




Lehrstuhl für Energieverbundtechnik

Masterarbeit



Ermittlung von industriellen
Abwärmepotenzialen im Bereich der Zement-,
Kalk-, und Chemieindustrie

Benedikt Sebastian Berndonner, BSc

September 2023



EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

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

Datum 13.09.2023

Unterschrift Verfasser/in
Benedikt Sebastian Berndonner

KURZFASSUNG

Energieverluste führen dazu, dass Wärme Prozesse stoffstromgebunden verlässt, oder diffus an die Umgebung abgegeben wird. Diese Wärme wird als Abwärme bezeichnet und kann häufig noch in andere Prozesse eingebracht werden, wodurch hochexergetische Energieträger eingespart werden können. Wie viel Energie als Abwärme und auf welchem Temperaturniveau diese anfällt, ist dabei stark prozessabhängig. Bei der Beurteilung von Abwärmequellen hinsichtlich ihrer Nutzbarkeit sind Menge und Temperatur entscheidende Faktoren, wobei jedoch schlussendlich bei der konkreten Planung und Umsetzung viele weitere techno-ökonomische Bedingungen berücksichtigt werden müssen. Im Rahmen des Projektes „INXS Industrial Excess Heat – Erhebung industrieller Abwärmepotenziale in Österreich“ wird versucht das Abwärmepotenzial der gesamten österreichischen Industrie zu erheben und somit besser erfassbar zu machen. Als Teil dieses Projektes ist es Ziel dieser Master-Arbeit die Abwärmepotenziale der Zement-, Kalk- und einzelner Betriebe der Chemieindustrie zu modellieren. Verwendet werden dabei rein öffentlich zugängliche Informationen, wobei trotz hoher Datenunsicherheit versucht wird, plausible und möglichst genaue Schätzwerte zu generieren. Während die Ergebnisse der Zement- und Kalkindustrie auf prozessspezifische Bilanz-Modelle aufbaut, musste für die Berechnung der Potenziale der Chemieindustrie überwiegend auf Abwärmepotenzialfaktoren anderer Studien zurückgegriffen werden. In Summe wurden 21 Industriebetriebe hinsichtlich ihres Abwärmepotenzials untersucht, wobei insgesamt ein technisches Abwärmepotenzial von 1,23 TWh berechnet wurde, was in Relation zum österreichischen Endenergiebedarf in etwa 0,39 % entspricht. Das tatsächliche ökonomische Potenzial liegt jedoch wahrscheinlich deutlich unter diesem Wert, besonders da ein Großteil dieser Wärme bei Temperaturen unter 100 °C emittiert wird.

ABSTRACT

Energy losses lead to heat leaving processes either bound to material flows or to being emitted directly to the process environment. This heat is called waste heat and can often be transferred into other processes, leading to savings in high exergy energy sources. How much energy is emitted as waste heat and at what temperature levels, is highly contextual to the observed process. While evaluating waste heat sources regarding their usability, quantity and temperature levels are important factors, although further concrete planning and implementation steps need to consider many additional techno economical conditions. “INXS Industrial Excess Heat – Analysis of industrial waste heat potential in Austria” is a research project that tries to evaluate the total potential of waste heat in the Austrian industry sector. As part of this project, it is the goal of this thesis to estimate the waste heat potential of the cement, lime, and parts of the chemistry industry. The thesis builds its modeling framework solely on publicly available data. Despite the limitations of this method the thesis aims to create sound and accurate estimates. While the models for the cement and lime industry are process specific, the models for the chemistry sector had to adopt waste heat factors of other studies. In total 21 industry firms were evaluated, which have an estimated technical waste heat potential of 1,23 TWh. This equals about 0,39 % compared to the total Austrian final energy demand. The economical potential might be significantly lower, especially since the waste heat in the evaluated sectors primarily is emitted at temperatures lower than 100 °C.

VORWORT

Zunächst möchte ich mich bei meinen Betreuern dieser Masterarbeit, Herrn Professor Thomas Kienberger und Dr. Andreas Hammer, bedanken. Herrn Kienberger insbesondere auch in seiner Rolle als Studiengangsbeauftragter, in welcher er in den letzten Jahren das junge Studium „Industrielle Energietechnik“ in seiner Ausrichtung geschärft und qualitativ verbessert hat. Bei Herrn Hammer möchte ich mich für die intensive Betreuung und zahlreichen Gespräche bedanken, die maßgeblich den Inhalt der Arbeit geprägt haben.

Bedanken möchte ich mich auch bei all meinen Kollegen und Kolleginnen bzw. Freunden die mich im Studium unterstützt haben. Ein großer Dank geht an den Chor der Montanuniversität und der unglaublichen Sarah Kettner, ohne der ich nicht zu meiner zweiten Berufung, dem Gesang, gefunden hätte.

Zu guter Letzt möchte ich bei meinen Eltern bedanken, die mich dorthin gebracht haben, wo ich heute stehe, die immer an mich geglaubt haben, das auch noch immer tun, und ohne die ich mir mein Studentenleben nicht leisten könnte.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
2	Aufgabenstellung.....	3
	2.1 Vorgehensweise.....	3
	2.1.1 Datenbeschaffung	3
	2.1.2 Modellierung	4
3	Theoretischer Hintergrund und Stand der Technik.....	5
	3.1 Begriffsdefinition der Abwärme und des Abwärmepotenzials	5
	3.2 Theoretische Grundlagen zur Wärmeübertragung und Bilanzierung von Energie	7
	3.2.1 Thermische innere Energie und Wärme	7
	3.2.2 Energiebilanzen	11
	3.3 Erfassung von Abwärmepotenzialen	13
	3.4 Bestehende Literatur zu Abwärmepotenzialen.....	14
	3.4.1 Abwärmepotenzialstudien und deren Methodik.....	15
	3.4.2 Abwärmepotenziale in der Zementindustrie	16
	3.4.3 Kalkindustrie.....	17
	3.4.4 Chemieindustrie	18
	3.5 Beschreibung der Sektoren am Standort Österreich.....	18
	3.5.1 Zementindustrie in Österreich	18
	3.5.2 Branntkalkindustrie in Österreich	21
	3.5.3 Chemieindustrie in Österreich	25
	3.5.3.1 ESIM Chemicals/Vertellus – Linz	25
	3.5.3.2 Metadynea Austria – Krems.....	25
	3.5.3.3 Donau Chemie AG – Pischelsdorf.....	26
	3.5.3.4 Atmos Austria – Schwechat.....	26
	3.5.3.5 Sandoz – Kundl/Schaftenau	26
4	Modellbeschreibung	28

4.1 Allgemeine Modell-Annahmen.....	28
4.1.1 Bilanzrahmen.....	28
4.1.2 Wärmeübertragung, Wärmeverluste und Wärmeverteilung.....	29
4.2 Beschreibung der Modelle.....	31
4.2.1 Modelle der Zementindustrie.....	31
4.2.2 Modelle der Kalk-Industrie.....	34
4.2.3 Modelle der Chemie-Industrie.....	37
4.2.3.1 Metadynea Austria.....	40
4.2.3.2 Atmoso Austria.....	42
4.2.3.3 ESIM Chemicals & Vertellus.....	43
4.2.3.4 Sandoz Österreich.....	43
4.2.3.5 Donau Chemie – Pischelsdorf.....	44
5 Ergebnisse.....	46
5.1 Ergebnisse für die Zementindustrie.....	46
5.2 Ergebnisse für die Kalkindustrie.....	48
5.3 Ergebnisse für die Chemieindustrie.....	50
5.3.1 Abwärmepotenzial – Metadynea Austria.....	52
5.3.2 Abwärmepotenzial – Atmoso Austria.....	53
5.3.3 Abwärmepotenzial – ESIM Chemicals & Vertellus.....	54
5.3.4 Abwärmepotenzial – Sandoz Kundl.....	54
5.3.5 Abwärmepotenzial – Sandoz Schaftebau.....	55
5.3.1 Abwärmepotenzial – Donau Chemie Pischelsdorf.....	56
6 Zusammenfassung und Ausblick.....	58
7 Literaturverzeichnis.....	61

NOMENKLATUR

Abkürzungen

BAT	Best Available Techniques
GGR-Ofen	Gleichstrom-Gegenstrom-Regenerativofen
MKS	Mehrkammerschachtofen
PSA	Phthalsäureanhydrid
RS	Ringschachtofen

Indizes

A	Übertragungsfläche [m ²]
C	Wärmekapazität [J/K]
c	Spezifische Wärmekapazität [J/(kg·K)]
E	Gesamtenergie [J]
g	Gravitationskonstante [m ³ /(kg·s ²)]
H	Enthalpie [J]
h	Spezifische Enthalpie [J/kg]
m	Masse [kg]
P	Leistung [J/s]
Q	Wärme [J]
T	Temperatur [K]
t	Zeit [s]
U	Innere Energie [J]
\dot{V}	Volumenstrom [m ³ /s]
v	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit [m/s]
W	Arbeit [J]
x	Spezifische Luftfeuchtigkeit [kg/kg]
z	Höhe [m]

Nomenklatur

β	Proportionalitätskoeffizient [-]
ε	Emissionsgrad [-]
λ	Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante [W/(m ² ·K ⁴)]

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Abgrenzung der Abwärmepotenziale [12].....	6
Abbildung 2: Schematische Darstellung eine Zement-Drehhohrofens mit Vorwärmung und Calcinator [28].....	21
Abbildung 3: Querschnitt eines Normalschachtofens und eines GGR-Ofens [30]	24
Abbildung 4: Temperaturverlauf der Wärmekapazität von Stickstoff im Temperaturbereich 250 – 800 K [40]	30
Abbildung 5: Allgemeine Wärmebilanz eines Zementwerkes pro Tonnen Klinker [41]	33
Abbildung 6: Temperaturverteilung der Abwärmepotenziale im chemischen Sektor der Enova-Studie	39
Abbildung 7: Anteile der Haupt- und Nebenreaktionen bei der PSA-Produktion [38].....	42
Abbildung 8: Reaktionsschritte bei der Schwefelsäureherstellung [36].....	44
Abbildung 9: Energie-Flussdiagramm einer Schwefelsäureproduktionsanlage [36]	45
Abbildung 10: Abwärmepotenziale in Relation zum thermischen Energieeinsatz.....	58
Abbildung 11: Relative Abwärmepotenziale nach Temperaturbereich.....	59

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Zementwerke mit Ofenbetrieb in Österreich [24]	19
Tabelle 2: Wichtige Kalköfen in Österreich [23, 29]	22
Tabelle 3: Konstanten zur Berechnung der Wärmekapazität von Stickstoff [40].....	30
Tabelle 4: Legende	31
Tabelle 5: Energiespezifische Prozessparameter der Zementklinker-Herstellung [24].....	31
Tabelle 6: Beispielhafte Berechnung des Energieeinsatzes und Klinkeroutput für Rohrdorfer Zement [25].....	32
Tabelle 7: Austretende Wärmeströme im Verhältnis zum Brennstoff-Input [41].....	33
Tabelle 8: Energiespezifische Prozessparameter der Kalk-Industrie [23, 27, 46].....	34
Tabelle 9: Beispielhafte Berechnung des Energieeinsatzes und Branntkalk-Output für das Kalkwerk Wopfing [25].....	35
Tabelle 10: Volumenverhältnisse Erdgas H [48]	36
Tabelle 11: Idealisierte Gaszusammensetzungen	36
Tabelle 12: Anpassung der Temperaturverteilung der Enova Potenzialstudie [18]	39
Tabelle 13: Stoffwerte zur Berechnung der Energiebilanz von Metadynea Austria [40, 46, 48]	41
Tabelle 14: Energiebilanz von Metadynea Austria auf Basis der Formaldehydproduktion	41
Tabelle 15: Stoffwerte zur Berechnung der Energiebilanz von Atmos Austria [40, 46, 48] ..	42
Tabelle 16: Energiebilanz von Atmos Austria auf Basis der PSA Produktion	43
Tabelle 17: Wärmeverteilung des theoretischen Abwärmepotenzials der Zementindustrie .	46
Tabelle 18: Wärmeverteilung des technischen Abwärmepotenzials der Zementindustrie	46
Tabelle 19: Energieeinsatz und technisches Potenzial der Österreichischen Zementwerke ..	48
Tabelle 20: Wärmeverteilung des theoretischen Abwärmepotenzials des GGR-Modells	49
Tabelle 21: Wärmeverteilung des technischen Abwärmepotenzials des GGR-Modells	49
Tabelle 22: Wärmeverteilung des theoretischen Abwärmepotenzials des Nicht-GGR-Modells	49
Tabelle 23: Wärmeverteilung des technischen Abwärmepotenzials des Nicht-GGR-Modells	50
Tabelle 24: Energieeinsatz und technisches Potenzial der österreichischen Kalkindustrie	50
Tabelle 25: Ausgehend von der Enova-Studie berechnete Abwärmepotenziale	51
Tabelle 26: Abgas-Abwärmepotenzial von Metadynea – Potenzialfaktor nach Brückner [9].	52
Tabelle 27: Gesamtes Abwärmepotenzial von Metadynea -Potenzialfaktor nach Enova [18]	52
Tabelle 28: Abgas-Abwärmepotenzial von Atmos Austria – Potenzialfaktor nach Brückner [9]	53

Tabelle 29: Gesamtes Abwärmepotenzial von Atmos Austria – Potenzialfaktor nach Enova [18] 53

Tabelle 30: Abgas-Abwärmepotenzial von ESIM Chemicals & Vertellus – Potenzialfaktor nach Brückner [9]..... 54

Tabelle 31: Gesamtes Abwärmepotenzial von ESIM Chemicals & Vertellus – Potenzialfaktor nach Enova [18]..... 54

Tabelle 32: Abgas-Abwärmepotenzial Sandoz Kundl – Potenzialfaktor nach Brückner [9] 55

Tabelle 33: Gesamtes Abwärmepotenzial von Sandoz Kundl – Potenzialfaktor nach Enova [18] 55

Tabelle 34: Abgas-Abwärmepotenzial Sandoz Schafteuau – Potenzialfaktor nach Brückner [9] 56

Tabelle 35: Gesamtes Abwärmepotenzial von Sandoz Schafteuau – Potenzialfaktor nach Enova [18] 56

Tabelle 36: Abgas-Abwärmepotenzial Donau Chemie Pischelsdorf 57

Tabelle 37: Abwärmepotenzial der Säurekühlung Donau Chemie Pischelsdorf 57

1 EINLEITUNG

Um die Folgen des Klimawandels einzudämmen, sollen in Europa bis 2030 die Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Referenzjahr 1990 um 40 % reduziert und der Anteil an erneuerbaren Energien im EU-Durchschnitt auf 32 % angehoben werden. Das Gesamtziel ist es bis 2050 bilanziell keine Treibhausgasemissionen auszuweisen. [1, 2] Die österreichische Regierung strebt sogar bis 2030 an, den Strombedarf bilanziell zu 100 % durch erneuerbare Energieträger zu decken und will bis 2040 eine vollständige Dekarbonisierung des Energiesystems erreichen. [3, 4] Österreich wies 2019 einen Primärenergiebedarf von 378,8 TWh und einen Endenergiebedarf von 316,3 TWh aus, wobei 33,6 % des Endenergiebedarfes, durch erneuerbare Energien bereitgestellt wurden. Mit der vereinfachten Annahme, dass der erneuerbare Anteil am Primärenergiebedarf gleich hoch ist, wie der des Endenergiebedarfes, besteht eine Lücke von 251,5 TWh, die es für eine vollständige Dekarbonisierung bis 2040 zu schließen gilt. [3]

Raum- und Prozesswärme machen einen großen Teil des Energiebedarfs aus. In Österreich fielen 2019 für den Verwendungszweck Raumwärme und Warmwasser rund 84,6 TWh, für Prozesswärme rund 74,1 TWh und somit insgesamt 158,7 TWh an. Dies entspricht rund 42 % des Primärenergiebedarfes. [5] Ein großer Teil der Raumwärme und des Warmwassers fällt mit rund 66,4 TWh in den Haushalten an, während die Prozesswärme zu einem überwiegenden Teil dem verarbeitenden Gewerbe zuzurechnen ist. [6] Bei der Raumwärme der Haushalte entfallen in etwa 33,8 % auf erneuerbare Energieträger, was absolut der Hälfte der erneuerbaren Energie im gesamten Wärmesektor entsprechen soll. Dies lässt auf einen Anteil an erneuerbaren Energieträgern von rund 28 % im gesamten Wärmesektor rückschließen. Damit die Klimaziele erreicht werden können müssten somit in etwa 105 TWh Wärme durch erneuerbare Energieträger bereitgestellt beziehungsweise durch Effizienzmaßnahmen oder Änderungen im Nutzungsverhalten eingespart werden. [7]

Besonders in der Industrie wird Wärme überwiegend auf hohem Temperaturniveau benötigt. Es wird nur ein Teil der Wärme in Prozesse eingebracht, während der Rest oft noch ungenutzt als sogenannte Abwärme verloren geht. Dabei besteht zumeist die technische Möglichkeit diese Energie nutzbar zu machen und so Primärenergie einzusparen. Die Umsetzung scheitert häufig an ökonomischen und betriebssicherheitstechnischen Fragen, weitere Hindernisse können jedoch auch Informationslücken darstellen. Im Rahmen des Projektes „INXS Industrial Excess Heat – Erhebung industrieller Abwärmepotenziale in Österreich“ sollen Abwärmepotenziale von Industriebetrieben erhoben werden und nach räumlichem Aufkommen, Temperaturniveau der Abwärme sowie zeitlicher Verfügbarkeit und Nutzbarkeit der Abwärme klassifiziert werden. Im Rahmen dieses Projektes, ist es Ziel

dieser Arbeit, die Abwärmepotenziale der Zement,- Kalk und Chemieindustrie für ausgewählte Betriebe dieser Sektoren abzuschätzen. [8]

Zur Berechnung der Potenziale werden, ausgehend von öffentlich zugänglichen Daten, Energiebilanzen aufgestellt. Die Arbeit strebt an möglichst betriebsspezifische Modelle zu erstellen, aufgrund von mangelnden Informationen muss jedoch vorwiegend auf branchen- oder sektorspezifische Mittelwerte zurückgegriffen werden. Die Daten werden über Internet- und Literaturrecherche erhoben und stammen vorwiegend aus Umweltberichten, BAT-Referenz-Dokumenten, statistischen Erhebungen und anderen wissenschaftlichen Arbeiten, die sich mit der Berechnung von Wärmepotenzialen beschäftigen. Aufgrund der verwendeten Methodik handelt es sich bei den berechneten Potenzialen ausnahmslos um Annäherungen an die tatsächlichen Potenziale, wobei die Genauigkeit von der verfügbaren Datenlage abhängig ist.

2 AUFGABENSTELLUNG

Diese wissenschaftliche Arbeit ist Teil des Projektes „INXS Industrial Excess Heat“ das von dem Lehrstuhl für Energieverbundtechnik der Montanuniversität Leoben koordiniert wird und von den Projektpartnern „AIT – Austrian Institute of Technology“, „AEE Intec – Institut für nachhaltige Technologien“ und dem Energieinstitut der Johannes Kepler Universität Linz unterstützt wird. Ziel des Gesamtprojektes ist die Bereitstellung einer möglichst lückenlosen Datenbasis in Bezug auf Abwärmepotenziale im Industriesektor, welche als Referenz, die Umsetzung von Projekten zur Nutzung von industrieller Abwärme unterstützen soll. Sowohl Abwärmepotenziale als auch Wärmesenken sollen geographisch verortet werden, um so Nutzungsmöglichkeiten der Abwärme aufzuzeigen. Ebenso soll die zeitliche Verfügbarkeit ermittelt werden und Prognosen erstellt werden, die das verfügbare Potenzial für die Jahre 2030 und 2040 abschätzen. [8]

Das Teilziel dieser Arbeit besteht dabei darin, das Abwärmepotenzial von ausgewählten Unternehmen der Zement-, Kalk- und der Chemieindustrie zu berechnen beziehungsweise abzuschätzen. Ausgehend von öffentlich zugänglichen Daten sollen Modelle für die betrachteten Betriebe erstellt werden, die die abwärmebestimmenden Prozesse so gut wie möglich widerspiegeln. Über diese Modelle sollen das theoretische und das technische Abwärmepotenzial ermittelt werden und eine Einteilung der Wärmeströme nach Trägermedium und Temperaturniveau erfolgen. Der Fokus dieser Arbeit liegt dabei auf der Erfassung von ungenutzter Abwärme. Nicht Teil ist hingegen die Bestimmung von Wärmesenken oder die Erstellung von Prognosen hinsichtlich der Entwicklung des Abwärmepotenzials.

2.1 Vorgehensweise

Eine der großen Limitationen dieser Arbeit, hinsichtlich der Erhebung der Abwärmepotenziale, stellt die Abhängigkeit von öffentlich zugänglichen Daten dar. Zwar wurden im Zuge des Gesamtprojektes Fragebögen erstellt deren Auswertung jedoch nicht Teil dieser Arbeit ist. In diesem Abschnitt soll auf die Möglichkeiten zur Datenbeschaffung und Modellierung und auf die in dieser Arbeit zum Einsatz kommenden Methoden eingegangen werden.

2.1.1 Datenbeschaffung

Bei der Datenbeschaffung von Abwärmedaten kann generell zwischen erhobenen und berechneten Daten unterschieden werden. Unter die Kategorie erhobene Daten fallen Messdaten oder Daten die durch Fragebögen, Umfragen oder verpflichtende Unternehmensberichte erhoben werden. Berechnete Daten können zum Beispiel durch

Multiplikation von Wirkungsgraden bzw. Energiekennwerten mit Energieeinsatzdaten ermittelt werden. Auch Daten, die aus Umfragen stammen, können berechnete Daten enthalten, in welchem Fall die Grenze zwischen erhobenen und berechneten Daten verschwimmen kann. [9]

Bei den in dieser Arbeit präsentierten Abwärmepotenzialen handelt es sich exklusiv um berechnete Daten, wobei der Energieeinsatz, insbesondere der Wärmeeinsatz, den Ausgangspunkt für die Berechnungen darstellt. Hier wird dieser aus öffentlich zugänglichen Unternehmensdaten, zum Beispiel aus Umweltberichten, gewonnen oder wird mithilfe der Emissionsdaten des europäischen Emissionshandelssystems und branchenspezifischen Kennwerten abgeschätzt.

2.1.2 Modellierung

Bei den Modellierungsverfahren zur Berechnung von Abwärmedaten werden häufig zwei Ansätze unterschieden. Bei Bottom-Up Modellen werden Einzelfallstudien oder Experimente zu allgemeinen Ergebnissen zusammengefasst. Der Top-Down Ansatz versucht hingegen mithilfe von allgemeinen Ergebnissen oder Kennwerten, meist aus statistischen Daten, Rückschlüsse über den speziellen Fall zu ziehen. Werden jedoch mehrere Top-Down Ergebnisse einzelner Standorte für eine gesamte Branche zu einem Gesamtergebnis aggregiert, entspricht das wieder einem Bottom-Up Ansatz auf Branchenebene. [9]

Die in dieser Arbeit vorgestellten Modelle können auf Betriebsebene vorwiegend dem Top-Down Prinzip zugeordnet werden, da primär mithilfe von prozess- und branchenspezifischen Durchschnittswerten Abwärmepotenziale für einzelne Betriebe erhoben werden. Der Hauptunterschied zwischen den verschiedenen entwickelten Modellen liegt darin ob für einen Standort die energiebestimmenden Prozesse einzeln modelliert werden konnten, oder ob aggregierte Abwärmefaktoren anderer Studien auf spezifische Betriebe einer diversen Branche angewendet werden mussten. Zweiteres liefert wesentlich unschärfere Modelle und Daten und übernimmt potenziell die Fehler der verwendeten Studien. Auf Branchenebene können insbesondere die Berechnungen der Zement und Kalkindustrie der Bottom-Up Analyse betrachtet werden.

3 THEORETISCHER HINTERGRUND UND STAND DER TECHNIK

Dieses Kapitel soll zunächst die Begriffe Abwärme und Abwärmepotenzial definieren. Daraufhin sollen einige theoretischen Grundlagen hinsichtlich Energie, Wärme bzw. Wärmeübertragung und dem Erstellen von Energiebilanzen vorgestellt werden. Ebenso wird die Erfassung von Abwärmepotenzialen untersucht und bestehende Literatur zu Abwärmepotenzialen diskutiert. Schlussendlich werden die in dieser Arbeit betrachteten Branchen vorgestellt, wobei konkret auf den Standort Österreich eingegangen wird.

