



Lehrstuhl für Energieverbundtechnik

Masterarbeit

Ermittlung von Abwärmepotenzialen in der
Sappi Gratkorn mit anschließender
Machbarkeitsstudie zur Erzeugung von
Niederdruckdampf durch Abwärme

Alexandra Petru, BSc

Oktober 2022



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 25.10.2022

Unterschrift Verfasser/in
Alexandra Petru

KURZFASSUNG

Diese Masterarbeit soll eine Übersicht der Abwärmequellen und deren Potenziale in der Produktionslinie 4 des Papierherstellers Sappi Gratkorn liefern, um diese im weiteren Verlauf für geeignete Wärmesenken zu nutzen. Zusätzlich wird eine Machbarkeitsstudie zur Erzeugung von Niederdruckdampf aus Abwärme durchgeführt. Mithilfe von Abwärmenutzung kann der Energiebedarf wie auch CO₂-Ausstoß deutlich reduziert werden. Aufgrund von steigenden Energiepreisen können auch beträchtliche Kosten eingespart werden. Vor allem in energieintensiven Industriebetrieben, wie der Papierindustrie, ist die Nutzung von Abwärme sinnvoll. Zu Beginn dieser Arbeit wird im Allgemeinen auf die industrielle Abwärmenutzung eingegangen. Im Anschluss daran wird Einblick in die Prozessschritte der Papierherstellung und deren Wärmebedarf gewährt, um relevante Wärmequellen und -senken in der Papierindustrie ausfindig zu machen. Im Mittelpunkt der Arbeit steht die Analyse der wärmerlevanten Anwendungen der Produktionslinie 4 der Sappi Gratkorn und die darauffolgende Machbarkeitsstudie zur Erzeugung von Niederdruckdampf. Im Zuge der Analyse werden vorhandene Abwärmequellen und mögliche Wärmesenken ermittelt und auf ihre Eignung zur Nutzung beurteilt. In der Machbarkeitsstudie werden dann jene Abwärmeströme mit den höchsten Potenzialen zur Erzeugung von Niederdruckdampf herangezogen und deren Wärmeleistungen ermittelt. Darauf aufbauend können Abwärmenutzungstechnologien ausgelegt werden und deren Realisierbarkeit mittels einer zusätzlichen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bewertet werden.

ABSTRACT

This master thesis is intended to provide an overview of the waste heat sources and their potentials in production line 4 of Sappi Gratkorn in order to use them for suitable heat sinks in the further course. In addition, a feasibility study on the generation of low-pressure steam from waste heat will be carried out. With the help of waste heat utilization, the energy demand as well as CO₂ emissions can be significantly reduced. Due to rising energy prices, considerable costs can also be saved. Especially in energy-intensive industrial plants, such as the paper industry, the use of waste heat makes sense. At the beginning of this paper, industrial waste heat utilization will be discussed in general. This is followed by an insight into the process steps in paper production and their heat requirements in order to identify relevant heat sources and sinks in the paper industry. The focus of the work is the analysis of the heat-relevant applications of production line 4 of Sappi Gratkorn and the subsequent feasibility study for the generation of low-pressure steam. In the course of the analysis, existing waste heat sources and possible heat sinks are identified and assessed for their suitability for use. In the feasibility study, those waste heat streams with the highest potential for the generation of low-pressure steam are then identified and their heat outputs determined. Based on this, waste heat utilization technologies can be designed and their feasibility evaluated by means of an additional economic feasibility study.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
2	Aufgabenstellung.....	3
	2.1 Vorgehensweise.....	3
3	Einführung in die industrielle Abwärmenutzung	4
	3.1 Unterscheidungsmerkmale der Abwärme.....	4
	3.2 Technologien zur Nutzung von Abwärme	6
	3.2.1 Wärmetauscher.....	7
	3.2.2 Wärmepumpe	7
	3.2.2.1 Kompressionswärmepumpe	10
	3.2.2.2 Sorptionswärmepumpe.....	10
	3.3 Industrielle Abwärmenutzungspotenziale.....	12
	3.3.1 Abwärmenutzungspotenziale in verschiedenen Industriebereichen	14
	3.3.2 Anwendungsbeispiele für Abwärmenutzungstechnologien in unterschiedlichen Industriebetrieben	16
	3.4 Förderprogramme	18
4	Abwärmenutzungspotenziale in der Papierindustrie.....	20
	4.1 Grundlagen der Papier- und Zellstoffherstellung.....	20
	4.2 Wärmebedarf bei der Papierherstellung.....	24
	4.3 Übersicht der Abwärmequellen und -senken in der Papierindustrie.....	25
5	Potenzialanalyse zur Abwärmenutzung in der Sappi Gratkorn	28
	5.1 Beschreibung der wärmerlevanten Anwendungen in der Produktionslinie 4	28
	5.1.1 Übersicht der gefundenen Abwärmequellen und -senken.....	31
	5.2 Ermittlung der Abwärmenutzungspotenziale	32
	5.2.1 Berechnung der Wärmeleistung der Abluft.....	32
	5.2.2 Berechnung der Wärmeleistung des Abwassers	33
	5.2.3 Berechnung der Wärmeleistung der Kühltürme.....	33
	5.2.4 Übersicht der berechneten Wärmeleistungen	34

5.3 Feasibility Study zur Niederdruckdampferzeugung in der PL4 durch Abwärmenutzung	37
5.3.1 Bewertung der Abwärmequellen für die Erzeugung von Niederdruckdampf.....	38
5.3.2 Konzept zur Umsetzung der Niederdruckdampferzeugung	40
5.3.2.1 Messung der Temperaturen und Strömungsgeschwindigkeiten.....	42
5.3.2.2 Berechnung der Wärmeleistungen	43
5.3.2.3 Berechnung der jährlich abgegebenen Wärmeleistungen	44
5.3.2.4 Darstellung und Interpretation der gemessenen Temperaturen	45
5.3.2.5 Darstellung und Interpretation der berechneten Jahreswärmeleistungen beispielhaft an Messpunkt 24 dargelegt.....	49
5.3.2.6 Darstellung und Interpretation sämtlicher berechneten Wärmeleistungen	51
5.3.2.7 Auslegung der ausgewählten Abwärmenutzungstechnologien	54
5.3.2.8 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	57
6 Zusammenfassung und Ausblick.....	63
7 Literaturverzeichnis	65
8 Anhang	69

NOMENKLATUR

Abkürzungen

WP	Wärmepumpe
HTWP	Hochtemperaturwärmepumpe
VHTWP	Very High Temperature (Höchsttemperatur) -Wärmepumpe
COP	Coefficient of Performance (Leistungszahl)
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
ORC	Organic-Rankine-Cycle
DIP	Deinking-Prozess
PL	Produktionslinie
PM	Papiermaschine
SM	Streichmaschine
WT	Wärmetauscher
WRG	Wärmerückgewinnung
IR	Infrarotstrahlungstrockner
AWP	Absorptionswärmepumpe
KWP	Kompressionswärmepumpe
Hu	Unterer Heizwert
EF	Emissionsfaktor
ü	Überdruck
abs	Absolutdruck
d	Durchmesser
v	Geschwindigkeit
V	Volumen
Q	Wärmemenge
T	Temperatur

Nomenklatur

c	Wärmekapazität
N	zugeführte Leistung
η	Wirkungsgrad
m	Masse
K	Kosten
p	Druck
EUR	Euro
ROI	Return on Investment

Indizes

PJ	Petajoule
GJ	Gigajoule
kW	Kilowatt
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunde
TWh	Terrawattstunde
€	Euro
%	Prozent
°C	Grad Celsius
K	Kelvin
Mio	Millionen
kg	Kilogramm
m	Meter
mm	Millimeter
min	Minuten
h	Stunden

Nomenklatur

s	Sekunden
a	Jahre
t	Tonne
g	Gramm
l	Liter
Bm ³	Betriebskubikmeter
Nm ³	Normkubikmeter
m ²	Quadratmeter
mm ²	Quadratmillimeter
g/mm ²	Gramm pro Quadratmillimeter (Grammatur)
hPa	Hektopascal
bar	Bar

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Energetischer Endverbrauch in Österreich für 2019 nach Wirtschaftssektoren [1]	1
Abbildung 2: Energetischer Endverbrauch in Österreich nach Energieträgern von 1995 bis 2019 [5]	1
Abbildung 3: Energetischer Endverbrauch in Österreich nach dem Verwendungszweck für 2019 [5]	2
Abbildung 4: Schematischer Vergleich zwischen Wärmerückgewinnung (li.) und Abwärmenutzung (re.) [9].....	6
Abbildung 5: Übersicht der unterschiedlichen Technologien zur Nutzung von Abwärme [9] ..	6
Abbildung 6: Schematisches Funktionsprinzip einer Wärmepumpe [13]	8
Abbildung 7: Zusammenhang zwischen theoretischer bzw. realer Leistungszahl und dem Temperaturgefälle [8]	9
Abbildung 8: Einteilung der Wärmepumpen nach thermodynamischen Systemen [7]	9
Abbildung 9: Einteilung der Wärmepumpen nach dem vorhandenen Temperaturniveau [7]	10
Abbildung 10: Schematisches Funktionsprinzip einer Absorptionswärmepumpe [16]	11
Abbildung 11: Schematisches Funktionsprinzip einer Adsorptionswärmepumpe [16]	12
Abbildung 12: Übersicht der Potenzialbegriffe mit abgrenzenden Parametern [18].....	13
Abbildung 13: Übersicht verschiedener Industrieprozesse nach deren Prozesstemperaturen und verfügbaren Wärmepumpen gegliedert [24]	15
Abbildung 14: Übersicht der technischen Potenziale für die Integration von Wärmepumpen in den einzelnen Industriebranchen [25].....	16
Abbildung 15: Gegenüberstellung von Abwärmequellen und deren Nutzungsmöglichkeiten in Abhängigkeit vom Temperaturniveau [27].....	17
Abbildung 16: Fließschema eines Zellstoff- und Papierherstellungsverfahrens [37]	21
Abbildung 17: Schema einer Papiermaschine [39]	22
Abbildung 18: Übersicht einzelner Prozesse in der Papier-, Pappe- und Kartonproduktion mit dem jeweiligen absoluten und spezifischen Energieeinsatz [15]	24
Abbildung 19: Übersicht an Möglichkeiten zur Abwärmenutzung in der Papierindustrie hinsichtlich technischer (unteres Dreieck) und wirtschaftlicher (oberes Dreieck) Realisierbarkeit (schwarz = hohes Potenzial, grau = mittleres Potenzial, weiß = geringes Potenzial) [44]	26
Abbildung 20: Input- und Outputströme der PL 4	29

Abbildung 21: Bewertungsmatrix der verfügbaren Abwärmequellen zur Erzeugung von Niederdruckdampf mit den aktuell verfügbaren Technologien (grün = hohes Potenzial, gelb = vorhandenes Potenzial aber nicht für die Dampferzeugung, rot = geringes Potenzial).....	39
Abbildung 22: Visualisierung der Maßnahmen zur Niederdruckdampferzeugung mithilfe zwei Wärmetauscher und einer Absorptionswärmepumpe.....	41
Abbildung 23: Gemessene Ablufttemperaturen in Abhängigkeit der Papiergrammaturen....	46
Abbildung 24: Prozentuelle Aufteilung der gemessenen Ablufttemperatur des Messpunktes 24 nach Betriebsstunden	48
Abbildung 25: Aufbau eines Rippenrohr-Wärmetauschers [46].....	55
Abbildung 26: Aufbau einer Absorptionswärmepumpe der Kategorie 2 [47].....	56

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Einteilung der Wärmetauscher nach Aggregatzustand [11]	7
Tabelle 2: Berechnete Wärmeleistungen der in der PL 4 erfassten Abwärmeströme	35
Tabelle 3: Übersicht der untersuchten Messpunkte mit deren Bezeichnungen und dazu gehörigen Anlagennummern	43
Tabelle 4: Produktionszeiten der einzelnen Papiersorten im Zeitraum von 13.08.2022 16:09 Uhr – 19.08.2022 21:21 Uhr.....	47
Tabelle 5: Gruppierung (1 – 6) ähnlich hergestellter Papiersorten für die Jahreshochrechnung	47
Tabelle 6: Übersicht der mittleren Ablufttemperaturen und -wärmeleistungen des Messpunktes 24 zu den einzelnen Papiersorten für die direkte Abwärmenutzung mit der Abkühltemperatur 150 °C.....	49
Tabelle 7: Übersicht der mittleren Ablufttemperaturen und -wärmeleistungen des Messpunktes 24 zu den einzelnen Papiersorten für die indirekte Abwärmenutzung mit der Abkühltemperatur 80 °C.	49
Tabelle 8: Übersicht der ganzjährigen mittleren Gesamtwärmeleistungen des Messpunktes 24 zu den einzelnen Papiersorten für die direkte und indirekte Abwärmenutzung.....	50
Tabelle 9: Übersicht aller mittleren Abluftwärmeleistungen für die direkte Abwärmenutzung mit einer Abkühltemperatur von 150 °C.....	51
Tabelle 10: Übersicht aller mittleren Abluftwärmeleistungen für die indirekte Abwärmenutzung mit einer Abkühltemperatur von 80 °C.....	52
Tabelle 11: Übersicht aller mittleren Abluftwärmeleistungen zu den einzelnen Papiersorten für die direkte Abwärmenutzung mit einer Abkühltemperatur von 150 °C.....	53
Tabelle 12: Übersicht aller mittleren Abluftwärmeleistungen zu den einzelnen Papiersorten für die indirekte Abwärmenutzung mit einer Abkühltemperatur von 80 °C.....	54
Tabelle 13: Übersicht der eingesparten Dampf- und Brennstoffmengen sowie CO ₂ -Zertifikate	59
Tabelle 14: Übersicht der Investitionskosten für die Anschaffung der Abwärmenutzungstechnologien.....	60

1 EINLEITUNG

In Österreich lag der gesamte Endenergieverbrauch für das Jahr 2019 bei 1.140,5 PJ, wovon der industrielle Sektor, wie in Abbildung 1 ersichtlich ist, einen Anteil von 28,3 % einnahm. Somit stellt dieser nach dem Verkehrssektor den größten Endverbraucher in Österreich dar. [1]

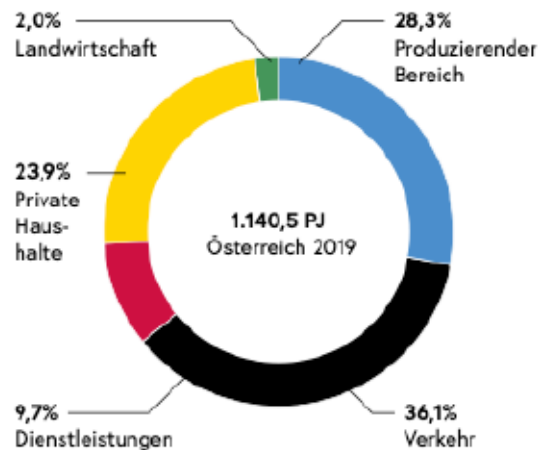


Abbildung 1: Energetischer Endverbrauch in Österreich für 2019 nach Wirtschaftssektoren [1]

Zu den energieintensiven Industriebereichen in Österreich zählen u. A. Glas, Chemie, Eisen und Stahl, Papier sowie die Nichteisenmetallurgie [2]. Der Abbildung 2 kann entnommen werden, dass der größte Anteil an der Endenergie durch Erdöl gedeckt wird, gefolgt von elektrischer Energie und Gas [3]. Abbildung 3 zeigt auf, dass in etwa die Hälfte des Energiebedarfs für Wärmeanwendungen, wie Dampf- und Heißwassererzeugung, Trocknungs-, Wasch- sowie Reinigungsprozesse und weitere herangezogen wird [4].

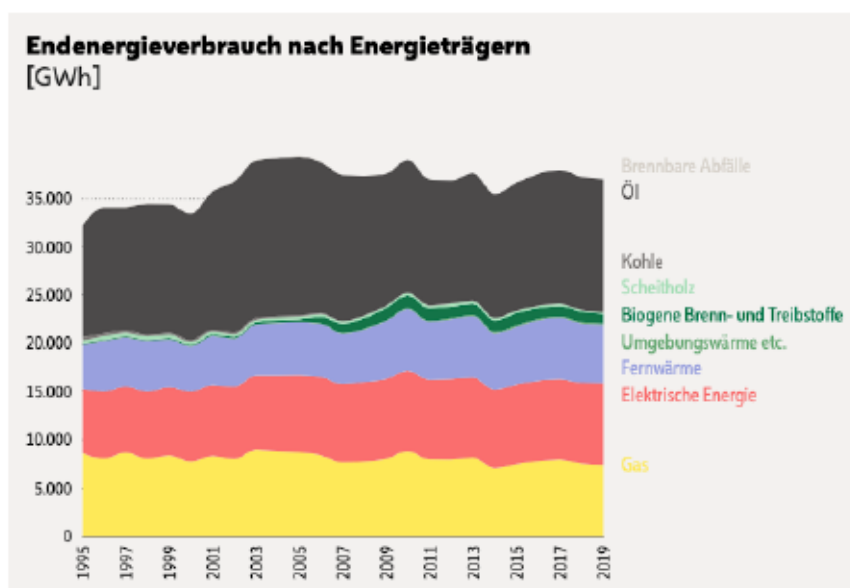


Abbildung 2: Energetischer Endverbrauch in Österreich nach Energieträgern von 1995 bis 2019 [5]

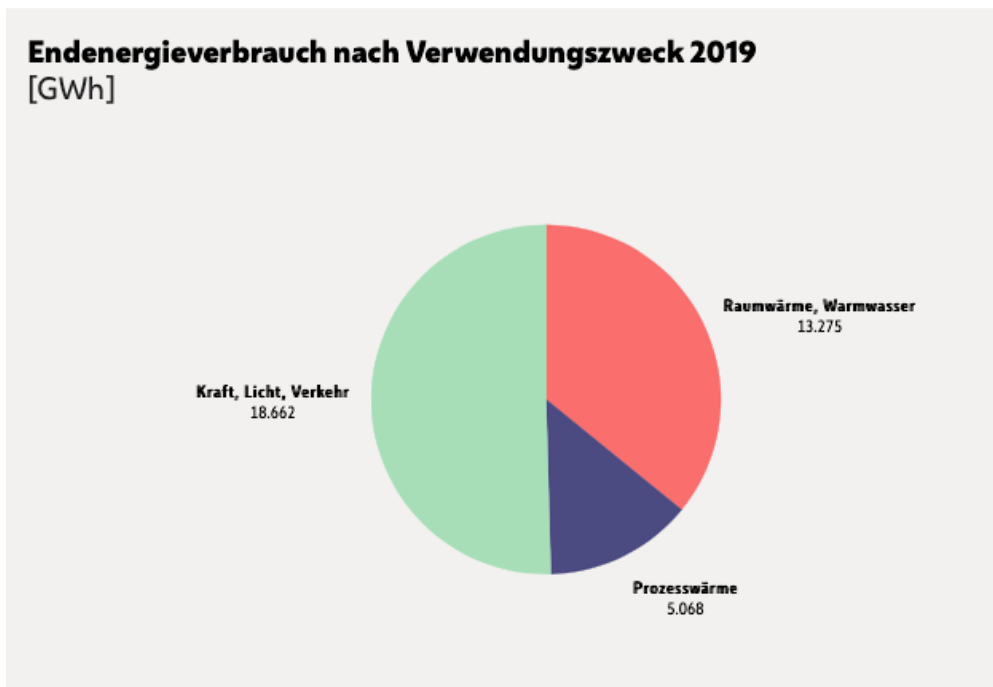


Abbildung 3: Energetischer Endverbrauch in Österreich nach dem Verwendungszweck für 2019 [5]

Hier gibt es nicht nur einen hohen Bedarf an Investitionen für den Ausbau von erneuerbaren Energien sondern auch an Effizienzsteigerung, da beispielsweise bis zu 70 % der eingesetzten Wärmeenergie in Abwasser oder Abluft übergehen [6]. Durch sorgfältige Integration von Abwärmenutzungstechnologien kann ein beträchtlicher Teil der industriell eingesetzten Wärme wieder rückgewonnen werden, wodurch Energie sowie CO₂-Emissionen und damit einhergehende Kosten eingespart werden können [7].

2 AUFGABENSTELLUNG

Ziel dieser Arbeit ist es, im Rahmen einer Machbarkeitsstudie Abwärmepotenziale in der Produktionslinie 4 der Sappi Gratkorn zu erheben und Möglichkeiten zu deren effektiven Nutzung aufzuzeigen. Speziell die Erzeugung von Niederdruckdampf mit 142 °C und 3,8 bar (abs) durch die Verwendung von Abwärme wird betrachtet. Dabei werden auch geeignete Technologien zur Abwärmenutzung festgelegt, um neben der Untersuchung der technischen Realisierbarkeit eine Beurteilung zur Wirtschaftlichkeit zu treffen. Die im Zuge dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse sollen als Grundlage für die Entscheidung, ob ein Projekt zu dieser Thematik durchgeführt werden kann, dienen.

