. Des Weiteren ist aufgeführt, dass bereits $0,308 \text{ GJ/t}_{\text{RS,fest}}$ (ca. 9,04 PJ/a) bereits an thermischer Abwärme von der Stahlindustrie weiteren Nutzungszwecken zugeführt wird bzw. bereits erschlossen ist.

Als Haupthemmnisse wurden bereits in Kapitel 5 die folgenden Punkte benannt:

- ▶ In den Werken existieren Bestandsanlagen mit begrenztem Raum für Installationen zusätzlicher Anlagentechnik zur Wärmeauskoppelung oder Rückgewinnung.
- ▶ Wechselnde politische Rahmenbedingungen erschweren eine Kalkulation der Wirtschaftlichkeit von Großanlagen.
- ▶ Das zeitliche Profil der Abwärme von Produktionsanlagen ist nicht deckungsgleich mit dem Bedarf möglicher externen Abnehmer.

7 Ausblick

Diese Studie beschreibt die Abwärmepotenziale und deren mögliche Nutzung im aktuellen Anlagenpark der integrierten Hüttenwerke der Stahlindustrie in Deutschland. Vor dem Hintergrund des Strukturwandels im Anlagenpark dieser Hüttenwerke, der Energiewende, der Ausgestaltung des CO₂-Emissionsrechtehandels, eventuellen regulatorischen Anforderungen seitens der Umweltpolitik und der weiteren äußeren Einflüsse stellt sich die Frage, inwieweit die ausgewiesenen Potenziale, auch im Zeithorizont bis 2030 und darüber hinaus, vorhanden sind.

Die integrierten Hüttenwerke in Deutschland verfolgen aktuell unterschiedliche Lösungsansätze zur Minderung der CO₂-Emissionen im Stahlherstellungsprozess. Dabei spielt die effiziente Abwärmennutzung zunächst eine untergeordnete Rolle, da diese nicht wesentlich zu einer Minderung der CO₂-Emissionen im Stahlherstellungsprozess in der vorgegebenen Größenordnung von mindestens 80 % im Stahlherstellungsprozess bis zum Jahr 2050 beiträgt.

Durch den erforderlichen Umbau der integrierten Hüttenwerke werden zum einen Anlagen weggelassen und zum anderen neue hinzukommen. Dadurch werden sich gegebenenfalls bei der Abwärme auf der Wärme-Erzeugerseite und auf der Wärme-Abnehmerseite drastische Änderungen ergeben. Diese Änderungen betreffen die Temperaturniveaus, die Verschiebung von kontinuierlichen und diskontinuierlichen Wärmeströmen sowie die Erzeugung von Nebenprodukten (wie z. B. Hochofenschlacke). Hinzu kommen Fragestellungen zur Elektrizitätsversorgung und der Dampfbereitstellung im Werk. Im Kern ist das gesamte Energiemanagement inkl. des Wärmemanagements der integrierten Hüttenwerke betroffen.

Durch die individuelle Ausgestaltung und Anordnung der Anlagenverbünde in den integrierten Hüttenwerken ist es daher schwierig und nur für den Einzelfall zu beurteilen, in wie weit sich der erforderliche Strukturwandel im Anlagenpark auf das Abwärmepotenzial auswirken wird. Derzeit werden in Deutschland zwei grundsätzliche Umbaupfade für die integrierten Hüttenwerke diskutiert::

