



Lehrstuhl für Energieverbundtechnik

Masterarbeit



Entwicklung der industriellen Abwärme in
ausgewählten Standorten

Christoph Singer, BSc

November 2024



EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, den Einsatz von generativen Methoden und Modellen der künstlichen Intelligenz vollständig und wahrheitsgetreu ausgewiesen habe, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich den Satzungsteil „Gute wissenschaftliche Praxis“ der Montanuniversität Leoben gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 06.11.2024

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Christoph Singer', written over a horizontal line.

Unterschrift Verfasser/in
Christoph Singer

KURZFASSUNG

Als Teil des von der österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) geförderten Projekt „Heat Highway“ werden, im Rahmen dieser Masterarbeit, neun spezielle Standorte aus vier verschiedenen Industriebranchen sowie einer Gasverdichterstation auf ihre zukünftig verfügbare Abwärme untersucht. Diese Standorte wurden als Teil der energieintensiven Industrie und aufgrund der Nähe zur geplanten Wärmeschiene „Heat Highway“ entlang der Mur/Mürz-Furche ausgewählt.

Ziel dieser Masterarbeit ist es eine Methodik zu entwickeln, mit welcher die Veränderung der verfügbaren Abwärme an den untersuchten Standorten bis zum Schlüsseljahr 2050 darstellbar ist.

Dazu wurden in einer umfangreichen Literaturstudie zu aktuellen Roadmaps der österreichischen sowie europäischen Branchenvertretungen geplante Strategien für die verpflichtende Dekarbonisierung der Industrie bis zum Jahr 2050 erarbeitet. Auf Basis der Erkenntnisse aus der Literaturstudie wurde anschließend anhand verschiedener Kennzahlen Methodiken erarbeitet, welche die Veränderung der vorhandenen Abwärme für die Zukunft darstellen können. Als effektivste Methode für die produzierende Industrie hat sich die Produktionsmenge bzw. für die untersuchte Gasverdichterstation die transportierte Menge an Erdgas als Kennzahl für die Abwärmemenge herausgestellt. Mit dieser Erkenntnis wurden im Anschluss Szenarien für die Veränderung der Produktionsmenge der einzelnen Standorte durchgeführt.

Als Basis für die Berechnung der konkreten Mengen an verfügbarer Abwärme in Form von Abwärmepotentialen der untersuchten Standorte, dienten die Ergebnisse des Ist-Stand aus dem umfangreichen Projekt „Industrial Excess Heat“. Durch die Verknüpfung der Ausgangsbasis mit den entwickelten Szenarien für die Energiemenge sowie der Berücksichtigung von bevorstehender Technologieänderungen und der allgemeinen Annahme eines Brennstoffwechsels auf Wasserstoff für das Jahr 2050, konnten konkrete Werte für die verfügbare Abwärme der Stützjahre 2030 und 2040 sowie des Schlüsseljahres 2050 berechnet werden. Die Ergebnisse werden nach Temperaturniveaus in $< 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50 - 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ sowie $> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ eingeteilt. Weiters erfolgt eine Kategorisierung nach eingesetzten Energieträgern.

Aus den Ergebnissen geht eine deutliche Veränderung des Abwärmepotentials der Eisen- und Stahlindustrie, sowie der Gasverdichterstation hervor. Das Potential der Eisen- und Stahlindustrie ist vor allem durch die bevorstehenden Veränderungen der Primärstahlherstellung der voestalpine Donawitz geprägt. Durch den Wegfall der Sinteranlage, der Hochöfen, des Stahlwerks sowie der thermischen Kraftwerke zur Verwertung der Kuppelgase sinkt das technische Abwärmepotential von etwa 1600 GWh/a im Jahr 2019 auf nur mehr etwa 326 GWh/a im Jahr 2050. Das Potential der Gasverdichterstation wird von dem bevorstehenden Rückgang der Erdgasverbrauchs in Europa definiert. Damit reduziert sich der Durchfluss durch die Verdichterstation und somit das anfallende technische Abwärmepotential von etwa 320 GWh/a des Basisjahres 2019 auf nunmehr 65 GWh/a im Jahr 2050. Das technische Potential der Papier- und Zellstoffindustrie wird durch die Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff als Energieträger beeinflusst und sinkt leicht von ursprünglich etwa. 3500 GWh/a auf ca. 3160 GWh/a. Das technische Potential der Zementindustrie ist durch die Reduktion des Klinkeranteils bis zum Jahr 2040 geprägt und sinkt von etwa 100 GWh/a auf ca. 70 GWh/a.

Abschließend wurden die berechneten technischen Potentiale auf die Randbedingungen des Heat Highway angepasst und mit den gesammelten Erkenntnissen zu einer Roadmap zusammengefasst. Dabei wurde für den Heat Highway der Einsatz von Wärmepumpen in der Nieder- und Mitteltemperatur mit einem niedrigen COP von ca. 2.5 berücksichtigt. Daraus ergibt sich, dass unter den gesetzten Randbedingungen, im Jahr 2050 etwa 7100 GWh an Abwärme aus der Industrie zur Verfügung stehen.

ABSTRACT

As part of the "Heat Highway" project, funded by the Austrian Research Promotion Agency (FFG), this master's thesis examines the future availability of waste heat at nine selected locations from four different industrial sectors, as well as a gas compression station. These locations were chosen due to their classification within energy-intensive industries and their proximity to the planned "Heat Highway" along the Mur-Mürz Valley.

The aim of this thesis is to develop a methodology for representing the changes in available waste heat at the investigated sites up to the key year 2050.

To achieve this, thorough literature research was conducted on current roadmaps from Austrian and European industry associations, outlining planned strategies for mandatory industrial decarbonization by 2050. Based on the insights gained from this review, methodologies were then developed using various indicators to represent future changes in available waste heat. For the manufacturing industry, production volume emerged as the most effective indicator for waste heat quantity, while for the gas compression station studied, the amount of transported natural gas proved to be the relevant metric. Building on this approach, scenarios were subsequently developed to project changes in production volumes at each location.

The current state results from the extensive "Industrial Excess Heat" project served as the basis for calculating the specific amounts of available waste heat in the form of potential waste heat at the investigated sites. By linking this initial data with the developed energy quantity scenarios and factoring in upcoming technological changes, as well as the general assumption of a fuel switch to hydrogen by 2050, concrete values for available waste heat were calculated for the target years 2030, 2040, and the key year 2050. Results are classified by temperature levels: below 50 °C, 50 – 100 °C, and above 100 °C, along with an additional categorization by energy sources used.

The results show a significant shift in the waste heat potential of the iron and steel industry, as well as for the gas compression station. The potential for the iron and steel industry is primarily influenced by upcoming changes in primary steel production at voestalpine Donawitz. With the discontinuation of the sinter plant, blast furnaces, steelworks, and the thermal power plants that process coke oven gases, the technical waste heat potential is projected to decrease from approximately 1600 GWh/a in 2019 to about 326 GWh/a by 2050.

For the gas compression station, the decline is driven by the expected reduction in natural gas consumption across Europe. This will lower throughput at the compressor station, reducing its technical waste heat potential from around 320 GWh/a in the base year 2019 to about 65 GWh/a in 2050.

In the pulp and paper industry, the switch from natural gas to hydrogen as an energy source will slightly decrease the technical potential, from approximately 3500 GWh/a to around 3160 GWh/a. Meanwhile, the technical potential of the cement industry is influenced by the planned reduction in clinker content by 2040, leading to a decrease from about 100 GWh/a to approximately 70 GWh/a.

Finally, the calculated technical potentials were adjusted to the boundary conditions of the Heat Highway and combined with the gathered insights into a roadmap. For the Heat Highway, the use of heat pumps, with a bad COP of about 2.5 in low- and medium-temperature applications was considered. Based on these boundary conditions, it is projected that by 2050, approximately 7,100 GWh of waste heat from industry will be available.

VORWORT

An dieser Stelle möchte ich alle jenen danken, die mich während des Studiums sowie besonders in der den letzten Monaten während des Verfassens dieser Masterarbeit unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer, Dipl.-Ing. Josef Steinegger, der mich in jeder erdenklichen Situation während des Verfassens dieser Arbeit umfassend unterstützt hat. Durch die zahlreichen fachlichen Diskussionen rund um das Thema dieser Arbeit sowie den beträchtlichen Zeitaufwand, den er in viele Meetings investierte, wurde die Fertigstellung dieser Diplomarbeit überhaupt erst möglich. Josef, ich danke dir herzlich für deine außergewöhnliche fachliche Kompetenz und vor allem für deine Geduld mit mir. Deinen Einsatz weiß ich außerordentlich zu schätzen, und ich möchte hier nochmals betonen, dass dein Engagement und der investierte Aufwand in der Betreuung weit über das übliche Maß hinausgingen – für mich war dies keineswegs selbstverständlich.

Ein großer Dank geht auch an den Leiter des Lehrstuhls für Energieverbundtechnik Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Thomas Kienberger sowie dem gesamten Team des EVT für die Möglichkeit im Rahmen dieser Diplomarbeit ein sehr spannendes und zukunftsträchtiges Thema zu bearbeiten, welches einen positiven Einfluss auf die Energieversorgung der Zukunft beitragen kann.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung.....	1
2	Aufgabenstellung.....	2
2.1	Vorgehensweise	2
3	Theoretischer Hintergrund und Stand der Technik	4
3.1	Überblick aktueller Roadmaps.....	4
3.1.1	Definition der Roadmap	4
3.1.2	Definition Szenario.....	5
3.2	Roadmap der Eisen- und Stahlindustrie.....	6
3.3	Roadmap der Papier- und Zellstoffindustrie	11
3.4	Roadmap der Zementindustrie	13
3.5	Roadmap der Magnesiaindustrie	15
3.6	Roadmap der Verdichterstation Weitendorf.....	17
3.7	Derzeit verfügbare Abwärme der untersuchten Standorte	18
3.8	Industrielle Abwärme und abwärmerelevante Prozesse	20
3.8.1	Sektor Stahl.....	22
3.8.2	Sektor Papier und Zellstoff	25
3.8.3	Sektor Zement	28
3.8.4	Sektor Magnesia.....	30
3.8.5	Gasverdichterstation Weitendorf.....	31
4	Methodik	33
4.1	Szenarienentwicklung	33
4.1.1	Szenarienentwicklung für die Eisen- und Stahlindustrie	34
4.1.2	Szenarienentwicklung Papier- und Zellstoffindustrie	37
4.1.3	Szenarienentwicklung Zementindustrie	37
4.1.4	Szenarienentwicklung Magnesiumindustrie	38
4.1.5	Szenarienentwicklung Gasverdichterstationen	39
4.2	Randbedingungen und Einflussfaktoren der Szenarien.....	41
4.3	Berechnungsmethodik der Abwärmepotentiale.....	42
4.3.1	Berechnungsmethoden industrieller Abwärmepotentiale	42
4.4	Weiterentwicklung der Abwärmepotentiale bis 2050	46
4.4.1	Vorgehensweise Eisen- und Stahlindustrie	48
4.4.2	Vorgehensweise Papier- und Zellstoffindustrie.....	50

4.4.3	Vorgehensweise Zementindustrie	51
4.4.4	Vorgehensweise Magnesiaindustrie	52
4.4.5	Vorgehensweise Verdichterstation	53
5	Ergebnisse der Abwärmepotentialentwicklung	55
5.1	Technisches Abwärmepotential aller untersuchten Standorte	55
5.2	Eisen- und Stahlindustrie	56
5.3	Papier- und Zellstoffindustrie	65
5.4	Zementindustrie	68
5.5	Magnesiaindustrie	69
5.6	Gasverdichterstation	70
5.7	Abwärmepotentialentwicklung nach Energieträger	71
6	Roadmap für den Heat-Highway	78
6.1	Roadmapping-Prozess	78
6.2	Abwärmepotential für Heat-Highway	79
6.3	Roadmap für den Heat Highway	81
7	Diskussion	83
8	Zusammenfassung und Ausblick	86
9	Literaturverzeichnis	88
10	Anhang	97
10.1	Einsatz von künstlicher Intelligenz	100

NOMENKLATUR

Abkürzungen

KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
EAF	Electric Arc Furnace (Elektrolichtbogenofen)
GVS	Gasverdichterstation
TAG	Trans-Austria-Gasleitung
CCUS	Carbon Capture and Storage
GuD-Kraftwerk	Gas und Dampf-Kraftwerk
AWN	Abwärmenutzung
EBS	Ersatzbrennstoff
BAT	Best Available Techniques (Beste verfügbare Technik)
CBAM	Carbon Border Adjustment Mechanism
COP	Coefficient of Performance

Indizes

MW_{th}	Megawatt thermisch
GWh	Gigawattstunden
λ	Luftzahl [-]
\dot{V}	Volumenstrom [m^3/h]
E_{Jahr}	Energiefluss pro Jahr [kWh]
BW_{EG}	Brennwert von Erdgas [kWh/m^3]
$\dot{Q}_{sensible}$	Sensibler Wärmestrom [MW]
$\dot{m}_{Abgas,ft.}$	Feuchter Abgasmassenstrom [kg/h]
$C_{p,Abgas}$	Wärmekapazität des Abgases [kJ/kgK]
$T_{Abg.}$	Temperatur des Abgases [$^{\circ}C$]
$T_{Ref.}$	Referenztemperatur [$^{\circ}C$]
\dot{Q}_{latent}	Latenter Wärmestrom [MW]
$\dot{m}_{Abgas,wasser}$	Massenstrom an Wasser im Abgas [kg/h]
$H_{Kondensation}$	Kondensationsenthalpie [kJ/kg]
$\dot{Q}_{Abwasser}$	Wärmestrom des Abwassers [MW]
$\dot{m}_{Abwasser}$	Massenstrom des Abwassers [kg/h]
$C_{p,Abgas}$	Wärmekapazität des Abwassers [kJ/kgK]
$T_{Abwasser}$	Temperatur des Abwassers [$^{\circ}C$]
L_{min}	Mindestluftbedarf [-]

Nomenklatur

O_{\min}	Mindestsauerstoffmenge [-]
L	Luftmenge
COP_{Carnot}	Carnot Coefficient of Performance
COP_{Real}	Realer Coefficient of Performance
η	Gütegrad [-]

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung: 3-1 Phasen des Roadmapping Prozesses [6]	5
Abbildung 3-2: CO ₂ -Emissionen und Stahlnachfrage bis 2050 (weltweit) [16]	7
Abbildung 3-3: Prognostizierte Menge an Stahlschrott bis 2050	8
Abbildung 3-4: Projektion der Stahlnachfrage bis 2050 in Europa[9]	9
Abbildung 3-5: Verfügbarkeit von Stahlschrott [9]	9
Abbildung 3-6: Technologiepfade der Stahlindustrie nach EUROFER [9]	10
Abbildung 3-7: Roadmap der voestalpine [18]	11
Abbildung 3-8: Papier und Kartonproduktion in Europa [21]	12
Abbildung 3-9: Zementherstellungsprozess mit Dekarbonisierungsmaßnahmen [25]	15
Abbildung 3-10: Transitflüsse durch Österreich 2020 [33]	17
Abbildung 3-11: Veränderung der Erdgasnachfrage in Europa bis 2050 [36]	18
Abbildung 3-12: Darstellung der verschiedenen Potentiale [60]	22
Abbildung 3-13: Darstellung der beiden Routen zur Rohstahlerzeugung [61]	22
Abbildung 3-14: Schematische Darstellung des Papierherstellungsprozesses [71]	26
Abbildung 3-15: Darstellung der prozessinternen Weiterverwendung der Abwärme im Trocknungsprozess [50]	27
Abbildung 3-16: Wärmebilanz Trockenpartie in der Papierindustrie [73]	28
Abbildung 3-17: Schematische Darstellung der Zementherstellung [75]	29
Abbildung 3-18: Nutzung der Wärmeverluste am Drehrohr [77]	30
Abbildung 3-19: Schema der Magnesiaproduktion in Breitenau [78]	31
Abbildung 3-20 Aufbau einer Gasverdichtungsstation [79]	32
Abbildung 4-1: Entwicklung der Rohstahlmenge VA Donawitz	35
Abbildung 4-2: Entwicklung der Sintermenge VA Donawitz	35
Abbildung 4-3: Produktionsmenge Marienhütte Graz	36
Abbildung 4-4: Produktionsmenge Böhler Edelstahl Kapfenberg	36
Abbildung 4-5: Änderung der Produktionsmenge in der Papierindustrie	37
Abbildung 4-6: Änderung der Klinkermenge Holcim Retznei (eigene Darstellung)	38
Abbildung 4-7: Trend des Magnesitabbaus in Österreich	38
Abbildung 4-8: Produktionsmenge Magnesia Breitenau	39
Abbildung 4-9: Physikalische Flüsse an den Ein- und Ausspeisepunkten der österreichischen Fernleitungen [86]	40
Abbildung 4-10: Durchflussmenge Erdgas über GVS Weitendorf	41
Abbildung 4-11: Einteilung der Methoden zur Bestimmung von Abwärmepotentialen [88]	42
Abbildung 4-12: Vorgehensweise zur Bestimmung von Abwärmepotential im INXS-Bericht [60]	44
Abbildung 4-13: Verfahren zur Bestimmung der Abwärmepotentiale [60]	45
Abbildung 4-14: Beispielhafte Bilanzgrenze der Papierindustrie (eigene Darstellung)	47
Abbildung 4-15: Modell der Sinteranlage [60]	49
Abbildung 4-16: Modell des EAF [66]	50
Abbildung 4-17: Modell eines Zellstoff- und Papierwerks (eigene Darstellung nach Vorlage von [72]) ...	51
Abbildung 4-18: Modellansatz für die Zementindustrie (eigene Darstellung nach Vorlage [60])	52
Abbildung 4-19: Modell Magnesiaherstellung (eigene Darstellung nach Vorlage [60])	52

Abbildung 4-20: Modell der GVS Weitendorf (eigene Darstellung in Anlehnung an die Vorlage der Gas Connect Austria sowie Murhammer) [79, 81]	53
Abbildung 5-1: technisches Abwärmepotential aller untersuchten Standorte	55
Abbildung 5-2: technisches Abwärmepotential der Eisen- und Stahlindustrie	56
Abbildung 5-3: technisches Abwärmepotential der voestalpine Donawitz	57
Abbildung 5-4: technisches Abwärmepotential VA Sinteranlage	58
Abbildung 5-5: technisches Abwärmepotential VA Hochofen	59
Abbildung 5-6: technisches Abwärmepotential VA Stahlwerk	60
Abbildung 5-7: technisches Abwärmepotential VA Elektrolichtbogenofen	61
Abbildung 5-8: technisches Potential Kraftwerkspark VA Donawitz	62
Abbildung 5-9: technisches Abwärmepotential Marienhütte Graz	63
Abbildung 5-10: technisches Abwärmepotential Böhler Kapfenberg	64
Abbildung 5-11: technisches Abwärmepotential für die Papier- und Zellstoffindustrie	65
Abbildung 5-12: technisches Abwärmepotential Sappi Gratkorn	66
Abbildung 5-13: technisches Abwärmepotential Zellstoff Pöls	67
Abbildung 5-14: technisches Abwärmepotential Norske Skog Bruck an der Mur	67
Abbildung 5-15: technisches Abwärmepotential Mayr-Melnhof Frohnleiten	68
Abbildung 5-16: technisches Abwärmepotential Holcim Retznei	69
Abbildung 5-17: technisches Abwärmepotential RHI-Magnesita Breitenau	70
Abbildung 5-18: technisches Abwärmepotential GVS Weitendorf	71
Abbildung 5-19: technisches Abwärmepotential nach Energieträgern	72
Abbildung 5-20: technisches Abwärmepotential nach Energieträger VA Donawitz	73
Abbildung 5-21: technisches Abwärmepotential nach ET Sekundärstahlindustrie	73
Abbildung 5-22: technisches Abwärmepotential nach Energieträgern Papier- und Zellstoffindustrie	74
Abbildung 5-23: technisches Abwärmepotential nach Energieträger Holcim Retznei	75
Abbildung 5-24: technisches Abwärmepotential nach Energieträger RHI-Magnesita Breitenau	76
Abbildung 5-25: technisches Abwärmepotential nach Energieträger GVS Weitendorf	77
Abbildung 6-1: technisches Abwärmepotential für Heat-Highway	81
Abbildung 6-2: Technologie-Roadmap für den Heat Highway	82

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 3-1: Abwärmequellen eines integrierten Hüttenwerks [63]	24
Tabelle 3-2: Abwärmequellen des Elektrolichtbogenofen [67, 68]	25
Tabelle 3-3: Abwärmequellen der Papierherstellung [59, 71, 74]	27
Tabelle 3-4: Abwärmequellen in der Zementindustrie [59, 77]	29
Tabelle 3-5 Abwärmequellen Magnesiaherstellung [30, 77]	31
Tabelle 3-6: Abwärmequellen Gasverdichterstation Weitendorf [56, 81]	32
Tabelle 4-1: Abminderungsfaktoren zur Bestimmung des technischen Potentials [60]	46
Tabelle 4-2: Zusammenfassung der betrachteten Abwärmepotential VA Donawitz	49
Tabelle 5-1: Vergleich Marienhütte Graz und Böhler Edelstahl Kapfenberg	64

1 EINLEITUNG

Um den Auswirkungen des bevorstehenden Klimawandels entgegenzuwirken, hat die Europäische Union bereits 2019 den europäischen Green Deal vorgestellt und seit Juni 2021 ist sein Inhalt, durch das in Kraft treten des europäischen Klimagesetzes, verpflichtend für alle Mitgliedsstaaten umzusetzen. [1]

Ziel des Green Deals ist die Klimaneutralität von Europa bis zum Jahr 2050, sowie das Zwischenziel im Jahr 2030 die Netto-Treibhausgasemissionen um 55 % bezogen auf das Jahr 1990 zu reduzieren. Unter Netto-Treibhausgasemissionen versteht man die Gesamtemissionen an Treibhausgasen abzüglich natürlicher (Wälder, Böden) und künstlich Emissionen (abgeschiedenes CO₂).

Teilpläne des Green Deals beinhalten unter anderem:

- **REPowerEU-Plan:** Der REPowerEU-Plan zielt auf die Reduzierung der Energieabhängigkeit der EU von Drittländern ab. Weitere Ziele sind die vollständige Unabhängigkeit von russischen Gasimporten bis 2027, die Beschleunigung der Energiewende und weitere Diversifizierung der Energieversorgung in der EU. [2]
- **Grüner Industriepan:** Der grüne Industriepan soll die europäische klimaneutrale Industrie wettbewerbsfähiger machen. Durch planungssichere und einfachere Regelungen, schnellerer Zugang zu Finanzmitteln, dem Ausbau von Kompetenzen sowie der Schaffung eines offenen und fairen Handels. [3]

Österreich als Mitgliedsland der EU muss, die im europäischen Green Deal vorgelegten Klimaziele bis zum Jahr 2030 bzw. 2050 erreichen. Die österreichische Bundesregierung geht dabei sogar noch einen Schritt weiter und setzt sich mit der vollkommenen Klimaneutralität bis 2040 ein noch ambitionierteres Ziel als die Europäische Union. [4]

Eine zentrale Herausforderung wird dabei die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung sein. Auf diesen Sektor fallen in Österreich immerhin etwa 50 % des Endenergieverbrauchs welcher zum aktuellen Zeitpunkt noch zu 2/3 aus fossilen Energieträgern gedeckt. Die Nutzung von Abwärme aus Industrieprozessen könnte dabei einen großen Beitrag zum Erreichen der Klimaziele leisten. Das vom FFG geförderte Projekt „Heat Highway“ beschäftigt sich mit der Fragestellung ob überregionale Wärmenetze versorgt mit industrieller Abwärme, sinnvoll sind. Durch die Nutzung von Abwärme aus der Industrie wird neben einer nachhaltigen Fernwärmeversorgung auch der Primärenergieeinsatz für die Wärmeversorgung gesenkt. [5]

Die betrachteten Unternehmen wurden aufgrund ihrer Energieintensität sowie der Nähe zum geplanten Heat Highway ausgewählt und umfassen Vertreter der Eisen- und Stahl, Papier- und Zellstoff, Magnesium sowie Zementindustrie. Weiters wird das Potential einer Gasverdichterstation entlang der Fernleitung TAG betrachtet.

In dieser Arbeit wird im Rahmen des Projekts „Heat Highway“ die Fragestellung behandelt, wie sich die Abwärme in der Industrie bis zum Jahr 2050 weiterentwickelt. In den erstellten Szenarien werden aktuellen Trends der Produktionssteigerung sowie Einschränkungen der europäischen Industrie durch die gesetzten Klimaziele und daraus resultierende bevorstehende Technologietransformationen sowie Brennstoffumstellungen berücksichtigt.

Die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse sollen im Rahmen des Projekt Heat Highway zur Steigerung der Nutzung von industrieller Abwärme beitragen und somit einen Beitrag zur Energieeffizienz und in weiterer Folge zu einer Reduktion des Primärenergieeinsatzes im Wärmesektor leisten.

2 AUFGABENSTELLUNG

Um die im Rahmen dieser Arbeit behandelte Forschungsfrage zu beantworten, werden folgende Punkte behandelt:

- Im Zuge einer umfassenden Literaturstudie soll der aktuelle Stand der Technik im Bereich der industriellen Abwärme erarbeitet werden. Dies umfasst eine Recherche über die derzeit verwendeten Prozesse der untersuchten Branchen mit besonderem Fokus auf der im Prozess anfallenden Abwärme.
- Im praktischen Teil soll nun eine geeignete Methode entwickelt werden, die es ermöglicht, anhand der angeeigneten Erkenntnisse aus der Literaturrecherche sowie auf Basis von bereits vorhandenen Arbeiten eine Aussage für die verfügbare Abwärme der ausgewählten Standorte bis 2050 zu treffen.
- Als Ergebnis sollen konkrete Werte der vorhandenen Abwärme für die jeweiligen Industriebetriebe, ausgehend vom Ist-Stand für die Stützjahre 2030 und 2040 bis hin zum Zieljahr 2050, berechnet werden. Die Abwärme ist dabei in die Temperaturbereiche über 100 °C, 50-100 °C und unter 50 °C einzuteilen.
- Abgeschlossen wird diese Arbeit durch die Darstellung der berechneten Abwärmepotentiale zusammen mit den wichtigsten Meilensteinen entlang eines Zeitstreifens in einer Roadmap.

2.1 Vorgehensweise

Diese Arbeit gliedert sich in drei Hauptteile. Der erste Teil umfasst mit dem aktuellen Stand der Technik die Grundlagen der Roadmap- und Szenarienbildung und zeigt einen Überblick der wichtigsten Ergebnisse aktueller Roadmaps aus der Industrie. Abgeschlossen wird der erste Hauptteil mit der aktuellen Nutzung von Abwärme in Industriebetrieben sowie der Beschreibung von Industrieprozessen bei denen Abwärme besonders relevant aufscheint. Der zweite Teil beschäftigt sich mit der Methodik hinter der Szenarienentwicklung sowie der Berechnungsgrundlage für die Bestimmung der Abwärmepotentiale für den Ist-Stand. Weiters wird die Methodik für die Weiterentwicklung der Abwärmepotentiale erläutert und tiefer auf die Vorgehensweise für jede Branche eingegangen. Im dritten und letzten Teil folgen die Darstellung und Beschreibung der Resultate dieser Arbeit.

Die Vorgehensweise, zur Beantwortung der Fragestellung, lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Literaturrecherche zu vorhandenen Roadmaps, Szenarien und der wirtschaftlichen Lage der untersuchten Branchen in Europa und Österreich.
- Durchführen von Expertengesprächen mit Vertretern der Industrie, um Meinungen zur Unterstützung getroffener Annahmen zu erlangen.
- Recherche über die aktuell verfügbare Abwärme und den zur Nutzung verwendeten Technologien sowie zu den Prozessen, welche in der untersuchten Industrie besonders relevant für Abwärme sind.
- Entwicklung von verschiedenen Methoden zur Beschreibung der Abwärmemengen der produzierenden Industrie sowie der Abwärmemenge an Gasverdichterstationen.

- Auswahl der passenden Methode und Erstellen von Szenarien für die jeweiligen Branchen.
- Kombination der Szenarien mit den Abwärmepotentialen des Ist-Stand
- Berechnung der Potentiale für die Zukunft unter Berücksichtigung von Technologieänderungen.
- Darstellung und Beschreibung der Ergebnisse nach Temperaturniveaus sowie eingesetzten Energieträgern.
- Anpassung des Referenzzustandes und zusammenfassen der Ergebnisse dieser Arbeit auf eine für den Heat Highway relevante Roadmap.

3 THEORETISCHER HINTERGRUND UND STAND DER TECHNIK

In diesem Kapitel werden der theoretische Hintergrund der Szenarien- und Roadmapbildung sowie ein Überblick der aktuellen Roadmaps von internationalen sowie nationalen Industrieverbänden gegeben. Abgeschlossen wird das Kapitel mit einer Einführung in den Themenbereich der industriellen Abwärme ergänzt durch eine Beschreibung der wichtigsten Prozesse in den jeweiligen Industriezweigen, welche für die Nutzung von Abwärme von Bedeutung sind.

3.1 Überblick aktueller Roadmaps

Dieses Unterkapitel fasst den aktuellen Stand verfügbarer Roadmaps der einzelnen Branchen zusammen. Die nachfolgenden Roadmaps zusammen mit den Referenzdaten der Ausgangssituation liefern die Datengrundlage für die im folgenden Kapitel beschriebene Methodik hinter der Szenarienbildung.

3.1.1 Definition der Roadmap

Die Internationale Energie Agentur (IEA) beschreibt in „*Energy Technology Roadmaps – a guide to development and implementation*“ [6] die Vorgehensweise zur Erstellung einer Roadmap für die Industrie. Laut dieses Leitfadens wird eine Roadmap als ein strategischer Plan, welcher die notwendigen Schritte beschreibt, die eine Organisation nehmen muss, um die festgelegten Ziele zu erreichen definiert. Weiters beinhaltet eine Roadmap gewisse Kennzahlen und Meilensteine, mit denen Zwischenziele, sowohl als auch der Fortschritt gemessen werden können. Der Prozess des Erstellens einer Roadmap wird als Roadmapping bezeichnet. Hierbei werden die Ziele meist in Workshops mit Vertretern aus der Industrie, politischen Entscheidungsträgern sowie Mitarbeitern von Forschungseinrichtungen und Universitäten erarbeitet. [6]

In Abbildung: 3-1 ist die Vorgehensweise des Roadmapping-Prozesses nach dem Schema der IEA dargestellt. Dabei ist erkennbar, dass der Prozess in vier wesentliche Phasen sowie zwei Aktivitätstypen unterteilt ist, welche sich hinsichtlich der Datengrundlage unterscheiden. Auf der einen Seite werden Daten und Analysen herangezogen und auf der anderen Seite die Meinung von Experten.

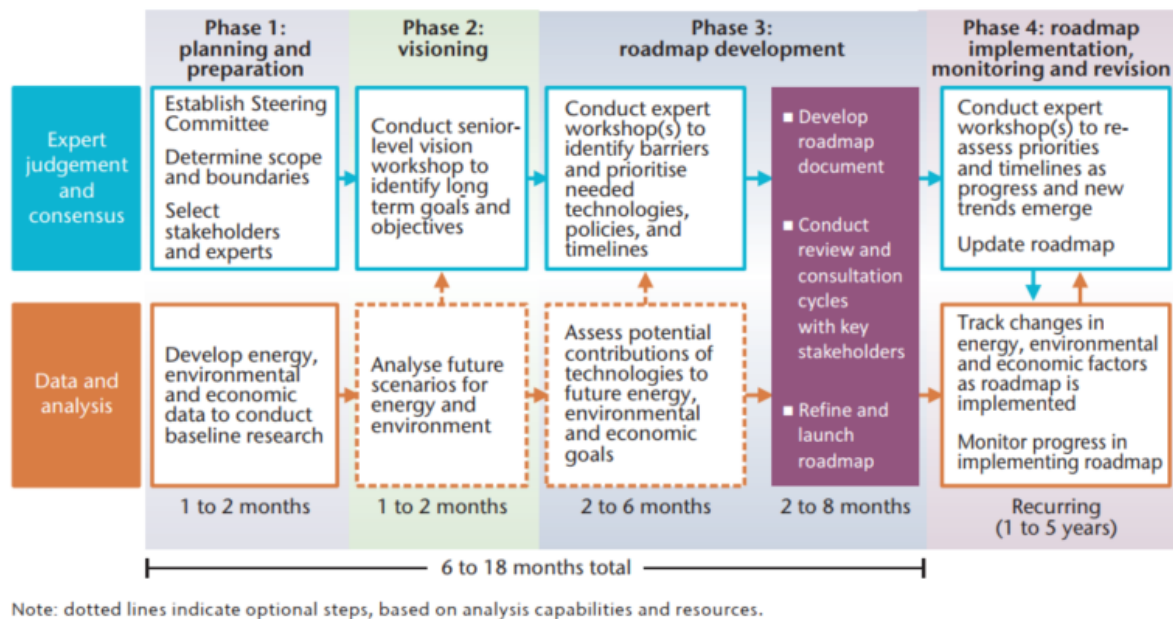


Abbildung: 3-1 Phasen des Roadmapping Prozesses [6]

Die Phasen des Roadmapping-Prozesses können wie folgt zusammengefasst werden: [6]

- Die **erste Phase** (Planung und Vorbereitung) umfasst zu einem das Aufstellen eines Expertenteams sowie die Definition der grundlegenden Ziele und Grenzen der Roadmap. Zudem muss die Datengrundlage, auf welcher die Ergebnisse der Roadmap basieren, erfasst werden.
- In der **zweiten Phase** (Zukunftsplanung) werden von dem Experten-Committee Workshops abgehalten, in welchen die langfristigen Ziele erarbeitet werden. Die Datengrundlage dafür ist die Analyse von Zukunftsszenarien.
- Die **dritte Phase** ist die Entwicklung der Roadmap. Basierend auf den Szenarien und Expertenworkshops werden die Aktivitäten und der Zeithorizont erstellt. Dabei sollen Zukunftstrends wie Technologiewandel und politische Ziele mitberücksichtigt werden.
- Die **vierte und letzte Phase** ist die Implementation der Roadmap sowie das nachfolgende Monitoring.

Im Verlauf des Zeithorizonts werden regelmäßig Workshops veranstaltet sowie die Ziele der Roadmap mit den realen Errungenschaften verglichen und angepasst.

3.1.2 Definition Szenario

Die Szenario-Methode wurden erstmals von der Ölbranche angewandt, nachdem die vorhandenen Prognosemethoden den rapiden Anstieg des Ölpreises in den 1970er nicht vorhersagen konnten. Durch das Verwenden von Szenarien wurde damit ein weiteres strategisches Planungstool eingeführt, welches die Komplexität und Unvorhersehbarkeit der wirtschaftlichen, sozialen und politischen Umfeld einer Organisation berücksichtigen konnte. [7]

Allgemein stellt ein Szenario ein Werkzeug zur strategischen Planung dar, welches die potenziell eintreffenden Ergebnisse auf Basis von Fakten, Trends und Annahmen unter der Berücksichtigung einer gewissen Unsicherheit darstellt. Ein Szenario ist demnach keine Vorhersage für die Zukunft, sondern stellt nur eine Abfolge von Ereignissen dar, die einen Ausblick geben, wie die Zukunft aussehen könnte. [7, 8]

Die EU hat mit ihrem Klimagesetz die verpflichtende Dekarbonisierung der Industrie eingeleitet. Aus diesem Grund basieren die in weiterer Folge vorgestellten Roadmaps weitestgehend auf den Szenarien zur Dekarbonisierung der Industrie.

Roadmaps der Industrie

Aufgrund der Bestrebung der Europäischen Union bis zum Jahr 2050 die Klimaneutralität zu erreichen, befassen sich die aktuellen Roadmaps der Industrie mit Maßnahmen und Umsetzungen der derzeitigen Produktionsprozesse zur Einhaltung dieses Ziels bei gleichbleibender Wettbewerbsfähigkeit europäischer Produkte am Weltmarkt. Die im weiteren Verlauf vorgestellten Roadmaps [9–12] können in drei Teilbereiche gegliedert werden.

Nachfrage:

Hier wird die Nachfrage der Produkte bzw. prognostizierte Produktionsmenge für die Zukunft behandelt. In den meisten Branchen geht man nur von einem sehr schwachen Zuwachs bzw. einer Stagnation der Produktionsmengen bis zum Jahr 2050 aus.

Technologie Roadmap:

Um die Klimaziele zu erreichen, müssen viele Betriebe neue Technologien verwenden. Neben Effizienzmaßnahmen sind eine Umstellung auf klimaneutrale Brennstoffe und die Elektrifizierung von Prozessen essenziell. Weiters werden Branchen, bei denen prozessbedingtes Kohlendioxid anfällt, den Einsatz von Technologien zur CO₂-Abscheidung nicht verhindern können.

Politische Rahmenbedingungen:

Ohne geeignete politische Rahmenbedingungen wird die Industrie in der EU bis zum Jahr 2050 nicht fortbestehen. Es müssen Rahmenbedingungen geschaffen werden, die es der Industrie ermöglicht, trotz der erhöhten Produktionskosten durch die strengeren Klimaauflagen gegenüber Drittländern, weiterhin am Weltmarkt wettbewerbsfähig zu bleiben.

3.2 Roadmap der Eisen- und Stahlindustrie

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der drei wichtigsten vorhandenen Roadmaps zusammengefasst. Die internationale Energieagentur (IEA) bietet mit ihrem Bericht *„Iron and Steel Technology Roadmap“* [13] den Überblick der aktuellen und zukünftigen weltweiten Eisen- und Stahlindustrie. Die Vereinigung der Europäischen Eisen- und Stahlindustrie (EUROFER) befasst sich sowohl in *„A Steel Roadmap For Low Carbon Europe 2050“* [9] wie auch in *„Low Carbon Roadmap – Pathways To A CO₂-Neutral European Steel Industry“* [14] mit der Transformation der europäischen Stahlindustrie bis 2050 und den Szenarien wie die Klimaziele der Europäischen Union bis 2030 bzw. die Klimaneutralität bis 2050 erreicht werden kann. Weiters hat die Voest Alpine genaue Ziele für die Herstellung von klimaneutralen Stahl bis 2050 für die Standorte Linz und Donawitz in einer eigenen Roadmap unter dem Projektnamen *„CO₂UNTDOWN To ZERO“* [15] zusammengefasst.

Kurzer Überblick über die weltweite Stahlproduktion

Aus dem Bericht der IEA geht hervor, dass Stahl essenziell für unser modernes Energiesystem ist, ohne dem Einsatz von Stahl in Erneuerbaren Energien wie Windkraftwerken sowie Elektrofahrzeuge wird die Energiewende nicht möglich sein. Seit 1970 hat sich die Nachfrage von Stahl mehr als verdreifacht. Dabei

gilt die Stahlnachfrage durch die damit verbundene Urbanisierung, Güterkonsum und Ausbau von Infrastruktur als Indikator für Wirtschaftswachstum. [13]

Die Kehrseite dieses Wachstum ist, der mit der Stahlindustrie einhergehende CO₂-Ausstoß. Durch den Einsatz von Koks als Reduktionsmittel und Energieträger in der Roheisenherstellung, ist die Branche für 7 % des weltweiten CO₂-Ausstoßes verantwortlich. Die globale Stahlnachfrage wird noch bis 2050 um mehr als ein Drittel ansteigen. Trotz eines höheren Anteils an der weniger energieintensiven Sekundärroute werden die prognostizierten CO₂-Emissionen weiterhin steigen und in etwa 7 % höher als im Vergleich zu heute sein. Laut Prognose der IEA soll Indien bis zum Jahr 2050 mehr als 20 % des weltweiten Stahls herstellen und somit China überholen. Zu jetzigen Zeitpunkt steht Indien mit 5 % noch auf dem zweiten Platz hinter China. [13]

Die Ergebnisse der IEA-Roadmap wurden von der Worldsteel-Association [16] aufgearbeitet und zusammengefasst. Daraus geht hervor, dass die Dekarbonisierung der Branche auf drei Pfeilern fußt. In Abbildung 3-2 ist die Stahlnachfrage sowie die drei Maßnahmenpakete dargestellt. Diese Maßnahmenpakete dienen als guter Anhaltswert für die Erstellung der Roadmaps dieser Branche und werden in weiter Folge kurz erläutert.

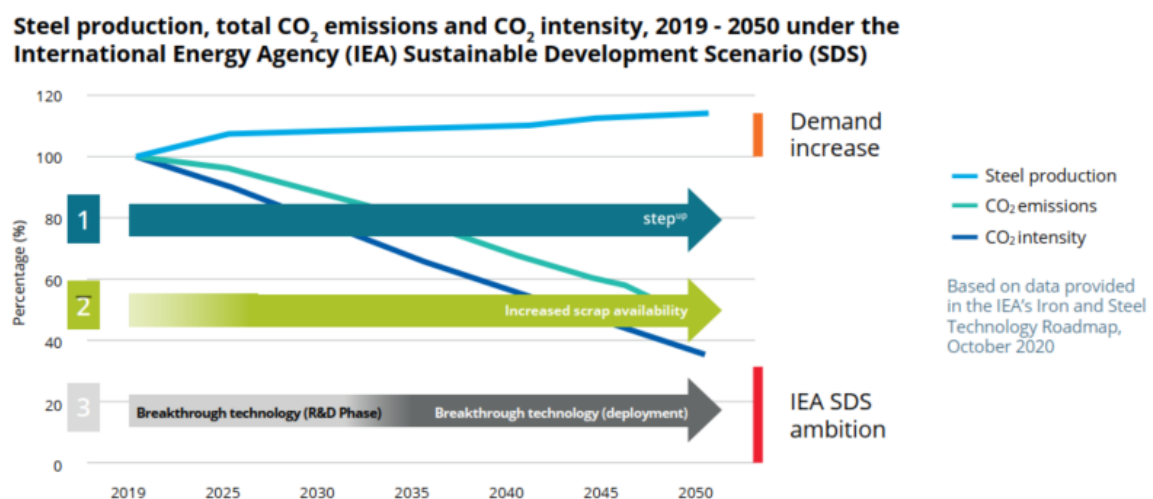


Abbildung 3-2: CO₂-Emissionen und Stahlnachfrage bis 2050 (weltweit) [16]

Die erste Maßnahme wird als Step-Up bezeichnet und umfasst Effizienzsteigerungen während der Übergangszeit zu den Breakthrough-Technologien (BTT). Dadurch soll für die Primärroute eine Emissionsreduktion von bis zu 20 % und für die Sekundärroute mit Stahlschrott bis zu 50 % möglich sein. [13] In einem nächsten Schritt gilt es die Recyclingquote zu Maximieren. Durch den Einsatz von Stahlschrott anstatt des Eisenerzes können bis zu 1.5 Tonnen CO₂ pro Tonne Schrott eingespart werden. Die Verfügbarkeit von Stahlschrott ist von der Lebensdauer von Stahlprodukten abhängig. Durch die enorme Produktionssteigerung in China anfangs der 2000er Jahre, wird für das nächste Jahrzehnt wieder ein Zuwachs an Stahlschrott prognostiziert. Die Prognostizierte Menge an Stahlschrott ist in Abbildung 3-3 dargestellt. [13]

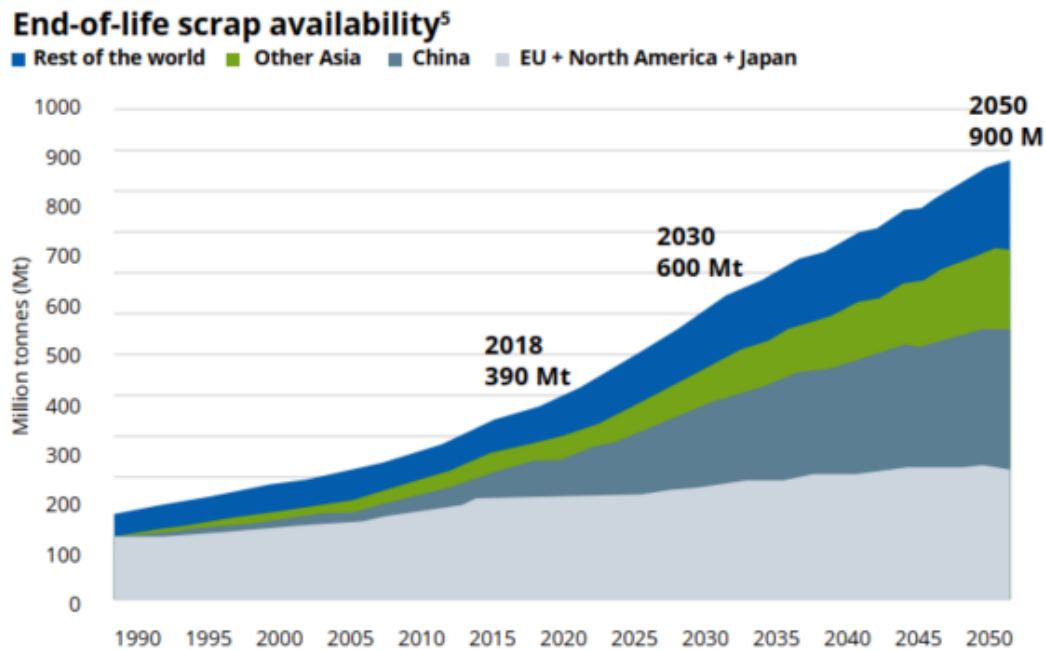


Abbildung 3-3: Prognostizierte Menge an Stahlschrott bis 2050

Die heutigen Hochöfen arbeiten schon beinahe an ihrem technischen Optimum. Für den Übergang zu einer dekarbonisierten Stahlindustrie werden daher ganzheitlich neue Technologien, sogenannte Breakthrough-Technologien, benötigt. Im Vordergrund stehen dabei zum jetzigen Stand der Technik folgende Technologien: Carbon Capture and Storage (CCUS), Wasserstoff als Reduktionsmittel und die direkte Elektrolyse des Eisenerzes. Wichtig ist, dass es dabei in der Übergangszeit nicht eine einzige richtige Technologie geben wird, sondern vielmehr eine Kombination unterschiedlicher Technologien je nach regionalen Bedingungen wie dem Zugang zu Ressourcen und lokalen politischen Richtlinien abhängt. So kann in Regionen mit ausreichend Zugang zu klimaneutralem Wasserstoff die Direktreduktion eingesetzt werden. Wohingegen in Regionen mit ausreichenden Kapazitäten für CCUS sowie den erforderlichen rechtlichen Bedingungen dieses Verfahrens, weiterhin fossile Reduktionsmittel eingesetzt werden könnten. Da in der Übergangszeit sowohl CO₂-armer als auch konventionell erzeugter Stahl gleichzeitig am Markt zur Verfügung stehen wird, müssen Regierungen und Stakeholder mit der Stahlindustrie zusammenarbeiten, um einen fairen Wettbewerb am Markt zu gewährleisten als auch aktiv einen Markt für CO₂-armen Stahl zu schaffen. [16]

Die Stahlindustrie in Europa

Die europäische Stahlindustrie gilt als fortschrittlichste der Welt. Der Interessensverband der europäischen Stahlindustrie (EUROFER) hat ebenfalls eine Roadmap für die Stahlproduktion in Europa erstellt. Im Hauptfokus steht dabei die Dekarbonisierung sowie die Wettbewerbsfähigkeit von Europäischem Stahl am Weltmarkt.