2.1 Vorgehensweise

Zu Beginn dieser Arbeit wurden Literaturrecherchen bezüglich der industriellen Abwärmenutzung betrieben. Auf diese Weise konnten Informationen zur allgemeinen Definition der Abwärme wie auch zu deren Unterscheidungsmerkmalen und Nutzungsmöglichkeiten beschaffen werden. Unterschiedliche Technologien zur Umsetzung einer Abwärmenutzung wurden dabei erfasst. Zudem wurden bereits identifizierte Abwärmepotenziale verschiedener Industriebranchen aus diversen Studien für eine erste Einschätzung betrachtet. Anschließend wurde der Fokus auf Abwärmepotenziale in der Papierindustrie gelegt, wodurch Eindrücke zu den vorhandenen Wärmesenken und -quellen erhalten werden konnten. Im weiteren Verlauf wurden die wärmerlevanten Anwendungen der Produktionslinie 4 in der Sappi untersucht, charakterisiert und mithilfe des Diagramm- und Zeichentoolprogramms „diagrams.net“ grafisch dargestellt. Durch Veranschaulichung der bestehenden Prozesse konnte eine Übersicht der verfügbaren Wärmesenken und Abwärmequellen erstellt werden. Infolgedessen wurde eine Abschätzung unter Einbeziehung von fachspezifischen Beratern getroffen, welche Abwärmequellen für die Erzeugung von Niederdruckdampf geeignet sind. Im Anschluss daran wurden Messungen jener Quellen erhoben, Berechnungen zu verfügbaren Wärmeleistungen durchgeführt und auf Basis dessen ein technisches Aggregat ausgelegt. Abschließend wurden die durch Abwärmenutzung eingesparten Brennstoffkosten bestimmt und den ermittelten Investitionskosten gegenübergestellt, um die Machbarkeitsstudie zu untermauern.

3 EINFÜHRUNG IN DIE INDUSTRIELLE ABWÄRMENUTZUNG

Die Abwärme wird als jener Wärmestrom bezeichnet, welcher die Anlage verlässt und nicht der Erzeugung der Zielenergie zuzurechnen ist. Diese tritt hauptsächlich als Verbrennungswärme in Öfen, als Verlustwärme aus Produktionsmaschinen, in chemischen Prozessen und auch als Produktionshallenabluft auf und muss mit Hilfe von geeigneten Kühlmitteln abtransportiert werden. Die Wärmeleistung \dot{Q} lässt sich anhand der Temperaturdifferenz ΔT zwischen der Wärmesenke und -quelle, der spezifischen Wärmekapazität c sowie des Medienmassenstroms \dot{m} durch Formel 3-1 ermitteln.

$$\dot{Q} = \dot{m} * c * \Delta T \quad (3-1)$$

Dieser mathematische Zusammenhang beschreibt, dass je größer die Temperaturdifferenz bzw. der Massenstrom ist, desto größer wird die Wärmemenge. Außerdem ist die zeitliche Verfügbarkeit der Abwärme für die Nutzbarkeit von Bedeutung. Ein kontinuierlicher Abwärmestrom trägt wesentlich zur Wirtschaftlichkeit einer Nutzung bei. Des Weiteren sind Einschränkungen der Verwendbarkeit durch die räumliche Entfernung zwischen Wärmesenke und -quelle sowie durch Verschmutzungen gegeben. [4] Bedeutende Abwärmequellen in der Industrie sind [8]:

- Rauchgase
- Dampf von Destillations- und Eindampfprozessen
- Kühlturm-Reservoirwasser
- Abluft von Trocknungsanlagen (z.B. Papiermaschinen)
- Abwasser
- Kondensat der Dampfturbinen
- Kühlwasser von Pressmaschinen, Kompressoren und chemischen Reaktoren

Bevor Nutzungspotenziale der industriellen Abwärme abgeschätzt werden können, sollte der jeweilige Prozess optimiert werden. Darunter versteht sich die Reduktion des Nutzenergiebedarfs auf das notwendigste Minimum mithilfe variabler Regelungstechnik oder das Substituieren veralteter Verfahren durch neuere moderne Prozesse. Sobald diese Maßnahmen getroffen wurden, wird die Abwärme in erster Linie für eine betriebsinterne Nutzung herangezogen und erst im letzten Schritt kann über die Auskopplung der Abwärme für externe Anwendungen diskutiert werden. [4]

3.1 Unterscheidungsmerkmale der Abwärme

Zur besseren Beurteilung des Abwärmepotenziales können folgende Eigenschaften betrachtet werden [9]:

- **Temperaturniveau:** Hier wird unterteilt in Niedertemperatur-, Mitteltemperatur- und Hochtemperaturabwärme.
- **Abwärmestrom:** Die anfallende Menge an Abwärme geht, wie oben bereits erwähnt, mit der zur Verfügung stehenden Wärmeleistung einher.
- **Branchen und Arten von Prozessen:** Zur besseren Abschätzung werden Abwärmepotenziale nach der Branche, in welcher diese anfallen, eingeteilt.
- **Erscheinungsform:** Abwärme kann entweder diffus als Strahlung oder durch Konvektion an Oberflächen abgegeben oder an einen Träger gebunden werden.
- **Trägermedium:** Um Abwärme zu binden werden gasförmige und flüssige Trägermedien wie Abluft, Abgas, Brüden, Dampf, Thermoöl und Kühl- bzw. Prozesswasser eingesetzt.
- **Verwendungszweck:** Grundsätzlich kann Abwärme für unterschiedliche Zwecke verwendet werden [10]:
 - **Anlagen- bzw. prozessinterne Nutzung:** Die Abwärme wird in derselben Anlage bzw. im selben Prozess verwendet, weshalb man hier auch von Wärmerückgewinnung spricht. Diese Methode ist die naheliegendste Variante, da diese kostengünstig und einfach zu konstruieren ist. Ein gängiges Beispiel wäre die Luftvorwärmung in Verbrennungsprozessen.
 - **Betriebsinterne Nutzung:** Diese Form wird dann angewandt, wenn die Nutzung der Abwärme durch die zuvor genannte Variante nicht erreichbar ist. Die Abwärme kann über zusätzliche Wärmeleitungen in anderen Produktionsprozessen, zur Warmwasserbereitstellung oder auch zur Raumluftbeheizung eingesetzt werden. Dies führt zur gegenseitigen Abhängigkeit der Anlagen bzw. Prozesse. Abbildung 4 soll den Unterschied zwischen der prozess- und betriebsinternen Nutzungsmöglichkeit bildlich veranschaulichen.
 - **Externe Nutzung:** In der Praxis wird darauf gesetzt, die Abwärme in erster Linie aufgrund der Transportverluste direkt am Industriestandort zu nutzen bevor diese an Dritte abgegeben wird. Nahe gelegene Unternehmen stellen mögliche Wärmeabnehmer dar. Außerdem kann die Abwärme ins Wärmenetz eingespeist und über Fernwärmeleitungen für z.B. Privathaushalte zugänglich gemacht werden.

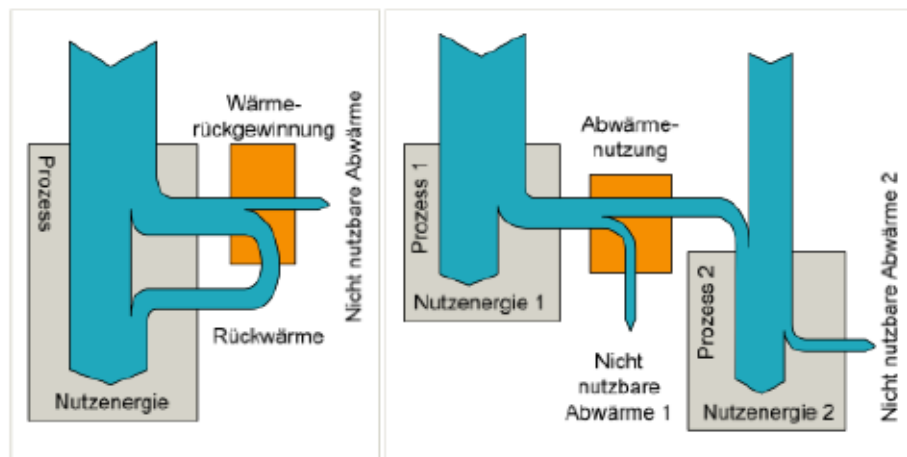


Abbildung 4: Schematischer Vergleich zwischen Wärmerückgewinnung (li.) und Abwärmenutzung (re.) [9]

3.2 Technologien zur Nutzung von Abwärme

Abwärme kann direkt oder auch indirekt eingesetzt werden. Bei der direkten Verwendung wird die Abwärme, welche ein gewisses Temperaturniveau aufweisen muss, unmittelbar wieder in das System eingespeist. Bei der indirekten Nutzung wird das Temperaturniveau mithilfe externer Energiezufuhr für thermische Prozesse angehoben oder die Abwärme für anderweitige Energieformen, wie Strom oder Kälte, bereitgestellt. Die Technologien der Abwärmenutzung umfassen die Aufnahme, den Transport und die Umwandlung der Abwärme sowie das Anheben deren Temperaturniveaus. Nachfolgende Abbildung 5 stellt einen Überblick der verschiedenen Technologien zur Abwärmenutzung dar. In diesem Kapitel wird auf die Wärmeauskopplung durch Wärmetauscher sowie auf Wärmepumpen, welche als Kompressions- oder Sorptionswärmepumpen ausgeführt werden, eingegangen. [4] [9]

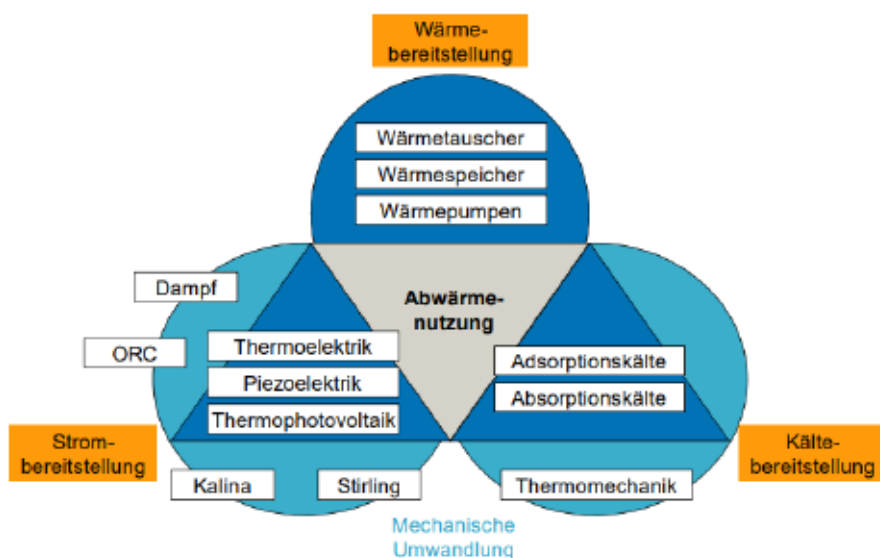


Abbildung 5: Übersicht der unterschiedlichen Technologien zur Nutzung von Abwärme [9]

3.2.1 Wärmetauscher

Bei Wärmetauschern handelt es sich um Apparate, welche eine Verschiebung von zugeführten Energien in die Richtung der Wärmesenke bewerkstelligen. Flüssigkeiten, Gase oder Dämpfe mit hoher Temperatur übertragen ihre Wärme auf Stoffe mit niedrigerer Temperatur. Bei rekuperativen Wärmetauschern sind die Medien dabei durch zylindrische, spiralige oder ebene Flächen voneinander abgetrennt. Die Größe der Fläche geht mit der Höhe der zu übertragenden Wärme einher. Hierfür werden Plattenwärmetauscher, Wärmerohre und auch Kreislaufverbundsysteme eingesetzt. Bei regenerativen Wärmetauschern passiert die Wärmeübertragung mithilfe von Speichermedien durch abwechselndes Strömen beider Stoffe. Die gängigste Bauart sind Rotationswärmetauscher. Grundsätzlich können Wärmetauscher nach vielen Kriterien klassifiziert werden, wie beispielsweise nach dem Übertragungsmechanismus, der Bauart des Apparates oder dem Strömungsverhalten. Nachstehende Tabelle 1 bietet eine Übersicht der unterschiedlichen Arten von Wärmetauschern nach Aggregatzuständen der wärmeabgebenden und wärmeaufnehmenden Medien. [11] [12] [4]

Tabelle 1: Einteilung der Wärmetauscher nach Aggregatzustand [11]

Aggregatzustand: wärmeabgebendes/-aufnehmendes Medium	Apparat	Beschreibung
Flüssig/flüssig	Wärmetauscher, Vorwärmer	Wärmeübertragung von Kühlwasser auf Brauchwasser
Gas/Gas	Luftkühler	Vorwärmung der Frischluft mittels Abluft
Flüssig/Gas	Warmwasser- Heizung	Raumlufterwärmung durch Warmwasser

3.2.2 Wärmepumpe

Die Wärmepumpe nimmt Wärmeenergie bei einem niedrigem Temperaturniveau auf und gibt diese unter Zufuhr von hochwertiger Energie zu einem höheren Temperaturniveau wieder ab. Grundsätzlich kann die Wärmepumpe als ein System angesehen werden, welches sich, wie in folgender Abbildung 6 ersichtlich ist, aus Verdampfer, Verdichter, Verflüssiger/Kondensator und Expansionsventil zusammensetzt. [8]

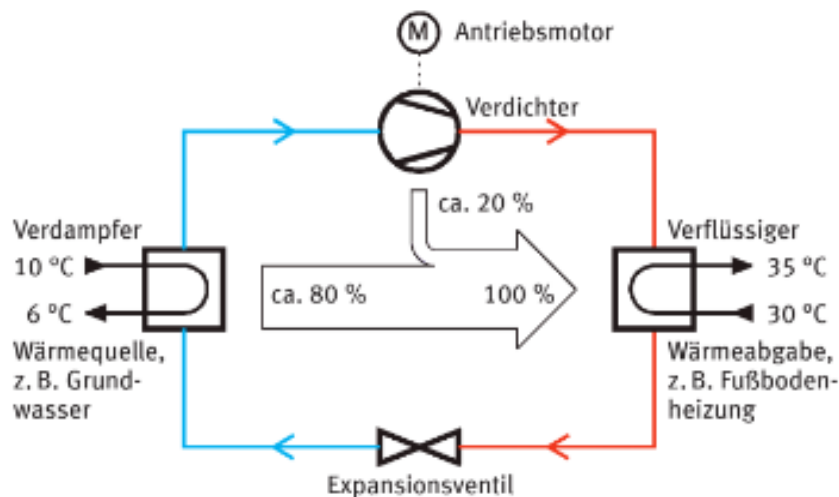


Abbildung 6: Schematisches Funktionsprinzip einer Wärmepumpe [13]

Hierbei handelt es sich um einen Linksprozess, bei dem einem Arbeitsmedium oder auch Kältemittel auf der Niederdruckseite Wärme aus einer Wärmequelle bis zur Verdampfung zugeführt wird. Dieses Medium wird im nächsten Schritt durch Zufuhr von zusätzlicher Energie verdichtet und anschließend im Kondensator unter Wärmeabgabe auf höherem Temperaturniveau verflüssigt. Mittels eines Expansionsventils wird das Kältemittel wieder entspannt. Im Idealfall bildet dieses Prinzip einen Carnot-Prozess ab. Die Wärmepumpe kann auch als Kältemaschine betrieben werden. Dabei bleibt das Prinzip gleich, lediglich die genutzte Energie ist eine andere. Während die Wärmepumpe zum Erwärmen eingesetzt wird, soll die Kältemaschine Wärme aus einer Umgebung wegtransportieren und somit kühlen. [8]

Mithilfe der Leistungszahl, welche auch als Coefficient of Performance (COP) bezeichnet wird, kann die Effizienz dieser Energieumwandlungsprozesse in einer Wärmepumpe beschrieben werden. Nach Formel 3-2 stellt diese das Verhältnis zwischen Nutzwärmeleistung \dot{Q}_N und effektiv zugeführter Leistung N_K bzw. den Kehrwert des Carnot'schen Wirkungsgrades η_c mit der oberen Prozesstemperatur T_o und der unteren Prozesstemperatur T_U dar.

$$COP_c = \frac{\dot{Q}_N}{N_K} = \frac{1}{\eta_c} = \frac{T_o}{T_o - T_U} \quad (3-2)$$

Der COP des Realprozesses lässt sich über den theoretischen COP und den Gesamtwirkungsgrad η_{ges} des Prozesses anhand Formel 3-3 errechnen. [14] [8]

$$COP_{real} = \eta_{ges} * COP_c \quad (3-3)$$

In Abbildung 7 kann man die reziproke Abhängigkeit vom COP und der Temperaturdifferenz zwischen der oberen und unteren Prozesstemperatur erkennen. Mit steigender Temperaturdifferenz nimmt die Leistungszahl ab.

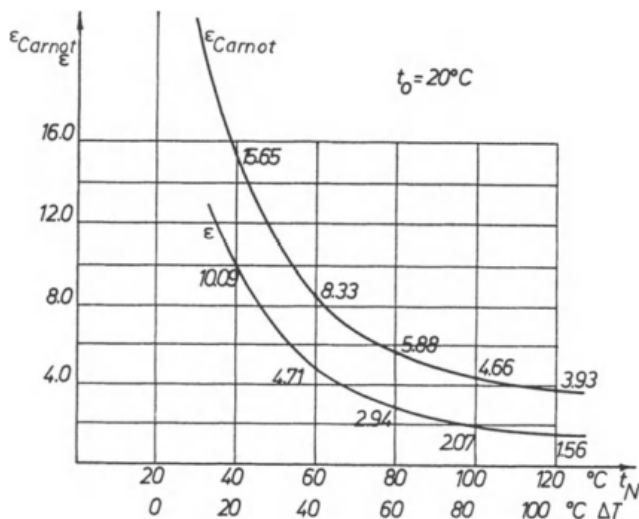


Abbildung 7: Zusammenhang zwischen theoretischer bzw. realer Leistungszahl und dem Temperaturgefälle [8]

Prinzipiell arbeitet die Wärmepumpe wirtschaftlich solange Abwärme in genügend hohen Massenströmen vorhanden und die Temperaturdifferenz zwischen Wärmesenke und -quelle nicht allzu groß ist. Die Jahresbetriebsstunden sollten hoch und die Kosten für die Antriebsenergie niedrig sein. Zusätzlich muss ein Abnehmer vorhanden sein, an den die Wärmeenergie abgegeben werden kann. [8]

Wärmepumpen lassen sich je nach Anforderung in offene und geschlossene Systeme einteilen. Bei offenen Systemen kommt es zusätzlich zum grenzüberschreitenden Wärmeaustausch auch zu einem Masseaustausch. Anschließende Abbildung 8 zeigt eine schematische Klassifizierung. Bei der Kompressionswärmepumpe handelt es sich um die meist verbreitete Ausführung.