- ▶ Ein Umbaupfad zur CO₂-Minderung bei der Stahlherstellung zielt auf einen erhöhten Einsatz von Wasserstoff als Reduktionsmittel in der Metallurgie. Der Wasserstoffeinsatz, sofern der Wasserstoff aus CO₂-freier Erzeugung stammt, könnte eine der künftigen Schlüsseltechnologien für eine kohlenstoffarme Stahlerzeugung werden. Eisenerze werden dann nicht im Hochofen, sondern in einer sogenannten Direktreduktionsanlage mit erheblichem Anteil von Wasserstoff reduziert. Das so erzeugte direktreduzierte Eisen wird im Elektrolichtbogenofen unter Verwendung von CO₂-freiem Strom in Rohstahl umgewandelt. Dies hätte zur Folge, dass die hier untersuchten Abwärmepotenziale und somit eine mögliche Abwärmennutzung aus dem Hochofenprozess an den jeweiligen Standorten entfallen würden. Gleichzeitig dürfte für die benötigten Neuanlagen nach aktuellem Stand der Technik bereits in der Planungsphase ein Nutzungskonzept für die nicht vermeidbare Abwärme entwickelt werden.
- ▶ Der andere Pfad setzt unter Beibehaltung des Hochofens und Konverterstahlwerks auf die Zusammenarbeit verschiedener Industriebetriebe in einem Netzwerk, z.B. für Branchen wie Stahl und Chemie. In einem solchen „crossindustrial network“ würden die Exportgase integrierter Hüttenwerke zusammen mit Wasserstoff aus regenerativer Erzeugung (und zu einem kleinen Teil auch aus eigener Erzeugung als Inhaltsstoff der jetzigen Hüttengase) für die Herstellung chemischer Produkte wie Methanol, Ethanol, künstlich hergestellte Kraftstoffe oder Harnstoff genutzt werden. Dies hätte zur Folge, dass die entstehenden Kuppelgase umgewandelt, statt wie bisher im Kraftwerk zur Strom- und Dampferzeugung genutzt werden. Gleichzeitig entstünden neue Wärmequellen und Wärmesenken auf dem Gelände der integrierten Hüttenwerke durch den Zubau der chemischen Anlagen. Das komplette Energiemanagement inkl. dem Wärmemanagement der integrierten Hüttenwerke müsste dementsprechend neu ausgestaltet werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich die Stahlindustrie im Umbruch befindet. Ob und inwieweit Abwärmepotenziale auch über 2030 hinaus zur Verfügung stehen oder ob ggf. weitere Potenziale entstehen, muss individuell von Standort zu Standort betrachtet werden.

Quellenverzeichnis

- Adler, W., Bender, W., Marion, M., Hirz, R.-P., & Eberwein, K. (2011). *CO₂ reduction by regenerative heat recovery in process gas fired reheating furnaces*. Düsseldorf: EECR Steel.
- AG, i. e. (kein Datum). Abgerufen am 07. 07 2017 von https://www.ifm.com/ifmch/web/apps-by-industry/cat_040_010_060_020.html
- Ausfelder, F., & u.a. (1-2 2015). Energiespeicherung als Element einer sicheren Energieversorgung. *Chemie Ingenieur Technik*, S. 17 - 89.
- Autorenkollektiv. (1998). *Energy Use in the Steel Industry*. Brüssel.
- Autorenkollektiv. (2014). *Energieeffizientes Duisburg*. Berlin: BMWi.
- Autorenkollektiv. (2015). *CO₂: Abtrennung, Speicherung, Nutzung*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Autorenkollektiv. (2015). *Stahlfibel*. Düsseldorf: Verlag Stahleisen GmbH.
- Autorenkollektiv. (kein Datum). <http://www.spektrum.de/lexikon/chemie/stahlerzeugung/8667>. Abgerufen am 18. 05 2017
- Autorenkollektiv. (kein Datum). <https://www.durag.com/de/industries-de/stahlindustrie-de/sinteranlage-de/>. Abgerufen am 27. 07 2017
- Bönisch, S., & Hauck, T. (2013). *Hochofen-Prozessgrößen, Wärmebilanz und C-DRR-Diagramm*. Düsseldorf: VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH.
- Buchner, P. (30. Juni 2017). Industrielle Abwärme in NRW. *Einbindung industrieller Abwärme aus Sicht eines Energieversorgers*. Düsseldorf.
- Bundesnetzagentur. (2016). *LEITFADEN ZUR EIGENVERSORGUNG*. Bonn: Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen.
- Dahlmann, P., Fandrich, R., & Lungen, H. (2012, 10). Steelmaking in Europe. *Stahl und Eisen*, pp. 29 - 38.
- Darstellung, e. (kein Datum).
- DEHSt, U. (2011). Spezielle Zuteilungsregeln für Anlagenübergreifende Wärmeströme. Zuteilung 2013-2020, Leitfaden: Teil 3a. Berlin.
- Fakten zur Stahlindustrie 2016. (kein Datum). (Wirtschaftsvereinigung Stahl) Von http://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2013/12/Fakten_Stahlindustrie_2016_V2.pdf abgerufen
- Grassmann, P. (1970). *Physikalische Grundlagen der Verfahrenstechnik*. Aarau und Frankfurt am Main: Verlag Sauerländer.
- Hensmann, M., Haardt, S., & Ebert, D. (2012). Emissionsfaktoren zur Eisen- und Stahlindustrie für die Emissionsberichterstattung. Dessau: Umweltbundesamt.
- Hirzel, S., Sontag, B., & Rohde, C. (2013). Industrielle Abwärmernutzung.
- <http://www.plonsker-server.de/frei/stahl/screens/htmlscopt/b6.html>. (kein Datum). Abgerufen am 03. 07 2017
- [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dust_bag_\(Staubsaack\)_-_several_constructions.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dust_bag_(Staubsaack)_-_several_constructions.png). (14. 10 2010). Abgerufen am 03. 07 2017
- https://www.ifm.com/ifmch/web/apps-by-industry/cat_040_010_060_020.html. (kein Datum). Abgerufen am 07. 07 2017
- Junge, U. (2013). <http://www.ing-büro-junge.de/html/fern-nahwaerme.html>. Abgerufen am 23. März 2018
- Juris. (2018). *Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG*. Abgerufen am 16. 07 2018 von Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz;: <http://www.gesetze-im-internet.de/bimSchG/BImSchG.pdf>
- Knoop, K. (8. November 2017). interne Quelle. Verwendung der Fließbilder im Bericht freigestellt.
- Lamberterie, B., & et.al. (2014). Steel production - energy efficiency working group. EUROFER.
- Limited, G. G. (kein Datum). Abgerufen am 03. 07 2017 von <http://www.globalgeothermal.com/ironsteelindustry.aspx>.
- Luengen, H., Peters, M., & Schmoele, P. (2011). *Iron Making in Western Europe*. Düsseldorf: METEC 2011.