Stahlnachfrage:

Ausgehend von aktuellen Nachfragen der drei Schlüsselindustrien (Bauwesen, Automobil und Maschinenbau) und aktuellen Produktionsmengen, sowie Trends aus der Vergangenheit wird eine durchschnittliche jährliche Steigerung der Stahlproduktion in Europa von ca. 0.5 % prognostiziert. Eine genaue Aufschlüsselung der Vorgehensweise für die Prognose der EUROFER ist in Abbildung 3-4 zu sehen. [9]

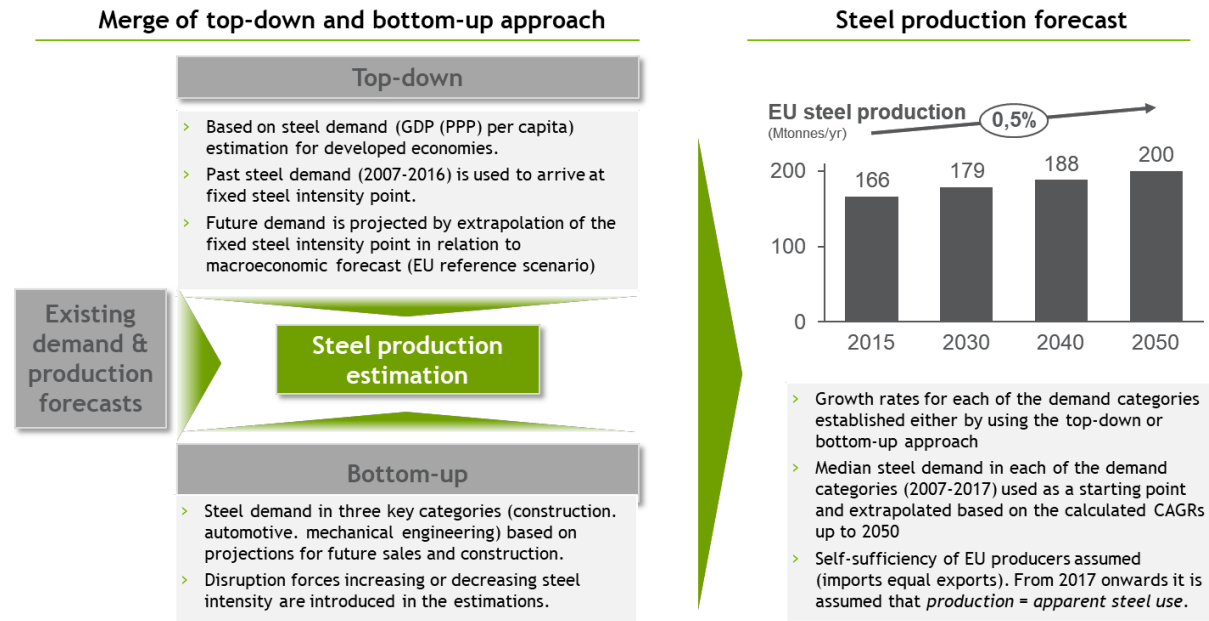


Abbildung 3-4: Projektion der Stahlnachfrage bis 2050 in Europa[9]

Die produzierte Menge an Stahl über die Primärroute wird dabei leicht zurückgehen und jene der Sekundärroute über Schrotteinsatz und EAF leicht steigen. Aktuell werden in Europa 40 % des Rohstahls über die EAF-Route produziert. Dieser Anteil soll bis zum Jahr 2050 auf 44 % steigen, was einer jährlichen Steigung von 0.13 % entspricht. Der Produktionszuwachs der Sekundärherstellung ist dabei ebenfalls abhängig von zukünftigen vorhandenen Schrottmengen. Diese wird von der EUROFER auf einen durchschnittlichen jährlichen Zuwachs von 1.1 % geschätzt. [9] Die zukünftige Verfügbarkeit sowie eine Einteilung in welchen Bereichen Schrott anfällt, ist in Abbildung 3-5 dargestellt.

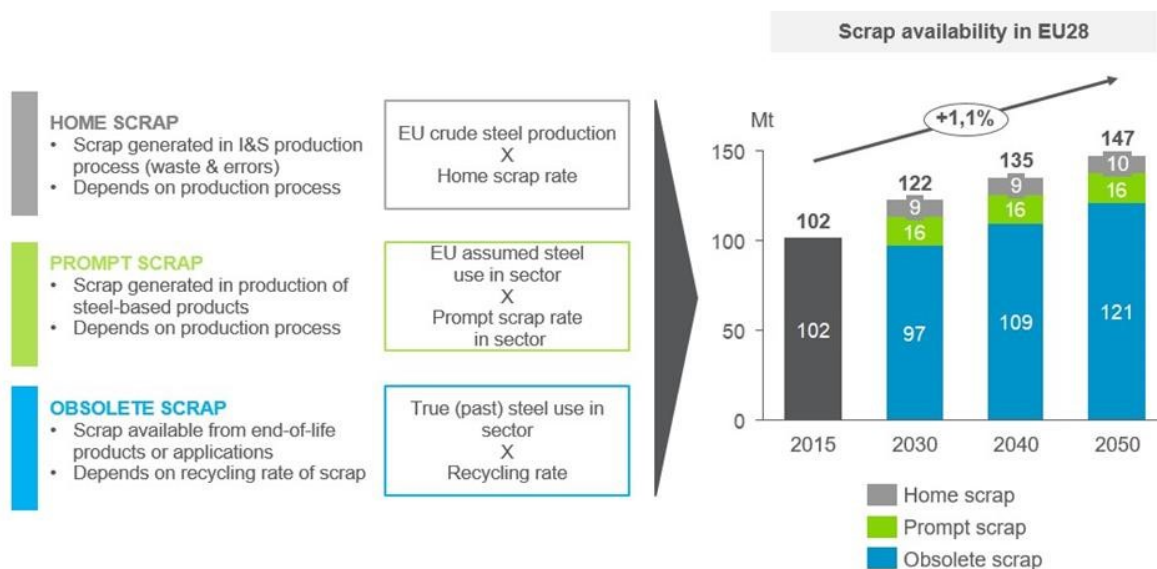


Abbildung 3-5: Verfügbarkeit von Stahlschrott [9]

Technologie Roadmap:

Um die Dekarbonisierung der Eisen- und Stahlindustrie zu erzielen können prinzipiell zwei verschiedene Routen eingeschlagen werden. Dabei wird grob in die Weiterverwendung des anfallenden Kohlenstoffs (**Smart Carbon Usage**) und in die Vermeidung des Kohlenstoffs (**Carbon Direct Avoidance**) eingeteilt. Eine detaillierte Aufstellung der verschiedenen Technologien ist in Abbildung 3-6 zu sehen. Den zwei Kategorien übergeordnet ist die allgemeine Reduktion des eingesetzten Kohlenstoffs durch eine verbesserte Kreislaufwirtschaft von Stahl. [9]

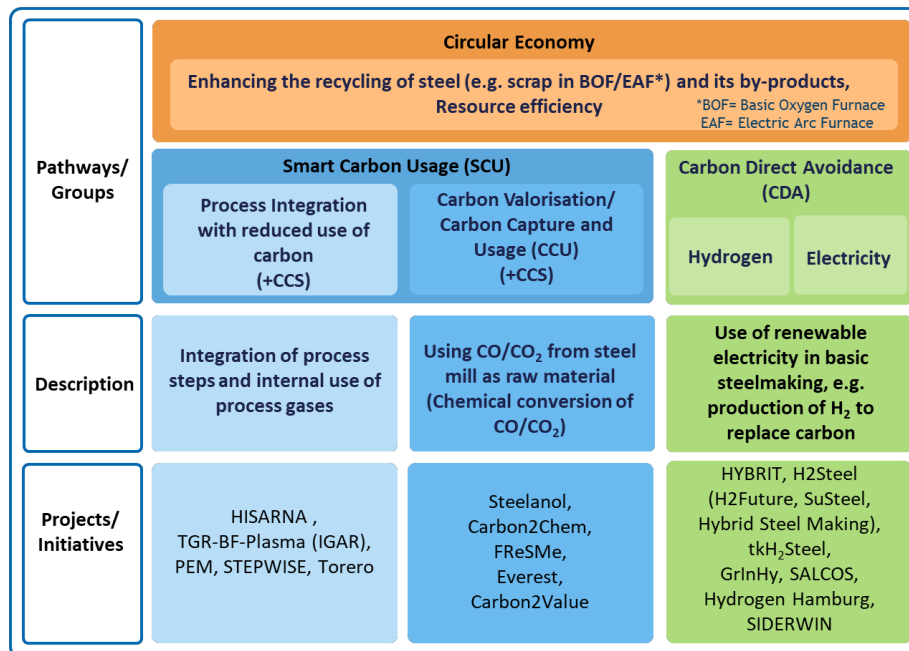


Abbildung 3-6: Technologiepfade der Stahlindustrie nach EUROFER [9]

Jener Technologiepfad, welcher die Vermeidung von Emissionen aus Kohlenstoff anstrebt, beruht auf einer wasserstoff- bzw. strombasierten Herstellung von Stahl. Hierbei wird der Kohlestoff aus dem Koks durch Wasserstoff oder Strom als Reduktionsmittel ersetzt und somit der Ausstoß von Kohlendioxid verhindert. Die Transformation der europäischen Eisen- und Stahlindustrie wird nicht nur auf einer der Schlüsseltechnologien basieren. Vielmehr wird es je nach lokalen Gegebenheiten und Gesetzen für Carbon Capture und Storage (CCS) sowie dem Zugang zu ausreichend günstigen erneuerbaren Energien wie Wasserstoff und Strom eher zur Verwendung des anfallenden CO₂ oder zur Vermeidung von kohlestoffbasierten Energieträgern kommen. [9, 16]

Politische Rahmenbedingungen:

Es müssen die richtigen legislativen Rahmenbedingungen festgelegt werden, die es der Industrie ermöglicht die Stahlherstellung in Europa weiterhin wettbewerbsfähig zu halten. Daher werden vor allem bezahlbare Energie und die dafür benötigte Infrastruktur von der Industrie gefordert. Weiters muss ein Regelwerk aufgestellt werden, welches der Industrie ermöglicht den teureren europäischen Produkten im Vergleich zu Produkten aus Ländern mit weitaus weniger strengen Klimaauflagen weiterhin wettbewerbsfähig zu halten. [16]

Österreichisch Stahlindustrie:

Als einziger Primärstahlhersteller in Österreich hat die voestalpine, ihre in Abbildung 3-7 dargestellte eigene Roadmap für die Dekarbonisierung der Rohstahlherstellung in Österreich entwickelt. An den Standorten Linz und Donawitz werden demnach im Jahr 2050 nur noch klimaneutraler Stahl unter dem Markennamen „Greentec Steel“ produziert. [17]



Abbildung 3-7: Roadmap der voestalpine [18]

Den ersten Schritt macht die Substitution von jeweils einen Hochofen durch einen Elektrolichtbogenofen (EAF) an den beiden Standorten. Diese produzieren ab 2027 gemeinsam ca. 2.5 Millionen Tonnen CO₂-reduzierten Stahl. Eingesetzt wird dabei Hot Briquetted Iron (HBI), auch als Eisenschwamm bekannt, aus der vor Kurzen an ArchelorMittel (internationaler Stahlkonzern) verkauften Anlage in Texas. Die Zulieferung soll dabei für die nächsten Jahre gesichert sein. Weiters wird Roheisen aus den verbleibenden Hochofen sowie Schrott im EAF zugesetzt. [19]

Ab 2030 werden dann erneut jeweils ein Hochofen in Linz und Donawitz durch einen weiteren EAF abgelöst. Damit steht ab 2030 noch ein Hochofen in Linz und keiner mehr in Donawitz. Bis 2050 soll die gesamte Primärstahlproduktion in Österreich dekarbonisiert sein. [17]

3.3 Roadmap der Papier- und Zellstoffindustrie

Die Papier- und Zellstoffindustrie gehört prozessbedingt zu einer der energie- und rohstoffintensivsten Industrien der Welt.

In der vorhandenen Roadmap „*Investing in Europe for a Industry Transformation – 2050 Roadmap to a low-carbon bioeconomy*“ [10] der Vereinigung der europäischen Papierindustrie (CEPI) werden die benötigten Maßnahmen für die Transformation zu einer klimaneutralen Papierindustrie dargestellt. Die Studie „*Klimastudie Papierindustrie – Transformation zur Klimaneutralität*“ [20] von DiePapierindustrie zeigt einen genaueren Einblick in die deutsche Papierindustrie und mit welchen Technologien die Transformation gelingen kann.

Nachfrage:

Gerade in der Papierbranche wirken sich gesellschaftliche Trends und Transformationen wie die zunehmende Digitalisierung sowie der demographische Wandel aber auch die aktuelle Energie- und Klimapolitik der Europäischen Union stark auf die Branche aus. Die Papierindustrie steht vor einem Wandel ihrer Produktsegmente. Der lange Trend des abnehmenden Anteils an Printmedien wird durch einen zunehmenden Anteil an Verpackungsmaterialien und Hygienepapiere ausgeglichen und führt zu einem stagnierenden europäischen Markt. Weiters werden laut CEPI neue strategische Segmente im Bereich der Spezialpapiere immer wichtiger. [10]

Die historischen Produktionsdaten steigen bis 2008 und stagnieren anschließend. Der gleiche Trend wird auch beim Verbrauch beobachtet. Die Produktionsmengen von Karton und Papier in Europa seit 1991 sind in Abbildung 3-8 dargestellt.

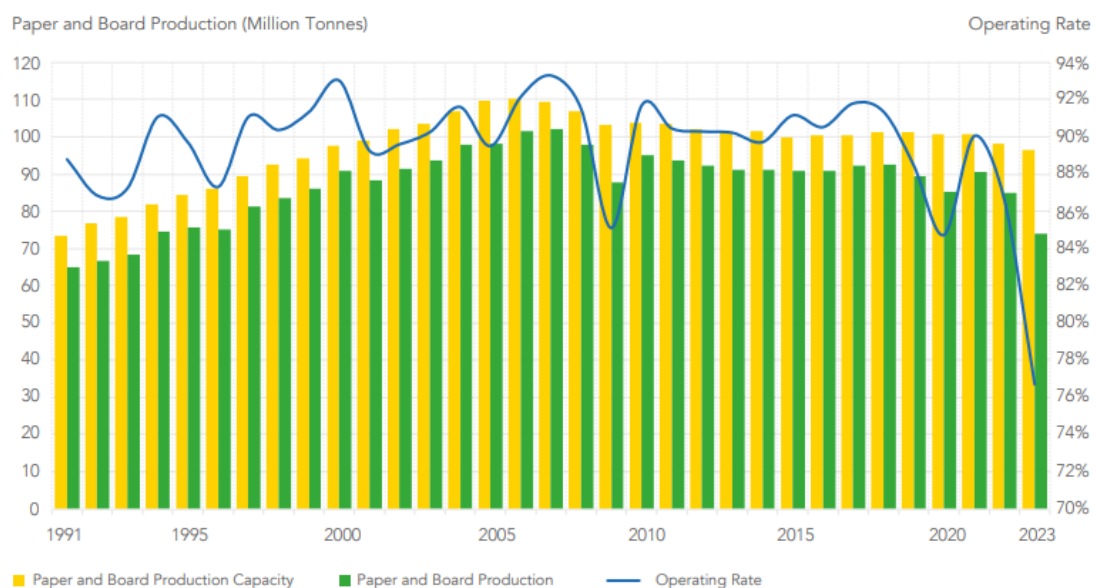


Abbildung 3-8: Papier und Kartonproduktion in Europa [21]

Technologie Roadmap:

Der heutige Papierherstellungsprozess ist weitestgehend optimiert. Bei der Herstellung fallen keine prozessbedingten CO₂-Emissionen an, jedoch verlangt die heutige Papierherstellung nach großen Mengen an Strom und Wärme in Form von Dampf, welche Großteils über fossil gefeuerte Kraftwerke bzw. Dampfkessel am Standort bereitgestellt werden. Um die Klimaziele einzuhalten, müssen die fossilen Energieträger durch erneuerbare Biomasse bzw. Wasserstoff substituiert werden. [10]

Im Bericht „*The Two Team Project*“ [22] von CEPI wurden ganzheitlich neue Technologien für die Papierherstellung vorgestellt, mit welchen der Energieeinsatz teilweise deutlich reduziert werden könnte.

Diese sogenannten Breakthrough-Technologien könnten ab 2030 zur Verfügung stehen. Eine dieser Technologien ist die Verwendung von niedrig eutektischen Lösungsmitteln in der Zellstoffherstellung, mit welchen die Zellstoffherstellung bei niedrigeren Temperaturen möglich wäre. Im Vergleich zum herkömmlichen Zellstoffprozess soll eine Energieeinsparung um bis zu 40 % möglich sein. [22]

Der Trockenprozess ist der energieintensivste Schritt der Papierherstellung. Hier wird die restliche Feuchte aus dem Pressprozess durch den Einsatz von Dampf aus dem Papier ausgetrieben. Der hohe Anteil an Wasser bewirkt den hohen Bedarf an Dampf für die Trocknung. Weitere vorgestellte Technologien befassen sich deshalb damit, den Wassergehalt durch etwa das Aufblasen von nahezu trockenen Fasern auf das Vlies mit Dampf zu senken. [22]

Auch der komplette Verzicht auf den Einsatz von Dampf zur Trocknung wurde vorgestellt. Als Trocknungsmittel könnte superkritisches CO₂ eingesetzt werden. Dieses wird bereits in anderen Branchen, etwa in der Lebensmittelindustrie zum Trocknen von Früchten oder für Trocknungsprozesse in der Textilindustrie eingesetzt. Dadurch entfällt die energieintensive Bereitstellung von Dampf. Experten gehen dabei von einer Energieeinsparung im Bereich von etwa 20 % aus. [22]

Der Einsatz von elektrischen Dampfkesseln kann für die Bereitstellung des benötigten Dampfes im Trocknungsprozess realisiert werden. Diese Technologie ist bereits ausgereift und in breiten Leitungsbereichen anwendbar. [20]

Politische Rahmenbedingungen:

Um Wettbewerbsnachteile für die europäische Papierindustrie gegenüber Produkten aus Drittländern zu vermeiden, sollten erhöhte Produktionskosten im Zuge der Dekarbonisierung vermieden werden. Etwa 23 % der weltweiten Zellstoff- und Papierproduktion stammen aus Europa, was die Bedeutung einer wettbewerbsfähigen Energiebereitstellung unterstreicht. Für die erfolgreiche Dekarbonisierung sind dabei sowohl ausreichende Energiemengen als auch niedrige Energiepreise erforderlich, unabhängig davon, ob die Dampferzeugung über elektrische Kessel oder durch den Einsatz von grünem Wasserstoff und Biogas erfolgt.

3.4 Roadmap der Zementindustrie

Bei der Zementherstellung entstehen bei der Herstellung des Klinkers prozessbedingte CO₂-Emissionen durch die Entsäuerung des Kalksteins sowie durch den Einsatz von fossilen Brennstoffen.

In „*Wie Was Wenn – Roadmap zur CO₂-Neutralität der österreichischen Zementindustrie bis 2050*“ [11] hat der Verein Österreichischer Zementindustrie (VÖZ) seine Roadmap für die Dekarbonisierung der österreichischen Zementindustrie vorgestellt. Diese decken sich mit den Aussagen der Roadmap „*Cementing the European Green Deal – Reaching Climate Neutrality Along The Cement And Concrete Value Chain By 2050*“ [23] der europäischen Zementvereinigung (Cembureau).

Zementnachfrage:

Die Roadmap der VÖZ basiert auf den Daten der in Österreich produzierten Zementmengen. Dabei wird von einer gleichbleibenden jährlichen Zementmenge bis zum Jahr 2050 ausgegangen. Der langfristige Trend des Rückgangs des Zementbedarfs durch effizientere Planung in der Baubranche wird durch einen erhöhten Bedarf für den Ausbau von Energieversorgungsanlagen ausgeglichen. Zement ist durch seine hohe Dichte kein richtiges Exportgut und bedient meistens nur den regionalen Markt. [24]

Technologie Roadmap:

Etwa zwei Drittel der CO₂-Emissionen bei der Klinkerherstellung sind Prozessemissionen. Der Rest entsteht bei der Verbrennung von fossilen Energieträgern, um die benötigten Prozesstemperaturen zu erreichen. Bis 2050 werden diese Energieträger durch grüne Gase, Wasserstoff und dem Einsatz von erneuerbarer elektrischer Energie ersetzt. Weiters ist die Zementindustrie auch bei der Verwertung von Ersatzbrennstoffen (ESB) in Zukunft ein entscheidender Partner der Abfall- und Kreislaufwirtschaft. [11]

Wie schon erwähnt stammt die Mehrheit der CO₂-Emissionen prozessbedingt aus dem Klinkerprozess. Verringert man nun den Anteil des Klinkers im Zement reduzieren sich auch die Emissionen. Bis zum Jahr 2040 soll der durchschnittliche Anteil an Klinker im Zement-Portfolio von 70 % auf 52 % sinken. Zudem soll der Anteil an Ersatzrohstoffen (Hüttensand, Flugasche) bei der Zementherstellung weiterhin so hoch wie möglich gehalten werden. Für neue Zementarten mit weiterer Reduktion des Klinkeranteils müssen ganzheitlich neue Zusatzstoffe wie getemperter Ton für den Einsatz entwickelt und getestet werden. [11]

Die prozessbedingten Emissionen, welche nicht durch die weitere Senkung des Klinkeranteils verhinderbar sind, müssen mit CO₂-Abscheidungs- und Speicherungstechnologien aus dem Rauchgas abgeschieden werden (CCUS). Nur durch den Einsatz dieser Technologien ist es möglich eine klimaneutrale Zementherstellung zu erreichen. [25]

Politische Rahmenbedingungen:

Diese Umstellungen sind, wie schon bei den anderen Industrien erwähnt, nur unter den richtigen regulatorischen Rahmenbedingungen der Politik möglich. Es muss neben der geeigneten Infrastruktur und der verlässlichen Versorgung erneuerbarer Energie (Strom, Wasserstoff) auch ein Markt für nachhaltige Zementprodukte geschaffen werden. Sowie die Technologien zur Abscheidung und Speicherung von Kohlendioxid ermöglicht werden. Die nachfolgende Abbildung 3-9 stellt die klimaneutrale Zementherstellung der Zukunft dar, in welchem alle verfügbare Technologien eingesetzt werden. [23]

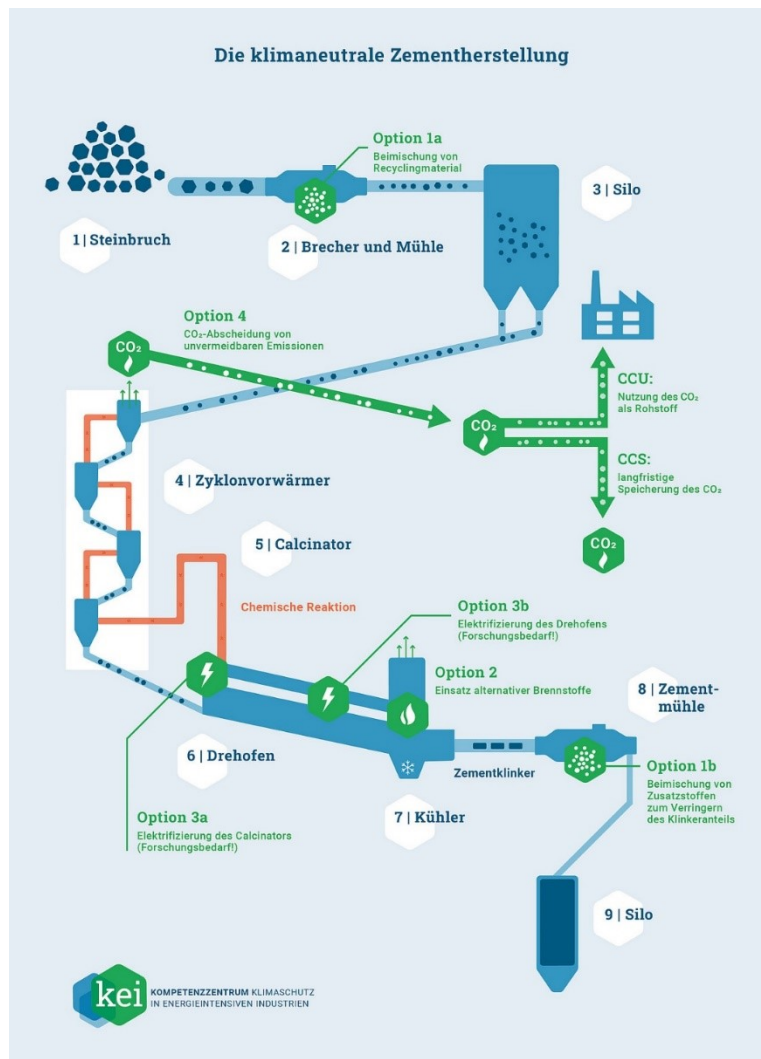


Abbildung 3-9: Zementherstellungsprozess mit Dekarbonisierungsmaßnahmen [25]

3.5 Roadmap der Magnesiaindustrie

Das aus dem Mineral Magnesit (MgCO_3) gewonnene Magnesia (MgO) wird in der Industrie als Feuerfestmaterial für Hochtemperaturprozesse in der Stahl-, Zement- und Glasherstellung verwendet. Auch die Magnesiaindustrie in Österreich bekennt sich zur Dekarbonisierung der Branche bis 2050. Österreich gilt geostrategisch als weltweit wichtigstes Rohstoffvorkommen für Magnesit. Die RHI-Magnesita, als Vertreter der österreichischen Magnesiaindustrie, hat in einer Stellungnahme ihre Maßnahmen und Hürden zum Erreichen der Klimaziele für ihre Standorte in Österreich zusammengefasst. [26–28]

Magnesianachfrage:

Über 50 % des produzierten Magnesias werden als Feuerfestmaterial in der Stahlindustrie eingesetzt. Dadurch ist die Nachfrage nach Magnesia stark von der Konjunktur der Stahlbranche abhängig und beeinflusst somit die Magnesiaproduktion. [12]

Zum aktuellen Zeitpunkt werden über 90 % des in Europa benötigten Magnesia aus China importiert. Im RePowerEU Akt will die Europäische Union auch den vorkritischen Rohstoff Magnesit in Europa durch die Erhöhung der Produktion schützen, um die Rohstoffabhängigkeit von China zu reduzieren. [29]

Für die Primärstahlproduktion ist ein prognostizierter Zuwachs der Produktionsmenge bis 2050 um ca. 0.5 % pro Jahr prognostiziert worden. Diese Produktionssteigerung wird auch für die Magnesiaproduktion angenommen.

Technologie Roadmap:

Bei der Kalzinierung von Magnesit zu Magnesia fällt prozessbedingt CO₂ an. Aber auch durch die Verbrennung von fossilen Energieträgern wie Erdgas und Erdöl, um die benötigten Prozesstemperaturen zu erreichen, entstehen Kohlendioxid-Emissionen. Demnach fallen für die Herstellung von einer Tonne Magnesia in etwas 1.7 Tonnen CO₂ an. Die für den Prozess benötigten Temperaturen können nach jetzigem Stand der Technik nicht über direkten Einsatz von elektrischer Energie erreicht werden. Damit beschränkt sich die Dekarbonisierung der Energieträger auf den Einsatz von grünen Gasen wie klimaneutraler Wasserstoff. [28, 30]

Die RHI arbeitet daran ihre Recyclingquote von aktuell 15 % auf bis zu 25 % im Jahr 2050 zu steigern. Dadurch kann ein Großteil des Kohlendioxids aus der Primärherstellung verhindert werden. Die restlichen prozessbedingten Emissionen müssen über CO₂-Abscheidetechnologien eingefangen werden. Hier arbeitet die RHI-Magnesita mit dem australischem Start-Up MCi Carbon an einer Pilotanlage in Hochfilzen, welche es ermöglichen soll, bis zu 50.000 Tonnen CO₂ pro Jahr in CO₂-negative Produkte umzuwandeln. [28]

Politische Rahmenbedingungen:

Magnesia ist als Feuerfestmaterial ein kritischer Bestandteil der Wertschöpfungskette, ohne dem viele verschiedenen Industrien stillstehen würden. Die aktuelle Nachfrage der Industrie kann durch die heimische Produktion nicht gedeckt werden. Dadurch begibt man sich in eine strategische Abhängigkeit von Importen aus China. Mit dem RePowerEU-Plan der Europäischen Union soll unter anderem auch die heimische Magnesia Produktion gestützt und gefördert werden. [2]

Für den Einsatz von Wasserstoff als Brenngas muss die benötigte Infrastruktur vorhanden sein. Hierbei hat die Magnesiaproduktion aufgrund ihrer meist abgelegenen Produktionsstätten entscheidende Nachteile. Der Standort in Breitenau jedoch könnte strategisch nahe genug an der geplanten Wasserstoffpipeline liegen. Weiters muss der grüne Wasserstoff in ausreichenden Mengen und zu vernünftigen Preisen vorhanden sein. [28]

Für die Umsetzung von CCU- und CCS-Technologien müssen die benötigten Infrastrukturen geschaffen werden. In Österreich das Einspeichern von CO₂ nach aktuellem Rechtsstand verboten, was einen starken Wettbewerbsnachteil für den Standort darstellt. [31]

Die Magnesiaindustrie ist momentan noch aus dem CBAM- (Carbon Border Adjustment Mechanism) System ausgeschlossen. Dieses grenzübergreifende CO₂-Bepreisungssystem macht es möglich, Produkte zu vergleichen unabhängig davon, ob sie außerhalb oder innerhalb der EU hergestellt wurden. Durch das Exkludieren von Magnesiaprodukten werden die heimischen Produkte schlichtweg zu teuer werden. [28]

3.6 Roadmap der Verdichterstation Weitendorf

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Abwärmepotential der für den Heat Highway attraktiven Gasverdichterstation Weitendorf entlang der Trans Austria Gasleitung (TAG) für die Jahre 2020 bis zum Zieljahr 2050 bestimmt. Um dieses Potential zu berechnen, muss die zukünftige Durchflussmenge entlang der TAG bestimmt werden.

Da Österreich aufgrund seiner zentralen geographischen Lage als Gastransitland gilt, sind die Durchflussmengen vor allem von den Nachfragen der Nachbarländer abhängig. In Abbildung 3-10 sind die Transitflüsse im östlichen Marktgebiet von Österreich zum Zeitpunkt vor dem russischen Angriffskrieg auf die Ukraine im Jahr 2022 dargestellt. Klar zu sehen ist der Transit von vor allem russischen Erdgas über die Slowakei weiter nach Italien. [32]

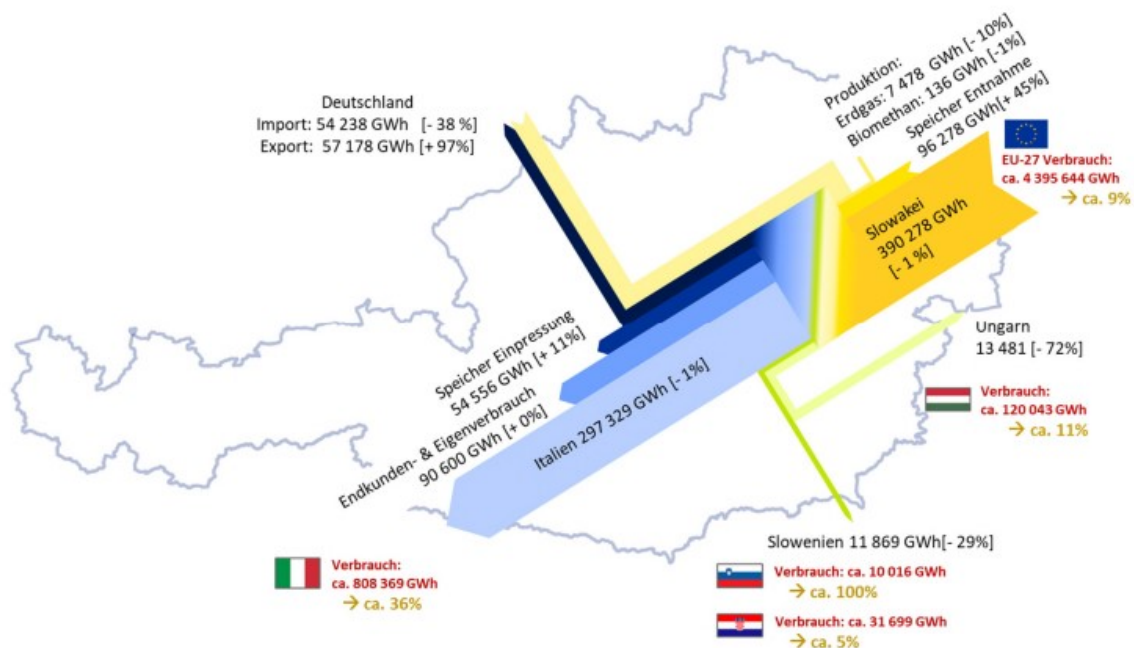


Abbildung 3-10: Transitflüsse durch Österreich 2020 [33]

Der Gastransit durch Österreich wird sich jedoch in den nächsten Jahrzehnten stark ändern. Einerseits wird es durch den RePowerEU-Plan der europäischen Union zu einer Verringerung der Erdgasimporte aus Russland kommen. Andererseits wird sich mittelfristig der Transit durch Wasserstoffimporte aus Italien umkehren. [2, 32]

Anfang des Jahres 2024 hat die Europäische Kommission vorgelegt, bis zum Jahr 2027 vollständig aus dem Import von russischem Erdgas aussteigen zu wollen. Österreichs Nachbarland Italien hat ebenso Pläne für die vollständige Unabhängigkeit von russischem Erdgas bis zum Jahr 2030 vorgelegt. [32, 34]

Viele dieser politischen Entscheidungen sind, zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit noch nicht vollständig gefestigt. Sicher ist jedoch, dass es in naher Zukunft zu einer deutlichen Reduktion der Transitmengen an den österreichischen Gas-Fernleitungen gibt.

In einer Studie der TU Wien im Auftrag des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) [32] wurde der Gastransitbedarf in Österreich für die Jahre bis 2040 modelliert und abgeschätzt. Daraus geht hervor, dass es bis zum Jahr 2030, durch den Ausstieg

Italiens aus russischem Erdgas, eine deutliche Reduktion der Auslastung entlang der TAG erwartet wird. Weiters wird es ab 2030 zu einer Umkehrung der Flussrichtung kommen, die TAG wird dann Gas aus Italien importieren. Daraus folgt, dass zu dem Zeitpunkt nicht mehr alle drei Pipelines verwendet werden müssen und die Möglichkeit besteht eine Leitung für den Wasserstofftransport umzuwidmen. Der prognostizierte Erdgasbedarf bis 2050 unter Berücksichtigung verschiedener Szenarien ist in Abbildung 3-11 dargestellt. [32]

Bis 2040 soll der Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur und der Anschluss an den H₂-Backbone stattfinden. 2040 soll die Gasinfrastruktur eine 100 % klimaneutrale Energieversorgung mit Wasserstoff und anderen grünen Gasen garantiert sein. Die H₂-Importe über die TAG werden ab 2030 Großteils über Italien führen. [35]

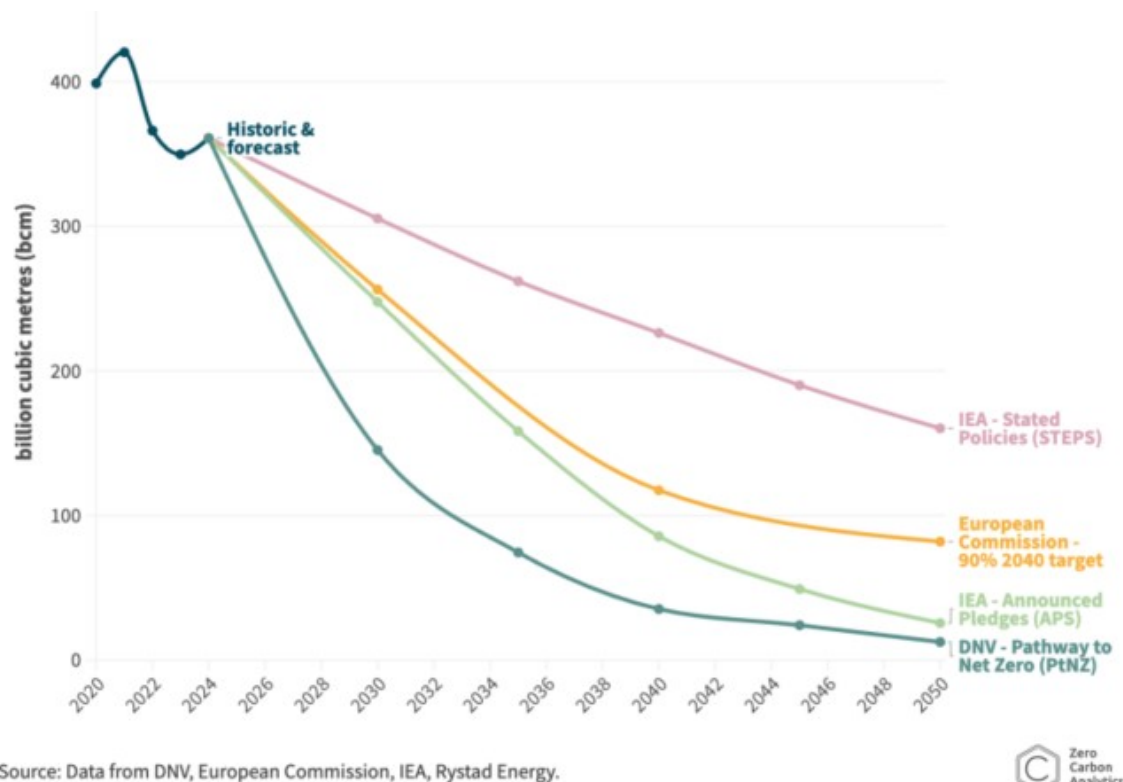


Abbildung 3-11: Veränderung der Erdgasnachfrage in Europa bis 2050 [36]

Für die Verdichterstation ist nun entscheidend welches Gas im Jahr 2050 durch die Pipeline fließt. Biomethan mit einer Beimischung von bis zu 25 % H₂ wurde bereits erfolgreich getestet. Wird nur noch Wasserstoff in den Pipelines transportiert ist der Einsatz von Turboverdichtern nicht mehr problemlos möglich. Aufgrund der geringeren Dichte des Wasserstoffs gegenüber Erdgas wäre ein viermal größerer Durchsatz bzw. müsste die Drehzahl viermal höher sein als bei einem Betrieb mit Erdgas. Für bestehende Turboverdichter ist dies aufgrund der starken Materialbelastungen kaum realisierbar. Für die Verdichtung von reinem Wasserstoff werden deshalb Kolbenverdichter empfohlen. [37, 38]

3.7 Derzeit verfügbare Abwärme der untersuchten Standorte

Dieses Kapitel umfasst die Abwärmemengen, welche zum aktuellen Zeitpunkt in die anliegenden Wärmenetze eingespeist werden können sowie den dafür bezogenen Abwärmequellen der Industrie.

Abwärmeauskopplung voestalpine Donawitz

Die bei der Roheisen- und Stahlproduktion auftretenden Kuppelgase werden seit 2008 in einer Kraftwärmekopplungs-Anlage (KWK) verbrannt und versorgen damit das Netz der Stadtwärme Leoben und Trofaiach. Die Fernwärmeauskopplung erfolgt demnach im Normalbetrieb aus dem Turbinenwärmetauscher der Dampfturbine mit einer maximalen Leistung von 50 MW_{th} und einer maximalen Temperatur von 115 °C. Im eingeschränkten Betrieb kann der Notwärmetauscher eine maximale Leistung von 30 MW_{th} bereitstellen. Weiters können bis zu 15 MW_{th} je nach Verfügbarkeit aus dem internen Wasserdampfsystem bereitgestellt werden. [39, 40]

Abwärmeauskopplung Böhler Kapfenberg

Das zum aktuellen Stand weltweit modernste Edelstahlwerk versorgt das örtliche Fernwärmenetz der Stadtwerke Kapfenberg mit einer jährlichen Abwärmemenge von bis zu 20 GWh pro Jahr. Dabei steht im Stahlwerk eine maximale Abwärmeleistung von bis zu 12.5 MW_{th} aus der Wärmerückgewinnung eines geschlossenen Kühlkreislaufes am EAF und des Argon-Sauerstoff-Entkohlung-Konverters zur Verfügung. Die tatsächlich installierte Wärmeübertragerleistung an der Übergabestation beträgt etwa 6 MW_{th} und stellt dem Netz Wärme mit einer konstanten Vorlauftemperatur von 85 °C bereit. Ein Teil der Prozessabwärme wird intern verwendet und kühlt über eine Adsorptionskältemaschine das Datacenter des Stahlwerks. [41–43]

Abwärmeauskopplung Marienhütte Graz

Das Stahl- und Walzwerk Marienhütte ist seit 1993 an das Fernwärmenetz in Graz angeschlossen und gilt damit als erste Einspeiser von industrieller Abwärme in dieses Netz. Nach Rücksprache mit den Stakeholdern sowie weiterer Literatur zum Grazer Fernwärmenetz [44, 45] wurde der Entschluss getroffen, dass die Marienhütte Graz entweder 7 MW_{th} mit 95 °C und 11.5 MW_{th} mit 69 °C oder 15 MW_{th} mit 95 °C liefern kann. [46]

Abwärmeauskopplung Sappi Gratkorn

Das Papierwerk Sappi in Gratkorn ist ebenfalls an das Grazer Fernwärmenetz angeschlossen und speist hier mit bis zu 45 MW_{th} ein. Weiters werden die Ortschaften Gratkorn und Gratwein mit zusätzlich insgesamt 12 MW_{th} versorgt. In Summe werden somit etwa 57 MW_{th} für die Fernwärmebereitstellung ausgekoppelt. Die Abwärme kommt dabei aus der Eindampfanlage und der KWK-Anlage, in welcher unter anderem biogene Brennstoffe wie Laugen und Rinden aus dem Zellstoffwerk verbrannt werden. [46–48]

Abwärmeauskopplung Zellstoff Pöls

Die Zellstoff Pöls AG liefert über eine 18 km langen Wärmeschiene seit 2011 Fernwärme die zum Großteil aus der Verbrennung von Schwarzlauge, einem Restprodukt aus der Zellstoffproduktion, in einer effizienten KWK-Anlage an die Fernwärmenetze der Regionen Judenburg, Zeltweg und Fohnsdorf mit einer maximalen Leistung von etwa 30 MW_{th}. Weiters wird angenommen, dass der Ort Pöls mit 11 MW_{th} an die Zellstoff Pöls angeschlossen ist. Für das Wärmenetz in Judenburg wird eine Wärmemenge von 18.7 GWh angegeben. In Murdorf stammen 14 GWh aus der Abwärme von Zellstoff Pöls. Zeltweg wird mit 28 GWh versorgt. [49, 50]

Abwärmeauskopplung Norske Skog Bruck an der Mur

Seit 2012 ist die Papierfabrik Norske Skog in Bruck an der Mur in der ersten Ausbaustufe mit 6 MW_{th} an das Brucker Bio-Fernwärmenetz angeschlossen. 2017 wurde in einer weiteren Ausbaustufe die maximale

Abwärmeauskopplung auf 16.6 MW_{th} angehoben. Insgesamt werden somit im Jahr ca. 35 GWh an Wärmebedarf, durch Abwärme aus der Papierfabrik Norske Skog in Bruck gedeckt. Die Abwärme kommt aus Wärmerückgewinnung in der Schleiferei und aus der neuen Reststoffverwertungsanlage. [51, 52]

Abwärmeauskopplung Mayr-Melnhof Frohnleiten

Bei Mayr-Melnhof in Frohnleiten wird ein Gas und Dampf-Kraftwerk (GuD) zur Stromproduktion verwendet. Die Abwärme aus dem GuD-Prozess wird in das lokale Fernwärmenetz geleitet. Somit steht eine maximale Leistung von 14 MW_{th} für die Abwärmeauskopplung bereit. [53]

Abwärmeauskopplung Holcim Retznei

Das Zementwerk in Retznei speist seit 2012 mit einer Leistung von bis zu 3 MW_{th} ins Nahwärmenetz Gleinstätten ein. Damit werden die Gemeinden Retznei, Ehrenhausen und Gamlitz mit Wärme versorgt. [54]

Abwärmeauskopplung RHI Breitenau

Zum jetzigen Zeitpunkt wird keine Abwärme aus dem Betrieb in Breitenau ausgekoppelt.

Abwärmeauskopplung Gasverdichterstation Weitendorf

Zum jetzigen Stand wird die Abwärme der Gasverdichterstation in Weitendorf zur Stromproduktion über einen Abhitzeessel mit nachgeschalteter Dampfturbine verwendet. Für eine Fernwärmeauskopplung gibt es momentan noch keinen Bedarf. [55–57]

3.8 Industrielle Abwärme und abwärmerelevante Prozesse

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Berechnung industrieller Abwärmepotentiale. Zur Sicherstellung eines einheitlichen Verständnisses, werden im Folgenden die wichtigsten Begriffe erklärt.

Definition der Abwärme

Die Definition von Abwärme ist allgemein sehr inkonsistent. In dieser Arbeit wird die vom AGFW (Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V.) in Zusammenarbeit mit Forschungsinstitutionen, Verbänden der Industrie, sowie betroffenen Mitgliedsunternehmen praxisnahe Definition verwendet. Demnach wird als Abwärme jene Wärme bezeichnet, welche bei einem Prozess, mit dem Hauptziel der Erzeugung eines Produktes, Dienstleistung oder Energieumwandlung als ungenutztes Nebenprodukt an die Umgebung abgeführt werden muss. Nach dieser Definition gelten somit auch anfallende Wärmemengen bei der Energieumwandlung in Kraftwerken bzw. Wärme aus Verbrennungsprozessen als Abwärme. [58]

Weiters kann der Begriff Abwärme nach unterschiedlichen Merkmalen kategorisiert werden [59]:

- **Medium:** Abwärme kann meist in Form von flüssigen oder gasförmigen Trägermedien anfallen. Klassische gasförmige Abwärmequellen sind Abgase, Abluft oder Brüden. Flüssige Abwärmequellen sind zumeist Kühl- oder Prozesswasser.
- **Temperaturniveau:** Die Einteilung nach Temperaturniveaus erfolgt meist in: Nieder-, Mittel- und Hochtemperatur. Die tatsächlichen Temperaturbereiche werden jedoch meist je nach Industrie unterschiedlich eingeteilt.

- Bündelung der Abwärme: Weiters kann unterschieden werden, ob die Abwärme diffus durch Strahlung oder Konvektion vorliegt (Produktwärme, Abluft) oder gebunden an den Trägerstrom (Ab-/Prozesswasser)
- Prozess: Abwärme wird nach dem Prozess eingeteilt, bei dem sie anfällt
- Energieträger: Abwärme kann auch nach dem im Prozess eingesetzten Energieträger bzw. eingesetzter Endenergie kategorisiert werden.

Aus der Recherche zu vorhandenen Abwärmequellen sowie der Untersuchung der aktuellen Fernwärmeauskopplungen der Industrie, stellt sich heraus, dass die Industrie den Begriff der Abwärme für ihre Fernwärmeversorgung etwas weitläufiger als in der Literatur definiert. So werden unter anderem auch Abwärmemengen aus Kraftwerksanlagen, welche nicht im Prozess anfallende Abfallstoffe einsetzen als industrielle Abwärme bezeichnet.

Aus diesem Grund werden die industriellen Abwärmern im Rahmen dieser Arbeit in die folgenden vier Kategorien unterteilt:

- Kategorie 1: Abwärme aus Prozessen mit Temperaturen über 100 °C für die Fernwärmeversorgung.
- Kategorie 2: Abwärme aus Prozessen, welche durch den Einsatz von Wärmepumpen auf ein geeignetes Temperaturniveau für die Fernwärmeversorgung angehoben werden können.
- Kategorie 3: Abwärme aus Verbrennungsanlagen (Kraftwerken) die mit im Prozess anfallenden Abfallstoffen betrieben werden.
- Kategorie 4: Abwärme aus Verbrennungsanlagen (Kraftwerken), welche mit externen Brennstoffen versorgt werden.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden für die Bestimmung der technischen Potentiale die Kategorien 1 und 2 (Abwärme aus Prozessen) jedoch ohne den Einsatz von Wärmepumpen betrachtet. Wie sich das Anheben von Abwärmepotentialen im Nieder- und Mitteltemperaturbereich auf die verfügbare Abwärme für Fernwärmenetze und auf mögliche Prozessänderungen innerhalb der Industrie auswirken könnte wird in Kapitel 5 und in Kapitel 0 am Ende dieser Arbeit behandelt.

Abwärmepotential

Diese Arbeit bezieht sich auf die Ergebnisse des Projekts „Abwärmekataster III Steiermark“ [60]. Aus diesem Grund werden die im Zuge des Projekts erstellten Definitionen der Abwärmepotentiale für diese Arbeit übernommen. Zur genauen Bestimmung der Abwärmepotentiale, müssen diese zu Beginn in theoretisches, technisches und wirtschaftliches Potential unterschieden werden. Die drei Potentiale sind in Abbildung 3-12 in Form von Teilmengen dargestellt.

Das **theoretische Potential** ist demnach rein über die physikalischen bzw. thermodynamischen Schranken begrenzt. Es stellt somit das größtmögliche erfassbare Potential dar. Als Referenztemperatur wurde hier 0 °C gewählt. Zudem muss die Wärme an ein Trägermedium gebunden sein. [60]

Als **technisches Potential** wird jener Anteil des theoretischen Potentials betrachtet, welcher unter der Berücksichtigung von technischen Grenzen realisierbar ist. Zu diesen Grenzen zählen Limitierungen bei der Wärmeextraktion wie Wärmeverluste bei der Übertragung sowie mindestens erforderliche Temperaturdifferenzen (Grädigkeiten) in Wärmeübertragern und Verunreinigungen von Wärmeträgermedien. [60]

Das **wirtschaftliche Potential** ist als Teilmenge des technischen Potentials zu betrachten. Es ist jener Teil, der unter den gegebenen Rahmenbedingungen ökonomisch realisierbar ist. [60] Dieses Potential wird jedoch in dieser Arbeit nicht mehr weiter betrachtet. Die Ergebnisse der nachfolgenden Berechnungen beziehen sich auf das technische Potential bzw. in weiter Folge auf ein für den Heat-Highway relevantes Potential.