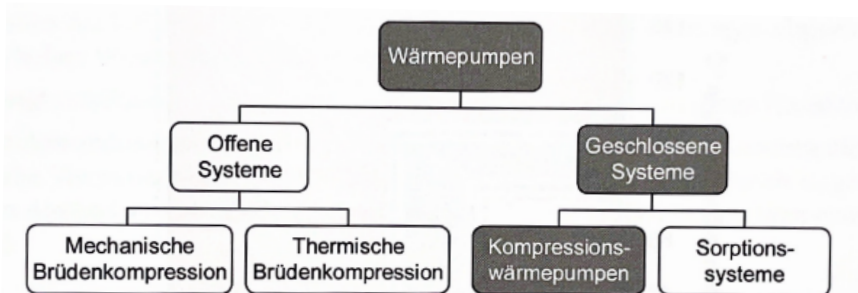


Abbildung 8: Einteilung der Wärmepumpen nach thermodynamischen Systemen [7]

Des Weiteren kann die Wärmepumpe auch nach verschiedenen Temperaturniveaus kategorisiert werden. Man unterscheidet dann hier zwischen der konventionellen Wärmepumpe (WP), der Hochtemperaturwärmepumpe (HTWP) und der Höchsttemperaturwärmepumpe (VHTWP). Letztere stellen zurzeit noch Prototypen dar. Die Abbildung 9 zeigt die zu erreichende Senkentemperatur in Abhängigkeit von der

Quellentemperatur. Konventionelle Wärmepumpen können bis zu 80 °C erreichen. Ab dann spricht man von Hochtemperatur- und Höchsttemperaturwärmepumpen. [7]

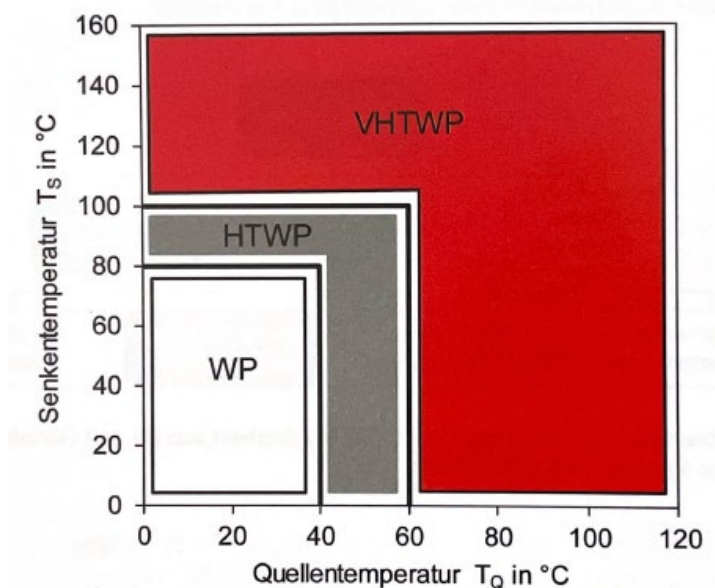


Abbildung 9: Einteilung der Wärmepumpen nach dem vorhandenen Temperaturniveau [7]

3.2.2.1 Kompressionswärmepumpe

Die Kompressionswärmepumpe ist dem geschlossenen System unterzuordnen und arbeitet nach dem Kaltdampfprinzip. Ein mechanischer Verdichter, welcher elektrisch oder durch Verbrennung angetrieben wird, dient als Kompressor für das Arbeitsmedium. Häufig eingesetzte Kältemittel sind beispielsweise R134a, R410A und R404A wie auch Propan, Ammoniak, Kohlendioxid und konventionelle FCKW. Kompressionswärmepumpen können Mehrstoffsyste me zur Leistungserhöhung verwenden, mit Einstoffmedien arbeiten oder zusätzlich einen Lösungskreislauf einsetzen. Des Weiteren lassen sich diese als einstufige oder auch mehrstufige Anlagen (Kaskadenschaltung) ausführen. Anlagen in Kaskaden geschaltet sind bei höheren Temperaturunterschieden zwischen Quelle und Senke wirtschaftlicher. Mithilfe von Kompressionswärmepumpe kann Abwärme mit über 100 °C, besonders für die Bereitstellung von Prozesskälte, sinnvoll genutzt werden. [8] [15] [16]

3.2.2.2 Sorptionswärmepumpe

Eine weitere Möglichkeit wäre die Wärmepumpe nach dem Absorptions- bzw. Adsorptionsprinzip arbeiten zu lassen. Der große Unterschied zur Kompressionswärmepumpe besteht darin, dass thermische Energie als Antrieb fungiert. Dadurch kann entweder Abwärme auf niedrigem Temperaturniveau auf ein höheres gehoben oder Abwärme zusammen mit Antriebswärme höherer Temperatur auf ein mittleres Temperaturniveau gebracht werden. [8]

Bei der Absorptionswärmepumpe wird der mechanische Kompressor durch einen thermischen ersetzt. Dieser setzt sich aus Absorber, Lösungspumpe, Wärmetauscher, Austreiber und Expansionsventil zusammen. Der thermische Kompressor arbeitet mit einem Zweistoffgemisch und komprimiert nicht das Kältemittel sondern trennt dieses von einem Lösungsmittel, wie beispielsweise Wasser, in eine mit Kältemittel angereicherte Lösung und in eine wenig angereicherte. Das gasförmige Kältemittel steht unter Druck und wird zum Kondensator weitergeleitet, in welchem es seine Wärme abgibt und dadurch verflüssigt wird. Im weiteren Verlauf durchströmt es ein Reduzierventil, wodurch es abkühlt und so Wärme im nachgeschalteten Verdampfer aufnehmen kann. Im Absorber wird das gasförmige Kältemittel durch das Lösungsmittel absorbiert und gibt erneut Wärme ab. Das Gemisch wird zum Austreiber gefördert, beheizt und wieder aufgetrennt. Abbildung 10 soll das hier beschriebene Funktionsprinzip erläutern. [8] [16]

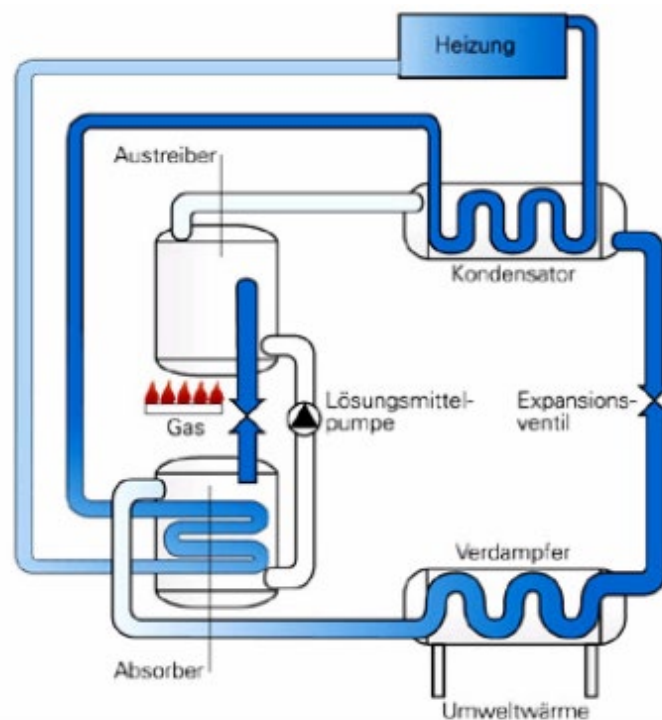


Abbildung 10: Schematisches Funktionsprinzip einer Absorptionswärmepumpe [16]

Absorptionswärmepumpen bestehen aus zwei Modulen. Der obere Bereich besteht aus dem Adsorber bzw. Desorber und enthält einen Wärmetauscher mit dem Adsorptionsmittel, wie beispielsweise Kieselgel, Aktivkohle, Bentonit oder Zeolith. Im unteren Teil, dem Kondensator oder Verdampfer, befindet sich ein weiterer Wärmetauscher. Zuerst wird das Adsorptionsmittel erwärmt, wodurch das Kältemittel Wasser desorbiert und dampfförmig in den unteren Bereich geleitet wird. Dort kondensiert der Wasserdampf und gibt Wärme ab. Sobald das gesamte Wasser übergegangen und das Adsorptionsmittel wieder trocken ist, wird der obere Bereich nicht mehr beheizt. Das Modul kühlt nun unter die Umgebungstemperatur

ab und das Wasser verdampft erneut im unteren Modul durch Umgebungswärme. Das dampfförmige Wasser strömt wieder nach oben und wird vom Adsorptionsmittel adsorbiert, wodurch erneut Wärme frei wird und der Kreislauf von vorne anfängt. Nachstehende Abbildung 11 stellt den eben beschriebenen Prozess bildlich dar. [16]

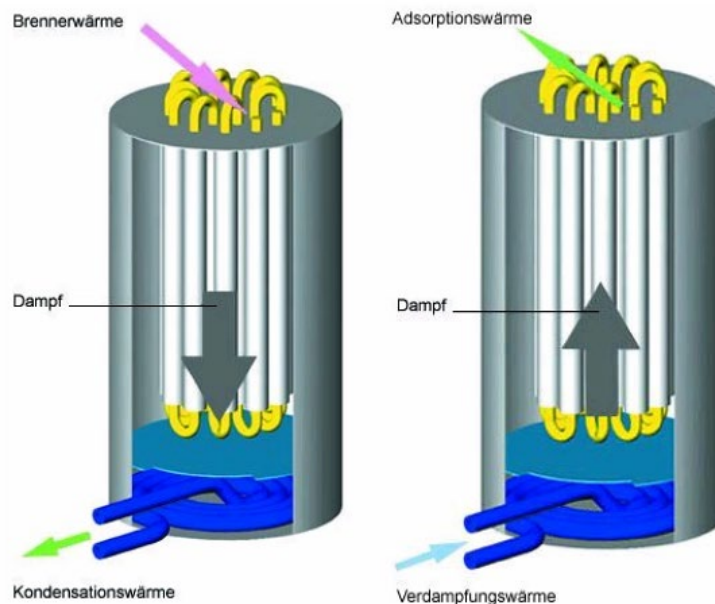


Abbildung 11: Schematisches Funktionsprinzip einer Adsorptionswärmepumpe [16]

3.3 Industrielle Abwärmenutzungspotenziale

Für die Bewertung der Abwärmenutzung in den verschiedenen Industriebereichen werden erhobene Energieeinsparpotenziale betrachtet. Mithilfe einer Potenzialanalyse lässt sich das Potenzial als Endenergieeinsparung quantifizieren und infolgedessen die Einsatzmöglichkeit einer Technologie beurteilen. Für einen einheitlichen Vergleich wird der Begriff Potenzial definiert. [17] Grundsätzlich lassen sich Potenziale in theoretische, technische, praktische, realisierbare und auch wirtschaftliche Potenziale unterteilen. Die unterschiedlichen Begrifflichkeiten können auch miteinander kombiniert werden, wie beispielsweise das wirtschaftliche und praktische Potenzial. Nachfolgende Abbildung 12 soll den hier beschriebenen Zusammenhang mithilfe von Teil- und Schnittmengen veranschaulichen. [18]

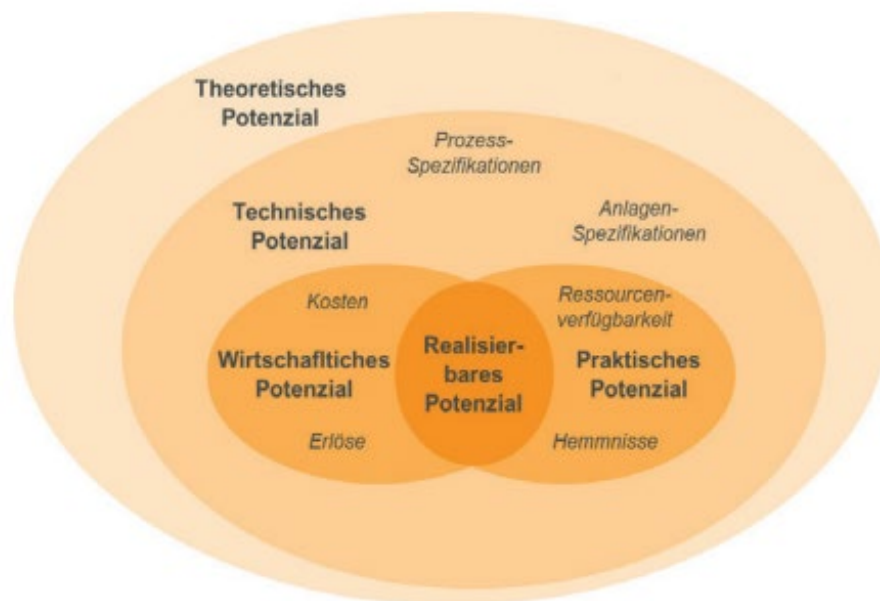


Abbildung 12: Übersicht der Potenzialbegriffe mit abgrenzenden Parametern [18]

Aus der oben stehenden Abbildung 12 ist zu entnehmen, dass das theoretische Potential die maximal für die Umsetzung einer Technologie zur Verfügung stehende Energiemenge bezeichnet, während beim technischen Potenzial zusätzlich Anlagengrößen nach dem Stand der Technik sowie ökologische Aspekte betrachtet werden. Überdies können noch wirtschaftliche und unternehmensspezifische Faktoren berücksichtigt werden, welche das Potenzial weiter verringern. Das in der Realität umsetzbare Potenzial ergibt sich aus der Schnittmenge des wirtschaftlichen und praktischen Potentials. [14] [19]

Für die Ermittlung der Abwärmenutzungspotenziale werden drei verschiedene Methoden betrachtet: [14]

- **Top-Down-Abschätzung:** Die Potenziale werden mithilfe der Durchschnittsenergieverbräuche von repräsentativen Industriebetrieben und der Wirkungsgrade der Maschinen und Prozesse unter Berücksichtigung von Literaturquellen geschätzt.
- **Bottom-Up-Abschätzung:** Durch Auswertung von Fragebögen sollen unternehmensrelevante Daten erhoben werden, um Potenziale abschätzen zu können. Die Ergebnisse hängen daher von der Vollständigkeit und Richtigkeit der angegebenen Daten ab.
- **Bottom-Up-Messung:** Bei dieser Methode werden die Mengen der Abwärme direkt vor Ort gemessen und aufgezeichnet. Diese Analyse ist jedoch mit hohem Aufwand verbunden, bietet aber auch die höchste Genauigkeit und ist für eine konkrete Planung unerlässlich.

3.3.1 Abwärmenutzungspotenziale in verschiedenen Industriebereichen

Laut einer vom deutschen Umweltbundesamt beauftragten Untersuchung zur Nutzung industrieller Abwärme sind lediglich 44 % der in Deutschland anfallenden Abwärme für eine weitere Verwendung geeignet [20]. Eine weitere deutsche Analyse aus dem Jahre 1995 liefert ein ähnliches technisches Potenzial mit etwa 45 % [21]. Etwas spezifischer beziffert eine norwegische Studie die verfügbare Abwärme über 140 °C in der Zementindustrie mit circa 40 % und in der chemischen Industrie wird das Potenzial lediglich auf 8 % geschätzt [4]. Nach einer Studie von McKenna et al. 2010 sind im Vereinigten Königreich in etwa 5 – 10 % des Wärmebedarfs der dort betrachteten Sektoren technisch nutzbar. Vor allem in der Chemie-, Aluminium-, Mineralstoff- sowie Eisen- und Stahlindustrie sollen die Potenziale aufgrund hohen Temperaturniveaus am größten sein [9]. Nach einer Studie der Technischen Universität Wien sieht man hohes Potenzial für den Einsatz von Wärmepumpen in der Papier- und Lebensmittelindustrie [22].

Trotz Vorhandensein einiger Potenzialanalysen lässt sich das gesamte Potenzial zur Abwärmenutzung nur schwer bestimmen, da unterschiedliche Regionen, Industriebereiche, Begriffsdefinitionen wie auch Erhebungsmethoden eine übergreifende Einschätzung einschränken. Grundsätzlich unterscheiden sich die Optionen zur Abwärmenutzung zwischen den unterschiedlichen Industriebetrieben durch das erforderliche Temperaturniveau. [9]

Nachstehende Abbildung 13 liefert einen Überblick von Prozessen in unterschiedlichen Industriebetrieben mit dem jeweiligen Temperaturbereich. Die Bandbreite der Prozesstemperaturen reicht üblicherweise von 10 bis über 160 °C. Jener Bereich lässt sich weiters nach dem Stand der Technik untergliedern. So können prinzipiell Wärmeverbräuche bis 100 °C in u. A. Trocknungs-, Eindampf-, Koch- und Bleichprozessen mit aktuell verfügbaren Wärmepumpen bereitgestellt werden. Wärmepumpen, welche Wärmeenergie mit Temperaturen über 100 °C generieren, befinden sich bereits vereinzelt auf dem Markt, sind jedoch grundsätzlich noch in der Entwicklung. Einschränkungen sind dem verwendeten Kältemittel zuzuschreiben. Mittels neu entwickelten Kältemitteln könnten sogar Temperaturen bis zu 160 °C erreicht werden. [23] [7]

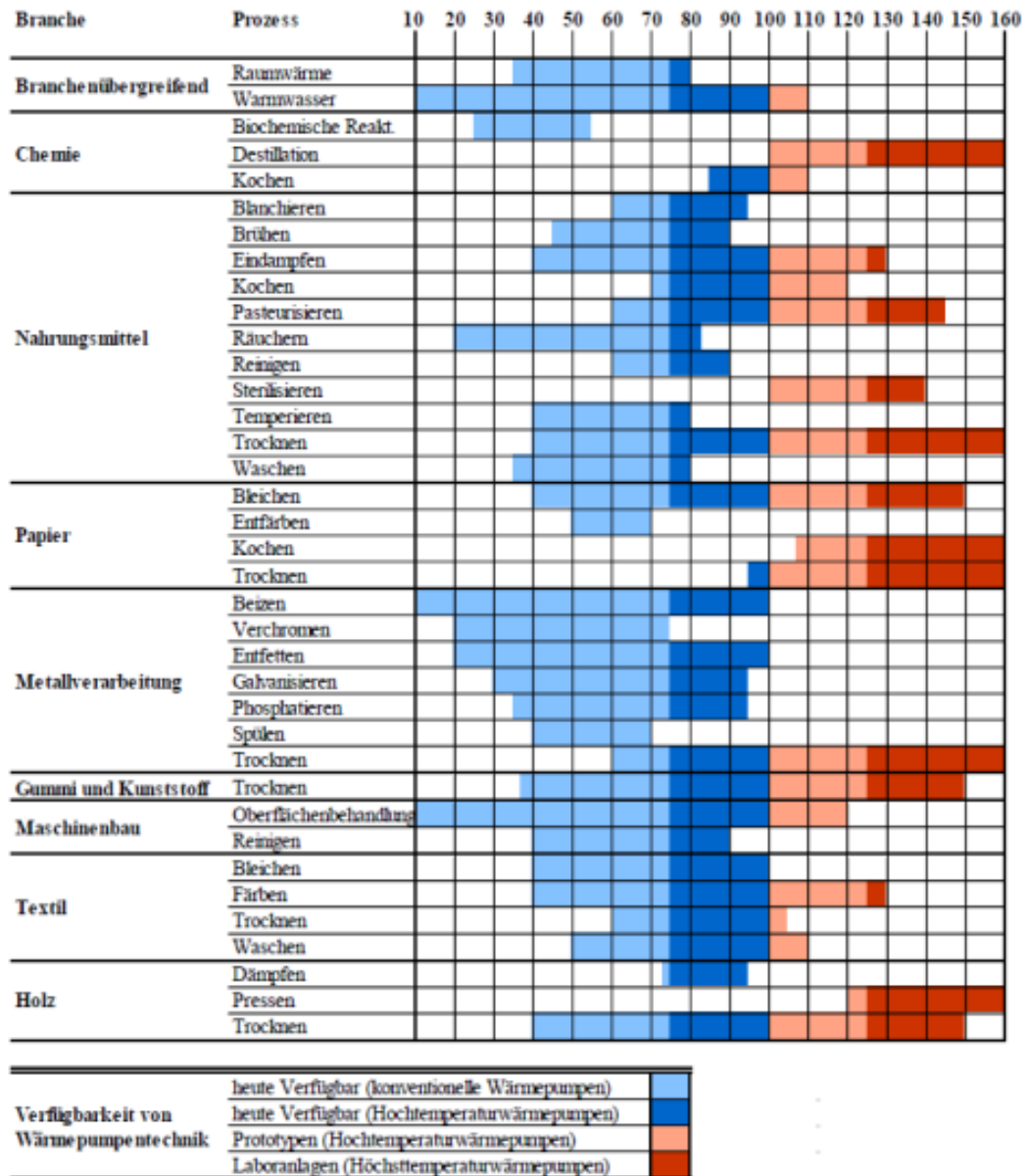


Abbildung 13: Übersicht verschiedener Industrieprozesse nach deren Prozesstemperaturen und verfügbaren Wärmepumpen gegliedert [24]

Das technische Potenzial für die Anwendung von Wärmepumpen in Industrieprozessen lässt sich anhand der einzelnen Wärmeverbräuche und den Temperaturniveaus abschätzen. Im Jahre 2010 betrug in Deutschland der industrielle Energiebedarf für Raumheizung, Warmwasserbereitstellung und Prozesswärme 524 TWh. Die Resultate einer Potenzialanalyse aus dem Jahre 2012, welche in Abbildung 14 dargestellt sind, zeigen, dass 75 TWh Wärme durch Wärmepumpen nach der damals verfügbaren Technik bereitgestellt hätten werden können. Mit der Einwicklung von neuen Kältemitteln, die Temperaturen bis 140 °C erzielen, hätten weitere 91 TWh gedeckt werden können. In der Analyse wird die Wärmemenge, die durch Wärmepumpen erzeugt werden kann, auf 32 % vom gesamten Wärmebedarf der deutschen Industrie geschätzt. Vor allem in der Lebensmittel-, Papier- und chemischen

Industrie sieht man die größten Potenziale für den Einsatz von Technologien zur Abwärmenutzung. [23]

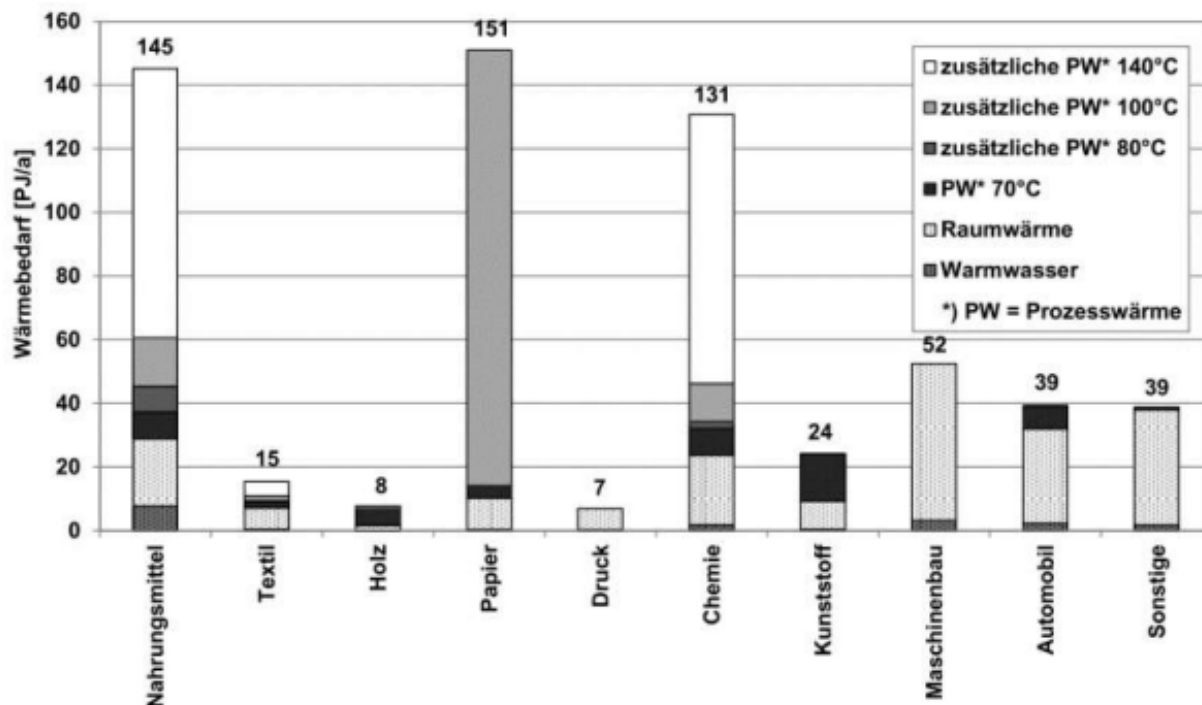


Abbildung 14: Übersicht der technischen Potenziale für die Integration von Wärmepumpen in den einzelnen Industriebranchen [25]

3.3.2 Anwendungsbeispiele für Abwärmenutzungstechnologien in unterschiedlichen Industriebetrieben

Nachdem ein Abwärmenutzungspotenzial in einem Betrieb gefunden werden konnte, ist zu analysieren, welche geeigneten Nutzungsmethoden angewandt werden können. Wie bereits in 3.3.1 dargestellt, besitzt jedes Unternehmen je nach Industriebranche ein eigenes Energieprofil, welches untersucht werden muss, um die Anwendung verschiedener Technologien fundiert bewerten zu können. [26] Abbildung 15 bietet einen allgemeinen Überblick von unterschiedlichen Abwärmequellen und möglichen Nutzungsanwendungen je nach vorhandener Temperatur. Die Abwärme von sowohl Rauchgasen mit über 400 °C als auch die von Lüftungsanlagen mit etwa 20 °C eignen sich für verschiedene Anwendungen, wie Warmwasserbereitstellung, Trocknung und sogar Dampferzeugung.