- Lutsch, W. (8. März 2016). Aktuelle Wärmethemen der deutschen Energiepolitik.
- Marion, M., Baldermann, M., Domels, H.-P., Hensmann, M., Stranzinger, B., & Sprecher, M. (2015). Rationelle Nutzung der Kuppelgase im Energieverbund in integrierten Hüttenwerken. *Stahl und Eisen* 135/4, S. 79-83.
- Meinert, J. (2016). *Technologien der Abwärmenutzung*. Dresden: Sächsische Energieberatung SAENA.
- Paschotta, R. (21. 12 2014). https://www.energie-lexikon.info/kalina_kreisprozess.html. Abgerufen am 03. 07 2017
- Paschotta, R. (kein Datum). https://www.energie-lexikon.info/thermoelektrischer_generator.html. Abgerufen am 14. 07 2017
- Pehnt, M., Bödeker, J., Arens, M., Jochem, E., & Idrissova, F. (2010). Wissenschaftliche Begleitforschung zu übergreifenden technischen, ökologischen, ökonomischen und strategischen Aspekten des nationalen Teils der Klimaschutzinitiative. ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Fraunhofer Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, IREES GmbH. Heidelberg, Karlsruhe: Schlussbericht BMWi-Vorhaben FKZ 03KSW016A und B.
- Pfeifer, H. (2017). Energiebilanzen brennstoffbeheizter Industrieöfen. *Energieeffizienzseminar*. Mönchengladbach: Stahlakademie.
- Pöttken, H.-G., & Strohschein, H. (1982). Ausnutzung industrieller Abwärme am Beispiel eines integrierten Hüttenwerkes zur volkswirtschaftlichen Einsparung von Primärenergie und Entlastung der Umwelt, Teil 1 und 2. Bochum.
- (2015). pr EN 19694, Teil 1 und 2 - Emissionen aus stationären Quellen — Bestimmung von Treibhausgasen (GHG) aus energieintensiven Industrien. CEN.
- Priebe, K. (2008). Effizienz kleiner ORC-Anlagen. *energy 2.0*, S. 53-55.
- Reichert, J., & Eichhammer, W. (1994). *Dampf- und Heißwassererzeuger*. Karlsruhe: FKA Jülich.
- Reining, F. (2017). http://www.reining-heisskuehlung.de/fileadmin/user_upload/pdf/Prospekte_neu/Reining_DE_2017.pdf. Abgerufen am 23. März 2018
- Remus, R., Monsonet, M., Roudier, S., & Sancho, L. (2013). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel production*. Luxemburg: European Union.
- Rosemann, H. (1987). Theoretische und betriebliche Untersuchungen zum Brennstoffenergieverbrauch in Zementdrehofenanlagen mit Vorcalcinierung. Düsseldorf: Beton-Verlag GmbH.
- Schmidt-Pleschka, R., & Millers, U. (Dezember 2005). Grundlagen der Wärmespeicherung. *Wärme und Strom speichern*. FIZ Karlsruhe GmbH.
- Schürmann, E., Metzger, J., Ullrich, W., & Winterfeld, F. (Mai 1981). Einfluß der Schrottvorwärmung mit Erdgas und Sauerstoff im Konverter auf den Sauerstoffumsatz des LD-Verfahrens. *Archiv des Eisenhüttenwesens*, S. 173 - 179.
- Senk, D., & Babich, A. (2013). *Eisenmetallurgie, Eisenreduktion und Schachtöfen*. Düsseldorf: Verlag Stahleisen GmbH.
- SMS. (8. 11 2017).
- Specht, E. (2014). Wärme- und Stoffübertragung in der Thermoprozesstechnik. Essen: Vulkan-Verlag.
- Specht, E., & Jeschar, R. (1990). Seminar zu Methoden der Energieeinsparung bei Industrieöfen. *Beurteilung von Industrieöfen bei Wärmerückgewinnung*. TU Clausthal.
- Taube, K. (1998). *Stahlerzeugung kompakt*. Braunschweig, Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH.
- UBA. (2002). *Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft vom 24. Juli 2002*. Abgerufen am 16. 07 2018 von https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/dokumente/taluft_stand_200207241.pdf
- UBA. (2018). *Energieverbrauch nach Energieträgern, Sektoren und Anwendungen*. Abgerufen am 31. 10 2018 von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energietraegern-sektoren>
- UBA. (kein Datum). <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energietraegern-sektoren>. Abgerufen am 31. 10 2018
- von Gersum, S., Adler, W., & Bender, W. (1-2 2011). Energieeffiziente Ofenbeheizung - Regenerative Wärmerückgewinnung mit Flachflammenbrennern. *Gaswärme International*, S. 34 - 37.
- Wersch, M. (2010). Technologierecherche Abwärmenutzung.