3.1 Begriffsdefinition der Abwärme und des Abwärmepotenzials

Um ein einheitliches Verständnis für den Begriff der Abwärme zu schaffen, soll die Definition nach VDI-Richtlinie 4661 (2003) genutzt werden: [10]

„Abwärme umfasst alle den betrachteten Bilanzraum verlassenden thermischen Energieströme. Sie ist Bestandteil der Energieverluste und setzt sich aus Konvektions-, Leitungs- und Strahlungsverlusten sowie der thermischen Enthalpie der austretenden Stoffströme zusammen. Sie kann im Rahmen einer Abwärmenutzung in einem anderen Prozess gezielt genutzt werden. Fortwärme ist Abwärme, die nicht gezielt anderen Energiewandlungsprozessen zugeführt, sondern letztendlich ungenutzt an die Umgebung abgegeben wird.“

Nach dieser Definition stellt Abwärme die Summe aller Wärmeströme dar, die den Bilanzraum eines Prozesses verlassen. Abwärme die im Energieverbund in andere Prozesse eingebracht und so zumindest teilweise genutzt wird, wird nach dieser Definition ebenfalls als Abwärme bezeichnet. Effizienzmaßnahmen, die hingegen die entstehende Wärme demselben Prozess bzw. dem Prozessverbund wiederzuführen, verringern den Abwärmestrom und erhöhen die Prozesswärmeausbeute. Abwärme kann nach verschiedenen Gesichtspunkten kategorisiert werden, wichtige Unterscheidungsmerkmale sind: [11]

- **Temperaturniveau:** in Abhängigkeit von der Temperatur mit dem der Wärmestrom den Prozess verlässt.
- **Abwärmemenge:** Ausmaß der entstehenden Abwärme.
- **Bündelung der Abwärme:** Art und Weise in der die Abwärme vorliegt. Unterschieden werden kann zwischen diffuser Abwärme, die durch Wärmeverluste (Konduktion, Konvektion, Strahlung) in der Prozessumgebung vorliegt, und stoffstromgebundener Abwärme.
- **Trägermedium:** bei der stoffstromgebundenen Abwärme kann nach Trägermedium unterschieden werden z.B.: Abgas, Kühlwasser- und Luft.

Besonders wichtig für diese Arbeit ist die klare Definition des Begriffes des Abwärmepotenzials. Dabei kann zwischen dem theoretischen Potenzial, dem technischen Potenzial und dem wirtschaftlichen Potenzial unterschieden werden. [9]

Das theoretische Potenzial, oder physikalische Potenzial, weist die geringsten Einschränkungen auf und soll alle stoffstromgebundenen beziehungsweise bündelbaren Wärmeströme umfassen. Begrenzt wird das theoretische Potenzial vorwiegend durch die gewählte Referenztemperatur, die in dieser Arbeit mit 0 °C angenommen wird. [12]

Das technische Potenzial stellt ein reduziertes Potenzial dar, welches technische Einschränkungen berücksichtigt. Hierbei können Wärmeverluste durch Konvektion, Konduktion und Strahlung, die minimal erforderliche Temperaturdifferenz bei der Wärmeübertragung, technische Limitationen durch Verunreinigungen im Wärmeträgermedium und Einschränkungen zur Gewährleistung der Betriebssicherheit berücksichtigt werden. Die genauen Einschränkungen können dabei stark abhängig von dem betrachteten Prozess sein, die in dieser Arbeit berücksichtigten Einschränkungen werden im Kapitel 4.2 dargelegt. Da eine Empfehlung zum Verwendungszweck der Wärme nicht Zweck dieses Werkes ist, wird die Wärme nur bis zur Übertragung zu einem sauberen, leistungsfähigen Trägermedium betrachtet. Verwendungszweck spezifische Wirkungsgrade oder Wärmeverluste außerhalb des Prozessstandortes werden hingegen nicht betrachtet. [9, 12]

Bei der Umsetzung von Projekten die Abwärme nutzen ist vorwiegend das **wirtschaftlich nutzbare Wärmepotenzial** entscheidend. Spätestens bei diesem Potenzial sollten sämtliche Übertragungs- beziehungsweise Umwandlungsverluste berücksichtigt werden. Damit es ökonomisch sinnvoll ist Abwärme zu nutzen braucht es für die Wärme Abnehmer, wodurch das ökonomische Potenzial durch den Wärmebedarf begrenzt wird, beziehungsweise eine Umwandlung in andere nutzbare Energieformen, wie Strom, erforderlich ist. Schlussendlich kann in der Regel nur jene Wärme genutzt werden die bei einem ausreichend positiven Return of Investment unter Einhaltung von organisatorischen, vertraglichen und rechtlich-institutionellen Rahmenbedingungen bereitgestellt werden kann. [9]

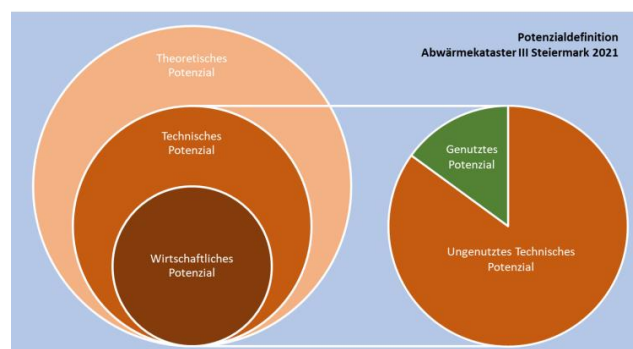


Abbildung 1: Abgrenzung der Abwärmepotenziale [12]

Bei dieser Einteilung des Wärmepotenzials sind auf jeden Fall weitere Subkategorien denkbar und je nach Literatur werden diese Kategorien etwas unterschiedlich aufgefasst. Wichtig ist die einheitliche Verwendung der Begriffe innerhalb derselben Arbeit und die klare Abgrenzung der Begriffe untereinander. Ist das der Fall stellt das technische Potenzial immer eine Teilmenge des theoretischen und das wirtschaftliche immer eine des technischen dar, so wie es in Abbildung 1 zu sehen ist. Wie Abwärme generell, können Abwärmepotenziale nach den oben aufgezählten Gesichtspunkten kategorisiert werden. Ebenso kann zwischen einem bereits genutzten oder ungenutzten Wärmepotenzial unterschieden werden. Das genutzte Potenzial ist eine Teilmenge aller Potenziale, die bei ökonomischer Nutzung das wirtschaftliche Potenzial nicht überschreiten sollte und per Definition das technische Potenzial nicht überschreiten kann.

3.2 Theoretische Grundlagen zur Wärmeübertragung und Bilanzierung von Energie

Um Energie bilanzieren zu können soll zunächst das abstrakte Konzept der Energie kurz vorgestellt werden. Energie wird oft als die Fähigkeit eines Systems Arbeit zu verrichten sowie Wärme zu übertragen verstanden. [13] Der Begriff Energie beschreibt in dieser Betrachtungsweise einen Zustand eines Systems, während Arbeit und Wärme den Prozess der Zustandsänderung beschreiben. [14] Eine entscheidende Eigenschaft von Energie ist, dass sie weder erschaffen noch vernichtet werden kann, sondern lediglich von einer Energieform in eine andere umgewandelt oder über Systemgrenzen hinweg verschoben werden kann. Typische Formen von Energie sind mechanische, elektrische, chemische Energie, Kernenergie, Strahlungsenergie und thermische Energie. Um die Qualität einer Energieform ausdrücken zu können, kann der Begriff der Exergie eingeführt werden. Der Exergieanteil beschreibt die maximale Arbeitsfähigkeit der betrachteten Energie, wobei sich reine Exergie theoretisch vollständig in jede andere Energieform umwandeln lässt. Im Gegensatz zur Energie ist Exergie keine Erhaltungsgröße und ohne externe Exergiezufuhr, kann die Exergie eines Systems niemals zunehmen. Stattdessen geht in realen Umwandlungsprozessen Exergie verloren, wobei die verlorene Exergie als Anergie bezeichnet wird. Diese beschreibt den Energieanteil, der keine Arbeit mehr verrichten kann. Der Exergieanteil von thermischer Energie wird von ihrem Temperaturniveau bestimmt, wobei sich reine Anergie als thermische Energie mit dem gleichen Temperaturzustand wie seine Umgebung veräußert. [15]

3.2.1 Thermische innere Energie und Wärme

Eine für diese Arbeit besonders wichtige Energieform ist der thermische, nicht-chemische, Anteil der inneren Energie. Im sprachlichen Gebrauch wird dieser Anteil oft auch als Wärme

bezeichnet. Streng genommen ist Wärme jedoch eine Prozessgröße, die bei Temperaturdifferenz von wärmeren auf kältere angrenzende Systeme übertragen wird und somit nur bei Zustandsänderungen auftritt. In der Wärmetechnik sind jedoch auch häufig die Begriffe sensible und latente Wärme anzufinden, um diesen physikalischen Anteil der inneren Energie zu beschreiben. Die Innere Energie ist eine Zustandsgröße und kann für jeden Zustand eines oder mehrerer Stoffe in Relation zu einem Referenzzustand klar definiert werden. Physikalisch stellt die sensible, thermische Energie primär die Bewegungsenergie, also die kinetische Energie, der Moleküle und Atome dar. Je nach Aggregatzustand und Molekülform sind dabei verschiedene Bewegungszustände möglich. Sowohl Translation, also die lineare Bewegung im Raum, Rotation und Schwingungen tragen zur kinetischen Energie auf molekularer Ebene bei. Die Intensität der Bewegungen spiegelt sich in der Temperatur der Stoffe wider. Bei Phasenübergängen kommt es zu Änderungen der zwischenmolekularen Kräfte, wodurch große Wärmemengen ab- bzw. zugeführt werden müssen. Trotz Änderung der inneren Energie des Systems kommt es zu keinem Temperaturanstieg oder -Abfall. [15]

Der Zusammenhang zwischen zugeführter Wärme Q und Temperatur T lässt sich durch die Wärmekapazität C ausdrücken: [15]

$$C = \frac{dQ}{dT} \quad (3-1)$$

Die Wärmekapazität ist dabei eine quantitative Stoffeigenschaft, was in der Regel über die spezifische Kapazität c ausgedrückt wird: [15]

$$C = m \cdot c \quad (3-2)$$

Die Wärmekapazität ist sowohl vom betrachteten Stoff als auch vom Stoffzustand abhängig. Die bedeutendste Zustandsgröße ist dabei die Temperatur selbst, der Einfluss des Volumens oder Druckes ist in vielen Fällen vernachlässigbar und spielt im Zusammenhang mit Wärmeübertragungsprozessen viel mehr eine Rolle in Hinsicht der Art der Prozessänderung. Unterschieden wird zwischen der Wärmekapazität C_v bei konstantem Volumen: [15, 16]

$$\Delta U = \Delta Q = m \cdot \int_{T_1}^{T_2} c_v(T) dT \quad (3-3)$$

und jenem bei konstantem Druck C_p : [15, 16]

$$\Delta H = \Delta Q = m \cdot \int_{T_1}^{T_2} c_p(T) dT \quad (3-4)$$

Dabei beschreibt ΔU die Änderung der inneren Energie und ΔH die der Enthalpie. Bei isobaren Prozessen ändert sich nicht nur die innere Energie des Systems, sondern es kann auch Volumenarbeit verrichtet werden, was eine Änderung der Enthalpie zur Folge hat. Die Unterscheidung der beiden Kapazitäten ist dabei besonders bei gasförmigen Phasen entscheidend. Das Volumen fester und flüssiger Stoffe ist in der Regel weniger temperaturabhängig, wodurch c_v und c_p als ident betrachtet werden können. Abhängig vom betrachteten Stoff und Temperaturbereich, lässt sich näherungsweise auch mit konstanten Wärmekapazitäten rechnen. [15, 16]

Bei Mehrstoffsystemen erhält man die Gesamtkapazität durch Summieren der einzelnen Wärmekapazitäten: [15]

$$C_{ges} = \sum_{i=1}^x C_i \quad (3-5)$$

Wie bereits angesprochen kommt es bei Phasenübergängen trotz Anstieg der inneren Energie beziehungsweise Enthalpie zu keinem Temperaturanstieg. Berücksichtigt wird das über die spezifische Schmelzenthalpie h_m , beim Schmelzen/Erstarren, und über die spezifische Verdampfungsenthalpie h_v , beim Verdampfen/Kondensieren. Die nötige Wärme ist dabei vom Zustand und von der Volumenarbeit, die im isobaren Fall geleistet werden muss, abhängig. [15]

Die treibende Kraft eines Wärmetransfers ist die Temperaturdifferenz zwischen zwei Systemen. Generell unterscheidet man drei Wärmeübertragungs-Mechanismen: [15–17]

- **Wärmeleitung:** beschreibt den Wärmetransport in Festkörpern und ruhenden Flüssigkeiten und Gasen. Die Wärme wird dabei durch die chaotische Bewegung der Moleküle übertragen, wobei Teilchen mit höherer kinetischer Energie den Energieüberschuss über Stöße an jene mit niedrigerer Energie übertragen.
- **Wärmekonvektion:** beschreibt die Wärmeübertragung zwischen einer strömenden Phase und einer zumeist ruhenden Phase. In der Regel wird dabei Wärme zwischen einem strömenden Gas bzw. einer Flüssigkeit und einer festen Phase übertragen. Weiter unterteilt wird die Konvektion in freie und erzwungene Konvektion, je nachdem ob primär durch Temperaturdifferenzen verursachte Dichteunterschiede oder mechanische Arbeit das Fluid zum Strömen anregen.
- **Wärmestrahlung:** anders als bei den zuvor genannten Übertragungsarten, ist der Transfer von Wärme bei diesem Mechanismus nicht stoffgebunden, sondern erfolgt durch elektromagnetische Wellen, wodurch dieser Wärmetransport auch im Vakuum erfolgen kann. In Abhängigkeit von ihrem Erregungszustand senden Atome und Moleküle Strahlungen mit unterschiedlicher Intensität aus. Diese Intensität nimmt

dabei mit der vierten Potenz der absoluten Temperatur des strahlenden Körpers zu und ist somit bei hohen Temperaturen besonders bedeutsam.

Allgemein kann die Wärmeübertragung im Fall der Konduktion und Konvektion durch folgende Gleichung beschrieben werden: [15]

$$\dot{Q} = \beta \cdot A \cdot \Delta T \quad (3-6)$$

Neben der Temperaturdifferenz ΔT und der Übertragungsfläche A , werden mit dem Proportionalitätskoeffizienten β alle anderen Einflussgrößen zusammengefasst, die auf die Wärmeübertragung Einfluss nehmen können. Er ist zum Beispiel abhängig von der Geometrie des Übertragungsfalles, von den Stoffeigenschaften des Systems und wird im Fall der Konvektion maßgeblich von der Strömungsgeschwindigkeit und dem Strömungsregime des Fluids bestimmt. In vielen Fällen ist β ebenfalls eine Funktion von T , da die relevanten Stoffeigenschaften, wie die Wärmeleitfähigkeit λ , ebenfalls temperaturabhängig sein können und die Strömung der freien Konvektion vom Temperaturgradienten im Fluid bestimmt wird. [15]

Jeder Körper mit einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt emittiert Wärmestrahlung. Abhängig von ihrer Interaktion mit Wärmestrahlung werden Körper in folgende theoretische Kategorien eingeteilt [16]:

- **Schwarze Körper:** absorbieren Wärmestrahlung vollständig.
- **Weißer Körper:** reflektieren Wärmestrahlung vollständig.
- **Diathermane Körper:** nehmen keine Wärmestrahlung auf.
- **Graue Körper:** Absorbieren einen Teil der Wärmestrahlung und reflektieren den Rest.

Allgemein gilt für jeden Körper, dass die Summe aus Absorptionskoeffizient a , Reflektionskoeffizient r und Durchlässigkeitskoeffizient d stets eins ergeben muss. [16, 17]

Ein Körper mit einer absoluten Temperatur T [K] emittiert je Flächenelement dA eine Energiestromdichte \dot{e} , die nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz wie folgt beschrieben werden kann: [17]

$$\dot{e} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (3-7)$$

Dabei stellt ε den Emissionskoeffizienten und σ die Stefan-Boltzmann-Konstante dar. Beim schwarzen Strahler ist neben dem Absorptionskoeffizient auch der Emissionskoeffizient eins und somit strahlt ein schwarzer Strahler bei einer gegebenen Temperatur die maximal mögliche Energiemenge aus. Allgemein gilt für jeden Strahler $\varepsilon = a$ sofern seine Oberfläche im thermischen Gleichgewicht mit seiner Umgebung ist. Der Emissionsgrad eines realen Strahlers ist eine Funktion von T . Die Strahlungsintensität eines Strahlers ist

richtungsabhängig und wird von der Geometrie des Strahlers bestimmt. Reale Strahler absorbieren und emittieren Wärmestrahlung nicht gleichmäßig im gesamten Wellenlängenspektrum der Wärmestrahlung, sondern, besonders im Fall von Gasen, hauptsächlich in bestimmten Strahlungsbanden. Der Absorptionsgrad wird dabei neben der Temperatur auch vom Druck und der Geometrie der Gasansammlung bestimmt. Gase mit linearer Molekülform können in der Annäherung als diatherman angesehen werden. Der netto Wärmestrom, der sich zwischen zwei Strahlern ausbildet, ist stark von deren Geometrie zueinander geprägt und verläuft vom wärmeren Strahler zum kälteren. [16, 17]

3.2.2 Energiebilanzen

Eine Energiebilanz schlüsselt den Energieinput und -Output eines Prozesses nach verschiedenen Kriterien auf. Je nach Art des Prozesses und des betrachteten Systems können dabei verschiedene Vereinfachungen beim Erstellen der Bilanzgleichung getroffen werden. Eine wichtige Unterteilung von Prozessen erfolgt dabei in instationäre und stationäre Prozesse. Bei instationären Prozessen können sich Energieinput und -Output unterscheiden, wodurch die Änderung der Systemenergie berücksichtigt werden muss. Anders ist das bei stationären Prozessen, bei denen sich Input und Output immer decken müssen. Systeme können in abgeschlossene, geschlossene und offene Systeme eingeteilt werden. Da abgeschlossenen Systemen per Definition weder Energie noch Materie zu- bzw. abgeführt werden kann, ist deren energetische Bilanzierung selten relevant. Geschlossene Systeme erlauben die Zu- und Abfuhr von Energie und offene zusätzlich die von Materie. [15]

Unter Vernachlässigung der Änderung von potenzieller und kinetischer Energie des Gesamtsystems, kann die Bilanzgleichung des geschlossen, instationären Systems allgemein wie folgt ausgedrückt werden: [15]

$$\frac{dU}{dt} = \dot{Q}(t) + P(t) \quad (3-8)$$

$$U_2 - U_1 = Q_{12} + W_{12} \quad (3-9)$$

Die erste Form stellt dabei die Differenzialform und die zweite die integrierte Form der Bilanzgleichung dar. Beide Formen geben zum Ausdruck, dass die Änderung der inneren Energie U eines geschlossenen Systems der Summe der zu-/abgeführten Wärme Q bzw. Arbeit W entsprechen muss. [15]

Komplexer wird die Gleichung bei Betrachtung eines offenen, instationären Systems bei der die Energie der zu- und abgeführten Massenströme berücksichtigt werden muss: [15]

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dt} + \dot{m}_a(t) \cdot \left[h_a(t) + \frac{1}{2} v_a^2(t) + g \cdot z_a(t) \right] - \dot{m}_e(t) \cdot \left[h_e(t) + \frac{1}{2} v_e^2(t) + g \cdot z_e(t) \right] & \quad (3-10) \\ = \dot{Q}(t) + P(t) \end{aligned}$$

Dabei stellt dE/dt die Änderung der Gesamtenergie des Systems dar und über die Massenströme \dot{m}_a und \dot{m}_e werden die stoffgebundenen Leistungen dargestellt. Die Indizes a beschreiben die austretenden und die Indizes e die eintretenden Größen. Zusammen mit den spezifischen Enthalpien h , den kinetischen Energieanteil als Funktion der mittleren Massenstromgeschwindigkeit v und dem potenziellen Energieanteil als Funktion der Höhe z , werden die Energieanteile der aus- und eintretenden Ströme berechnet. In vielen Fällen können einige Vereinfachungen getroffen werden. Technische Prozesse können häufig als stationäre Fließprozesse betrachtet werden, wodurch es zu keiner Änderung der Gesamtenergie des Systems kommt und somit dE/dt wegfällt. Auch alle anderen Größen sind im stationären Fall unabhängig von der Zeit t . In der Regel sind in chemischen Umwandlungsprozessen die Änderung der kinetischen und potenziellen Energie der Ströme, im Vergleich zur Enthalpie-Änderung, vernachlässigbar klein und bleiben unberücksichtigt.

Die vereinfachte Differentialform der stationären Energiebilanzgleichung eines offenen Systems kürzt sich unter den oben genannten Vereinfachungen zu: [15]

$$\dot{m}_a \cdot h_a - \dot{m}_e \cdot h_e = \dot{Q} + P \quad (3-11)$$

$$(\dot{m}_a \cdot h_a - \dot{m}_e \cdot h_e) \cdot t = Q + W \quad (3-12)$$

Da bei stationären Prozessen alle Größen zeitunabhängig sind, kann die integrale Form durch die Multiplikation aller Terme mit der Zeit erhalten werden. Bei genauer Betrachtung sind die Größen ortsabhängig, wobei die Ortsabhängigkeit beim Eintritt durch die Verwendung von Durchschnittswerten ausgeklammert wird. Die Zustandsänderungen innerhalb des Prozesses sind für die Bilanzierung irrelevant, lediglich der Ausgangszustand und Endzustand muss bekannt sein, um eine Bilanz zu erstellen. [15]

Ein realer Prozess kann in der Regel nicht durch einzelne Stoff- und Energieströme beschrieben werden. Stattdessen werden an unterschiedlichen Orten entlang der Prozessgrenze Energie- und Stoffströme ein- und ausgebracht. Die Bilanz erhält man durch Summation der Energieanteile der einzelnen Ströme:

$$\left(\sum_{i=1}^{x_1} \dot{m}_a \cdot h_a - \sum_{i=1}^{x_2} \dot{m}_e \cdot h_e \right) \cdot t = \sum_{i=1}^{x_3} Q + \sum_{i=1}^{x_4} W \quad (3-13)$$

3.3 Erfassung von Abwärmepotenzialen

Ein industrieller Betrieb kann als „Black Box“ angesehen werden, bei dem im stationären Zustand, oder im zeitlichen Mittel, die Summe aller zugeführten und aller abgeführten Energieströme ident sein müssen. Die abgeführte Energie ist vor allem in den Produktströmen und Prozessströmen (z.B.: Abgas, Abwasser) zu finden oder wurde im Laufe der Prozesskette an die Umgebung dissipiert.

Wie bereits in 2.1.1 beschrieben können Daten zur Abwärme entweder erhoben oder berechnet werden. Im idealen Fall stellen erhobene Daten Messwerte dar. Über die Messung von Temperaturen, Stoffstoffstrommengen bei bekannten oder ebenfalls gemessenen Stoffstromzusammensetzungen kann der Wärmeinhalt eines Stoffstromes berechnet werden. Werden alle Ströme erfasst und ist zusätzlich die Änderung der chemischen Enthalpie bekannt, können durch Bildung der Differenz zum Energieeinsatz die Energieverluste ermittelt werden. In manchen Fällen muss zusätzlich ein Output an elektrischer Energie oder die Änderung der kinetischen/potenziellen Energie der Stoffströme berücksichtigt werden. Über Messungen können prinzipiell die exaktesten Ergebnisse erzielt werden. Wichtig ist jedoch, dass alle relevanten Messgrößen hinreichend genau erfasst werden. Bei nicht kontinuierlicher Messung müssen Mess-Zeitraum und -Zeitpunkte so gesetzt werden, dass die betrieblichen Geschehnisse dennoch möglichst vollständig abgebildet werden. Fehlerhafte Daten werden einerseits durch falsch ausgeführte Messungen, aber auch durch technische Einschränkungen des Messequipments verursacht. [9] Messungen dieser Art werden in der Regel nur von Betrieben selbst oder in enger Kooperation mit diesen durchgeführt. Bei weitreichenden, flächendeckenden Studien ist es hingegen fast unmöglich alle betrachteten Betriebe durch Messungen zu erfassen.