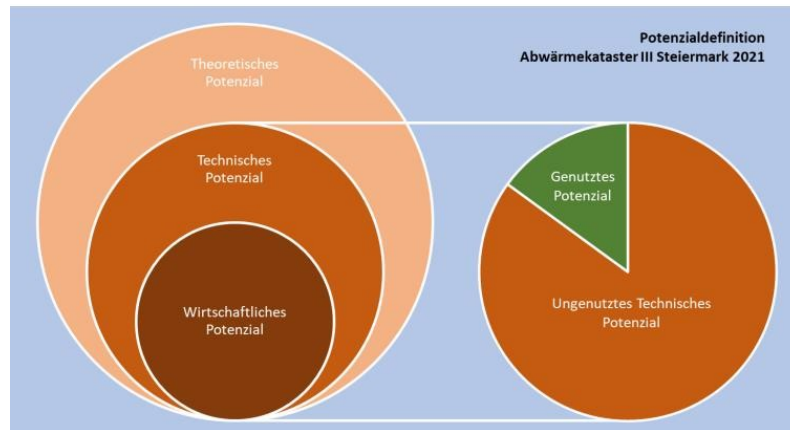


Abbildung 3-12: Darstellung der verschiedenen Potentiale [60]

3.8.1 Sektor Stahl

Im Folgenden werden hier die Prozesse der Rohstahlherstellung über die Hochofenroute in einem Integrierten Hüttenwerk sowie die Herstellung über das Sekundärverfahren/Elektrostahlverfahren mittels Elektrolichtbogenofen grob zusammengefasst und auf die verfügbaren Abwärmepotentiale untersucht. Die Abbildung 3-13 visualisiert eine schematische Gegenüberstellung der zwei beschriebenen Verfahren.

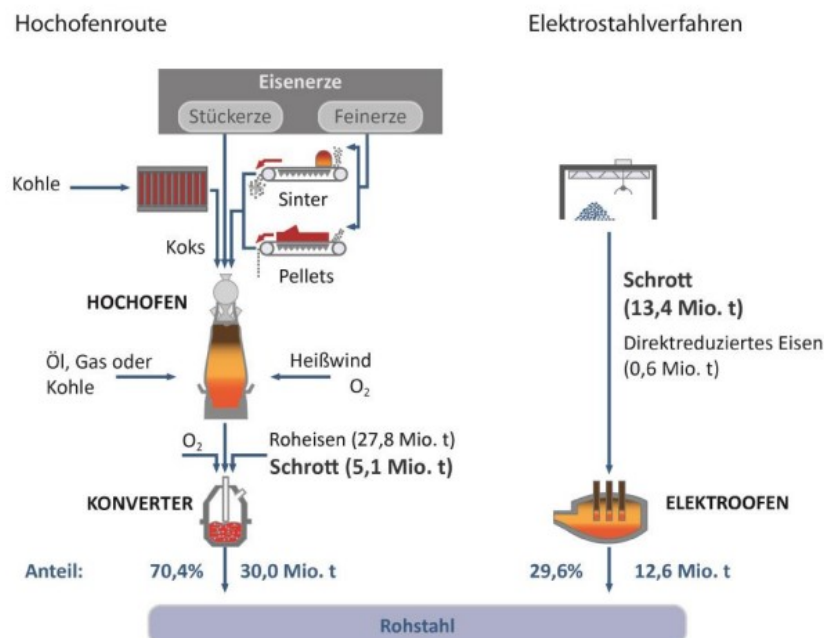


Abbildung 3-13: Darstellung der beiden Routen zur Rohstahlerzeugung [61]

In Österreich wurden im Jahr 2021 rund 7.88 Millionen Tonnen Rohstahl von insgesamt 13 Betrieben produziert [62]. Dabei werden ca. 90 % des Rohstahls über die integrierte Hochofenroute und die restlichen 10 % über die Sekundärroute hergestellt. [63, 64]

Primärroute/Hochofenroute:

Ein klassisches integriertes Hüttenwerk besteht aus einer Kokerei, der Sinteranlage, dem Hochofen und dem anschließenden Stahlwerk sowie der Stranggießanlage und das Warmwalzwerk. Weiters gibt es noch eine Vielzahl an Nebenaggregaten und Prozessen. Da dies hier jedoch eine Zusammenfassung der Prozesse zur besseren Übersicht der nachfolgenden Abwärmepotentialbestimmung dient, wird nur auf die wichtigsten Prozesse bzw. Anlagen eingegangen. [63]

Sinteranlage

Aufgabe der Sinteranlage ist das stückig machen („sintern“) der Feinerze, Konzentrate und des Pelletfeeds. In der Sinteranlage wird das Rohmaterial zusammen mit Zuschlagsstoffen in einer Trommel gemischt und anschließend agglomeriert. Der im Rohmaterial enthaltene Brennstoff Koksgrus wird mit Gas gezündet. Durch die freigesetzte Wärme startet der Prozess des Zusammenbackens (Sintern). Nach dem Backprozess muss der Sinter mit einem definierten Gradienten im Sinterkühler abgekühlt werden. [63]

Hochofen

Nach der Sinteranlage folgt der Hochofen. Hier wird das Eisenerz mit Zuschlagstoffen und Koks zu Roheisen reduziert und geschmolzen. Das Eisenoxid wird dabei durch die Reaktion des Koks mit eingeblasenen Heißwind und dem dabei entstehenden Kohlenmonoxid zu Eisen reduziert. Weiters liefert der Koks die benötigte Reaktionswärme, welche zum Erhitzen und Aufschmelzen der Erze benötigt wird. Aufgrund der hohen Temperaturen muss der Stahlmantel des Hochofens mit Wasser gekühlt werden. [63]

Stahlwerk (Konverter)

Das im Hochofen entstandene Roheisen wird nun im Stahlwerk zu Rohstahl weiterverarbeitet. Im Konverter wird nun der Anteil des im Roheisen enthaltenen Kohlenstoffs und unerwünschte Begleitelemente gesenkt. Dabei wird bei dem als Frischen bezeichnetem Prozess der Kohlenstoff durch Zufuhr von Sauerstoff nahezu vollständig oxidiert. Das dabei entstehende CO-reiche Kuppelgas kann wiederum in Kraftwerken zum Erdgas substituiert werden. Schlackenbildner sorgen für das Abbinden der unerwünschten Begleitelemente und mit dem Zufügen von Stahlschrott wird die Temperatur reguliert. [63]

Stranggießanlage

Ziel der Stranggießanlage ist den flüssigen Stahl in die, für die Weiterverarbeitung, gewünschte Form zu bringen. Dabei wird der flüssige Stahl unter Luftabschluss zuerst in einen Verteiler (Tundish) und weiter in wassergekühlte Kokillen gegossen. [63]

Warmwalzwerk

Der letzte Schritt im integrierten Hüttenwerk ist das Warmwalzwerk. Zu Beginn müssen die abgekühlten Brammen wieder auf die fürs Walzen erforderliche Temperatur aufgewärmt werden. Das geschieht meistens mit Hubbalkenöfen. Dabei erreicht der Erdgasbefeuerte Ofen je nach Werkstoff und Querschnitt bis zu 1350 °C. Durch den Aufwärmvorgang bildet sich auf der Oberfläche Eisenoxid „Zunder“. Dieser wird unmittelbar nach dem Austritt des Ofens im Zunderwäscher mit Hochdruckwasser entfernt. Die saubere

Bramme wird nun mehrmals durch das Walzenpaar, welche bei jedem Mal den Abstand verringert, gestreckt und am Ende des Prozesses zu einem Vorband aufgerollt. [63]

Theoretisches Abwärmepotential

Aus der Analyse von [63] geht hervor, dass in einem integrierten Stahlwerk, je nach Ausführung, Großteils die in Tabelle 3-1 zusammengefassten Abwärmequellen anzufinden sind. Abwärmeströme unter 50 °C sowie diffuse Wärmeverluste durch Strahlung und Konvektion wurden dabei nicht berücksichtigt.

Tabelle 3-1: Abwärmequellen eines integrierten Hüttenwerks [63]

Abwärmequelle	Medium	Temperaturniveau [°C]
Sinteranlage		
Abgas am Sinterband	Abgas	200-300
Abluft am Sinterkühler	Abluft	< 80
Hochofen		
Abgas von Winderhitzern (mit/ohne Wärmerückgewinnung)	Abgas	130 -250
Hochofenschlacke	Abluft	1480
Granulierungswasser	Abwasser	65
Konverter (mit Konvertergasgewinnung)		
Fackelverluste vom Konvertergas	Abgas	50
Abgekippte Konverterschlacke	Abluft	1695
Abgas am Konverter	Abgas	900
Stranggießanlage		
Brüden	Abluft	65
Restwärme der Bramme	Abluft	500
Warmwalzwerk		
Ofenabgas (nach Dampfabgabe)	Abgas	300
Kühlung der Ofenelemente	Abwasser	100
Restwärme Warmband	Abluft	500

Elektrolichtbogenroute

Rohstahl über die Sekundärroute wird durch Aufschmelzen von zumeist Stahlschrott aber auch HBI (Hot Briquetted Iron) oder DRI (Direct Reduced Iron) in Verbindung mit Zuschlagstoffen in einem Elektrolichtbogenofen (EAF) hergestellt. Die Elektroden erzeugen dabei einen über 3000 °C heißen Lichtbogen, welcher die Einsatzstoffe aufschmilzt. [65]

Moderne EAF werden hauptsächlich als Einschmelzaggregate verwendet. Die dabei entstehende Vorschmelze wird anschließend in Prozessen der Sekundärmetallurgie auf ihre gewünschte

Stahlzusammensetzung eingestellt. Der Prozessablauf erfolgt nach den Schritten Chargieren, Einschmelzen, Oxidieren (Frischen) und dem abschließenden Abschlacken sowie dem Abstich. [66]

Beim Chargieren werden neben den Rohstoffen (Schrott) auch zusätzliche Hilfsstoffe in Form von Zuschlagstoffen (Kalk, Dolomit) und Reduktionsmittel (Kohlenstaub) aufgegeben. Der Einschmelzvorgang beginnt nach dem Beschicken des Ofens durch die Zündung des Lichtbogens. Je nach EAF-Konzept können Erdgasbrenner zugeschaltet werden, welche im Aufschmelzvorgang einen zusätzlichen Wärmeeintrag liefern. Durch den Eintrag von Sauerstoff können unerwünschte Reststoffe am Schrott verbrannt werden. In der Nachfolgenden Oxidation (Frischen) werden durch die Reaktion unerwünschte Begleitstoffe mit dem in der Schlacke befindlichen Eisenoxid entfernt. Durch den zugeführten Kohlenstaub kommt es durch die Reduktion des Eisenoxids zu Eisen. Das dabei freigewordene Kohlenmonoxid (CO) lässt die Schlacke aufschäumen. Die Hilfsstoffe Kalk und Dolomit dienen zur Unterstützung Schlackenbildung. Durch die Schaumbildung wird der Lichtbogen stabilisiert und der Wärmeeintrag in die Schmelze verbessert. Im Anschluss wird der flüssige Stahl in Gießpfannen abgefüllt. [66]

Theoretische Abwärmepotentiale:

Bei der Herstellung von Rohstahl im Elektrolichtbogenofen werden die in Tabelle 3-2 zusammengefassten Abwärmequellen erfasst.

Tabelle 3-2: Abwärmequellen des Elektrolichtbogenofen [67, 68]

Abwärmequelle	Medium	Temperaturniveau [°C]
Abgas (Off-Gas) des EAF	Abgas	1300
Kühlung der Ofenwand	Abwasser	40-50
Schlacke	Abluft	600

Je nach Beschaffenheit des Schrotts, kann ein Teil des Abgases aus dem EAF zur Vorwärmung der Einsatzstoffe verwendet werden, damit reduziert sich der Gesamtenergiebedarf. [69]

3.8.2 Sektor Papier und Zellstoff

Laut des Branchenberichts der österreichischen Papierindustrie wurden 2022 in den heimischen Papierwerken ca. 4.6 Millionen Tonnen Papierprodukte sowie zwei Millionen Tonnen Zell- und Holzstoff hergestellt. Dabei wurden insgesamt 15.943 GWh an Energie aufgewandt wovon 13.176 GWh für die Dampfherstellung anfallen. Dampf wird in der Papierherstellung vor allem für den sehr energieintensiven Trocknungsprozess benötigt. [70]

Für ein besseres Verständnis in welchen Prozessen Abwärmepotentiale einer Papierfabrik vorhanden sind, wird im Folgenden ein grober Überblick über den aktuellen Papierherstellungsprozess gegeben. Prinzipiell kann das Herstellungsverfahren in die Schritte: Stoffaufbereitung, Papierherstellung, Streichung und Papierverarbeitung eingeteilt werden. In Abbildung 3-14 ist der gesamte Herstellungsprozess schematisch dargestellt.

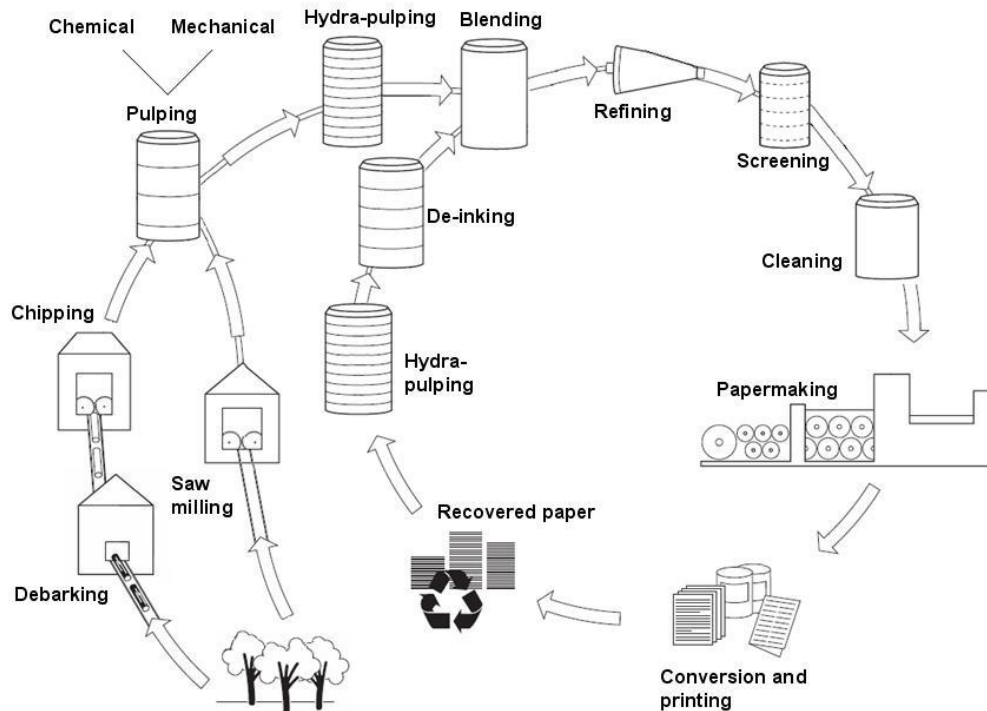


Abbildung 3-14: Schematische Darstellung des Papierherstellungsprozesses [71]

Stoffaufbereitung

Im ersten Schritt wird das Holz zerfasert. Dabei gibt es zwei Vorgehensweisen: der mechanische und der chemische Aufschluss. Beim mechanischen Aufschluss wird das Holz zuerst entrindet danach zu Hackschnitzel weiterverarbeitet und anschließend durch einen rotierenden Schleifstein (Refiner) mechanisch zu Fasern weiterverarbeitet. Durch Einsatz von Wärme und Druck im Refiner wird der Prozess beschleunigt. Das Endprodukt wird thermomechanischer Holzstoff (TMP) genannt. Zur Herstellung von Zellstoff werden chemische Aufschlussverfahren, wie etwa das Sulfatverfahren, verwendet. Die dabei eingesetzte Kochlauge ist für nahezu alle Holzarten geeignet. Im Kochprozess wird das gesamte Lignin (natürliches Bindemittel) entfernt, wodurch das fertige Papier an Lebensdauer zunimmt. Nach dem Kochen wird der Zellstoff gewaschen und gebleicht um anschließend ein letztes Mal gewaschen zu werden. [72]

Wird Altpapier für die Herstellung verwendet muss zuerst die Druckfarbe im Deinking Prozess entfernt werden. Durch den Einsatz von Chemikalien und unter Energieaufwand wird das Altpapier aufgelöst und gereinigt (Waschdeinken oder Flotation) und anschließend gebleicht und gewaschen. Die Deinkingrückstände können meistens energetisch verwertet werden. [72]

Papierherstellung

Die Hauptaufgabe der Papiermaschine ist, durch geeignete Verfahren wie Sieben, Pressen und Trocknen der Fasersuspension so viel Wasser wie möglich zu entziehen. Nach der Sieb- und Presspartie hat das Papier meist noch ca. 50 % Wassergehalt (0.5 kg Wasser auf 1 kg feuchtes Papier). In der nachfolgenden Trockenpartie wird durch dampferhitzte Hohlzylinder ein Trockengehalt von etwa 91-95 % erreicht. [72, 73]

Veredelung

Im Anschluss an die Trockenpartie erfolgt die Streichpartie. Hier können weitere Eigenschaften je nach Verwendungszweck des Papiers durch verschiedene Verfahren eingestellt werden. Dabei kann die Bedruckbarkeit durch eine spezielle Oberflächenbehandlung verbessert werden. Die notwendige Festigkeit und Feuchtigkeitsbeständigkeit des Papiers wird durch Oberflächenleimen erzeugt. Die dafür benötigten Leimpresenwalzen befinden sich meist am Anfang der Trockenpartie integriert. Mithilfe eines Glättwerks, bestehend aus mindestens zwei Rollen, kann das Papier geglättet werden. Am Ende der Trockenpartie befindet sich die Streichpartie. Im Streichprozess werden Pigmente sowie Bindemittel und andere Zusatzstoffe eingesetzt, durch welche das Papierprodukt eine glattere und hellere Oberfläche bekommt. Am Ende der Papiermaschine befindet sich die Aufrollpartie. Hier wird die Papierbahn zu sogenannten Tambouren aufgerollt.[72]

Abwärmequellen der Papierherstellung

Aus der Literatur [59, 71] sowie einer Masterarbeit des Lehrstuhls für Energieverbundtechnik [74] geht hervor, dass sich vor allem jene in Tabelle 3-3 zusammengefasste Prozesse als Abwärmequellen herausstellen:

Tabelle 3-3: Abwärmequellen der Papierherstellung [59, 71, 74]

Abwärmequelle	Medium	Temperaturniveau [°C]
Schleiferei/Refiner	Abwasser	60-70
Trockenpartie	Abluft	60-80
Presspartie	Abluft	50-60
Prozess- und Abwasser	Abwasser	20-50

Abwärme fällt bei der Papierherstellung demnach vor allem in Form von Abluft und Prozess- bzw. Abwasser an. Dies allerdings nur auf niedrigen Temperaturen im Bereich von 20-50 °C dafür in großen Mengen. Da hier die Abwärme Großteils auf niedrigen Temperaturniveaus anfällt, macht die Abwärmenutzung durch Wärmeintegration am meisten Sinn. In Abbildung 3-15 ist die interne Nutzung der Abwärme des Trocknungsprozesses dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Abwärme aus Press- und Trockenpartie als Vorwärmung für die Suspension dient.

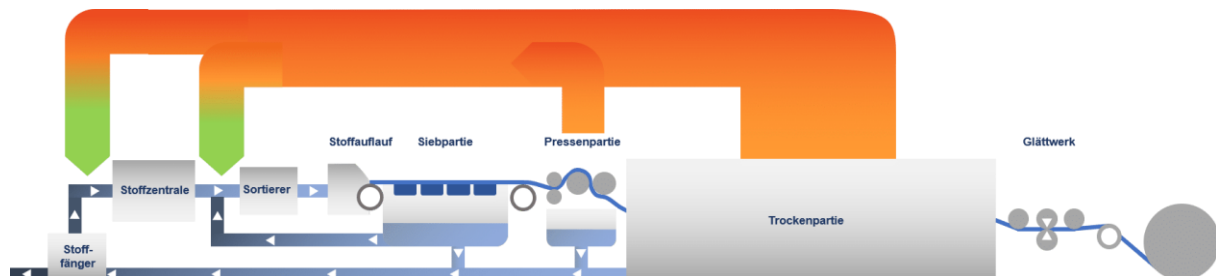


Abbildung 3-15: Darstellung der prozessinternen Weiterverwendung der Abwärme im Trocknungsprozess [50]

Wärmebilanz der Trockenpartie:

In der Trocknungspartie wird Dampf eingesetzt um die Papierbahn auf bis zu 3 % Restfeuchte zu trocknen. Die dabei entstehende feuchte Luft dient über eine Reihe von Wärmeübertragern zur Vorwärmung des Sieb- und Frischwassers und zur Heizung der Halle. Ein Teil der feuchten Luft wird mit frischem Dampf vermischt und wieder dem Trocknungsprozess zugeführt. In Abbildung 3-16 ist eine beispielhafte Wärmebilanz der Trockenpartie angeführt. Dabei ist erkennbar, dass neben der internen Abwärmenutzung rund ein Drittel der Abwärme über die Haube der Trockenpartie als Abluft verlässt. Der Hauptteil des Wärmeinhalts der Abluft liegt dabei als latente Wärme vor. Durch Auskondensieren des Dampfanteils der feuchten Luft könnte diese Abwärme nutzbar gemacht werden. Aufgrund der geringen Temperatur der feuchten Abluft ist das Auskondensieren jedoch technisch schwer umsetzbar. [73]

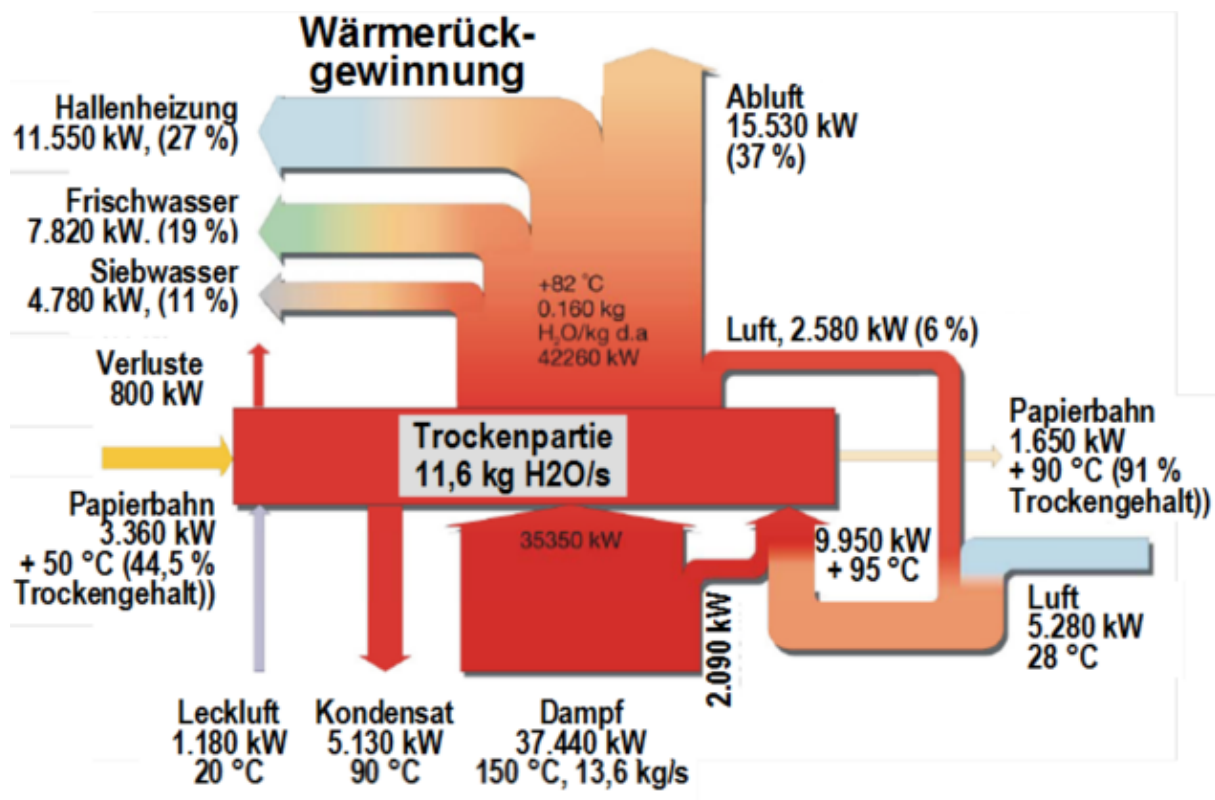


Abbildung 3-16: Wärmebilanz Trockenpartie in der Papierindustrie [73]

3.8.3 Sektor Zement

Die Zementindustrie in Österreich produzierte im Jahr 2019 5.23 Millionen Tonnen Zement in acht Zementwerken. Mit ungefähr 30-40 % des Energiekostenanteils an den Produktionskosten gilt die Zementindustrie als eine der energieintensivsten Branchen. [24]

Zementherstellung

Die Zementherstellung kann in die Prozessschritte: Rohmaterialgewinnung, Aufbereitung der Rohmaterialien, Brennvorgang und Mahlung des Zements unterteilt werden und ist grob in Abbildung 3-17 dargestellt.

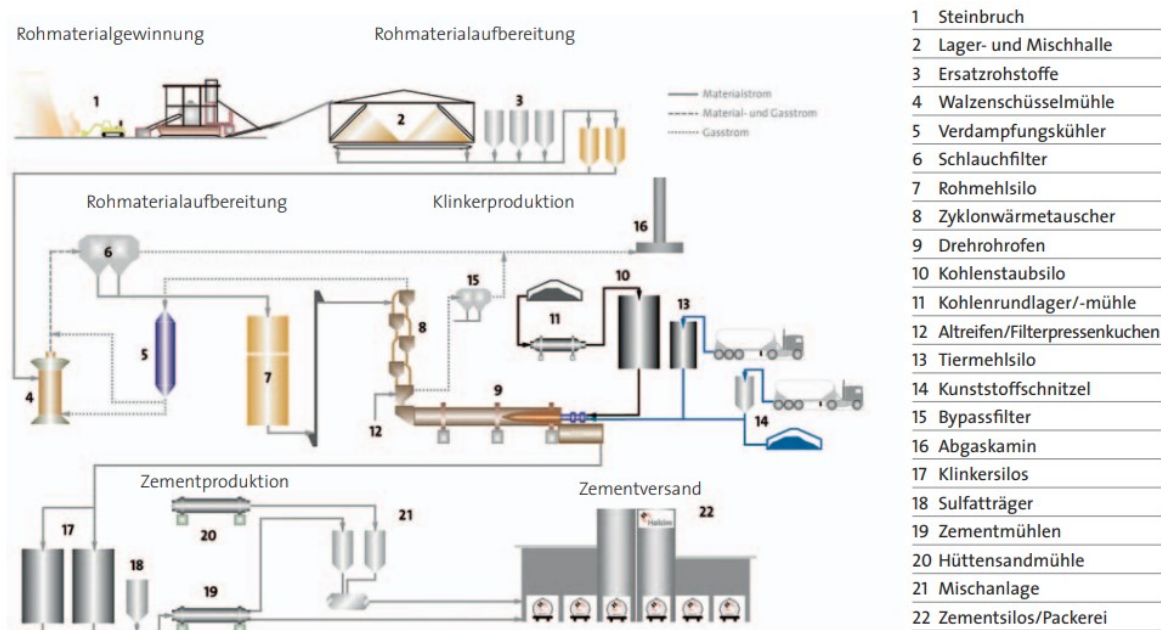


Abbildung 3-17: Schematische Darstellung der Zementherstellung [75]

Nach dem Abbau der Rohmaterialien Kalkstein, Ton und Mergel, werden diese zum Homogenisieren auf einem Mischbett zwischengelagert, bis sie für den Einsatz benötigt werden. In der Rohmehlmühle werden die Rohmaterialien durch die Abwärme aus dem Drehrohrföfen getrocknet und anschließend zu Rohmehl zerkleinert. Im nächsten Schritt folgt der Brennvorgang, der aus der Kalzinierung und anschließender Sinterung des Klinkers besteht. Bei der Entsäuerung (Kalzinierung) im Kalzinator wird das Rohmehl auf 900 bis 1100 °C erwärmt und der Kalkstein (CaCO_3) wird thermisch zu Branntkalk (CaO) und Kohlendioxid zersetzt. Die Sinterung im nachgeschalteten Drehrohrföfen bei bis zu 1450 °C dient zur Granulierung (Sinterung) und zur Bildung von Klinkermineralen. Abschließen wird der Klinker über einen Klinkerkühler auf 100 bis 300 °C abgekühlt, um seine Eigenschaften beizubehalten. Der letzte Schritt ist die Zementmühle. Hier wird aus Klinker und Ersatzrohstoffen wie Flugasche und Hüttensand der fertige Zement gemahlen. [76]

Abwärmequellen:

Für die Zementindustrie wurden die in Tabelle 3-4 zusammengefassten Abwärmequellen definiert.

Tabelle 3-4: Abwärmequellen in der Zementindustrie [59, 77]

Abwärmequelle	Medium	Temperaturniveau [°C]
Abgas Drehrohrföfen	Abgas	200-450
Klinkerkühler	Abluft	100-300
Abstrahlung Drehrohrföfen	Abluft	300

Ein Teil des heißen Drehrohrföfenabgas wird bereits für die Vorwärmung der Rohmaterialien verwendet. Der heiße Abluftstrom aus der Klinkerkühlung wird über Wärmetauscher in den Kalzinator eingebracht.

Das freiliegende Rohr des Drehrohrföfens ist eine der größten Verlustquellen der Zementherstellung. Im inneren des Drehrohrs herrschen Temperaturen bis zu 1450 °C an der Außenseite von bis zu 360 °C.

Durch Strahlung und konvektiven Wärmetransport wird die Abwärme hier an die Umgebung abgegeben. [77] In Abbildung 3-18 ist das Konzept der Abwärmenutzung der Strahlung und Konvektionsverluste am Drehrohr dargestellt.

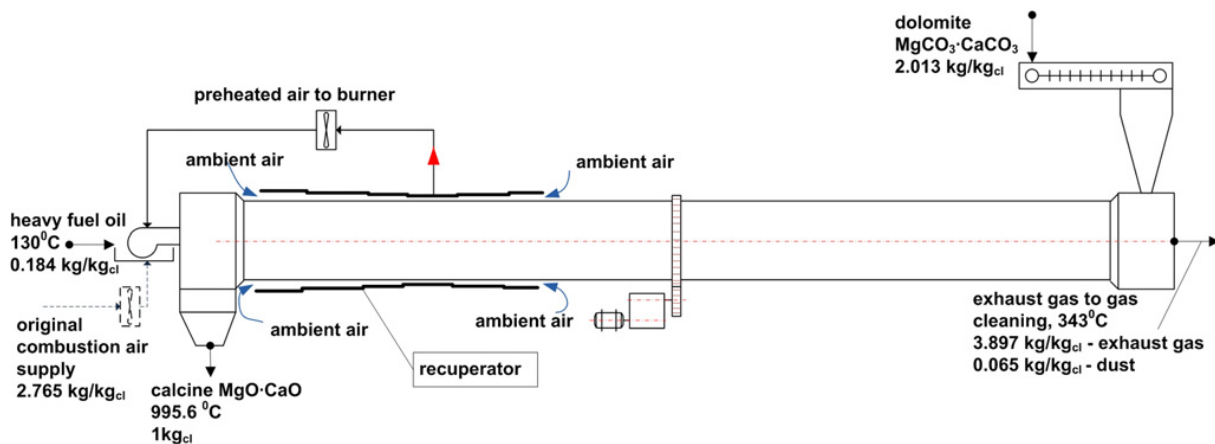


Abbildung 3-18: Nutzung der Wärmeverluste am Drehrohr [77]

Aktuell wird die Wärmerückgewinnung der Abstrahlung des Drehrohrföfens noch nicht genutzt. Durch die Installation eines Mantels um das Drehrohr sowie dem Durchspülen des Spalts mit Luft können Temperaturen von etwa 300°C erreicht werden. [77]

3.8.4 Sektor Magnesia

Am Standort Breitenau wird aus dem Mineral Magnesit der Rohstoff Magnesiumoxid, umgangssprachlich auch als Magnesia bezeichnet, hergestellt. Magnesia wird vorrangig in der Feuerfest-Industrie eingesetzt. Dabei wird weltweit mehr als die Hälfte (65 %) in der Stahl- und ca. 15 % in der Zementindustrie verwendet. [30]

Herstellung

Der Prozess zeigt deutliche Ähnlichkeit mit dem Herstellungsverfahren in der Zementindustrie. Die Prozessschritte sind wiederum: Rohmaterialgewinnung, Aufbereitung der Rohmaterialien, Brennvorgang und Nachkühlung.

Rohmaterial für die Magnesiaherstellung ist der Magnesit (MgCO_3). Nach dem Abbau wird das Mineral zunächst über Brecher zerkleinert und anschließend sortiert. Die Entsäuerung und Sinterung nach dem natürlichen Prozess findet in einem Langdrehrohrföfen statt. Für die Herstellung von Kaustermagnesia über die Entsäuerung des Roherzes werden Temperaturen von $900\text{--}1000^{\circ}\text{C}$ verwendet. Für Sintermagnesia sind Temperaturen von $1600\text{--}2000^{\circ}\text{C}$ nötig. Im Unterschied zur Klinkerherstellung in der Zementindustrie, läuft hier die Vorwärmung, Entsäuerung des Magnesits und die Sinterung in einem Aggregat ab. Aus diesem Grund werden hier deutlich längere Öfen verwendet. Nach dem Sintern muss das Sintermagnesia abgekühlt werden. Dafür wird ein gegenläufiges Kühlrohr dem Brennpfrozess nachgeschaltet. Die hier benötigte Kühltluft dient gleichzeitig als Verbrennungsluft. In Abbildung 3-19 ist der Prozess der Magnesiaherstellung in Breitenau schematisch dargestellt. Durch die Ähnlichkeit zum vorherig vorgestellten Zementherstellungsprozess werden auch ähnliche Abwärmequellen definiert. [30, 78]

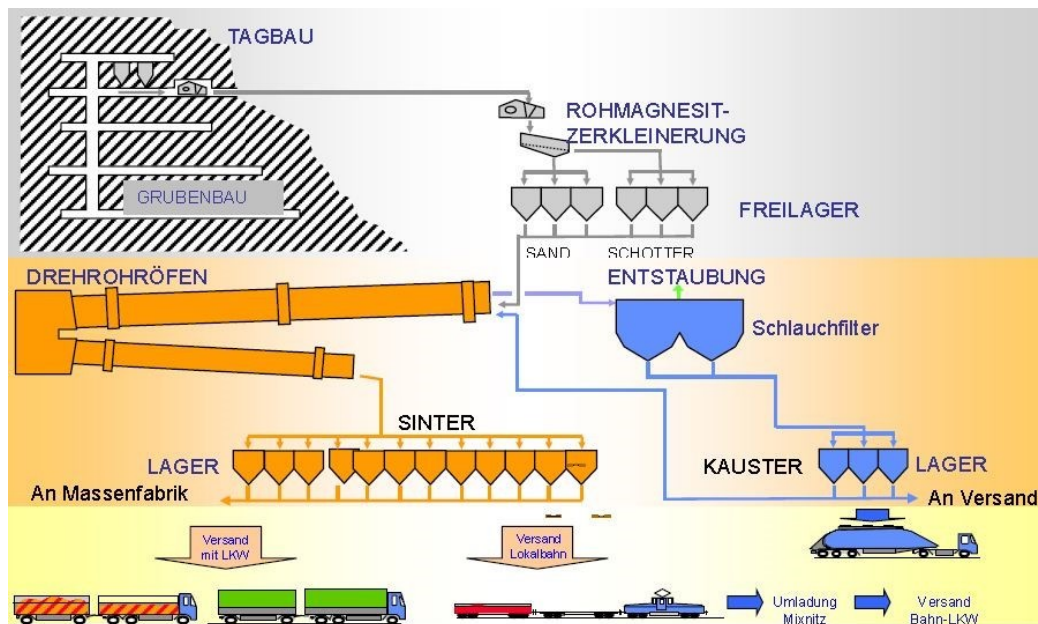


Abbildung 3-19: Schema der Magnesiaproduktion in Breitenau [78]

Abwärmequellen:

Die Abwärmequellen der Magnesiaindustrie sind sehr ähnlich jenen der Zementindustrie, da beide auf ähnlichen Prozessen basieren. Dadurch werden in der Literatur die in Tabelle 3-5 angeführten Abwärmequellen definiert.

Tabelle 3-5 Abwärmequellen Magnesiaherstellung [30, 77]

Abwärmequelle	Medium	Temperaturniveau [°C]
Abgas Drehrohröfen	Abgas	200-450
Abstrahlung des Dreh- und Kühlrohrs	Abluft	100-300
Kühlluft der Nachkühlung	Abluft	200

3.8.5 Gasverdichterstation Weitendorf

Durch Reibung und aufgrund von Höhenunterschieden entlang einer Gasleitung nimmt der Druck und daraus folgend die Flussgeschwindigkeit des zu transportierenden Gases in der Pipeline ab. Gasverdichterstationen erhöhen den Druck wieder auf den benötigten Betriebsdruck und gewährleisten somit einen konstanten Gasfluss für den optimalen Betrieb des Gasnetzes. [79]

Die derzeitige Standardausführung von Gasverdichterstationen (GVS) bestehen aus drei Hauptkomponenten: der Filterungsanlage, der Verdichtereinheit und der Kühlungseinheit. Vor dem Eintritt in die Verdichterstation wird das Erdgas in einem Filterseparator von festen und flüssigen Bestandteilen gereinigt. Zur Verdichtung haben sich Gasturbinenverdichter in der Vergangenheit etabliert. Aufgrund von unterschiedlichen Gastransportvolumina muss der Verdichter einen großen Drehzahlbereich abdecken können. Dabei werden als Gasturbine abgewandelte Flugzeugturbinen verwendet, da sie durch ihre Zweiwellenbauweise diese Anforderungen erfüllen. Im Verdichter wird das Gas auf einen Druck von ca. 70 bar verdichtet. Durch die Verdichtung erwärmt sich das Gas und muss für den Weitertransport in der

Kühlungseinheit über Gaskühlerbänke von etwa 55 °C auf 30 °C abgekühlt werden. Der letzte Schritt, bevor das Erdgas wieder in die Pipeline geleitet werden darf, ist die Trocknung. Hier wird im Gas enthaltener Wasserdampf durch Glykol ausgetrieben. Der Aufbau einer klassischen Gasverdichtungsstation ist in Abbildung 3-20 dargestellt. [80]



Abbildung 3-20 Aufbau einer Gasverdichtungsstation [79]

Die GVS in Weitendorf wird als Gasturbinenverdichter mit Abwärmenutzungsanlage (AWN) ausgeführt und liefert dadurch zusätzlich zu ihrer Primäraufgabe als Verdichterstation den Nutzen von 16 MW elektrischer Leistung. Die Abwärmenutzungsanlage besteht aus einem Abhitzeessel mit nachgeschalteter Kondensationsdampfturbine. Weiters kann in Zukunft, bei ausreichendem Bedarf, das Abgas über einen zusätzlichen Wärmeübertrager für die Versorgung von Nahwärme mit einer Leistung von ca. 11 MW bis auf 90 °C abgekühlt werden. [55–57]

Abwärmequellen:

Die Abwärmequellen der Gasverdichterstation in Weitendorf sind in Tabelle 3-6 zusammenfasst.

Tabelle 3-6: Abwärmequellen Gasverdichterstation Weitendorf [56, 81]

Abwärmequelle	Medium	Temperaturniveau [°C]
Rauchgas am Turbinenausgang	Abgas	140
Kühlluft der Kühlungseinheit	Abluft	18

4 METHODIK

In diesem Kapitel wird die systematische Vorgehensweise zur Bestimmung der Abwärmepotentiale in den ausgewählten Industriestandorten bis zum Schlüsseljahr 2050 erläutert. Dies umfasst die Strategie zur Szenarienentwicklung der einzelnen energieintensiven Unternehmen ebenso wie die Beschreibung der erstellten Szenarien. Zudem werden die gängigen Methoden zur Berechnung von Abwärmepotentialen aus der Literatur vorgestellt und tiefer auf die Berechnungsgrundlage der bereits für das Basisjahr berechneten Abwärmepotentiale eingegangen. Abgeschlossen wird das Kapitel mit der Vorgehensweise der in dieser Arbeit durchgeführten Weiterentwicklung der Abwärmepotentiale.

4.1 Szenarienentwicklung

Wie in Kapitel 3.8 erläutert fällt Abwärme als Nebenprodukt von Industrieprozessen an und wird aus diesem Grund meistens nicht bilanziell erhoben. Um die Entwicklung der Abwärmemengen für die Zukunft darzustellen, ist eine Kennzahl erforderlich, die im direkten Zusammenhang mit der entstehenden Abwärme steht. Aus diesem Grund werden für diese Arbeit Szenarien gebildet, die es ermöglichen, mithilfe einer geeigneten Kennzahl die Abwärme bis zum Jahr 2050 darzustellen. Die Vorgehensweise für die Szenarienentwicklung kann in folgende vier Phasen eingeteilt werden:

1. Zieldefinition und Datenbeschaffung
2. Aufstellen der verschiedenen Methoden
3. Vergleich und Gewichtung der aufgestellten Methoden
4. Auswählen der passenden Methode

Zieldefinition und Datenbeschaffung:

Das Ziel dieser Arbeit besteht in der Entwicklung einer Methodik zur Darstellung der verfügbaren Abwärme der untersuchten Standorte bis zum Jahr 2050. Als Datengrundlage für die Szenarienbildung dienen:

- Erkenntnisse aus Branchenberichten der untersuchten Industrie
- Dekarbonisierungsstrategien der EU (EU-GreenDeal und RePowerEU)
- Best Available Techniques (BAT)-Dokumente der untersuchten Branchen
- Forschungsberichte, die sich bereits mit ähnlichen Fragestellungen befasst haben
- Aussagen der durchgeführten Interviews mit Experten aus der Industrie

Aus den hier gesammelten Erkenntnissen wurden im nächsten Schritt Methoden erstellt, die es ermöglichen die verfügbare Abwärme darzustellen.

Aufstellen verschiedenen Methoden:

Im Rahmen der Szenarienentwicklung wurden Methodiken entwickelt, die verschiedene Kennzahlen verwenden, um das Abwärmepotential für die Zukunft abzubilden. Durch eine Recherche wurden folgende Kennzahlen für die Darstellung der Abwärme ausgewählt:

1. Wirtschaftswachstum
2. Mitarbeiteranzahl
3. Produktionsmenge für die Zukunft aus den Branchenberichten
4. Produktionsmenge aus Trends der Vergangenheit

Wirtschaftswachstum

Anhand des Wirtschaftswachstums einer Branche können Rückschlüsse auf den Energieeinsatz und die Änderung der Produktionsmenge abgeleitet werden.

Mitarbeiteranzahl

Die Mitarbeiteranzahl ist eine beliebte Kennzahl, die es ermöglicht Informationen aus gut dokumentierten Branchen auf Branchen mit mangelndem Informationsstand umzulegen.

Produktionsmenge aus Branchenberichten

Die Berichte der jeweiligen Industriebranchen in Österreich sowie Europa fassen viele Indikatoren wie das jeweilige Wirtschaftswachstum, aber auch bevorstehende Einschränkungen wie steigende Energiepreise und Klimaziele zusammen und bündeln die Informationen, um einen umfassenden Ausblick für die Produktionsänderungen in der Zukunft zu geben.

Produktionsmenge aus Trends der Vergangenheit

Aus historischen Daten vergangener Produktionsmengen können Trends für die Zukunft entwickelt werden. Hierbei ist zu beachten, dass je nach gewähltem Zeitraum die Ergebnisse durch unübliche Ereignisse (z.B. Corona-Krise) teilweise stark verfälscht werden können.

Vergleich und Gewichtung der aufgestellten Methoden

Anschließend wurden die jeweiligen Methoden für die einzelnen Standorte aufgestellt und nach ihrer Relevanz gewichtet.

Auswahl der passenden Methode und Bestimmung der Randbedingungen

Aus den gesammelten Erkenntnissen wird nun die geeignetste Methode für die Entwicklung der Szenarien ausgewählt. Bis auf die Gasverdichterstation Weitendorf, sind alle hier untersuchten Standorte Teil der produzierenden Industrie. Für diese Industrie gibt es einen direkten Zusammenhang zwischen Energieverbrauch (Input) und der Produktionsmenge (Output). Demnach ist ebenfalls die anfallende Abwärme, unter gleichbleibenden technischen Prozessbedingungen, direkt von der produzierten Menge abhängig. Damit lässt sich die verfügbare Abwärme einfach über die Änderung der Menge beliebig skalieren. Somit wurde als Kennzahl die Produktionsmenge ausgewählt. Da die Prognosen in den Branchenberichten die bevorstehenden Transformationsprozesse für die Dekarbonisierung der Industrie in Europa berücksichtigt, wurde diese Methodik der Trendbildung aus der Vergangenheit bevorzugt. Darauf aufbauend werden nun für jeden Standort Szenarien entwickelt, welche die Produktionsmengen bis 2050 darstellen. Als Basisjahr dient hier das Jahr 2019. Im nachfolgenden Kapitel 5 werden dann die daraus abgeleiteten Abwärmemengen dargestellt.

4.1.1 Szenarienentwicklung für die Eisen- und Stahlindustrie

Die Szenarienentwicklung für die Eisen- und Stahlindustrie wird für die Primär- und Sekundärherstellung unterteilt.

Primärherstellung voestalpine Donawitz:

Aufgrund der bevorstehenden Transformation der Primärstahlproduktion in Österreich dient die eigens von der voestalpine erstellte Roadmap als Grundlage für die Szenarienbildung. Daraus geht hervor, dass die Produktionsmenge für Rohstahl am Standort Donawitz bis zum Jahr 2050 konstant bleibt, jedoch die

Menge über die Hochofenroute abnimmt und jene über Elektrolichtbogenofenroute zunimmt. In Abbildung 4-1 ist das Szenario für die Entwicklung der Produktionsmenge, sowie der Übergang hin zur Herstellung über die EAF-Route dargestellt. [82]

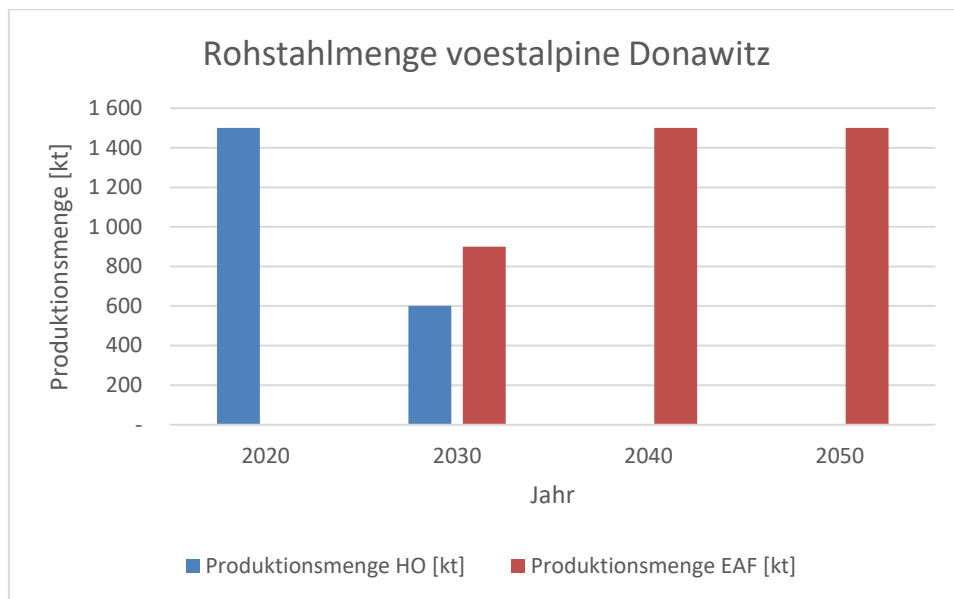


Abbildung 4-1: Entwicklung der Rohstahlmenge VA Donawitz

Im Jahr 2030 werden laut Roadmap der Voest in Donawitz etwa 850 Tausend Tonnen Rohstahl in mittels EAF produziert. Daraus folgt, dass noch etwa 600 Tausend Tonnen Rohstahl über den Hochofen mit anschließender Weiterbehandlung im Stahlwerk produziert werden. Am Standort Donawitz wird außerdem eine Sinteranlage betrieben. Da diese ebenfalls als bedeutendes Abwärmepotential dient wird auch ein Szenario für die produzierte Menge an Sintermaterial erstellt. Diese ist in Abbildung 4-2 zu sehen. [83]

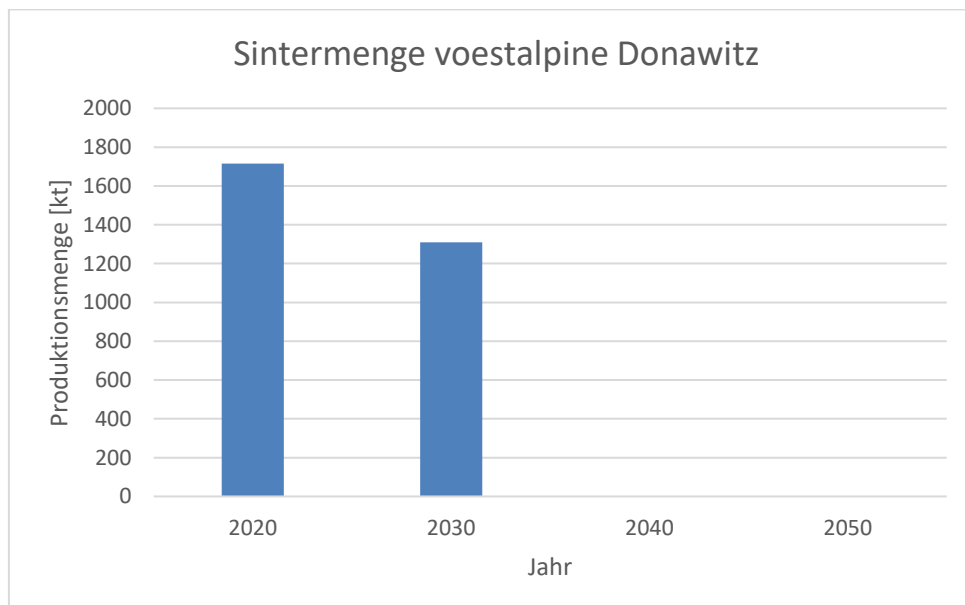


Abbildung 4-2: Entwicklung der Sintermenge VA Donawitz

Die Produktion der Sinteranlage sinkt bis 2030 auf etwa 1.310 Tausend Tonnen Sintermaterial. Ab 2040 wurde die Annahme getroffen, dass durch die Umstellung auf reinen EAF-Betrieb kein Bedarf an

Sintermaterial am Standort besteht und die Anlage aus diesem Grund nicht mehr weiterbetrieben wird. [83]

Sekundärroute von Böhler Edelstahl Kapfenberg & Marienhütte Graz:

Für die Vertreter der Sekundärstahlproduktion wird aus den Branchenberichten der EUROFER ein sehr leichter Produktionszuwachs in Europa von 0.13 % pro Jahr angenommen. Diese Produktionssteigerung wurde auch für das Szenario der Sekundärroute der österreichischen Betriebe übernommen. [9]

Die Weiterentwicklung der produzierten Menge an Stahl für die Marienhütte Graz ist in Abbildung 4-3 dargestellt.