Wirtschaftsvereinigung_Stahl (Hrsg.). (2017). *Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie* (Bde. ISBN: 978-3-514-00834-2). Düsseldorf: Verlag Stahleisen GmbH.

Witterstein, C. (2015). Thermische Energierückgewinnung in Stranggießanlagen und in Brammenanlagen. Osnabrück: Deutsche Bundesstiftung Umwelt.

(https://www.ifm.com/ifmch/web/apps-by-industry/cat_040_010_060_020.html). (kein Datum). Abgerufen am 07. 07 2017

Anhang 1: Stoffdaten

Unterer Heizwert, Mindestluftbedarf und Abgas von Brennstoffen

Bezeichnung	unt. Heizwert	L min		V min		Quellen
Brenngase	kJ/m³ i.N.	m³ i.N./m³ i.N.	m³ i.N./MJ	m³ i.N./m³ i.N.	m³ i.N./MJ	
Erdgas	35.900	9,487	0,267	10,429	0,293	prEN 19694-2, Annex C
Koksofengas	17.900	4,445	0,248	5,090	0,284	European average 2009 (AEA-Review) VDEh-Statistik
Hochofengas	3.470	0,662	0,195	1,517	0,447	
Konvertergas	8.950	1,708	0,191	2,335	0,261	
Kohlenmonoxid CO	12.623	2,406	0,190	2,881	0,228	Dubbel I, S.506
Feste Brennstoffe	kJ/kg	m³ i.N./kg	m³ i.N./MJ	m³ i.N./kg	m³ i.N./MJ	
Kohlenstoff, C	33.800	8,895	0,263	8,973	0,265	Skript Prof. Specht , L_{min} , V_{min} berechnet h_u : VDEh-Statistik, L_{min} , V_{min} : berechnet h_u : VDEh-Statistik, L_{min} , V_{min} : berechnet
Steinkohlenstaub	31.100	8,127	0,264	8,569	0,264	
Koks	30.100	7,798	0,259	7,925	0,263	