Eine weitere Möglichkeit zur Erhebung von Abwärmedaten sind Fragebögen. Werden Daten auf diese Art erhoben, sollen bestehende Daten von Unternehmen dazu genutzt werden, um Rückschlüsse über das Abwärmeaufkommen zu ziehen. Die internen Unternehmensdaten können auf Messdaten rückzuführen sein, können aber ebenfalls durch prozess- oder sogar branchenspezifische Kennzahlen generiert werden und enthalten in diesem Fall auch berechnete Daten. Prinzipiell hat ein Betrieb den besten Einblick in seine Prozesse und sollte bei vorhandener fachlicher Kompetenz auch bei der Miteinbeziehung von berechneten Daten genauere Ergebnisse erzielen können als es die Berechnung durch externe Studien erlaubt. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, sollte der Fragebogen detailliert darlegen welche Abwärmequellen berücksichtigt werden sollen, welcher Referenzpunkt herangezogen wird und wie die Abwärme kategorisiert werden soll. Die meisten Studien stützen auf Fragebögen die auf freiwilliger Basis retourniert werden, somit liefern Fragebögen nicht zwingend vollständige Ergebnisse. Eine norwegische Abwärme-

Potenzialstudie erhielt beispielsweise 69 % aller ausgesendeten Fragebögen zurück. [18] Häufig sind die erhaltenen betrieblichen Daten vertraulich, wodurch sie erst durch Aggregation zu einem Gesamtergebnis, z.B.: auf Branchenebene, veröffentlicht werden können.

Berechnete Daten versuchen über branchen- und prozessspezifische Wirkungsgrade, Kennzahlen, Temperaturniveaus oder mit Hilfe von Ergebnissen anderer Studien in Verknüpfung mit Unternehmensdaten Abwärmepotenziale abzuschätzen. Die Qualität der Ergebnisse ist dabei stark vom Einblick in die betrieblichen Geschehnisse, der Homogenität der Branche, besonders hinsichtlich deren Prozesseffizienz und Energienutzungsverhalten, und letztendlich von der Qualität der verfügbaren Ausgangsdaten abhängig. Einproduktunternehmen sind dabei in der Regel einfacher zu modellieren als Unternehmen die eine große Bandbreite an Produkten mit zum Teil sehr unterschiedlichen Herstellungsprozessen erzeugen. Ausgangspunkt zur Berechnung eines Abwärmepotenzials ist häufig der Energieeinsatz. Umwelt- und Energieberichte von Unternehmen mit detaillierten Angaben zum Energieeinsatz erleichtern die Berechnung des Potenzials. Ist dieser nicht bekannt, kann dieser teilweise über die CO₂-Emissionen oder andere Kennzahlen wie der Produktionsmenge oder der Mitarbeiterzahl abgeschätzt werden. Generell ist die Berechnung von Abwärmepotenzialen mit sehr hoher Ungenauigkeit behaftet, besonders wenn die eingesetzten Modelle primär auf öffentlich zugängliche Daten zurückgreifen.

Bei der Modellierung von Abwärmepotenzialen kann zwischen Bottom-Up und Top-Down-Modellen unterschieden werden. Bei der Bottom-Up-Methode erfolgt die Berechnung des gesamten Potenzials durch Summation von spezifischen Einzelergebnissen. Beim Top-Down-Ansatz wird hingegen versucht mithilfe vom allgemeinen Fall (Durchschnittswerte, Kennzahlen etc.) Ergebnisse für den spezifischen Fall abzuschätzen. Modelle, die sich auf erhobene Daten stützen, können in der Regel dem Bottom-Up-Verfahren zugerechnet werden. Hierbei werden die Ergebnisse auf der Prozessebene zu einem Potenzial auf Betriebsebene aggregiert, wobei die Potenziale mehrerer Unternehmen ein Gesamtergebnis auf regionaler oder Branchen-Ebene bilden können. Berechnete Werte nutzen häufig Durchschnittswerte und bilden somit Top-Down-Modelle auf Prozessebene und schlussendlich meistens auch auf Unternehmensebene. Jedoch kann bei der Summation von diesen einzelnen Ergebnissen dennoch von einem Bottom-Up-Ansatz auf z.B.: Branchenebene gesprochen werden. [9]

3.4 Bestehende Literatur zu Abwärmepotenzialen

In diesem Abschnitt sollen zunächst einige ausgewählte Studien vorgestellt werden und deren Vorgehensweise und Rahmenbedingungen diskutiert werden. Daraufhin soll auf

Ergebnisse zu Abwärmepotenzialen bestehender Studien hinsichtlich der in dieser Arbeit betrachteten Branchen eingegangen werden.

3.4.1 Abwärmepotenzialstudien und deren Methodik

In diesem Kapitel sollen einige europäische Abwärmepotenzialstudien vorgestellt werden, wobei insbesondere auf deren Rahmenbedingungen und Vorgehensweisen eingegangen werden soll. Die ausgewählten Studien zeigen unterschiedliche Methodiken und haben zum Teil hohe Relevanz für einzelne in dieser Arbeit vorgestellte Modelle. Dieses Kapitel bietet einen kurzen Einblick in diese Abwärmepotenzialstudien, stellt jedoch keine vollständige Literaturübersicht dar.

Im Jahre 2009 wurde im Auftrag vom norwegischen Staatsunternehmen Enova SF [18] eine Abwärmepotenzialstudie durchgeführt, deren Fokus auf den Branchen Lebensmittel, Holzverarbeitung, Zement, Chemie, Aluminium und Eisen/Stahl lag. Zusätzlich wurden einige einzelne energieintensive Unternehmen und Müllverbrennungsanlagen erfasst. Das Potenzial wurde mithilfe von Fragebögen erhoben. Insgesamt wurden die Formulare an 105 Unternehmen gesendet, wobei 72 Unternehmen diese retournierten. Alle Betriebe gemeinsam sollen zusammen 63 % des Energieverbrauchs der norwegischen Industrie aufweisen. Erfasst werden sollten alle ungenutzten Wärmeträger die mit einer Endtemperatur von mindestens 25 °C emittiert werden. Die Referenztemperatur liegt bei 0 °C wobei die Abwärmepotenziale in vier unterschiedliche Temperaturbereiche unterteilt wurden: 25 – 40 °C, 40 – 60 °C, 60 – 140 °C und über 140 °C. Zusätzlich wurde die Abwärme nach Wärmeträger kategorisiert, wobei zwischen flüssigem Wasser, Wasserdampf und Abgas unterschieden wurde. [18]

Eine wichtige Bottom-Up-Erhebung des Wärmepotenzials in Deutschland stellt die Dissertation *Brückners „Industrielle Abwärme in Deutschland“* [9] aus dem Jahr 2016 dar, die auch auf Grund ihrer umfassenden Literaturübersicht zu Abwärmepotenzialstudien zu empfehlen ist. In der Arbeit wird versucht ein möglichst flächendeckendes Abwärmeaufkommen über Daten der Emissionserhebungen der deutschen Bundesländer zu ermitteln. Diese vierjährig verpflichtet erhobenen Daten werden durch Messungen, Berechnungen und Schätzungen gewonnen. Während die Daten für einzelne Anlagen verfügbar sind, erfolgte die Berechnung der Potenziale in Brückners Arbeit auf Betriebsebene. Die betrachteten Daten beinhalten einerseits Abgasvolumenströme, Abgastemperaturen und Betriebsstunden, andererseits auch Angaben zu den eingesetzten Brennstoffen und deren Menge. Die Auswertung der Daten erfolgte computerunterstützt, wobei Datensätze die bestimmten Plausibilitätskriterien nicht standhalten konnten, aussortiert wurden. Die Studie berechnet im ersten Schritt ihre Daten Bottom-Up für einzelne Betriebe und aggregiert diese weiter auf Länder- und Bundesebene.

Bezugstemperatur dieser Studie ist 35 °C. Aufgrund der Art der ausgewerteten Daten wurden nur die Abgas-Abwärme erhoben. Bei den ermittelten Potenzialen handelt es um ungenutzte, theoretische Potenziale, da die betrachtete Wärme über das Abgas emittiert wurde. [9]

In McKennas 2009 publizierter Dissertation „Industrial energy efficiency: Interdisciplinary perspectives on the thermodynamic, technical and economic constraints“ [19] wird ein Modell entwickelt welches das britische, industrielle Abwärmepotenzial durch Berechnung abschätzen soll. Ausgehend von CO₂-Emissionen des europäischen Emissionshandelsregister sollte mithilfe einer typischen Brennstoffzusammensetzung für den betrachteten Sektor, die über Brennstoffe eingebrachte Energie ermittelt werden. Vernachlässigt werden dabei exotherme Reaktionen und über elektrische Energie eingebrachte Wärme. Zusätzlich blieben Biomasse und alternative Brennstoffe in der Brennstoffmatrix unberücksichtigt. Mithilfe von Kesselwirkungsgraden, Lastfaktoren, Prozesswirkungsgraden, zusätzlichen Verlustfaktoren und Abgasendtemperaturen wurden schließlich Abwärmepotenziale für die betrachteten Sektoren abgeschätzt. Betrachtet wurden die Aluminium-, Zement-, Keramik-, Chemie-, Nahrungsmittel-, Eisen/Stahl-, Papier-, Kalk-, Gips- und Mineralwollindustrie. [19]

Das Projekt „INXS Industrial Excess Heat“ baut zum Teil auf die Methodiken des Projektes „Abwärmekataster Steiermark“ [12] aus dem Jahr 2021 auf, an welchem der Lehrstuhl für Energieverbundtechnik der Montanuniversität Leoben ebenfalls beteiligt war. Ziel des Projektes „Abwärmekataster Steiermark“, war die Erfassung der theoretischen und technischen Abwärmepotenziale der steirischen Betriebe und die Erstellung eines Konzeptes einer Abwärmekontaktplattform. Die Studie kombiniert die Erhebung von Abwärmedaten mit Hilfe von Fragebögen und Berechnungen, die zu einem Teil eine genaue Prozessmodellierung anstreben, zum anderen Werte über Kennzahlen errechnet. Die Referenztemperatur wurde mit 0 °C festgelegt, wobei die Abwärme in die Temperaturbereiche: 0 – 50 C, 50 – 100 C und über 100 °C aufgeteilt wurde. Wenn möglich wurde die Abwärme in folgende Wärmeträgermedien klassifiziert: Rauchgas, Kondensation, Ab- und Kühlwasser, Produkt- und Hallenabwärme und Abluft-Maschinenkühlung. [12]

3.4.2 Abwärmepotenziale in der Zementindustrie

Die für diese Arbeit relevanteste Studie hinsichtlich des Abwärmepotenzials der Branche in Österreich ist ein Bericht zur „Energieeffizienz der österreichischen Zementindustrie“ aus dem Jahr 2010 [20] und dem Referenzjahr 2007, der durch die Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie beauftragt wurde. Betrachtet wurden alle zwölf Standorte die 2007 in Österreich in Betrieb waren, wobei drei davon mittlerweile geschlossen wurden und sich bei einem Standort nur ein Mahlwerk befindet. Die Daten wurden mithilfe von Fragebögen erhoben und die präsentierten Ergebnisse wurden Bottom-Up aus den

Einzelergebnissen der zwölf Anlagen gewonnen. Das Ergebnis der Studie beziffert ein nutzbares Abwärmepotenzial von etwa 935 GWh, wobei 515 GWh bereits intern, vor allem für die Rohmehlerwärmung und Trocknungsprozesse, genutzt werden sollen und die restlichen 420 GWh noch ungenutzt bleiben. Als nutzbar gilt in dieser Studie nur Abwärme mit Temperaturen über 100 °C. Weitere 1142 GWh sollen nicht nutzbar sein, wobei keine Referenztemperatur für dieses Ergebnis angegeben wird. Der Gesamtbrennstoffeinsatz für das Referenzjahr 2007 soll 4012 GWh betragen, wodurch sich ein ungenutztes Potenzial für Wärmeströme über 100 °C von etwa 10,5 % und sich ein theoretisches Abwärmepotenzial von 51,8 % ergibt. [20]

In einer Studie die Abwärmepotenziale der Industriesektoren in China betrachtet, wird für den Zementsektor ein theoretisches Abwärmepotenzial von 26 % angegeben, wobei in etwa die Hälfte davon auf ein Temperaturniveau von über 150 °C verfügbar sein soll. Betrachtet wurden dabei die Abwärme des Abgases und der Klinker-Kühlluft. Dabei soll ein großer Teil dieser Abwärme bereits genutzt werden, denn mit dem Stand 2012 sollen bei 70 % der Drehrohröfen Maßnahmen umgesetzt worden sein, die es erlauben einen Teil der Abwärme zu Strom umzuwandeln. [21]

Die bereits genannte Enova-Studie bestimmte durch Unternehmensbefragung ein theoretisches, ungenutztes Abwärmepotenzial von 46 % bezogen auf die Referenztemperatur 0 °C. [18]

Bei einer Referenztemperatur von 25 °C wurde 2008 vom US Department of Energy ein ungenutztes Abwärmepotenzial für Zementwerke mit trockenen Verfahren von etwa 31,2 % berechnet, wovon ein Drittel (10,5 %) über 150 °C verfügbar sein sollen. [22]

3.4.3 Kalkindustrie

Die Effizienz der Kalkbrandöfen variiert stark nach der eingesetzten Ofenart, wobei GGR-Öfen (Gleichstrom-Gegenstrom-Regenerativöfen) mit Wirkungsgraden bis über 85 % den höchsten aufweisen. [23] Bei diesem Ofentyp macht der theoretische Abwärmestrom somit nur in etwa 15 % des Gesamtenergieeinsatzes aus. Aufgrund der hohen Prozesseffizienz und der niedrigen Produktionskapazität fallen die Abwärmepotenziale relativ zum Energieeinsatz und absolut vergleichsweise gering aus, weshalb Branntkalk wahrscheinlich auch kaum gesonderte Erwähnung in Abwärmepotenzial-Erhebungen findet. In *McKennas* Dissertation aus dem Jahr 2009 werden ein Gesamtenergiebedarf und Abwärmepotenzial für den Sektor in Großbritannien berechnet, die Ergebnisse werden jedoch nur graphisch dargestellt. Die graphische Auswertung ergibt ein technisches Potenzial von ungefähr 8 – 17 %. [19]

3.4.4 Chemieindustrie

Die Chemieindustrie ist ein vielseitiger Sektor mit sehr unterschiedlichen Prozessen, wobei Wärme in der Chemieindustrie oft nicht nur durch Brennstoffe, sondern auch durch exotherme Reaktionen in Prozesse eingebracht wird. Bei den 9 Chemieunternehmen, die in der Enova Studie aus dem Jahr 2009 befragt wurden, soll das durchschnittliche theoretische Abwärmepotenzial deshalb 157 % des Brennstoffeinsatzes entsprechen, wobei ein Großteil, nämlich 139 %, in Kühlwasserströmen gebunden vorliegen soll. Eine untergeordnete Rolle sollen hingegen dampfförmige- und Abgasströme, mit respektiv 10 – und 8 % spielen. Das kann darauf hindeuten, dass generell mehr Abwärme im Kühlwasser anfällt, aber auch darauf, dass ein größerer Anteil der gasförmigen Abwärmeströme bereits genutzt wird. Das hohe Abwärmepotenzial, das bei den betrachteten Unternehmen im Durchschnitt höher als der Brennstoffeinsatz ist, ist auf exotherme Reaktionen zurückzuführen. Da in der Studie das Abwärmepotenzial rein auf den Brennstoffbedarf bezogen wurde, wobei das chemische Potenzial der Ausgangsstoffe vernachlässigt wurde, sind Abwärmepotenziale über 100 % möglich. [18] Bei Chemieunternehmen bei denen endotherme Prozesse überwiegen, ist hingegen mit deutlich niedrigeren brennstoffbezogenen Wärmepotenzialen zu rechnen.

In *Brückners* Dissertation aus dem Jahr 2016 wurden für den deutschen Chemiesektor ein durchschnittlicher Abwärmefaktor von 9 % für abgasgebundene Wärme ermittelt. [9] Aus *McKennas* Arbeit können, ebenfalls für abgasgebundene Wärme, aus graphischen Ergebnissen Abwärmefaktoren von 3,0 – 5,5 % ermittelt werden. [19]

3.5 Beschreibung der Sektoren am Standort Österreich

Dieser Abschnitt soll einen Überblick über die in dieser Arbeit betrachteten Sektoren geben, die Standorte beschreiben und die zum Einsatz kommenden Technologien erklären.

3.5.1 Zementindustrie in Österreich

Mit Stand 2022 gibt es in Österreich acht Zementwerke mit Ofenbetrieb, die in Tabelle 1 zu sehen sind. In einem Bericht der technischen Universität Wien ist auch noch der Standort Peggau angeführt, laut Angaben des Betreibers W&P Zement ist dort jedoch nur mehr ein Mahlwerk in Betrieb. Diese Angabe deckt sich auch mit den österreichischen Emissionsberichten, in denen seit dem Jahr 2013 keine CO₂-Emissionen für den Standort angeführt werden. [24–26] In Summe sollen in allen Zementwerken, 2019, 3.422.866 t Klinker produziert worden sein, was einem Zementoutput von 5.241.524 t entspricht. Dabei wurde CO₂ in einer Höhe von 2.895.376 t emittiert, wobei in etwa 39 % des Kohlenstoffdioxids aus Verbrennungsreaktionen stammen und der Rest aus dem Rohmehl

ausgetrieben wird. Bei spezifischen CO₂-Emissionen von 82,4 kg CO₂/GJ ergibt sich ein Brennstoffeinsatz von etwa 3785 GWh. [24]

Tabelle 1: Zementwerke mit Ofenbetrieb in Österreich [24]

Zementwerke mit Ofenbetrieb in Österreich	
Betreiber	Standort
Zementwerk Leube	Gartenau
Zementwerk Hatschek	Gmunden
Kirchdorfer Zementwerk Hofmann	Kirchdorf
Lafarge Zementwerke GmbH	Mannersdorf
Lafarge Zementwerke GmbH	Retznei
Schretter & Cie	Vils
W&P Zement	Wietersdorf
Baumit	Wopfing

Das Produkt Zement ist ein fein gemahlenes, anorganisches, nicht-metallisches Pulver, das bei der Zugabe von Wasser eine Paste bildet, die mit der Zeit erstarrt. Das Aushärten erfolgt dabei primär durch die Bildung von Calciumsilikathydraten. Als Ausgangsstoff für Beton ist Zement einer der wichtigsten Stoffe der Bauindustrie. Für die Herstellung werden, unter anderen, Calciumcarbonate, Silikate, Eisen- und Aluminiumoxide benötigt, die zum Beispiel in den Rohstoffen Kalkstein, Ton, Schiefer und Mergel enthalten sind und häufig im Übertagebau gewonnen werden. Die genaue Komposition der Ausgangsstoffe bestimmt hierbei die Eigenschaften des Endproduktes und kann zur Variation dieser angepasst werden. Bevor die Ausgangsstoffe im Ofen zum sogenannten Klinker gebrannt werden, müssen sie gemahlen werden, wobei für eine hohe Produktqualität auf eine homogene Verteilung der chemischen Komponenten zu achten ist. Der anschließende Brenn- und Sinterungsprozess ist mit einem hohen Energieeinsatz verbunden, wobei die benötigten hohen Temperaturen durch in den Prozess eingebrachte Brennstoffe erzeugt werden. Um Zement zu erhalten, muss der gebrannte Zementklinker anschließend unter Beigabe von Gips oder Anhydrit gemahlen werden, wobei auch inertes Material als Zuschlagsstoff zum Einsatz kommen kann. Der elektrische Energieeinsatz, für das Mahlen des Rohstoffes und Produktes, macht nur in etwa 13,6 % des Gesamtenergieeinsatzes aus und die entstehende Abwärme fällt bei niedrigen Temperaturen, diffus und somit schwer rückgewinnbar an. Deswegen soll in dieser Arbeit nur der brennstoffintensive Klinkerbrennprozess betrachtet werden, wobei auf diesen in weiterer Folge noch genauer eingegangen wird. [27]

Das Brennen des Klinkers ist der kostenbestimmende Prozess der Zementherstellung. Er ist energieintensiv, weist Flammentemperaturen von etwa 2000 °C und hohe CO₂-Emissionen auf. Der erste grundlegende chemische Prozess bei der Klinkerherstellung startet bei 900 °C mit der Dekomposition von Calciumkarbonat (CaCO₃) zu Calciumoxid (CaO) und

Kohlenstoffdioxid (CO_2). Dieser Schritt wird auch als Kalzinierung oder Calcination bezeichnet. Das freiwerdende CO_2 dieser chemischen Reaktion ist für mehr als die Hälfte der CO_2 -Emissionen der Zementherstellung verantwortlich. Die bereits erwähnten restlichen 39 % werden bei der Verbrennung von fossilen Brennstoffen, aber auch Ersatzbrennstoffen, wie Tiermehl, Klärschlamm, Sägemehl, Altreifen und Kunststoffen frei. Die Brennstoffe stellen die notwendige Energie fürs Calcinieren bereit und müssen die Reaktionszone für den Sinterungsprozess auf $1400 - 1500 \text{ }^\circ\text{C}$ halten. Beim Sintern reagiert CaO mit Silikaten, Eisen- und Aluminiumoxiden und formt dabei Calciumsilikate, -ferrite, und -aluminat. Die Calcination findet dabei größtenteils schon beim Vorwärmen und im sogenannten Calcinator statt, während das Brennen des Klinkers erst in den für die Zementherstellung typischen Drehrohrofen stattfindet. [27]

Je nach Zustand des Ausgangsmaterial werden vier unterschiedliche Prozesstypen unterschieden: [27]

- Der trockene Prozess
- Der semi-trockene Prozess
- Der semi-nasse Prozess
- Der nasse Prozess

Der trockene Prozess ist der am wenigsten energieintensivste Prozess, da während des Brennens keine Trocknung des Materials zu erfolgen hat. Sofern es das Rohprodukt der Lagerstätten zulässt, kommt deshalb bevorzugt der trockene Prozess zum Einsatz. [27] Bei allen in Betrieb stehenden Zementanlagen in Österreich sind deshalb Drehöfen mit trockenem Verfahren in Verwendung. Beim Drehrohrofen in Peggau, der derzeit nicht mehr in Verwendung ist, handelt es sich hingegen um einen Lepolofen der ein halbtrockenes Verfahren anwendet. [24] In den ersten Klinkerbrennprozessen kamen langgezogene Drehrohröfen zum Einsatz in denen die gesamte Energie zum Trocknen, Calcinieren und Sintern im Drehrohrofen eingebracht wurde. Moderne, trockene Verfahren nutzen hingegen stationäre Wärmetauscher/Öfen, zum Vorwärmen/Calcinieren, was zu einer besseren Ausnutzung der Wärme führt und somit die Energieeffizienz steigern konnte. Das Vorwärmen erfolgt zumeist in Zyklon-Wärmetauschern bei denen über mehrere Stufen das trockene Rohmehl im heißen Abgas in Suspension gebracht wird, wodurch eine möglichst große Wärmeübertragungsfläche geschaffen wird. Moderne Anlagen verfügen zumeist auch über einen Brennraum, der sich vor dem Drehrohrofen befindet, in dem bis zu 65 % des Brennstoffes zu gefeuert wird und der primär der Calcination des Rohmehls dient und somit als Calcinator bezeichnet wird. Die Brennluft wird dabei vorgewärmt aus der Produkt-Nachkühlung abgezweigt. Durch die hohe Verweilzeit des Mehls im Calcinator-Zyklon-System gelangen über 90 % des Inputs bereits calciniert und mit etwa $870 \text{ }^\circ\text{C}$ in den

Drehrohrofen. [27] Die österreichischen Anlagen besitzen 4 – 5 Zyklonstufen und bis auf eine Anlage sind alle mit einem Calcinator bestückt. [24]

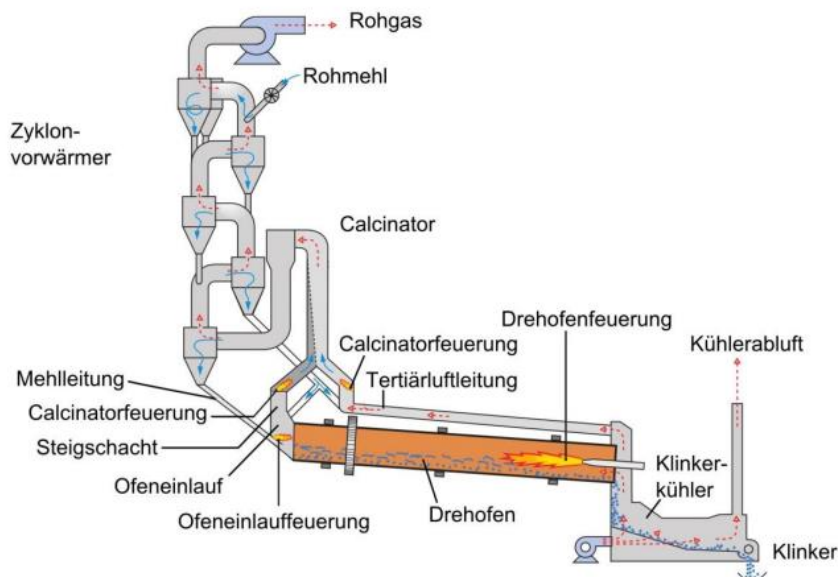


Abbildung 2: Schematische Darstellung eine Zement-Drehrohrofens mit Vorwärmung und Calcinator [28]

In Abbildung 2 ist eine Zement-Klinker Anlage mit zwei Calcinatorfeuerungen und vier Zyklon-Wärmetauscherstufen zu sehen. Die roten Pfeile der Graphik zeigen dabei den Weg der Luft bzw. des Abgases und die blauen den Weg des Rohmehls bzw. Klinkers an. Zu sehen ist, dass die Kühlerluft sowohl als Primärluft im Drehrohrofen, als auch als Tertiärluft für die Calcinatorfeuerungen genutzt wird. [28]

Zement-Drehrohrofen eignen sich gut für den Einsatz von Ersatzbrennstoffen, wodurch fossile Brennstoffe eingespart werden können. Abfall, der schadstoffbeladen ist und schwer zu entsorgen ist, kann aufgrund der hohen Verbrennungstemperaturen und langen Verweilzeit des Abgases im Ofen gut entsorgt werden. Die Verweilzeit im Temperaturbereich in dem es zur Dioxin-/Furan-Bildung kommt ist hingegen kurz, weshalb auch chlorhaltiger Abfall verbrannt werden kann. Zusätzlich können Schadstoffe im Klinker gebunden werden, wodurch die Schadstoffe im Abgas weiter reduziert werden. [11] Die österreichischen Anlagen substituieren einen Großteil ihres Brennstoffbedarfs durch Ersatzbrennstoffe, wobei 2019 ein Anteil von 78,4 % der Brennstoffenergie durch Ersatzbrennstoffe bereitgestellt wurde. [24]

3.5.2 Branntkalkindustrie in Österreich

In Österreich gibt es insgesamt 14 Standorte an denen Branntkalk hergestellt wird. Bei sieben dieser Standorte handelt es sich um kleinere Anlagen die primär den Eigenverbrauch der betreibenden Unternehmen, die in der Papier-, Lebensmittel- und Chemieindustrie anzusiedeln sind, decken sollen. Diese Arbeit konzentriert sich dabei auf die anderen sieben

größeren Anlagen, die auch im Emissionshandelsregister ausgewiesen werden. Eine Übersicht über jene Betriebe ist in Tabelle 2 zu sehen.