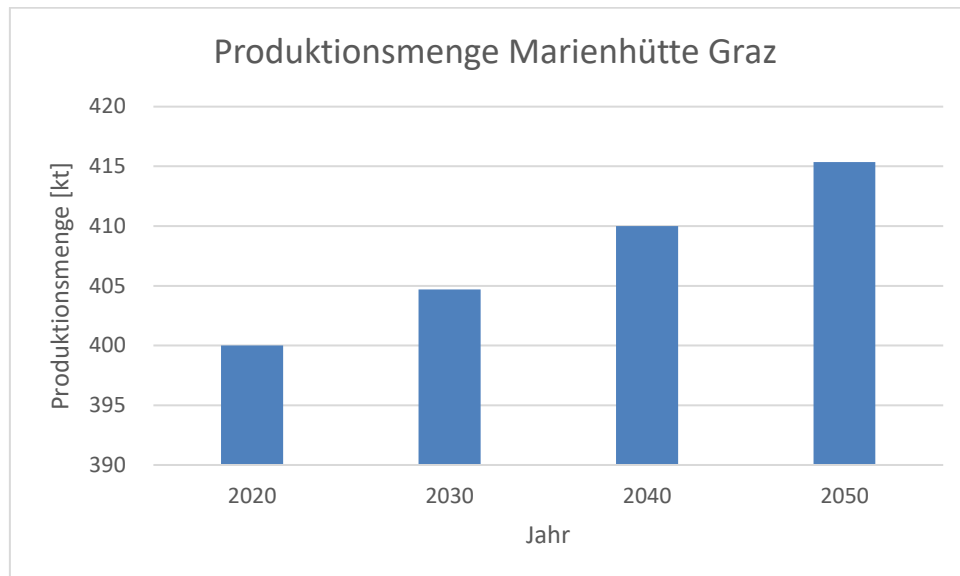


Abbildung 4-3: Produktionsmenge Marienhütte Graz

Jene Produktionsmenge für Böhler Edelstahl Kapfenberg in Abbildung 4-4 zu sehen.

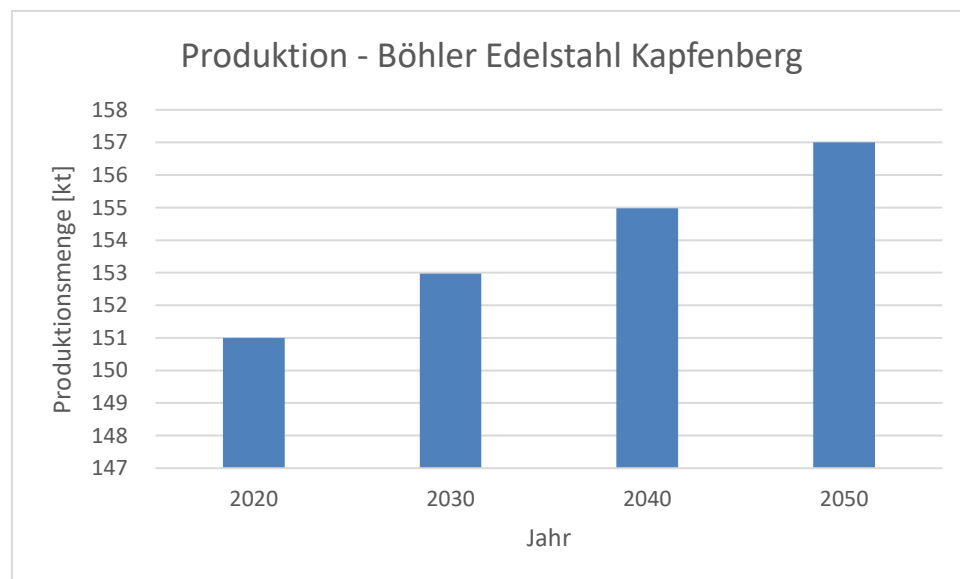


Abbildung 4-4: Produktionsmenge Böhler Edelstahl Kapfenberg

Somit produziert die Marienhütte im Jahr 2050 etwa 415.000 Tonnen an Baustahl und das Stahlwerk Böhler Kapfenberg rund 157.000 Tonnen an Edelstahl.

4.1.2 Szenarienentwicklung Papier- und Zellstoffindustrie

Für die Papier- und Zellstoffindustrie wird kein Wachstum bis zum Jahr 2050 vorhergesagt. Der Rückgang des Bedarfs an Printmedien wird durch die steigende Nachfrage nach Verpackungs- und Hygienepapieren kompensiert. Die Produktionsmengen für die Betriebe Norske Skog, Sappi Gratkorn, Zellstoff Pöls und Mayr-Melnhof Frohnleiten sind in Abbildung 4-5 zusammengefasst.

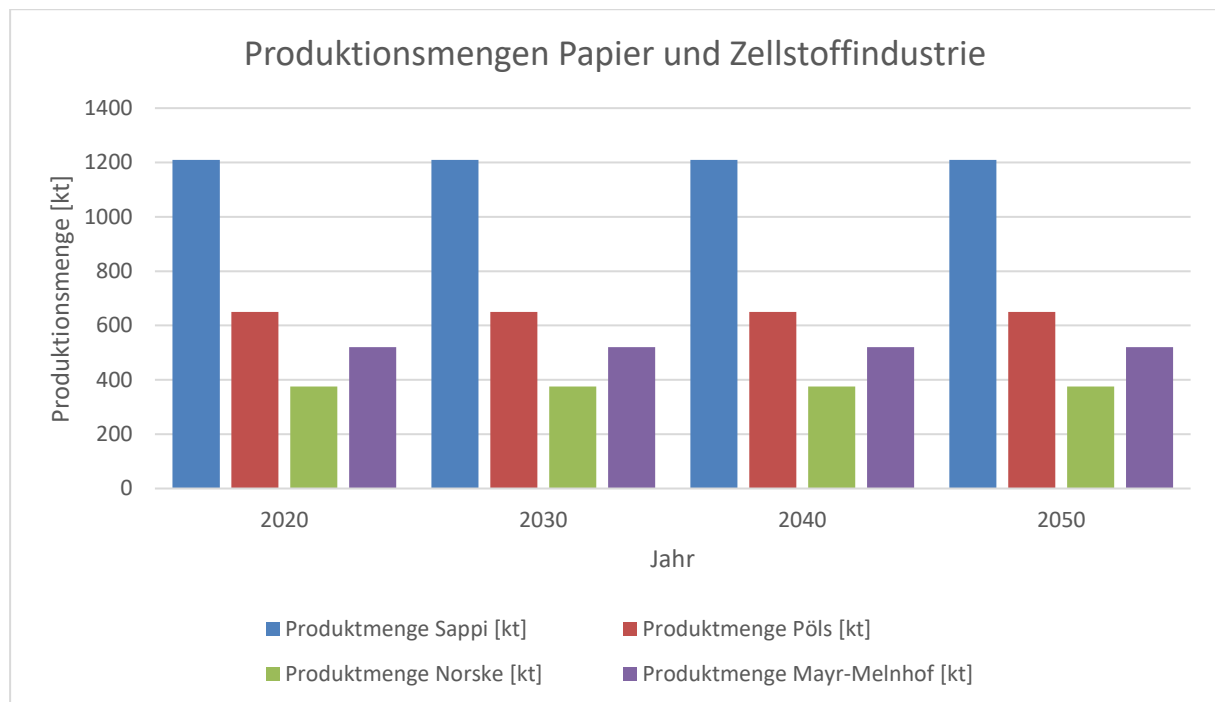


Abbildung 4-5: Änderung der Produktionsmenge in der Papierindustrie

4.1.3 Szenarienentwicklung Zementindustrie

Für die Zementindustrie wird ein konstanter Zementoutput bis 2050 prognostiziert. Jedoch soll sich der Anteil an Klinker im Zement bezogen auf das Jahr 2020 bis zum Jahr 2040 um 18 % reduzieren und anschließend bis 2050 konstant bleiben. Da die Klinkerproduktion den energieintensivsten Schritt der Zementherstellung darstellt wird für die Prognose der Abwärmemenge die Menge an produzierten Klinker herangezogen. Die Änderung der Klinkermenge im Zementwerk Holcim Retznei ist in Abbildung 4-6 dargestellt. [11]

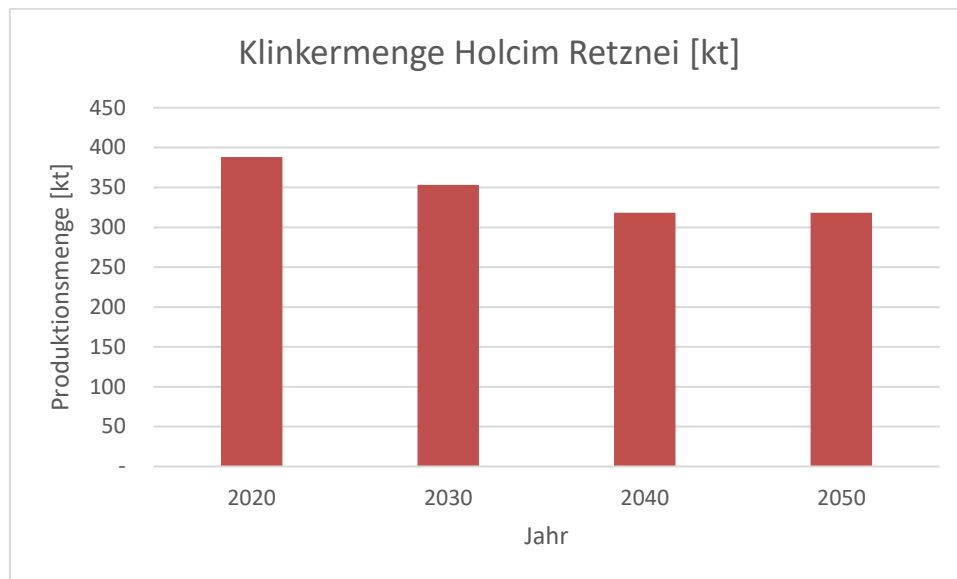


Abbildung 4-6: Änderung der Klinkermenge Holcim Retznei (eigene Darstellung)

4.1.4 Szenarienentwicklung Magnesiumindustrie

Die Nachfrage nach Magnesia ist stark von dem Bedarf an Feuerfestmaterialien abhängig. Neben der Zementindustrie ist die Eisen- und Stahlindustrie der Hauptabnehmer von Feuerfestmaterialien. Durch den leichten Anstieg in der Sekundärstahlherstellung wird für die Magnesiaproduktion die Annahme getroffen, dass dadurch auch der Bedarf an Feuerfestmaterialien steigt. Aus diesem Grund wird für diese Arbeit eine Steigerung der Magnesiaproduktion im gleichen Ausmaß wie der Zuwachs in der Sekundärstahlindustrie angenommen. Eine Erhöhung des in Österreich abgebauten Magnesit ist auch über die Bildung eines Trends über die in „World Mining Data 2023“ [84] veröffentlichten Abbaumengen von 2010 bis 2022 festzustellen. Der Trend ist aus Abbildung 4-7 zu entnehmen.

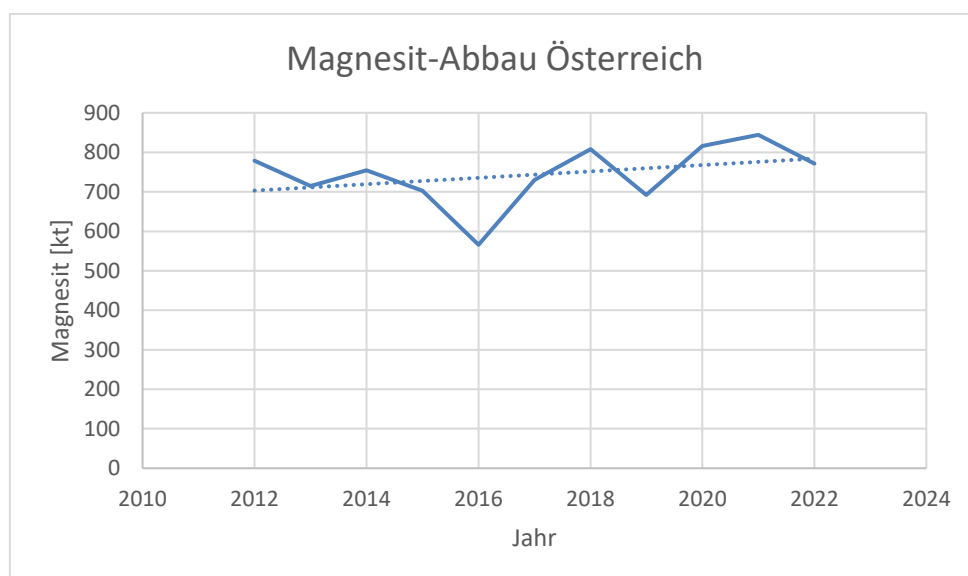


Abbildung 4-7: Trend des Magnesitabbaus in Österreich

Für den Standort Breitenau wird demnach von einer leichten Steigerung der Produktionsmenge von 0.13 % pro Jahr ausgegangen. In Abbildung 4-8 ist die Entwicklung der Produktionsmenge dargestellt.

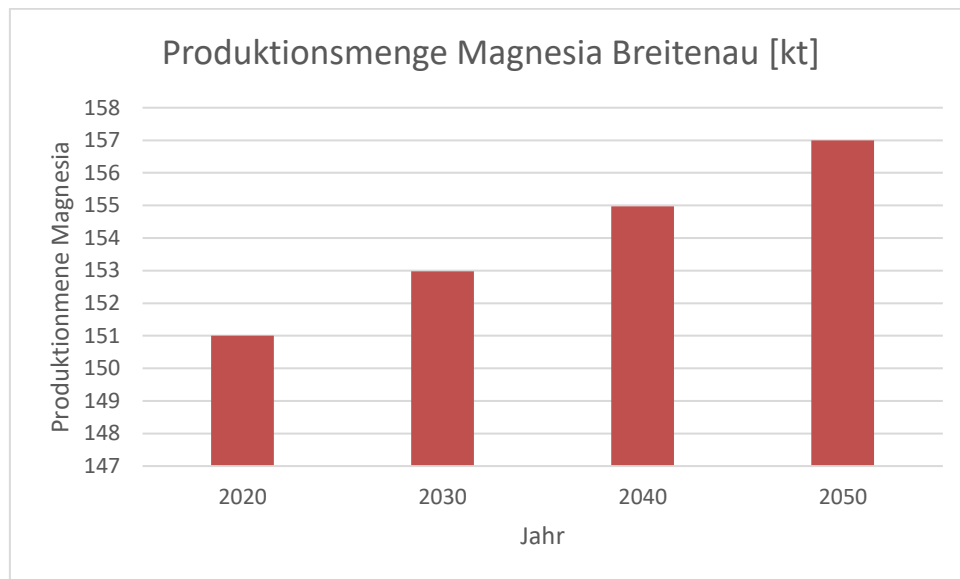


Abbildung 4-8: Produktionsmenge Magnesia Breitenau

4.1.5 Szenarienentwicklung Gasverdichterstationen

Die Gasverdichterstation in Weitendorf ist der einzige, in dieser Arbeit untersuchte Standort, welcher nicht zur produzierenden Industrie gehört. Die anfallende Abwärme der gasbefeuchten Verdichterstation ist von der transportierten Menge an Gas sowie der Druckerhöhung abhängig. Die genauen Durchflussmengen durch die Verdichterstation werden nicht veröffentlicht, jedoch können sie über die veröffentlichten Daten des *Austrian Gas Grid Management* (AGGM) aus dem Entry/Exit-Aufzeichnungen grob abgeschätzt werden. [85]

Für die Durchflussabschätzung des aktuellen Stands wird das Basisjahr 2019 herangezogen. Damit wird der Zustand vor der russischen Invasion in die Ukraine und den damit einhergehenden Folgen für die Gastransporte durch Europa abgebildet. Die Durchflussabschätzung der Transportmenge über die Verdichterstation in Weitendorf wurde folgendermaßen durchgeführt:

Wie in Abbildung 4-9 zu sehen, betritt das Erdgas am Knoten Baumgarten (Entry) das Marktgebiet Ost in Österreich. Ein Teil wird hier über die West-Austria-Gasleitung (WAG) nach Deutschland geleitet, ein Teil über die Hungaria-Austria-Gasleitung (HAG) in Richtung Ungarn und der Rest über die Trans-Austria-Gasleitung (TAG) bis nach Arnoldstein an der Grenze zu Italien und verlässt hier wieder das Marktgebiet (Exit). Im Bereich der Verdichterstation Weitendorf wird noch ein Anteil des Erdgastransportes entlang der TAG über die Süd-Ost-Leitung (SOL) bis an die Grenze zu Slowenien transportiert und verlässt bei Murfeld das Marktgebiet.

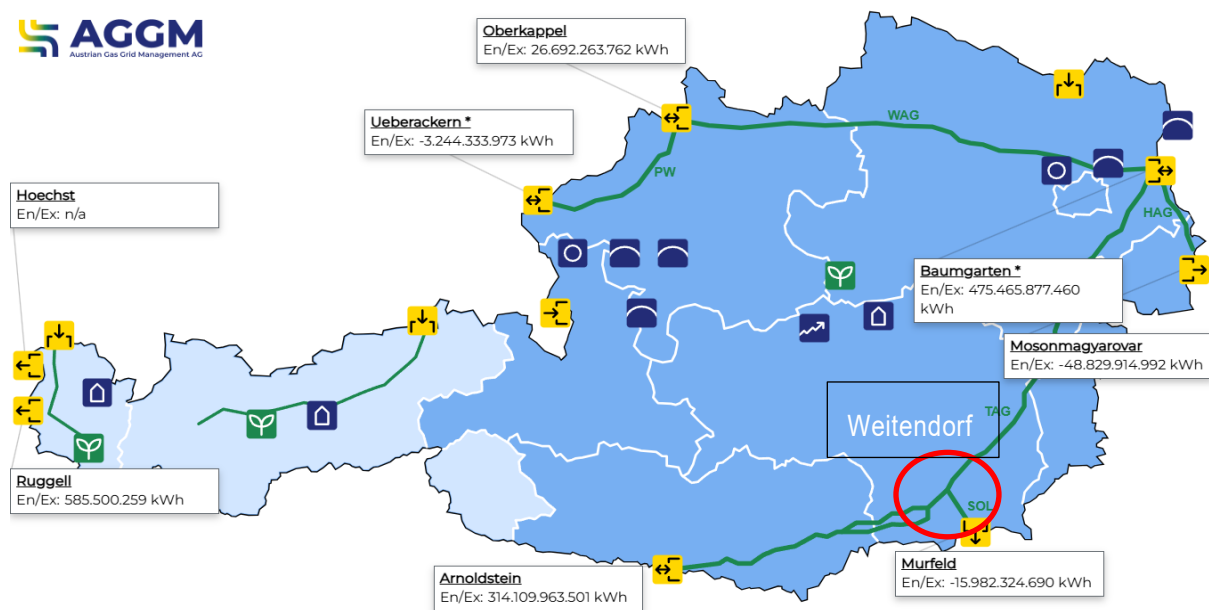


Abbildung 4-9: Physikalische Flüsse an den Ein- und Ausspeisepunkten der österreichischen Fernleitungen [86]

Anhand der Kenntnis über die Position der Verdichterstation, sowie unter der Annahme, dass die entlang der TAG ausgespeisten Mengen an Erdgas im Vergleich zu dem transportierten Mengen vernachlässigbar gering sind, ergibt sich der Volumenstrom an Gas durch die Verdichterstation in Weitendorf zu:

$$\dot{V} = \frac{E_{\text{Jahr}}}{BW_{EG}} \quad (4-1)$$

Aus dem Exit-Anteil vom Knotenpunkt Arnoldstein und Murfeld ergibt sich die jährlichen Energieflüsse E_{Jahr} über die Gasverdichterstation in Weitendorf. Anhand der Formel (4-1) und mit einem angenommenen Brennwert von Erdgas BW_{EG} von 11,11 kWh/m³ ergibt sich der jährliche Volumenstrom an Erdgas über die Gasverdichterstation. Laut Nomenklatur der AGGM sind die Exit-Anteile mit einem negativen Vorzeichen ausgestattet. In Abbildung 4-9 ist der Ausspeisepunkt in Arnoldstein jedoch als positiv dargestellt. Dies wurde bei der AGGM angemerkt und sollte in Zukunft behoben werden. Die Durchflussmenge liegt mit etwa 29,7 Mrd. m³ Erdgas pro Jahr im Bereich der von der TAG veröffentlichten Transportmenge von jährlich 30 Mrd. m³ Erdgas.

Durchflussabschätzung bis 2050

Die Gasverdichterstation in Weitendorf ist Teil der Trans-Austria-Gasleitung (TAG) und somit vor allem für den Weitertransport von Gasmengen in die südlichen Nachbarländer zuständig.

Durch den bevorstehenden Ausstieg zahlreicher Mitgliedsstaaten der EU aus russischem Erdgas wird sich die Transportmenge von Erdgas in den nächsten Jahren stark verringern. Für die Abschätzung der Durchflussmenge an Erdgas durch die TAG bis 2050 wurde stark vereinfacht die Annahme der Reduzierung des Gasverbrauchs aus der Prognose des „Natural Gas Demand Outlook 2050“ [87] für Europa angenommen. Anhand dieser Daten wurde nun die Durchflussmenge bis 2050 auf Basis der

berechneten Menge im Jahr 2019 umgelegt. Die Durchflussmenge an Erdgas bis 2050 ist in Abbildung 4-10 dargestellt.

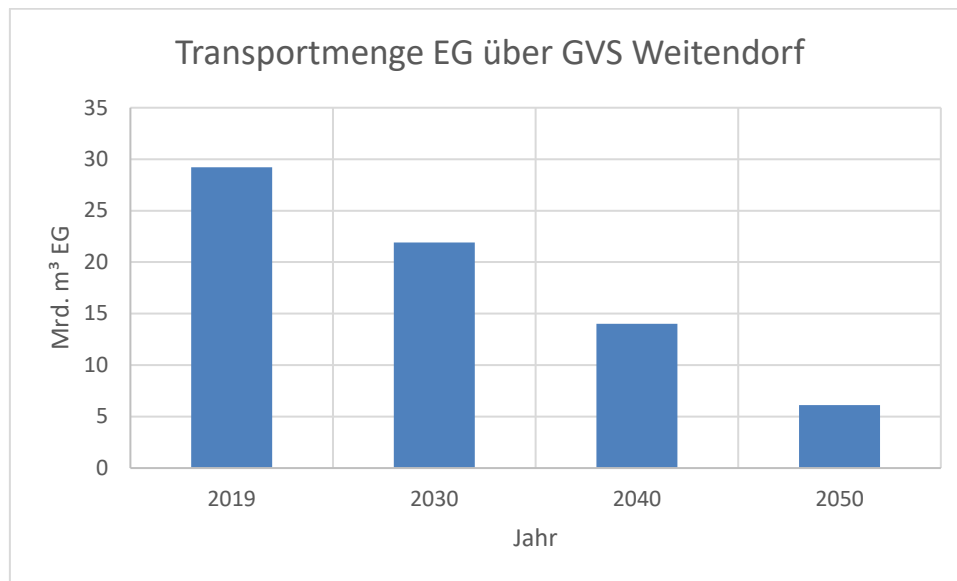


Abbildung 4-10: Durchflussmenge Erdgas über GVS Weitendorf

Für die Berechnung der Durchflussmenge getroffene Annahmen:

- Bis 2050 paralleler Erdgas- und Wasserstofftransport
- Kein Mischbetrieb mit H₂ und Erdgas in einer Pipeline
- Für die Verdichtung von H₂ werden elektrisch betriebene Kolbenverdichter verwendet. Hierbei wird ein des Gasstroms zur Kühlung der Antriebsmaschine verwendet. Die dabei entstehende Abwärme wird für diese Arbeit als vernachlässigbar angenommen.
- Der Teilstrom an Erdgas wird weiterhin mittels gasbefuerter Verdichterstationen verdichtet.
- Abschätzung über den Rückgang des Erdgasverbrauchs in Österreich und der EU (RePowerEU-Ziele)

4.2 Randbedingungen und Einflussfaktoren der Szenarien

Einfluss auf die vorhandenen Abwärmepotentiale hat vor allem das Net-Zero Ziel der EU. Dadurch sind die Unternehmen angehalten Energieeffizienzmaßnahmen, Brennstoffwechsel und neue Technologien zu verwenden. Die Prognosen für die Änderungen der Produktionsmenge stammt aus Branchenberichten der österreichischen oder europäischen Industrievertretungen und wurden durch die Aussagen der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Expertengespräche mit Vertretern der Industrie unterstützt. Die dort veröffentlichten Produktionsänderungen berücksichtigen die europäischen Klimaziele bis zum Jahr 2050 sowie die dadurch entstehenden Auswirkungen auf die Wirtschaft und Wettbewerbsfähigkeit europäischer Konzerne im Vergleich zu Drittländern, welche weitaus weniger strenge Klimaauflagen erfüllen müssen. Damit die Ziele eingehalten werden, fordert die Industrie bestimmte Randbedingungen, welche auch für die in dieser Arbeit entwickelten Szenarien als erfüllt angenommen werden. Für die Umsetzung der Technologieänderungen sowie Brennstoffwechsel werden in den hier erstellten Szenarien folgende Annahmen getroffen:

- Die Industrie kann ihre bisherigen Wirtschaftsweisen beibehalten. Produkte, die unter strengeren Klimaauflagen in der EU produziert werden, sind am Weltmarkt weiterhin wettbewerbsfähig.
- Die Infrastruktur für die Bereitstellung und Transport von grünem Gas und Wasserstoff für die Industrie ist gegeben.
- Es wird ausreichend Strom aus erneuerbaren Energien sowie Wasserstoff für die Industrie bereitgestellt.
- Energiepreise werden leistbar gestaltet. d.h. Grüne Gase müssen vergleichbar mit Erdgas sein.

4.3 Berechnungsmethodik der Abwärmepotentiale

In diesem Kapitel wird die verwendete Berechnungsmethodik zu Bestimmung der aktuellen Abwärmepotentiale sowie in weiterer Folge die Weiterentwicklung der Abwärmepotentiale der ausgewählten Standorte erläutert. Die Berechnung der Potentiale für den Referenzzustand basieren Großteils auf der im „INXS-Bericht“ [60] verwendeten Vorgehensweise. Zur Weiterentwicklung der Potentiale dienen die Ergebnisse des Berichts als Grundlage und werden mit den in dieser Arbeit entwickelten Szenarien der Produktionsmengen sowie anstehenden Technologieänderungen kombiniert.

4.3.1 Berechnungsmethoden industrieller Abwärmepotentiale

Da Abwärme aus industriellen Prozessen für ein Unternehmen (noch) keinen direkten Nutzen hat, ist die Berechnung von Abwärmepotentialen über statistisch erhobene Daten meist nicht möglich. Daher müssen sehr komplexe Energiebilanzen mit besonderem Fokus, auf das Bilanzgebiet verlassende Wärmeströme durchgeführt werden. In der Literatur findet man grundsätzlich zwei Herangehensweisen zur Bestimmung von Abwärmepotentialen. Eine Erhebung der vorhandenen Potentiale über Fragebögen oder eine Berechnung der Potentiale anhand eines Bottom-Up oder Top-Down Ansatzes. Je nach Datenbasis wird entweder die Bottom-Up Methode, die Top-Down Methode oder eine Kombination von beiden verwendet. In Abbildung 4-11 ist die Einteilung der Bestimmungsmethoden der Potentiale inklusive der dafür verfügbaren Instrumente dargestellt. [60, 88]

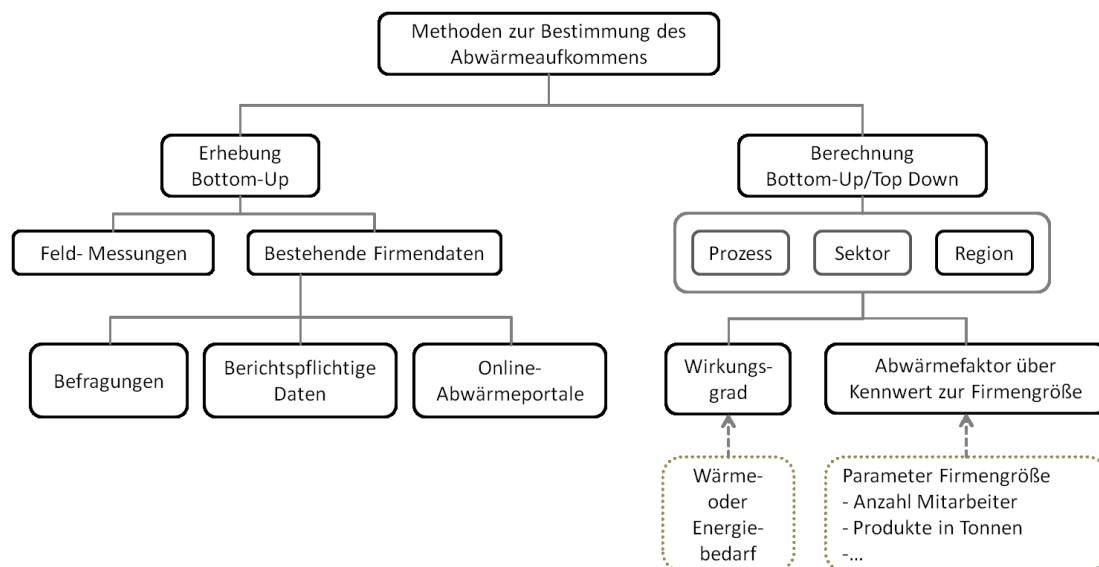


Abbildung 4-11: Einteilung der Methoden zur Bestimmung von Abwärmepotentialen [88]

Bottom-Up Methode:

Basierend auf direkten Messungen oder Erhebungen von spezifischen Daten auf unternehmensebene können je nach Datenqualität Aussagen über weitere Unternehmen bzw. ganze Sektoren gemacht werden. Als Nachteil dieser Methode wird der hohe Ressourceneinsatz für die zahlreichen Messungen gesehen. Wird die Erhebung mittels Fragebogen durchgeführt, sinkt die Ressourcenintensität aber auch die Qualität und Quantität der Daten. [60, 88]

Top-Down Methode:

Dienen als Ausgangsbasis allgemein vorhandene Daten wie Statistiken und Datenbanken spricht man von einem Top-Down Ansatz. Durch die Kombination dieser Daten mit sogenannten Proxies wie Wirkungsgraden und spezifischen Kennzahlen aus der Literatur oder mit den Ergebnissen der Erhebungen aus einer Bottom-Up-Methode können Abwärmepotentiale beliebig skaliert erhoben werden. Nachteilig ist die weitaus ungenauere Aussage. [60, 88]

INXS Abwärmepotential Erhebung:

In der Praxis wird meist eine Kombination beider Ansätze (Top-Down + Bottom-Up) verwendet. Für die Berechnung der Abwärmepotentiale der Industrie im INXS-Bericht wurde, je nach Datenlage, von einem Bottom-Up Ansatz ausgegangen und dieser durch eine Top-Down Betrachtung ergänzt. Für Unternehmen deren Prozesse bekannt und Daten zu Emissionen und Produktionsmengen vorhanden sind wurde der Bottom-Up Ansatz verwendet. Durch die zusätzliche Verwendung von Fragebögen konnten die berechneten Potentiale auch teilweise validiert werden. Für Industrieunternehmen, bei denen die Erhebung über den Bottom-Up Ansatz nicht möglich ist, wurde mit der Top-Down Ansatz über Daten aus Statistiken gerechnet. So kann über geeignete Proxy-Daten (wie z.B. der branchenspezifische Energieeinsatz pro Mitarbeiter oder aus der Literatur allgemein bekannte Temperaturniveaus) das Abwärmepotential abgeschätzt werden. [60]

Methodenportfolio INXS:

Die Vorgehensweise zur Bestimmung der Abwärmepotentiale in der Industrie ist in Abbildung 4-12 dargestellt. Ausgangspunkt für die Berechnung ist die Erhebung der eingesetzten Primärenergiemenge und den dafür verwendeten Energieträgern. Durch die Betrachtung der im Unternehmen vorliegenden Prozesse kann in weiterer Folge das Abwärmepotential bestimmt werden. Wenn vorhanden, wurden der Energiebedarf und die Abwärmemengen über Fragebögen direkt beziffert.

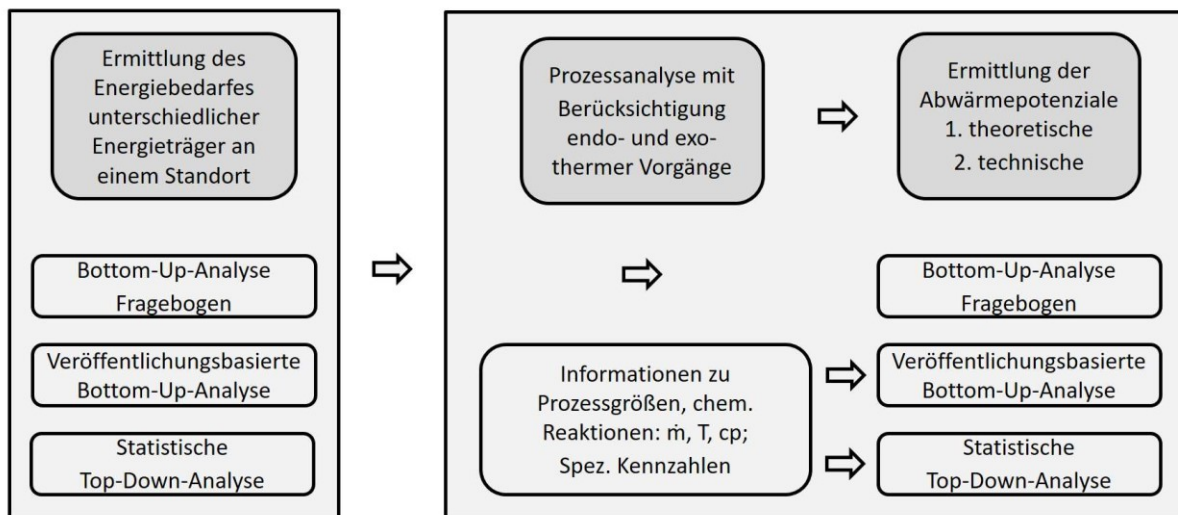


Abbildung 4-12: Vorgehensweise zur Bestimmung von Abwärmepotential im INXS-Bericht [60]

Ermittlung des Energiebedarfs:

Wie bereits erwähnt dient als Basis für die Berechnung der Abwärmepotentiale die Bestimmung des Energiebedarfs. Durch einen veröffentlichungsbasierten Bottom-Up Ansatz kann der Energiebedarf am genauesten über folgende öffentlich zugängliche Daten bestimmt werden [60]:

- Verpflichtend veröffentlichte EMAS-Berichte
- Freiwillige Umweltberichte
- Publierte Berichte von Branchenvereinigungen
- Websites der Unternehmen

Werden keine Daten zum Energieeinsatz veröffentlicht, besteht die Möglichkeit der Rückrechnung des Energiebedarfs ausgehend von öffentlich zugänglichen Emissionsdaten aus dem Emission-Trading-System (ETS-Register). In Betrieben mit produktionsbedingten CO₂-Emissionen wie der Zementindustrie, müssen diese vorher abgezogen werden. Je nach eingesetztem Energieträger und Produktionsmenge kann nun mittels Verbrennungsrechnungen auf den Brennstoffeinsatz zurückgerechnet werden.

Die letzte und ungenaueste Methode ist die Berechnung des Energieeinsatzes über die Umlegung von spezifischen Kennzahlen bezogen auf die Produktionsmenge, den Umsatz oder die Mitarbeiteranzahl aus bereits berechneten branchenähnlichen Betrieben.

Ermittlung der theoretischen Abwärmepotentiale:

Die Vorgehensweise zur Ermittlung der theoretischen Abwärmepotentiale ist in Abbildung 4-13 dargestellt und basiert auf einer möglichst genauen Abbildung des Prozesses durch das Aufstellen eines Modells aus der Literatur mit bekannten Temperaturen und Massenströmen des jeweiligen Standorts. Wenn diese Daten nicht verfügbar sind, müssen Werte aus der Literatur oder von Standorten mit vergleichbaren Prozessen übernommen werden. Für die Bestimmung der sensiblen Wärme aus dem Abgas werden Verbrennungsrechnungen durchgeführt. Mit den Abgasmassenströmen können die Leistung und über die Betriebsstunden die Energiemengen berechnet werden. Für Kühl- und Abwasserströme wird das Potential ebenfalls über den Massenstrom bestimmt. Der Anteil an latenter Wärme im Abgas wird mithilfe der spezifischen Kondensationswärme bestimmt. Heiße, strahlende Oberflächen werden über spezifische Werte aus der Literatur berechnet. Der Wärmeinhalt von Produkten wird mittels Massenstrom, der

Temperaturdifferenz und der jeweiligen spezifischen Wärmekapazität ermittelt. In den Gleichungen 4-2 bis 4-4 ist die Berechnung beispielhaft dargestellt.



Abbildung 4-13: Verfahren zur Bestimmung der Abwärmepotentiale [60]

Berechnung des theoretischen Abwärmepotentials:

Rauchgas:

Die im Rauchgas enthaltene theoretische Abwärme kann in sensible und latente (Kondensationswärme) Wärme eingeteilt werden. Die im Rauchgas enthaltene sensible Abwärme wird über folgende Berechnung (Formel 4-2) durchgeführt:

$$\dot{Q}_{\text{sensibel}} = \dot{m}_{\text{Abgas,ft.}} \cdot c_{p\text{Abgas}} \cdot (T_{\text{Abgas}} - T_{\text{ref}}) \quad (4-2)$$

Die latente Wärme wird über den Anteil an Wasser im Abgasstrom sowie über die Kondensationsenthalpie, wie in Formel 4-3 gezeigt, berechnet.

$$\dot{Q}_{\text{latent}} = \dot{m}_{\text{Abgas,wasser}} \cdot H_{\text{Kondensation}} \quad (4-3)$$

Abwasser:

Für die Berechnung des im Abwasser/Prozesswasser enthaltenen Wärme wird gleichermaßen wie zur Berechnung der sensiblen Wärmemenge im Rauchgas vorgegangen, wie Formel 4-4 beschreibt.

$$\dot{Q}_{\text{Abwasser}} = \dot{m}_{\text{Abwasser}} \cdot c_{p\text{Wasser}} \cdot (T_{\text{Abwasser}} - T_{\text{ref}}) \quad (4-4)$$

Berechnung des technischen Potentials:

Wie schon in Abschnitt 3.8 erwähnt resultiert das technische Potential aus dem theoretischen Potential unter Berücksichtigung von Wärmeverlusten, welche bei der Übertragung und Verteilung entstehen. Anstelle einer expliziten Berechnung der Wärmeverluste durch Strahlung, Konvektion und Konduktion werden in dieser Arbeit Wirkungsgrade von Wärmeübertragern als Näherung herangezogen. Zusätzlich werden die für die Wärmeübertragung notwendigen Mindesttemperaturdifferenzen (Grädigkeit)

berücksichtigt, um eine vereinfachte und dennoch genaue Analyse des thermischen Verhaltens der Systeme zu ermöglichen. Da aus Datenschutzrechtlichen Gründen nicht alle Faktoren weitergegeben werden dürfen, sind nur die wichtigsten Abminderungsfaktoren für die Berechnung des technischen Potentials in Tabelle 4-1 zusammengefasst. Die Faktoren stammen teilweise aus der Literatur teils stammen sie aus Abschätzung und Erfahrung der Autoren des INIX-Berichts.

Tabelle 4-1: Abminderungsfaktoren zur Bestimmung des technischen Potentials [60]

Abminderungsfaktor	Wert
Wirkungsgrad Wärmeüberträger	90 %
Reduktion der Kondensation durch verdünntes Abgas	80 %
Grädigkeit für Abgase	10 K
Grädigkeit Abwasser	5 K
Grädigkeit Schlacke	400 K
Grädigkeit Stahlprodukte	100 K
Grädigkeit Abstrahlung Drehrohrofen	200 K

4.4 Weiterentwicklung der Abwärmepotentiale bis 2050

Die Weiterentwicklung der in dieser Arbeit untersuchten Abwärmepotentiale der Papier- und Zellstoffindustrie, Eisen- und Stahlindustrie, Zement- sowie die Magnesiaindustrie basieren auf den veröffentlichten Ergebnissen des INXS-Berichts. [60] Für die Berechnung des Abwärmepotentials der Verdichterstation Weitendorf wird eine abgeänderte Berechnung nach dem Schema von Murhammer et al. [81] verwendet. In weiterer Folge wird die Vorgehensweise der Berechnung erläutert.

Vorgehensweise

Die Vorgehensweise für die weitere Berechnung der Abwärmepotentiale umfasst die Einbeziehung bevorstehender Brennstoffwechsel sowie die Anpassung der Produktionsmengen der produzierenden Standorte bzw. der Durchflussmenge für die Verdichterstation aus den zuvor aufgestellten Szenarien. Darüber hinaus werden die technisch erforderlichen Prozessanpassungen für die Einhaltung der EU-Klimaziele bis 2050 berücksichtigt.

Definieren der Bilanzgrenzen

Die Bestimmung von Abwärmepotentialen wird als Energiebilanz, mit besonderem Fokus auf jene die Bilanzgrenze verlassenden Wärmeströme, betrachtet. Damit die Abwärmemengen bestimmt werden können, muss zuerst die Bilanzgrenze bestimmt werden. Als betrachteter Bilanzzeitraum wird ein Jahr herangezogen. Bei der produzierenden Industrie wird von 8000 Volllaststunden ausgegangen. Damit werden mögliche Wartungsarbeiten sowie Betriebsurlaube mitberücksichtigt. Aufgrund der Versorgungssicherheit werden Gasverdichterstationen redundant ausgeführt. Dadurch ist der durchgehende Betrieb gesichert und es kann eine Betriebsdauer von 8760 Stunden jährlich angenommen werden. Die untersuchten Prozesse dienen vorrangig der Stoffumwandlung. Es gibt demnach in das System eintretende und das System verlassende Massen- und Energieströme. Aus diesem Grund wird

von einem offenen System ausgegangen. Damit ein Potential bestimmt werden kann, muss zuerst ein Referenzzustand definiert werden. Für die Bestimmung der theoretischen und technischen Potentiale wird als Referenzzustand der Normalzustand mit 0 °C und 1.013 bar festgelegt. Für Industriebetriebe mit eigener Energieversorgung werden diese Anlagen ebenfalls mitbilanziert. Eine beispielhafte Darstellung der Bilanzgrenzen ist in Abbildung 4-14 zu sehen.

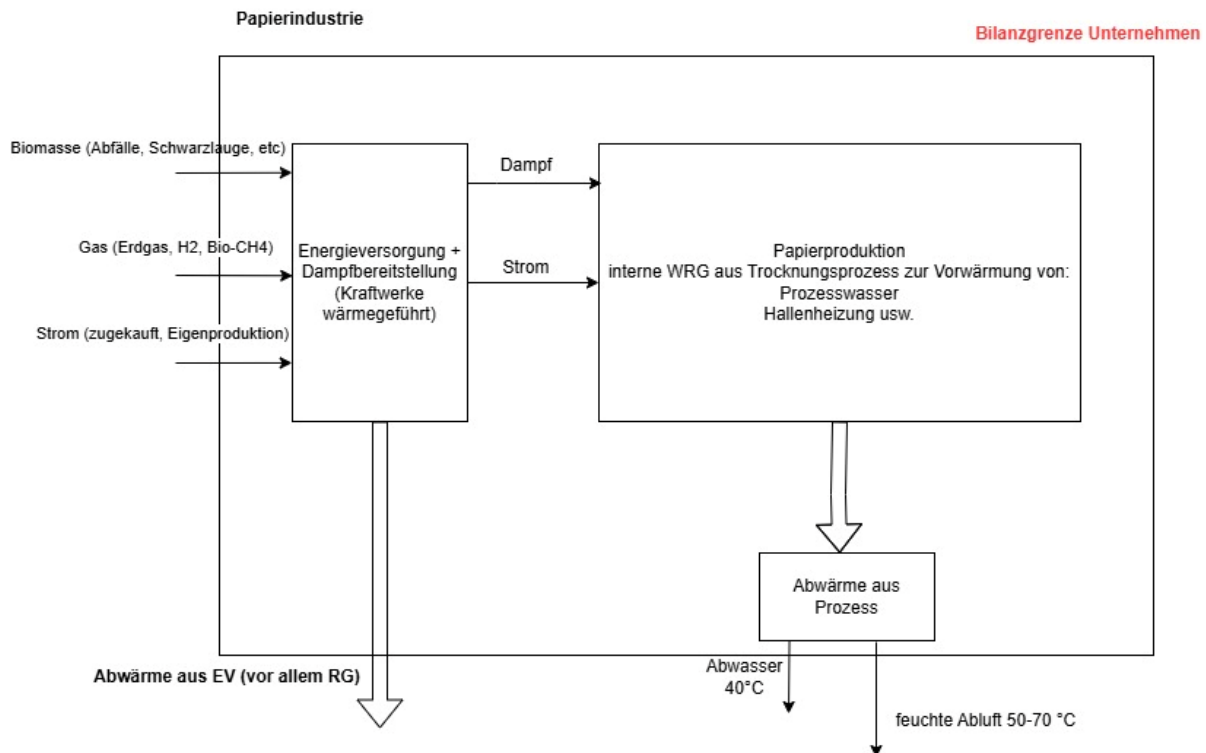


Abbildung 4-14: Beispielhafte Bilanzgrenze der Papierindustrie (eigene Darstellung)

Anpassung der Produktionsmengen

Für manche Standorte wird eine Änderung der Produktionsmenge bis 2050 angenommen. Um dies zu berücksichtigen, muss der Energieeinsatz pro Produktionsmenge festgestellt und auf die neue Produktionsmenge angepasst werden. Für die Berechnung des Abwärmepotentials der Gasverdichterstation werden die Durchflussmengen angepasst.