Spezifische Wärmekapazität von Einsatzstoffen und Produkten

Bezeichnung	Mittlere spez. Wärmekapazität		Temperatur	Quelle	Polynomkoeffizienten		$cp = a * \vartheta^3 + b * \vartheta^2 + c * \vartheta + d$			Gültigkeit im Temp.-Bereich	Bemerkungen
	Einheit	cp			a	b	c	d	Einheit		
Eisenerz	kJ/kg*K		15						kJ/kg*K		
Kalkstein CaCO ₃	kJ/kg*K	0,825	15	VDZ-Ofenversuche			6,00E-04	8,16E-01	kJ/kg*K	0 - 200 °C	
Kalk CaO	kJ/kg*K	0,816	200	VDZ-Ofenversuche			3,10E-04	7,54E-01	kJ/kg*K	0 - 200 °C	
Sinter	kJ/kg*K	0,651	15	Pöttken 1982		-1,00E-07	5,00E-04	6,44E-01	kJ/kg*K	0 - 1.500 °C	
Kühlwasser	kJ/kg*K	4,187	15	Dubbel I, S. 871				4,19E+00	kJ/kg*K	0 - 100 °C	
Luft	kJ/m ³ i.N.*K	1,301	15	Dubbel	-2,04E-11	6,31E-08	5,96E-05	1,30E+00	kJ/m ³ i.N.*K	0 - 1.500 °C	21% O ₂ , 79% N ₂
Hochofengas	kJ/m ³ i.N.*K	1,405	178	Dubbel	-4,50E-14	-2,86E-08	2,57E-04	1,36E+00	kJ/m ³ i.N.*K	0 - 500 °C	23% CO, 23% CO ₂ , 4,5 % H ₂ , 49,5% N ₂
Kohle, 25 % Fl.	kJ/kg*K	1,151	60	VDZ-Ofenversuche			1,60E-03	1,06E+00	kJ/kg*K	0-150 °C	
Koks	kJ/kg*K	0,719	50	Pöttken 1982		-4,00E-07	1,00E-03	6,70E-01	kJ/kg*K	0 - 200 °C	
Hochofenschlacke	kJ/kg*K	1,131	1.480	VDZ, Ehrenberg		-4,00E-08	3,00E-04	7,75E-01	kJ/kg*K	0- 1.500 °C	[Peters]: 1.680 kJ/kg Schlacke
Hüttensand	kJ/kg*K	0,779	50	VDZ-Ofenversuche			5,02E-04	7,54E-01	kJ/kg*K	0 - 300 °C	
Sauerstoff, O ₂	kJ/m ³ i.N.*K	1,311	50	Dubbel	-2,86E-12	-2,86E-08	1,43E-04	1,30E+00	kJ/m ³ i.N.*K	0 - 1.500 °C	
Konvertergas KG1	kJ/m ³ i.N.*K	1,577	1.500	Dubbel	-1,46E-11	2,80E-08	1,55E-04	1,33E+00	kJ/m ³ i.N.*K	0 - 500 °C	Austritt Konverter: 10% CO ₂ , 90% CO
Konverter-Abgas KG2	kJ/m ³ i.N.*K	1,700	900	Dubbel	1,24E-11	-8,64E-08	3,80E-04	1,42E+00	kJ/m ³ i.N.*K	0 - 1.000 °C	Austritt Dampfkessel: 35,9% CO ₂ , 4,5% CO, 59,6 % N ₂
Konvertergas KG3	kJ/m ³ i.N.*K	1,535	900	Dubbel	-8,14E-12	5,95E-10	2,09E-04	1,35E+00	kJ/m ³ i.N.*K	0 - 1.000 °C	Eintritt VDK: 16,2% CO ₂ , 69,4% CO, 14,4 % N ₂
Stahl, fest	kJ/kg*K	0,609	500	Pöttken 1982			1,00E-04	5,59E-01	kJ/kg*K	0 - 1.400 °C	
Abgas Erdgas, LF=1,05	kJ/m ³ i.N.*K	1,610	1.300	eigene Berechnung	-1,78E-11	5,45E-08	1,49E-04	1,36E+00	kJ/m ³ i.N.*K	0 - 1.000 °C	Abgasanteile: 9,3% CO ₂ , 17,7% H ₂ O, 72,1% N ₂ , 0,9 % O ₂
Abgas Hochofengas, LF=1,05	kJ/m ³ i.N.*K	1,655	900	eigene Berechnung	5,56E-12	-5,43E-08	3,24E-04	1,40E+00	kJ/m ³ i.N.*K	0 - 1.000 °C	Abgasanteile: 29,7% CO ₂ , 2,9% H ₂ O, 67,0% N ₂ , 0,4% O ₂
Abgas Koksofengas, LF=1,05	kJ/m ³ i.N.*K	1,529	900	eigene Berechnung	-1,98E-11	6,39E-08	1,40E-04	1,37E+00	kJ/m ³ i.N.*K	0 - 1.000 °C	Abgasanteile: 7,9% CO ₂ , 21,3% H ₂ O, 69,9% N ₂ , 0,9% O ₂
Abgas WWW-Ofen	kJ/m ³ i.N.*K	1,495	630	eigene Berechnung	-1,40E-11	3,67E-08	1,79E-04	1,37E+00	kJ/m ³ i.N.*K	0 - 1.000 °C	Abgas aus WWW-Ofen
Abgas Sinterband	kJ/m ³ i.N.*K	1,343	100	eigene Berechnung	-1,57E-11	4,27E-08	1,22E-04	1,33E+00	kJ/m ³ i.N.*K	0 - 250 °C	Abgas Sinterband: 7% CO ₂ , 4% H ₂ O, 77% N ₂ , 12% O ₂