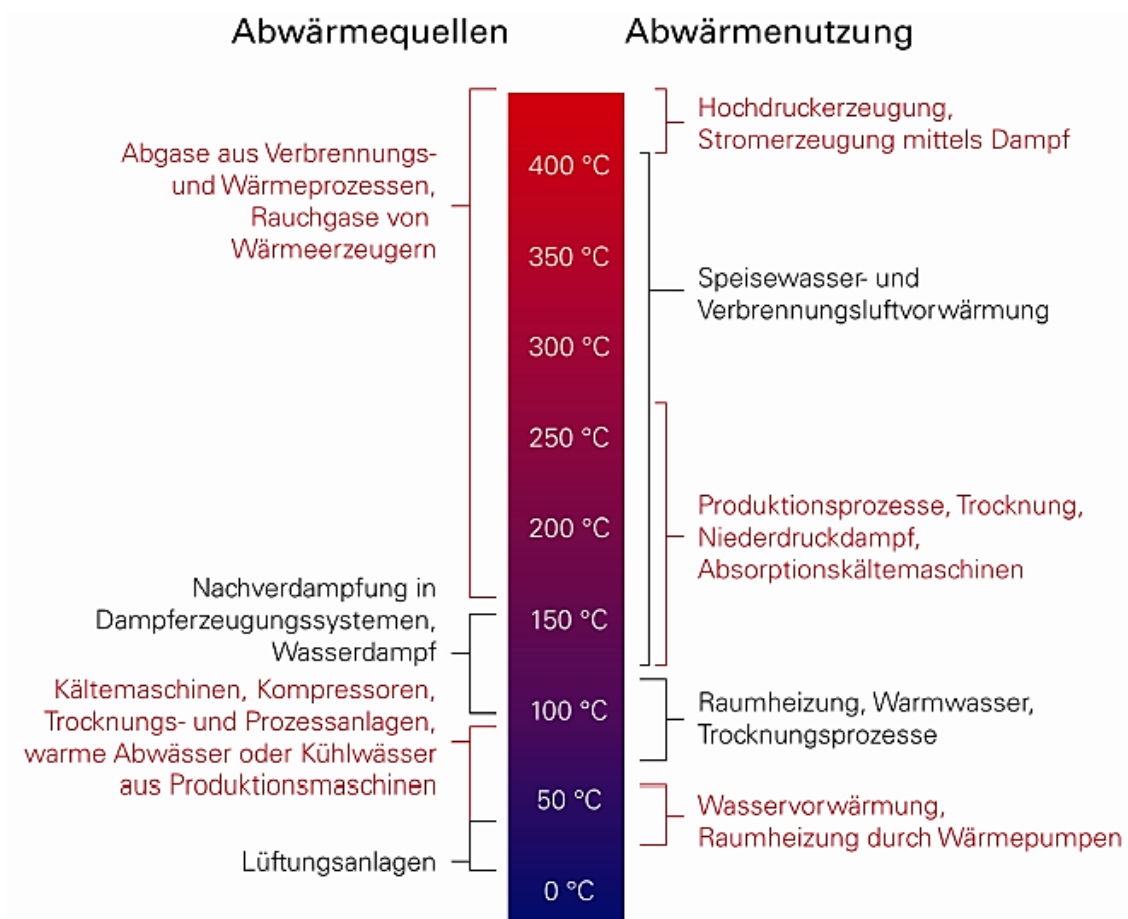


Abbildung 15: Gegenüberstellung von Abwärmequellen und deren Nutzungsmöglichkeiten in Abhängigkeit vom Temperaturniveau [27]

In der Eisen- und Stahlindustrie fällt viel Hochtemperaturwärme in Bereichen der Öfen an. Hier nutzt man die Abwärme aus Rauchgasen, welchen zuerst gereinigt und dann zu Wärmetauschern weitergeleitet werden, um dort Verbrennungsluft vorzuwärmen. Im Rahmen einer Untersuchung aus dem Jahre 2017 konnten durch Nutzung der Abwärme aus sauberen Gasströmen 15,6 kW thermische Leistung rückgewonnen werden. Abwärmennutzungsanlagen für verschmutzte Abgase sind ebenfalls verfügbar, werden jedoch aufgrund der zu hohen Kosten weniger eingesetzt. In einem weiteren Projekt wurde Abwärme aus einem Kühlungsprozess gewonnen und einem Abwärmekessel zugeführt, wodurch in etwa 280 MW Strom erzeugt werden konnten. [28] Im Stahl- und Walzwerk Marienhütte Graz liegt der Fokus auf der Nutzung der Prozessabwärme zur Erzeugung von Fernwärme für die Stadt Graz [29].

In der Lebensmittelindustrie fällt die Abwärme größtenteils auf Nieder- oder Mitteltemperatur an. Abwärme aus Heiz- und Kühlsystemen, aus der Verarbeitung sowie heiße Luft- oder Wasserströme in der Produktion stellen die Hauptquellen dar. Nachteilig für die Nutzung ist jedoch die stark schwankende Verfügbarkeit aufgrund der variierenden Prozesse, weshalb viele Potenziale hier noch ungenutzt sind. Beispielsweise wird beim Sengen

von Schlachtkörpern der größte Teil der Wärme in die Atmosphäre abgegeben. Für eine effizientere Produktion könnte jene Abwärme den Wärmebedarf für Enthaarungs- und Brühprozesse teilweise decken bzw. sogar für die Warmwasserbereitung zur Verfügung gestellt werden. Die Rückgewinnung aus Kondensatoren, Abwasser und Rauchabzügen lässt sich aufgrund des hohen Anteils an Fett- und Speiseresten schwieriger gestalten. [28]

Obwohl im Rahmen zahlreicher Studien bedeutende Potenziale für den Einsatz von Abwärmenutzungstechnologien gefunden werden konnten, wird in vielen Unternehmen bei der Umsetzung gezögert. Folgende Gründe werden als Risiken angesehen: [9] [14] [29]

- Lange Amortisationszeiten schrecken viele Anlagenbetreiber ab. Je aufwendiger die Technologie wird, desto höhere Kosten müssen getragen werden, wodurch es länger dauern kann bis sich die Investition rentiert.
- Aufgrund des Skaleneffektes ist die Anschaffung von neuen Technologien bei kleineren Anlagen wirtschaftlich unvorteilhafter.
- Fehlende Wärmeabnehmer in unmittelbarer Umgebung stellen ebenfalls ein Hindernis für die Umsetzung dar.
- Aufgrund von diskontinuierlichen Abwärmeströmen lassen sich eingesetzte Technologien nicht schnell amortisieren.
- Der geringe Bekanntheitsgrad der aktuellsten Technologien und die daraus resultierende geringe Vernetzung zwischen Anlagenplanern, Herstellern, Installateuren usw. tragen ebenfalls dazu bei weitere Marktdurchdringung einzuschränken.
- Stetig niedrige Öl- und Gaspreise stellen den Einsatz von Abwärmenutzungstechnologien nicht lukrativ dar.

3.4 Förderprogramme

Fördermittel von der EU, vom Staat, Land oder Energieversorger im Bereich Umwelt- und Klimaschutz sollen als Unterstützung für den Einsatz von Wärmerückgewinnungstechnologien beitragen. Der Verein Wärmepumpe Österreich stellt eine Übersicht aller in Österreich bereitstehenden Förderprogramme je nach Bundesland und Energieversorgungsunternehmen dar. In Österreich stehen u. A. folgende Förderprogramme zur Verfügung:

- Bis zu 5000 EUR für thermische Sanierungen von fossilen Heizsystemen durch den „Raus aus Öl“-Bonus. [30]
- Vom Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus wird für Wärmepumpen das Förderprogramm zur Versorgung mit Warmwasser bereitgestellt. [31]

- Neben der Wärmepumpe selbst ist auch die Wärmequellenanlage, der Pufferspeicher, die elektrische und hydraulische Installation wie auch die Regelung förderfähig. Für die Fördersatzhöhe wird zwischen Wärmepumpen mit einer thermischen Leistung von <100 kW und ≥ 100 kW unterschieden. [31]

4 ABWÄRMENUTZUNGSPOTENZIALE IN DER PAPIERINDUSTRIE

In diesem Kapitel wird näher auf Abwärmequellen und deren Nutzungspotenziale in der Papierindustrie eingegangen. Im ersten Schritt wird allgemein der Produktionsprozess zur Papier- und Zellstoffherstellung für ein besseres Verständnis näher gebracht, um anschließend wesentliche Abwärmequellen und -senken systematisch zu untersuchen und darzustellen.

4.1 Grundlagen der Papier- und Zellstoffherstellung

Im Jahr 2021 lag der Umsatz der österreichischen Papier- und Zellstoffindustrie bei 4,1 Milliarden EUR. Insgesamt wurden in 21 Unternehmen 2,0 Millionen Tonnen Zellstoff und 5,1 Millionen Tonnen Papier produziert. [32] Davon sind rund 13 % der Zellstoff- und 19 % der Papierherstellung der Sappi in Gratkorn zuzuschreiben, wovon 95 % in den Export gehen. Die Sappi hat ihren Sitz in Johannesburg in Südafrika und beschäftigt weltweit 12.492 MitarbeiterInnen. Im Werk Gratkorn sind derzeit in etwa 1240 MitarbeiterInnen tätig. [33]

Eine strukturierte Übersicht der einzelnen Prozessschritte in der Papier- und Zellstoffherstellung soll die Abbildung 16 liefern. Der komplette Prozess kann grob in Holzvorbereitung, Zellstoffherstellung, Papiererzeugung, Streichen und Papierverarbeitung unterteilt werden.

Holzlagerung und -vorbereitung

Für die Papierproduktion werden typischerweise Laubhölzer, wie Birke, Pappel, Buche und Eukalyptus oder Nadelhölzer wie Fichte, Tanne und Kiefer, verwendet. Nadelholz hat längere Fasern als Laubholz und verleiht dem Papier eine höhere Festigkeit. Auf dem Holzplatz werden die Holzstämmen in einer rotierenden Trommel entrindet, um diese danach zu Hackschnitzeln zu zerkleinern. [34]

Kochen, Waschen, Eindicken und Bleichen (Zellstoffherstellung)

Die Hackschnitzeln werden auf einem Förderband zur Zellstofffabrik befördert, in der sie in einer Säurelösung gekocht werden. Dadurch wird das Lignin herausgelöst und die Pflanzenfasern werden freigelegt. Der in diesem Prozess hergestellte Zellstoff wird als holzfrei bezeichnet. Die Säurelösung wird anschließend aus den Fasern ausgewaschen. Bevor der Zellstoff zur Herstellung von weißem Papier verwendet werden kann, muss er eingedickt und gebleicht werden, um Rückstände des Lignins, welche das Papier vergilben lassen würden, zu entfernen. Zur Schonung der Umwelt wird in der Sappi unter Verwendung von Sauerstoff und Peroxid ohne Chlor gebleicht [33]. Die gelbbraunen Hackschnitzeln sind in der Zellstofffabrik zu weichem weißem Zellstoff geworden, welcher den Hauptrohstoff in der Papierherstellung darstellt. Der entstandene Zellstoff kann dann getrocknet und balliert zu anderen

Abwärmenutzungspotenziale in der Papierindustrie

Papierfabriken transportiert werden, die entweder über keine eigene Zellstofffabrik verfügen, oder eine spezielle Art Zellstoff benötigen, um ihrem Papier besondere Eigenschaften zu verleihen. [35] [36]

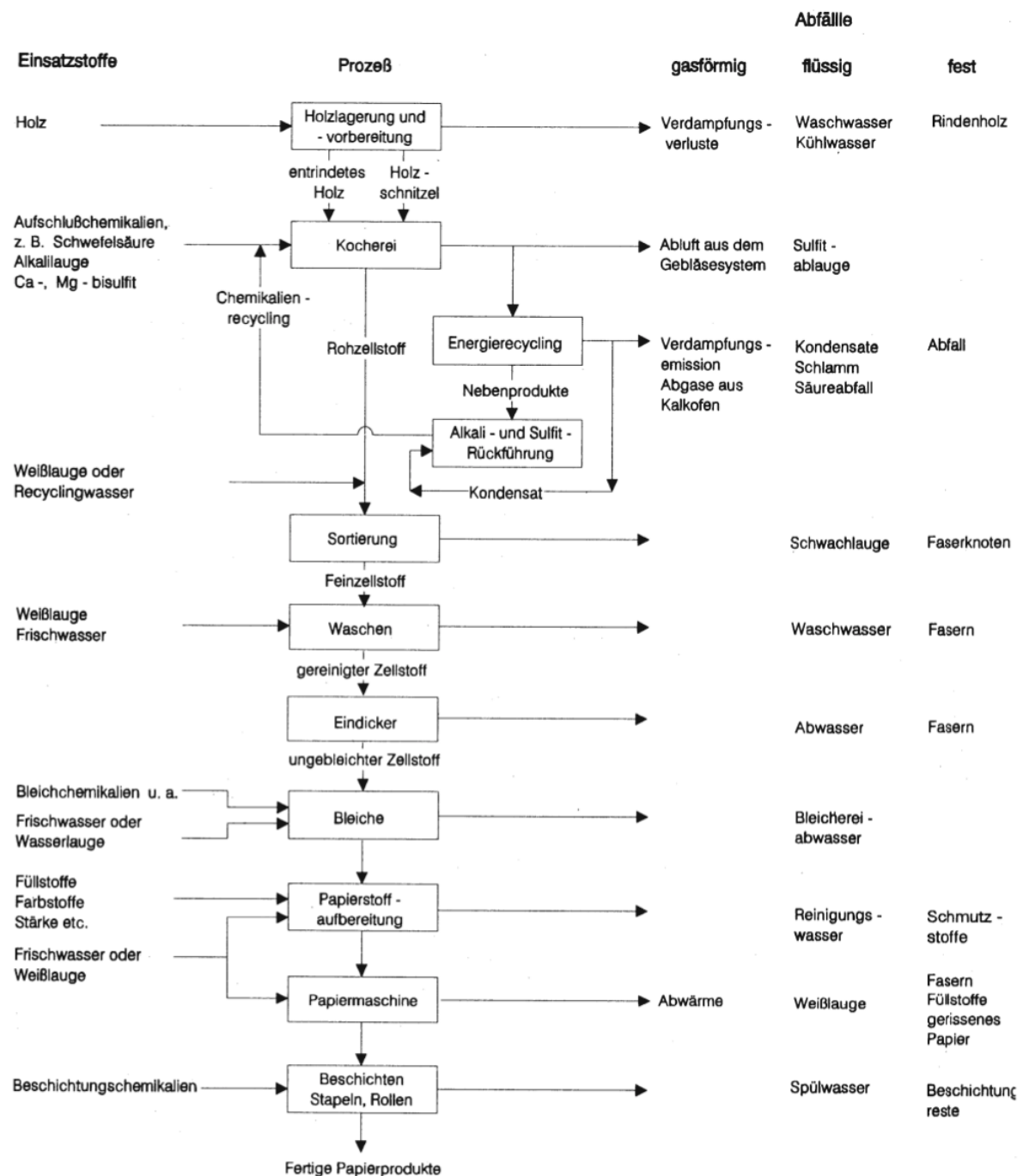


Abbildung 16: Fließschema eines Zellstoff- und Papierherstellungsverfahrens [37]

Papiererzeugung

In der Papierfabrik wird dem Zellstoff zunächst Wasser zugesetzt und anschließend wird er in Refinern mithilfe einer Reihe rotierender und stationärer Messer gemahlen, wodurch festeres Papier erzeugt werden kann. Zusätzlich werden Füllstoffe, wie beispielsweise Calciumcarbonat und Kaolin, beigefügt. Diese sorgen für eine höhere Opazität und eine besser

kontrollierbare Dichte. Farbstoffe, Pigmente und Leim können ebenfalls dem Zellstoff beigemischt werden, um das Aussehen und die Eigenschaften des Papiers zu verbessern. Das bei weitem wichtigste Prozessmaterial ist Wasser. Etwa 100 Liter Frischwasser sind erforderlich, um einen Kilogramm Papier herzustellen. Ausgeklügelte Wasseraufbereitungsanlagen und geschlossene Umlaufwassersysteme machen es heutzutage möglich, dass sogar 90% des Wassers wiederverwendet werden kann. Die Zellstofflösung, welche nun ein Gemisch aus in Wasser gelösten Fasern, Füllern und Pigmenten darstellt, kann der Papiermaschine zugeführt werden. Abbildung 17 zeigt exemplarisch das Schema einer Papiermaschine. Hier laufen eine Reihe kontinuierlicher Produktionsprozesse, die die Zellstofflösung in vielfältige Papiersorten für jede erdenkliche Marktanwendung verwandeln. Der Stoffauflauf befindet sich am vordersten Teil der Papiermaschine. Die Zellstoffsuspension wird unter hohem Druck direkt in den Spalt zwischen den beiden gleichlaufenden Sieben, dem sogenannten Gap-Former, aufgebracht. Dadurch wird das überschüssige Wasser sehr rasch beidseitig aus dem Gemisch abtransportiert. Die Faserstoffe werden innerhalb von Millisekunden nach Verlassen des Stoffauflauf immobilisiert und zu einer kontinuierlichen Papierbahn befördert. An dieser Stelle ist der Stoff jedoch feucht und fragil, aber weist bereits die wichtigsten Blatteigenschaften auf. In der Presspartie wird die Entwässerung durch Endlosfilze fortgesetzt, die den Großteil des Wassers aus der filigranen Papierbahn pressen und ein Reißen des Blattes verhindern. [34] [36] [38]

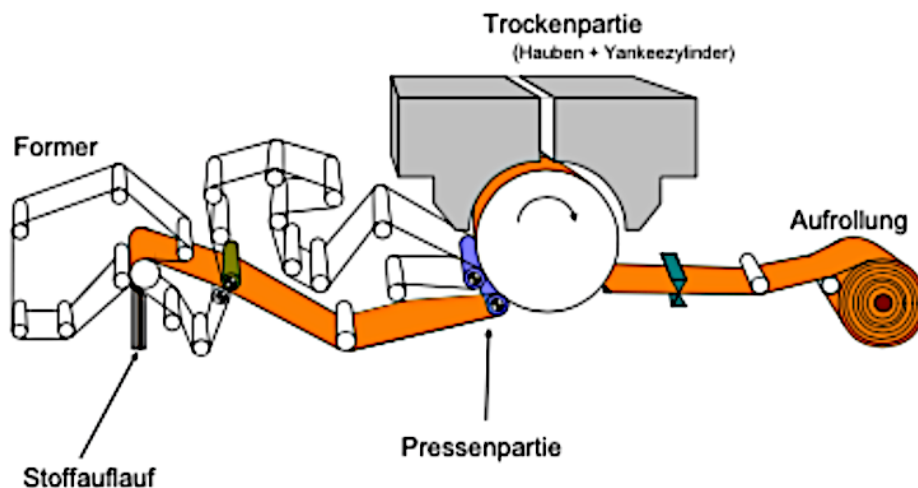


Abbildung 17: Schema einer Papiermaschine [39]