Änderung des eingesetzten Brennstoffs

Eine Schlüsselkomponente für die Dekarbonisierung der Industrie ist der Umstieg auf erneuerbare Energieträger. In der Papier- und Zellstoffindustrie wird bei Sappi Gratkorn im Jahr 2019 bilanziell noch ein Anteil an Steinkohle eingesetzt. Dieser Anteil wird bereits für das Jahr 2030 mit Biomasse substituiert. Weiters wurde für das Jahr 2050 für alle Branchen die Substitution von Erdgas durch grünen Wasserstoff durchgeführt. Für die Berechnung der zu substituierenden Menge an Wasserstoff wird wie folgt vorgegangen:

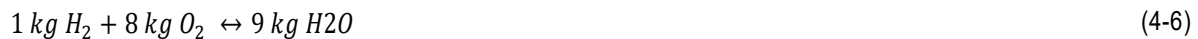
1. Aufstellen der Reaktionsgleichung für die Verbrennung von H₂ unter Luft
2. Bestimmung des Mindestluftbedarfs
3. Bestimmung des Luftbedarfs unter Verwendung einer geeigneten Luftzahl
4. Umrechnen auf die Menge H₂ über Energiedichten (Brennwert)

5. Berechnung der Abgaszusammensetzung bei der Verbrennung von Wasserstoff an Luft

In Gleichung (4-5) ist die Reaktionsgleichung von Wasser mit Sauerstoff dargestellt.



Diese wurde unter Berücksichtigung der Molmassen in Gleichung (4-6) in eine Massengleichung für 1 kg Wasserstoff umgeformt.



Aus Gleichung (4-6) folgt der Mindestsauerstoffmenge $O_{2, \min}$ von 8 kg Sauerstoff pro 1 kg Wasserstoff. Unter Verwendung der Zusammensetzung von Luft folgt der Mindestluftbedarf L_{\min} in Gleichung (4-7).

$$L_{\min} = \frac{O_{2, \min}}{0.21} \quad (4-7)$$

Unter der Annahme einer atmosphärischen Verbrennung wird eine Luftzahl von $\lambda = 1.4$ verwendet. Damit lässt sich nun der Luftbedarf L für die Verbrennung von H_2 nach Gleichung 4-8 bestimmen:

$$L = L_{\min} * \lambda \quad (4-8)$$

Technologiewandel

Um die Dekarbonisierungsziele zu erreichen, ist in einigen Industriezweigen der Einsatz neuer Technologien erforderlich. Als Beispiel gilt hier die Primärstahlindustrie, die eine Transformation von der konventionellen Hochofenroute hin zur Produktion mit Elektrolichtbogenöfen vollzieht.

4.4.1 Vorgehensweise Eisen- und Stahlindustrie

In diesem Unterkapitel wird nun die Vorgehensweise der Berechnung der Abwärmepotentiale in der Eisen- und Stahlindustrie beschrieben. Aufgrund der grundlegend unterschiedlichen Prozesse muss zwischen der Primär- und Sekundärstahlproduktion unterschieden werden.

Voestalpine Donawitz

Die Voestalpine dient als einziger Vertreter eines integrierten Stahlwerks in Österreich. Das integrierte Stahlwerk besteht aus den Teilen: Sinteranlage, Hochofen, Stahlwerk sowie dem Kraftwerkspark als Nebenanlage. Diese Anlagen wurden getrennt betrachtet und anschließend zur Potentialbildung für den Standort zusammengefasst. Als Beispiel für die Modellbildung des integrierten Stahlwerks wird die Sinteranlage vorgestellt.

Modell Sinteranlage

Die Modelle zur Berechnung der Abwärmepotentiale stammen teilweise aus den Berechnungsgrundlagen des INXS-Berichts. Das Verfahrensschema stammt aus den BAT-Dokument [69] und die Temperaturen sowie spezifischen Energiemengen aus der Literatur [63].

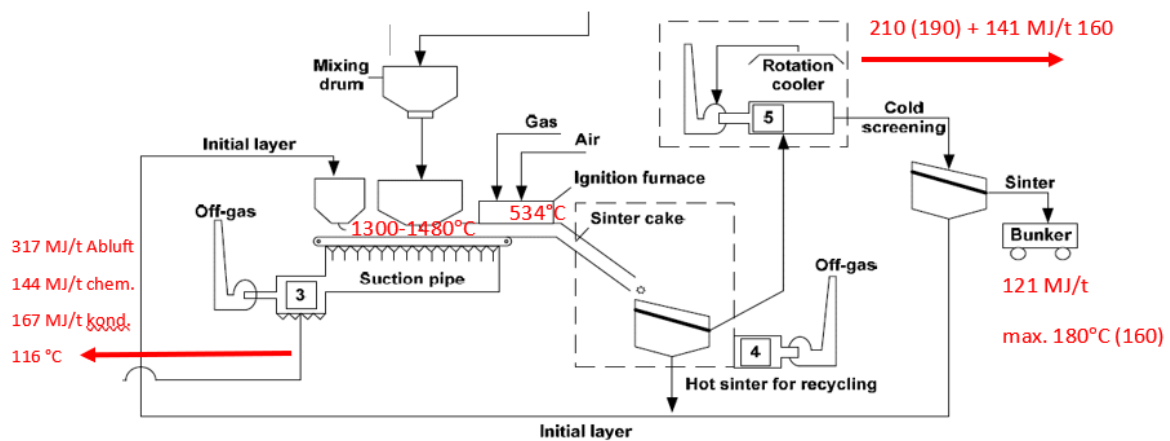


Abbildung 4-15: Modell der Sinteranlage [60]

Betrachtete Abwärmepotentiale

Die betrachteten Abwärmepotentiale für die voestalpine Donawitz sind in der nachfolgenden Tabelle 4-2 zusammengefasst.

Tabelle 4-2: Zusammenfassung der betrachteten Abwärmepotential VA Donawitz

Sinteranlage	Hochofen	Stahlwerk	EAF	Kraftwerk
Abgasenergie	Abgasenergie	Abgasenergie	Abgasenergie	Abgasenergie
Sinterkühler	Kühlwasseraus	Kühlwasser	Verbrennung C +	Wärme aus
Wärmeenergie	Kühlturm	Wärmeenergie	Falschluff am EAF	Kondensator
Sinter	Wärmeenergie	Schlacke & Stahl	Wärmeenergie	Druckluft
	Schlacke		Schlacke & Stahl	
			Kühlwasser	

Technologieänderung

Nach dem erstellten Szenario sowie der veröffentlichten Roadmap der voestalpine Donawitz wird ab 2027 der erste von zwei Hochöfen durch einen EAF ersetzt. Damit reduziert sich die Menge an produzierten Roheisen über die Hochofenroute sowie die Menge an Rohstahl aus dem Stahlwerk. Als neues Potential tritt dafür der Elektrolichtbogenofen auf. Ab 2030 soll der zweite EAF den verbleibenden Hochofen ablösen. Aus diesem Grund wurde für das Potential 2040 die Annahme getroffen, dass Stahl nur noch über die beiden Elektrolichtbogenöfen hergestellt wird. Die beiden Hochöfen sowie die Sinteranlage, das Stahlwerk und das thermische Kuppelgas-Kraftwerk wird für das Abwärmepotential 2040 nicht mehr betrachtet.

Modell Sekundärstahlherstellung

Für die Berechnung der Stahlwerke Böhler Edelstahl und Marienhütte Graz diente das in Abbildung 4-16 dargestellte Verfahrensschema eines Elektrolichtbogenofens als Grundlage. Die dargestellten Mengen sind auf die Tonne an produzierten Rohstahl bezogen.

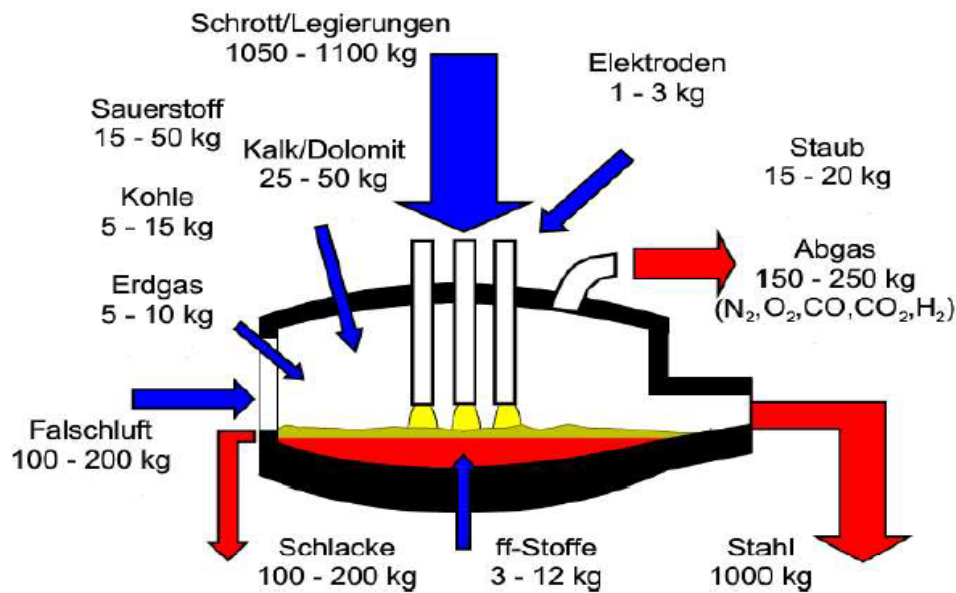


Abbildung 4-16: Modell des EAF [66]

Das Modell stellt die vorhandenen Abwärmepotentiale eines klassischen Elektrolichtbogenofens dar. Das Potential aus der Kühlung des EAF ist in der Abbildung nicht dargestellt.

Betrachtete Abwärmepotentiale

- Abgasenergie Erdgas
- Verbrennung Kohlenstoff + Falschluff EAF
- Wärmeenergie Schlacke+ Stahl
- Kühlwasser

Technologieänderungen

Für die Sekundärstahlerzeugung mittels EAF werden bis 2050 keine Technologieänderungen angenommen.

4.4.2 Vorgehensweise Papier- und Zellstoffindustrie

Die Prozesse in den untersuchten Standorten der Papier- und Zellstoffindustrie sind grundsätzlich sehr ähnlich und unterscheiden sich Großteils nur durch die Anteile der eingesetzten Energieträger.

Modell Papierherstellung inklusive Zellstoffproduktion

Zur Bestimmung der Abwärmepotentiale in der Papier- und Zellstoffindustrie muss zuerst ein repräsentatives Modell aufgestellt werden. Anhand der ablaufenden Prozesse können die Abwärmeströme definiert werden und anschließend berechnet werden. In Abbildung 4-17 ist ein beispielhaftes Modell mit den untersuchten Abwärmepotentialen dargestellt. Die noch nicht erfassten Abwärmepotentiale umfassen vor allem die Kühl- und Abwässer. Diese befinden sich ganzjährig auf niedrigen Temperaturniveaus (40 °C).

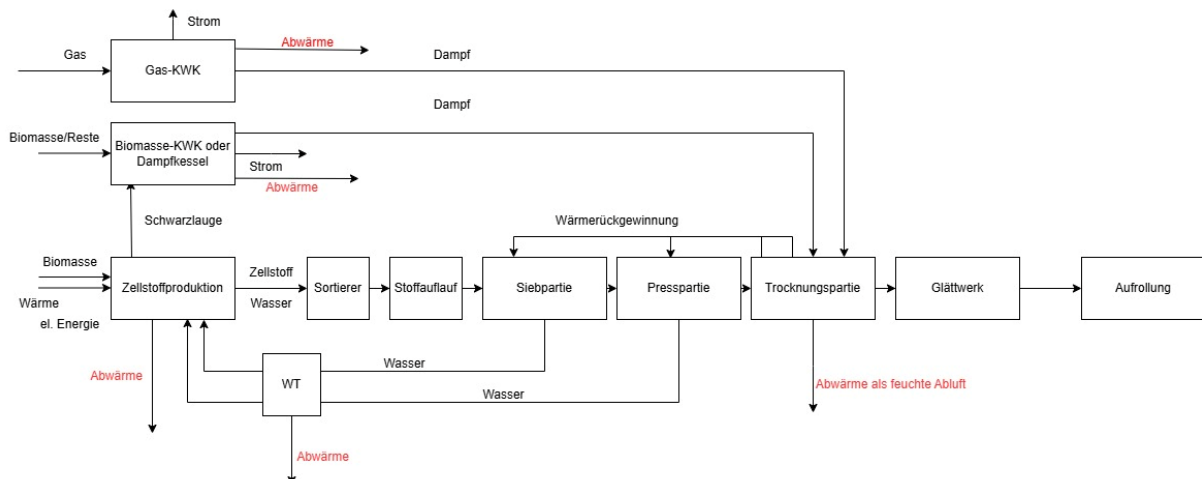


Abbildung 4-17: Modell eines Zellstoff- und Papierwerks (eigene Darstellung nach Vorlage von [72])

Aus dem Modell können nun die Abwärmepotentiale herausgelesen werden.

Abwärmepotentiale

- Abgasenergie (Erdgas, Biogas, Steinkohle)
- Papiertrocknung und Kochen
- Abgasenergie Schwarzlauge
- Produkt & Hallenwärme
- Ab- und Kühlwasser

Technologieänderungen:

Die heutige Produktionsroute der Papierherstellung ist nahe dem Optimum. Für die Zukunft sind deshalb keine großen Prozessumstellungen geplant. Für das Jahr 2050 wird jedoch die Umstellung der fossilen Energieträger auf Wasserstoff berücksichtigt.

4.4.3 Vorgehensweise Zementindustrie

In diesem Unterkapitel wird die Vorgehensweise für die Zementindustrie näher erläutert. Als Vertreter der Zementindustrie wird der Standort Holcim Retznei näher betrachtet.

Modell Zementwerk

Das verwendete Modell für die Zementherstellung ist in Abbildung 4-18 dargestellt und stammt aus der Berechnungsgrundlage des INXS-Berichts.

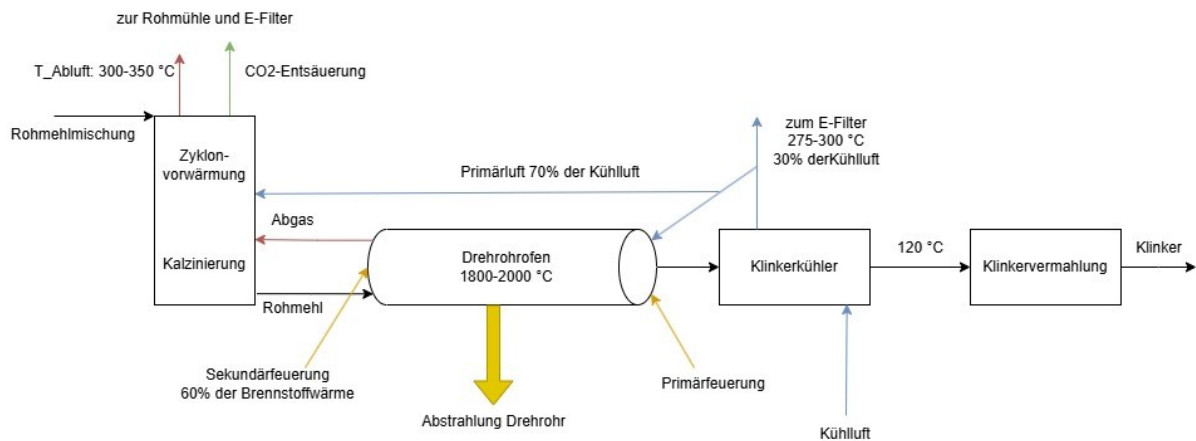


Abbildung 4-18: Modellansatz für die Zementindustrie (eigene Darstellung nach Vorlage [60])

Das Modell bietet nun die Möglichkeit die vorhandenen Abwärmquellen zu bestimmen.

Betrachtete Abwärmepotentiale

- Abgasenergie
- Abstrahlung am Drehrohr
- Klinkerkühler

Technologieänderung

Für das Zementwerk Retznei werden keine Technologieänderungen für die Zementherstellung angenommen. Zu Beginn dieser Arbeit wurde die Installation einer Carbon Capture Anlage überlegt. Aus den Expertengespräch wurde jedoch abgeleitet, dass dies für den Standort Retznei, nach aktuellem Stand, nicht geplant ist.

4.4.4 Vorgehensweise Magnesiumindustrie

Hier wird auf die Vorgehensweise für die Weiterentwicklung der Abwärmepotentiale in der Magnesiaindustrie tiefer eingegangen.

Modell Magnesiaherstellung

In Abbildung 4-19 ist das verwendete Modell aus der Berechnungsgrundlage des INXS-Berichts für die Magnesiaherstellung abgebildet. Aufgrund des sehr ähnlichen Prozessablaufs der Magnesia- und der Zementherstellung können auch ähnliche Abwärmepotentiale festgestellt werden.

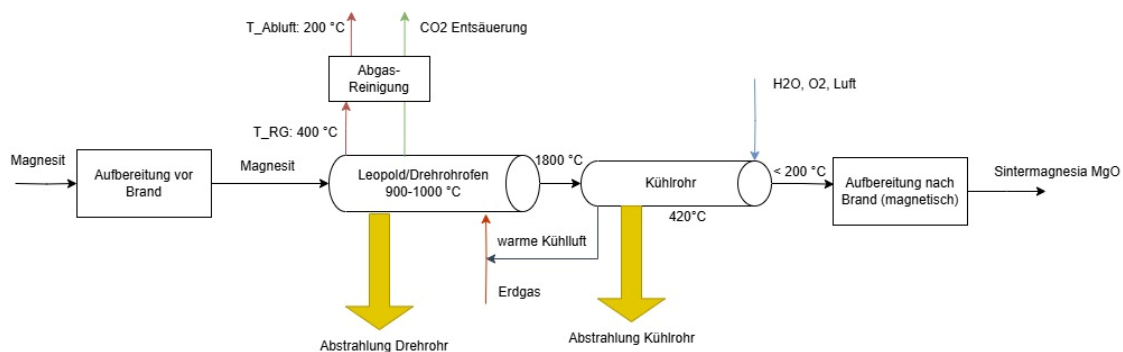


Abbildung 4-19: Modell Magnesiaherstellung (eigene Darstellung nach Vorlage [60])

Betrachtete Abwärmepotentiale:

Aus dem Modell lassen sich folgende Abwärmequellen feststellen

- Abgasenergie
- Abstrahlung am Drehrohr
- Abluft am Kühlrohr

Technologieänderung

Für die Magnesiaherstellung werden keine Technologieänderungen angenommen. Auch hier wird nur die Brennstoffumstellung von Erdgas auf Wasserstoff betrachtet.

4.4.5 Vorgehensweise Verdichterstation

Da das Modell der Gasverdichterstation nicht auf den Ergebnissen des INXS-Berichts basiert, wird in diesem Unterkapitel auch weiter auf die Berechnungsgrundlage eingegangen.

Modell Gasverdichterstation

Die Abbildung 4-20 zeigt das Modell der Gasverdichterstation in Weitendorf mit der bereits vorhandenen Abwärmenutzungsanlage. Das Abwärmepotential der GVS wurde in dieser Art, für das Basisjahr 2019, noch nicht aufgestellt und wird im Weiteren präziser erläutert.

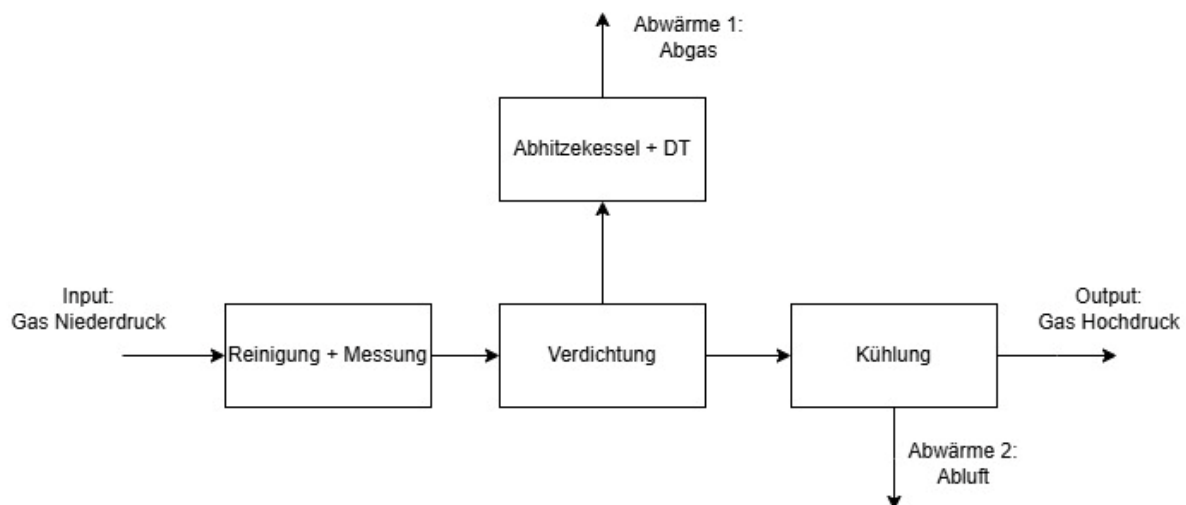


Abbildung 4-20: Modell der GVS Weitendorf (eigene Darstellung in Anlehnung an die Vorlage der Gas Connect Austria sowie Murhammer) [79, 81]

Turbinenabluft

Die Berechnungsmethodik für den Ist-Stand basiert auf der Vorgehensweise von Murhammer et al. [81]. Für die Bestimmung der Abwärmemenge der Turbinenabluft muss zuerst der Energieeinsatz für den Betrieb der Turbine mittels Verbrennungsrechnung aus dem im ETS-Register veröffentlichten CO₂-Ausstoß zurückgerechnet werden. Als Abweichung zur Berechnung von Murhammer et al. [81] wird in dieser Arbeit jedoch, die Abwärmenutzungsanlage (AWN) mitberücksichtigt. Aus dem UVP-Bescheid ist damit die deutlich niedrigere Rauchgastemperatur von 140 °C zu entnehmen. [56]

Abwärme aus Gaskühlung

Die Abwärmemenge aus dem Abkühlprozess nach der Verdichtung ist abhängig von der Durchflussmenge sowie der Druckdifferenz und wird wie folgt nach der Berechnung von Murhammer et al. [81] bestimmt:

- Es wird der angenäherte Durchfluss benötigt.
- Die Druckdifferenz ist nicht bekannt, deshalb wird die Verdichtung auf den Maximaldruck von 70 bar angenommen.
- Aus der Druckerhöhung ergibt sich die Temperaturerhöhung über die Verdichtung.
- Die Verdichterleistung ist dem UVP-Bescheid zu entnehmen.
- Bestimmung der Verdichterarbeit aus der Verdichterleistung.
- Aus der Verdichterarbeit kann die Erwärmung des Erdgases bei einer isentropen Verdichtung bestimmt werden. Als Referenztemperatur wird aufgrund der Einheitlichkeit zu den Potentialen ebenfalls 0 °C eingesetzt.
- Aus dieser Temperaturerhöhung kann die Abwärme des verdichteten Gases bestimmt werden
- Das Gas wird vor dem Eingang in die Pipeline auf die Eintrittstemperatur von 0 °C abgekühlt.

Weiterentwicklung

Für die Weiterentwicklung des Abwärmepotentials wurden die Berechnungen von Murhammer et al. [81] auf die neue Abgastemperatur durch die AWN angepasst. Weiters wurde die Durchflussmenge anhand des erstellten Szenarios reduziert. Aus der Literaturstudie [38] geht hervor, dass Wasserstoff nur unter speziellen Bedingungen über Turboverdichter komprimiert werden kann. Zum aktuellen Zeitpunkt konnten keine verlässlichen Aussagen über die zukünftigen Transportmengen von Wasserstoff über die TAG getroffen werden. Aus diesem Grund und auf Basis der Annahmen, dass in Wasserstoffverdichterstationen Kolbenverdichter anstelle von Turboverdichtern eingesetzt werden und diese nur ein geringes Abwärmepotential aufweisen, wurde geschlussfolgert, dass zukünftig in solchen Stationen keine nennenswerte Abwärme entstehen wird. Daher wurde in dieser Arbeit nur das Abwärmepotential von erdgasbefeuerten Turboverdichtern berücksichtigt. Das Abwärmepotential aus dem Abgas wird über die prozentuelle Änderung der Durchflussmenge abgeleitet. Jenes aus der Gaskühlung wurde direkt aus der Änderung der Durchflussmenge bestimmt.

5 ERGEBNISSE DER ABWÄRMEPOTENTIALENTWICKLUNG

In diesem Kapitel werden nun die Ergebnisse der technischen Abwärmepotentiale der betrachteten Standorte ausgehend von Basisjahr 2019 über die Stützjahre 2030 und 2040 bis zum Schlüsseljahr 2050 dargestellt und diskutiert. Für eine bessere Vergleichbarkeit sind die Ergebnisse für alle Branchen auf die Temperaturniveaus 0 bis 50 °C, 50 bis 100 °C und über 100 °C bezogen. Die Ergebnisse beziehen sich dabei immer auf die untere Referenztemperatur des gewählten Temperaturniveaus. So werden Abwärmepotentiale mit Temperaturen über 100 °C zunächst auf die Temperatur 100 °C bezogen und weiters auf 50 °C bzw. 0 °C. Zunächst wird das Abwärmepotential aller untersuchten Standorte angeführt und diskutiert. In weiterer Folge wird für jene Branchen mit mehreren untersuchten Standorten ein Überblick gegeben und anschließend genauer auf die einzelnen Standorte eingegangen. Zusätzlich werden die Potentiale auch, so weit wie möglich, nach den eingesetzten Energieträgern kategorisiert. Im Anhang befinden sich die detaillierten Ergebnisse jedes untersuchten Standorts.

5.1 Technisches Abwärmepotential aller untersuchten Standorte

In Abbildung 5-1 ist das technische Potential aller in dieser Arbeit untersuchten Standorte der vier untersuchten Industriebranchen sowie die Gasverdichterstation in Weitendorf zusammengefasst.

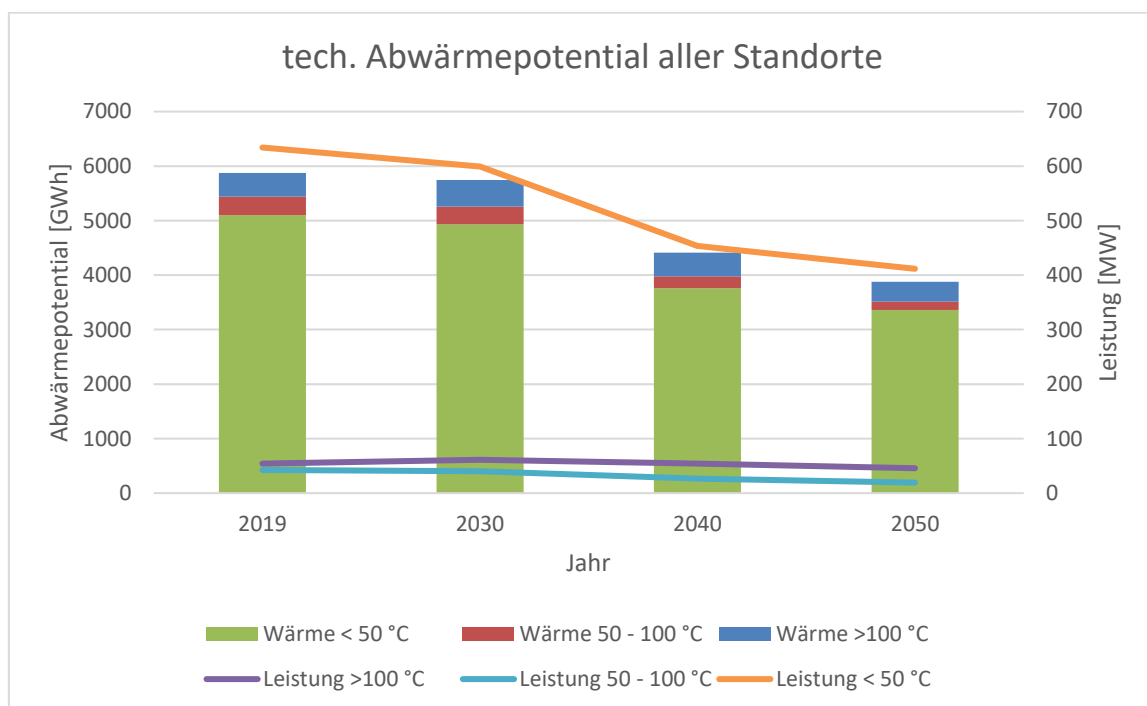


Abbildung 5-1: technisches Abwärmepotential aller untersuchten Standorte

Den überwiegenden Anteil des Abwärmepotentials stellt der Temperaturbereich bis 50 °C dar. In diese Kategorie fallen vor allem die Potentiale der Kühl- und Abwässer. Der Anteil an Abwärme im Bereich über 100 °C stammt vermehrt aus dem restlichen Energieinhalt des Abgases und aus der Abstrahlung von heißen Oberflächen oder Produkten. Insgesamt sinkt das berechnete Abwärmepotential von knapp 5700 GWh im Basisjahr 2019 auf etwa 3800 GWh im Schlüsseljahr 2050.

5.2 Eisen- und Stahlindustrie

Die Eisen- und Stahlindustrie wird in die Primärherstellung aus Eisenerz bzw. in Zukunft aus direkt reduziertem Eisenschwamm und in die Sekundärherstellung, durch Einschmelzen von Stahlschrott, unterteilt. Die Primärroute durchläuft in naher Zukunft einige Transformationen, welche sich auch auf die verfügbare Abwärme auswirken.

Zunächst wird in Abbildung 5-2 ein Überblick über die Änderung des technischen Abwärmepotentials der gesamten Eisen- und Stahlbranche gegeben. Als Vertreter wurden in dieser Arbeit die Standorte voestalpine Donawitz, Böhler Edelstahl Kapfenberg und Marienhütte Graz untersucht. Die Umstellung der voestalpine am Standort Donawitz von der Hochofenroute hin zu einer vollständigen Stahlproduktion mittels Elektrolichtbogenofen macht sich auch deutlich im Abwärmepotential bemerkbar. Durch den Technologiewechsel auf Basis von neuen Rohstoffen (DRI, Eisenschrott) entfallen für das Jahr 2040 wesentliche Komponenten der Hochofenroute, darunter die Sinteranlage und das Stahlwerk sowie die hauptsächlich über die Kuppelgase betriebenen thermischen Kraftwerke. Damit entfällt auch das entsprechende Abwärmepotential dieser Anlagen. Das Potential der Sekundärherstellung steigt durch den Zuwachs an produzierter Menge bis 2040 und sinkt aufgrund des Brennstoffwechsels bis 2050 wieder.

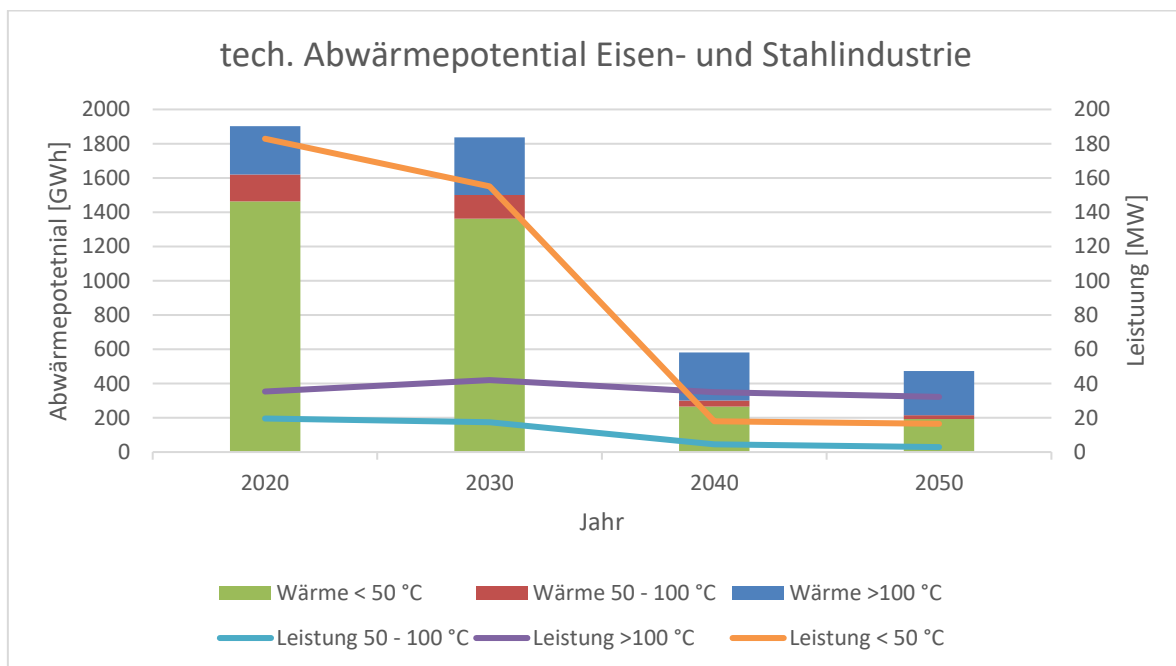


Abbildung 5-2: technisches Abwärmepotential der Eisen- und Stahlindustrie

voestalpine Donawitz

Für die Primärstahlherstellung werden zahlreiche Teilprozessschritte benötigt. Um das Abwärmepotential des Standorts so genau wie möglich zu erfassen, werden die Teilanlagen jeweils einzeln betrachtet und bilanziert. Das zusammengefasst Ergebnis ist in Abbildung 5-3 dargestellt. Durch den Wegfall der Abwärme aus der Sinteranlage, dem Stahlwerk sowie dem thermischen Kraftwerk reduziert sich das technische Potential ab 2040 signifikant. Das Abwärmepotential liegt bis 2040 überwiegend im Temperaturbereich bis 50 °C. Danach verschiebt sich der Schwerpunkt des Abwärmepotential auf Temperaturen über 100 °C, aufgrund des großen Anteils an Abgasen mit weit über 100 °C, welche bei der Stahlproduktion mittels EAF anfallen.

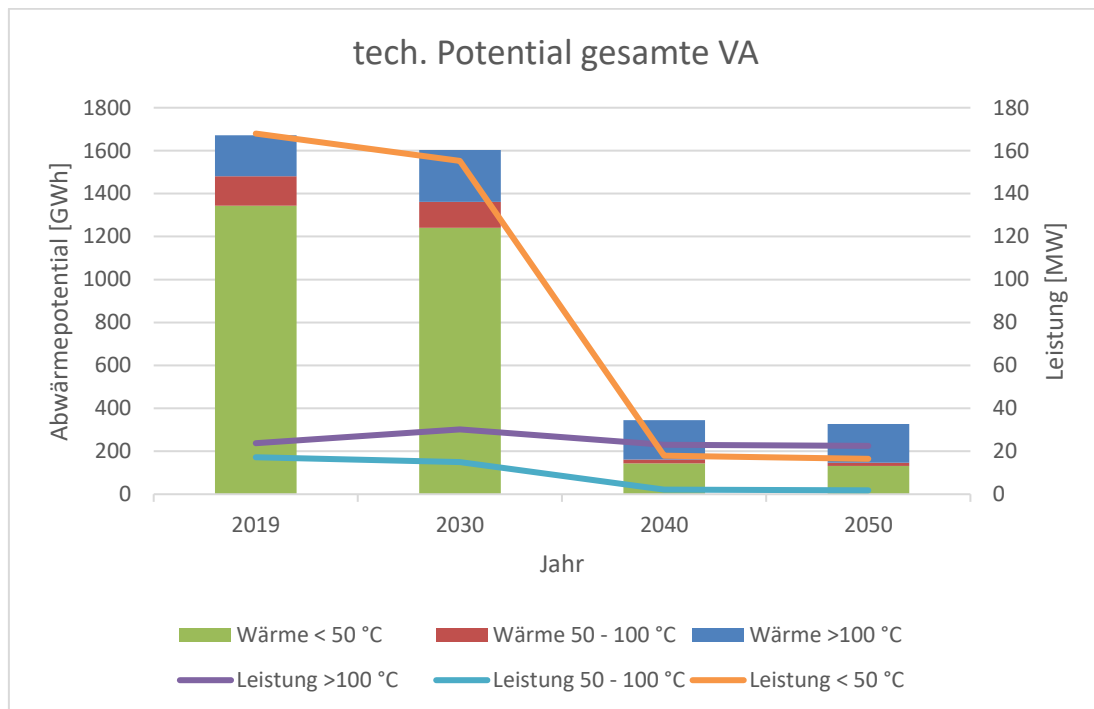


Abbildung 5-3: technisches Abwärmepotential der voestalpine Donawitz

Sinteranlage

Das technische Abwärmepotential sowie die verfügbare Leistung der Sinteranlage am Standort der voestalpine in Donawitz ist in Abbildung 5-4 dargestellt. Die Roadmap der voestalpine gibt eine Reduktion der Menge an produzierten Sintermaterial bis zum Jahr 2030 vor. Nach der angenommenen Stilllegung der Sinteranlage, bei vollständiger Umstellung auf reinen Betrieb der Elektrolichtbogenöfen ab 2030, steht auch kein Abwärmepotential an der Sinteranlage zur Verfügung. Das größte technische Potential der Sinteranlage liegt im Bereich der Abgasenergie. Aufgrund von Kondensationsproblematiken kann jedoch nur der Anteil des Sinterabgases nach der Gasreinigung mit einer Temperatur von 65 °C als gefasster Abgasstrom angenommen werden. Unter der Berücksichtigung der benötigten Grädigkeiten fällt dieses Potential auf den Bereich unter 50 °C. Die Anteile des Abwärmepotentials über 100 °C sind der Abluft des Sinterkühlers und der Produktwärme des Sinters zuzuordnen.

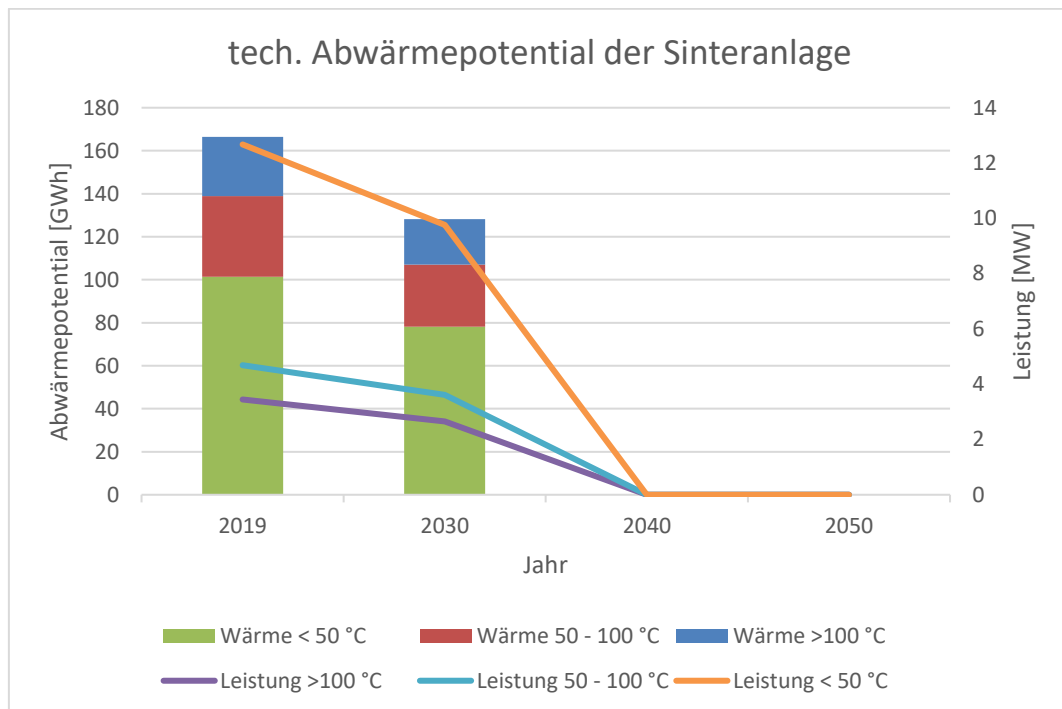


Abbildung 5-4: technisches Abwärmepotential VA Sinteranlage

Hochofen

In Abbildung 5-5 ist das technische Abwärmepotential sowie die technische Leistung der Abwärme der beiden Hochöfen in Donawitz zu sehen. Im Jahr 2027 wird planmäßig ein Hochofen in Donawitz abgeschaltet und durch den ersten EAF ersetzt. Dadurch reduziert sich die Menge an Rohstahl über die Hochofenroute signifikant und im gleichen Ausmaß reduziert sich ebenfalls das vorhandene Abwärmepotential. Ab 2030 soll der zweite Hochofen außer Betrieb genommen werden. Daraus folgt, dass das Abwärmepotential am Hochofen für die Jahre ab 2040 wegfällt. Das Potential bis 50 °C stammt vorrangig aus dem Kühlwasser des Kühlturms, der zur Kühlung des Hochofenmantels benötigt wird. Das heiße Abgas des Hochofens wird teilweise über Rekuperatoren und Winderhitzer wieder dem Hochofen hinzugeführt. Ein Teil des Abgases wird gereinigt und aus dem Prozess herausgeführt und dient somit als Abwärmepotential. Ein nicht zu unterschätzender Anteil an Potential steckt in der heißen Hochofenschlacke, die Temperaturen um die 1500 °C hat.

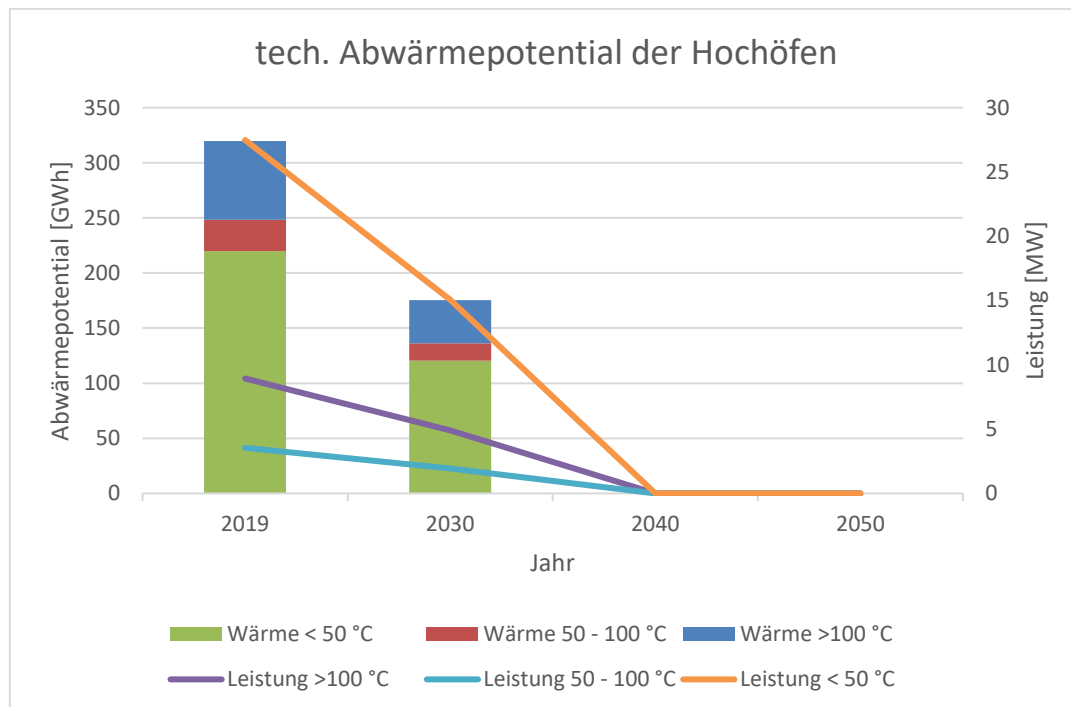


Abbildung 5-5: technisches Abwärmepotential VA Hochofen

Stahlwerk

Das technische Abwärmepotential sowie die Leistung sind in Abbildung 5-6 dargestellt. Im Stahlwerk wird nach der Installation des ersten EAF nur mehr die Hälfte des ursprünglichen Roheisens weiterverarbeitet. [83] Aus diesem Grund fällt im Jahr 2030 nur mehr die Hälfte des Abwärmepotentials im Stahlwerk an. Ab 2030 soll der zweite Hochofen abgeschaltet werden und somit auch die Weiterverarbeitung des Roheisens im Stahlwerk wegfallen. Somit wird für die Jahre ab 2040 kein Abwärmepotential am Stahlwerk gesehen. Der Großteil der im Stahlwerk anfallenden Abwärme liegt im Bereich der Niedertemperatur und stammt aus dem Kühlwasser des Verdampfungskühlers sowie aus dem Kühlwasser, welches für die Spritzkühlung eingesetzt wird, an. Die heißen Abgase aus dem Konverter werden in einem Abhitzekeßel bereits weiterverwerten. Dadurch fällt dieses Potential dementsprechend gering aus.

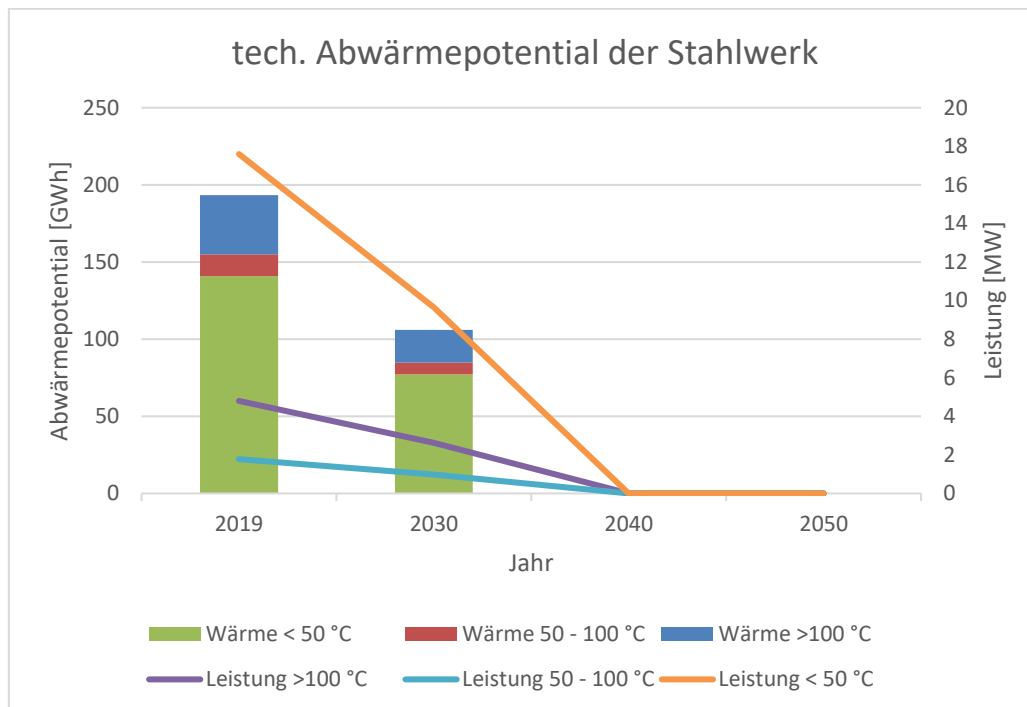


Abbildung 5-6: technisches Abwärmepotential VA Stahlwerk

Elektrolichtbogenofen

Im Jahr 2027 soll der erste EAF am Standort Donawitz in Betrieb gehen und dabei jährlich eine Menge von rund 850 Tausend Tonnen Rohstahl erzeugen. Im Jahr 2040 wird die gesamte Rohstahlmenge über nun zwei Elektrolichtbogenöfen hergestellt. Für das Jahr 2050 werden die Zusatzbrenner des EAF nun mit Wasserstoff anstatt Erdgas betrieben. In Abbildung 5-7 sind das technische Abwärmepotential sowie die dabei vorhandene maximale Abwärmeleistung dargestellt. Der hohe Anteil an Abwärme im Bereich von über 100 °C folgt aus den Abgasen am EAF, welche bei der Verbrennung der Graphitelektroden und den für die (Schaum)Schlackenbildung benötigten Kohlenstaub und Kalk entsteht. Von 2030 auf 2040 verdoppelt sich die über Elektrolichtbogen hergestellte Stahlmenge bei gleichbleibenden Prozessbedingungen. Im Jahr 2050 wird die angenommene Zusatzbefeuerung des EAF von Erdgas auf Wasserstoff umgestellt. Die Menge der Abwärme wird jedoch vor allem durch die Abgase bei der Verbrennung der Zusatzstoffe für Schlackenbildung bestimmt. Der Anteil des Abwärmepotentials im Temperaturbereich unter 50 °C wird hauptsächlich durch die Kühlung des EAF bestimmt.