Spezifische Enthalpie von Hüttenprodukten, Abgasen etc.

Bezeichnung	Spez. Enthalpie		Temperatur	Quelle	Polynomkoeffizienten		$h = +b * \vartheta^2 + c * \vartheta + d$			Gültigkeit im Temp.-Bereich	Bemerkungen
	Einheit	h			a	b	c	d	Einheit		
Roheisen, spez. Enthalpie	kJ/kg	1.290	1.450	Böhnisch			8,00E-01	1,30E+02	kJ/kg	1.400 - 1.500 °C	incl. Schmelz- und Mischungsenthalpie incl. Schmelzenthalpie Gudenau et al: Stahl u. Eisen 106 (1986) Nr. 23, S.57-62 Formel für Polynom s. Zelle D51
Rohstahl, spez. Enthalpie	kJ/kg	1.157	1.500	Böhnisch			7,56E-01	2,27E+01	kJ/kg	1.400 - 1.600 °C	
Stahlwerksschlacke	kJ/kg	2.200	1.650	Gudenau et al.				2,20E+03	kJ/kg	1.650	
H ₂ O Verdampfungsenthalpie	kJ/kg	2.465	15	Wikipedia		-3,62E+03	-5,16E+01	2,78E+03	kJ/g	0-200 °C	
Brüden bei 1 bar	kJ/kg	2.676	100	Dubbel I, S. 894				2,68E+03	kJ/kg	100 °C	
Sattdampf, 10 bar	kJ/kg	2.827	200	Dubbel I, S. 894				2,83E+03	kJ/kg	200 °C	
Überhitzter Dampf, 25 bar	kJ/kg	3.010	300	Dubbel I, S. 894				3,01E+03	kJ/kg	300 °C	

Spezifische Standard-Reaktionsenthalpien

Bezeichnung	Spez. Enthalpie h		Anlage	Quelle
	Einheit	h		
CaCO ₃ -Dissoziation	kJ/kg CaCO ₃	1.788	Sinteranlage	BFI-Bericht V 41.170
Reduktion von Fe ₂ O ₃ zu Fe	kJ/kg Fe	7.389	Hochofen	BFI-Bericht V 41.170
Reduktion von Si, Mn,...	kJ/kg Roheisen	215	Hochofen	BFI-Bericht V 41.171
Oxidation von Fe zu FeO	kJ/kg Fe	5.033	Stahlwerk	BFI-Bericht V 41.170