In der Schuhpresse wird das Papier durch eine weiche rotierende Walze gegen einen hydraulisch bewegten Metallschuh gepresst. Durch diesen Druck wird das Wasser aus dem Papier herausgedrückt und dann mit Hilfe der Feuchtilze abtransportiert. Den längsten Abschnitt der Papiermaschine bildet die Trockenpartie mit ihren Trockenzyklindern. Diese riesigen beheizten Walzen trocknen das Papier und verleihen ihm ausreichend Festigkeit, sodass es stabil und für die nachfolgenden Verfahren, welche die Oberflächeneigenschaften

bestimmen, vorbereitet wird. Die Papierbahn läuft mit einer Geschwindigkeit von bis zu 1400 Meter pro Minute durch die Maschine. Das Papier wird nach der Trocknung auf eine Reihe von Stahlkernen, die sogenannten Tamboure, gewickelt. Die Papiermaschine erzeugt pro Stunde eine Jumborolle mit einer 80 Kilometer langen Papierbahn in 8,5 Meter Breite und einem Gewicht von 120 Tonnen. Der Papiermaschinenführer überprüft sorgfältig alle Kriterien der Rohpapierqualität, wie Dicke, Opazität und Glätte, und stellt sicher, dass die Papiereigenschaften den Spezifikationen entsprechen, bevor die Jumborolle zur Weiterverarbeitung abtransportiert wird. [34] [36] [38]

Streichen

Im nächsten Schritt durchläuft das Papier einen Kalandr, in dem zwei fein polierte Stahlwalzen in einem präzise festgelegten Abstand zueinander für eine gleichmäßige Papierdicke sorgen. Das Papier wird nun in einer Reihe von Leim- und Streichpressen weiterbehandelt. Hier werden die Stärke und Streichfarben mithilfe des Filmpressverfahrens auf die Oberfläche aufgetragen. Die Streichfarbe wird auf eine elastische Walze gesprüht, die danach den Strichfilm auf die Papierbahn überträgt. Mit der Filmpresse wird eine gleichmäßig dicke Strichschicht erzielt, die sich der Oberfläche anpasst. Nach jedem Streichprozess wird die Oberfläche durch Infrarotheizungsaggregate und Trockenzylinder getrocknet. Durch das Auftragen des Leimes auf die Oberfläche trocknen die Druckfarben besser auf dem Papier und werden nicht absorbiert. Dies erhöht die Farbintensität des fertigen Druckes und verbessert die Oberflächen- und Wasserfestigkeit. Das Papier kann mit glänzender oder matter Oberfläche, natur- oder reinweiß verkauft werden. Die Komponenten der Streichfarbe werden, entsprechend vorgegebenen Rezepturen, in Tanks in der Streichküche gemischt. Das wichtigste Farbpigment ist Calciumcarbonat, das für den Weißgrad der Papieroberfläche verantwortlich ist. Die Streichfarbe kann aber auch Kaolin und Talkum enthalten. Bindemittel können natürliche Stärke oder rein synthetische Komponenten, wie Latex, sein. Um eine glattere Oberfläche zu erzielen, wird jede Seite im Raketstreichverfahren noch bis zu zwei weitere Male gestrichen. Jeder Strichauftrag wird direkt auf das Papier aufgesprüht und dann durch ein Stahlmesser abgestreift, wodurch Unregelmäßigkeiten ausglich werden. Durch Streichen und anschließendes Trocknen jeder Seite werden die entsprechenden Papiereigenschaften jeder Papiersorte herausgebildet. [34] [40]

Papierverarbeitung

Das Papier verfügt an dieser Stelle zwar die richtigen Grundeigenschaften und die optimale Strichbeschaffenheit, jedoch fehlt noch das optimale Oberflächen-Finish. Das Papier wird durch bis zu 10 Walzen geschickt, die jeweils Druck und Hitze auf die Papierbahn aufbringen. Je nachdem welcher Glanz erzielt werden soll und welche Oberflächenbehandlungen erforderlich sind, kommen Walzen mit unterschiedlichen Oberflächen wie hochfester Stahl

oder weicher Gummi zum Einsatz. Zuletzt wird die Papierbahn neu aufgewickelt und zu einer Rollenschneidmaschine transportiert, an der rotierende Messer die Rolle kleiner schneiden. Daraufhin werden die Papierrollen zu den Verpackungsstraßen und in die Lagerhalle weiterbefördert und sind bereit für die Auslieferung an den Kunden. Die fertige Ware erhält noch abschließend ein Etikett mit dem Sortennamen, einer Chargennummer, aus der die Herstellungshistorie ersichtlich ist, und dem Bestimmungsort. [34] [40]

4.2 Wärmebedarf bei der Papierherstellung

Im Kapitel 3.3.1 wurde bereits aufgezeigt, dass in der Papierindustrie ein hoher Bedarf an Wärmeenergie bereits ab 40 °C besteht. Im europäischen Raum wurde ein spezifischer Energieverbrauch von 3 Kilowattstunden pro Kilogramm hergestelltes Produkt (kWh/kg) im Durchschnitt ermittelt, wovon ein Anteil von zwei Drittel auf den thermischen Energiebedarf zurückzuführen ist. [41] Folgende Abbildung 18 stellt übersichtlich einzelne Prozesse bzw. Produkte in der Papier-, Pappe- und Kartonherstellung mit dem jeweiligen Energieaufwand dar. Der Energiebedarf variiert je nach Produktart, Trocknungsart, Feuchtegehalt und Maschinenkonfiguration. [15]

Produkt/Prozeß	Produkt- masse [kt]	Wärmeenergie				Elektroenergie	
		spezifisch		absolut		spez.	absolut
		[MJ/ kg]	[kWh/ kg]	[TJ]	[GWh]	[kWh/ kg]	[GWh]
Papierzellstoff incl. Bleichg.	1562	14,0	3,88	21.868	6057	0,80	1249
Trocknung b. Zellstoffabgabe	551	3,0	0,83	1653	457	0,00	0
Auflösg. B. Zellstoffzukauf	3581	–	–	–	–	0,00	0
Holzstoff (Refiner, TMP)	1163	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	3489
Holzschiff (Steinschliff)	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
Altpapieraufbereitung Sek. Fa.	16.046						
ohne Deinking	7541	6,5	1,80	49.020	13.578	0,8	6033
mit Deinking	8504	6,5	1,80	55.278	15.312	1,5	12.756
davon gebleicht	1	–	–	–	–	0,0	0
Papier, Karton Pappe PM/KM ⁷	22.690						
Produktion von Papier, Karton, Pappe für Verpackungen	10.211	9,0	2,5	91.899	25.456	1,0	10.211
Produktion für Druck-, Presse-, Büro-/Administrationspapier	9634	7,5	1,3	72.255	12.524	1,0	9634
Produktion für techn./sonst. Zwecke	1474	6,5	1,80	9581	2653	0,36	530
Produktion für Hygienpapier	1371	7,5	2,20	10.282	3016	1,0	1371
Streichmasch., gestrichenes Papier	1649	8,0	1,5	13.192	2473	0,71	1170
Formatausrüstung (Zuschnitt)	22.690		–	–	–	0,00	0,0
Laugeneindickung (Zellstoff)	1	0,34	0,1	0,0	0,0	0,01	0,0
Rindenzerkleinerung	1333	–	–	–	–	0,00	0,0
Rindenenwässerung	1333	–	–	–	–	0,00	0,0
Produktbez. Energiebedarf	111.334			325.029	81.530		46.445

Abbildung 18: Übersicht einzelner Prozesse in der Papier-, Pappe- und Kartonproduktion mit dem jeweiligen absoluten und spezifischen Energieeinsatz [15]

Unabhängig von der Schwankung des Energieaufkommens durch die Herstellung unterschiedlicher Produktsorten kann prinzipiell gesagt werden, dass die Trocknung den energieintensivsten Verfahrensschritt in der Papier- und Zellstoffproduktion darstellt. Hier wird hauptsächlich Wärmeenergie in Form von Dampf zur Verringerung des Feuchtegehaltes der Papierbahn eingesetzt. Aufgrund steigender Energiepreise gewinnt die Reduktion des Energiebedarfs immer mehr an Bedeutung. Maßnahmen wie die Verbesserung der Pressenpartie zur Entwässerung, neue Maschinen und Anlagenteile mit höheren Wirkungsgraden und die ausgebaute Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) zur internen Anwendung sind bereits Stand der Technik. Daher sieht man in der Nutzung von Abwärme großes Potenzial zur Senkung des Energieeinsatzes. Für die Papierproduktion in Deutschland könnten durch Wärmerückgewinnungsmaßnahmen mit anschließender Integration in den Prozess 3,61 TWh Dampf eingespart werden. [15] [42]

4.3 Übersicht der Abwärmequellen und -senken in der Papierindustrie

Nach Betrachtung sämtlicher Aggregate der kompletten Prozesskette bietet sich grundsätzlich Abwärme für die Rückgewinnung aus Schleifer, Refiner, Trockner und Abwasser auf einem niedrigem Temperaturniveau an, weshalb hier das Potenzial für die Integration von Wärmepumpen sehr hoch ist. Die rückgewonnene thermische Energie kann für die Aufwärmung der Zuluft, des Filter-/Sieb- oder Frischwassers bereitgestellt werden. Darüber hinaus ist es auch möglich Dampf wieder zu verwenden oder Prozesswärme herzustellen. Die Erzeugung von Kälte und Strom mithilfe eines Organic-Rankine-Cycles (ORC) aus Niedertemperaturabwärme ist zwar nicht abwegig, wird allerdings in der Praxis nicht umgesetzt. [9] [15]

Folgende Abbildung 19 stellt gefundene Quellen und Senken in der Papiererzeugung in Form einer Matrix gegenüber. Diese soll die unterschiedlichen Möglichkeiten der Abwärmenutzung sowohl in technischer Sicht (unteres Dreieck) als auch in wirtschaftlicher Sicht (oberes Dreieck) aufzeigen. Ein schwarzes bzw. graues Dreieck bedeutet, dass die Anwendung hohes bzw. mäßiges Potenzial hat, wohingegen ein weißes auf geringes bis kein Potenzial hindeuten soll. [43]

Konzeptvarianten - Matrix -		Wasser			Luft	
		Wärme Abwasser	Wärme Kreislauf DIP	Wärme Filtrat Schleiferei	Wärme Trocken- partie	Wärme Pressenpartie
Wasser	Aufwärmung Frischwasser	Black triangle	White triangle	Black triangle	Black triangle	White triangle
	Aufheizung Siebwasser	Black triangle	White triangle	Black triangle	Black triangle	White triangle
intern	Kühlung Warte, EDV, etc.	Grey triangle	White triangle	Grey triangle	White triangle	White triangle
	Heizung Büro-/ Lageräume	White triangle	White triangle	White triangle	White triangle	White triangle
extern	Heizung Schwimmbad	White triangle	White triangle	White triangle	White triangle	White triangle
	Fernwärme	Grey triangle	White triangle	Grey triangle	Grey triangle	White triangle

Abbildung 19: Übersicht an Möglichkeiten zur Abwärmenutzung in der Papierindustrie hinsichtlich technischer (unteres Dreieck) und wirtschaftlicher (oberes Dreieck) Realisierbarkeit (schwarz = hohes Potenzial, grau = mittleres Potenzial, weiß = geringes Potenzial) [44]

Zunächst ist zu erkennen, dass die Nutzung der Abwärme aus Wasserkreislaufanlagen von Deinking-Prozessen (DIP) in keiner Hinsicht realisierbar sei und daher hier nicht weiter betrachtet wird. Zudem ist die Beheizung von Büro- und Lagerräumen wie auch Schwimmbädern nicht von Bedeutung. Prinzipiell lassen sich interne Anwendungen lukrativ besser umsetzen als externe. Das liegt in erster Linie an der Distanz zwischen Wärmequelle und dazu passender Senke. Die Einspeisung ins Fernwärmenetz wird natürlich nur bei Vorhandensein eines solchen relevant. Bei passenden Gegebenheiten erhöht sich hier die Wirtschaftlichkeit enorm. Kühlungsbedarf besteht meistens in Warten oder Schalträumen, welche über den ganzen Standort verteilt liegen, weshalb die Eignung der Abwärmenutzung vor Ort geprüft werden muss. Jedoch stellen diese meistens keine ökonomisch attraktive Lösungsmöglichkeit dar. Bei Betrachtung der Abwärme von Abwasser, der Schleiferei und Trockenpartie wie auch deren Nutzung für die Frisch- und Siebwasseraufwärmung wird sowohl das technische als auch wirtschaftliche Potenzial deutlich. Angebot und Nachfrage an Wärme decken sich in diesen Anwendungen, sodass die Wirtschaftlichkeit in diesen Anwendung relativ hoch ist. Ausschlaggebend ist vor allem die geringe lokale Distanz, wodurch die Realisierbarkeit dieser Kombinationen gegeben ist. Die Nutzung der Abwärme aus Abwasser ist aufgrund der höheren spezifischen Wärmekapazität gegenüber der Abluft

Abwärmenutzungspotenziale in der Papierindustrie

natürlich sehr interessant. Lediglich das Zusammenspiel der Wärme aus Abluft der Pressenpartie und der Aufwärmung der Wassersysteme scheint weniger Potenzial zu haben. [43]

Zusammenfassend lassen sich die in der Literatur gefundenen Abwärmequellen mit den höchsten Potenzialen zusammenführen zu [15] [45]:

- Schleiferei (Refiner, Schleifer)
- Trockenpartie
- Presspartie
- Abwasser

Mögliche Abwärmesenken für die Verwendung der vorhandenen Wärmemenge aus obigen Quellen wären [15] [45] [43]:

- Erwärmung von Siebwasser
- Erwärmung von Frischwasser
- Fernwärme

5 POTENZIALANALYSE ZUR ABWÄRMENNUTZUNG IN DER SAPP GRATKORN

Dieses Kapitel befasst sich mit der Ermittlung und Untersuchung von Wärmequellen und -senken sowie der Beurteilung der Abwärmepotenziale für geeignete Technologien zur Abwärmennutzung in der Papierfabrik Sappi am Standort Gratkorn Steiermark. Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf die Prozesse der Produktionslinie 4 (PL 4) mit der Papier- und Streichmaschine 11 (PM 11 und SM 11). Es werden sämtliche Wärmeströme sowohl in der Produktion selbst als auch in unterstützenden Sekundärprozessen betrachtet. Zuerst werden die wärmerlevanten Verfahren der PL4 anhand einer Prozessgrafik erläutert, um anschließend gefundene Abwärmequellen und dazu passende Senken aufzuzeigen. Im Zuge einer ersten Bewertung der Eignung werden die Wärmeleistungen dieser ermittelt. Für diese Berechnungen werden bekannte Daten aus der Produktion und aus früheren Messungen herangezogen. Anschließend werden die Wärmeleistungen der Größe nach sortiert, um den Fokus auf jene Abwärmequellen mit den höchsten Werten zu legen, da sonst der Umfang dieser Arbeit gesprengt werden würde. Im weiteren Verlauf werden die ausgewählten Abwärmequellen in Hinblick auf die Eignung von Abwärmennutzungstechnologien unter Zuhilfenahme verschiedener wärmetechnischer Unternehmen näher betrachtet. Unter zusätzlicher Einbeziehung der gefundenen Wärmesenken können konkrete Anwendungsfälle zur Nutzung jener Abwärme bewertet werden. Nach dieser Analyse wird eine Fallstudie vorgestellt, in welcher die Abwärmepotenziale mithilfe der in Kapitel 3.3 beschriebenen Bottom-up-Methode aus gemessenen Temperaturen und Volumenströmen berechnet werden. Die erhaltenen Daten werden dann zur Auslegung der technischen Anwendungen herangezogen. Mit einer zusätzlichen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung soll die Realisierbarkeit jener Technologien abschließend geprüft werden.

5.1 Beschreibung der wärmerlevanten Anwendungen in der Produktionslinie 4

Die PL 4 besteht hauptsächlich aus der Papier- und Streichmaschine 11. Die Papiermaschine beinhaltet einen Stoffauflauf, eine Siebpartie mit einem Doppelsiebformer, eine Presspartie mit Vakuumabnahme, eine Vortrockenpartie, ein Glättwerk, eine Nachtrockenpartie, eine nachgestellte Streichanlage mit zwei Streichstationen mit je einer Trockengruppe, Infrarotstrahlungstrockner und einen Aufroller. Die Anlage ist für eine Arbeitsbreite von 8.500 mm, eine Betriebsgeschwindigkeit von 1.500 m/min und eine Produktionsleistung von ca. 100 t/h ausgelegt. Die Streichmaschine besitzt eine Abrollung, vier Streichwerke mit jeweils Infrarotstrahlungs- und Heißlufttrocknern (Airfoils) wie auch eine Aufrollung. Sie ist für eine

Potenzialanalyse zur Abwärmenutzung in der Sappi Gratkorn

Arbeitsbreite von 8.500 mm, eine Betriebsgeschwindigkeit von 1.800 m/min und eine Produktionsleistung von ca. 125 t/h ausgelegt.

Um mögliche Abwärmequellen und passende Senken in der PL 4 zu ermitteln, werden sämtliche Wärmeströme bzw. -anwendungen betrachtet. Die Abbildung 20 bietet eine Übersicht aller relevanten Input- und Outputströme der PL 4.

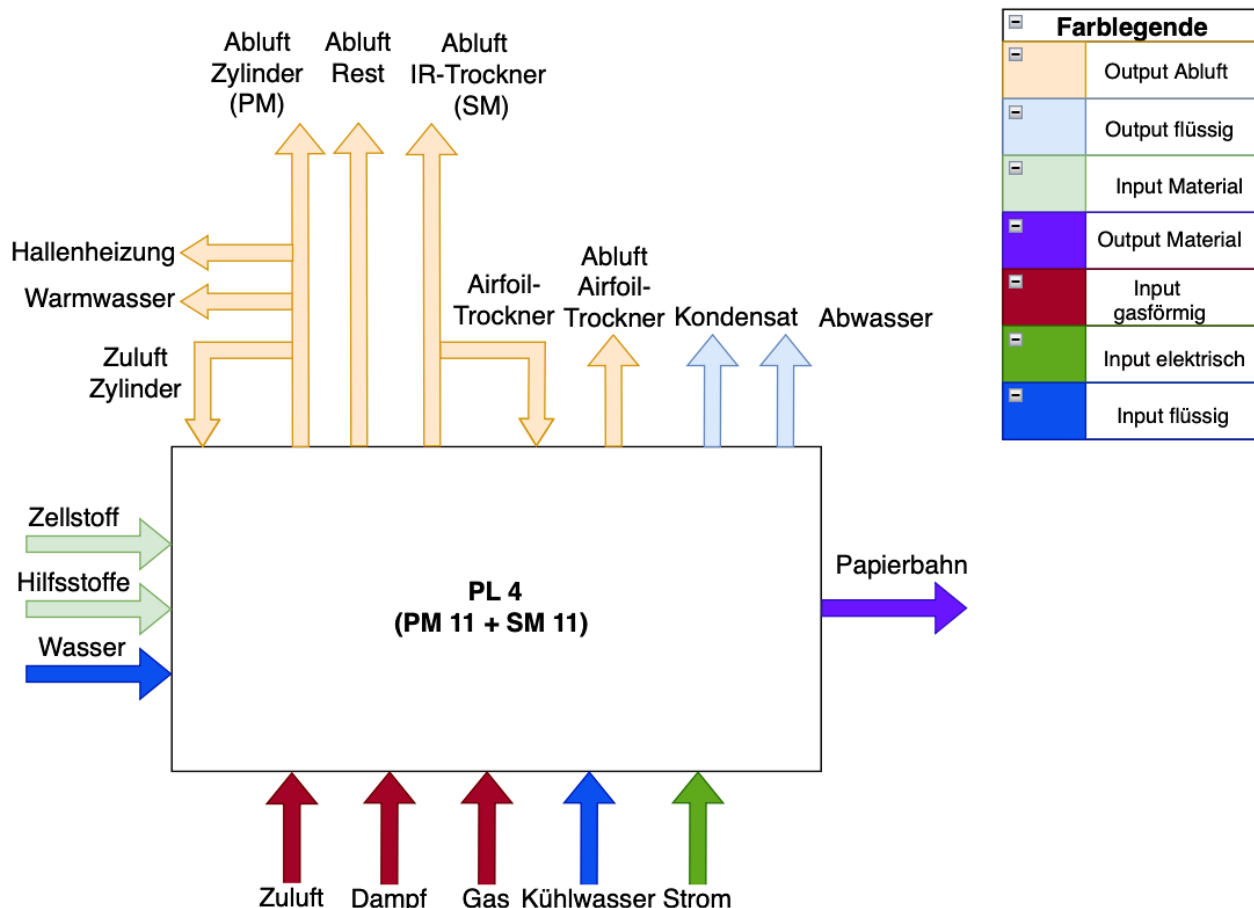


Abbildung 20: Input- und Outputströme der PL 4

Die wärmerlevanten Ströme lassen sich reduzieren auf die eintretenden Ströme für Dampf, Gas, Kühlwasser, Zuluft und die austretenden Ströme der Abluft, des Kondensates und Abwassers.