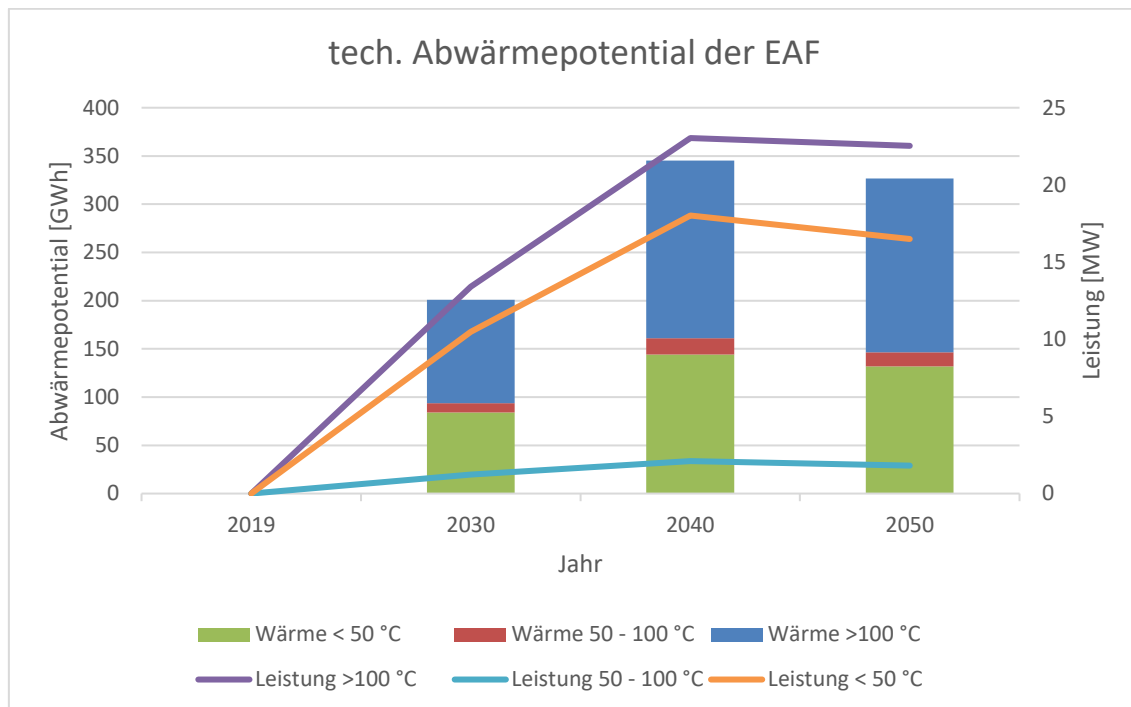


Abbildung 5-7: technisches Abwärmepotential VA Elektrolichtbogenofen

Kraftwerkspark VA

Der bestehende thermische Kraftwerkspark der voestalpine Donawitz dient vor allem der energetischen Verwertung der beim Hochofenprozess entstehenden Gichtgase sowie im Stahlwerk anfallenden Konvertergase zusammengefasst als Kuppelgase bezeichnet. Durch die Verwertung der Kuppelgase in einer Kraft-Wärme-Kopplungsanlage (KWK) wird der Standort mit Strom und Wärme versorgt. Ein Teil der anfallenden Wärme aus dem KWK-Prozess (keinen direkte Prozessabwärme, nach den in Kapitel 3.8 beschriebenen Kategorien) wird über einen Turbinenwärmetauscher an der Dampfturbine für die Fernwärmeversorgung der Stadt Leoben verwendet. Zum Stand 2023 werden rund 80 % des am Standort benötigten elektrischen Energie durch die energetische Verwertung der Kuppelgase bereitgestellt. [18] Das technische Potential des Gichtgaskraftwerks ist in Abbildung 5-8 zu sehen. Der große Anteil an Abwärmepotential im Temperaturbereich unter 50 °C geht aus dem Energieinhalt des Kondensats des Rauchgases hervor. Für die Berechnung des Abwärmepotentials wird für einen gleichbleibenden Betrieb der Kraftwerke bis zum Schlüsseljahr 2040 ausgegangen. Die fehlenden Mengen an Kuppelgasen, durch das Wegfallen der beiden Hochöfen und des Stahlwerks, werden durch Erdgas ersetzt. Mit dem Wegfallen des letzten Hochofens ab 2030 und somit dem Wegfall der Kuppelgase wird für dieses Szenario angenommen, dass der Betrieb des Kraftwerks eingestellt wird und somit kein Abwärmepotential mehr vorhanden ist. Da die voestalpine laut Expertengesprächen jedoch sehr bemüht ist, die Stromversorgung am eigenen Standort so gut wie möglich selbst zu gewährleisten, könnte ebenso der Fall eintreten, dass der Kraftwerkspark weiterhin in Betrieb bleibt, jedoch andere Energieträger, wie zum Beispiel Wasserstoff, verwendet werden. Dieser allgemeine Trend, welcher zurzeit in der energieintensiven Industrie zu beobachten ist, hin zum verstärkten Betrieb von Energieversorgungsanlagen an Industriestandorten, ist im Kapitel 0 näher beleuchtet.

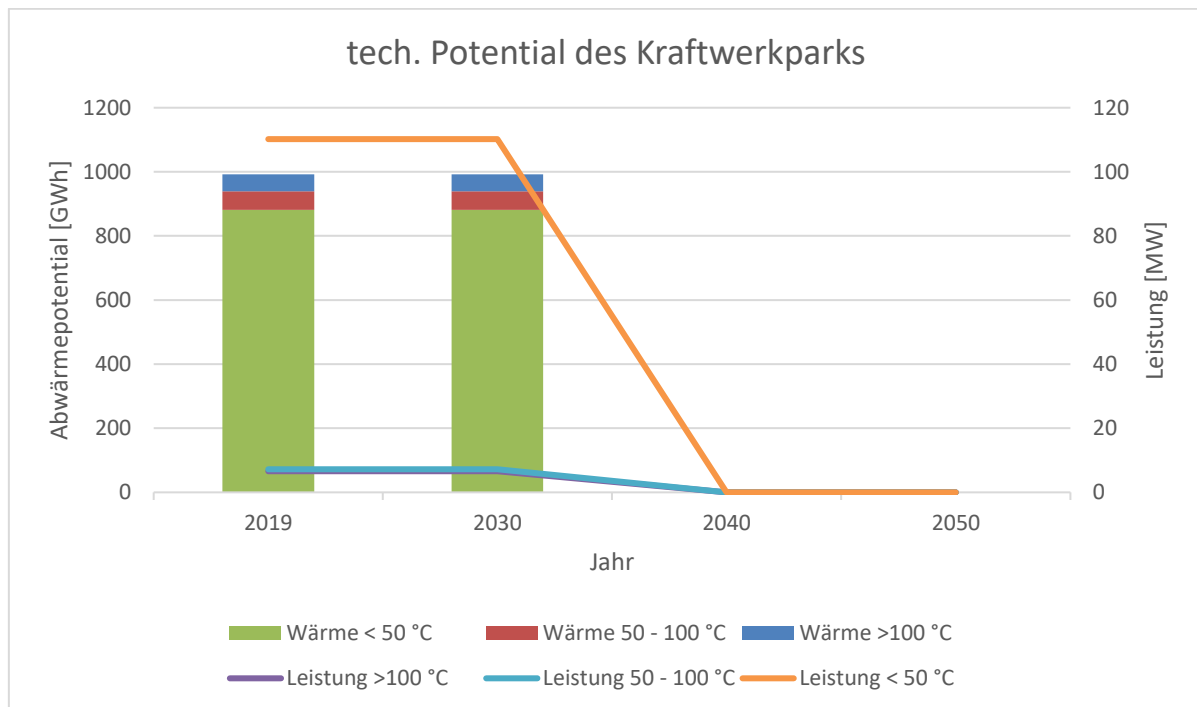


Abbildung 5-8: technisches Potential Kraftwerkspark VA Donawitz

Marienhütte Graz

Das technische Abwärmepotential der Marienhütte Graz ist in Abbildung 5-9 dargestellt und steigt leicht bis zum Jahr 2040 durch den prognostizierten Produktionszuwachs bei gleichbleibenden Prozessbedingungen in der Sekundärstahlherstellung. Für das Jahr 2050 ist eine Reduktion der Abwärme durch den Einsatz von Wasserstoff statt Erdgas in den Zusatzbrennern des EAF sowie für die Nachbehandlung des Stahls bemerkbar. Der hohe Anteil an Abwärme im Temperaturbereich über 100 °C folgt aus den sehr hohen Abgastemperaturen, welche beim Betrieb des Elektrolichtbogenofens durch die Verbrennung von Kohlenstoff zur Schlackenbildung und dem Elektrodenabbrand entstehen. Der Anteil an Abwärmepotential im Temperaturbereich unter 50 °C ist durch das Kühlwasser der Ofenkühlung und dem latenten Anteil des Rauchgases geprägt.

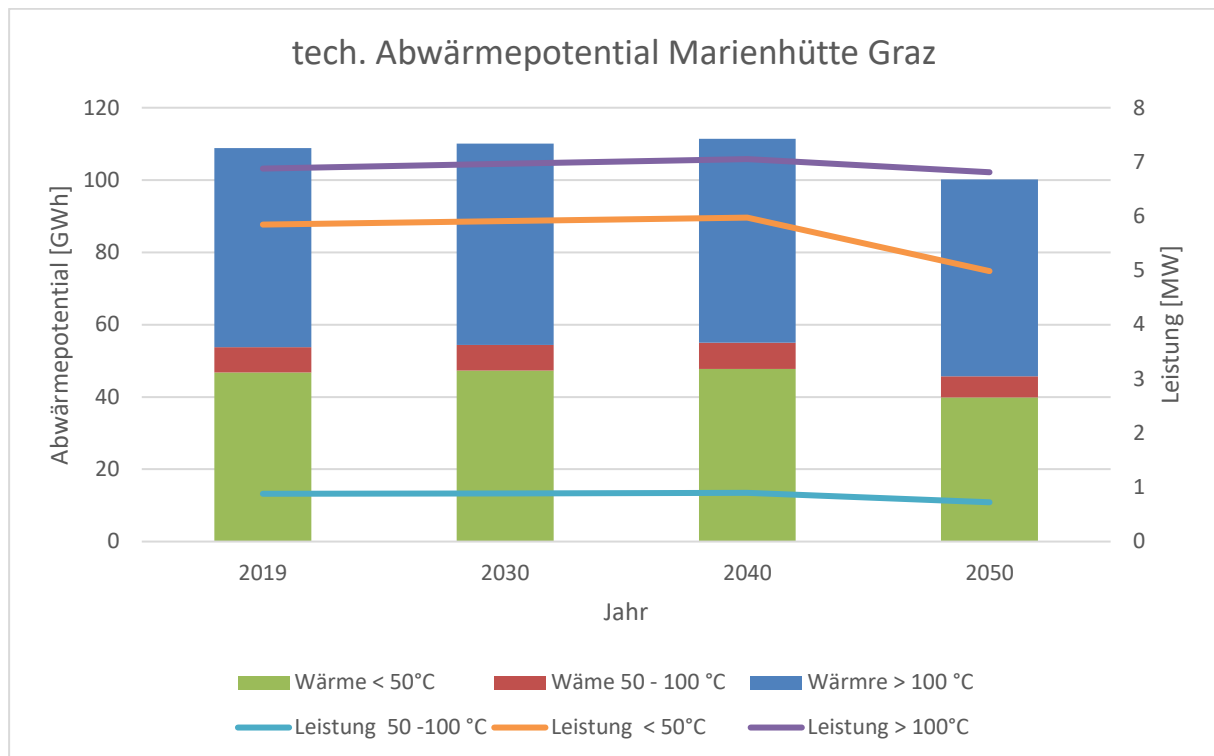


Abbildung 5-9: technisches Abwärmepotential Marienhütte Graz

Böhler Edelstahl Kapfenberg

Das Abwärmepotential des Edelstahlwerk in Kapfenberg ist in Abbildung 5-10 abgebildet. Hier wird ebenfalls eine leichte Steigung der Produktionsmenge für die nächsten 25 Jahre angenommen. Da die Produktionsmenge von Böhler Kapfenberg jedoch im Vergleich zu Marienhütte Graz wesentlich geringer ist, fällt die prozentuelle Steigerung nicht so stark im Zuwachs der Abwärmemenge auf. Für das Jahr 2050 wird wieder der gesamte am Standort eingesetzte Erdgasbedarf durch grünen Wasserstoff ersetzt. Dadurch ist eine deutliche Reduktion des Abwärmepotentials zu beobachten. Diese Reduktion ist auf den geringeren Massenstrom an Brennstoff und der daraus entstehenden geringeren Menge an Abgas zurückzuführen. Für 2040 wird für die Verbrennung von Erdgas ein Abgasmassenstrom von knapp 100 000 kg/h berechnet. Für die Bereitstellung der äquivalenten Energiemenge durch Wasserstoff sinkt der Massenstrom auf knapp 1/10.

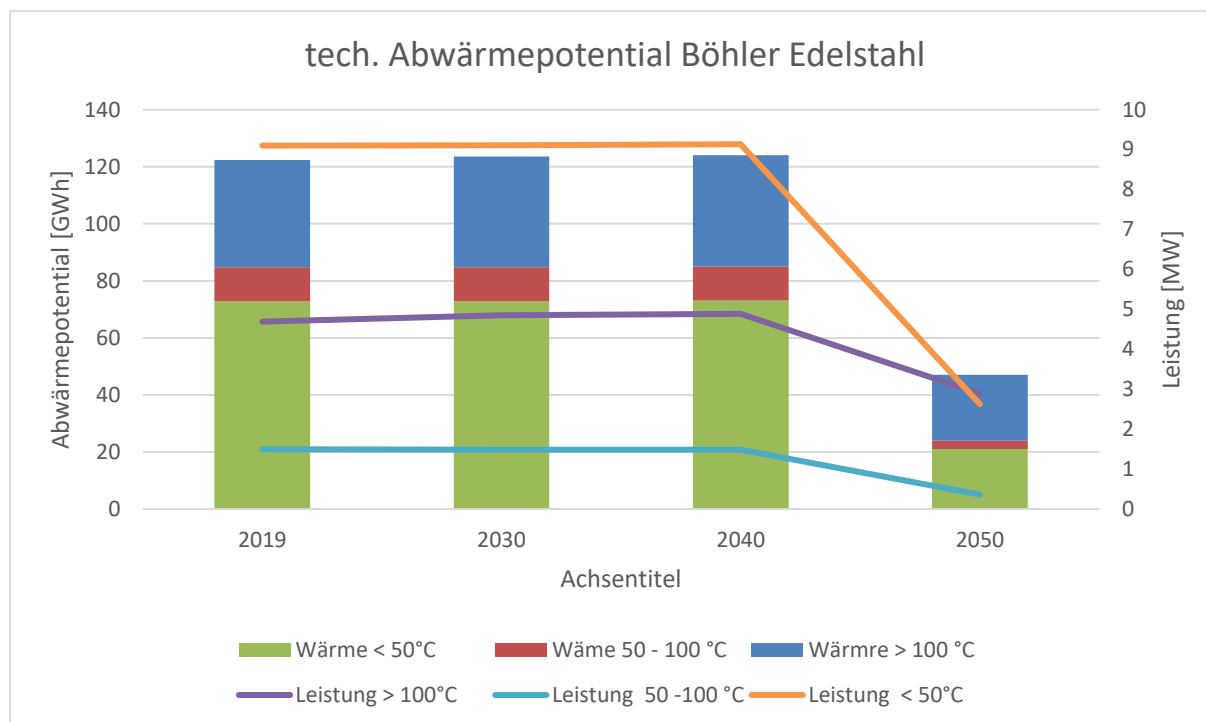


Abbildung 5-10: technisches Abwärmepotential Böhler Kapfenberg

Vergleich Marienhütte und Böhler

Die beiden Sekundärstahlwerke Marienhütte Graz und Böhler Edelstahl Kapfenberg verwendet das gleiche Verfahren (Elektrolichtbogenofen) zur Stahlherstellung, jedoch verhalten sich die Änderungen der Abwärmepotentiale unterschiedlich. In Tabelle 5-1 sind die wesentlichen Eingangs- und Ausgangsgrößen der beiden Stahlwerke gegenübergestellt.

Tabelle 5-1: Vergleich Marienhütte Graz und Böhler Edelstahl Kapfenberg

Eigenschaft	Böhler Edelstahl	Marienhütte Graz
Produktionsmenge	151.000 t	415.000 t
CO ₂ -aus EU-Register	129297t CO ₂ /a	36550t CO ₂ /a
Energieeinsatz aus Erdgas	626.52 GWh	105.13 GWh

Böhler Kapfenberg hat im Vergleich zur Marienhütte Graz einen deutlich höheren CO₂-Ausstoß, obwohl etwa 2.5-mal weniger Stahl produziert wird. Der aus dem CO₂-Ausstoß zurückgerechnete Energieeinsatz aus Erdgas wird bei Böhler in der deutlich energie-intensiveren Nachbehandlung des Stahls eingesetzt. In zahlreichen Prozessschritten wird demnach Erdgas entweder zum Vorheizen der Apparate oder zum Erwärmen des Stahls eingesetzt. Im Gegensatz dazu fertigt die Marienhütte Graz überwiegend Baustahl, der eine deutlich weniger intensive Nachbehandlung durchläuft und somit auch weniger Erdgas eingesetzt werden muss. Das Abwärmepotential der Marienhütte Graz setzt sich demnach aus dem Anteil des Abgases durch den Abbrand der Elektroden und des Kohlenstaubs zur Schlackenbildung, sowie aus der Abstrahlungswärme der Produkte und Schlacken zusammen. Dadurch verändert sich das Abwärmepotential durch die Umstellung auf Wasserstoff nicht sehr stark. Im Vergleich dazu liegt das Potential bei Böhler Kapfenberg im Abgas aus der Verbrennung von Erdgas sowohl im Lichtbogenofen

wie in den Anlagen zur Nachbehandlung. Die Produktionsmenge ist deutlich geringer und somit liegt hier weniger Abwärmepotential im Anteil des Abgases durch die Verbrennung des Kohlenstaubs und der Abstrahlung der Produkte. Daraus folgt, dass bei einer Umstellung auf Wasserstoff sich das gesamte Abwärmepotential am Standort Böhler Kapfenberg deutlich verringert.

5.3 Papier- und Zellstoffindustrie

Zu Beginn wird das Abwärmepotential für die Vertreter der Papiers- und Zellstoffindustrie gesammelt betrachtet. In weiterer Folge wird detaillierter auf die einzelnen Standorte eingegangen. Das technische Abwärmepotential ist in Abbildung 5-11 für die Branche zusammengefasst.

Die Papier- und Zellstoffindustrie zeichnet sich durch ein signifikantes Abwärmepotential im Niedertemperaturbereich durch hohe Massenströme an Ab- und Kühlwässern aus. Ein Großteil des Potentials über 50 °C stammt aus den Energieversorgungsanlagen direkt am Standort. Der große Bedarf an Dampf für die Papiertrocknung wird über entweder Biomasse oder Erdgas befeuerte KWK-Anlagen gedeckt und bietet somit ebenfalls ein großes Potential für die Nutzung der Kondensationswärme. Für die gesamte Branche wird kein Zuwachs der Produktionsmengen bis zum Jahr 2050 erwartet, jedoch ist eine leichte Steigung des Potentials von 2020 auf 2030 zu erkennen. Diese Steigung ist auf der Umstellung des Energieträger Steinkohle auf Biomasse am Standort Sappi Gratkorn zurückzuführen.

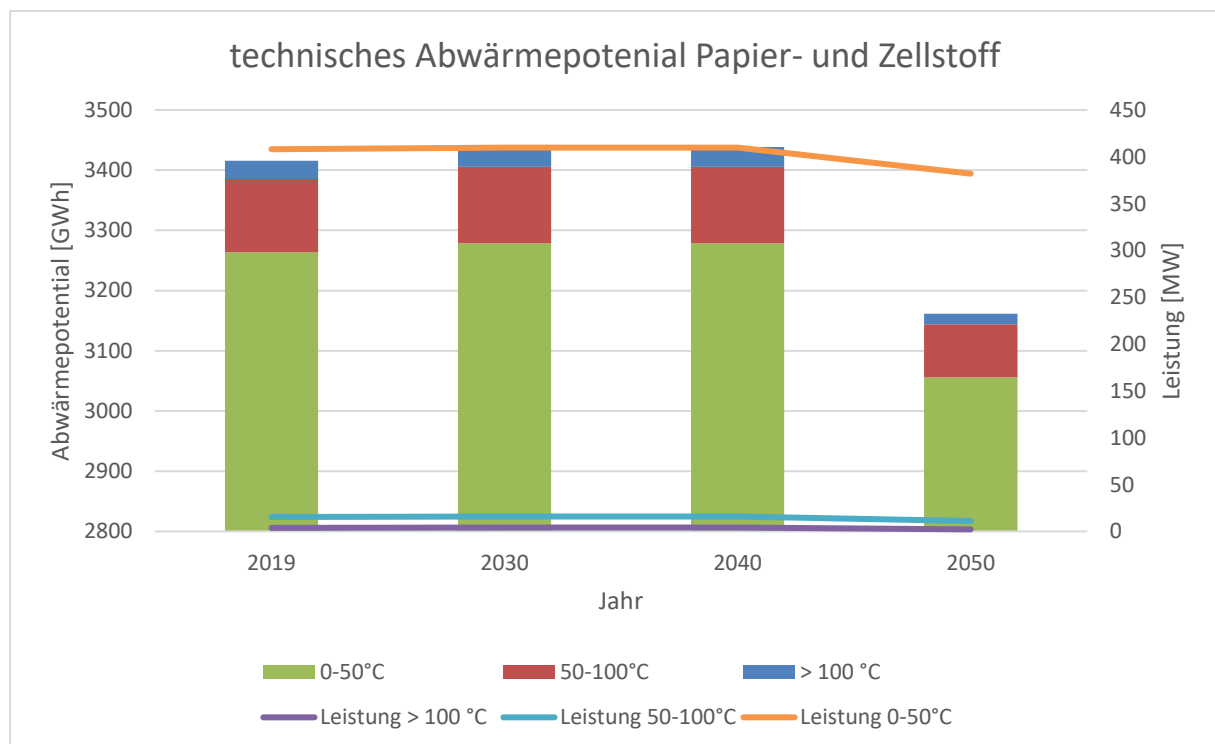


Abbildung 5-11: technisches Abwärmepotential für die Papier- und Zellstoffindustrie

Sappi Gratkorn

Das Abwärmepotential der Papier- und Zellstofffabrik Sappi in Gratkorn ist in Abbildung 5-12 dargestellt. Für die gesamte Papier- und Zellstoffindustrie wird eine konstante Produktionsmenge angenommen. Wie schon einleitend erwähnt wurde 2020 am Standort Sappi Gratkorn noch Steinkohle als Energieträger eingesetzt. Durch die Umstellung auf Biomasse entsteht somit ein größerer Rauchgasmassenstrom, der

durch die Feuchte der Biomasse ebenfalls einen höheren Anteil an Kondensat mit sich bringt. Dadurch steigt das Abwärmepotential im Bereich der Niedertemperatur. Für das Jahr 2050 wird Erdgas durch Wasserstoff substituiert. Aufgrund der hohen spezifischen Energiedichte von Wasserstoff resultiert daraus ein niedrigerer Abgasmassenstrom, welcher zu einer Verringerung des Abwärmepotentials führt.

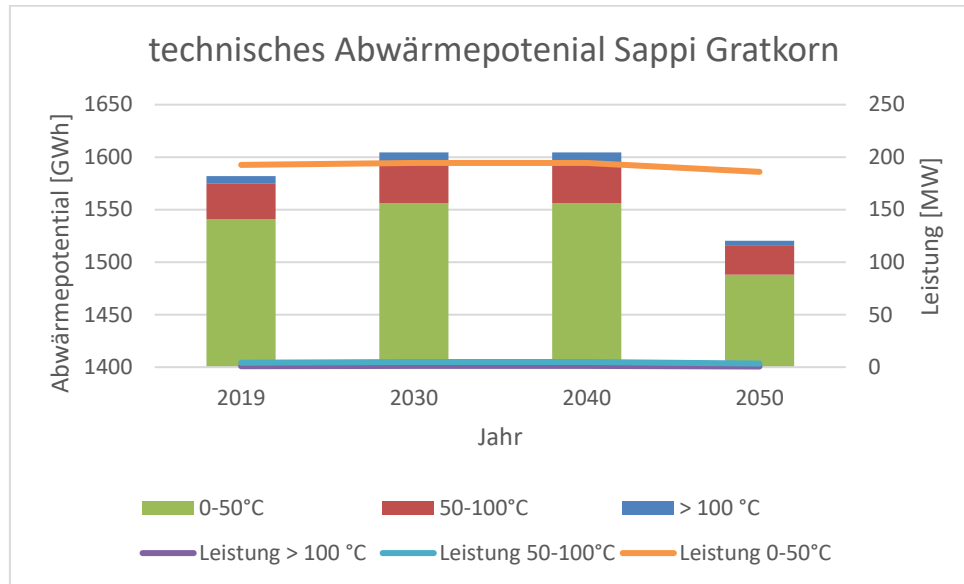


Abbildung 5-12: technisches Abwärmepotential Sappi Gratkorn

Zellstoff Pöls

Das technische Abwärmepotential von Zellstoff Pöls ist in Abbildung 5-13 abgebildet. Auch dieser Standort setzt Erdgas sowie Biomasse für die Energieversorgung ein. Das größte Potential liegt wiederum im Temperaturbereich unter 50 °C und stammt aus der Papiertrocknung, dem Kochprozess bei der Zellstoffherstellung sowie dem Ab- und Kühlwasser. Abwärme über 100 °C fällt hier lediglich im Rauchgas der Erdgas-Kraftwerke an. Im Vergleich zu den anderen Papierfabriken fällt das Abwärmepotential im Temperaturbereich zwischen 50-100 °C bei Zellstoff Pöls deutlich höher aus. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Temperatur des Rauchgases aus der Verbrennung der, bei der Zellstoffherstellung anfallenden Schwarzlauge, mit 80 °C angenommen wurde.

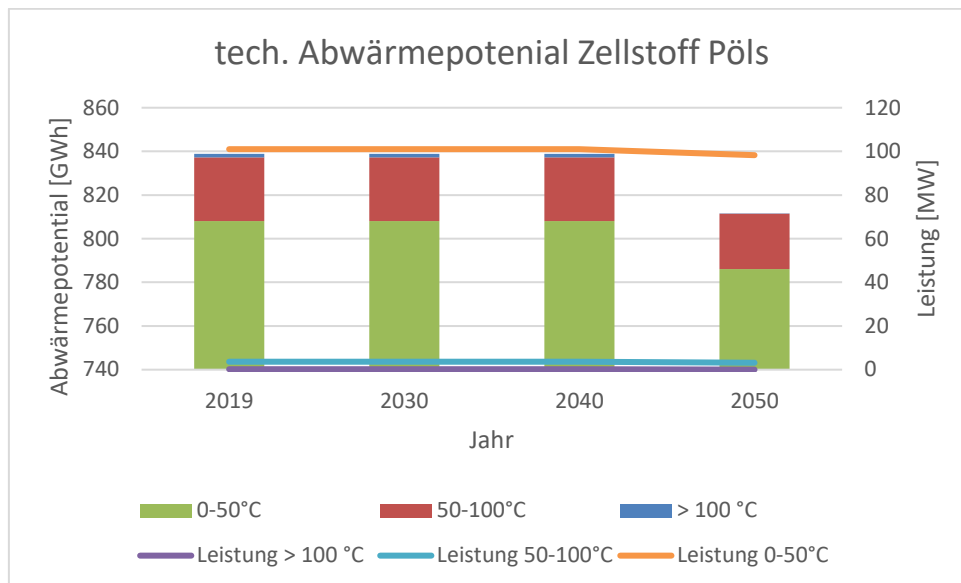


Abbildung 5-13: technisches Abwärmepotential Zellstoff Pöls

Norske Skog Bruck an der Mur

Das Ergebnis der Berechnung des technischen Abwärmepotentials für den Standort Norske Skog in Bruck an der Mur ist in Abbildung 5-14 dargestellt. Abermals ist der große Anteil des Abwärmepotentials im Temperaturbereich unter 50 °C durch die im Prozess auftretenden Abwässer sowie die bei der Papiertrocknung anfallende feuchte Abluft geprägt. Potentiale über 50 °C sind im Abgas des Erdgases und der Biomasse zu finden.

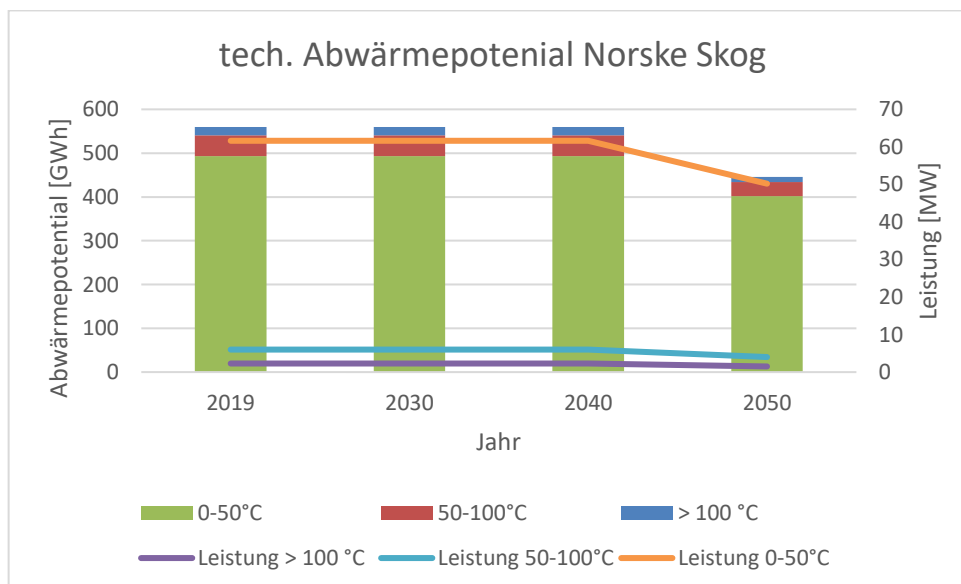


Abbildung 5-14: technisches Abwärmepotential Norske Skog Bruck an der Mur

Mayr-Melnhof Frohnleiten

Abschließend ist in Abbildung 5-15 das technische Abwärmepotential von Mayr-Melnhof in Frohnleiten dargestellt. Auch hier ist eine typische Aufteilung der Potentiale der Papierindustrie zu sehen. Der hohe Anteil des Potentials in Temperaturbereich unter 50 °C ist durch die feuchte Abluft der Trockenpartie sowie dem hohen Massenstrom an Ab- und Kühlwasser geschuldet.

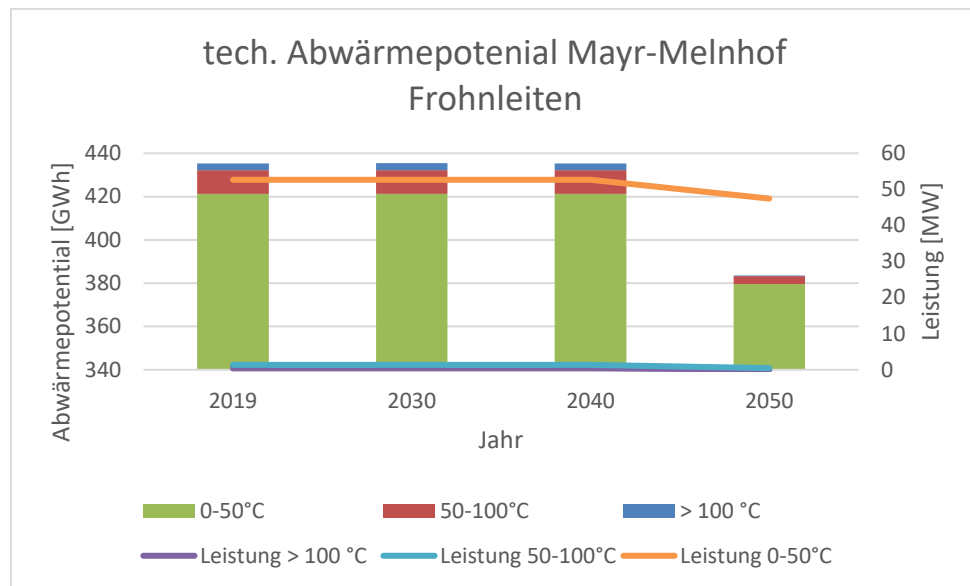


Abbildung 5-15: technisches Abwärmepotential Mayr-Melnhof Frohnleiten

5.4 Zementindustrie

Als Vertreter der Zementindustrie wurde der Standort Holcim in Retznei untersucht. Für die Zementindustrie wird eine gleichbleibende Produktionsmenge bis zum Jahr 2050 vorhergesagt. Der Anteil an Klinker reduziert sich jedoch. Da der Herstellungsprozess des Klinkers der Abwärme relevante Prozess der Zementherstellung ist, wird für die Potentialabschätzung der Zementindustrie die Menge an produzierten Klinker herangezogen. In Abbildung 5-16 ist der Verlauf des technischen Abwärmepotentials für Holcim Retznei bis 2050 dargestellt. Es ist eine Abnahme der Abwärme aufgrund des Rückgangs der Klinkermenge bis zum Jahr 2040 zu erkennen. Insgesamt soll der Klinkeranteil bezogen auf das Jahr 2020 um 18 % bis zum Jahr 2040 reduziert werden. Das Potential ist sehr gleichmäßig auf die Temperaturbereiche verteilt, das folgt aus der Tatsache, dass alle betrachteten Abwärmequellen Temperaturen über 100 °C aufweisen. Für das hier dargestellte technische Potential werden auch die Strahlungs- und Konvektionsanteile des Drehrohrofens mitberücksichtigt. In der Zementherstellung werden hauptsächlich Ersatzbrennstoffe (EBS) eingesetzt. Damit stellt die Zementindustrie ein wichtiger Bestandteil der Kreislauf und Abfallwirtschaft in Österreich dar. Aus dem Roadmap-Bericht der VÖZ [24] geht hervor, dass die Verwendung von Ersatzbrennstoffe auch weiterhin gegeben sein wird. Neben den EBS wird ein geringer Anteil an fossilen Brennstoffen im Hochfahrbetrieb verwendet. Aus diesem Grund macht sich die Umstellung der fossilen Energieträger auf Wasserstoff im Jahr 2050 nicht bemerkbar.

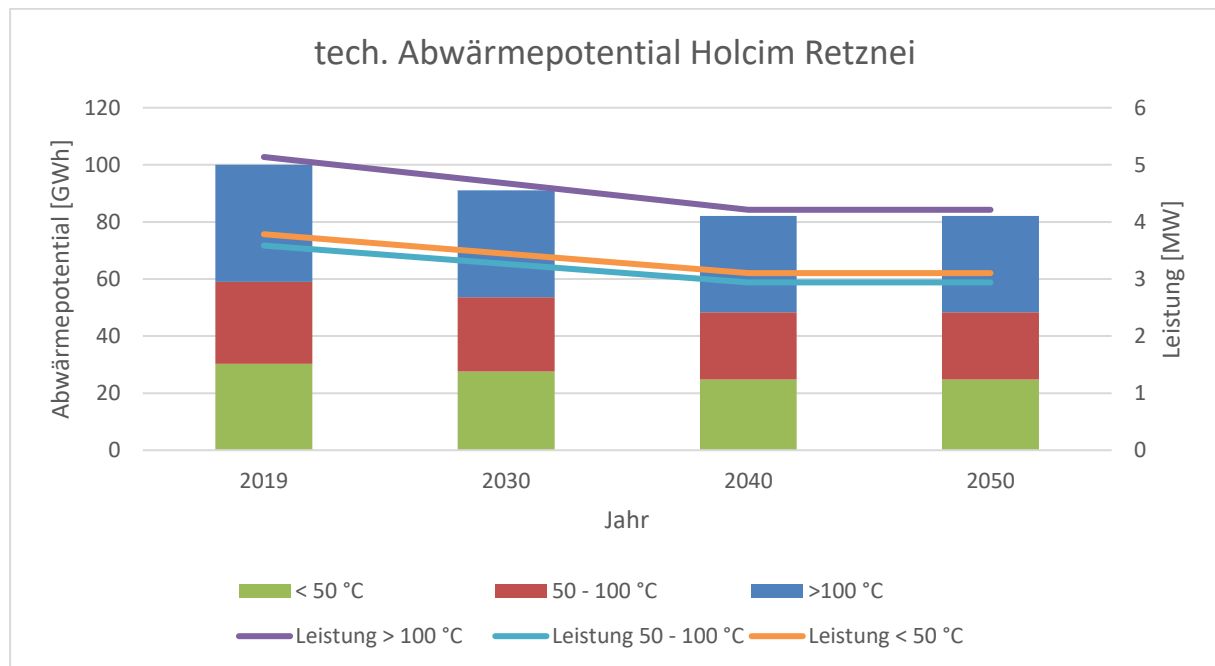


Abbildung 5-16: technisches Abwärmepotential Holcim Retznei

5.5 Magnesiaindustrie

Als Teil der Magnesiaindustrie wird der Standort RHI-Magnesita Breitenau untersucht. Das Ergebnis der technischen Abwärmepotentiale ist in Abbildung 5-17 zu sehen. Haupteinsatzgebiet von Magnesia liegt in der Feuerfestindustrie. Da diese primär für die Eisen- und Stahlindustrie relevant ist, wird für die Magnesiaproduktion eine Steigerung im gleichen Ausmaß wie für die Sekundärstahlherstellung angenommen. Aus der Steigung der Produktmenge leitet sich auch ein zunehmendes Abwärmepotential bis 2040 ab. Obwohl das Herstellungsverfahren von Magnesia sehr ähnlich dem von Zement ist, werden für die Magnesiaherstellung keine Ersatzbrennstoffe eingesetzt, da diese die Produktqualität der Feuerfestmaterialien negativ beeinflussen würden. Aus diesem Grund wird hauptsächlich Erdgas als Brennstoff verwendet. Für die Magnesiaindustrie wird daher eine Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff für das Jahr 2050 angenommen. Aufgrund des geringeren Rauchgasmassenstrom verringert sich das Abwärmepotential für das Jahr 2050 wieder. Die Abwärmepotentiale verhalten sich jedoch ähnlich zu denen der Zementindustrie. Das größte Potential stammt dabei aus der Abgasenergie sowie aus der Abstrahlung des Drehrohr und des Kühlrohrs.

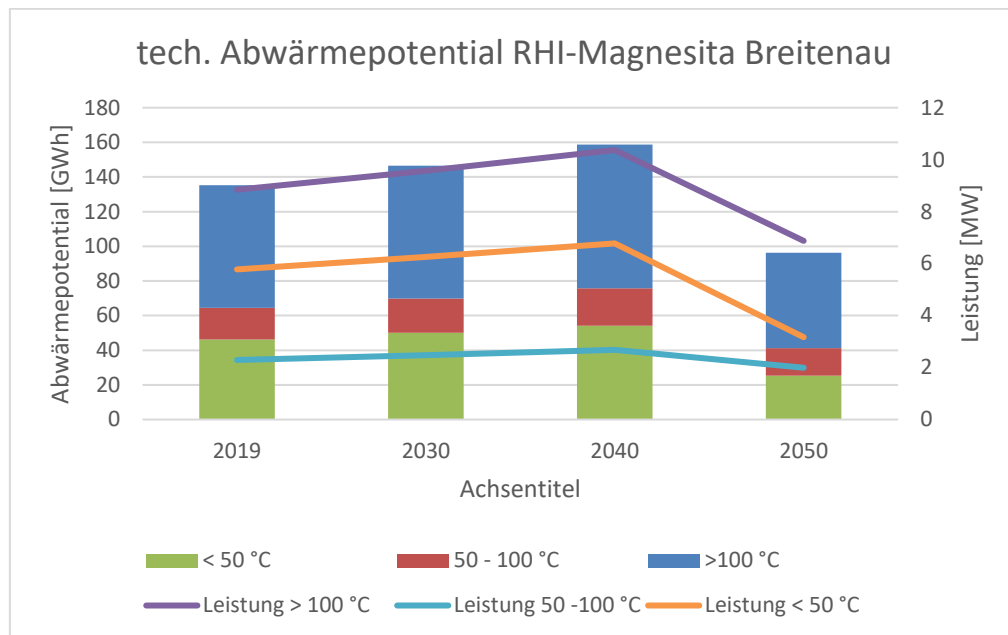


Abbildung 5-17: technisches Abwärmepotential RHI-Magnesita Breitenau

5.6 Gasverdichterstation

Die Ergebnisse der Gasverdichterstation (GVS) in Weitendorf sind in nachfolgender Abbildung 5-18 gezeigt. Das technische Abwärmepotential ist bei Gasverdichterstationen abhängig von der jeweiligen Durchflussmenge. Für den Erdgasbedarf in Europa und somit für die transportierten Erdgasmengen werden drastische Rückgänge in den kommenden Jahren erwartet, somit sinkt das technische Abwärmepotential signifikant bis zum Jahr 2050. Die Menge des zukünftig transportierten Wasserstoffs wird für die Abschätzung des Abwärmepotentials nicht berücksichtigt. Für die Verdichtung von reinem Wasserstoff können die Turboverdichter nicht weiterverwendet werden und somit müssen elektrisch betriebene Kolbenverdichter eingesetzt werden. Das Abwärmepotential über 50 °C stammt aus dem Rauchgas des Erdgases, welches für den Antrieb des Verdichters benötigt wird. Das Potential im Bereich unter 50 °C wird hauptsächlich durch die bei der Abkühlung des verdichteten Gases anfallende Abwärme bestimmt.

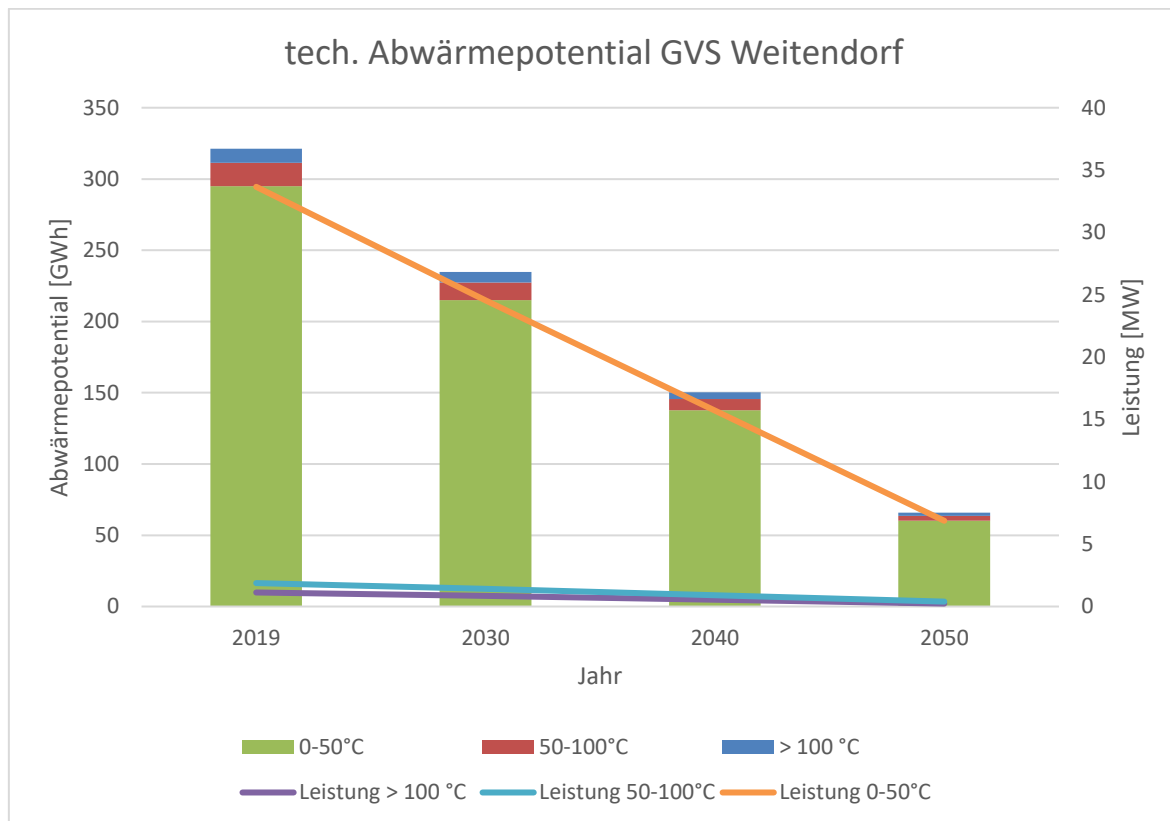


Abbildung 5-18: technisches Abwärmepotential GVS Weitendorf

5.7 Abwärmepotentialentwicklung nach Energieträger

In diesem Kapitel werden nun die technischen Abwärmepotentiale nach ihren eingesetzten Energieträgern kategorisiert. Zu Beginn erfolgt ein zusammenfassender Überblick aller Standorte. Im Anschluss wird ein detaillierter Einblick in die einzelnen Branchen gegeben. Aufgrund der erhöhten Komplexität des Standorts voestalpine Donawitz wird dieser für die Eisen- und Stahlindustrie erneut gesondert betrachtet.

Infolge der zahlreichen Umwandlungsprozesse sowie bei den dabei ablaufenden endothermen sowie exothermen Reaktionen gestaltet sich die eindeutige Zuordnung der Abwärme in den Reaktoren sowie der Produkte als sehr komplex. Um jedoch einen groben Überblick zu liefern, werden die nicht eindeutig zuordbaren Abwärmepotentiale der Kategorie „Produkt/Abwärme“ zugeordnet. Grundsätzlich werden alle Potentiale aus den Abgasen den jeweiligen Input Brennstoffen zugeordnet. Alle restlichen Potentiale wie: Abwasser, Wärmeinhalt von Produkten, sowie Abstrahlung von Oberflächen wird der Kategorie „Produkt/Abwärme“ zugeteilt.

Überblick

In Abbildung 5-19 ist der Überblick über die eingesetzten Energieträger und deren Auswirkung auf die Abwärmepotentiale aller untersuchten Standorte zu sehen. Den größten Anteil hat dabei die Kategorie „Produkt/Abwärme“ mit den zahlreichen nicht eindeutig einem Energieträger zuordbaren Abwärmequellen. Mit großem Abstand folgt an zweiter Stelle Biomasse als Energieträger mit dem meisten Abwärmepotential. Dieser wird nur von der Papier- und Zellstoffindustrie eingesetzt. Dicht gefolgt wird die Biomasse von Erdgas, welches bis zum Jahr 2040 von allen untersuchten Standorten eingesetzt wird. Als Brennstoff wird fester Kohlenstoff vor allem im Hochofen in Form von Koks sowie im Elektrolichtbogenofen

als Kohlenstaub und als Teil der Graphitelektrode verwendet. Ausnahme macht hier der Einsatz von Steinkohle in der Papierindustrie bei Sappi Gratkorn, jedoch nur im Jahr 2019. Wasserstoff als Energieträger scheint erst im Jahr 2050 auf. Der Einsatz von Ersatzbrennstoffen wird nur in der Zementindustrie verzeichnet.

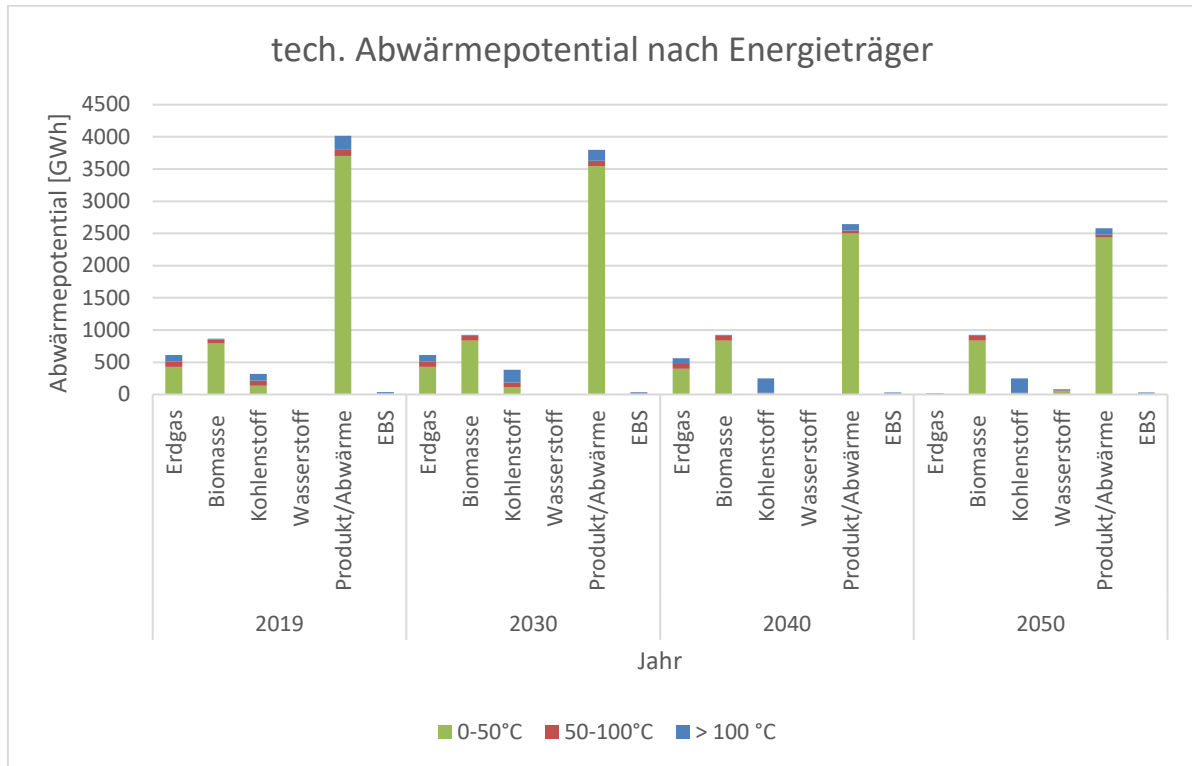


Abbildung 5-19: technisches Abwärmepotential nach Energieträgern

Eisen- und Stahlindustrie

In Abbildung 5-20 sind die Ergebnisse für das Abwärmepotential kategorisiert nach den eingesetzten Energieträgern für die voestalpine Donawitz dargestellt. Die Abwärmepotentiale im Rauchgas wurden dem jeweiligen eingesetzten Energieträger zugeteilt. Für den Hochofen wurde das Potential des Rauchgases durch Kenntnis der Inputmengen an Koks und Erdgas prozentuell aufgeteilt.