Tabelle 2: Wichtige Kalköfen in Österreich [23, 29]

Betreiber	Standort	Ofentechnik	Kapazität [t/a]
Ernstbrunner Kalktechnik GmbH	Ernstbrunn	2 Schachtöfen	80300
Baumit Baustoffe GmbH	Bad Ischl	1 RS-Ofen	48000
voestalpine Stahl GmbH	Steyrling	4 GGR-Öfen	386900
Wopfinger Baustoffindustrie GmbH	Wopfung	2 GGR-Öfen	182500
InterCal Austria	Peggau	1 GGR-Ofen	138335
Schretter & Cie	Vils	1 GGR-Ofen	60225
Leube GmbH	Golling	1 RS + 1 MKS-Öfen	169725

Die meisten Informationen stammen dabei aus einem Bericht des Österreichischen Umweltbundesamtes aus dem Jahr 2007 [23], die durch Online-Recherche ergänzt wurden, wobei nur am Standort Peggau Informationen über eine Änderung der eingesetzten Technologie gefunden werden konnte. Die InterCal Austria ersetzte zwei alte Anlagen durch einen GGR-Ofen und erhöhte dabei ihre Kapazität von 265 auf 379 t Kalk pro Tag. Somit kommen an vier Standorten GGR-Öfen zum Einsatz, wobei vier der insgesamt acht GGR-Öfen in Steyrling anzufinden sind. An den drei Standorten, die keine GGR-Öfen verwenden, wird Kalk in zwei Schachtöfen, zwei Ringschachtöfen (RS) und einem Mehrkammerschachtöfen (MKS) gebrannt. Bei einem Output von insgesamt 785.000 t Kalk im Jahr 2005 waren die Öfen, unter der Berücksichtigung der damaligen Kapazität zu 75 % ausgelastet. [23]

Unter dem Sammelbegriff Kalk werden verschiedene mineralische Calciumverbindungen bezeichnet. So können Kalkstein (CaCO_3), Branntkalk (CaO) und Kalkhydrat (Ca(OH)_2) als Kalk bezeichnet werden, wobei Kalkstein das chemische Ausgangsprodukt von Branntkalk und dieses wiederum jenes von Kalkhydrat darstellt. Diese Arbeit legt ihren Fokus dabei auf den energie- und exergieintensiven Prozess des Kalkbrennens. Kalkstein wird im Tagebau gewonnen, tritt mineralisch als Kalzit auf und tritt als Sedimentgestein in verschiedenen geologischen Formationen auf. Der gewonnene Kalkstein wird durch das Zerkleinern und Waschen von Verunreinigungen wie Ton, Lehm, Sand und Quarz befreit und kann danach zu Branntkalk weiterverarbeitet werden. [23]

Für die Herstellung von Branntkalk wird Kalkstein auf über 900 °C erhitzt, wobei es durch thermische Dissoziation dekarbonisiert wird. Der entweichende Kohlenstoffdioxid entlässt dabei feine Poren im Branntkalk. Das entstehende Produkt ist sehr reaktiv und nicht beständig gegenüber Kohlenstoffdioxid und Wasser, wobei sich respektiv Kalkstein und Kalkhydrat bilden. Abhängig von der Brenntemperatur können die physikalischen

Eigenschaften des Produktes variiert werden, wobei bei niedrigeren Temperaturen (1000 °C) ein sehr poröser Kalk, als Weichbranntkalk bezeichnet, entsteht und höhere Temperaturen (1500 °C) ein dichteres, weniger poröses Produkt, den sogenannten Hartbranntkalk, entstehen lassen. Auch Kalkstein mit Dolomit-Anteilen ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) kann gebrannt werden, wobei die Dekarbonisierung für den Magnesiumanteil schon bei niedrigeren Temperaturen startet. Vor allem bei größeren Korndurchmessern kann es zu einem Temperaturgefälle innerhalb des Kornes kommen, wobei sich verschiedene Schichten mit unterschiedlicher Porosität bilden können. [23]

Für das Brennen des Kalkes kommen verschiedene Ofentypen zum Einsatz. Während größere Anlagen primär Schachtöfen verwenden, kommen außerhalb der Kalkindustrie häufig auch Drehrohrofen zum Einsatz. Der Fokus liegt dabei in dieser Arbeit auf den Schachtöfen von denen in Folge drei kurz vorgestellt werden sollen: [23, 27]

- **Normalschachtofen:** Beim Normalschachtofen handelt es sich um eine Standardbauform des Schachtofens. Der vertikale Reaktor, mit rundem oder rechteckigem Querschnitt, wird von oben mit dem Ausgangsmaterial und festem Brennstoff beschickt, während die Verbrennungsluft im Gegenstrom vom unteren Ende des Schachtes eingeblasen wird. Kommen flüssige oder gasförmige Brennstoffe zum Einsatz, werden diese zentral über Brenner in den Ofen eingebracht. Im Ofen werden drei Zonen unterschieden. Am oberen Ofenanfang befindet sich die Vorwärmzone, in der der Ofeninput durch die Verbrennungsgase auf etwa 900 °C vorgewärmt wird. Im mittleren Bereich, der Verbrennungszone, werden durch die Verbrennung der Brennstoffe die höchsten Temperaturen erreicht, wodurch in dieser Zone auch die Umwandlung des Kalksteins erfolgt. Am unteren Ende befindet sich die Kühlzone, in welcher der gebrannte Kalk durch die eintretende Luft auf etwa 100 °C gekühlt wird, wodurch umgekehrt die Verbrennungsluft auf ca. 900 °C vorgewärmt wird. Normalschachtöfen eignen sich besonders gut für die Herstellung von hartem Kalk.
- **Ringschachtofen:** Der namensgebende Ring des Ringschachtofens wird durch einen im Ofen stehenden oder hängenden Zylinder gebildet. Innerhalb des Ringspaltes wird der feste Materialstrom geführt. Der zumeist gasförmige oder flüssige Brennstoffeintrag erfolgt seitlich, wobei die Brennkammern an den gegenüberliegenden Seiten versetzt, auf einer Seite am oberen und auf der anderen am unteren Ende, der Brennzone angebracht sind. Ein Teil des Abgases wird in den inneren Zylinder angesogen, umströmt dabei den äußeren Ring und wird anschließend wieder in den unteren Bereich rezirkuliert. Im Ringschachtofen lässt

sich innerhalb der Brennzone eine sehr homogene Temperaturverteilung einstellen, wodurch sich dieser Ofentyp besonders gut für weich gebrannten Kalk eignet.

- **GGR-Ofen:** der Gleichstrom-Gegenstrom-Regenerativofen besteht aus mindestens zwei Schächten, die oberhalb der Kühlzone mit einem Überstromkanal miteinander verbunden sind. Die Besonderheit dieses Ofens ist das beide Schächte gleichzeitig betrieben werden, einer im Gleichstrom der andere im Gegenstrom. Die Verweilzeit des festen Materials im Ofen ist dabei sehr hoch, wobei Weichbranntkalk durchschnittlich 24 h und Hartbranntkalk bis zu 36 h im Ofen verbleibt. Während des Betriebes wird immer nur die Gleichstromseite befeuert, in der anderen Seite wird lediglich der heiße Abgasstrom über den Überstromkanal angesogen und der Inputstrom erwärmt. Ein Wechsel der Betriebsweisen wird periodisch alle 12 – 20 Minuten vollzogen. Während der Umstellphase erfolgt auch die Beschickung mit neuem Material, wohingegen der Produktstrom kontinuierlich abgezogen wird. Im Gleichstrombetrieb ist es möglich den Brennstoffeintrag mit Lanzen von oben in den Reaktor einzubringen, wobei der Rohstein die Wärme gut aufnehmen kann und sich ein milder Brand einstellt. Dadurch kann die Produktqualität, insbesondere bei der Herstellung von Weichbranntkalk, verbessert werden. Ein weiterer Vorteil ist die besonders gute Brennstoffausnutzung, wobei das Gestein den Ofen bei 60 – 70 °C und das Abgas bei 70 – 110 °C den Ofen verlässt.

In Abbildung 3 werden der Normalschachtofen und der GGR-Ofen einander gegenübergestellt:

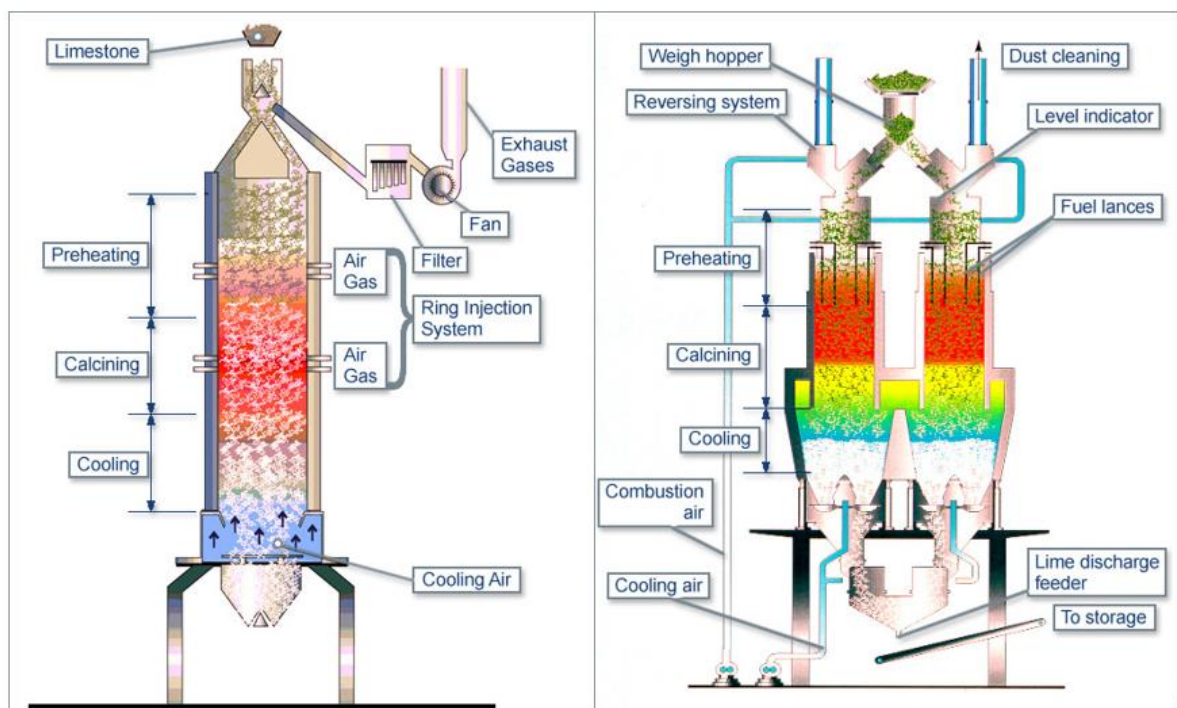


Abbildung 3: Querschnitt eines Normalschachtofens und eines GGR-Ofens [30]

Bei Kalköfen kommen primär konventionelle Brennstoffe zum Einsatz wobei in Österreich hauptsächlich flüssige und gasförmige Brennstoffe wie Heizöl und Erdgas verwendet werden. Der Anteil von Ersatzbrennstoff und Biomasse beim Kalkbrennen lag 2010 EU-weit bei 10 %, wobei in Österreich, Stand 2007, praktisch keine unkonventionellen Brennstoffe beigeheizt wurden.

3.5.3 Chemieindustrie in Österreich

Während die Zement- und Kalkindustrie spezifische Sparten des Stein-, Erde- und Glassektors darstellen, ist die Chemieindustrie ein sehr vielseitiger Sektor. In Österreich zählen zu diesem Sektor über 300 verschiedene Betriebe, wobei er in die Branchen Herstellung von Kunststoffwaren, Pharmazeutika und Chemikalien unterteilt werden kann. In dieser Arbeit werden dabei ausschließlich Unternehmen der Chemie- und Pharmazeutika-Branche betrachtet, die im Folgenden einzeln vorgestellt werden sollen. [31]

3.5.3.1 ESIM Chemicals/Vertellus – Linz

Das österreichische Chemieunternehmen ESIM Chemicals hat 2021 den Geschäftsbereich Intermediates ausgegliedert und in weiterer Folge an das US-amerikanische Unternehmen Vertellus Specialities verkauft. Daten zum Betriebsstandort liegen zum derzeitigen Zeitpunkt nur verknüpft vor, weshalb beide Unternehmen gemeinsam betrachtet werden sollen und die Bezeichnung ESIM Chemicals auch den verkauften Geschäftsbereich mit einbeziehen soll. ESIM Chemicals ist Produzent von Fein- und Grundchemikalien mit Produktionsstandort in Chemiapark Linz und beschäftigt rund 500 Mitarbeiter. Insgesamt 6 Produktionsanlagen sind dem Produktionsstandort zuzuordnen: [32]

- drei Mehrzweckanlagen
- eine Mehrprodukteanlage v.a. zur Veresterung
- eine Produktionsanlage zur Herstellung von Maleinsäureanhydrid und Fumarsäure
- eine Mehrzweckanlage für wässrige Synthesen

Der Chemiapark Linz verfügt über ein werkswieites Dampfleitungsnetz, das gemeinsam von den ansässigen Unternehmen genutzt wird, um Prozesswärme zu beziehen und einspeisen zu können. [32]

3.5.3.2 Metadynea Austria – Krems

Metadynea Austria, ursprünglich als Krems Chemie bekannt, ist Produzent von Leimen, Harzen, Feinchemikalien, Lackrohstoffen und Flammschutzmitteln. Das Unternehmen gibt an mit über 200 Mitarbeitern jährlich eine Produktmenge von in etwa 440.000 Tonnen zu produzieren. [33] Besonders zu hervorheben ist die exotherme Formaldehydproduktion des Unternehmens, die einen Großteil der Energie des Unternehmens bereitstellen soll. Das bei

der Formaldehydproduktion entstehende Schwachgas soll bei der Verbrennung genug Energie liefern um 72 % der Energie des gesamten Industrieparks zu decken. [34] Stand 2001 war die Formaldehydkapazität des Standortes 91.000 t (Reinform), wobei 1998 tatsächlich 83.600 t Formaldehyd produziert wurden. [35]

3.5.3.3 Donau Chemie AG – Pischelsdorf

In einem Industriepark angesiedelt, produziert das Unternehmen Donau Chemie am Standort Pischelsdorf Schwefelsäure. Der Herstellungsprozess ist stark exotherm, wobei durch Verbrennung des Ausgangsstoffes Schwefel, kein CO₂ anfällt. Am Standort gibt es 2 Produktionsanlagen die zusammen eine Kapazität von 240.000 t/a aufweisen und im Regelfall Schwefelsäure mit einer Konzentration von 96 – 98 % produzieren. [36]

Um Schwefelsäure zu erzeugen, wird im ersten Schritt reiner Schwefel bei 140 – 150 °C im flüssigen Zustand mit trockener Luft verbrannt. Die Temperatur des Abgases wird dabei durch Kühlwasser auf 450 °C begrenzt, wobei Dampf mit 400 °C und 40 bar erzeugt wird. Katalysatoren stellen im zweiten Schritt sicher, dass eine möglichst vollständige Umwandlung des im Abgas verbleibenden SO₂ zu SO₃ erfolgt. Ein erster Absorber wäscht SO₃ aus und wandelt es in H₂SO₄ um. Ein dem Absorber vorgeschalteter Wärmeübertrager kühlt das in den Absorber eintretende Gas ab, um das austretende wieder zu erwärmen. Dieser Abgasstrom, der noch rest-SO₂ enthält, wird nochmals über eine Katalysatorstufe zu SO₃ oxidiert und dann im finalen Absorber zu Schwefelsäure umgewandelt. Mit diesem Aufbau können über 99,8 % des Schwefels in Schwefelsäure überführt werden. [36]

3.5.3.4 Atmos Austria – Schwechat

Atmos Austria ist ein Chemieunternehmen, das sich auf die Produktion von Phthalsäureanhydrid (PSA) spezialisiert hat. PSA ist u.a. Ausgangsmaterial für die Herstellung von Weichmachern und Polyesterharzen. [37] Stand 2001 hat die Produktionsanlage eine Kapazität von 50.000 t, mit einem tatsächlichen Output von 40.000 – 47.000 t. Für diese Produktionsmenge werden, als Ausgangsmaterial, zwischen 36.000 – 44.000 t o-Xylol benötigt. [35] Die Umwandlung von o-Xylol zu PSA erfolgt durch partielle Oxidation, wobei höhere Oxidationsstufen zur Bildung von unerwünschten Nebenprodukten führen. [38]

3.5.3.5 Sandoz – Kundl/Schaftenau

Sandoz produziert in Österreich an den Standorten Kundl und Schafteu als Pharmazieunternehmen einerseits Antibiotika und Biosimilars, stellt aber auch biologische Düngemittel auf Pilzmycel Basis her. 2019 wurden in Kundl 4.992 t und in Schafteu 1.056 t Pharmazeutika produziert. Durch die Einstellung einer Produktionslinie ging in Schafteu 2020 die Produktionsmenge jedoch auf 31 t zurück. Die Düngemittelproduktion belief sich

insgesamt auf 13.582 t. Als Energieträger werden hauptsächlich Erdgas und Strom eingesetzt. [39]

4 MODELLBESCHREIBUNG

Eine Abwärmepotenzialerhebung stellt im Wesentlichen eine Energiebilanz dar, bei der ein besonderes Augenmerk auf die Bilanzierung der aus dem Bilanzraum austretenden Wärmeströme gelegt wird. In diesem Kapitel sollen die allgemein getroffenen Annahmen als auch die konkreten Modelle für die betrachteten Branchen, beziehungsweise Unternehmen, dargelegt werden.

4.1 Allgemeine Modell-Annahmen

Um sehr komplexe Prozesse auf möglichst simple Modelle herunterbrechen zu können, die mit limitierten Informationen die energetischen Einflussfaktoren auf die wesentlichsten reduzieren können, müssen einige Vereinfachungen getroffen werden. Eine umfassende Dokumentation gewährleistet die Replizierbarkeit und Überprüfbarkeit der Ergebnisse.

4.1.1 Bilanzrahmen

Die vorgestellten Modelle sollen Verfahren beschreiben, deren Ziel es ist Inputstoffströme durch Energiezufuhr und -Abfuhr einer chemischen Umwandlung zu vollziehen. Der Bilanzzeitraum ist dabei ein Jahr, wobei im Projektrahmen das Jahr 2019 als Referenzjahr dient. Alle betrachteten Systeme werden als stationär angesehen. Die Modelle gehen dabei von einem konstanten Betrieb aus und vernachlässigen jegliche Anfahr- und Abschaltprozesse, sowie Stillstandzeiten. Da alle betrachteten Prozesse der Stoffumwandlung dienen, handelt es sich um offene Systeme, die Materialströme und Energieströme mit ihrer Umgebung austauschen.

Generell können Energieangaben eines Zustandes nur relativ zu einem Referenzzustand angegeben werden. Kinetische Energie und potenzielle Energie brauchen räumliche Referenzpunkte, um beschrieben werden zu können. Bei Enthalpie-Änderungen dienen Referenzdruck und eine Referenztemperatur, um den Referenzzustand festzulegen. [13] Prinzipiell können Referenzpunkte frei festgelegt werden, wobei beim unterschreiten des Referenzzustandes die Energie des Ist-Zustandes hinsichtlich des Referenzzustandes ein negatives Vorzeichen annimmt. Oft wird bei Wärmepotenzialerhebungen als Referenztemperatur die minimale Temperatur, auf die das Wärmeträgermedium abgekühlt werden kann, herangezogen. Die Referenztemperatur wird dabei bei unterschiedlichen Studien unterschiedlich gewählt, wobei in der Literatur zum Beispiel Referenztemperaturen von 0 °C, 35 °C und 100 °C gefunden werden können. [9, 20] Ebenso ist es denkbar die Referenztemperatur auf die Jahresmitteltemperatur festzulegen. Eine zusätzliche Unterteilung in mehrer Temperaturbereiche erlaubt es die Ergebnisse genauer aufzuschlüsseln und exergetisch zu beurteilen. [9]

Im Rahmen des INXS-Projektes wurde die Referenztemperatur auf 0 °C und der Referenzdruck auf 1,013 bar festgelegt, was Normbedingungen entspricht. Eine weitere Unterteilung des Potenzials erfolgt in die Temperaturbereiche 0 – 50 °C, 50 – 100 °C und über 100 °C. Dabei kann der unterste Potenzialbereich wahrscheinlich nur begrenzt genutzt werden und erfordert zumeist die zusätzliche Einbringung von Exergie, beispielsweise mithilfe von Wärmepumpen. Ebenso sind Wärmeabnehmer für diesen Bereich begrenzt verfügbar und zeitlich vor allem auf die Wintermonate beschränkt.

Die Systemgrenzen sollen möglichst so gesetzt werden, dass die energieintensiven Anlagen vollständig abgebildet werden. Die austretenden Wärmeströme sollten dabei nur bis hin zur Übertragung auf ein geeignetes Wärmeträgermedium berücksichtigt werden. Verluste bei der weiteren Verteilung oder Umwandlung werden hingegen vernachlässigt.

4.1.2 Wärmeübertragung, Wärmeverluste und Wärmeverteilung

Die in dieser Arbeit beschriebenen Modelle rechnen mit einem stark vereinfachten Wärmeverlustmodell. Anstatt, wie in 3.2.1 kurz beschrieben, die Wärmeverluste für Wärmeleitung, -Konvektion und -Strahlung explizit zu berechnen, werden Verluste über Wirkungsgrade abgeschätzt. Zusätzlich wird das technische Wärmepotenzial durch die Grädigkeit der Wärmeübertrager herabgesetzt. Die Grädigkeit stellt dabei die Temperaturdifferenz zwischen dem erwärmten und abgekühlten Wärmestrom dar. Die Reduktion der Grädigkeit ist vor allem eine ökonomische Frage und kann über die Größe des Wärmeübertragers gesteuert werden. Größere Anlagen verringern die Grädigkeit, ziehen aber steigende Kosten mit sich.