Abwasser mit 40 °C und einem Durchfluss von 100 l/s entsteht in erster Linie in der Presspartie, nachdem der in Wasser gelöste Zellstoff mittels des Stoffauflaufs der Papiermaschine zugeführt wird. Das Oberflächenwasser wird durch mechanische Kräfte ausgetrieben und in die unterirdische betriebsinterne Kanalisation überführt.

Anschließend gelangt das Zellstoffgemisch mit einer relativen Feuchte von etwa 50 % zu den ungefähr 135 °C warmen Trockenzylindern und wird auf 96-97 % Trockengehalt getrocknet. Die Zylinder werden mit Dampf gespeist, wodurch sich diese erhitzen und das Papier über die Zylinderwand getrocknet werden kann. Der Dampf wird außerhalb der PL 4 im Kesselhaus

generiert und gelangt über ein Leitungssystem zur Papiermaschine. An der PL 4 sind die 3,8 bar (Niederdruckdampf) - und 13 bar (Mitteldruckdampf)-Schienen in Verwendung. Der Trocknungsprozess ist in 6 Kompartimente aufgeteilt, in denen die Temperatur zunimmt, um das Papier schonend zu trocknen. Die erste Trocknungsgruppe wird mit der niedrigsten Temperatur und dem geringsten Druck betrieben. Durch Mischen der beiden Dampfschienen im richtigen Verhältnis durch Thermokompressoren können unterschiedliche Temperaturen und Dampfdrücke gewonnen werden. Der Dampf gelangt leicht überhitzt zur Trockenpartie und kondensiert im Zylinder nach Erwärmung der Zylinderwand. Für eine Tonne Papier werden 0,99 Tonnen Dampf gebraucht. Je höher die zu produzierende Grammaturn ist, desto größer wird der Dampfverbrauch. Insgesamt werden an der PL 4 über 600 kt Dampf benötigt. Das Kondensat wird abgeführt und zurück ins Kesselhaus in den Speisewasserbehälter transportiert.

Das aus der Papierbahn in die Luft übertragene Wasser wird über Luftströme aus der Trockenpartie als Abluft abtransportiert. Diese ist ziemlich feucht und durchläuft eine dreistufige Wärmerückgewinnungsanlage (WRG) bevor sie die Produktionshalle verlässt. Die WRG soll in erster Linie die Abwärme der Trockenpartie wieder in den gleichen Prozess zurückführen. In der ersten Stufe dient die rückgewonnene Wärme zur Erwärmung der in die Trockenpartie eingeblasenen Luft. Diese wird anschließend weiter mittels Brüden und Niederdruckdampf erwärmt, bevor sie der PM wieder zugeführt wird. In der zweiten Stufe wird der Abluft die Wärme für die Heizung des Prozesswassers entnommen und mit der dritten Stufe soll die Heizwärme der Halle bereit gestellt werden. Die restliche Abluft gelangt mit etwa 55 °C über die Kamine ins Freie. Insgesamt verfügt die Papiermaschine über fünf dieser Wärmerückgewinnungsgruppen.

Weitere Abluftströme, welche nicht für bereits eingesetzte Wärmerückgewinnungsprozesse eingesetzt werden können, werden direkt über den Kamin abgeführt. Darunter ist die Abluft der Halle oder der Maschinen, wie beispielsweise der Vakuumpumpen, zu verstehen.

Das Gas wird für die Infrarotstrahlungstrockner sowohl in der Papier- als auch in der Streichmaschine eingesetzt. Die Brenner feuern mit etwa 1000 °C auf die Heizflächen, welche die Papierbahn dadurch erwärmen und trocknen. Dabei entsteht eine Abluft von ca. 200 °C. Zusätzlich zu den Infrarotstrahlern der Streichmaschine sind Airfoiltrockner angebracht, welche einen Teilstrom der Abluft der Infrarotstrahler direkt nutzen und mit angesaugter Frischluft das Papier durch Luftkonvektion bei etwa 170 °C trocknen. Hierbei entsteht eine Abluft von ca. 100 °C. Jedem Infrarotstrahlungstrockner der Streichmaschine ist ein Airfoiltrockner zugeordnet.

Die gesamte Abluft der PL 4 wird über 72 Kamine aus der Halle befördert, wobei 26 Kamine zur Hallenabluft, 23 zur Maschinenabluft PM 11, 7 zur Streichaggregatabluft PM 11 und 16 zur Streichaggregatabluft SM 11 zusammengefasst werden.

Das Kühlwasser dient der Kühlung der Zylinder, der Vakuumpumpen und des Kreislaufwassers. Dieses wird über insgesamt sieben Kühltürme, wobei drei zurzeit nicht in Betrieb sind, wieder zurück in die Produktion gebracht. Durch dieses optimierte Kreislaufsystem können über 90 % an Prozesswasser wieder rückgewonnen werden.

5.1.1 Übersicht der gefundenen Abwärmequellen und -senken

Nach Betrachtung der in Kapitel 5.1 angeführten und beschriebenen Wärmeanwendungen der PL 4 können folgende bedeutende Abwärmeströme, welche eine Restwärme beinhalten, jedoch in der Produktion keinen Nutzen haben, erfasst werden:

- Abluft:
 - aus der Produktionshalle
 - der Maschinen
 - der Infrarotstrahlungstrockner
 - der Airfoil-trockner
- Abwasser: aus dem Prozess
- Kühltürme:
 - Prozesskühlung
 - Zylinderkühlung
 - Vakuumpumpenkühlung

Möglichkeiten zur Nutzung der oben angeführten Abwärmeströme stellen anschließende Wärmesenken dar:

- Niederdruckdampferzeugung
- Kondensataufwärmung
- Frischwassererwärmung
- Hallenbeheizung
- Kühlung (EDV, IT, FU,..)
- Fernwärme
- Frischluftaufwärmung für Airfoiltrockner

5.2 Ermittlung der Abwärmenutzungspotenziale

Um die Nutzbarkeit der in 5.1.1 genannten Abwärmeströme zu bewerten, werden die Wärmeleistungen \dot{Q} dieser Ströme aus der Austrittstemperatur T_2 , der Abkühltemperatur T_1 und dem Austrittsvolumenstrom \dot{V} mithilfe nachfolgender Formel 5-1 bestimmt. Die spezifische Wärmekapazität c_p des Abwassers wurde der Literatur entnommen und die der Abluft unter Berücksichtigung der relativen Feuchte aus dem Mollier-Diagramm ermittelt.

$$\dot{Q} = \dot{V} * c_p * (T_2 - T_1) \quad (5-1)$$

Die Temperatur T_1 wurde für die Abwärmequellen Abluft und Abwasser mit 20 °C angenommen. Die somit berechneten Wärmeleistungen stellen jenes Potenzial dar, welche bei Abkühlen der Abwärmeströme auf 20 °C zur Verfügung stehen würden. Lediglich die Wärmeleistungen der Kühltürme wurden mit den in der Produktion vorgegebenen Temperaturen, mit welchen diese betrieben werden, berechnet.

5.2.1 Berechnung der Wärmeleistung der Abluft

Als Grundlage für die Ermittlung der Wärmeleistungen der abgeführten Luftströme dienen Messungen eines Emissionsbescheides aus dem Jahr 2018, welche dem Anhang zu entnehmen sind. Im Zuge dieser Messungen wurde die Temperatur, der Durchfluss und die Feuchte des Abluftstromes sowie der vorherrschende Luftdruck jedes Abluftkamines aufgenommen. Nachfolgend wird die Berechnung der Normwärmeleistung beispielhaft am Messpunkt 24 durchgeführt. Die betrieblichen Volumenströme \dot{V}_B wurden mit der Formel 5-2 in Normbedingungen umgerechnet, wobei der Normdruck p_N mit 1,01325 bar und die Normtemperatur T_N mit 273,15 K angeführt werden. Der Betriebsdruck p_B , die Betriebstemperatur T_B und der Betriebsvolumenstrom \dot{V}_B gehen aus dem Bescheid hervor, wie bereits erwähnt. Sämtliche berechneten Wärmeleistungen sind dem Anhang beigelegt.

$$\dot{V}_N = \frac{p_B}{p_N} * \frac{T_N}{T_B} * \dot{V}_B \quad (5-2)$$

Beispielrechnung: Wärmeleistung des Messpunktes 24 – Coater 3 IR Abluft Rampe

$$\dot{V}_{B,MP\ 24} = 14.476 \frac{Bm^3}{h}$$

$$c_{p_{Abwasser}} = 1,0 \frac{kJ}{m^3K}$$

$$p_B = 971 \text{ hPa}$$

$$T_2 = 257 \text{ °C}$$

$$T_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\dot{V}_{N,MP24} = \frac{0,971}{1,01325} * \frac{273,15}{(257 + 273,15)} * 14.476 = 7.148 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} = 1,99 \frac{\text{Nm}^3}{\text{s}}$$

$$\dot{Q}_{N,MP24} = 1,99 * 1,0 * (257 - 20)$$

$$\dot{Q}_{N,MP24} = 470,5 \text{ kW}$$

An dem Messpunkt 24, welcher dem Infrarotstrahlungstrockner 3 in der Streichmaschine zuzuschreiben ist, kann man bei einer Ausströmungstemperatur von 257 °C und einem austretenden Volumenstrom von 1,99 Nm³/s eine restliche Wärmeleistung von 470,5 kW entnehmen.

5.2.2 Berechnung der Wärmeleistung des Abwassers

Das Abwasser der Produktion strömt konstant mit 100 l/s und 40 °C ins Klärwerk, wodurch sich folgende zur Verfügung stehende Wärmeleistung ergibt.

$$\dot{V}_{Abwasser} = 100 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 0,1 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$c_{p,Abwasser} = 4190 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3\text{K}}$$

$$T_2 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\dot{Q}_{Abwasser} = 0,1 * 4190 * (40 - 20)$$

$$\dot{Q}_{Abwasser} = 8380,0 \text{ kW}$$

5.2.3 Berechnung der Wärmeleistung der Kühltürme

Die Zylinderkühlung erfolgt über zwei Kühltürme, wobei die Temperatur des Kühlwassers von 29 °C auf 22 °C gesenkt wird. Vier weitere Kühltürme stehen für die Kühlung des Kreislaufwassers (Prozesskühlung) mit 24 °C auf 22 °C zur Verfügung. Nachfolgende berechnete Wärmeleistungen stellen die bei der Abkühlung freiwerdenden Wärmeströme dar. Der Durchfluss des Kühlwassers schwankt je nach Produktion, weshalb sich in anschließender Berechnung eine minimale und eine maximale Wärmeleistung ergibt.

Berechnung: Wärmeleistung der Zylinderkühlung

$$\dot{V}_{Zylinderkühlung,min} = 125 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 0,125 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\dot{V}_{Zylinderkühlung,max} = 235 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 0,235 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$T_2 = 29 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_1 = 22 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\dot{Q}_{\text{Zylinderkühlung,min}} = 0,125 * 4190 * (29 - 22)$$

$$\dot{Q}_{\text{Zylinderkühlung,min}} = 3666,3 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{\text{Zylinderkühlung,max}} = 0,235 * 4190 * (29 - 22)$$

$$\dot{Q}_{\text{Zylinderkühlung,max}} = 6892,6 \text{ kW}$$

Bei der Kühlung des Kühlwassers der Zylinder werden an einem Kühlturm mindestens 3,7 MW und maximal 6,9 MW Wärme frei.

Berechnung: Wärmeleistung der Prozesskühlung

$$\dot{V}_{\text{Prozesskühlung,min}} = 80 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 0,080 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\dot{V}_{\text{Prozesskühlung,max}} = 240 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 0,240 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$T_2 = 24 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_1 = 22 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\dot{Q}_{\text{Prozesskühlung,min}} = 0,080 * 4190 * (24 - 22)$$

$$\dot{Q}_{\text{Prozesskühlung,min}} = 670,4 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{\text{Prozesskühlung,max}} = 0,240 * 4190 * (24 - 22)$$

$$\dot{Q}_{\text{Prozesskühlung,max}} = 2011,2 \text{ kW}$$

Bei der Kühlung des Kreislaufwassers werden an einem Kühlturm mindestens 0,7 MW und maximal 2,0 MW Wärme frei.

5.2.4 Übersicht der berechneten Wärmeleistungen

Die ermittelten Wärmeleistungen der 72 Abluftkamine, zwei Kühlturmkreisläufe mit jeweils minimalen und maximalen Durchfluss und des Abwassers sind in absteigender Ordnung in Tabelle 2 angeführt. Demnach ist das bei weitem höchste theoretisch berechnete Potenzial zur Abwärmenutzung dem Abwasser, aufgrund des hohen Durchflusses und der hohen spezifischen Wärmekapazität gegenüber der Luft, mit 8,38 MW zuzuschreiben. Des Weiteren ist erkennbar, dass die in den Zylinderkühltürmen frei werdende Wärme zwischen 6,89 MW und 3,67 MW liegt und somit ebenfalls ein enormes theoretisches Potenzial aufweist. Bezüglich der Abluftströme sind die höchsten Wärmeleistungen bei den Coatern (Streichaggregate) zu finden. Hier ist sowohl die Abwärme der Infrarotstrahlungstrockner (IR

Potenzialanalyse zur Abwärmenutzung in der Sappi Gratkorn

Abluft Rampe) als auch die der Airfoiltrockner der Coater 3 – 6 mit in etwa 1 – 2 MW sehr energiereich. Außerdem kann man feststellen, dass das verfügbare Potenzial der Wärmerückgewinnung 1 – 4 mit knapp 1 MW bis 1,8 MW auch relativ hoch ist. Die restliche Abluft der Halle und der Maschinen ist weniger energiereich und daher für eine Abwärmenutzung im Zuge dieser Arbeit nicht relevant.

Tabelle 2: Berechnete Wärmeleistungen der in der PL 4 erfassten Abwärmeströme

lfd. Nr.	Messpunkt Nr.	Anlagenpunkt-Nr.	Bezeichnung	\dot{Q}_N /kW
1	-	-	Abwasser	8380,00
2	-	-	Zylinderkühlung (max)	6892,55
3	-	-	Zylinderkühlung (min)	3666,25
4	36	53 32 0014	Coater 6 - IR Abluft Rampe	2042,94
5	-	-	Prozesskühlung (max)	2011,20
6	13	31 42 0037	Wärmerückgewinnung 4	1794,56
7	32	53 32 0010	Coater 5 - IR Abluft Rampe	1670,17
8	12	31 42 0035	Wärmerückgewinnung 3	1645,63
9	28	53 32 0006	Coater 4 - IR Abluft Rampe	1543,06
10	11	31 42 0033	Wärmerückgewinnung 2	1363,44
11	27	53 42 0007	Coater 3 - Airfoil Trockner	1227,28
12	39	53 42 0031	Coater 6 - Airfoil Trockner	1109,28
13	35	53 42 0023	Coater 5 - Airfoil Trockner	1053,58
14	10	31 42 0031	Wärmerückgewinnung 1	995,37
15	5.2	11 21 0062	SM - Abluft	923,73
16	16	31 52 0016	Coater 1 - IR Abluft Rampe	919,46
17	5.3	11 21 0063	SM - Abluft	895,41
18	5.8	11 21 0068	SM - Abluft	886,03
19	5.4	11 21 0064	SM - Abluft	885,88
20	5.1	11 21 0061	SM - Abluft	876,71
21	31	53 42 0015	Coater 4 - Airfoil Trockner	809,75
22	21	31 52 0017	Coater 2 - IR Abluft Rampe	749,86
23	-	-	Prozesskühlung (min)	670,40
24	8	31 22 0031	Siebraum Duoformer 2	592,15

Potenzialanalyse zur Abwärmennutzung in der Sappi Gratkorn

25	3.1	11 21 0021	PM-Naßpartie	540,02
26	3.2	11 21 0022	PM-Naßpartie	540,02
27	3.3	11 21 0023	PM-Naßpartie	540,02
28	3.5	11 21 0025	PM-Naßpartie	540,02
29	4.1	11 21 0026	PM-Trockenpartie	517,12
30	29	53 22 0003	Coater 4 - IR Abluft offene Haube	486,08
31	24	53 32 0002	Coater 3 - IR Abluft Rampe	470,67
32	40	31 42 0101	Wärmerückgewinnung 3a	466,60
33	7	31 22 0030	Siebraum Duoformer 1	405,24
34	25	53 22 0001	Coater 3 - IR Abluft offene Haube	345,86
35	17	31 52 0001	Coater 1 - IR Abluft offene Haube	314,49
36	20	31 52 0003	Coater 2 - IR Abluft offene Haube	300,40
37	22	31 52 0004	Coater 2 - IR geschlossene Haube	272,54
38	30	53 22 0004	Coater 4 - IR geschlossene Haube	242,22
39	18	31 52 0002	Coater 1 - IR geschlossene Haube	229,12
40	26	53 22 0002	Coater 3 - IR geschlossene Haube	227,54
41	37	53 22 0007	Coater 6 - IR Abluft offene Haube	213,03
42	34	53 22 0006	Coater 5 - IR geschlossene Haube	202,13
43	38	53 22 0008	Coater 6 - IR geschlossene Haube	195,59
44	9	31 22 0032	Absaugung Skimmer	189,15
45	2.2	11 22 0051	Streichküche Nr.2	165,15
46	23	31 42 0043	Glättwerk - Haubenabluft	160,14
47	44	43 12 0036	Pulper UR 112	122,62
48	5.5	11 21 0065	SM - Abluft	118,50
49	1.3	11 22 0061	SM-WRG Ebene	114,50
50	1.4	11 22 0060	SM-WRG Ebene	114,50
51	43	43 12 0038	Randstreifenpulper 2	105,76
52	5.6	11 21 0066	SM - Abluft	102,56
53	42	43 12 0030	Pressenauflöser	98,40
54	5.10	11 21 0070	SM - Abluft	94,95
55	15	43 12 0037	Randstreifenpulper 1	91,10

Potenzialanalyse zur Abwärmenutzung in der Sappi Gratkorn

56	5.7	11 21 0067	SM - Abluft	88,57
57	4.2	11 21 0027	PM-Trockenpartie	84,43
58	5.9	11 21 0069	SM - Abluft	84,41
59	3.4	11 21 0024	PM-Naßpartie	79,15
60	2.1	11 22 0050	Streichküche Nr.1	73,25
61	2.3	11 22 0052	Streichküche Nr.3	69,84
62	1.5	11 22 0027	PM-WRG Ebene	66,88
63	46	43 12 0031	Leimpresenauflöser	58,73
64	1.1	11 22 0028	PM-WRG Ebene	55,46
65	1.2	11 22 0029	PM-WRG Ebene	53,67
66	1.6	11 22 0059	SM-WRG Ebene	52,02
67	45	43 12 0034	Maschinenauflöser	45,40
68	41	31 22 0040	Vacuumschuh	44,32
69	14	43 12 0035	Pulper UR 111	35,23
70	6.4	31 21	Vakuumpumpen	16,55
71	6.5	31 21	Vakuumpumpen	15,63
72	6.6	31 21	Vakuumpumpen	15,17
73	6.3	31 21	Vakuumpumpen	14,71
74	47	43 12 0039	Rollenschneiderauflöser	14,49
75	6.1	31 21	Vakuumpumpen	14,25
76	6.2	31 21	Vakuumpumpen	14,25
77	33	53 22 0005	Coater 5 - IR Abluft offene Haube	0,00

5.3 Feasibility Study zur Niederdruckdampferzeugung in der PL4 durch Abwärmenutzung

In diesem Kapitel soll explizit die Eignung der in Tabelle 2 gelisteten Abwärmequellen zur Erzeugung von Niederdruckdampf mit 2,8 bar (ü) und 142 °C bewertet werden. Die Verwendung von Abwärme ist bei interner Nutzung, besonders im gleichen Bereich, in dem diese anfällt, effizienter. Daher ist nicht nur die Höhe des Wärmeinhaltes ausschlaggebend für eine optimale Abwärmenutzung sondern auch das Vorhandensein einer idealen Wärmesenke, denn der Bedarf an Wärme ist für die Anwendung einer Abwärmenutzung unabdingbar. Bei Betrachtung der möglichen Wärmesenken in der Sappi Gratkorn kann demnach die

Möglichkeit einer Hallenheizung mittels Abwärme vorab verworfen werden, da diese bereits durch Wärmerückgewinnungen, wie in Kapitel 5.1 beschrieben wurde, optimiert ist. Ebenso gibt es aufgrund ausgebauter Wärmetechnologien wenig Bedarf an Abwärme in der Frischwassererwärmung. Des Weiteren wäre die Umsetzung einer Kühlungseinrichtung für diverse Warten, EDV- und Technikräume am Standort eher weniger lukrativ, da aufgrund der örtlichen Distanz enorme Verrohrungsarbeiten notwendig wären und zudem der Bedarf nicht hoch genug wäre. Demzufolge eignen sich die Niederdruckdampferzeugung, Kondensataufwärmung, Frischluftaufwärmung der Airfoil-Trockner sowie die Erzeugung von Fernwärme als Wärmesenken für die Anwendung von Abwärmenutzungstechnologien. Im weiteren Verlauf wird der Fokus auf die Herstellung von Dampf gelegt, da hier das größte auszuschöpfende Potenzial gesehen wird. Bei Substitution von Dampf mit im Prozess anfallende Abwärme können erhebliche Erzeugungskosten eingespart werden. Anschließend an die Bestimmung von geeigneten Abwärmequellen, mit welchen das vorgegebene Ziel erreicht werden kann, wird eine Wirtschaftlichkeitsberechnung mit ausgelegten Technologieanwendungen durchgeführt, um eine Aussage zur Rentabilität der Dampferzeugung mit Abwärme zu treffen.