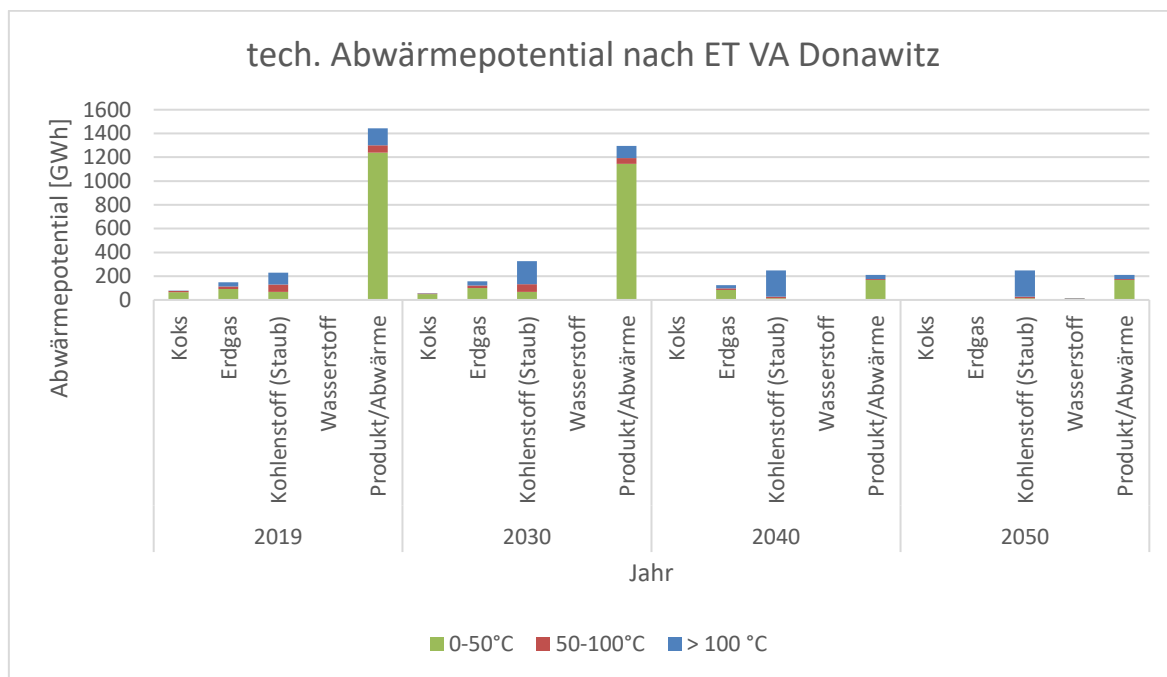


Abbildung 5-20: technisches Abwärmepotential nach Energieträger VA Donawitz

Die Standorte der Sekundärstahlherstellung sind in Abbildung 5-21 zu sehen. Hauptenergieträger ist Erdgas, gefolgt von Kohlenstoff in Form von Kohlenstaub und dem Abbrand der Elektroden. Der signifikante Anteil an Abwärmepotential im Temperaturbereich über 100 °C aus dem Abgas des Elektrolichtbogenofens ist eindeutig der Verbrennung des Kohlenstaubs zuzuordnen.

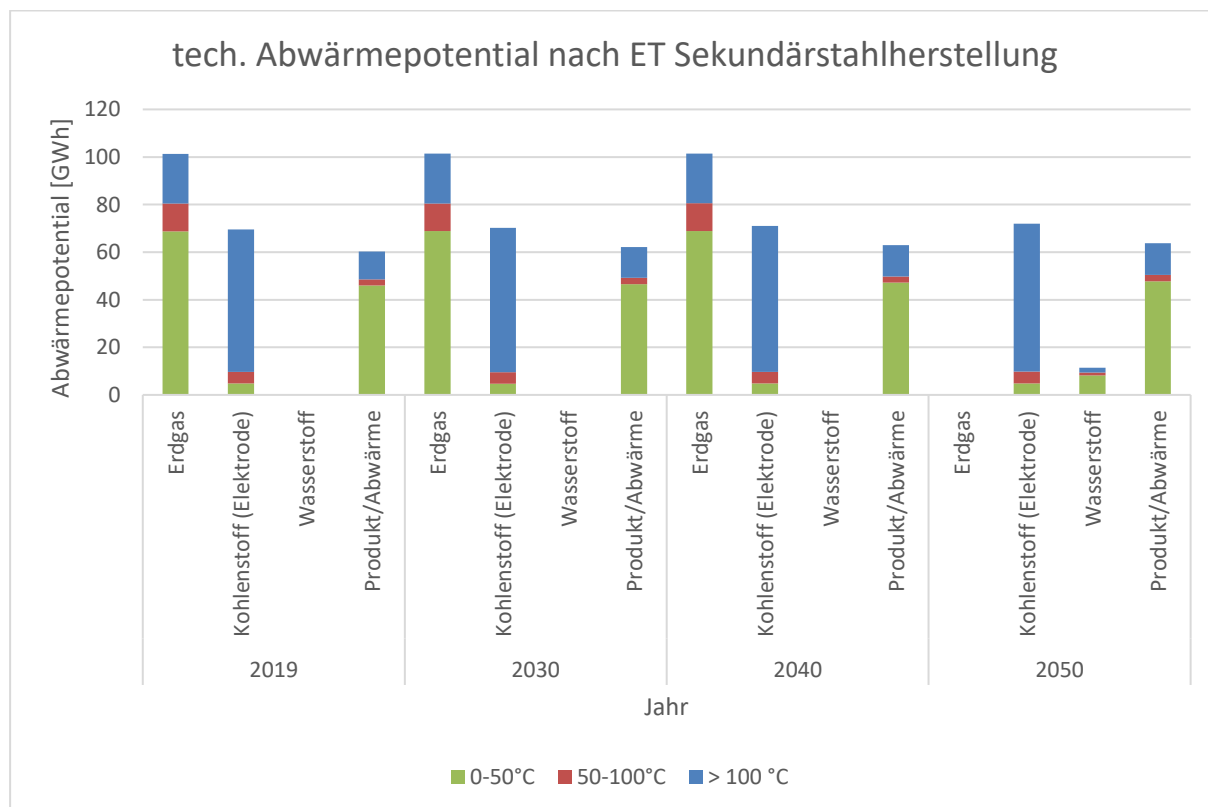


Abbildung 5-21: technisches Abwärmepotential nach ET Sekundärstahlindustrie

Papier- und Zellstoffindustrie

In Abbildung 5-22 ist das technische Abwärmepotential der Papier- und Zellstoffindustrie nach den eingesetzten Energieträgern eingeteilt dargestellt. Für die Papierherstellung dient Holz als Primärrohstoff. Aus diesem Grund liegt es nahe anfallende Abfälle der Zellstoffherstellung thermisch zu Verwerten und damit die Produktion mit Strom und Wärme, vor allem in Form von Dampf, zu versorgen. Die Kategorie Biomasse enthält dabei Abfälle aus dem Entrinde- und Schleifprozess sowie die bei der Zellstoffherstellung anfallende Lignin-haltige Schwarzlauge. Neben Biomasse wird vor allem Erdgas in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen verbrannt. Der hohe Energiebedarf der Papierherstellung wird dadurch meistens von den standorteigenen Kraftwerken gedeckt. Steinkohle kommt nur als Energieträger am Standort von Sappi Gratkorn im Jahr 2019 vor. Die Umstellung auf Biomasse wurde bereits für die Jahre ab 2030 mitberücksichtigt. Die Kategorie Abwärme/Produkte enthält das Potential der Kühl- und Abwässer am Standort sowie anfallende Produkt und Hallenwärme. Für das Jahr 2050 wurde wieder die Annahme getroffen, den Erdgasverbrauch durch Wasserstoff zu ersetzen.

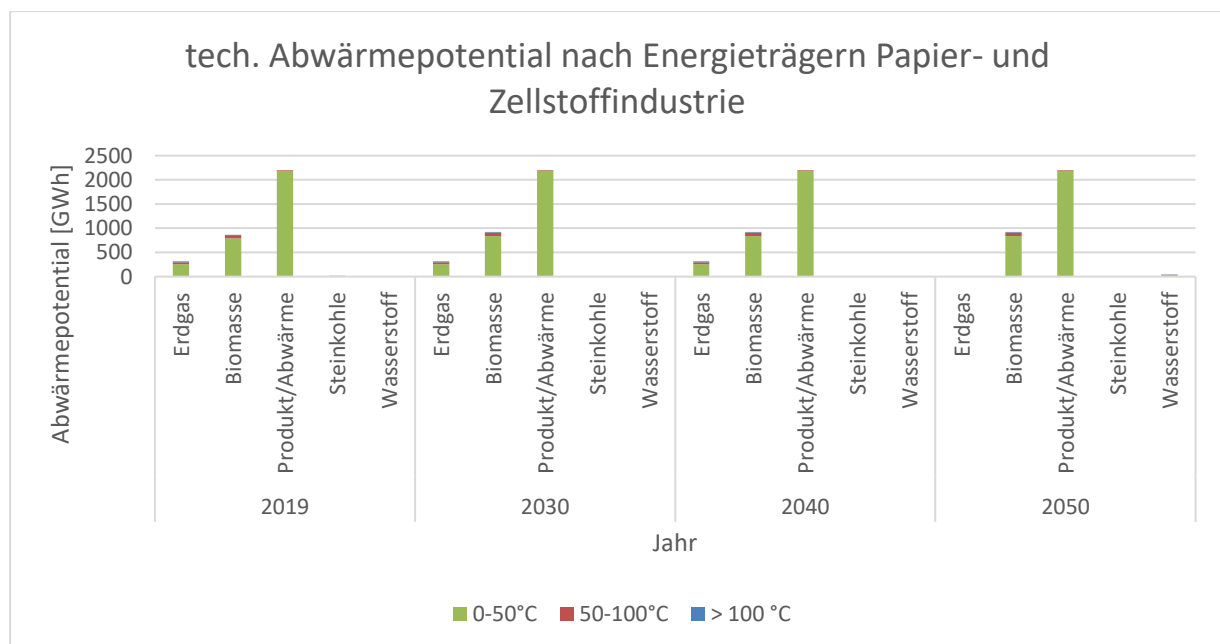


Abbildung 5-22: technisches Abwärmepotential nach Energieträgern Papier- und Zellstoffindustrie

Zementindustrie

Das technische Abwärmepotential nach eingesetzten Energieträgern für den Standort Holcim Retznei ist in Abbildung 5-23 dargestellt. Als Hauptenergieträger werden Ersatzbrennstoffe (EBS) verwendet. Als Ersatzbrennstoffe werden unter anderem Altreifen, Kunststoffabfälle sowie generischer Hausmüll und Holzabfälle bezeichnet. Fossile Brennstoffe, in Form einer Mischung aus Petrolkoks und Heizöl extra leicht, werden nur für den Hochfahrvorgang eingesetzt, da erst beim Erreichen einer bestimmten Temperatur EBS verbrannt werden dürfen. Die Zementindustrie sieht auch für die Zukunft den Einsatz von EBS als essenziellen Bestandteil der Zementherstellung und möchte die Quote auch bis zum Jahr 2050 möglichst hochhalten. Unter die Kategorie Produkt/Abwärme fallen hier vor allem die Abstrahlung des Drehrohrofens sowie das Potential der Kuhlflut im Klinkerkühler. Für 2050 wurde der Anteil an eingesetzten fossilen Brennstoff durch Wasserstoff ersetzt. Als fossile Energieträger werden dabei hauptsächlich Petrolkoks und Heizöl extra leicht verwendet.

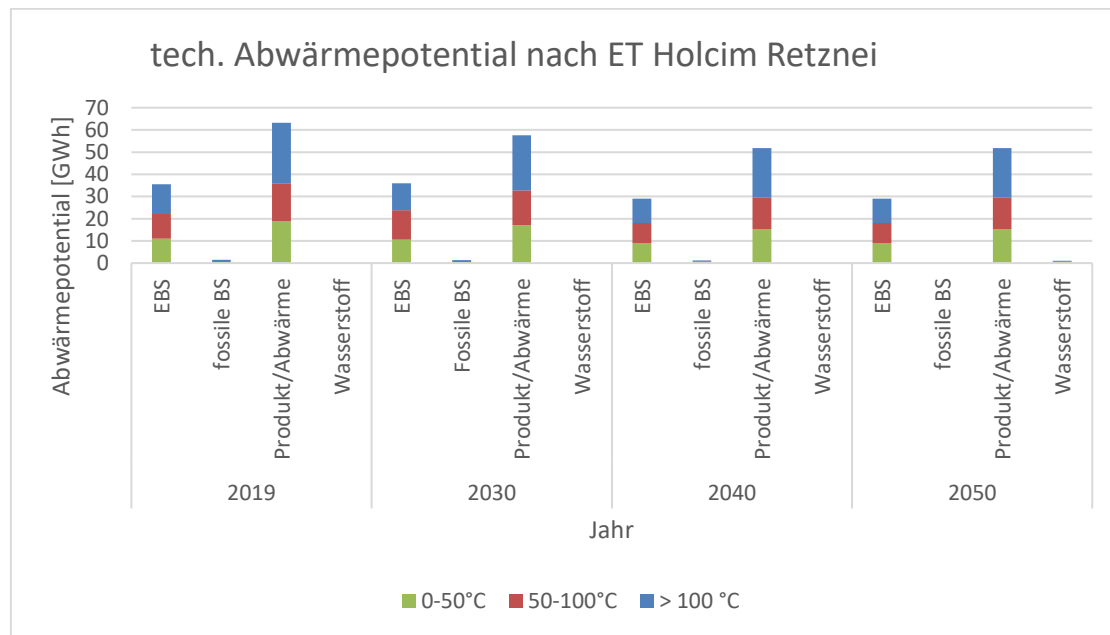


Abbildung 5-23: technisches Abwärmepotential nach Energieträger Holcim Retznei

Magnesiaindustrie

Die Ergebnisse für die Magnesiaherstellung sind in Abbildung 5-24 dargestellt. Anders als bei der Zementherstellung dürfen bei der Magnesiaherstellung keine EBS verwendet werden, da sich das negativ auf die Produktqualität auswirken kann. Aus diesem Grund werden die Öfen meist ausschließlich mit Erdgas befeuert. Dadurch wird das Potential des Rauchgases dem Energieträger Erdgas zugeordnet, Abstrahlung des Drehrohrs sowie die Abluft beim Kühlen des Magnesias wird wie bei der Zementindustrie der Kategorie Produkt/Abwärme zugeordnet. Für das Schlüsseljahr 2050 wird die Prozesswärme für die Magnesiaherstellung hauptsächlich durch Wasserstoff gedeckt.

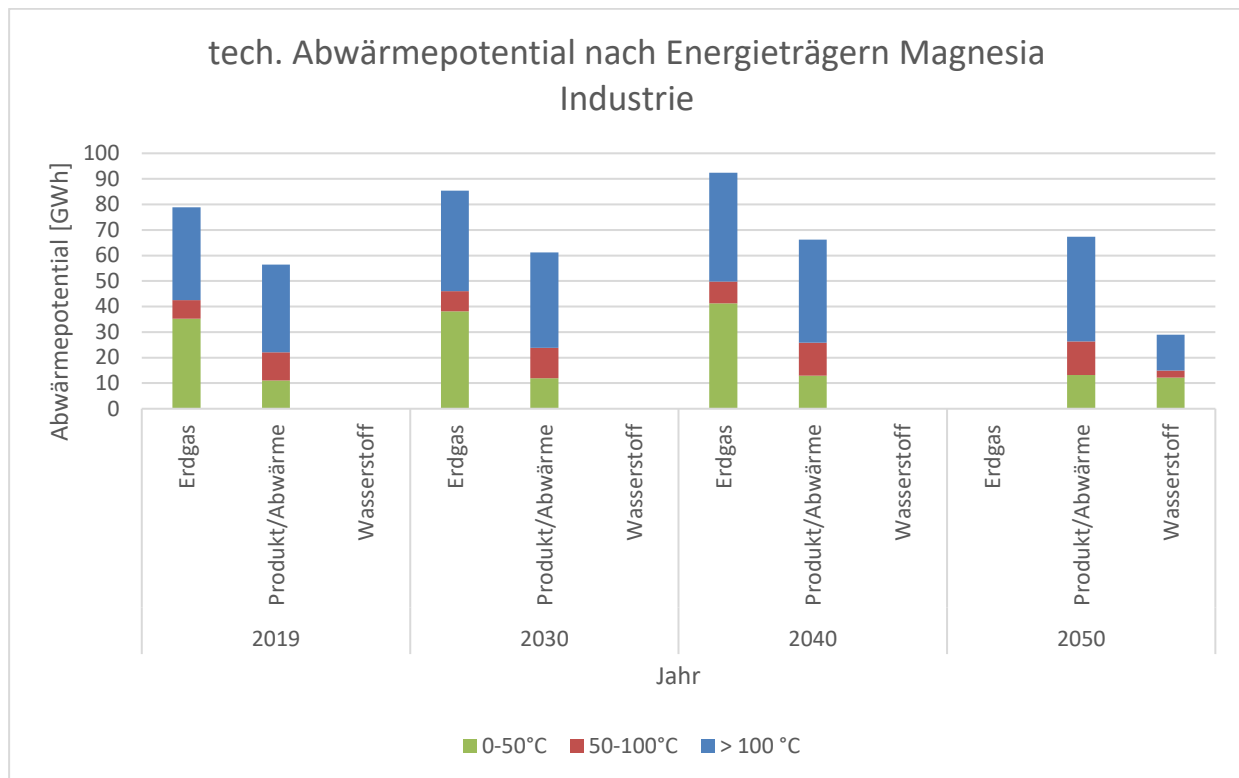


Abbildung 5-24: technisches Abwärmepotential nach Energieträger RHI-Magnesita Breitenau

Gasverdichterstation

Das Ergebnis für die GVS in Weitendorf ist in Abbildung 5-25 zu sehen. Gasverdichterstationen verwenden einen Teil des transportierten Gases zum Antrieb der Turboverdichter. Aus diesem Grund wird nur Erdgas als eingesetzten Energieträger verortet. Die Abwärme, die an den Gaskühlern anfällt, wird als Produktabwärme angenommen. Durch die Abnahme der benötigten Gasmengen in Europa reduziert sich die transportierte Gasmenge und damit auch die bei der Verdichtung anfallende Abwärme.

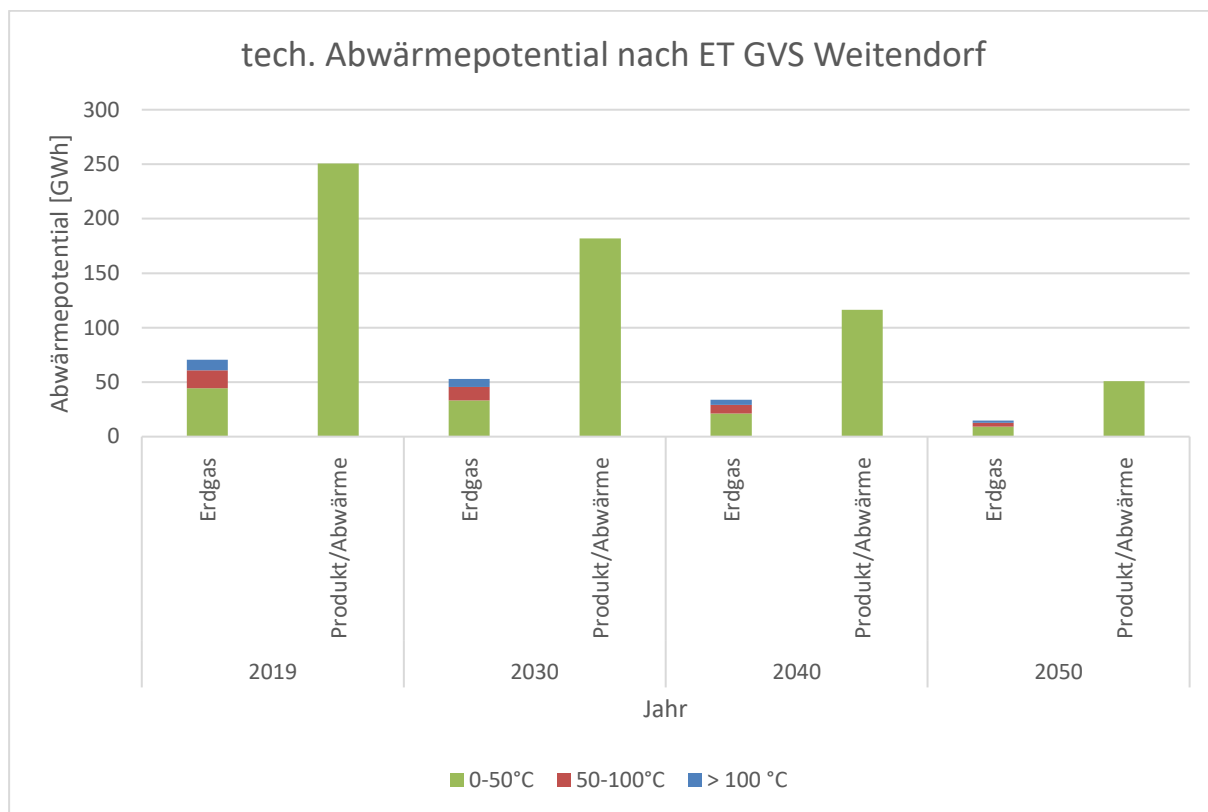


Abbildung 5-25: technisches Abwärmepotential nach Energieträger GVS Weitendorf

6 ROADMAP FÜR DEN HEAT-HIGHWAY

Im Projekt Heat-Highway wird die Fragestellung behandelt, ob überregionale Fernwärmenetze mit industrieller Abwärme versorgt werden können. Essenziell für die Beantwortung dieser Frage ist die Kenntnis über aktuelle und zukünftige Mengen an verfügbarer Abwärme entlang des überregionalen Fernwärmenetzes. Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, konkrete Abwärmemengen für die untersuchten Standorte bis zum Jahr 2050 zu ermitteln.

Im einleitenden Literaturteil dieser Arbeit wurde eine Roadmap als strategisches Planungswerkzeug vorgestellt. Ziel dieser Arbeit ist es einen strategischen Plan für die vorhandenen Abwärmemengen der ausgewählten Unternehmen aus der energieintensiven Industrie zu erarbeiten. Relevant sind die technischen Abwärmepotentiale ausgehend vom Basisjahr 2019 für die Stützjahre 2030 und 2040 bis zum Schlüsseljahr 2050 unter Berücksichtigung von Produktionsänderungen, politischen Rahmenbedingungen und bevorstehender Technologieänderungen.

Die Roadmap soll beinhalten:

- Konkrete Abwärmemengen für die Jahre Ist-Stand (2019), 2030, 2040 und 2050
- Notwendigen Technologischen Änderungen um die Klimaziele der EU/Österreich zu erreichen.

Weiters werden in dieser Roadmap von den in Kapitel 3.8 vorgestellten Kategorien der industriellen Abwärme, nur jene der 1 und 2 (direkte Prozessabwärme) Kategorie und nicht für die Potentiale aus Kategorie 3 und 4 dargestellt.

6.1 Roadmapping-Prozess

Für die Vorgehensweise des gesamten Roadmapping-Prozesses wird nach dem Schema der IEA in einer verkürzten Version vorgegangen. Dabei werden die einzelnen Phasen Schritt für Schritt durchgegangen.

1. Phase: Planung und Vorbereitung

Die erste Phase umfasst die Planung und Vorbereitung der Roadmap. Hier werden die Ziele definiert. Aus der Aufgabenstellung geht hervor, dass die technischen Abwärmepotentiale der ausgewählten Industriebetriebe bis zum Jahr 2050 zu identifizieren sind.

2. Phase: Szenarienentwicklung

Die verwendeten Szenarien stellen die prognostizierte Produktionsmenge der Industriebranchen dar. Da die in dieser Arbeit untersuchten Standorte Teil der produzierenden Industrie sind, hat eine Änderung der Produktionsmenge eine direkte Auswirkung auf die anfallende Abwärme. Für die Gasverdichterstation in Weitendorf wird die Durchflussmenge als Kennzahl zur Bestimmung der Abwärme herangezogen.

3. Phase: Aufstellen einer Roadmap

Ausgangsbasis für die Roadmap bilden die Ergebnisse sowie die Berechnungsmethodik aus dem „INIX-Bericht“. Diese werden mit den in dieser Arbeit erstellten Szenarien für die Änderung der Produktionsmenge kombiniert, um konkrete Abwärmemengen bis zum Jahr 2050 zu berechnen. Anhand der Szenarien sowie für einige Standorte bereits geplanter Technologieänderungen und der Annahme der Umstellung auf klimaneutrale Brennstoffe werden die verfügbaren Abwärmemengen bis zum Jahr 2050 berechnet.

4. Phase: Implementation

Diese Arbeit umfasst lediglich die Berechnung der vorhandenen Potentiale ausgehend von der aktuell vorhandenen und zugänglichen Datenlage. Sie soll aufzeigen, wie sich die vorhandenen Abwärmepotentiale unter Berücksichtigung von Technologieänderungen und politischer Rahmenbedingungen bis zum Jahr verändert. Der Roadmapping-Prozess ist in der Regel ein ausgesprochen dynamisches Vorhaben, bei dem der Status-Quo immer wieder über Kennzahlen geprüft und durch Maßnahmen angepasst wird.

6.2 Abwärmepotential für Heat-Highway

In diesem Kapitel werden nun die Ergebnisse der verfügbaren Abwärmepotentiale, der Kategorie 1 und 2, bezogen auf den Heat Highway, dargestellt. Diese unterscheiden sich zu den in Kapitel 5 dargestellten allgemeinen Ergebnissen der technischen Abwärmepotentiale durch die Berücksichtigung gewisser Randbedingungen des Heat Highways.

Randbedingungen:

- Für die Abwärme der Kategorie 1: Die anfallenden Leistungen können direkt verwendet werden, da die Temperatur für den Heat Highway hoch genug ist.
- Für Kategorie 2 Abwärme – Mitteltemperatur Abwärme: Das Temperaturniveau wird einheitlich auf 130 °C mittels Wärmepumpen angehoben.
- Für Kategorie 2 Abwärme – Niedertemperatur Abwärme: Das Temperaturniveau einheitlich auf 110 °C mittels Wärmepumpen erhöht.
- Die Abwärme aus der Kategorie 2 wird anhand der Bildung des durchschnittlichen Coefficient of Performance (COP) für die Mitteltemperatur und für die Niedertemperatur bewertet. Für die Berechnung wird ein Gütegrad der Wärmepumpe von 0.5 angenommen.
- Die Bilanzgrenze wird weiterhin um den untersuchten Standort gezogen. Zusätzliche Verluste, die bei der Wärmeübertragung auf den Heat Highway entstehen, werden nicht mitberücksichtigt.
- Alle Abwärmern werden auf die Rücklauftemperatur des Heat Highways von 55 °C bezogen.
- Die berechneten COPs für die Kategorie 2 werden auf die tatsächliche Temperatur der Abwärmequelle bezogen.

Da die eingesetzte elektrische Leistung nicht bekannt ist, erfolgt die Berechnung des Coefficient of Performance (COP) über die bekannten Temperaturniveaus und einem durchschnittlichen Gütegrad. Ausgegangen wird, wie in Formel (6-1) dargestellt, vom theoretische maximalen COP, welcher dem Kehrwert des Carnot-Wirkungsgrades entspricht. [89] Die Temperaturen werden als absolute Temperaturen in Kelvin eingesetzt.

$$COP_{Carnot} = \frac{T_{Hei\beta}}{T_{Hei\beta} - T_{Kalt}} \quad (6-1)$$

Unter Berücksichtigung des Gütegrads η wird anschließend der reale COP, nach Formel (6-2) berechnet.

$$COP_{Real} = COP_{Carnot} * \eta \quad (6-2)$$

In Abbildung 6-1 ist das verfügbare technische Abwärmepotential sowie die vorhandene Abwärmeleistung für den Heat Highway dargestellt. Betrachtet wird die Abwärme aus Kategorie 1 (Kat 1 Prozess), welche sich bereits auf einem ausreichend hohem Temperaturniveau für die Nutzung in Fernwärmenetzen befindet und die Abwärmen aus Kategorie 2, welche in Mitteltemperatur (Kat 2 (+WP) 130 °C) und Niedertemperatur (Kat 2 (+WP) 110 °C) aufgeteilt ist. Die Abwärme aus Kategorie 1 wird von der jeweiligen Temperatur, bei der diese anfällt auf die Referenztemperatur von 55 °C bezogen. Die Abwärme aus der Kategorie 2 (+WP 130 °C) gilt für Abwärme, welche in einem Temperaturbereich zwischen 50 °C und 100 °C anfällt und wird über Wärmepumpen auf 130 °C angehoben. Sie bezieht sich ebenfalls auf die Referenztemperatur von 55 °C. Für die Kategorie 2 (+WP 110 °C) werden die Abwärmepotentiale unter 50 °C auf eine Temperatur von 110 °C angehoben. Auch diese Potentiale beziehen sich auf die Referenztemperatur von 55 °C. Da die tatsächlichen Abwärmemengen auf verschiedenen Temperaturen anfallen ergeben sich unterschiedliche COPs, mit denen der Einsatz der Wärmepumpen bewertet werden kann. Daraus folgt, dass die Abwärme aus Mitteltemperatur für die Kombination mit Wärmepumpen geeigneter ist. In der Papier- und Zellstoffherstellung werden Abwärmepotentiale im Bereich von 80 °C im Rauchgas der Schwarzlauge und in der Abluft aus der Papiertrocknung gefunden. Diese Abwärmen lassen sich durch geringeren Energieaufwand als bei der Kat 2 (+WP 110 °C), auf eine, für die Fernwärmeversorgung nutzbare, Temperatur von 130 °C anheben, was sich durch einen durchschnittlichen COP von etwa 3.3 bestätigen lässt. Der Großteil des Abwärmepotentials liegt jedoch, wie auch schon bei den Ergebnissen der allgemeinen technischen Potentiale in Kapitel 5, im Bereich der Niedertemperatur. Für die in dieser Arbeit untersuchten Niedertemperatur-Abwärme liegt der durchschnittliche COP bei etwa 2.5, wird jedoch durch Ausreißer wie jenen bei der Abluft aus der Kühlung des komprimierten Erdgases mit 2.1 etwas negativ beeinflusst. In [90] wurden Hochtemperaturwärmepumpen zur energetischen Nutzung von Niedertemperatur-Abwärme aus der Industrie analysiert. Aus den veröffentlichten Ergebnissen ist ein vergleichbarer COP von etwa 2.5 für die Anhebung von Abwärme bei 50 °C auf 110 °C zu entnehmen. Die Wirtschaftlichkeit des Betriebs ist stark von den aktuellen Energiekosten und dem Temperaturhub abhängig. Aus dem Fazit von [90] geht hervor, dass ein COP von 3 bei den aktuellen Preisverhältnissen von Strom und Gas in der Industrie nicht ausreicht, um die von den Unternehmen gewünschten Amortisationszeiten zu realisieren. Werden alle Potentiale im Niedertemperaturbereich in Verbindung mit Wärmepumpen auf 110 °C angehoben, können gewaltige Abwärmemengen realisiert werden. Im Jahr 2019, dem Jahr mit dem größten Abwärmepotential stehen beinahe 10700 GWh an Abwärme zur Verfügung. Davon etwa 10000 GWh im Bereich der Niedertemperatur Kat 2 (+WP 110 °C). Im Schlüsseljahr 2050 sind insgesamt immerhin noch rund 7100 GWh an Potential vorhanden. Der Anteil an direkt nutzbarer Prozesswärme verändert sich über die Jahre geringfügig. Von anfänglich 746 GWh im Jahr 2019 nimmt das Potential bis 2050 auf knapp 480 GWh ab. – Im technischen Abwärmepotential ohne Wärmepumpen nimmt die Niedertemperaturabwärme von 2019 bis 2050 ca. um 1/3 ab, dieser Trend ist auch hier zu sehen. Grund dafür ist, wie auch schon bei den Potentialen der Ergebnisse ohne WP, der Wegfall von einigen Anlagen der Primärstahlindustrie sowie der durch den Einsatz von Wasserstoff im Jahr 2050 geringere Massenstrom und Anteil an Kondensat im Vergleich zur Verbrennung von Erdgas.

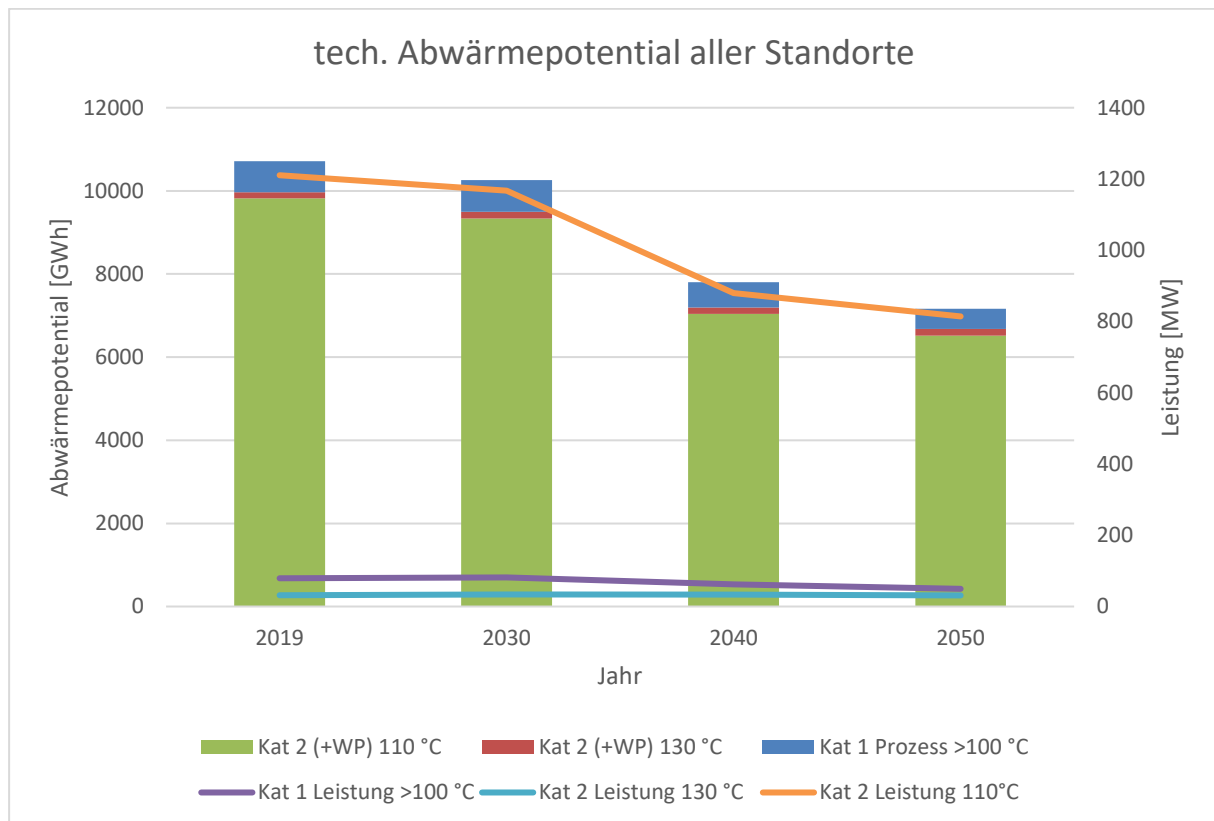


Abbildung 6-1: technisches Abwärmepotential für Heat-Highway

6.3 Roadmap für den Heat Highway

Die Roadmap fasst nun die in dieser Arbeit erarbeiteten Ergebnisse zusammen. Es werden die technischen Abwärmepotentiale, unter den in 6.2 aufgestellten Randbedingungen für den Heat Highway, zusammen mit den aus Roadmaps bzw. Expertengesprächen erfassten Entwicklungen für die Zukunft übersichtlich dargestellt. Der Aspekt des Wirtschaftswachstums und die Klimaziele werden durch die Änderung der Produktionsmenge sowie dem Einsatz von neuen Technologien und Brennstoffwechsel mitberücksichtigt. Die Ergebnisse werden als Zeitstreifen mit den jeweiligen Meilensteinen graphisch in Abbildung 6-2 dargestellt. Daraus ist zu erkennen, dass im Jahr 2050 unter den in dieser Arbeit verwendeten Annahmen zu den Produktionsmengen und bevorstehender Technologieänderungen für die untersuchten Standorte insgesamt fast 7100 GWh an technischem Abwärmepotential zur Verfügung stehen. Unter der Annahme, dass ein durchschnittliches Einfamilienhaus etwa 10.000 kWh an Wärmebedarf pro Jahr hat sowie unter der Vernachlässigung von Transport- und Übertragungsverlusten lassen sich somit im Jahr 2050 etwa 710 Tausend Haushalte mit Abwärme der Kategorie 1 und 2 aus der Industrie versorgen. Wichtig zu erwähnen ist, dass die hier gezeigten zusammengefassten Ergebnisse nur für eine von vielen möglichen Möglichkeiten gilt. Mithilfe der in dieser Arbeit erstellten Ergebnisse sowie der Roadmap wird gezeigt, wie sich das verfügbare Abwärmepotential unter Berücksichtigung der bevorstehenden Technologieänderungen sowie unter dem Einsatz von Wärmepumpen bis zum Jahr 2050 verändert.

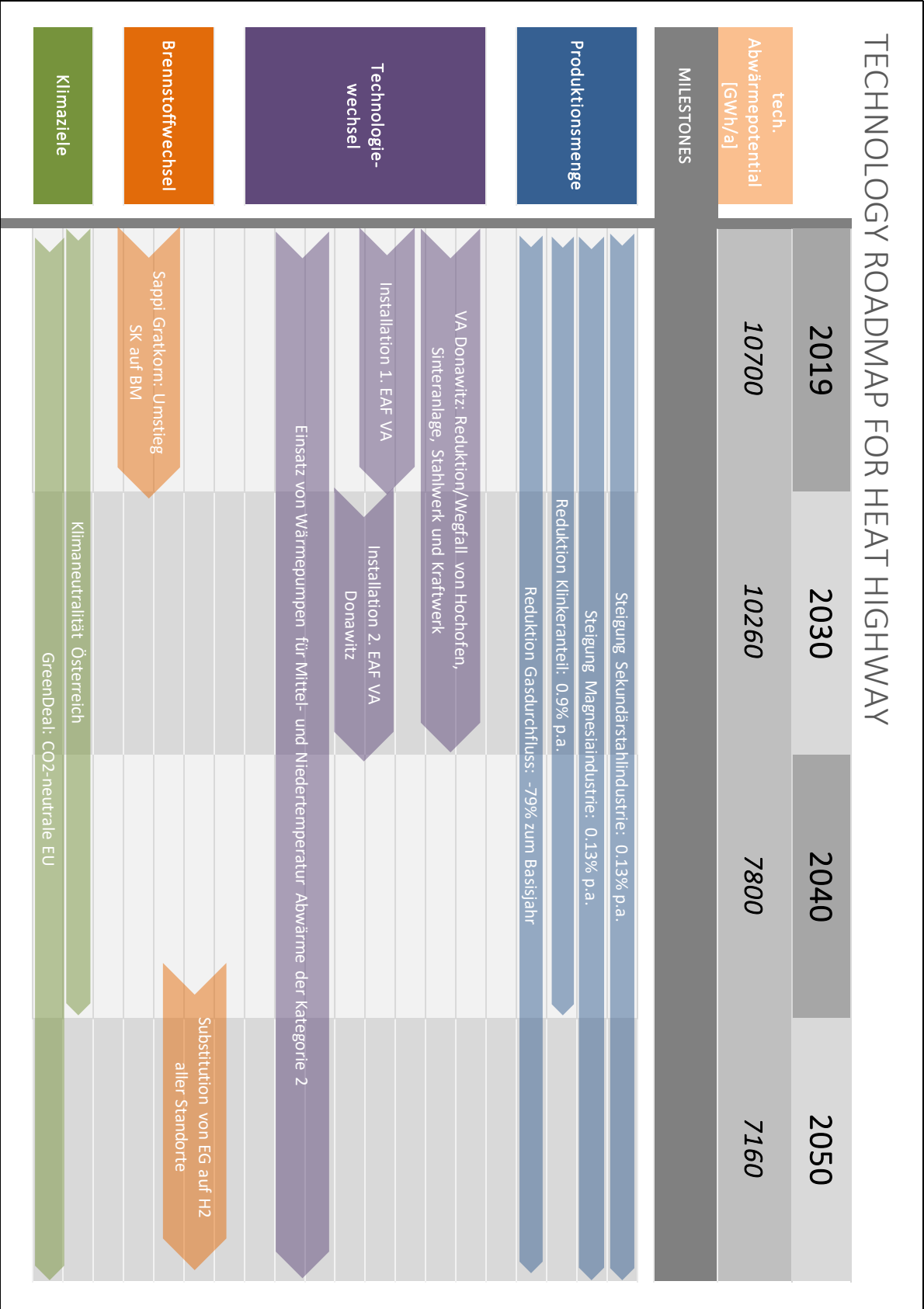


Abbildung 6-2: Technologie-Roadmap für den Heat Highway

7 DISKUSSION

Aus der Berechnung der technischen Potentiale, der Literaturstudie sowie aus den durchgeführten Expertengesprächen hat sich herausgestellt, dass der Begriff der Abwärme in der Industrie sehr vielseitig eingesetzt wird. Aus diesem Grund wurden vier Kategorien erstellt, die es ermöglichen Abwärme für den Einsatz in Fernwärmenetzen, in die folgenden Kategorien einzuteilen:

1. Prozessabwärmern, mit einer Temperatur über 100 °C, welche direkt in Fernwärmenetzen genutzt werden können.
2. Prozessabwärmern, welche durch den Einsatz von Wärmepumpen, auf ein geeignetes Temperaturniveau für die Fernwärme angehoben werden können.
3. Abwärme aus Verbrennungsanlagen, die mit Abfallstoffen aus der Produktion befeuert verwerten.
4. Abwärme aus Verbrennungsanlagen, die externe Brennstoffe einsetzen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden vorrangig die Weiterentwicklung der Abwärmern der Kategorie 1 und 2 bis zum Jahr 2050 untersucht. Dabei wurde die Kategorie 2 als Teil der allgemeinen Ergebnisse der technischen Potentiale in Kapitel 5 ohne den Einsatz von Wärmepumpen sowie im Kapitel 6 für den Heat Highway mit Wärmepumpen betrachtet. Daraus geht hervor, dass die Abwärme im Jahr 2030 am höchsten ist und danach bis 2050 abnimmt. Die Hochtemperaturabwärme der Kategorie 1 bleibt dabei bis zum Jahr 2050 konstant. Daraus folgt, dass auch in Zukunft weitere Abwärme für den direkten Einsatz in Fernwärmenetzen problemlos erschlossen werden könnten. Durch den Einsatz von Hochtemperaturwärmepumpen könnten Abwärmepotentiale zwischen 50 °C und 100 °C oder darüber, auf Temperaturen gehoben werden, welche für die interne Nutzung im Prozess interessant werden. Die Papier- und Zellstoffindustrie könnte besonders davon profitieren. Durch den Einsatz von Hochtemperaturwärmepumpen könnte damit die energieintensive Herstellung des für den Trocknungsprozess benötigten Dampfes über Gas-und-Dampfkombikraftwerke, Biomasse-KWKs oder Gaskessel entfallen oder zumindest verringert werden, wodurch sich der Primärenergieeinsatz verringert. Für die Abwärme in Fernwärmenetzen bedeutet dies, dass in Zukunft durch den Einsatz von Hochtemperaturwärmepumpen mehr Abwärme intern in der Industrie genutzt werden könnte. Daraus folgt, dass in Zukunft eventuell weniger Abwärmepotential aus Kategorie 1 und 2 aus dem Hoch- und teilweise aus den Mitteltemperaturbereich zur Verfügung steht. Jedoch zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit, dass die Fernwärme in Zukunft auch durch den Einsatz von Wärmepumpen in Verbindung mit Niedertemperatur bzw. teilweise Mitteltemperatur, unter den diskutierten Umständen, ausreichend versorgt werden könnte. Aus der Literaturstudie zur aktuellen Fernwärmeauskopplung der Industrie sowie aus den Expertengesprächen geht hervor, dass ein Großteil der zurzeit genutzten und in den letzten Jahren weiter ausgebauten Abwärmeauskopplungsanlagen auf die Abwärme der Kategorie 3 und 4 fallen. Da diese Kategorien in der Berechnung nicht berücksichtigt wurden, sind die Ergebnisse weitgehend unabhängig davon. Jedoch wird daraus der Trend bemerkbar, dass sich die Industrie zunehmend in Richtung der Energieversorgung entwickelt. Gerade die energieintensive Eisen- und Stahlindustrie und die Papierindustrie setzen schon lange auf eine eigenständige Energieversorgung ihrer Standorte, um unabhängig von stark fluktuierenden Energiepreisen zu sein. Aufgrund der zunehmenden Fluktuation der Strompreise macht es Sinn, die vorhandenen Kapazitäten zur Bereitstellung von Energie zur eigenen Versorgung auszubauen und ebenfalls Überkapazitäten zu installieren um, egal ob Strom oder Wärme, außerhalb des Industriebetriebs Energie bereitzustellen.

Daraus lässt sich ebenfalls ein Trend für die zukünftige Fernwärmeversorgung ableiten. Demnach wird, aufgrund des Wandels der Industrie in Richtung der Energiedienstleistung sowie dem Trend des Ausbaus weiterer Kapazitäten, in Zukunft vorrangig industrielle Abwärme der Kategorien 3 und 4 für die Fernwärme eingesetzt. Ob dabei jedoch primär Abwärme der Kategorie 3 (aus der Verbrennung von Produktionsabfällen) oder der Kategorie 4 (aus der Verbrennung externer Brennstoffe) genutzt wird, hängt maßgeblich davon ab, ob Wasserstoff für den Einsatz in KWK-Anlagen verfügbar sein wird.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Abwärmepotentiale und deren Entwicklung bis zum Jahr 2050 ermittelt. Angesichts der zukunftsorientierten Fragestellung müssen für die Berechnungen gewisse Annahmen und Vereinfachungen getroffen werden. Aus diesem Grund müssen die Ergebnisse mit einer gewissen Unsicherheit betrachtet werden. Die Resultate basieren auf den Berechnungen des Ist-Stands für 2019 und werden mithilfe von Szenarien, welche die Veränderung der Produktionsmenge berücksichtigen, bis zum Jahr 2050 berechnet. Die erstellten Szenarien stellen nur eine von vielen Möglichkeiten dar, wie sich die Abwärmemengen für die Zukunft verändern könnten. Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Szenario für eine allgemeine Umstellung von fossilen Energieträgern auf Wasserstoff sowie die bereits geplanten Technologieänderungen untersucht. Für eine umfangreichere Darstellung sowie einen Vergleich der Ergebnisse, wie sich die Abwärmepotentiale unter Berücksichtigung unterschiedlicher Entscheidungszweige, etwa der vollständigen Elektrifizierung der Industrie, durch zum Beispiel den vermehrten Einsatz von Wärmepumpen und dem Einsatz von elektrischer Energie für die Hochtemperaturprozesse in der Zement- und Magnesiaherstellung, oder dem Einsatz von neuen Durchbruchtechnologien (wie zum Beispiel der vorgestellten Technologien zur wasserreduzierten Papierherstellung) verändert, wäre eine Berechnung mit zusätzlichen Szenarien äußerst wertvoll.

Als Ausgangsbasis für die Berechnung der Abwärmepotentiale dienten die bereits vorhandenen Ergebnisse aus dem „INXS-Bericht“. Da der Fokus dieser Arbeit auf der Weiterentwicklung der Abwärmepotentiale lag, wurden die vorhandenen Ergebnisse zwar sorgfältig auf Plausibilität geprüft, jedoch kann damit nicht verhindert werden, dass Vereinfachungen aus den bestehenden Berechnungen, die Ergebnisse verfälschen können. Weiters wurden für die Berechnung der technischen Potentiale oftmals mit Erfahrungswerten angenommen, welche nicht jeden Standort perfekt abbilden.