In dieser Arbeit wird von einem Wärmeverlust bedingten Wirkungsgrad von 90 % ausgegangen. Dieser Wert soll die Verluste beim Transport des Wärmeträgermediums und beim Prozess der Wärmeübertragung berücksichtigen. Nicht berücksichtigt in diesem Wert wird der Temperaturunterschied zwischen der Endtemperatur des erwärmten und abgekühlten Wärmeträgermediums. Dieser wird über Grädigkeit dargestellt, welche in dieser Arbeit in der Regel mit 20 K angesetzt wird. Bei hoher Staubbelastung kann die Wärmeübertragung durch Anlagerungen im Wärmeübertrager reduziert werden, weswegen mit einem ΔT von 40 K gerechnet wird. Wärme die an Wasser gebunden vorliegt, ist per in dieser Arbeit verwendeten Definition des technischen Abwärmepotenzials, direkt nutzbar, wodurch von keiner Temperaturreduktion ausgegangen wird.

Stoffbezogene Werte wie Wärmekapazitäten, Kondensationsenthalpien etc. sind in der Regel temperaturabhängig. Während für die Kondensationsenthalpie Kondensationsbedingungen festgelegt werden können, für die es eindeutig zuordenbare Werte gibt, ändert sich die Wärmekapazität über den gesamten Abkühlungsbereich. Die

Temperaturabhängigkeit kann dabei für eine Phase eines Stoffes mithilfe von Polynomen höherer Ordnung beschrieben werden, wobei sie über einen Teil des Temperaturbereichs oft auch linear angenähert werden kann. [17] Beispielsweise kann für die Berechnung der Wärmekapazität von Stickstoff die in (4-1) zu sehende empirische Formel verwendet werden: [40]

$$C_p = A + B * t + C * t^2 + D * t^3 \quad (4-1)$$

Die Konstanten A – E nehmen dabei im Temperaturbereich 100 – 500 K die in Tabelle 3 aufgelisteten Werte an:

Tabelle 3: Konstanten zur Berechnung der Wärmekapazität von Stickstoff [40]

A	28,98641
B	1,853978
C	-9,647459
D	16,63537
E	0,000117

Graphisch dargestellt ergibt sich der in Abbildung 4 dargestellte Temperaturverlauf:

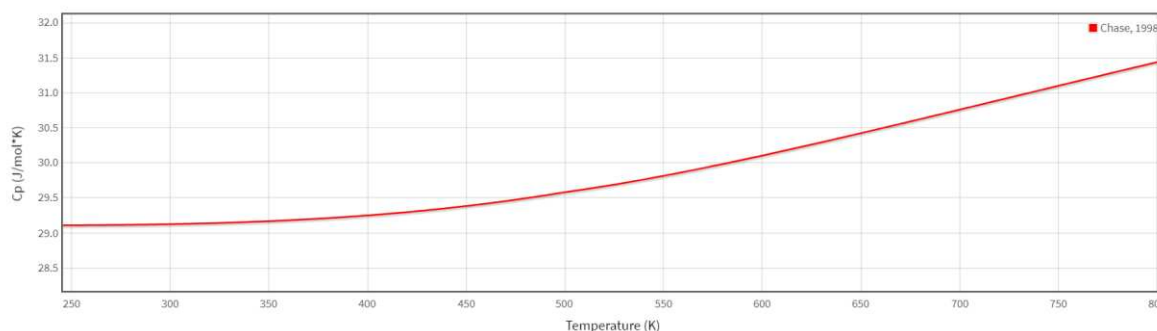


Abbildung 4: Temperaturverlauf der Wärmekapazität von Stickstoff im Temperaturbereich 250 – 800 K [40]

Dabei lässt sich ein zunächst langsamer Anstieg der Wärmekapazität im unteren Temperaturbereich erkennen, der progressiv zunimmt, bis sich im oberen Temperaturbereich ein nahezu lineares Wachstum abzeichnet. Für diese Arbeit ist primär der Temperaturbereich von ca. 300 – 600 K relevant, wobei sich die Werte mit 29,12 J/molK und 30,10 J/molK um einen Faktor von etwa 1,03 unterscheiden. [40] Stickstoff ist der Hauptbestandteil der Verbrennungsluft und somit auch der überwiegende Bestandteil von Abgasen und bestimmt deshalb auch zu einem großen Teil die Wärmekapazität von diesen.

Die Änderung der Wärmekapazität wird dabei für die Genauigkeit dieser Arbeit, den betrachteten Stoffen im relevanten Temperaturbereich als vernachlässigbar eingestuft. Stattdessen werden in dieser Arbeit für die Wärmekapazität Mittelwerte herangezogen und die Wärme auf den gesamten Temperaturbereich gleichmäßig verteilt.

4.2 Beschreibung der Modelle

Dieses Kapitel soll genauer auf die einzelnen Modelle der unterschiedlichen Branchen eingehen und die getroffenen Prozessparameter darlegen. Werden dabei Werte in Tabellen präsentiert wird die in Tabelle 4 zu sehende Farbcodierung verwendet:

Tabelle 4: Legende

Eingabefelder
Stoffwerte und angenommene Prozessparameter
Vergleichswert

Die Eingabefelder sollen die Produktivität eines Unternehmens widerspiegeln und stellen in dieser Arbeit CO₂-Emissionen oder Produktmengen dar. Mit grüner Farbe werden Stoffparameter, wie z.B.: Reaktionsenthalpien oder Wärmekapazitäten, und prozessspezifische Parameter, wie produktspezifische Emissionen, markiert. Diese stellen keine spezifischen Messwerte der einzelnen Anlagen dar, sondern Durchschnittswerte, die in der Literatur gefunden werden. Vergleichswerte werden für die eigentlichen Berechnungen nicht verwendet und dienen primär der Kontrolle der Ergebnisse. Nicht farblich markierte Werte werden aus der Verknüpfung der Werte der Eingabefelder, mit denen der Stoffwerte und Prozessparameter, errechnet.

4.2.1 Modelle der Zementindustrie

Während spezifische Energie- und Umweltdaten für die österreichischen Zementwerke nur sehr eingeschränkt vorhanden sind, wird jährlich ein umfassender Bericht veröffentlicht, der u.a. aggregierte Absolutwerte und Durchschnittswerte zu den Emissionen und zum Brennstoff- und Energieeinsatz der gesamten Branche am Standort Österreich liefert. Ausgehend vom Bericht des Jahres 2020 *Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie* [24] und einem Wärmeflussdiagramm [41], wurde ein Rechenmodell erstellt das versucht die Abwärmeströme eines durchschnittlichen österreichischen Zementwerkes möglichst genau abzubilden. Vereinfacht wurde dieses Modell auf alle Zementwerke angewendet, wobei das Abwärmepotenzial in Abhängigkeit von den erfassten CO₂-Emissionen abgeschätzt wurde.

Tabelle 5: Energiespezifische Prozessparameter der Zementklinker-Herstellung [24]

Durchschnittlicher Emissionsfaktor	82,4	kgCO ₂ /GJ
Spez. Kohlenstoffemissionen	0,846	tCO ₂ /t Klinker
CO₂-Anteil neutraler Brennstoffe	0,084	
CO₂-Anteil Verbrennung	0,388	

In Tabelle 5 sind alle Parameter aufgelistet, die verwendet wurden, um den Energiebedarf der österreichischen Zementwerke und deren Klinker-Output für das Jahr 2019 abzuschätzen. In Tabelle 6 sind die Ergebnisse am Beispiel von Rohrdorfer Zement angeführt:

Tabelle 6: Beispielhafte Berechnung des Energieeinsatzes und Klinkeroutput für Rohrdorfer Zement [25]

CO₂ 2019 gesamt	276.447,4	t CO ₂ /a	CO₂ aus Verbrennung	107.214,9	t CO ₂ /a
Energieeinsatz	1.301.151,7	GJ/a		361,4	GWh/a
Klinker-Output	326.770,0	t Klinker/a		37,3	t/h
Kapazität-Zement	540.000	t Zem/a	Zement-Outp. berechnet	466.814,2	t Zem/a

Die CO₂-Emissionen wurden aus dem Emissionshandelsregister des europäischen Emissionshandelssystem für das Jahr 2019 entnommen. [42] Da diese nicht den CO₂-Anteil biogener Brennstoffe enthält, musste der Faktor der emissionsneutralen, biogenen Brennstoffe berücksichtigt werden:

$$CO_{2,gesamt} = \frac{CO_{2,ETS}}{1 - 0,084} \quad (4-2)$$

Während sich die spezifischen Kohlenstoffemissionen pro Tonnen Klinker auf die Gesamtemissionen beziehen, ist der Emissionsfaktor pro GJ auf die brennstoffbezogenen Emissionen anzuwenden. Deshalb müssen die Gesamtemissionen mit dem Faktor 38,8 % multipliziert werden, um den Energieeinsatz des betrachteten Zementunternehmens abschätzen zu können.

Die Wärmebilanz baut auf ein Wärmeflussdiagramm auf, das den Unterlagen der Vorlesung „Thermische Verfahrenstechnik in der Bindemittel- und Baustoffindustrie“ [41] der Montanuniversität entnommen wurde. Diese ist in Abbildung 5 graphisch dargestellt, wobei für diese Arbeit besonders die aus dem Bilanzraum ein- und austretenden Wärmeströme relevant sind. Innerhalb der Prozessblöcke deuten positive Vorzeichen auf endotherme und negative Vorzeichen auf exotherme Prozesse hin. Die vollen Pfeile stellen die feststoffgebundenen, die strichlierten die gasstromgebundenen, die roten die diffusen und die grünen die eintretenden Wärmeströme dar.

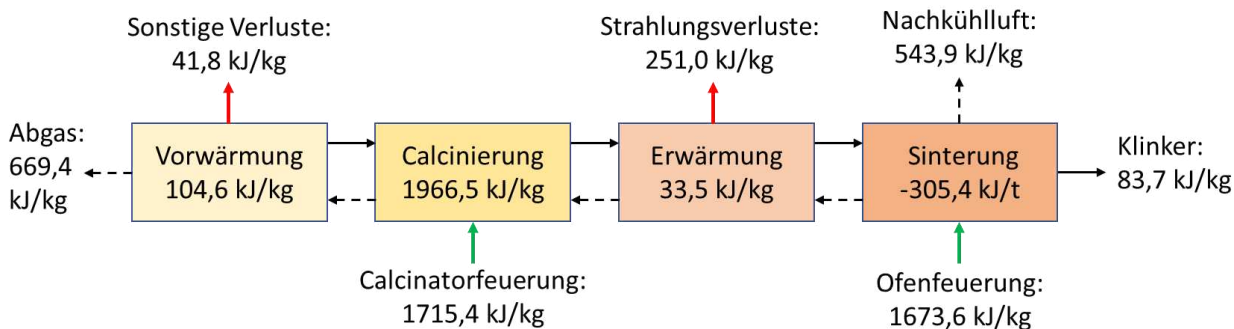


Abbildung 5: Allgemeine Wärmebilanz eines Zementwerkes pro Tonnen Klinker [41]

Mit einem Brennstoff-Input von 3389 kJ/kg ist dieser in der Bilanz deutlich geringer als der durchschnittliche Input der österreichischen Anlagen von 3983 kJ/kg. [24, 41] Wenn davon ausgegangen wird, dass die Reaktionsbilanz mehr oder weniger ident ausfällt, müssen die Wärmeverluste der realen Anlagen größer sein. Um den höheren Energieeintrag pro Klinker zumindest teilweise zu berücksichtigen, wurden die austretenden Wärmeströme auf den Brennstoff-Input der Bilanz bezogen, wobei sich die in Tabelle 7 zu sehende prozentuelle Verteilung ergibt:

Tabelle 7: Austretende Wärmeströme im Verhältnis zum Brennstoff-Input [41]

Abgas	19,8%
Nachkühlluft	16,0%
Klinker	2,5%
Strahlungsverluste	7,4%

Ein Teil der Abwärme wird bereits intern zur Trocknung und Vorwärmung des Inputmaterials beziehungsweise des Brennstoffes verwendet. Laut einer Studie der Vereinigung der österreichischen Zementwerke werden dabei 53 % des nutzbaren Abwärmepotenzials bereits genutzt. Als nutzbar gilt hier Abwärme über 100 °C aus den Wärmeströmen Abgas und Abkühlluft. [20] Dabei verlässt der Abgasstrom, nach der Kalzination und Vorwärmung des Ausgangsmaterials, und die Kühlluft den Prozess mit etwa 300 °C. [27] Nach weiteren internen Nutzung von 53 % der Wärme über 100 °C werden die beiden Ströme schlussendlich mit einer Temperatur von etwa 200 °C emittiert. [20] Zur Berechnung des theoretischen Potenzials wurden die in den Strömen enthaltene Wärme ausgehend von einer maximalen Temperatur von 300 °C anteilmäßig auf alle Temperaturbereiche verteilt und anschließend von der intern genutzten Wärme im Temperaturbereich über 100 °C abgezogen. Für die Berechnung des technischen Potenzials wurde für die Verteilung der Wärme nur mehr von einer Temperatur von 200 °C ausgegangen. Aufgrund der Staubbelastung wurde für alle Wärmeströme außer der Strahlungswärme von einer Grädigkeit von 40 °C ausgegangen.

Die Rückgewinnung der Strahlungswärme bei Drehrohröfen ist derzeit nicht Stand der Technik. Eine Möglichkeit Strahlungs- und konvektive Wärmeverluste zu reduzieren, ist es, den Drehrohröfen mit einem zweiten Mantel zu umhüllen, wobei in den Zwischenspalt Kühlluft geleitet wird. Die Wärme soll dabei auf einem Temperaturniveau von etwa 300 °C rückgewonnen werden können, ohne den Prozess zu beeinflussen. [43] Dabei ist davon auszugehen, dass es weder technisch noch ökonomisch möglich ist den gesamten Reaktor zu umhüllen, diese Arbeit nimmt an maximal 40 % der Verluste rückgewinnen zu können.

4.2.2 Modelle der Kalk-Industrie

In der Kalk-Industrie kommen unterschiedliche Ofen-Typen zum Einsatz, die sehr unterschiedliche Wirkungsgrade aufweisen können. Deshalb wurden für diese Sparte zwei Modelltypen entworfen, eines für die effizienten GGR-Öfen und ein weiteres für die restlichen, tendenziell ineffizienteren Öfen. Die Daten bauen dabei primär auf das *Best Available Techniques (BAT)* Dokument für die Zement-, Kalk- und Magnesiumindustrie [27] und dem *Stand der Technik zur Kalk-, Gips und Magnesiaherstellung* Dokument des österreichischen Umweltbundesamt [23] auf. Hierbei wird die Energiebilanz ebenfalls ausgehend von den CO₂-Emissionen berechnet, wobei angenommen wird, dass primär CH₄ als Brennstoff eingesetzt wird. Ausgenommen sind die Standorte Steyerling und Peggau deren Energieeinsatz in Umweltberichten veröffentlicht wurde. [44, 45] Die in Tabelle 8 zu sehenden Werte wurden zur Ermittlung des Energieeinsatzes eingesetzt:

Tabelle 8: Energiespezifische Prozessparameter der Kalk-Industrie [23, 27, 46]

Spez. Kohlenstoffemissionen (Prozess) [27]	0,785	tCO ₂ /tCaO
Spez. CO₂-Emissionen Erdgas [46]	0,0556	tCO ₂ /GJ
Heizwert Erdgas [46]	36,80	MJ/Nm ³
kg CO₂/Nm³-Erdgas	2,05	kgCO ₂ /Nm ³ -EG
GGR-Öfen		
Spez. Energieaufwand Branntkalk [23]	3.650	MJ/tCaO
Spez. Kohlenstoffemissionen d. Verbrennung	0,20	tCO ₂ /tCaO
CO₂-Anteil-Verbrennung	20,54	%
Sonstige Öfen		
Spez. Energieaufwand Branntkalk [23]	4.450	MJ/tCaO
Spez. Kohlenstoffemissionen d. Verbrennung	0,25	tCO ₂ /tCaO
CO₂-Anteil-Verbrennung	23,97	%

Beim spezifischen Energieaufwand für Branntkalk wurden dabei zwei Werte verwendet, einer für GGR-Öfen und ein zweiter für alle andere Ofentypen. Die verwendeten Energieaufwände stellen dabei den Median von Intervallen dar, wobei bei den GGR-Öfen die Spannweite gering ausfällt. Die restlichen Öfen weisen mit einem Intervall von 3.800 – 5.100 MJ/tCaO eine deutliche Schwankungsbreite auf. [46] Dabei können mit den

verfügbaren Informationen keine Schlüsse über den tatsächlichen Mittelwert dieser Anlagen getroffen werden. Aufgrund des unterschiedlichen Energieaufwandes weisen die beiden Modelle auch unterschiedliche verbrennungsbedingte Emissionen und CO₂-Anteile auf. Die spezifischen Kohlenstoffemissionen der Verbrennung ergeben sich dabei durch Division der spezifischen Emissionen des Brennstoffes durch den spezifischen Energieaufwand der Branntkalk-Herstellung. Der CO₂-Anteil der Verbrennung ist schlussendlich der Quotient aus verbrennungsbedingten und prozessbedingten Emissionen.

Mithilfe dieser Werte wurden der Energieeinsatz, der Kalk-Output und der Volumenstrom des eingesetzten Erdgases für die einzelnen Standorte berechnet. Beispielsweise sind diese Berechnungen für den Standort Wopfung in Tabelle 9 angeführt:

Tabelle 9: Beispielhafte Berechnung des Energieeinsatzes und Branntkalk-Output für das Kalkwerk Wopfung [25]

CO2 Verified 2019	138.751	t CO ₂ /a	CO2 (Verbrennung)	28.501	t CO ₂ /a
Energieeinsatz	512.623	GJ/a		142,40	GWh/a
Kalk-Output	140.445	t CaO/a			
Kapazität-Kalk	182.500	t Branntkalk/a	Auslastung	77%	
V-Erdgas	13.929.983	Nm ³ -EG/a			

Aus dem Bilanzraum Kalkbrennofen treten zwei stoffgebundene Wärmeströme aus, ein am Abgas und ein am Produktstrom gebundener Wärmestrom. Um den Energieinhalt dieser Ströme zu berechnen, wurden dem BAT-Dokument der Zementindustrie typische Durchschnittstemperaturen für die Ströme eines GGR-Ofens entnommen. Dabei soll der Abgasstrom den Reaktor mit Temperaturen von 60 – 80 °C und der Kalkstrom mit unter 100 °C verlassen. [27] Simulationsergebnisse einer deutschen Forschungsstudie berechnen in ihrem Standardmodell Abgastemperaturen von 103 °C und Kalkstromtemperaturen von 82 °C. Für Normalschachtöfen werden Abgastemperaturen von 328 °C und Kalkstromtemperaturen von 80 °C angegeben. [47] Für die Modelle dieser Arbeit wurden vereinfacht für GGR-Öfen sowohl die Abgastemperatur als auch die Kalkstromtemperatur auf 80 °C festgelegt. Für die restlichen Öfen wurde die Abgastemperatur auf 295 °C und die Kalkstromtemperatur ebenfalls auf 80 °C festgesetzt. Die Abgastemperatur der restlichen Öfen wurde dabei aus dem berechneten Wirkungsgrad der GGR-Öfen und dem Vergleich des spezifischen Energieaufwand der Ofentypen approximiert.

Um schlussendlich den Energieinhalt der Ströme abschätzen zu können wurde über eine Verbrennungsrechnung die Zusammensetzung des Abgasstromes abgeschätzt. Die Verbrennung des Erdgases soll dabei mit einem Sauerstoffüberschuss von 3 % erfolgen. Aus einer Faustformelsammlung der SAACKE Gruppe [48], einem Feuerungstechnikhersteller, wurden für hochkalorisches Erdgas (Erdgas H), bei stöchiometrischer Verbrennung im

Normzustand, die Volumenverhältnisse zwischen Brennstoff, Abgas und Verbrennungsluft entnommen. Die Werte sind in Tabelle 10 zu sehen:

Tabelle 10: Volumenverhältnisse Erdgas H [48]

$V_{a,f}$ [m ³ /m ³]	10,47
$V_{a,tr}$ [m ³ /m ³]	8,53
V_{H2O} [m ³ /m ³]	1,94
V_i [m ³ /m ³]	9,47

Beim Abgasvolumen kann durch das Bilden der Differenz das Volumen des im Abgas enthaltenen Wasserdampf berechnet werden. Um diese Volumenverhältnisse an den geforderten Sauerstoffgehalt anzupassen, wurde das Brennluftvolumen mit dem Verbrennungsluftverhältnis multipliziert. Das Verbrennungsluftverhältnis berechnet sich dabei für einen Sauerstoffüberschuss von 3 %, bei einem Sauerstoffgehalt der Brennluft von 21 % durch folgende Formel:

$$\lambda = 1 + \frac{3}{21 - 3} \cdot \frac{V_{a,tr}}{V_i} \tag{4-3}$$

Um die Volumenströme in Massenströme umwandeln zu können, wurden die in Tabelle 11 angeführten, idealisierte Zusammensetzungen für das Abgas und die Verbrennungsluft herangezogen:

Tabelle 11: Idealisierte Gaszusammensetzungen

Abgaszusammensetzung		Luftzusammensetzung	
N₂	0,85	N₂	0,79
CO₂	0,12	O₂	0,21
O₂	0,03		

Das ideale Gasvolumen das bei Normalbedingungen 22,414 dm³/mol entspricht und die molaren Massen von Stickstoff, Sauerstoff, Kohlenstoffdioxid und Wasser erlauben eine Umwandlung der Volumenströme in Massenströme. [13] Die Wärmekapazität des Abgases wird wie in *Brückners* „Industrielle Abwärme in Deutschland“ konstant mit 1,007 kJ/kgK angenommen. [9] Für den Branntkalk wurde die mittlere Wärmekapazität von CaO im Temperaturintervall [20 °C; 80 °C] aus der HSC-Datenbank mit rund 0,766 kJ/kgK bestimmt. [49]

Bei Abkühlung des Abgases kommt es zur Kondensation der im Abgas enthaltenen Feuchtigkeit. Im Gleichgewichtszustand entspricht dabei die im Abgas verbleibende spezifische Luftfeuchtigkeit x [kg_{H2O}/kg_{Gas}] der Sättigungsfeuchtigkeit s , welche bei

Normalbedingungen einen Wert von 0,015 kg/kg aufweist. [50] Da in diesem Modell die Kondensationswärme berücksichtigt werden soll, muss bei der Berechnung der Kondensationswärme die Sättigungsfeuchtigkeit vom gesamten Wassergehalt abgezogen werden.

Die Abschätzung des theoretischen Potenzials erfolgt in drei Schritten:

- Berechnung der Kondensationswärme im Abgasstrom
- Berechnung der sensiblen Wärme des Abgasstroms
- Berechnung der sensiblen Wärme des Produktstroms

Für die Kondensationswärme wurde davon ausgegangen, dass diese bei einem Temperaturniveau von unter 50 °C auf ein Wärmeträgermedium übertragen wird und ergibt sich aus Multiplikation der kondensierten Wassermenge mit der Kondensationswärme des Wassers. Bei der Berechnung der sensiblen Wärme des Abgases wurden die Abgasmenge des Verbrennungsprozesses, das durch die Entsäuerung entstehende CO₂ und auch der Kühlluftstrom der Kühlzone berücksichtigt. Für die Ermittlung der Kühlluft wurde eine Kalktemperatur von 900 °C in der Kühlzone angenommen, wobei der Kühlluftstrom selbst auch auf knapp 900 °C erwärmt wird. [23] Der Kühlluftstrom startet mit einer Temperatur von 20 °C und kühlt den Kalk dabei auf 80 °C ab. Dabei ergibt sich der Massenstrom der Luft durch die Division des Wärmestroms des Kalkes mit dem Produkt aus Temperaturdifferenz und Wärmekapazität der Luft. Das gesamte theoretische Potenzial des Abgases berechnet sich durch Multiplikation aller drei Ströme mit der mittleren Wärmekapazität des Abgases und der Temperaturdifferenz zwischen Austrittstemperatur und Endtemperatur der verwendeten Ofentechnologie. Zur Berechnung des Wärmepotenzials des Nachkühlluftstroms wird davon ausgegangen, dass der Kalkstrom noch weiter von 80 °C auf 20 °C abgekühlt werden kann. Dabei wird idealisiert angenommen, dass die Wärme vollständig auf den Kühlluftstrom übertragen werden kann und dieser dabei auf 80 °C erhitzt wird.