5.3.1 Bewertung der Abwärmequellen für die Erzeugung von Niederdruckdampf

Im ersten Schritt werden jene Abwärmequellen ausgewählt, welche der Herstellung von Niederdruckdampf dienen können. Dafür werden die Abwärmeströme unter Zuhilfenahme von wärmetechnischen Lieferanten auf ihre potenzielle Nutzung mithilfe von aktuell verfügbaren Technologien bewertet. In Abbildung 21 sind die vorhandenen Quellen mit ihren typischen Temperaturniveaus sowie die Einschätzung der Lieferanten zu deren Eignung zu erkennen. Eine grüne Färbung deutet generell auf eine hohe potenzielle Nutzung der Abwärme für die Dampferzeugung hin und rot auf eine eher geringe bzw. keine. Eine gelbe Färbung soll auf ein vorhandenes Potenzial hindeuten, jedoch nicht für die Dampferzeugung, sondern anderweitige Anwendungen. Bei erster Betrachtung ist erkennbar, dass die meisten Abwärmeströme für die Herstellung von Niederdruckdampf laut Lieferant nicht geeignet sind. Die Firma Ochsner sieht in der PL 4 generell Potenzial nur in Abwärme flüssiger Form. Hier kämen Kompressionswärmepumpen in Frage, welche Wärme mit maximal 130 °C generieren. Für die Erzeugung von Niederdruckdampf werden jedoch höhere Temperaturen vorausgesetzt.

Potenzialanalyse zur Abwärmenutzung in der Sappi Gratkorn

Farblegende	
	= hohes Potenzial
	= Potenzial vorhanden (nicht für Dampferzeugung)
	= kein Potenzial

Abwärmequellen	Temperatur -niveau	Lieferanten			
		Stepsahead	Viessmann	Exodraft	Ochsner
Hallenabluft	35 - 65 °C				
PM-WRG Ebene					
SM-WRG Ebene					
Streichküche					
PM-Naßpartie					
PM-Trockenpartie					
SM - Abluft					
Maschinenabluft	25 - 65 °C				
Vakuumpumpen					
Pressenauflöser					
Wärmerückgewinnung					
Pulper UR 111					
Randstreifenpulper 1+2					
Pulper UR 112					
Maschinenauflöser					
Streichaggregate	47 - 300 °C				
Coater IR Abluft Rampe					
Coater IR Abluft offene Haube					
Coater IR geschlossene Haube					
Coater Airfoil Trockner					
Kühltürme					
Zylinderkühlung	25 - 35 °C				
Prozesskühlung	19 - 25 °C				
Abwasser	40 °C				

Abbildung 21: Bewertungsmatrix der verfügbaren Abwärmequellen zur Erzeugung von Niederdruckdampf mit den aktuell verfügbaren Technologien (grün = hohes Potenzial, gelb = vorhandenes Potenzial aber nicht für die Dampferzeugung, rot = geringes Potenzial)

Prinzipiell wäre die Nutzung von Abwärme aus Abwasser und Kühltürmen eine energieeinbringende Anwendung, da die Abwärme zum einen in Form von Wasser mit einer höheren spezifischen Wärmekapazität vorliegt und zum anderen mit einer ziemlich konstanten und hohen Durchflussmenge zur Verfügung steht und somit eine hohe Wärmeleistung aufweist. Jedoch können mit den angebotenen Wärmepumpen der verschiedenen Hersteller nicht ausreichend hohe Temperaturen für eine Dampferzeugung erreicht werden. Die angebotene Wärmepumpe der Firma Viessmann wäre zwar in der Lage die Wärme des Abwassers auf 142 °C anzuheben, hätte aber aufgrund des enormen Stromeinsatzes und des riesigen Temperaturhubes eine zu geringe Leistungszahl, sodass die Lukrativität dieser Idee zu gering ist. Anderweitige Anwendungen wären die Aufwärmung der Frischluft für die Airfoiltrocknung, die Kondensataufwärmung und die Erzeugung von

Fernwärme, welche jedoch innerhalb dieser Arbeit nicht weiter behandelt werden. Für die Verwendung der Abluft bis 65 °C kann die gleiche Aussage getroffen werden. Die angebotenen Wärmepumpen der Hersteller Viessmann und Stepsahead können zwar die vorhandene Abluft auf ein höheres Temperaturniveau heben, sind jedoch ebenfalls mit etwa 130 °C limitiert oder wären in der Auslegung viel zu teuer. Für die Erzeugung von Niederdruckdampf werden grundsätzlich höhere Temperaturen vorausgesetzt. Drei der vier genannten Hersteller sehen eine potenzielle Nutzung zur Dampfproduktion mit verfügbaren Technologien in der Abluft der Streichaggregate bzw. Infrarotstrahlungs- und Airfoiltrockner.

Die Firma Exodraft spezialisiert sich auf Rauchgaswärmerückgewinnungen und bietet Lösungsansätze für diverse Nutzungsmöglichkeiten von Abwärme mit relativ hohen Temperaturen an. In erster Linie werden Wärmetauscher zur direkten Wärmeübertragung verwendet und je nach Anwendung unterschiedlich eingesetzt. Der Hersteller sieht ein hohes Potenzial in der direkten Nutzung der Streichmaschinenabluft. Durch Abkühlung an einem Wärmetauscher können Leistungen von 1 – 2 MW an Wasser übertragen werden.

Die Hersteller Viessmann und Stepsahead bieten ebenfalls die Option an über direkte Nutzung die Abwärme aus der heißen Abluft zur Dampferzeugung heranzuziehen. Zudem besteht die Möglichkeit einer Kombination aus direkter und indirekter Nutzung der Abwärme aus der Abluft. Dabei soll die heiße Abluft der Streichaggregate zuerst so runtergekühlt werden, dass die entnommene Wärme direkt für die Dampfproduktion eingesetzt werden kann. Die restliche Abwärme kann dann noch weiter abgekühlt und zu einer Wärmepumpe befördert werden, welche die Temperatur der Abwärme mit etwa 80 °C auf 142 °C anheben könnte. In diesem Fall wären die Temperaturen hoch genug, um mithilfe einer geeigneten und beständigen Wärmepumpe Dampf zu generieren. Die Firma Stepsahead bietet beispielsweise Absorptionswärmepumpen an, für welche Temperaturen bis 150 °C unproblematisch wären.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich die Abwärme der PL 4 mit der aktuell verfügbaren Technik für unterschiedliche Anwendungen verwerten lassen. Speziell für die Niederdruckdampferzeugung eignet sich lediglich die Abluft der Streichaggregate, da diese ausreichend hohe Temperaturen aufweist. Im nächsten Schritt wird eine passende Technologie für die Umsetzung bestimmt.

5.3.2 Konzept zur Umsetzung der Niederdruckdampferzeugung

Grundsätzlich basiert die Auswahl der Technologie auf das im vorherigen Kapitel 5.3.1 bereits erwähnte Konzept, in dem die Abwärmenutzung der Streichmaschinenabluft über eine direkte Wärmeübertragung und zusätzlich über eine Wärmepumpe erfolgt. Hierbei soll die Streichmaschinenabluft mithilfe eines Wärmetauschers (WT1) auf 150 °C abgekühlt werden und gleichzeitig das Medium Wasser auf der kalten Seite zum Verdampfen bringen, sodass

Potenzialanalyse zur Abwärmenutzung in der Sappi Gratkorn

Niederdruckdampf mit 142 °C und 2,8 bar (ü) entstehen kann. Die bereits einmal abgekühlte Abluft wird zu einem weiteren Wärmetauscher (WT2) befördert, der die noch übrige Wärme auf Wasser in einem Zwischenkreis übertragen soll. Das Wasser strömt mit 75 °C in den Wärmetauscher und wird auf 115 °C erwärmt, während sich die Temperatur des Luftstromes auf 80 °C reduziert. Die restliche Abluft entweicht über den Kamin in die Atmosphäre. Der Zwischenkreis mit Wasser dient als Wärmeübertragung für die Absorptionswärmepumpe, welche ebenfalls Niederdruckdampf mit den vorgegebenen Werten herstellen soll. Der aus (AWP) Abwärme hergestellte Dampf kann direkt vor Ort in die Niederdruckschiene eingespeist werden und substituiert somit relevante Frischdampfmengen. Auf diese Weise kann sehr heiße Abluft auf direktem Weg effizient eingesetzt werden und auch die abgekühlte aber noch ausreichend warme Abluft für das zu erreichende Ziel genutzt werden. Nachfolgende Abbildung 22 soll das hier vorgestellte Konzept erläutern.

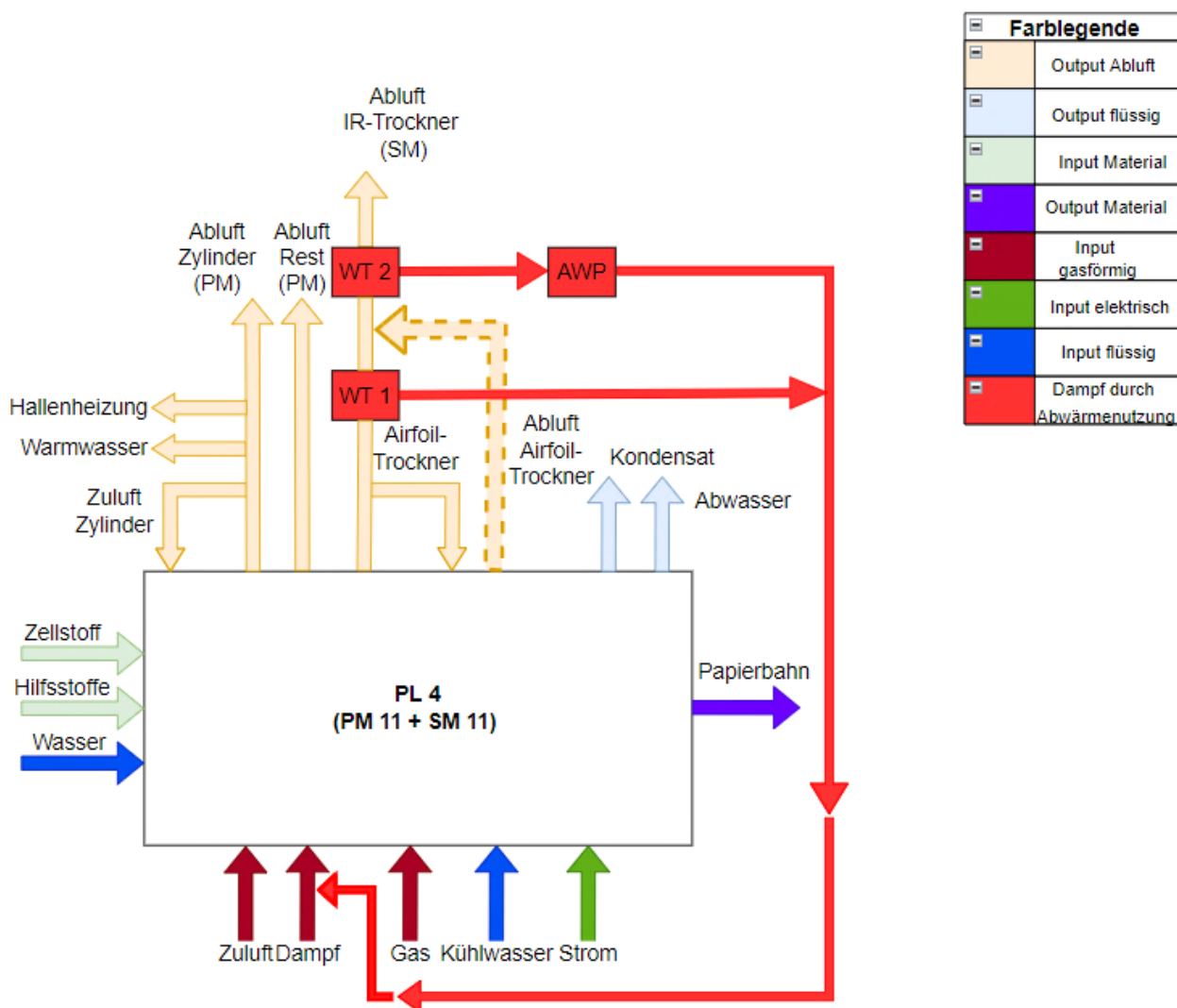


Abbildung 22: Visualisierung der Maßnahmen zur Niederdruckdampferzeugung mithilfe zwei Wärmetauscher und einer Absorptionswärmepumpe

In Kapitel 5.3.1 wurden bereits verschiedene wärmetechnische Hersteller mit den zur Verfügung stehenden Technologien genannt. Für die Umsetzung des hier vorgestellten Konzeptes sind Technologien für sowohl eine direkte als auch eine indirekte Abwärmenutzung notwendig. Die indirekte Abwärmenutzung soll, wie bereits oben erwähnt, durch eine Absorptionswärmepumpe realisiert werden. Ein großer Unterschied in der Betriebsweise zu einer Kompressionswärmepumpe liegt im Stromverbrauch. Kompressionswärmepumpen bewältigen den Temperaturhub mithilfe von elektrischer Energie, während bei Absorptionswärmepumpen die Abwärme selbst als Antriebsenergie dient und daher der Einsatz von Strom minimal bzw. vernachlässigbar ist. Im Falle von unvorhersehbaren Erhöhungen der Strompreise am Markt hat die Absorptionswärmepumpe einen deutlichen Vorteil gegenüber einer Kompressionswärmepumpe. Mithilfe des Herstellers Stepshead soll eine geeignete Wärmepumpe ausgelegt werden. Die Dimensionen und Kosten des Verdampfers und des Wärmetauschers werden von dem vertrauten Wärmetauscherhersteller Kelvion berechnet.

Für die Auslegung jener Abwärmenutzungstechnologien werden die Temperaturen wie auch Volumenströme und somit die vorhandenen Wärmeleistungen der Abluft benötigt. Die bereits in Kapitel 5.2 genannten Daten des Emissionsbescheids aus dem Jahre 2018 werden jedoch nicht herangezogen, da es sich hierbei um Punktmessungen handelt. Die Abluft der Papier- und Streichmaschine verändert sich je nach Eigenschaften der zu produzierenden Einheit und fluktuiert daher ziemlich stark. Diese Erkenntnis ist auf die Betriebsweise der Aggregate zurückzuführen. Je nach Schwere bzw. Grammaturn des Papiers werden die Infrarotstrahlungs- und Airfoiltrockner unterschiedlich betrieben, wodurch wiederum die Temperaturen und Volumenströme der Abluftkamine variieren. Da weder Temperatur noch Strömungsgeschwindigkeit der Abluft aufgezeichnet wird, ist es notwendig Messungen zu unterschiedlichen Grammaturn durchzuführen. Aufgrund der reichlichen Variation an Papiersorten wurden die Messreihen auf sechs ausgewählte Grammaturn beschränkt, welche für eine typische Betriebsweise aussagekräftig genug sind. Mithilfe jener Messungen kann auf ein Produktionsjahr hochgerechnet werden, um einen Leistungsbereich für die Auslegung der Wärmetauscher und Wärmepumpe zu definieren.

5.3.2.1 Messung der Temperaturen und Strömungsgeschwindigkeiten

Die Messungen wurden an den in Tabelle 3 aufgelisteten Messpunkten mithilfe des Handmessgerätes TESTO 400 und einem Prandtl-Staurohr mit Thermolement durchgeführt. Im Rahmen einer Messreihe wurde die Ablufttemperatur, die minimale, mittlere und maximale Strömungsgeschwindigkeit eines Kamins zu einer Grammaturn bestimmt. Die Temperatur, welche nach einem Zeitraum von 30 Sekunden keine Änderungen vorgewiesen hat, wurde als Austrittstemperatur festgelegt. Sämtliche gemessenen Temperaturen sind in

Abbildung 23 wie auch im Anhang ersichtlich. Die minimalen und maximalen Strömungsgeschwindigkeiten stellen die während des Messzeitraumes unteren und oberen erfassten Grenzen dar. Für die Bestimmung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit wurde vom Messgerät der Mittelwert der gemessenen Geschwindigkeiten berechnet. Die Messreihen wurden zu den Sorten Gloss 1 115 g/m², Silk 1 130 g/m², Silk 1 150 g/m², Silk 1 170 g/m², Silk 1 200 g/m² und Silk 1 300 g/m² durchgeführt. Die gemessenen Werte sind dem Anhang beigelegt.

Tabelle 3: Übersicht der untersuchten Messpunkte mit deren Bezeichnungen und dazu gehörigen Anlagennummern

Messpunktnr.	Bezeichnung	Anlagenpunktnr.
24	Coater 3 - IR Abluft Rampe	53 32 0002
25	Coater 3 - IR Abluft offene Haube	53 22 0002
27	Coater 3 - Airfoil Trockner	53 42 0007
28	Coater 4 - IR Abluft Rampe	53 32 0006
29	Coater 4 - IR Abluft offene Haube	53 22 0003
31	Coater 4 - Airfoil Trockner	53 42 0015
32	Coater 5 - IR Abluft Rampe	53 32 0010
33	Coater 5 - IR Abluft offene Haube	53 22 0006
35	Coater 5 - Airfoil Trockner	53 42 0023
36	Coater 6 - IR Abluft Rampe	53 32 0014
37	Coater 6 - Airfoil Trockner	53 42 0031

5.3.2.2 Berechnung der Wärmeleistungen

Aus den minimalen, mittleren und maximalen Strömungsgeschwindigkeiten v sowie dem Kamindurchmesser d_{Kamin} gehen mithilfe der Formel 5-4 minimale, mittlere und maximale Volumenströme \dot{V}_B hervor.

$$\dot{V}_B = v * A_{Kamin} = v * \frac{d_{Kamin}^2}{4} * \pi \quad (5-4)$$

Der Kamindurchmesser ist der Bescheidsmessung im Anhang zu entnehmen. Die berechneten Volumenströme werden mit der Formel 5-2 analog zu der Berechnung in Kapitel 5.2 auf Normbedingungen umgerechnet. Aus den ermittelten Normvolumenströmen lassen sich für jeden Kamin anhand der Formel 5-1 jeweils zwei minimale, mittlere und maximale

Wärmeleistung bestimmen. Dabei wird zuerst die Wärmeleistung mit 150 °C als Abkühltemperatur bestimmt und dann jene mit 80 °C. Nachfolgend wird die beschriebene Berechnung demonstrativ an Messpunkt 24 durchgeführt. Sämtliche berechneten Wärmeleistungen sind dem Anhang beigelegt worden.