Grundlage für die Bestimmung des Abwärmepotentials der Gasverdichterstation in Weitendorf ist die Abschätzung der transportierten Menge an Erdgas entlang der TAG. Diese Aufgabe stellte sich als deutlich komplexer als ursprünglich erwartet dar. Die TAG war bis vor kurzen vor allem für den Transport von russischem Erdgas in den Süden Europas zuständig. Seit der russischen Invasion in die Ukraine verfolgt die Europäische Union im Rahmen des REPowerEU-Plans das Ziel, bis spätestens 2027 die Abhängigkeit von russischem Erdgas vollständig zu beenden. Damit verändern sich die Durchflussmengen über die TAG in naher Zukunft drastisch. Gleichzeitig kommt es zu einem Trend mehr Erdgas über Italien in Richtung Zentral-Europa zu importieren, wodurch sich die Flussrichtung umkehrt. Weiters wird mit dem Projekt „Hydrogen Backbone“ der Ausbau eines europäischen Wasserstoffnetzes in naher Zukunft realisiert. Die Änderungen der Gastransportmengen sind demnach äußerst dynamisch und von vielen Faktoren abhängig. Dadurch können die Durchflussmengen je nach Szenario für die Zukunft (mehr Biogas oder mehr Wasserstoff) deutlich unterschiedlich ausfallen. Aus diesem Grund wurde die Vereinfachung getroffen, die Durchflussmengen durch die Verdichterstation aus einer Prognose für den Erdgasverbrauch in Europa abzuleiten und den Wasserstofftransport bei den Berechnungen vorerst nicht zu berücksichtigen. Um das Abwärmepotential der Gasverdichterstation demnach präziser zu berechnen,

müsste die Kenntnis über die zukünftigen Durchflussmengen sowie die Ausbaupläne der Gasinfrastruktur in Europa bekannt sein.

In dieser Arbeit wurden lediglich die technischen Abwärmepotentiale betrachtet. Einige der angenommenen Potentiale, wie z.B. die Nutzung der Abstrahlungswärme an Drehrohröfen, erfordern jedoch erhebliche Investitionen. Der Wärmeinhalt von Produkten wie Schlacke und Rohstahl wurde zwar mit großzügigen Grädigkeiten berücksichtigt, muss jedoch ebenfalls zunächst über Ablufthauben gebündelt werden. Für eine präzisere Darstellung der vorhandenen Abwärme müssen demnach die Investitionskosten der eingesetzten Technologien zur Abwärmenutzung mitberücksichtigt werden, um letztendlich das wirtschaftliche Potential zu ermitteln.

8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Zusammenfassend wurden in dieser Arbeit die technischen Abwärmepotentiale für insgesamt neun Standorte aus vier verschiedenen produzierenden Industriebranchen sowie für eine Gasverdichterstation unter der Berücksichtigung von zukünftigen Technologieänderungen bis 2050 berechnet. Zusätzlich wurden die allgemeinen Ergebnisse der Potentialberechnung auf die Randbedingungen des Heat Highways angepasst und die Abwärme aus der Kategorie 2 in Verbindung mit Wärmepumpen betrachtet. Anschließend wurden die Ergebnisse in Form einer Roadmap zusammengefasst. Diese Roadmap bildet eine übersichtliche Darstellung wie sich die Abwärmepotentiale aufgrund von bevorstehenden Technologieänderungen verändert und kann als wichtiges Instrument für strategische Entscheidungen eingesetzt werden. Die Berechnungen zeigen, dass mit den angenommenen Produktionsmengen, den bevorstehenden Technologiewandel und einer allgemeinen Umstellung der fossilen Energieträger auf Wasserstoff im Jahr 2050 etwa 7100 GWh an technischen Abwärmepotential aus der Kategorie 1 und 2, unter der Annahme, dass diese mit Wärmepumpen auf ein nutzbares Temperaturniveau angehoben werden können, für den Heat Highway vorhanden wären. Dies setzt allerdings voraus, wie in Kapitel 7 diskutiert, dass diese Wärme nicht in internen Prozessen verwendet wird und dass tatsächlich die gesamte Menge auch nutzbar gemacht wird, dass aufgrund von wirtschaftlichen Aspekten, eher als unrealistisch angesehen wird. Jedoch zeigt es das Potential, das in zurzeit nicht genutzter Abwärme steckt und soll dazu anregen weiter daran zu Forschen diese Abwärmequellen zu erschließen.

In zukünftigen Arbeiten sollten die Einflüsse unterschiedlicher Technologiepfade wie z.B. die weitere Elektrifizierung der Industrie und den Einsatz von neuen Durchbruchtechnologien auf die Abwärmepotentiale der Zukunft untersucht werden. Weiters könnte Einfluss durch eine kaskadische Nutzung der Abwärme zwischen den untersuchten Standorten näher betrachtet werden. Aus den Ergebnissen ist ein hoher Anteil an Abwärme der Kategorie 1 aus der Stahlindustrie, durch die Umstellung der Hochofenroute auf die Stahlproduktion mittels EAF, zu sehen. Diese Abwärme könnte entlang des Heat Highways zur umliegenden Papierindustrie transportiert und dort für die Bereitstellung des Dampfes eingesetzt werden.

Zusätzlich sollten bisher unberücksichtigte Abwärmepotentiale, die im Folgenden zusammengefasst werden, hinsichtlich ihres Abwärmepotentials analysiert werden.

Eisen und Stahlbranche

Am Standort Donawitz wird geplant eine modulare Wasserstoff-Elektrolyseanlage zu Errichten. Diese soll mit einer Gesamtleistung von 24 MW bis zu 3000 Tonnen Wasserstoff pro Jahr produzieren. Die beim Betrieb anfallende Abwärme kann wiederum als neues Potential gesehen werden. Weiters wird aktuell in Projekten wie H2Future, SuSteel und HYFOR an ganzheitlich neuen Verfahren zur Eisenschwamm- bzw. Rohstahlherstellung. In der am Standort Donawitz stehende Pilotanlage des Projekts SuSteel bildet ein Wasserstoffplasma eine Art Lichtbogen, mit dem es möglich sein soll, Stahl direkt aus dem Erz herzustellen ohne Roheisenstufe. CO₂-Emissionen können durch dieses Verfahren somit gänzlich vermieden werden. In naher Zukunft könnte diese Anlage eventuell neben den Elektrolichtbogenöfen betrieben und ebenfalls als Abwärmequelle gewertet werden. [91, 92]

Papier- und Zellstoffindustrie

Für die Papierherstellung wird bereits an neuen Prozessen mit deutlich geringerem Wassereinsatz geforscht. [22] Da der energieintensivste Schritt die Trocknung der feuchten Papierbahn ist, wirkt sich

eine geringere Feuchte des Papiers auch positiv auf die benötigte Menge an Dampf für die Trocknung aus und senkt dabei den Primärenergiebedarf sowie die im Prozess anfallende Abwärme. Diese Konzepte befinden sich noch im Forschungsstadium, könnten aber in Zukunft interessant werden und sollten für zukünftige Arbeiten mitberücksichtigt werden.

Zement und Magnesium

Bei der Zement- und Magnesiumherstellung fallen prozessbedingt CO₂-Emissionen an. In dieser Arbeit wurde noch keine CCU/S-Technologien berücksichtigt. In zukünftigen Arbeiten könnte untersucht werden, wie sich dadurch das Abwärmepotential des Abgases verändert.

Wasserstofftransport

Aus den Potentialberechnungen ging hervor, dass in der Abluft aus der Kühlung des komprimierten Gases einer Verdichterstation ein sehr großes Potential besteht. Dieses befindet sich zwar auf einer geringen Temperatur, akkumuliert sich jedoch aufgrund der hohen Durchflussmenge und kann in Verbindung mit Wärmepumpen zu einem wichtigen Potential für die Fernwärme werden. Dieses Potential blieb, im Rahmen dieser Arbeit, für die zukünftige Verdichtung von Wasserstoff über elektrische betriebene Kolbenverdichter unberücksichtigt. In zukünftigen Arbeiten sollte das Abwärmepotential aus der Abluft der Kühlung von Wasserstoff nach der Verdichtung von elektrisch betriebenen Kolbenverdichtern noch näher untersucht werden.

Zusammenfassend lässt sich aus den Ergebnissen dieser Arbeit folgern, dass der zukünftige Fernwärmebedarf auch weiterhin gedeckt werden kann, da ein Großteil dieses Bedarfs bereits jetzt über Abwärme der Kategorien 3 und 4 gedeckt wird und ein Trend zur Steigerung der Abwärme aus diesen Kategorien zu beobachten ist. Darüber hinaus stehen im Jahr 2050 noch etwa 9.000 GWh an technischen Abwärmepotential, bei Nutzbarmachung mit Wärmepumpen, der Kategorien 1 und 2 zur Verfügung. Aus der Kategorie 1 stehen im Jahr 2050 etwa 370 GWh an technischen Abwärmepotential aus direkter Prozessabwärme für die Fernwärme bereit, sofern sie nicht in internen Prozessen selbst genutzt wird.

9 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *Der europäische Grüne Deal*. URL https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de. – Aktualisierungsdatum: 2024-08-23 – Überprüfungsdatum 2024-08-23
- [2] EUROPEAN COMMISSION: *REPowerEU: Erschwingliche, sichere und nachhaltige Energie für Europa*. URL https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en?prefLang=de&etrans=de. – Aktualisierungsdatum: 2024-08-23 – Überprüfungsdatum 2024-08-23
- [3] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *Der grüne Industrieplan*. URL https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/green-deal-industrial-plan_de. – Aktualisierungsdatum: 2024-08-23 – Überprüfungsdatum 2024-08-23
- [4] OESTERREICH.GV.AT - ÖSTERREICHS DIGITALES AMT: *Die österreichische Klimaschutzstrategie/Politik*. URL https://www.oesterreich.gv.at/themen/umwelt_und_klima/klima_und_umweltschutz/1/Seite.1000310.html. – Aktualisierungsdatum: 2024-08-23 – Überprüfungsdatum 2024-08-23
- [5] POSITIONEN WIEN ENERGIE: *Energieverbrauch Österreich » in TWh nach Sektoren*. URL <https://positionen.wienenergie.at/grafiken/energieverbrauch-oesterreich/>. – Aktualisierungsdatum: 2024-05-21 – Überprüfungsdatum 2024-11-06
- [6] IEA ; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY: *Technology Roadmap A guide to development and implementation*. URL <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ca7594aa-1de1-4a3a-a531-121238ef5efb/TechnologyRoadmapAguidetodevelopmentandimplementation.pdf> – Überprüfungsdatum 2024-04-25
- [7] TOM LENEY, MIKE COLES, PHILIPP GROLLMAN, RAIVO VILU: *Scenarios Toolkit* (2004). URL https://www.cedefop.europa.eu/files/6009_en.pdf – Überprüfungsdatum 2024-07-19
- [8] *Definition: Szenario-Technik*. In: *Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH* (2018-02-14)
- [9] *Low-Carbon-Roadmap : Pathways to a CO2-neutral European Steel Industry* (2019). URL <https://www.eurofer.eu/assets/Uploads/EUROFER-Low-Carbon-Roadmap-Pathways-to-a-CO2-neutral-European-Steel-Industry.pdf> – Überprüfungsdatum 2024-08-09
- [10] CEPI: *Investing in Europe for Industry Transformation : 2050 Roadmap to a low-carbon bioeconomy*. URL <https://www.cepi.org/wp-content/uploads/2020/11/Roadmap-2050-Final-2017.pdf> – Überprüfungsdatum 2024-08-21
- [11] DI SEBASTIAN SPAUN, DI (FH) CORNELIA BAUER, DI CLAUDIA DANKL, DI. DR. RUPERT FRIEDLE, MAG. DR. FELIX PAPSCH: *Wie Was Wenn : Roadmap zur CO2-Neutralität der österreichischen Zementindustrie bis 2050* (2022). URL https://zement.at/downloads/downloads_2022/Roadmap_VOEZ_bis_2050.pdf – Überprüfungsdatum 2024-08-21
- [12] MARKUS HAIDER, Andreas Werner: *Roadmap Industrie - F&E-Fahrplan Energieeffizienz in der energieintensiven Industrie : Mineralien: Abbau und Verarbeitung*. Diskussionspapier - Juli 2014

- (2014). URL <https://www.klimafonds.gv.at/wp-content/uploads/sites/16/KLIEN2014FuEFahrplanMineralien.pdf> – Überprüfungsdatum 2024-08-21
- [13] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY: *Iron and Steel Technology Roadmap : Towards more sustainable steelmaking*. URL https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-187ceca189a8/Iron_and_Steel_Technology_Roadmap.pdf – Überprüfungsdatum 2024-08-10
- [14] *A Steel Roadmap for a low carbon Europe 2050*. URL <https://www.eurofer.eu/assets/publications/archive/archive-of-older-eurofer-documents/2013-Roadmap.pdf> – Überprüfungsdatum 2024-08-05
- [15] APPBUNDLE: *CO2UNTDOWN TO ZERO*. URL <https://www.voestalpine.com/co2untowntozero/>. – Aktualisierungsdatum: 2024-08-10 – Überprüfungsdatum 2024-08-10
- [16] *Climate-policy-paper-2021-1*. URL <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Climate-policy-paper-2021-1.pdf> – Überprüfungsdatum 2024-06-16
- [17] *voestalpine greentec steel - greentec steel*. URL <https://www.voestalpine.com/greentecsteel/de/>. – Aktualisierungsdatum: 2024-08-15 – Überprüfungsdatum 2024-08-23
- [18] *Auftrag Zukunft. Lösungen für Morgen. : Umwelterklärung Nachhaltigkeitmagazin 2023 (2023)*. URL <https://www.voestalpine.com/stahldonawitz/static/sites/stahldonawitz/.downloads/de/Umwelterklaerung-voestalpine-Stahl-Donawitz-2023.pdf> – Überprüfungsdatum 2024-10-28
- [19] *voestalpine Texas: Verkauf der Mehrheit an ArcelorMittal - voestalpine*. URL <https://www.voestalpine.com/group/de/media/presseaussendungen/2022-04-14-voestalpine-texas-verkauf-der-mehrheit-an-arcelormittal/>. – Aktualisierungsdatum: 2024-08-13 – Überprüfungsdatum 2024-08-23
- [20] JAN C. SCHAFFRATH: *Klimastudie Papierindustrie : Transformation zur Klimaneutralität*. URL https://cdn.prod.website-files.com/64baba653b7c9d6adfd30828/65af94c59fc8bb3d3d6e5a6e_Transformation%20der%20Papierindustrie%20-%20Studie%20-%20Web.pdf – Überprüfungsdatum 2024-08-21
- [21] CEPI: *Key Statistics 2023 : European pulp & paper industry*. URL <https://www.cepi.org/wp-content/uploads/2024/07/Key-Statistics-2023-FINAL.pdf> – Überprüfungsdatum 2024-08-03
- [22] CEPI: *The Two Team Project* (2013). URL https://www.pita.org.uk/images/PDF/CEPI_Two_Teams_Project_Report.pdf – Überprüfungsdatum 2024-08-21
- [23] CEMBUREAU: *Cementing the European Green Deal : REACHING CLIMATE NEUTRALITY ALONG THE CEMENT AND CONCRETE VALUE CHAIN BY 2050*. URL https://cembureau.eu/media/kuxd32gi/cembureau-2050-roadmap_final-version_web.pdf – Überprüfungsdatum 2024-07-10
- [24] VÖZ: *Klimaneutral bis 2050: Ziele und Meilensteine der österreichischen Zementindustrie - VÖZ | VEREINIGUNG DER ÖSTERREICHISCHEN ZEMENTINDUSTRIE*. URL <https://www.zement.at/services/archiv/299-jugendliche-frische-in-der-betonwelt-concrete-art?skey=1>. – Aktualisierungsdatum: 2024-08-22 – Überprüfungsdatum 2024-08-22

- [25] BIANCA DORNISCH-BUND: *Klimaneutrale Zementherstellung | Kompetenzzentrum Klimaschutz in energieintensiven Industrien (KEI)*. URL <https://www.klimaschutz-industrie.de/themen/branchen/zementindustrie/klimaneutrale-zementherstellung/>. – Aktualisierungsdatum: 2024-08-01 – Überprüfungsdatum 2024-08-01
- [26] RHI MAGNESITA: *Position: Dekarbonisierung Österreich | RHI Magnesita*. URL <https://www.rhimagnesita.com/de/position-austria/>. – Aktualisierungsdatum: 2023-05-16 – Überprüfungsdatum 2024-08-11
- [27] BMF: *Magnesit*. URL <https://www.bmf.gv.at/themen/bergbau/bergbau-in-oesterreich/industriemineralien2/magnesit.html>. – Aktualisierungsdatum: 2024-08-10 – Überprüfungsdatum 2024-08-11
- [28] RHI: *A European Green Deal that works for medium-sized energy-intensive industries operating in remote areas : RHI Magnesita White Paper for the next Commission* (2024). URL <https://www.rhimagnesita.com/wp-content/uploads/2024/04/rhi-magnesita-online-version.pdf> – Überprüfungsdatum 2024-08-18
- [29] HOLMAN, Jacqueline: *Europe looks to increase domestic magnesium production*. In: *S&P Global Commodity Insights* (2022-06-20:+00:00)
- [30] ILONA SZEDNYJ, Doris Brandhuber: *Stand der Technik zur Kalk-, Gips- und Magnesiaherstellung : Beschreibung von Anlagen in Österreich* (2007). URL <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0128.pdf> – Überprüfungsdatum 2024-08-19
- [31] WKO.AT: *CO2-Speicherung und Transport weiterhin unsicher*. URL <https://www.wko.at/ktn/industrie/co2-speicherung-und-transport-weiterhin-unsicher>. – Aktualisierungsdatum: 2024-08-22 – Überprüfungsdatum 2024-08-22
- [32] ARIA RODGARKIA-DARA, CHRISTOPH GATZEN, LINO SONNEN, ANNA LANE, SEBASTIAN ZWICKL-BERNARD, HANS AUER: *Rolle der Gasinfrastruktur in einem klimaneutralen Österreich : Endbericht-Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie*. URL <https://www.bmk.gv.at/themen/energie/publikationen/rolle-gasinfrastruktur.html>. – Aktualisierungsdatum: 2024-08-02 – Überprüfungsdatum 2024-08-02
- [33] *Koordinierter Netzentwicklungsplan 2022 : für die Gas-Fernleitungsinfrastruktur in Österreich für den Zeitraum 2023-2032*. URL https://www.gasconnect.at/fileadmin/Fachabteilungen/ST/NEP/01-KNEP_2022-DE.pdf – Überprüfungsdatum 2024-08-02
- [34] KATE ABNETT: *EU's Russian gas exit should be written into law, says Lithuania*. In: *Reuters Media* (2024-02-29)
- [35] *Mit Gasinfrastruktur und grünem Gas zur Energiewende : Transformationspfad für ein 100 % klimaneutrales Gasnetz*. URL https://www.gruenes-gas.at/wp-content/uploads/2023/09/OVGW_Factsheet_05_H2Transformationspfad_211108.pdf – Überprüfungsdatum 2024-08-02
- [36] ZERO CARBON ANALYTICS: *Existing gas supplies to meet EU demand under 2040 emission target* (2024). URL <https://zerocarbon-analytics.org/wp-content/uploads/2024/06/Copy-of-Gas-supply-and-demand-in-the-EUs-2040-90-emissions-target-1.pdf> – Überprüfungsdatum 2024-08-01

- [37] EN:FORMER: *Wie aus Erdgaspipelines ein Wasserstoffnetz werden kann* | en:former. URL <https://www.en-former.com/wie-aus-erdgaspipelines-ein-wasserstoffnetz-werden-kann/>. – Aktualisierungsdatum: 2024-08-23 – Überprüfungsdatum 2024-08-23
- [38] DR.-ING. JOHANN LENZ/DR.-ING. PATRICK TETENBORG*: *Kolben- oder Turbo-Verdichter? Die passende Kompressor-Technologie für Wasserstoffspeicher*. In: *PROCESS* (2022-09-20)
- [39] MAYER: *Technische Details_2008-01-03*. URL <https://www.stadtwerke-leoben.at/wp-content/uploads/2021/02/Stadtwaerme-Leoben-Technische-Details.pdf> – Überprüfungsdatum 2024-06-06
- [40] STADTWERKE LEOBEN E.U.: *Stadtwärme – Stadtwerke Leoben e.U.* URL <https://www.stadtwerke-leoben.at/stadtwaerme/>. – Aktualisierungsdatum: 2024-09-23 – Überprüfungsdatum 2024-09-25
- [41] LUNIK2: *Modernster Umweltschutz im neuen Edelstahlwerk*. In: *Corporate Blog der voestalpine* (2024-01-23)
- [42] BMVIT INFOTHEK: *Mit der Umweltförderung im Inland zum weltweit modernsten Edelstahlwerk*. URL <https://infothek.bmk.gv.at/die-umweltfoerderung-im-inland-zum-weltweit-modernsten-edelstahlwerk/>. – Aktualisierungsdatum: 2024-09-25 – Überprüfungsdatum 2024-09-25
- [43] ELKE WIELAND, BSc: *Integration alternativer Wärmequellen in ein bestehendes Fernwärmenetz am Beispiel Kapfenberg*. Pinkafeld, Fachhochschule Burgenland GmbH. 2021-12-04
- [44] DI WOLFGANG GÖTZHABER, DI ERNST MEIßNER, DI GERALD MORAVI, DI DR. WERNER PRUTSCH, DIPL.-WI (FH) PETER SCHLEMMER, DI ROBERT SCHMIED, DIPL.-HTL-ING. ERICH SLIVNIKER, DI MARTIN ZIMMEL: *Wärmeversorgung Graz 2020/2030 : Wärmebereitstellung für die fernwärmeversorgten Objekte im Großraum Graz*. Statusbericht 2017 (2017). URL https://www.umweltservice.graz.at/infos/energie/WaermeZuk_Statusbericht_2017.pdf – Überprüfungsdatum 2024-11-06
- [45] BAKK. MARTIN DIEWALD, DI WOLFGANG GÖTZHABER, DI ERNST MEIßNER, DI GERALD MORAVI, DI DR. WERNER PRUTSCH, DIPL.-WI (FH) PETER SCHLEMMER, DI ROBERT SCHMIED, DIPL.-HTL-ING. ERICH SLIVNIKER, DI DIETER THYR, DI MARTIN ZIMMEL: *Wärmeversorgung Graz 2020/2030 : Wärmebereitstellung für die fernwärmeversorgten Objekte im Großraum Graz*. Statusbericht 2019 (2019). URL https://www.grazer-ea.at/wp-content/uploads/2021/07/WaermeZuk_Statusbericht_2019.pdf – Überprüfungsdatum 2024-11-06
- [46] DI WOLFGANG GÖTZHABER, DI ERNST MEIßNER, DI GERALD MORAVI, DI DR. WERNER PRUTSCH, DIPL.-WI (FH) PETER SCHLEMMER, BAKK. MARTIN SCHMERDA, DI ROBERT SCHMIED, DI DIETER THYR, DI MARTIN ZIMMEL: *Wärmeversorgung Graz 2030/2040 : Wärmebereitstellung für die fernwärmeversorgten Objekte im Großraum Graz*. Statusbericht 2022 (2022). URL https://www.umwelt.graz.at/cms/dokumente/10084666_7301688/c4df10ce/AU22-05243_Grazer-Energieagentur-Broschuere_.pdf – Überprüfungsdatum 2024-06-07
- [47] GFMAG. JAKOB EDLER: *Umweltfreundliche Fernwärme aus Biomasse. : Vortrag Bioenergie-Gruppe Abwärmenutzung*. URL <https://gemeindebund.at/website2020/wp-content/uploads/2021/09/ksg2021-forum2-edlerjakob.pdf> – Überprüfungsdatum 2024-11-06

- [48] ING. MARTIN LEITNER: *Referenzliste für Biomasse-Feuerungsanlagen* (2014). URL <http://www.tbl.st/upload/download/referenzen/Referenzliste-2014.04.24.pdf> – Überprüfungsdatum 2024-11-06
- [49] DIPL. ING. WOLFGANG JILEK: *Energiebericht Steiermark 2014* (2015). URL https://www.technik.steiermark.at/cms/dokumente/12678764_146432123/21aa3edf/Energiebericht_Steiermark_2014_.pdf – Überprüfungsdatum 2024-10-29
- [50] CHRISTOPH, Zirngast: *2024-11_PDF_Fernwärmeliste.xlsx*. URL https://www.technik.steiermark.at/cms/dokumente/12809578_176136073/0ce7972a/2024-11_PDF_Fernw%C3%A4rmeliste.pdf – Überprüfungsdatum 2024-11-06
- [51] WEBSOLUTIONS, R. D.H.: *BIO FERNWÄRME*. URL <https://www.biofernwaerme-bruck.at/index.html>. – Aktualisierungsdatum: 2023-11-07 – Überprüfungsdatum 2024-08-23
- [52] ING. LEO RIEBENBAUER: *Machbarkeitsstudie solare Großanlage Bruck an der Mur* (2022). URL https://solare-grossanlagen.at/wp-content/uploads/sites/7/2022/05/2022-04-27-PublizierbarerEndberichtMachbarkeitstudien_SolarGross-Bruck.pdf – Überprüfungsdatum 2024-09-26
- [53] WEIBOLD, Sandra: *Smart City Frohnleiten* (2018). URL https://smartcities.at/wp-content/uploads/sites/3/BGR14_2018_Frohnleiten-Fertig-1.pdf – Überprüfungsdatum 2024-11-06
- [54] *Zementwerk Retznei | Holcim*. URL <https://www.holcim.at/standorte/zementwerk-retznei>. – Aktualisierungsdatum: 2024-11-06 – Überprüfungsdatum 2024-11-06
- [55] KÜTTER GRUPPE: *Abwärmenutzung an einer Gasverdichterstation*. URL <https://www.kuettner.com/de/news/abwarmenutzung-an-einer-gasverdichterstation/>. – Aktualisierungsdatum: 2024-08-07 – Überprüfungsdatum 2024-08-07
- [56] LANDESSTANDARD: *Bescheid UVP-Änderungsbescheid : Gasverdichterstation Weitendorf - Abwärmenutzung* (2009). URL https://www.umwelt.steiermark.at/cms/dokumente/11125370_9176022/e35d05dc/AenderungsgenBescheidWeitendorf28-05-2009.pdf – Überprüfungsdatum 2024-08-22
- [57] TAG: *Trans Austria Gasleitung GmbH : Hauptschlagader des Ergasnetzes in Zentraleuropa*. URL https://taggmbh.at/wp-content/uploads/TAG_FactSheet_DE_20201109.pdf – Überprüfungsdatum 2024-08-07
- [58] DR. SUSANNE STARK, FELIX UTHOFF, JOHN A. MILLER: *Leitfaden zur Erschließung von Abwärmequellen für die Fernwärmeversorgung* (2020). URL https://www.gruene-fernwaerme.de/fileadmin/Redakteure/gruene-fernwaerme/02_Das_Netzwerk/Netzwerk_Karte/AGFW/210401_Abw%C3%A4rmeleitfaden_Langfassung.pdf – Überprüfungsdatum 2024-06-04
- [59] SIMON HIRZEL, BENJAMIN SONTAG, DR.-ING CLEMENS ROHDE: *Industrielle Abwärme : Kurzstudie*. November 2013
- [60] GRUBER-GLATZL, WOLFGANG, REBECCA KRAINZ, JÜRGEN FLUCH, FRANZ MAUTHNER, ANDREAS HAMMER, ELISABETH LACHNER, THOMAS KIENBERGER, MARCUS HUMMEL, ANDREAS MÜLLER: *Abwärmekataster III Steiermark : Öffentlicher Kurzbericht*. URL

- https://www.technik.steiermark.at/cms/dokumente/12776224_157067047/c2520903/AWK_Stmk_%C3%96ffentlicher_Kurzbericht_v1.0.pdf – Überprüfungsdatum 2024-08-22
- [61] DR. ING. MARKUS HIEBEL, JOCHEN NÜHLEN M.SC.: *Technische, Ökonomische, Ökologische und Gesellschaftliche Faktoren von Stahlschrott*. Zukunft Stahlschrott. Oberhausen, November 2016
- [62] WWW.ADVANTAGEAUSTRIA.ORG: *Zahlen und Fakten -Metalle / Verarbeitung*. URL <https://www.advantageaustria.org/ch/zentral/branchen/metalle-und-metallverarbeitung/zahlen-und-fakten/zahlen-und-fakten.de.html>. – Aktualisierungsdatum: 2024-07-27 – Überprüfungsdatum 2024-07-27
- [63] MARTIN SPRECHER, DR. ING. HANS BODO LÜNGEN, DR. ING. BERNHART STRANZINGER, DR. ING. HOLGER ROSEMAN, DR. ING. WOLFGANG ADLER: *Abwärmenutzungspotenziale in Anlagen integrierter Hüttenwerke der Stahlindustrie* (2019). URL https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-01-21_texte_07-2019_abwaermenutzungspotenziale-huettenwerke.pdf – Überprüfungsdatum 2024-06-04
- [64] PETER PULM, Harald Raupenstrauch: *Energieeffizienz in der Eisen- und Stahlindustrie - F&E-Fahrplan Energieeffizienz in der energieintensiven Industrie : Energieeffizienz in der Eisen- und Stahlindustrie*. Diskussionspapier - April 2014 (2014). URL <https://www.klimafonds.gv.at/wp-content/uploads/sites/16/KLIENEisen-StahlF-u-E-Fahrplan.pdf> – Überprüfungsdatum 2024-06-19
- [65] ENARGUS: *Elektrolichtbogenofen*. URL https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d2939-2/*/*Elektrolichtbogenofen?op=Wiki.getwiki&search=Pappe. – Aktualisierungsdatum: 2024-11-06 – Überprüfungsdatum 2024-11-06
- [66] MICHAEL AICHINGER: *Technologievergleich von Elektrostahlerzeugungsverfahren : Eisen- und Stahlmetallurgie - Masterarbeit* (2015). URL <https://pureadmin.unileoben.ac.at/ws/files/1896823/AC12251146n01vt.pdf> – Überprüfungsdatum 2024-08-22
- [67] M.ENG FELIX KUGLER: *Prozesswärme in der stahlverarbeitenden Industrie*. URL <https://public-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/c61c82ff-83ab-4e39-98ac-092fdfabe6e6/content> – Überprüfungsdatum 2024-08-22
- [68] CONTRERAS-SERNA, Josué ; RIVERA-SOLORIO, Carlos I. ; HERRERA-GARCÍA, Marco A.: *Study of heat transfer in a tubular-panel cooling system in the wall of an electric arc furnace*. In: *Applied Thermal Engineering* 148 (2019), S. 43–56. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431118312067>
- [69] RAINER REMUS, MIGUEL A. AGUADO MONSONET, SERGE ROUDIER, LUIS DELGADO SANCHO: *Best available techniques (BAT) reference document for iron and steel production : Industrial emissions Directive 2010/75/EU : integrated pollution prevention and control*. Luxembourg, 2013 (Scientific and technical research series JRC 69967)
- [70] PATRICK MADER, ALEXANDER WOLSCHANN, NINA KAINZ: *Austropapier_Branchenbericht_2022_2023* (2022). URL https://www.advantageaustria.org/gb/zentral/branchen/papier_verpackung/zahlen-und-fakten/Austropapier_Branchenbericht_2022_2023.pdf – Überprüfungsdatum 2024-07-23

- [71] SUHR, Michael ; KLEIN, Gabriele ; KOURTI, Ioanna ; GONZALO, Miguel Rodrigo ; SANTONJA, Germán Giner ; ROUDIER, Serge ; DELGADO SANCHO, Luis: *Best available techniques (BAT) reference document for the production of pulp, paper and board : Industrial emissions directive 2010/75/EU (integrated pollution prevention and control)*. Luxembourg, 2015 (JRC science and policy reports JRC95678)
- [72] FMP FACHVERBAND MEDIENPRODUKTION: *So entsteht Qualitätspapier*. URL <https://www.fmp.de/res/expertenteam-papier/Papierherstellung.pdf> – Überprüfungsdatum 2024-07-03
- [73] DIPL.-ING. KONRAD TREPPE, DR.-ING. ROLAND ZELM, DIPL.-ING. LARS SCHINKE, DIPL.-ING. STEFAN KUITUNEN, DIPL.-ING. SEBASTIAN PINNAU, B.-SC. ROBERT KAMISCHKE, DIPL.-ING. ONKAR DIXIT: *Energetische Optimierung der Trockenpartie : Wärmetechnische Bewertung zur Steigerung der Energieeffizienz* (2012). URL https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/ifvu/ressourcen/dateien/tvu/forschungsprojekte/forschung_alt/INFOR117/Bericht_INFOR117.pdf?lang=de – Überprüfungsdatum 2024-07-25
- [74] ALEXANDRA PETRU, BSc: *Ermittlung von Abwärmepotenzialen in der Sappi Gratkorn mit anschließender Machbarkeitsstudie zur Erzeugung von Niederdruckdampf durch Abwärme* 2022. URL <https://pureadmin.unileoben.ac.at/ws/portalfiles/portal/11217249/AC16729448.pdf> – Überprüfungsdatum 2024-08-22
- [75] HOLCIM: *Zementherstellung : im Werk Höver*. URL https://www.holcim.de/sites/germany/files/documents/Hoever_Zementproduktion_14.pdf – Überprüfungsdatum 2024-08-22
- [76] CORNELIA BAUER, RUPERT FRIEDLE, FELIX PAPSCH, SEBASTIAN SPAUN, CLAUDIA DANKL, CATHÉRINE STUZKA, SUSANNE TESCHNER, ROBERT HULA, STEFAN KRISPEL: *Zementherstellung in Österreich : Grundlagen, Daten, Fakten* (2021). URL https://www.zement.at/downloads/downloads_2021/Zementherstellung_in_Oesterreich_2021.pdf – Überprüfungsdatum 2024-08-22
- [77] KARAMARKOVIĆ, Vladan ; MARAŠEVIĆ, Miljan ; KARAMARKOVIĆ, Rade ; KARAMARKOVIĆ, Miodrag: *Recuperator for waste heat recovery from rotary kilns*. In: *Applied Thermal Engineering* 54 (2013), Nr. 2, S. 470–480. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431113001324>
- [78] DIPL.-ING. CHRISTIAN SANTNER, BSc: *Möglichkeiten zur Abtrennung und Verwertung von CO₂ aus den Prozessgasen der RHI Magnesita*. Leoben, Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes. 10.2018
- [79] GAS CONNECT AUSTRIA GMBH: *Verdichterstation: Gas Connect*. URL <https://www.gasconnect.at/ueber-erdgas/erdgas-transport/verdichterstation>. – Aktualisierungsdatum: 2024-08-22 – Überprüfungsdatum 2024-08-22
- [80] GAS CONNECT AUSTRIA GMBH: *Verdichterstationen: Gas Connect*. URL <https://www.gasconnect.at/netzinformationen/verdichterstationen>. – Aktualisierungsdatum: 2024-07-31 – Überprüfungsdatum 2024-07-31
- [81] MURHAMMER, Christoph Edmund: *Ermittlung industrieller Abwärmepotentiale mit Schwerpunkt Holzindustrie, Herstellung von Biotreibstoffen und Gasinfrastruktur* (2023). URL

- <https://pure.unileoben.ac.at/de/publications/ermittlung-industrieller-abw%C3%A4rmepotentiale-mit-schwerpunkt-holzin>
- [82] DR. KATHARINA KANZ: *voestalpine Stahl Donawitz GmbH Projekt EAF - GreenTec Steel : Umweltverträglichkeitsprüfung - Feststellungsbescheid* (2023). URL https://www.umwelt.steiermark.at/cms/dokumente/12907969_9176091/5a2f03d3/UVP_Feststellungsbescheid_Projekt_EAF-GreenTec_Steel_voestalpine_Stahl_Donawitz.pdf – Überprüfungsdatum 2024-08-07
- [83] ELAK_WEB: *UVP_Feststellungsbescheid_Projekt_EAF-GreenTec_Steel_voestalpine_Stahl_Donawitz*. URL https://www.umwelt.steiermark.at/cms/dokumente/12907969_9176091/5a2f03d3/UVP_Feststellungsbescheid_Projekt_EAF-GreenTec_Steel_voestalpine_Stahl_Donawitz.pdf – Überprüfungsdatum 2024-10-28
- [84] DI CHRISTIAN REICHL: *World Mining Data 2023 : Iron and Ferro-Alloy Metals Non-Ferrous Metals Precious Metals Industrial Minerals Mineral Fuels* (2023). URL <https://world-mining-data.info/wmd/downloads/PDF/WMD2023.pdf> – Überprüfungsdatum 2024-09-30
- [85] AGGM: *Austrian Gas Grid Management AG : Marktdaten*. URL <https://www.aggm.at/>. – Aktualisierungsdatum: 2024-10-01 – Überprüfungsdatum 2024-10-01
- [86] AGGM: *AGGM Data Map*. URL <https://platform.aggm.at/portal/visualisation/map?mapGroup=Physical%20Flow&granularity=Year&date=2019-01-01&time=06:00>. – Aktualisierungsdatum: 2024-06-30 – Überprüfungsdatum 2024-09-30
- [87] PROF. DR. BERNHARD LORENTZ, DR. FELIX CHR. MATTHES, DR. JOHANNES TRÜBY, DR. ROMAN MENDELEVITCH: *Natural gas demand outlook 2050 : Sustainability & Climate*. Summary for Policymakers (2023). URL https://www.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/about-deloitte/Natural%20gas%20demand%20outlook%202050_Summary_Deloitte%20.pdf – Überprüfungsdatum 2024-10-02
- [88] BRUECKNER, Sarah: *Industrielle Abwärme in Deutschland : Bestimmung von gesicherten Aufkommen und technischer bzw. wirtschaftlicher Nutzbarkeit*. URL <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1310042/1310042.pdf> – Überprüfungsdatum 2024-08-23
- [89] PASCHOTTA, Rüdiger: *Leistungszahl*. URL <https://www.energie-lexikon.info/leistungszahl.html>. – Aktualisierungsdatum: 2024-11-08 – Überprüfungsdatum 2024-11-08
- [90] ING. GOTTFRIED ADELSBERGER, DI THOMAS CIEPIELA, DI DR. VERONIKA WILK: *Hotpump Reloaded : Energieforschungsprogramm*. Publizierter Endbericht (2017). URL <https://energieforschung.at/wp-content/uploads/sites/11/2020/12/Publizierbarer-Endbericht-Hotpump-Reloaded-Final.pdf> – Überprüfungsdatum 2024-11-08
- [91] *Net-Zero CO2-Emissionen bis 2050 - greentec steel*. URL <https://www.voestalpine.com/greentecsteel/de/Net-Zero-CO2-Emissionen-bis-2050/>. – Aktualisierungsdatum: 2024-10-08 – Überprüfungsdatum 2024-10-29
- [92] ELAK_WEB: *Energie Steiermark Green Power GmbH Energienetze Steiermark GmbH voestalpine Stahl Donawitz GmbH Cross-Sectoral-H2-Hub UVP-Feststellungsverfahren* :

Umweltverträglichkeitsprüfung. Feststellungsbescheid (2024). URL
https://www.umwelt.steiermark.at/cms/dokumente/12955751_6392227/eac10b19/UVP%20Feststellungsbescheid%2C%20Leoben.pdf – Überprüfungsdatum 2024-10-29

10 ANHANG

Hier werden die detaillierten Ergebnisse der technischen Abwärmepotentiale sowie die Abwärmeleistungen der untersuchten Standorte dargestellt.

Eisen- und Stahlindustrie:

VA-Sinteranlage:

Sinteranlage				
Wärmemenge [GWh]	2019	2030	2040	2050
Wärme >100 °C	27.57	21.25	0.00	0.00
Wärme 50 - 100 °C	37.49	28.89	0.00	0.00
Wärme < 50 °C	101.37	78.11	0.00	0.00
Leistung [MW]				
Leistung >100 °C	3.45	2.66	0.00	0.00
Leistung 50 - 100 °C	4.69	3.61	0.00	0.00
Leistung < 50 °C	12.67	9.76	0.00	0.00

VA-Hochöfen:

Hochöfen				
Wärmemenge [GWh]	2019	2030	2040	2050
Wärme >100 °C	71.53	39.20	0.00	0.00
Wärme 50 - 100 °C	28.38	15.56	0.00	0.00
Wärme < 50 °C	219.90	120.52	0.00	0.00
Leistung [MW]				
Leistung >100 °C	8.94	4.90	0.00	0.00
Leistung 50 - 100 °C	3.55	1.94	0.00	0.00
Leistung < 50 °C	27.49	15.06	0.00	0.00

VA-Stahlwerk:

Stahlwerk				
Wärmemenge [GWh]	2019	2030	2040	2050
Wärme >100 °C	38.38	21.03	0.00	0.00
Wärme 50 - 100 °C	14.22	7.79	0.00	0.00
Wärme < 50 °C	140.76	77.15	0.00	0.00
Leistung [MW]				
Leistung >100 °C	4.80	2.63	0.00	0.00
Leistung 50 - 100 °C	1.78	0.97	0.00	0.00
Leistung < 50 °C	17.60	9.64	0.00	0.00

VA-EAF:

	EAF			
Wärmemenge [GWh]	2019	2030	2040	2050
Wärme >100 °C	0.00	107.30	184.27	180.17
Wärme 50 - 100 °C	0.00	9.80	16.84	14.55
Wärme < 50 °C	0.00	83.93	144.13	130.92
Leistung [MW]				
Leistung >100 °C	0.00	13.41	23.03	22.52
Leistung 50 - 100 °C	0.00	1.23	2.10	1.82
Leistung < 50 °C	0.00	10.49	18.02	16.37

VA-Kraftwerke:

	Kraftwerke VA			
Wärmemenge [GWh]	2019	2030	2040	2050
Wärme >100 °C	52.78	52.78	0.00	0.00
Wärme 50 - 100 °C	57.65	57.65	0.00	0.00
Wärme < 50 °C	881.63	881.63	0.00	0.00
Leistung [MW]				
Leistung >100 °C	6.60	6.60	0.00	0.00
Leistung 50 - 100 °C	7.21	7.21	0.00	0.00
Leistung < 50 °C	110.20	110.20	0.00	0.00

Marienhütte Graz:

techn. Abwärmepotential Marienhütte Graz				
Abwärmepotential [GWh]	2019	2030	2040	2050
Wärmre > 100 °C	55.03	55.72	56.42	54.48
Wäme 50 - 100 °C	7.04	7.11	7.19	5.80
Wärme < 50°C	46.75	47.27	47.79	39.90
Leistung [MW]				
Leistung > 100°C	6.88	6.97	7.05	6.81
Leistung 50 -100 °C	0.88	0.89	0.90	0.72
Leistung < 50°C	5.84	5.91	5.97	4.99

Böhler Edelstahl Kapfenberg:

technisches Abwärmepotential Böhler Kapfenberg				
Abwärmepotential [GWh]	2019	2030	2040	2050
Wärmre > 100 °C	37.55	38.83	39.11	23.12
Wäme 50 - 100 °C	11.98	11.87	11.90	2.89
Wärme < 50°C	72.83	72.89	73.08	21.01
Leistung [MW]				
Leistung > 100°C	4.69	4.85	4.89	2.89
Leistung 50 -100 °C	1.50	1.48	1.49	0.36
Leistung < 50°C	9.10	9.11	9.14	2.63

Papier- und Zellstoffindustrie:

Sappi Gratkorn:

Sappi					Sappi				
technisches Abwärmepotential GWh					technisches Leistung [MW]				
Temperatur	2019	2030	2040	2050	Temperatur	2019	2030	2040	2050
> 100 °C	7.27	9.50	9.50	4.77	Leistung > 100 °C	0.91	1.19	1.19	0.60
50-100°C	33.63	39.21	39.21	27.38	Leistung 50-100°C	4.20	4.90	4.90	3.42
0-50°C	1541.11	1555.96	1555.96	1488.19	Leistung 0-50°C	192.64	194.49	194.49	186.02
Summe	1582.01	1604.67	1604.67	1520.34	Summe	197.75	200.58	200.58	190.04

Zellstoff Pöls:

Pöls					Pöls				
technisches Abwärmepotential GWh					technisches Leistung [MW]				
Temperatur	2019	2030	2040	2050	Temperatur	2019	2030	2040	2050
> 100 °C	1.69	1.69	1.69	0.17	Leistung > 100 °C	0.21	0.21	0.21	0.02
50-100°C	29.19	29.19	29.19	25.36	Leistung 50-100°C	3.65	3.65	3.65	3.17
0-50°C	808.04	808.04	808.04	786.07	Leistung 0-50°C	101.01	101.01	101.01	98.26
Summe	838.92	838.92	838.92	811.59	Summe	104.87	104.87	104.87	101.45

Norske Skog Bruck an der Mur:

Norske					Norske Skog				
technisches Abwärmepotential GWh					technisches Leistung [MW]				
Temperatur	2019	2030	2040	2050	Temperatur	2019	2030	2040	2050
> 100 °C	18.36	18.36	18.36	12.00	Leistung > 100 °C	2.30	2.30	2.30	1.50
50-100°C	47.99	47.99	47.99	32.09	Leistung 50-100°C	6.00	6.00	6.00	4.01
0-50°C	493.03	493.03	493.03	401.61	Leistung 0-50°C	61.63	61.63	61.63	50.20
Summe	559.38	559.38	559.38	445.69	Summe	69.92	69.92	69.92	55.71

Mayr-Melnhof Frohnleiten:

MM Frohnleiten					MM Frohnleiten				
technisches Abwärmepotential GWh					technisches Leistung [MW]				
Temperatur	2019	2030	2040	2050	Temperatur	2019	2030	2040	2050
> 100 °C	3.21	3.21	3.21	0.31	Leistung > 100 °C	0.40	0.40	0.40	0.04
50-100°C	10.91	10.91	10.91	3.67	Leistung 50-100°C	1.36	1.36	1.36	0.46
0-50°C	421.26	421.28	421.26	379.64	Leistung 0-50°C	52.66	52.66	52.66	47.45
Summe	435.38	435.40	435.38	383.62	Summe	54.42	54.42	54.42	47.95

Zementindustrie:

Holcim Retznei:

technisches Potential Zement Retznei				
Abwärmepotential [GWh]	2019	2030	2040	2050
>100 °C	41.10	37.40	33.70	33.70
50 - 100 °C	28.68	26.10	23.52	23.52
< 50 °C	30.27	27.55	24.82	24.82
Leistung [MW]				
Leistung > 100 °C	5.14	4.67	4.21	4.21
Leistung 50 - 100 °C	3.59	3.26	2.94	2.94
Leistung < 50 °C	3.78	3.44	3.10	3.10

Magnesiaindustrie:

RHI-Magnesita Breitenau:

technisches Abwärmepotential Breitenau				
Abwärmepotential [GWh]	2019	2030	2040	2050
>100 °C	70.75	76.61	82.97	55.02
50 - 100 °C	18.30	19.82	21.46	15.95
< 50 °C	46.24	50.08	54.23	25.36
Leistung [MW]				
Leistung > 100 °C	8.84	9.58	10.37	6.88
Leistung 50 -100 °C	2.29	2.48	2.68	1.99
Leistung < 50 °C	5.78	6.26	6.78	3.17

Gasverdichterstation

Weitendorf:

Technisches Abwärmepotential GVS Weitendorf				
Abwärmepotential [GWh]	2019	2030	2040	2050
> 100 °C	9.87	7.40	4.74	2.07
50-100°C	16.45	12.34	7.90	3.46
0-50°C	294.85	215.10	137.67	60.23
Leistung [MW]				
Leistung > 100 °C	1.13	0.85	0.54	0.24
Leistung 50-100°C	1.88	1.41	0.90	0.39
Leistung 0-50°C	33.66	24.56	15.72	6.88

10.1 Einsatz von künstlicher Intelligenz

Auf Basis der 181. Richtlinie des Vizerektors für Lehre und Internationales sowie des Studiendekans für den Einsatz von KI-basierter generativen Werkzeuge vom 4.4.2024 wird hier der angewandte Einsatz und verwendete Modelle in dieser Masterarbeit deklariert. Die folgenden Klärungspunkte orientieren sich an der Richtlinie:

1. Es wurde in dieser Arbeit KI für das Übersetzen von Teilen der deutschen Kurzfassung in die englische Sprache zur Hilfe genommen (Siehe Kapitel Abstract). Außerdem wurde vereinzelt KI verwendet, um Synonyme für einzelne Wörter zu finden sowie die Grammatik und Satzstellung mit überprüft, um das grammatikalische Niveau der Arbeit zu heben.
2. Als KI wurde dabei die Software ChatGPT ([ChatGPT](#)) in der Version 4o verwendet.
3. Der Anteil des KI-Generierten Outputs am Gesamtergebnis der Arbeit wird auf unter 25 % geschätzt. Der Output basiert zudem immer nur auf der für die Verbesserung der Grammatik und Satzstellung bereitgestellten persönlichen Input und wurde stets quergecheckt und nicht direkt übernommen.