Für die Berechnung des technischen Potenzials wurde wie in 4.1.2 beschrieben die Abwärme um einen Faktor von 0,9 reduziert und zusätzlich um die Grädigkeit vermindert. Von einer höheren Grädigkeit von 40 °C wird dabei bei der Nachkühlluft ausgegangen, da diese stärker mit Staub belastet sein könnte.

4.2.3 Modelle der Chemie-Industrie

Die Vielschichtigkeit des Chemiesektors macht es schwierig eine Wärmebilanz auf Basis eines prozessspezifischen Modells aufzubauen. Um dennoch an verwertbare Schätzwerte zu gelangen wurde versucht die mittleren Potenziale des Chemiesektors aus *Brückners*

Dissertation „Industrielle Abwärme in Deutschland“ [9] und der Enova Potenzialstudie [18] an die Rahmenbedingungen des INXS-Projektes und dieser Masterarbeit anzupassen.

Brückner weist in ihrer Arbeit für den Sektor „Herstellung von chemischen Erzeugnissen“ einen Abwärmefaktor von 0,09 aus, wobei sich der Wert auf den Brennstoffeinsatz bezieht. Als Referenztemperatur wurden in jener Arbeit 35 °C herangezogen, wobei innerhalb der Studie im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse sowohl ein Gesamtpotenzial für 35 °C und 0 °C angegeben wird. Die Ergebnisse der beiden Potenziale unterscheiden sich dabei um einen Faktor von 1,35. Wie in 3.4.4 beschrieben, wird dabei nur die im Abgas verbleibende Abwärme berücksichtigt und die an Kühlwasserströme gebundene Abwärme vernachlässigt. Da im INXS-Projekt versucht wird möglichst alle Abwärmequellen zu erfassen, sind Brückners Abwärmefaktoren für diese Arbeit nur eingeschränkt verwertbar. Deshalb soll in dieser Masterarbeit der an die Referenztemperatur angepasste Abwärmefaktor 0,12 primär als Vergleichswert eingesetzt werden. [9]

Die Enova Potenzialstudie aus dem Jahr 2009 schlüsselt ihre Ergebnisse für den Chemiesektor sowohl nach Art der Abwärmeströme als auch nach Temperaturniveau auf. Dabei werden beide Kategorien getrennt betrachtet. Die Referenztemperatur der Studie liegt ebenfalls bei 0 °C, jedoch wurden sämtliche Wärmeströme die mit einer Temperatur unter 25 °C anfallen vernachlässigt. In der Studie sollen nur Wärmeströme berücksichtigt worden sein, die weder extern noch intern genutzt werden. In folgende Medien wurde unterteilt: [18]

- **Wasser:** 139 % der Wärme liegt in Kühlwasserströmen im flüssigen Zustand vor
- **Dampf:** weitere 10 % liegen als Wasserdampf vor
- **Abgas:** 8 % der Wärme verbleibt im Abgas

Der Bezug für diese Abwärmefaktoren ist ebenfalls der Brennstoffeinsatz. Als Brennstoff werden chemische Energieträger gezählt die vollständig umgesetzt werden. Chemische Energieträger, die hingegen nur teilweise oxidiert werden und zur Bildung der Produkte beitragen, bleiben unberücksichtigt, wodurch stark exotherme Reaktionen zu Abwärmefaktoren über 100 % führen können. Die Temperaturverteilung wird in Abbildung 6 für vier Temperaturbereiche graphisch dargestellt. Dabei werden alle Wärmeströme mit Austrittstemperaturen, die innerhalb dieser Bereiche liegen aggregiert. Das Wärmepotenzial des Temperaturbereichs ist folglich das gesamte Wärmepotenzial der Summenströme hinsichtlich der Referenztemperatur von 0 °C. [18]

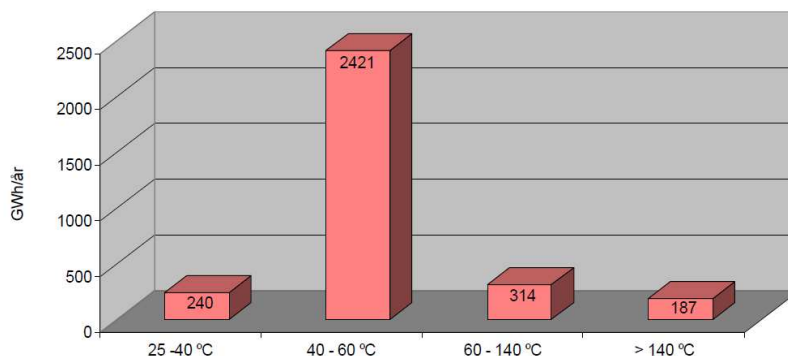


Abbildung 6: Temperaturverteilung der Abwärmepotenziale im chemischen Sektor der Enova-Studie

Dabei ist zu sehen, dass ein großer Teil der Abwärme niederexergetisch im Temperaturbereich 40 – 60 °C anfällt. Damit jene Verteilung in dieser Masterarbeit zur Anwendung kommen kann, müssen sowohl die Wahl der Temperaturbereiche als auch die Verteilung der Wärme innerhalb dieser verändert werden. Da es bei der Übertragung und Umwandlung der Wärme zur Abkühlung der Ströme kommt, kann nicht die gesamte Wärme im angegebenen Temperaturbereich genutzt werden, sondern muss anteilmäßig an die niedrigeren Bereiche verteilt werden. Die Anpassung der Temperaturverteilung für die in dieser Arbeit geforderten Temperaturbereiche sind dabei in Tabelle 12 zu sehen.

Tabelle 12: Anpassung der Temperaturverteilung der Enova Potenzialstudie [18]

Tmax [°C]	Austritts Temperatur [°C]	Potenzial Austritt [GWh/a]	Tech. Pot. Austritt [GWh/a]	Temp.-Bereich [°C]	Potenzial gleichverteilt		Tech. Pot. gleichverteilt	
250	> 140	187	155	> 100	202	6%	148	5%
140	60 - 140	314	262	50 - 100	553	17%	498	18%
60	40 - 60	2421	2179	0 - 50	2407	76%	2166	77%
40	25 - 40	240	216					
Sum		3162	2812,2		3162	100%	2812	100%

Da bei dem oberen Temperaturintervall keine maximale Temperatur angegeben ist, wurde für dieses eine mittlere obere Temperatur von 250 °C angenommen. Stark vereinfacht wurde von einer in allen Temperaturbereichen konstanten Wärmekapazität ausgegangen und keine potenziellen Phasenübergänge berücksichtigt. Mit diesen Annahmen wurden die Potenziale anteilmäßig auf die Temperaturbereiche aufgeteilt und anschließend durch das Gesamtpotenzial dividiert. Für die Berechnung der Verteilung des technischen Potenzials, wurde davon ausgegangen, dass bei der Wärmeverteilung- und Übertragung 10 % der Energie verloren gehen. Bei den heißeren Wärmeströmen wurde zusätzlich angenommen, dass diese auf einen weiteren Wärmeträger übertragen werden müssen, während die im Kühlwasser gespeicherte Wärme direkt genutzt werden kann. Deshalb wurde für die Wärmeströme in den Temperaturbereichen über 140 °C und von 60 – 140 °C respektiv eine

Grädigkeit von 20 °C und 10 °C angenommen. Da das Wärmepotenzial jedoch primär durch die unteren Temperaturbereiche bestimmt wird, haben diese Annahmen kaum Auswirkung auf das Gesamtpotenzial.

Sowohl *Brückner [9]* als auch die Enova Potenzialstudie [18] beziehen ihre Abwärmefaktoren auf den eingesetzten Brennstoff. Der Gesamtenergieeinsatz wird in der Chemiebranche jedoch häufig durch exotherme Reaktionen entlang der Umwandlungskette der chemischen Produkte bestimmt. Einige Unternehmen sind aufgrund der hohen Prozessabwärme Energieexporteure und liefern Prozesswärme an umliegende Unternehmen oder wandeln diese sogar in Dampfkraftwerken zu Strom um. Donau Chemie Pischelsdorf kommt beispielsweise praktisch ohne konventionelle Brennstoffe aus, da bei der Verbrennung von Schwefel genügend Wärme frei wird, um 45 – 48 GWh Strom zu erzeugen. Das Abwärmepotenzial kann somit nicht vom Brennstoffverbrauch abhängig gemacht werden, sondern höchstens anhand des Gesamtenergieverbrauchs beziehungsweise am thermischen Energiebedarf bestimmt werden. In dieser Masterarbeit wird dabei der elektrische Energiebedarf vernachlässigt, da dieser bei vielen Unternehmen unbestimmbar ist und es zusätzlich stark prozessabhängig ist, ob die entstehende Abwärme gebündelt und auf einem nutzbaren Energieniveau anfällt oder diffus an die Umgebung abgegeben wird. Als thermischer Energiebedarf wird in dieser Arbeit die gesamte in den Prozess eingebrachte chemische Enthalpie verstanden, die sowohl die Enthalpie der Brennstoffe, als auch die exotherme Umwandlungsenthalpie der Ausgangsstoffe beinhaltet.

Zunächst wurden die Abwärmefaktoren der Enova Studie [18] auf jene Unternehmen angewendet, bei denen sowohl ein Brennstoffeinsatz als auch ein thermischer Energieeinsatz abgeschätzt werden konnte. Die berechneten Potenziale wurden daraufhin mit dem chemischen Energieeinsatz ins Verhältnis gesetzt. Um einen einheitlichen Potenzialfaktor zu erhalten, der unabhängig vom Brennstoffeinsatz auf ein Unternehmen angewendet werden kann, wurden die einzelnen Potenzialfaktoren addiert und gemittelt. Diese Methodik geht davon aus, dass die in dieser Arbeit betrachteten Unternehmen im Mittel ein ähnliches Verhältnis zwischen Brennstoffeinsatz und thermischen Energieverbrauch besitzen und ist somit mit großer Unsicherheit behaftet. Außerdem wird angenommen, dass die betrachteten Unternehmen ein ähnliches Abwärmenutzungs-Profil aufweisen. Auch der Brennstoff- und Energieeinsatz konnte in vielen Fällen nur näherungsweise bestimmt werden. Die genaue Vorgehensweise soll dabei für die betrachteten Unternehmen einzeln betrachtet werden.

4.2.3.1 *Metadynea Austria*

Während es keine Umwelt- oder Energieberichte gibt, die den Energieeinsatz der Metadynea Austria GmbH beschreiben, gibt es öffentliche Informationen zur Formaldehydproduktion

dieses Standortes. Formaldehyd ist zwar nicht das einzige Produkt im Portfolio von Metadynea, der Herstellungsprozess ist jedoch stark exotherm und bestimmend für den thermischen Energieeinsatz des Unternehmens. Das Ausgangsmaterial bei der Formaldehyd-Produktion ist Methanol, wobei im Jahr 1998 mit 102.000 t Methanol 83.600 t Formaldehyd produziert wurden, wobei das einer Kapazitätsauslastung von 92 % entspricht. Die Reaktionsgleichung, bei deren exothermen Reaktion eine Enthalpie von -159 kJ/mol freigesetzt wird, ist in (4-4) zu sehen. [35]



Dabei wird das eingesetzte Methanol nicht zu 100 % umgesetzt, wobei ein energiereicher Abgasstrom, der als Schwachgas bezeichnet wird, entsteht und vom Produktstrom abgezogen wird. Im Jahr 1998 wurden 142 Mio Nm³ Schwachgas mit einem Wasserstoffgehalt von 15 – 20 Vol. % freigesetzt und in nachgeschalteten Anlagen umgesetzt. [35] Unter Berücksichtigung der Hauptreaktion und der Umsetzung des im Schwachgas enthaltenen Wasserstoffes wurde eine CO₂- und Energiebilanz auf Basis der CO₂-Emissionen des Jahres 2019 gebildet. Die in Tabelle 13 angeführten Stoffeigenschaften wurden zur Berechnung herangezogen:

Tabelle 13: Stoffwerte zur Berechnung der Energiebilanz von Metadynea Austria [40, 46, 48]

Molare Masse Formaldehyd	30,030	g/mol
Normdichte CO₂	1,9769	kg/Nm ³
Normdichte H₂	0,08989	kg/Nm ³
Heizwert Wasserstoff	10,76	MJ/Nm ³
Spez. CO₂-Emissionen Erdgas	0,0556	tCO ₂ /GJ

Unter der Annahme, dass das überschüssige CO₂ durch die Verbrennung von Erdgas entsteht, wurde bei CO₂-Emissionen von 12.632 t, die in Tabelle 14 zu sehende Bilanz errechnet: [46]

Tabelle 14: Energiebilanz von Metadynea Austria auf Basis der Formaldehydproduktion

Energie/CO₂-Bilanz	[GJ/a]	[t CO₂/a]
Hauptreaktion	442.637	12.632
Schwachgas Verbrennung (H ₂)	267.386	0
Summe Reaktionen	710.023	12.632
Bilanzdifferenz 2019 (CH ₄)	134.507	7.479
Summe gesamt	844.531	20.111

Der berechnete Brennstoffeinsatz von 134.507 GJ/a macht dabei maximal 16 % vom Gesamtenergieeinsatz aus, könnte in der Praxis auch geringer sein, wenn innerhalb der Produktionskette auch andere Prozesse CO₂-Emissionen verursachen.

4.2.3.2 Atmos Austria

Atmos Austria ist ein Einproduktbetrieb der auf die Produktion von Phthalsäureanhydrid (PSA) spezialisiert ist. Da Informationen zum Energieeinsatz fehlen, soll hier ebenfalls eine Energie- und CO₂-Bilanz erstellt werden. Das Werk besitzt eine Produktionskapazität von 50.000 t, wobei jährlich zwischen 36.000 – 43.000 t o-Xylol zur Produktion von 40.000 – 47.000 t PSA eingesetzt werden. Bei der exothermen Hauptreaktion wird o-Xylol durch drei Sauerstoffatome oxidiert, wobei sich drei Wasseratome bilden und 1108,7 kJ/mol freigesetzt werden. [35] Obwohl die eingesetzten Katalysatoren dafür sorgen, dass die partielle Oxidation bevorzugt wird, kommt es trotzdem zu Reaktionen, die zur weiteren Oxidation bis hin zur vollständigen Verbrennung des Ausgangsstoffes führen. Ein Projektentwurf gibt folgende typischen Prozentsätze für die Herstellung von PSA aus o-Xylol an (Abbildung 7): [38]

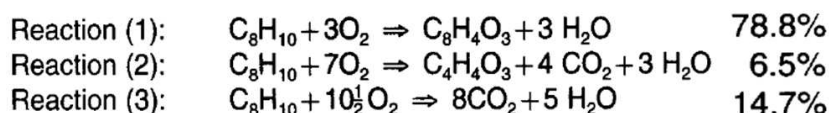


Abbildung 7: Anteile der Haupt- und Nebenreaktionen bei der PSA-Produktion [38]

In Tabelle 15 sind die Stoffwerte, die bei der Berechnung eingesetzt wurden, aufgelistet:

Tabelle 15: Stoffwerte zur Berechnung der Energiebilanz von Atmos Austria [40, 46, 48]

Hauptreaktion	-1108,7	kJ/mol
ΔfH°liquid o-Xylol	-24,4	kJ/mol
ΔfH°solid Bernsteinsäureanhydrid	-608,6	kJ/mol
ΔfH°liquid Wasser	-285,83	kJ/mol
ΔfH°gas Kohlenstoffdioxid	-393,51	kJ/mol
Molare Masse o-Xylol	106,160	g/mol
Molare Masse Phthalsäure	148,100	g/mol
Molare Masse CO₂	44,010	g/mol
Spez. CO₂-Emissionen Erdgas	0,0556	tCO ₂ /GJ

Basis für die Energiebilanz war der mittlere Werte des jährlichen o-Xylol-Einsatzes von 39.500 t, wobei eine Umrechnung in t PSA unter Berücksichtigung der Umwandlungsquote von 78,8 %, ebenfalls zu einen mittleren Produktoutput von rund 43.500 t führt. Die CO₂-Emissionen des Jahres 2019 wurden mit 27.429 t CO₂ aus dem Emissionshandelsregister entnommen. In Tabelle 16 soll mithilfe einer Energiebilanz der Brennstoffeinsatz abgeschätzt werden: [25]

Tabelle 16: Energiebilanz von Atmos Austria auf Basis der PSA Produktion

Energie/CO ₂ -Bilanz	[GJ/a]	[t CO ₂ /a]
Reaktion 1	325.069,670	0
Reaktion 2	72.936,010	4.257,561
Reaktion 3	593.393,561	19.257,277
Summe Reaktionen	991.399,241	23.514,84
Bilanzdifferenz 2019 (CH ₄)	70.398,59	3.914,16
Summe gesamt	1.061.797,83	27.429,00

Der Brennstoffeinsatz würde somit bei 70.398,59 GJ/a liegen und 16 % des gesamten Energieeinsatzes entsprechen. Die größte Fehlerquelle bei der Berechnung stellen vermutlich das Fehlen von tatsächlichen Produktmengenangaben für das Jahr 2019 dar, aber auch ein anderer Brennstoffmix, mit abweichenden spezifischen Emissionen, kann die Bilanz verfälschen.

4.2.3.3 ESIM Chemicals & Vertellus

Im Gegensatz zu den zuvor betrachteten Unternehmen hat ESIM Chemicals gemeinsam mit Vertellus 2021 einen Umweltbericht veröffentlicht, der umfassende Information zum Energieverbrauch von ESIM Chemicals liefert. Für das Bilanzjahr 2019 wird ein Erdgasverbrauch von 163.440 GJ, ein elektrischer von 218.520 GJ und ein primärer Gesamtenergieverbrauch von 1.314 TJ angegeben. Ein Großteil der thermischen Energie soll dabei durch die exotherme MSA-Synthese bereitgestellt werden. [32] Als thermischer Energieverbrauch wurde für diese Arbeit vereinfacht der Gesamtenergieverbrauch abzüglich des elektrischen Bedarfs herangezogen, der sich für 2019 mit 1.095.480 GJ beziffern lässt.

4.2.3.4 Sandoz Österreich

Sandoz veröffentlicht jährlich ihren Energieeinsatz für die Standorte Kundl und Schaftebau im Rahmen eines Nachhaltigkeitsberichtes.

Für das Werk in Kundl gibt Sandoz für das Jahr 2019 einen Erdgasverbrauch von 965.123 GJ, einen elektrischen Energiebedarf von 876.825 GJ und einen direkten Gesamtenergiebedarf von 1.885.472 GJ an. Die Differenz aus der Gesamtenergie und der elektrischen Energie liegt mit 1.008.647 GJ nahe am Erdgasverbrauch. [39]

Der kleine Betriebsstandort in Schaftebau soll im selben Jahr 175.507 GJ Erdgas, 125.132 GJ Elektrizität und in Summe 302.895 GJ aufgewendet haben. Die Differenz liegt mit 177.763 GJ praktisch auf demselben Niveau wie der Erdgasverbrauch. [39]

Bei dem Unternehmen Sandoz, das anstatt von Grundstoffchemikalien vor allem Pharmazeutika produziert, unterscheidet sich die Zusammensetzung der Energiematrix deutlich von den anderen Chemieunternehmen, die in dieser Arbeit betrachtet wurden.

Exotherme Reaktionen bei der chemischen Umwandlung entlang des Produktionsprozesses scheinen eine untergeordnete Rolle zu spielen und der Energieträger Strom ist ähnlich bedeutsam wie der Energieträger Erdgas. Dabei ist es wahrscheinlich, dass Strom auch zur Bereitstellung von thermischer Energie eingesetzt wird und als Abwärme bei höheren Temperaturen, stoffstromgebunden anfallen kann.

4.2.3.5 Donau Chemie – Pischelsdorf

Anders als die anderen in dieser Arbeit betrachteten Chemieunternehmen wird die Donau Chemie am Standort Pischelsdorf nicht im Emissionsregister erfasst. Da ihr Endprodukt Schwefelsäure durch Oxidation des Ausgangsproduktes Schwefel ohne die Verbrennung von Kohlenwasserstoffen erfolgt, sind keine direkten, prozessbedingten CO₂-Emissionen zu verzeichnen. Während keine aktuellen Energie- und Produktionsdaten bekannt sind, ist die Kapazität der beiden Produktionsanlagen mit 240.000 t beziffert. Die gesamte Reaktionsenthalpie wird durch folgende drei Reaktionsschritte bestimmt. [36]



Abbildung 8: Reaktionsschritte bei der Schwefelsäureherstellung [36]

Insgesamt ergibt sich somit eine Gesamtenthalpie von -528,4 kJ/mol H₂SO₄. Bei einer angenommenen Produktionsauslastung von 85 % und einer molaren Masse von 98,079 g/mol für Schwefelsäure, ergibt sich ein jährlicher Energieeinsatz von 1.099.049 GJ/a. Während die Abwärmefaktoren von *Brückner* und *Enova* nicht auf diesen Wert anwendbar sind, gibt es für den im Werk angewendeten Herstellungsprozess ein Energie-Flussdiagramm, welches in *Abbildung 9: Energie-Flussdiagramm einer Schwefelsäureproduktionsanlage [36]* dargestellt wird:

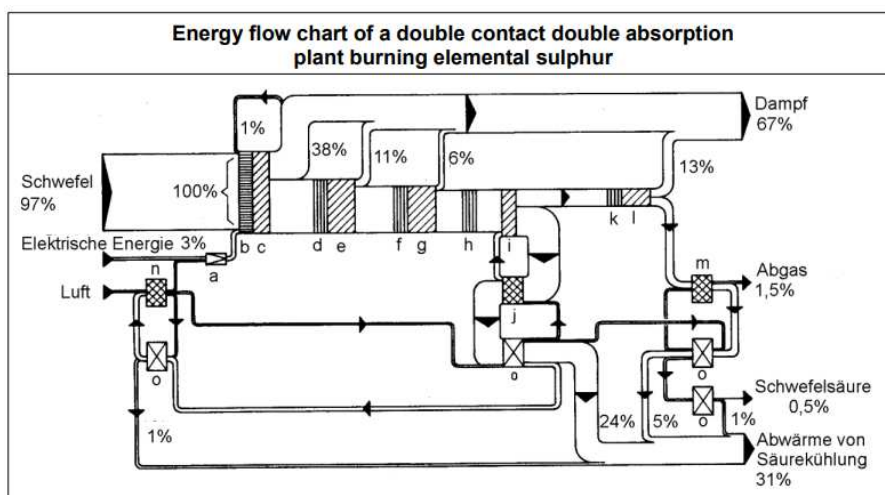


Abbildung 9: Energie-Flussdiagramm einer Schwefelsäureproduktionsanlage [36]

Ein entscheidender Anteil der Abwärme fällt dabei im Kühlwasser an, während die anderen Abwärmeströme bereits gut ausgenutzt werden und zu vernachlässigen sind. Die Wärme fällt in einem Temperaturniveau von 85 – 120 °C an. [36] In dieser Arbeit wurde davon ausgegangen, dass die Wärme im Mittel eine Temperatur von 100 °C aufweist, wobei fürs technische Potenzial ein Verlustfaktor von 0,9 eingerechnet wurde. Für die im Abgas verbleibende Wärme wurde noch eine Resttemperatur von 100 °C angenommen.

5 ERGEBNISSE

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Berechnungen für die einzelnen Branchen dargelegt und diskutiert.

5.1 Ergebnisse für die Zementindustrie

Das in dieser Arbeit entwickelte Modell für die Zementindustrie berechnet einen theoretischen Abwärmefaktor von 33,0 % und einen technischen Abwärmefaktor von 21,8 % bezogen auf den Brennstoffeinsatz der Zementunternehmen. Dabei ergibt sich für das theoretische Potenzial die in Tabelle 17 zu sehende Wärmeverteilung:

Tabelle 17: Wärmeverteilung des theoretischen Abwärmepotenzials der Zementindustrie

Temperatur	Abgas	Drehrohroberfläche	Kühlluft	Nachkühlluft	Summe
>100 °C	6,2%	4,9%	5,0%	0,4%	16,6%
50-100 °C	3,3%	1,2%	2,7%	1,0%	8,2%
0-50 °C	3,3%	1,2%	2,7%	1,0%	8,2%
Summe	12,8%	7,4%	10,4%	2,5%	33,0%

Zu sehen ist dabei ein ähnlich hohes Abwärmepotenzial, für Wärme über 100 °C, für das Abgas, der Verlustwärme des Drehrohrs und der Kühlluft. Trotz vergleichbarem Potenzial in diesem Temperaturbereich fällt das Potenzial unter 100 °C für Abgas und Kühlluft deutlich höher als bei der Wärmerückgewinnung der Drehrohrverluste aus. Grund dafür ist, dass ein bedeutsamer Teil der Hochtemperaturwärme des Abgases und der Kühlluft bereits intern genutzt wird, während im unteren Temperatursegment noch ein großer Teil ungenutzt bleibt.

Das in Tabelle 18 zu sehende technische Potenzial reduziert verschiedene Temperaturbereiche und Ströme unterschiedlich stark:

Tabelle 18: Wärmeverteilung des technischen Abwärmepotenzials der Zementindustrie

Temperatur	Abgaswärme	Drehrohrverluste	Kühlluft	Nachkühlluft	Summe
>100 °C	3,4%	1,8%	3,7%	0,0%	9,0%
50-100 °C	2,9%	0,5%	2,3%	0,6%	6,3%
0-50 °C	2,9%	0,5%	2,3%	0,9%	6,6%
Summe	9,2%	2,8%	8,4%	1,5%	21,8%

Zu sehen ist vor allem eine deutliche Reduktion der Abwärme im Temperaturbereich über 100 °C, die auf die Grädigkeit bei der Wärmeübertragung rückzuführen ist. Aufgrund der Annahme, dass maximal 40 % der Wärmeverluste des Drehrohrs rückgewonnen werden

können, liegt das technische Potenzial für die Drehrohrverluste deutlich unter dem theoretischen. Somit wird das technische Potenzial vorwiegend durch die verbleibende Wärme im Abgas und der Kühlluft bestimmt.

Das gesamte berechnete theoretische Abwärmepotenzial der Zementindustrie beläuft sich auf 1250 GWh und das technische auf 827 GWh. In Relation zum österreichischen Endenergiebedarf entspricht das technische Potenzial rund 0,26 % und in Relation zum Heizwärmebedarf der österreichischen Haushalte 0,98 %. [3, 5]

Drei Unternehmen geben an Abwärme bereits extern zur Bereitstellung von Fernwärme zu nutzen, wobei insgesamt laut Firmenangaben rund 32,6 GWh ausgespeist werden. Den größten Anteil speist dabei das Kirchdorfer Zementwerk mit 20 GWh aus. Wird davon ausgegangen, dass die zur Verfügung gestellte Energie vom technischen Energiepotenzial abgezogen werden darf, reduziert sich das technische Potenzial für dieses Unternehmen, bezogen auf den Brennstoffbedarf, von 21,8 % auf 15,8 %. Dabei ist davon auszugehen, dass die Fernwärme primär in den kältesten sechs Monaten ausgekoppelt werden kann. Bei gleichverteilten Produktionsoutput würde das bedeuten, dass in den Sommermonaten weiterhin 21,8 % der Energie ungenutzt bleiben, während im Winter nur mehr 9,8 % verbleiben. Bezogen wird die Wärme derzeit wahrscheinlich aus Abgas und Kühlluft, wobei die Ströme auf das ganze Jahr verteilt einen Abwärmestrom von 58,54 GWh liefern. Unter der Annahme dass die Wärme nur zur Hälfte genutzt werden kann, müssten in den Heizmonaten 68 % des technischen Potenzials dieser Ströme genutzt werden.

Hinsichtlich von Fehlerquellen bei der Berechnung des Modells ist zunächst die Herangehensweise bei der Berechnung des Energieeinsatzes zu erwähnen. Während der Brennstoffeinsatz der einzelnen Unternehmen in Summe dem gesamten Energieeinsatz der österreichischen Zementindustrie entsprechen sollte, sind Abweichungen im Energieeinsatz der einzelnen Standorte nicht auszuschließen. Generell werden im BAT für trockene Verfahren Brennstoffeinsätze von 3000 – 4200 MJ/t Klinker angegeben, was auf eine große Schwankungsbreite im Energieeinsatz hindeutet. [27] Im Durchschnitt liegen die österreichischen Zementwerke im oberen Bereich beim Brennstoffeinsatz, wodurch jedoch nicht auszuschließen ist, dass einzelne Unternehmen deutlich von diesem Durchschnitt abweichen. Ebenso kann das herangezogene Wärmeflussdiagramm nur bedingt der tatsächlichen Abwärmeverteilung der einzelnen Standorte entsprechen, besonders da dieses von einem deutlich niedrigeren auf Klinker bezogenen Energieeinsatz ausgeht. Weiters können sich die einzelnen Standorte deutlich in ihrem internen Abwärme-Nutzungsverhalten unterscheiden.

In Tabelle 19 sind abschließend noch die Ergebnisse für den Energieeinsatz und das technische Potenzial für die einzelnen Zementwerke angeführt:

Tabelle 19: Energieeinsatz und technisches Potenzial der Österreichischen Zementwerke

	Energieeinsatz	Technisches Potenzial
	[GWh]	[GWh]
Zementwerk Hatschek	361,43	78,97
Lafarge Zementwerk Mannersdorf	870,53	190,21
Lafarge Zementwerk Retznei	429,41	93,83
Schretter & Cie Zement	249,23	54,46
Wiietersdorfer & Peggauer Zement	668,73	146,12
Kirchdorfer Zementwerk Hofmann	332,56	72,66
Zementwerk Wopfing	415,59	90,81
Zementwerk Leube	457,98	100,07

5.2 Ergebnisse für die Kalkindustrie

Bei den Modellen der Kalkindustrie unterscheiden sich die relativen Abwärmepotenziale, aufgrund von standortspezifischen Annahmen, untereinander. Die Unterschiede sind dabei auf zwei verschiedene Modelle rückzuführen. Außerdem sind für zwei Unternehmen Daten zum Energieeinsatz bekannt, wodurch der spezifische Energieeinsatz vom Durchschnittswert der Branche abweicht. Für das allgemeine GGR-Ofenmodell errechnet sich ein theoretisches Abwärmepotenzial von 18,1 % und ein technisches von 11,4 %. Beim Kalkwerk Steyrling decken sich der im Umweltbericht ausgewiesene und berechnete Energieverbrauch annähernd, wodurch es nur zu geringen Abweichungen beim Wärmepotenzial kommt. Die Abwärmefaktoren beziffern sich respektiv mit 17,8 % und 11,1 %. Deutlichere Abweichungen gibt es hingegen beim Kalkwerk Peggau bei dem ein Brennstoffeinsatz von 93,86 GWh berechnet wurde, im Umweltbericht jedoch einer von 104,32 GWh angegeben wird, was einer Abweichung um einen Faktor von 1,11 entspricht. Ein höherer Energieeinsatz könnte auf höhere Prozessverluste durch Konvektion und Strahlung, aber auch auf schlechtere Ausnutzung der im Abgas und Produktstrom enthaltenen Energie rückzuführen sein. Da das Modell von gleichen Endtemperaturen bei allen GGR-Öfen ausgeht, sinken mit steigendem Energieeinsatz die relativen Abwärmepotenziale und liegen für Peggau mit 16,8 % und 10,5 % fast 1 %P unter dem allgemeinen Modell. In der Praxis ist jedoch davon auszugehen, dass der höhere Energieeinsatz nicht nur auf höhere Wärmeverluste, sondern auch auf schlechtere Wärmenutzung rückzuführen ist, wodurch die Temperatur im Abgas und somit auch das Wärmepotenzial angehoben werden würde. Deutlich höher liegt das Wärmepotenzial bei dem Modell für die restlichen Ofentypen, wobei mit den getroffenen Annahmen ein theoretisches Abwärmepotenzial von 33,3 % und ein technisches von 25,4 % ermittelt wurde.

Obwohl sich die Ergebnisse beim GGR-Modell etwas unterscheiden, soll hier aus Übersichtlichkeitsgründen nur jenes für den gemittelten Energieeinsatz präsentiert werden. Da bei der Berechnung vom Abwärmepotenzial von Steyrling und Peggau die gleichen Prozessparameter verwendet wurden, bleibt die Verteilung der Wärme auf die verschiedenen Temperaturbereiche und Ströme gleich. Alle Werte unterscheiden sich von den in Tabelle 20 zu sehenden lediglich um einen Faktor, der durch den Quotienten der Gesamtpotenziale berechnet werden kann:

Tabelle 20: Wärmeverteilung des theoretischen Abwärmepotenzials des GGR-Modells

Temperatur	Kondensation	Abgas	Nachkühlung	Summe
>100 °C	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
50-100 °C	0,0%	2,5%	0,6%	3,1%
0-50 °C	10,1%	3,9%	1,0%	15,1%
Summe	10,1%	6,4%	1,7%	18,1%

Das technische Potenzial ist in Tabelle 21 zu sehen und sieht eine weitere Reduktion des Potenzials über 50 °C:

Tabelle 21: Wärmeverteilung des technischen Abwärmepotenzials des GGR-Modells

Temperatur	Kondensation	Abgas	Nachkühlung	Summe
>100 °C	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
50-100 °C	0,0%	0,7%	0,0%	0,7%
0-50 °C	6,4%	3,5%	0,8%	10,6%
Summe	6,4%	4,2%	0,8%	11,4%

In Tabelle 22 ist die Verteilung des theoretischen Potenzials der Nicht-GGR-Öfen zu sehen. Der Unterschied zum GGR-Modell liegt vor allem im erhöhten Abgaspotenzial:

Tabelle 22: Wärmeverteilung des theoretischen Abwärmepotenzials des Nicht-GGR-Modells

Temperatur	Kondensation	Abgas	Nachkühlung	Summe
>100 °C	0,0%	14,6%	0,0%	14,6%
50-100°C	0,0%	3,7%	0,5%	4,2%
0-50°C	10,1%	3,5%	0,9%	14,5%
Summe	10,1%	21,8%	1,4%	33,3%

Auch bei dem in Tabelle 23 zu sehenden technischen Abwärmepotenzial befindet sich immer noch ein Großteil der Wärme bei Temperaturen über 100 °C im Abgas:

Tabelle 23: Wärmeverteilung des technischen Abwärmepotenzials des Nicht-GGR-Modells

Temperatur	Kondensation	Abgas	Nachkühlung	Summe
>100 °C	0,0%	11,8%	0,0%	11,8%
50-100 °C	0,0%	3,4%	0,0%	3,4%
0-50 °C	6,4%	3,2%	0,8%	10,3%
Summe	6,4%	18,3%	0,8%	25,4%

In Summe wurde für die Kalkindustrie ein theoretisches Gesamtpotenzial mit 168 GWh und ein technisches von 113 GWh berechnet. In Relation zum österreichischen Endenergiebedarf ergibt sich, bezogen auf das technische Potenzial, ein Anteil von 0,04 % und in Relation zum Raumwärmebedarf ein Anteil von 0,13 %.

Bei keinen der betrachteten Unternehmen konnten Informationen zur externen Nutzung der Abwärme gefunden werden. Insgesamt fällt das Potenzial in dieser Branche vergleichsweise niedrig und bei geringem Exergieniveau an. Hinzu kommt, dass die ineffizienteren Öfen zukünftig durch GGR-Öfen ersetzt werden könnten. Werden diese in absehbarer Zeit erneuert erscheint es wenig sinnvoll Maßnahmen zur Abwärmenutzung zu setzen, die auf ein höheres Potenzial ausgelegt wären als langfristig tatsächlich verfügbar ist. Wird davon ausgegangen, dass nur mehr GGR-Öfen zum Einsatz kommen, reduziert sich das technische Potenzial um ein Viertel von 113 GWh auf 85 GWh.

In Tabelle 24 kann Einsicht in die Einzelergebnisse der Kalkbranche genommen werden:

Tabelle 24: Energieeinsatz und technisches Potenzial der österreichischen Kalkindustrie

	Energieeinsatz [GWh]	Technisches Potenzial [GWh]
Kalkwerk Wopfing	142,40	16,19
Voest Kalkwerk Steyrling	320,00	35,67
Intercal Peggau	104,32	10,98
Kalkwerk Schretter & Cie, Vils	36,88	4,19
Ernstbrunner Kalktechnik GmbH	27,00	6,82
Leube Kalkwerk Golling	99,97	25,26
Calmit Bad Ischl	55,57	14,04
Kalkwerk Wopfing	142,40	16,19

5.3 Ergebnisse für die Chemieindustrie

Für die Chemie-Industrie wurden die Ergebnisse anderer Studien verwertet, um Schätzwerte für das Potenzial ausgewählter Chemieunternehmen generieren zu können. Dafür wurden zwei Studien herangezogen. Die Ergebnisse, die aus den Abwärmefaktoren aus *Brückners* Dissertation [9] gewonnen wurden, stellen dabei ein Potenzialminimum dar, das nur die im

Abgas verbleibende Wärme berücksichtigt. Die Ergebnisse aus der Enova [18] Potenzialstudie stimmen besser mit den Zielen dieser Arbeit überein, sind jedoch mit großen Unsicherheiten behaftet.

Der Energieeinsatz der Unternehmen Metadynea Austria, Atmoso Austria und ESIM Chemicals wird stark von exothermen Prozessen bestimmt, dennoch wird ein Teil der Energie zusätzlich durch Brennstoffe bereitgestellt. Die Anwendung der brennstoffbezogenen Potenziale auf diese Unternehmen ergibt, bezogen auf den geschätzten, gesamten thermischen Energieeinsatz, die in Tabelle 25 zu sehenden relativen Potenziale:

Tabelle 25: Ausgehend von der Enova-Studie berechnete Abwärmepotenziale

	Theoretisches Potenzial	Technisches Potenzial
Metadynea Austria	25,0%	22,2%
Atmoso Austria	11,1%	9,9%
ESIM Chemicals	23,4%	20,8%
Mittelwert	19,9%	17,7%

Wie bereits diskutiert stellen die berechneten Einzelwerte kein tatsächliches Maß dafür dar wie viel Abwärme ungenutzt bleibt, sondern ergeben sich lediglich aus dem geschätzten Verhältnis aus Brennstoffbedarf und thermischen Energieeinsatz (Berücksichtigung von exothermen Reaktionen). Um einen einheitlichen Faktor zu erhalten, wurden die drei Werte gemittelt. Dieser Wert soll darstellen, wie hoch das Potenzial für Chemieunternehmen im Mittel ist, kann aber keine Aussage über das tatsächliche Abwärmepotenzial eines spezifischen Unternehmens treffen. Ebenso kann mit den zur Verfügung stehenden Daten keine Aussage über die Genauigkeit des Wertes getroffen werden. Nur wenn das Verhältnis aus Brennstoff und thermischem Energieeinsatz der in dieser Arbeit betrachteten Unternehmen jenem der in der Enova Studie betrachteten Unternehmen entspricht, wurde ein Potenzialfaktor berechnet, mit dem sich bei bekanntem thermischem Energiebedarf die Ergebnisse der Enova Potenzialstudie replizieren lassen. Dieser Potenzialfaktor muss schlussendlich nicht repräsentativ für die gesamte Chemiebranche sein, da die Ergebnisse der Enova Studie lediglich durch Befragung eines Teils der norwegischen Branche gewonnen wurden und sich die Wärmenutzung der norwegischen von jener der österreichischen Chemie-Industrie unterscheiden kann. Trotz vieler Vorbehalte liegen die Potenzialfaktoren mit 19,9 % und 17,7 % in einem plausiblen Bereich. Jedoch schon der Vergleich mit dem in der Literatur gefundenen Potenzialfaktor für die Herstellung von Schwefelsäure zeigt eine deutliche Abweichung. In dieser Branche sollen 32,5 % der Wärme ungenutzt bleiben und vorwiegend bei niedrigen Temperaturen im Kühlwasser anfallen. [36]

Insgesamt ergab sich für alle in dieser Arbeit betrachteten Chemieunternehmen ein theoretisches Gesamtpotenzial von 326,38 GWh und ein technisches von 290,50 GWh. Das technische Potenzial hat dabei relativ zum österreichischen Endenergiebedarf einen Anteil von ca. 0,10 % und bezogen auf den Raumwärmbedarf einen von 0,34 %. Während die Ergebnisse für die Zement- und Kalkindustrie das Gesamtpotenzial ihrer Branche gut abbilden können sollte, sind diese Werte nur Schätzwerte für einen Teil der Chemieindustrie.

5.3.1 Abwärmepotenzial – Metadynea Austria

Für das Unternehmen Metadynea Austria wurde ausgehend von einem berechneten Brennstoffeinsatz von 37,4 GWh das in Tabelle 26 zu sehende Abgas-Abwärmepotenzial berechnet. Ausgegangen wurde dabei von einer Emissionstemperatur von 150 °C.

Tabelle 26: Abgas-Abwärmepotenzial von Metadynea – Potenzialfaktor nach Brückner [9]

Theoretisches Abwärmepotenzial		
>100 °C	1,52	GWh/a
50-100 °C	1,52	GWh/a
0-50 °C	1,52	GWh/a
Summe	4,55	GWh/a
Technisches Abwärmepotenzial		
>100 °C	0,82	GWh/a
50-100 °C	1,37	GWh/a
0-50 °C	1,37	GWh/a
Summe	3,55	GWh/a

Nachdem wie in 5.3 beschrieben, ausgehend von Tabelle 12, ein vorläufiges brennstoffbezogenes Gesamt-Potenzial berechnet wurde, wurde ausgehend vom thermischen Energieeinsatz von 234,6 GWh und den ermittelten Potenzialfaktoren von 19,9 % und 17,7 %, das in Tabelle 27 zu sehende Potenzial berechnet:

Tabelle 27: Gesamtes Abwärmepotenzial von Metadynea -Potenzialfaktor nach Enova [18]

Theoretisches Abwärmepotenzial		
>100 °C	2,97	GWh/a
50-100 °C	8,15	GWh/a
0-50 °C	35,46	GWh/a
Summe	46,59	GWh/a
Technisches Abwärmepotenzial		
>100 °C	2,18	GWh/a
50-100 °C	7,33	GWh/a
0-50 °C	31,92	GWh/a
Summe	41,43	GWh/a

Die Ergebnisse, die aus der *Enova-Potenzialstudie* generiert wurden, sind dabei um einen Faktor 10,2 und einen Faktor 11,7 höher als jene die mithilfe von *Brückners* Potenzialfaktoren gewonnen wurden, da bei *Brückner* die im Abgas verbleibende Wärme berücksichtigt wurde.

5.3.2 Abwärmepotenzial – Atmos Austria

Für Atmos Austria ergeben sich mit einem Brennstoffeinsatz von 19,56 GWh und *Brückners* Potenzialfaktoren das in Tabelle 28 zu sehende Abgaswärmepotenzial:

Tabelle 28: Abgas-Abwärmepotenzial von Atmos Austria – Potenzialfaktor nach Brückner [9]

Theoretisches Abwärmepotenzial		
>100 °C	0,79	GWh/a
50-100 °C	0,79	GWh/a
0-50 °C	0,79	GWh/a
Summe	2,38	GWh/a
Technisches Abwärmepotenzial		
>100 °C	0,43	GWh/a
50-100 °C	0,72	GWh/a
0-50 °C	0,72	GWh/a
Summe	1,86	GWh/a

In Tabelle 29 ist das berechnete Gesamtpotenzial zu sehen:

Tabelle 29: Gesamtes Abwärmepotenzial von Atmos Austria – Potenzialfaktor nach Enova [18]

Theoretisches Abwärmepotenzial		
>100 °C	3,49	GWh/a
50-100 °C	9,57	GWh/a
0-50 °C	41,63	GWh/a
Summe	54,69	GWh/a
Technisches Abwärmepotenzial		
>100 °C	2,56	GWh/a
50-100 °C	8,61	GWh/a
0-50 °C	37,47	GWh/a
Summe	48,64	GWh/a

Die brennstoffbezogenen und die auf den thermischen Energieeinsatz bezogenen Werte unterscheiden sich um einen Faktor von 22,9 zwischen den theoretischen Potenzialen und einem von 26,2 zwischen den technischen.

5.3.3 Abwärmepotenzial – ESIM Chemicals & Vertellus

Während der Brennstoffeinsatz und der Gesamtenergieeinsatz der zuvor genannten Unternehmen geschätzt wurde, wurden die von ESIM Chemicals und Vertellus aus einem Umweltbericht entnommen. Das aus dem Brennstoffeinsatz von 45,4 GWh ermittelte Abgas-Abwärmepotenzial nach *Brückner* ist in Tabelle 30 zu sehen:

Tabelle 30: Abgas-Abwärmepotenzial von ESIM Chemicals & Vertellus – Potenzialfaktor nach Brückner [9]

Theoretisches Abwärmepotenzial		
>100 °C	1,84	GWh/a
50-100 °C	1,84	GWh/a
0-50 °C	1,84	GWh/a
Summe	5,53	GWh/a
Technisches Abwärmepotenzial		
>100 °C	1,00	GWh/a
50-100 °C	1,66	GWh/a
0-50 °C	1,66	GWh/a
Summe	4,32	GWh/a

Für den gesamten Energieeinsatz ohne Elektrizität von 304,3 GWh wurde mit den Potenzialfaktoren 19,9 % und 17,7 % die in Tabelle 31 zu sehenden Ergebnisse generiert:

Tabelle 31: Gesamtes Abwärmepotenzial von ESIM Chemicals & Vertellus – Potenzialfaktor nach Enova [18]

Theoretisches Abwärmepotenzial		
>100 °C	3,86	GWh/a
50-100 °C	10,57	GWh/a
0-50 °C	46,00	GWh/a
Summe	60,43	GWh/a
Technisches Abwärmepotenzial		
>100 °C	2,83	GWh/a
50-100 °C	9,51	GWh/a
0-50 °C	41,40	GWh/a
Summe	53,74	GWh/a

Die berechneten Potenziale unterscheiden sich um die Faktoren 10,9 und 12,4.

5.3.4 Abwärmepotenzial – Sandoz Kundl

Sandoz Kundl unterscheidet sich im Vergleich zu den zuvor betrachteten Unternehmen deutlich in der Bereitstellung ihres Energiebedarfs. Aufgrund des höheren Brennstoffeinsatzes von 268,2 GWh liegt das in Tabelle 32 zu sehende Abgas-Abwärmepotenzial deutlich über denen der anderen Chemieunternehmen:

Tabelle 32: Abgas-Abwärmepotenzial Sandoz Kundl – Potenzialfaktor nach Brückner [9]

Theoretisches Abwärmepotenzial		
>100 °C	10,90	GWh/a
50-100 °C	10,90	GWh/a
0-50 °C	10,90	GWh/a
Summe	32,69	GWh/a
Technisches Abwärmepotenzial		
>100 °C	5,88	GWh/a
50-100 °C	9,81	GWh/a
0-50 °C	9,81	GWh/a
Summe	25,50	GWh/a

Der Energieeinsatz der als thermischer Energiesatz angenommen wurde liegt mit 280,18 GWh nur geringfügig über den Brennstoffeinsatz. Deshalb liegt das gesamte Abwärmepotenzial deutlich näher am nach *Brückner* berechneten Abgaspotenzial. Wie in Tabelle 33 zu sehen liegt das Abwärmepotenzial im obersten Temperaturbereich unter dem Abgaspotenzial:

Tabelle 33: Gesamtes Abwärmepotenzial von Sandoz Kundl – Potenzialfaktor nach Enova [18]

Theoretisches Abwärmepotenzial		
>100 °C	3,55	GWh/a
50-100 °C	9,73	GWh/a
0-50 °C	42,36	GWh/a
Summe	55,64	GWh/a
Technisches Abwärmepotenzial		
>100 °C	2,61	GWh/a
50-100 °C	8,76	GWh/a
0-50 °C	38,12	GWh/a
Summe	49,49	GWh/a

Die Potenziale unterscheiden sich dabei voneinander durch die Faktoren 1,7 und 1,9.

5.3.5 Abwärmepotenzial – Sandoz Schaftenuau

Bei Sandoz Schaftenuau verhält sich das Verhältnis Brennstoffeinsatz zu thermischen Energieeinsatz ähnlich wie beim Standort Kundl, der Standort besitzt mit 48,75 GWh jedoch einen deutlich geringeren Gesamtenergieeinsatz. Das berechnete Abgas-Abwärmepotenzial ist in Tabelle 34 zu sehen:

Tabelle 34: Abgas-Abwärmepotenzial Sandoz Schaftenau – Potenzialfaktor nach Brückner [9]

Theoretisches Abwärmepotenzial		
>100 °C	1,98	GWh/a
50-100 °C	1,98	GWh/a
0-50 °C	1,98	GWh/a
Summe	5,94	GWh/a
Technisches Abwärmepotenzial		
>100 °C	1,07	GWh/a
50-100 °C	1,78	GWh/a
0-50 °C	1,78	GWh/a
Summe	4,64	GWh/a

Mit einem angenommenen thermischen Energieeinsatz von 49,38 GWh ergibt sich dann folgendes gesamtes Abwärmepotenzial:

Tabelle 35: Gesamtes Abwärmepotenzial von Sandoz Schaftenau – Potenzialfaktor nach Enova [18]

Theoretisches Abwärmepotenzial		
>100 °C	0,63	GWh/a
50-100 °C	1,72	GWh/a
0-50 °C	7,46	GWh/a
Summe	9,81	GWh/a
Technisches Abwärmepotenzial		
>100 °C	0,46	GWh/a
50-100 °C	1,54	GWh/a
0-50 °C	6,72	GWh/a
Summe	8,72	GWh/a

Mit Faktoren von 1,65 und 1,88 liegen die unterschiedlich berechneten Abwärmepotenziale sogar noch näher beieinander als bei Sandoz Kundl.

5.3.1 Abwärmepotenzial – Donau Chemie Pischelsdorf

Im Gegensatz zu den anderen Chemieunternehmen konnte für Schwefelsäuren-Produktionsanlagen eine Energiebilanz gefunden werden. Ausgehend von der Schwefelsäureproduktion der Donau Chemie Pischelsdorf wurde ein thermischer Energieeinsatz von 305,29 GWh berechnet. Im Abgas soll dabei durchschnittlich das in Tabelle 36 zu sehende Potenzial verbleiben:

Tabelle 36: Abgas-Abwärmepotenzial Donau Chemie Pischelsdorf

Theoretisches Abwärmepotenzial		
>100 °C	-	GWh/a
50-100 °C	2,29	GWh/a
0-50 °C	2,29	GWh/a
Summe	4,58	GWh/a
Technisches Abwärmepotenzial		
>100 °C	-	GWh/a
50-100 °C	1,24	GWh/a
0-50 °C	2,06	GWh/a
Summe	3,30	GWh/a

Der deutlich größere Teil soll hingegen im Kühlwasser der Säurekühlung emittiert werden. Dieser ist in Tabelle 37 zu sehen:

Tabelle 37: Abwärmepotenzial der Säurekühlung Donau Chemie Pischelsdorf

Theoretisches Abwärmepotenzial		
>100 °C	-	GWh/a
50-100 °C	47,32	GWh/a
0-50 °C	47,32	GWh/a
Summe	94,64	GWh/a
Technisches Abwärmepotenzial		
>100 °C	-	GWh/a
50-100 °C	42,59	GWh/a
0-50 °C	42,59	GWh/a
Summe	85,18	GWh/a

Die Faktoren zwischen der im Abgas und in der Säurekühlung vorliegenden Wärme sind 20,7 und 25,8. Anders als bei den zuvor berechneten Faktoren enthält das zweite Potenzial nicht die Abgaswärme. Das technische Gesamtpotenzial beider Wärmeströme berechnet sich mit 88,48 GWh.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In dieser Arbeit wurden in Summe 21 Industriebetriebe hinsichtlich ihres Abwärmepotenzials untersucht. Für diese Betriebe wurde insgesamt ein technisches Abwärmepotenzial von 1,23 TWh bei einem thermischen Energieeinsatz von 6,02 TWh berechnet, wobei sich ein durchschnittlicher Abwärmefaktor von 20,4 % ergibt. In Relation zum österreichischen Endenergiebedarf von 316,3 TWh und Raumwärmebedarf von 84,6 TWh ergeben sich Anteile von etwa 0,39 % und 1,46 %. Bei tatsächlicher ökonomischer Nutzung dieses Potenzials, die auch die zeitlich beschränkte Verfügbarkeit von Wärmesenken und weitere Wärmeverluste durch die Wärmeverteilung bzw. aufgrund der Umwandlung in andere Energieformen berücksichtigen muss, ist von einer deutlichen Reduktion dieses Potenzials auszugehen. Die Umwandlung der Wärme zu Strom ist dabei nur bei hohen Temperaturniveaus effizient möglich, bei den betrachteten Unternehmen fällt die Wärme jedoch häufig zum überwiegenden Teil unter 100 °C an. Für die Abwärmern in der Zementindustrie sind bei der Umwandlung zu Strom Wirkungsgrade von etwa 16 % erzielbar, ein Wert, der in der österreichischen Zementindustrie jedoch aufgrund der hohen Abwärmernutzung für Trocknungsprozesse wahrscheinlich nicht erreicht werden kann. [51] Bei einer direkten Nutzung der Wärme wäre es möglich, höhere Prozentsätze ökonomisch zu nutzen, der genaue Prozentsatz ist dabei stark von den verfügbaren Abwärmesenken und den ökonomischen Rahmenbedingungen abhängig.

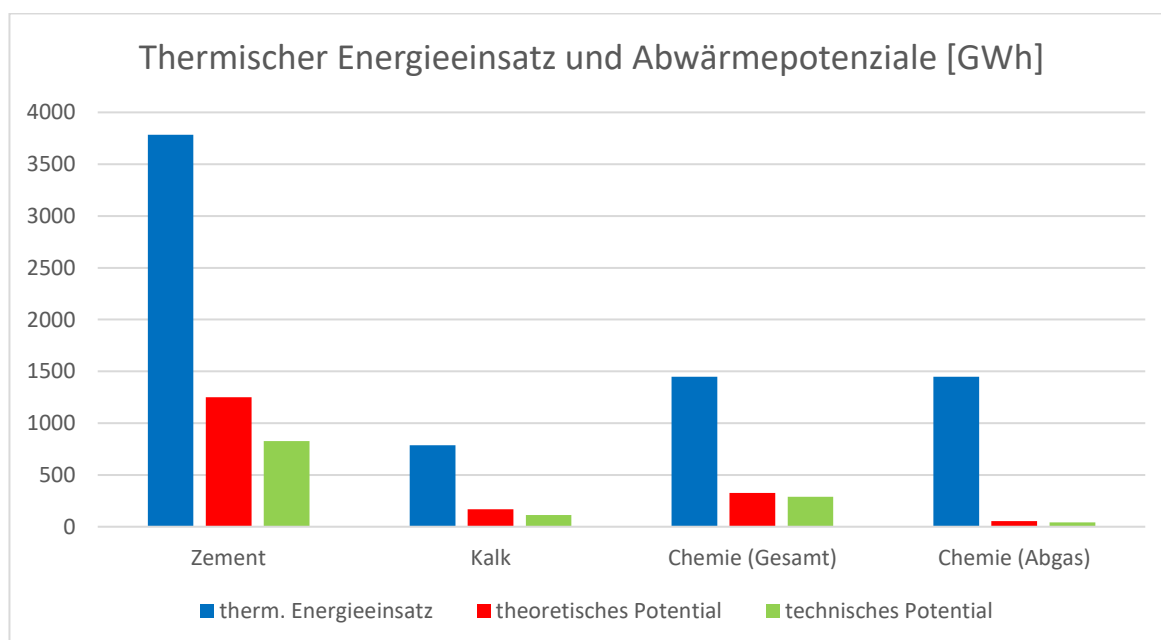


Abbildung 10: Abwärmepotenziale in Relation zum thermischen Energieeinsatz

In Abbildung 10 sind zusammenfassend die absoluten Wärmepotenziale für die Zement- und Kalkindustrie beziehungsweise für die betrachteten Chemieunternehmen zu sehen. Dabei wird bei den Chemiebetrieben zwischen Daten, die sich einerseits auf die Enova-

Potenzialstudie [18] und andererseits *Brückners Dissertation [9]* stützen, unterschieden. Zweitere beziehen sich dabei rein auf den Brennstoffeinsatz und ermöglichen nur eine Abschätzung der abgasgebundenen Abwärme. Das Abgas-Potenzial liegt in der Chemieindustrie jedoch in der Regel deutlich unter dem Potenzial der ab- und kühlwassergebundenen Wärme. In Abbildung 11 wird das relative Abwärmepotenzial der einzelnen Branchen in drei verschiedene Temperaturklassen unterteilt. Dabei muss in der Kalkindustrie bei der Temperaturverteilung zwischen GGR-Öfen und den restlichen Ofentypen unterschieden werden. In der Chemie Industrie muss der Betrieb Donau Chemie Pischelsdorf gesondert betrachtet werden, da hier die Wärmeverteilung von einem Bericht des österreichischen Umweltbundesamtes [36] stammt und nicht wie bei den restlichen aus den Ergebnissen der Enova-Potenzialstudie [18] ermittelt wurde. Zu sehen ist, dass bei der Kalk- und Chemie Branche ein Großteil der Abwärme im Niedertemperaturbereich anzufinden ist. In der Zementindustrie und in der Kalkindustrie bei den Öfen, die noch nicht durch GGR-Öfen ersetzt worden sind, ist noch ein bedeutender Teil der Abwärme bei Temperaturen über 100 °C zu finden.

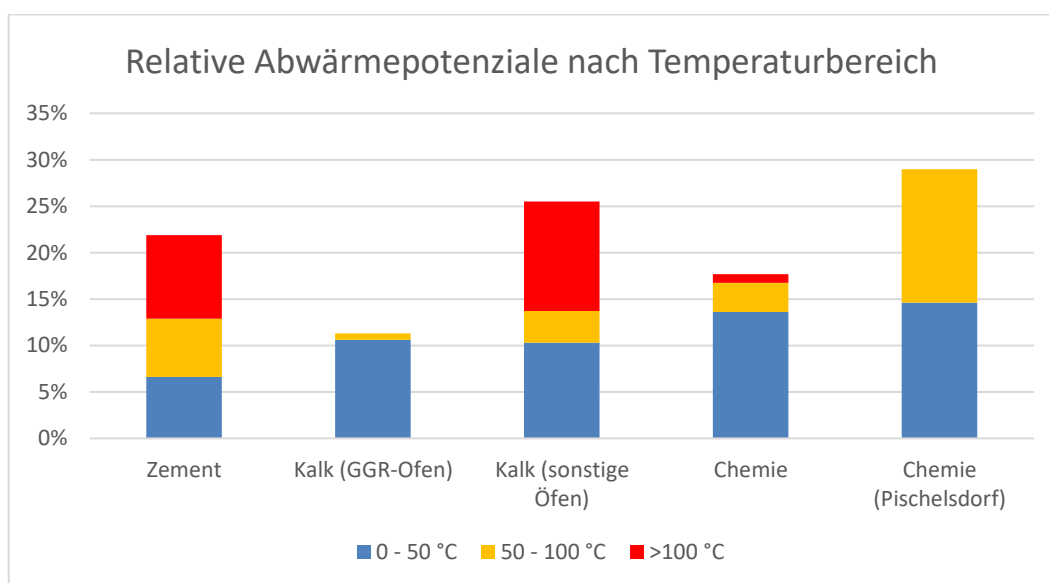


Abbildung 11: Relative Abwärmepotenziale nach Temperaturbereich

Die Berechnungen dieser Arbeit sind mit großen Unsicherheiten behaftet, können jedoch zur Einordnung der Größenordnung der Potenziale herangezogen werden. Für einen Großteil der Unternehmen mussten sowohl der Energieeinsatz, die Verteilung der ungenutzten Wärme, sowie das Temperaturniveau der Wärme, mithilfe von öffentlich zugänglichen Daten abgeschätzt werden. Diese Daten sind dabei nicht unternehmensspezifisch, sondern wurden mithilfe von prozess- oder branchenspezifischen Mittelwerten, beziehungsweise Potenzialfaktoren anderer Studien generiert. Lediglich der Energieeinsatz einiger Unternehmen konnte aus Umweltberichten übernommen werden. Technologische Unterschiede an verschiedenen Standorten, sowie das konkrete Abwärme-

Nutzungsverhalten der einzelnen Standorte wurden hingegen kaum bis gar nicht berücksichtigt. Weitere Fehlerquellen sind Vereinfachungen bei den physikalischen Berechnungsgrundlagen und getroffene Annahmen bei der Ermittlung des technischen Potenzials. Die tatsächliche Überprüfung der Ergebnisse kann dabei nur durch Unternehmensbefragungen und Berechnungen auf Basis von Messdaten erfolgen.

Wenn es um die Nutzung der Abwärme geht, sollten einige Gesichtspunkte berücksichtigt werden. Allgemein ist die Reduktion von Abwärme sinnvoller als deren Nutzung, wobei hierbei wiederum die interne der externen vorzuziehen ist. Längere Wärmeübertragungswege bedeuten höhere Wärmeverluste und meistens höhere Anlagenkosten, die sich bei Erhöhung der Prozesseffizienz vermeiden beziehungsweise bei der internen Nutzung verringern lassen. Bei der Abwärmenutzung gilt es eine geeignete Abwärmesenke zu finden, die sowohl in Quantität als auch in der zeitlichen Verfügbarkeit mit der Abwärmequelle gut übereinstimmt. Die Steigerung von Energie- und Ressourceneffizienz sind Ziele, die zur Verringerung der Treibhausgasemissionen beitragen sollen. Dabei kann eine global höhere Ressourceneffizienz zu einem geringeren Produktionsaufkommen führen, was zu einer Reduktion des Energieeinsatzes und somit auch des Wärmepotenzials führen könnte. Auch solche Effekte sollten bei der langfristigen Auslegung von Technologien zur Abwärmenutzung berücksichtigt werden.

7 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *Klima- und energiepolitischer Rahmen bis 2030*. URL https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-energy-framework_de – Überprüfungsdatum 2022-07-25
- [2] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *2050 long-term strategy*. URL https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_en – Überprüfungsdatum 2022-07-25
- [3] BUNDESMINISTERIUM FÜR KLIMASCHUTZ, UMWELT, ENERGIE, MOBILITÄT, INNOVATION UND TECHNOLOGIE: *Energie in Österreich : Zahlen, Daten, Fakten*. Wien, 2021
- [4] DIENDORFER, Christian ; GAHLEITNER, Bernhard ; BERNHARD DACHS ; KIENBERGER, Thomas ; PETER NAGOVNAK ; BÖHM, Hans ; SIMON MOSER ; THENIUS, Gregor ; KARINA KNAUS: *Klimaneutralität Österreichs bis 2040 : Beitrag der österreichischen Industrie*. September 2021
- [5] STATISTIK AUSTRIA: *Nutzenergieanalyse*. URL <https://www.statistik.at/statistiken/energie-und-umwelt/energie/nutzenergieanalyse>. – Aktualisierungsdatum: 2022-05-16 – Überprüfungsdatum 2022-07-25
- [6] STATISTIK AUSTRIA: *Energieeinsatz der Haushalte*. URL <https://www.statistik.at/statistiken/energie-und-umwelt/energie/energieeinsatz-der-haushalte>. – Aktualisierungsdatum: 2022-06-03. – Überprüfungsdatum 2022-07-25
- [7] WIEN ENERGIE: *Weiter Weg zur erneuerbaren Wärmeversorgung*. URL <https://positionen.wienenergie.at/wissenshub/energie-dashboard/erneuerbaren-anteil-waerme/> – Überprüfungsdatum 2022-07-25
- [8] KLIMA- UND ENERGIEFONDS: *INXS Industrial Excess Heat – Erhebung industrieller Abwärmepotentiale in Österreich*. URL <https://energieforschung.at/projekt/industrial-excess-heat-erhebung-industrieller-abwaermepotentiale-in-oesterreich/> – Überprüfungsdatum 2022-08-16
- [9] BRÜCKNER, Sarah: *Industrielle Abwärme in Deutschland : Bestimmung von gesichertem Aufkommen und technischer bzw. wirtschaftlicher Nutzbarkeit*. München, Technische Universität München, Lehrstuhl für Energiesysteme. Dissertation. 2016. URL <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1310042/1310042.pdf>
- [10] VEREIN DEUTSCHER INGENEURE: *Energiekenngrößen : Definitionen, Begriffe, Methodik*. Berlin : Beuth, 2003 (VDI-Richtlinien 4661)

- [11] HIRZEL, Simon ; SONTAG, Benjamin ; ROHDE, Clemens: *Industrielle Abwärmenutzung. Kurzstudie* (2013). URL https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2013/Kurzstudie_Abwaermenutzung.pdf – Überprüfungsdatum 2022-08-16
- [12] GRUBER-GLATZL, Wolfgang ; KRAINZ, Rebecca ; FLUCH, Jürgen ; MAUTHNER, Franz ; HAMMER, Andreas ; LACHNER, Elisabeth ; KIENBERGER, Thomas ; MARCUS HUMMEL, Andreas: *Abwärmekataster III Steiermark*
- [13] ELSTNER, Marcus: *Physikalische Chemie*. Berlin : Springer Spektrum, 2017 (Lehrbuch)
- [14] BUCHHOLZ, Martin: *Energie – Wie verschwendet man etwas, das nicht weniger werden kann?* 2., erweiterte und korrigierte Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer, 2019
- [15] LUCAS, Klaus: *Thermodynamik : Die Grundgesetze der Energie- und Stoffumwandlungen*. 7. korrigierte Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer, 2008 (Springer-Lehrbuch)
- [16] HERBRIK, Richard: *Energie- und Wärmetechnik : Mit 23 Tabellen*. 2., vollst. überarb. und erw. Aufl. Stuttgart : Teubner, 1993
- [17] STEPHAN, Peter (Hrsg.); KABELAC, Stephan (Hrsg.); KIND, Matthias (Hrsg.); MEWES, Dieter (Hrsg.); SCHABER, Karlheinz (Hrsg.); WETZEL, Thomas (Hrsg.): *VDI-Wärmeatlas : Fachlicher Träger VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen*. 12. Aufl. 2019. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2019 (VDI Springer Reference)
- [18] SOLLESNES, Geir ; HELGERUD, Hans E.: *Potensialstudie for ptnyttelse av spillvarme fra norske industri*. 2009
- [19] MCKENNA, Russell: *Industrial energy efficiency: Interdisciplinary perspectives on the thermodynamic, technical and economic constraints*. Bath, University of Bath, Mechanical Engineering. PhD. 2009
- [20] BERGER, Helmut ; HOENIG, Volker: *Energieeffizienz der österreichischen Zementindustrie*. 2010
- [21] LU, Hongyou ; PRICE, Lynn ; ZHANG, Qi: *Capturing the invisible resource: Analysis of waste heat potential in Chinese industry*. In: *Applied Energy* 161 (2016), S. 497–511
- [22] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (Hrsg.): *Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U.S. Industry*. 2008
- [23] SZEDNYJ, Ilona ; BRANDHUBER, Doris: *Stand der Technik zur Kalk-, Gips und Magnesiaherstellung : Beschreibung von Anlagen in Österreich*. 2007
- [24] MAUSCHITZ, Gerd: *Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie : Berichtsjahr 2020*. Wien, 2021

- [25] ÖSTERREICHISCHE EMISSIONSHANDELSREGISTERSTELLE: *Tabelle "Stand der Einhaltung" für Anlagen für das Jahr 2019*. 2020
- [26] WIG WIETERSDORFER HOLDING GMBH: *Geschäftsfelder Zement und Beton*. URL <https://www.wietersdorfer.com/geschaeftsfelder/zement-und-beton/> – Überprüfungsdatum 2022-09-13
- [27] SCHORCHT, Frauke ; KOURTI, Ioanna ; SCALET, Bianca Maria ; ROUDIER, Serge ; DELGADO SANCHO, Luis: *Best available techniques (BAT) reference document for the production of cement, lime and magnesium oxide : Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (integrated pollution prevention and control)*. Luxembourg : Publications Office, 2013 (EUR, Scientific and technical research series 26129)
- [28] HOENIG, Volker ; SEILER, Cornelia ; BODENDIEK, Nils ; HOPPE, Helmut: *Einsatz alternativer Rohstoffe im Zementherstellungsprozess : Hintergrundwissen, technische Möglichkeiten und Handlungsempfehlungen*. 13.02.2015
- [29] WOLF-HASLAUER, Eva: *Nachhaltigkeitsbericht 2018 - w&p Kalk*. 2018
- [30] EULA: *Kiln Types*. URL <https://www.eula.eu/about-lime-and-applications/production/kiln-types/> – Überprüfungsdatum 2022-09-20
- [31] UMBELTBUNDESAMT ÖSTERREICH: *Chemische Industrie*. URL <https://www.umweltbundesamt.at/industrie/chemische-industrie> – Überprüfungsdatum 2023-08-11
- [32] KRAPF, Christina: *ESIM Chemicals GmbH & Vertellus Specialties Austria GmbH - Umwelterklärung 2021*. Linz, 2021
- [33] METADYNEA AUSTRIA GMBH: *Über Metadynea Austria*. URL <https://www.metadynea.com/de/about> – Überprüfungsdatum 2022-09-22
- [34] METADYNEA AUSTRIA GMBH: *Gesundheit, Sicherheit und Umwelt*. URL <https://metadynea.com/de/responsibility> – Überprüfungsdatum 2022-09-24
- [35] SAMMER, Günther ; SCHINDLER, Ilse: *BAT for Large Volume Organic Chemicals and Production in Austria*. Wien, 2001
- [36] UMBELTBUNDESAMT ÖSTERREICH (Hrsg.): *Sulphuric Acid Production : Installation 1*. Wien, 2017
- [37] ATMOSA AUSTRIA GMBH: *Phthalic Anhydride*. URL <https://www.atmosa.at/products/phthalic-anhydride> – Überprüfungsdatum 2022-09-27

- [38] RAY, Martyn S. ; SNEESBY, Martin G.: *Chemical engineering design project : A case study approach ; (production of Phthalic Anhydride)*. 2nd ed. Amsterdam : Gordon & Breach, 1998
- [39] MÜLLER, Christian ; BONITZ, Wolfgang ; KUNZ, Maximilian: *Nachhaltigkeitsbericht 2021 für Novartis Österreich : mit integrierter Umwelterklärung für die Sandoz GmbH Standorte Kundl und Schaftebau*. 2021
- [40] LINSTROM, Peter: *NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database 69*. 1997
- [41] FÜRHAPTER, Peter: *Thermische Verfahrenstechnik in der Bindemittel- und Baustoffindustrie*. 2007 (Vorlesungsunterlage an der Montanuniversität Leoben)
- [42] ÖSTERREICHISCHE EMISSIONSHANDELSREGISTERSTELLE: *Tabelle "Stand der Einhaltung" für Anlagen für das Jahr 2013*
- [43] 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://studmail.unileoben.ac.at/imp/view.php?ctype=application%2Fpdf&actionID=view_attach&id=2&muid=%7B5%7DINBOX4399&view_token=B0WiFhoRgwHXB8ejeEgC1oA&uniq=1678201240645 – Überprüfungsdatum 2023-03-07
- [44] HAUSLEITNER, Hannes: *Umwelterklärung 2020 : Aktualisierte Umwelterklärung für die Standorte Linz, Steyring und Traisen*. 2020
- [45] KROIB, Peter: *Aktualisierte Umwelterklärung 2020 : w&p Kalk GmbH Produktionsstandort Peggau*. 2020
- [46] BUNDESMINISTERIUM FÜR KLIMASCHUTZ, UMWELT, ENERGIE, MOBILITÄT, INNOVATION UND TECHNOLOGIE (Hrsg.): *Standardfaktoren für Brennstoffe aus der nationalen Treibhausgasinventur zur Anwendung für die Ebene 2a in Österreich : gültig 2019 bis 2021*. Wien, 2019
- [47] SPECHT, E. ; WARNECKE, G. ; DO HAI, D. ; SCHMIDT, O. S.: *Untersuchung des Einflusses der Korngrößenverteilung und der Betriebsbedingungen auf die Qualität und den Energieverbrauch beim Brennen von Kalk in Schachtöfen*. Köln, 2011
- [48] SAACKE GMBH (Hrsg.): *Faustformelsammlung*. 8. Aufl.
- [49] A. ROINE: *HSC Chemistry* : Outotec, 2012
- [50] SPEKTRUM.DE: *Luftfeuchte*. Lexikon der Geowissenschaften. URL <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/luftfeuchte/9781> – Überprüfungsdatum 2023-01-28

- [51] FIERRO, José J. ; ESCUDERO-ATEHORTUA, Ana ; NIETO-LONDOÑO, César ; GIRALDO, Mauricio ; JOUHARA, Hussam ; WROBEL, Luiz C.: *Evaluation of waste heat recovery technologies for the cement industry*. In: *International Journal of Thermofluids* 7-8 (2020), S. 100040