Beispielrechnung: Wärmeleistung des Messpunktes 24 – Coater 3 IR-Abluft Rampe für 150 g/m²

$$v_{MP\ 24,mitel} = 3,30 \frac{m}{s}$$

$$c_{p\ Abwasser} = 1,0 \frac{kJ}{m^3 K}$$

$$p_B = 983\ hPa$$

$$T_2 = 230,90\ ^\circ C$$

$$T_1 = 150\ ^\circ C$$

$$\begin{aligned}\dot{V}_{B,MP24,mittel} &= v_{MP24,mitel} * A_{Kamin} = v_{MP24,mitel} * \frac{d^2_{Kamin,MP24}}{4} * \pi = 3,30 * \frac{1,6^2}{4} * \pi \\ &= 6,63 \frac{m^3}{s}\end{aligned}$$

$$\dot{V}_{N,MP24} = \frac{0,983}{1,01325} * \frac{273,15}{(230,90 + 273,15)} * 6,63 = 3,49 \frac{Nm^3}{s}$$

$$\dot{Q}_{N,MP24,direkt} = 3,49 * 1,0 * (230 - 150)$$

$$\dot{Q}_{N,MP24,direkt} = 282,19\ kW$$

$$\dot{Q}_{N,MP24,indirekt} = 3,49 * 1,0 * (150 - 80)$$

$$\dot{Q}_{N,MP24,indirekt} = 290,85\ kW$$

$$\dot{Q}_{N,MP24} = \dot{Q}_{N,MP24,direkt} + \dot{Q}_{N,MP24,indirekt} = 282,85 + 290,85 = 573,04\ kW$$

5.3.2.3 Berechnung der jährlich abgegebenen Wärmeleistungen

Um die verfügbaren Wärmemengen für ein Jahr abzuschätzen, werden ähnlich gefertigte Papiersorten so zusammengefasst, dass diese gleiche Werte aufweisen. Das bedeutet, dass einer Sorte, zu welcher keine Daten erhoben wurden, die gleichen Messwerte einer ähnlich hergestellten Sorte zugeordnet werden. Beispielsweise werden die gemessene Papiersorte Silk 1 130 g/m² und die unbekannte Sorte Gloss 1 130 g/m² aufgrund der ähnlichen Betriebsweise der Trocknungsaggregate zusammengefasst. Die Wärmeleistung eines Kamines für Gloss 1 130 g/m² entspricht dann jener von Silk 1 130 g/m². Dieser Ansatz wird für alle im Zeitraum von 13.08.2022 16:09 Uhr bis 19.08.2022 21:21 Uhr hergestellten Papiersorten durchgeführt. Jener Zeitraum stellt eine typische Produktionswoche dar und soll als Basis für

die Hochrechnung auf ein Betriebsjahr dienen. Die Produktionszeiten sämtlicher Papiersorten dieses Zeitintervalls werden als Prozentsatz dargestellt, um die Wärmemengen der Abluftkamine für jede hergestellte Sorte und deren zeitliche Verfügbarkeit im Jahr abzuschätzen. Nachstehender Rechenweg soll den eben beschriebenen Sachverhalt verdeutlichen. Die Produktionszeiten der Papiersorten, welche in dem oben genannten Zeitraum hergestellt wurden, sind im Anhang zu finden.

Berechnung: Messpunkt 24 – Jährliche Wärmeleistung bei der Produktion der Papiersorte Gloss 1 150 g/m²

$$\dot{Q}_{N,MP24,Gloss150} = \dot{Q}_{N,MP24,Silk150} = 573,04 \text{ kW}$$

$$t_{Produktion} = 157,70 \text{ h}$$

$$t_{Gloss150} = 9,20 \text{ h}$$

$$t_{Gloss150,rel} = \frac{t_{Gloss150}}{t_{Produktion}} = \frac{9,20}{157,70} = 0,0583$$

$$t_{Produktion,a} = 8700 \text{ h}$$

$$t_{Gloss150,a} = t_{Gloss150,rel} * t_{Produktion,a} = 507,55 \text{ h}$$

$$\begin{aligned} Q_{N,MP24,Gloss150,a} &= \dot{Q}_{N,MP24,Gloss150} * t_{Gloss150,a} = 573,04 * 507,55 = 290.844,14 \text{ kWh} \\ &= 290,84 \text{ MWh} \end{aligned}$$

5.3.2.4 Darstellung und Interpretation der gemessenen Temperaturen

In diesem Kapitel soll Aufschluss über die wichtigsten Erkenntnisse der Messungen und Berechnungen gegeben werden. In Abbildung 23 sind die gemessenen Temperaturen der Messpunkte 24, 25, 27, 28, 29, 31, 32, 33, 35, 36 und 39 ersichtlich. In dem Diagramm sind klare Schwankungen und Streuungen der Temperaturen zu erkennen. Die Streuung der Messpunkte zu einer Grammaturlage ist eindeutig auf den Unterschied der Aggregate zurückzuführen. Beispielsweise handelt es sich bei dem Messpunkt 24, dessen gemessene Temperatur relativ hoch liegt, um den Infrarotstrahlungstrockner 3 und bei dem Messpunkt 27 um den dazugehörigen Airfoiltrockner 3. Da die IR-trockner generell mit einer höheren Temperatur als die Airfoiltrockner betrieben werden, liegt die Ablufttemperatur dieser ebenfalls im oberen Bereich. Des Weiteren kann eine grobe Aussage über den Trend der Temperaturen im Zusammenhang der Papiergrammaturen getroffen werden. Mit zunehmendem Papiergewicht werden die Trocknungsaggregate mehr angefahren, wodurch sich die Betriebstemperaturen und somit die Ablufttemperaturen erhöhen. Bei 300 g/m² fallen die Temperaturen jedoch wieder. Das liegt daran, dass bei ziemlich hohen Grammaturen die Papierbahngeschwindigkeit reduziert wird und dadurch die IR- und Airfoiltrockner wieder gedrosselt werden.

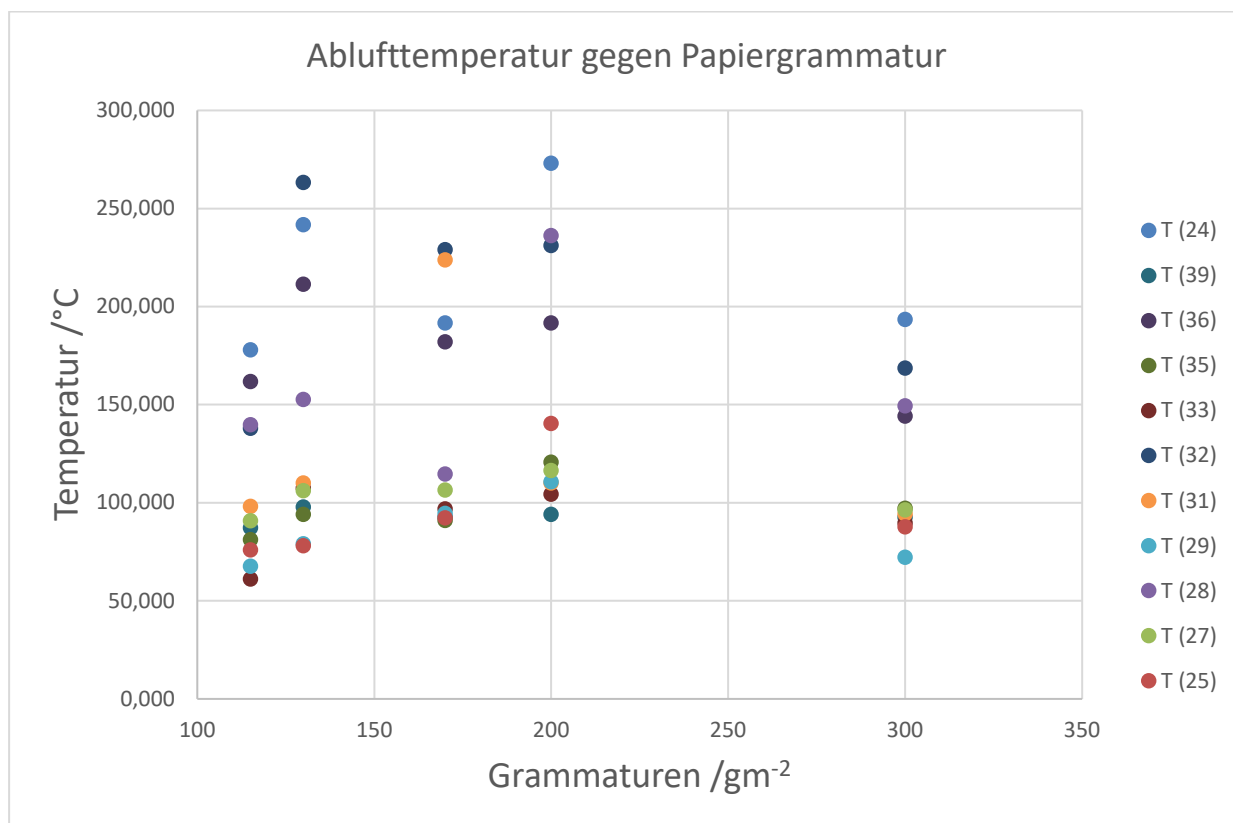


Abbildung 23: Gemessene Ablufttemperaturen in Abhängigkeit der Papiergrammaturen

Im oben gezeigten Diagramm wird außerdem die Eignung der betrachteten Abluft als Wärmelieferant für die direkte und indirekte Abwärmenutzung deutlich. Jene Abluftströme, welche Austrittstemperaturen von über 150 °C aufweisen, können zur direkten Dampferzeugung herangezogen werden und die restlichen mit einem geringeren Temperaturniveau versorgen die Absorptionswärmepumpe.

Als Basis für eine Abschätzung der ganzjährigen Verfügbarkeit der Ablufttemperaturen dienen die Produktionszeiten einzelner Papiersorten des Zeitraumes 13.08.2022 16:09 Uhr – 19.08.2022 21:21 Uhr, welche in Tabelle 4 dargestellt werden. Die Tabelle 5 soll die Clusterung der 13 Papiersorten, welche in 5.3.2.2 beschrieben wurde, darstellen. Die erste Sorte stellt die Gruppe 1 dar, die darauffolgenden drei Sorten die Gruppe 2 usw. Anhand dieser Daten kann abgeschätzt werden, wie lang eine bestimmte Temperatur eines Abluftstromes im Jahr verfügbar ist. In Abbildung 24 wird die jährliche Verfügbarkeit der Ablufttemperaturen als prozentuelle Aufteilung exemplarisch an Messpunkt 24 veranschaulicht. Zum Beispiel nimmt die Sorte Gloss 1 115 g/m² geschätzt 12,05 % der gesamten betrachteten Produktionszeit ein, bei welcher die Abluft des Messpunktes 24 im Mittel eine Temperatur von 178 °C aufweist. Dieses Temperaturniveau ist also für 12,05 % der Betriebsstunden im Jahr zu erwarten. Aus dem Diagramm geht hervor, dass der Messpunkt 24 bezüglich der vorhandenen Temperaturen sowohl für die direkte als auch für die indirekte Abwärmenutzung geeignet ist.

Potenzialanalyse zur Abwärmennutzung in der Sappi Gratkorn

Tabelle 4: Produktionszeiten der einzelnen Papiersorten im Zeitraum von 13.08.2022 16:09 Uhr – 19.08.2022 21:21 Uhr

Sorte	Grammatur /gm⁻²	Produktionszeit /h	Produktionszeit /%
Gloss 1	115	19,00	12,05
Silk 1	115	10,82	6,86
Silk 1	130/35	14,65	9,29
Gloss 1	130/35	15,90	10,08
Gloss 1	150	9,20	5,83
Silk 1	150	13,32	8,44
Gloss 1	170	19,23	12,19
Silk 1	170	7,86	4,98
Gloss 1	200	5,05	3,20
Silk 1	200	4,96	3,15
Gloss 1	250	8,53	5,41
Silk 1	250	14,03	8,90
Silk 1	300	15,15	9,61

Tabelle 5: Gruppierung (1 – 6) ähnlich hergestellter Papiersorten für die Jahreshochrechnung

Sorte	Grammatur /gm⁻²	Gruppierung
Gloss 1	115	1
Silk 1	115	2
Silk 1	130/35	2
Gloss 1	130/35	2
Gloss 1	150	3
Silk 1	150	3
Gloss 1	170	3
Silk 1	170	4
Gloss 1	200	4
Silk 1	200	5
Gloss 1	250	5
Silk 1	250	6
Silk 1	300	6

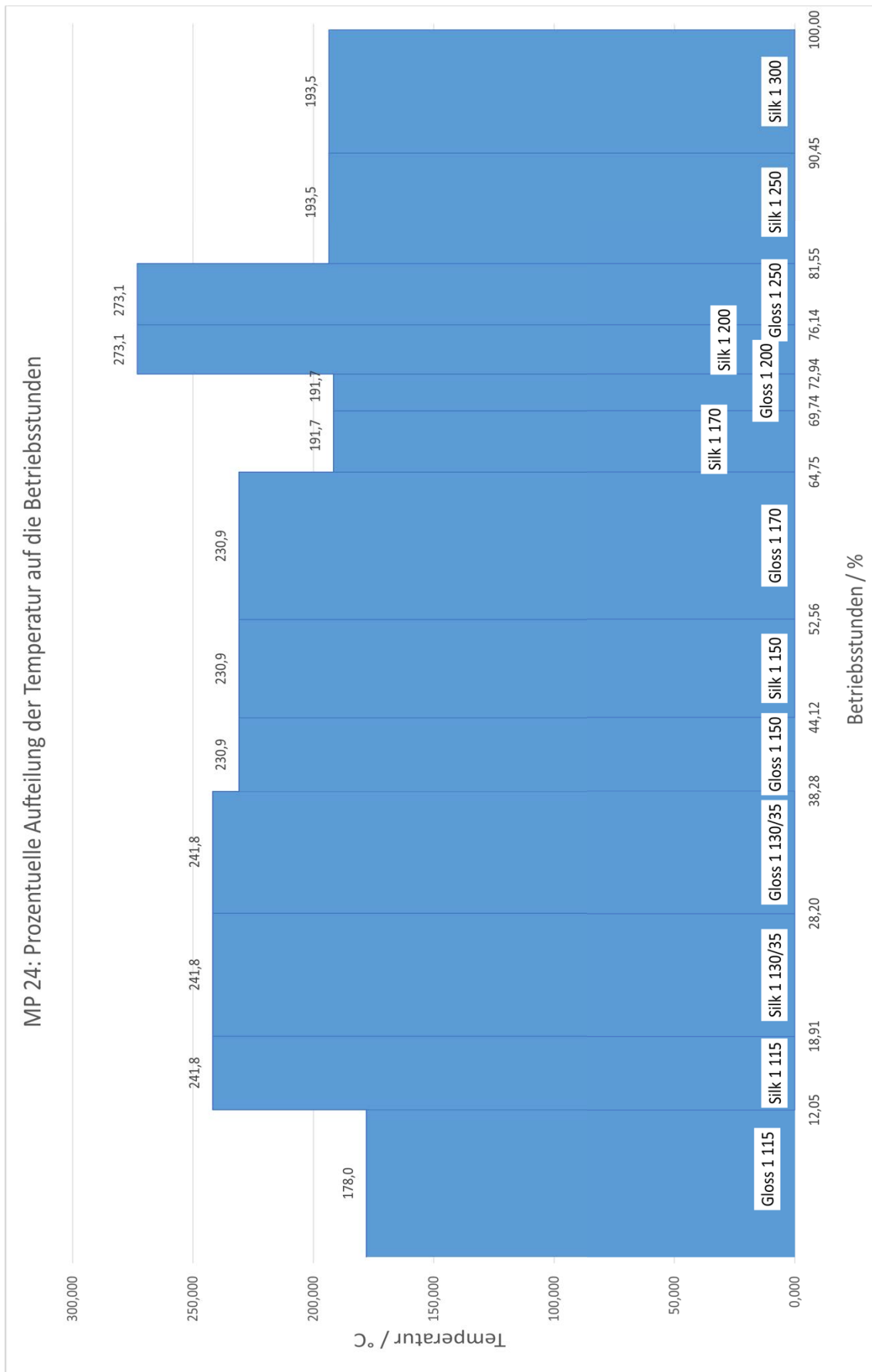


Abbildung 24: Prozentuelle Aufteilung der gemessenen Ablufttemperatur des Messpunktes 24 nach Betriebsstunden

5.3.2.5 Darstellung und Interpretation der berechneten Jahreswärmeleistungen beispielhaft an Messpunkt 24 dargelegt

Die zu den jeweiligen Grammaturnen berechneten und zugeordneten Wärmeleistungen des Messpunktes 24 für die direkte Abwärmenutzung bis 150 °C werden in Tabelle 6 veranschaulicht.

Tabelle 6: Übersicht der mittleren Ablufttemperaturen und -wärmeleistungen des Messpunktes 24 zu den einzelnen Papiersorten für die direkte Abwärmenutzung mit der Abkühltemperatur 150 °C

Sorte	Grammatur /gm ⁻²	Temperatur /°C	Q _{N,MP24,mittel} /kW
Gloss 1	115	178,00	59,52
Silk 1	115	241,83	228,02
Silk 1	130/35	241,83	228,02
Gloss 1	130/35	241,83	228,02
Gloss 1	150	230,90	282,19
Silk 1	150	230,90	282,19
Gloss 1	170	230,90	282,19
Silk 1	170	191,70	100,37
Gloss 1	200	191,70	100,37
Silk 1	200	273,13	468,36
Gloss 1	250	273,13	468,36
Silk 1	250	193,53	129,22
Silk 1	300	193,53	129,22

Somit ergeben sich für die indirekte Abwärmenutzung bis 80 °C in Tabelle 7 angeführte Temperaturen und Wärmeleistungen.

Tabelle 7: Übersicht der mittleren Ablufttemperaturen und -wärmeleistungen des Messpunktes 24 zu den einzelnen Papiersorten für die indirekte Abwärmenutzung mit der Abkühltemperatur 80 °C

Sorte	Grammatur /gm ⁻²	Temperatur /°C	Q _{N,MP24,mittel} /kW
Gloss 1	115	150,00	158,65
Silk 1	115	150,00	211,53
Silk 1	130/35	150,00	211,53
Gloss 1	130/35	150,00	211,53
Gloss 1	150	150,00	290,85

Potenzialanalyse zur Abwärmenutzung in der Sappi Gratkorn

Silk 1	150	150,00	290.85
Gloss 1	170	150,00	290.85
Silk 1	170	150,00	185.09
Gloss 1	200	150,00	185.09
Silk 1	200	150,00	343.73
Gloss 1	250	150,00	343.73
Silk 1	250	150,00	229.16
Silk 1	300	150,00	229.16

Mithilfe der in Tabelle 4 dargestellten Produktionszeiten der einzelnen Papiersorten und der Gruppierung in Tabelle 5 können die gesamten verfügbaren Wärmeleistungen des Messpunktes 24 für jede Papiersorte, welche in Tabelle 8 zusammengefasst werden, bestimmt werden.

Tabelle 8: Übersicht der ganzjährigen mittleren Gesamtwärmeleistungen des Messpunktes 24 zu den einzelnen Papiersorten für die direkte und indirekte Abwärmenutzung

Sorte	Grammatur /gm⁻²	Q_{N,MP24,mittel} /kW	Q_{N,MP24,mittel} /MWh
Gloss 1	115	218,17	228,69
Silk 1	115	439,55	262,38
Silk 1	130/35	439,55	355,26
Gloss 1	130/35	439,55	385,57
Gloss 1	150	573,04	290,85
Silk 1	150	573,04	420,98
Gloss 1	170	573,04	607,95
Silk 1	170	285,46	123,78
Gloss 1	200	285,46	79,53
Silk 1	200	812,09	222,22
Gloss 1	250	812,09	382,17
Silk 1	250	358,38	277,39
Silk 1	300	358,38	299,54

Die Abluft des Messpunktes 24 liefert daher eine jährliche Gesamtwärmemenge von 3.936,31 MWh.

5.3.2.6 Darstellung und Interpretation sämtlicher berechneten Wärmeleistungen

Nach Betrachtung und Analyse aller Messpunkte kann folgende Erkenntnis für die Eignung zur Abwärmenutzung gewonnen werden. Für die direkte Nutzung mithilfe eines Verdampfers können die Abluftströme nachstehender Messpunkte herangezogen werden:

- 24
- 28
- 31
- 32
- 36

Für die indirekte Nutzung über einen Wärmetauscher mit anschließender Wärmepumpe eignen sich Abluftströme der folgenden Messpunkte:

- 24
- 25
- 27
- 28
- 29
- 31
- 32
- 33
- 35
- 36
- 39

Die je nach gemessener Papiergrammatur resultierenden mittleren Gesamtwärmeleistungen für die direkte Nutzung mit einer Abkühltemperatur von 150 °C sind in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Übersicht aller mittleren Abluftwärmeleistungen für die direkte Abwärmenutzung mit einer Abkühltemperatur von 150 °C

Grammaturen		115	130	150	170	200	300
/ gm ⁻²							
Messpunkt Nr.	Bezeichnung	Q _{N,mittel} /kW	Q _{N,mittel} /kW	Q _{N,mittel} /kW	Q _{N,mittel} /kW	Q _{N,mittel} /kW	Q _{N,mittel} /kW
24	Coater 3 – IR Abluft Rampe	59,52	228,02	282,19	100,37	468,36	129,22

Potenzialanalyse zur Abwärmenutzung in der Sappi Gratkorn

28	Coater 4 – IR Abluft Rampe	-39,22	10,09	240,89	-470,85	225,56	-1,12
31	Coater 4 - Airfoil Trockner	-506,45	-209,30	-410,52	130,73	-317,99	-453,19
32	Coater 5 – IR Abluft Rampe	-68,23	427,40	54,39	343,66	317,38	79,06
36	Coater 6 – IR Abluft Rampe	50,59	196,06	645,45	112,70	95,59	-37,45

Die je nach Papiergrammatur resultierenden mittleren Gesamtwärmeleistungen für den Einsatz von indirekter Abwärmenutzung mit einer Abkühltemperatur von 80 °C sind in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Übersicht aller mittleren Abluftwärmeleistungen für die indirekte Abwärmenutzung mit einer Abkühltemperatur von 80 °C

Grammaturen / gm ⁻²		115	130	150	170	200	300
Messpunkt Nr.	Bezeichnung	Q _{N,mittel} /kW	Q _{N,mittel} /kW	Q _{N,mittel} /kW	Q _{N,mittel} /kW	Q _{N,mittel} /kW	Q _{N,mittel} /kW
24	Coater 3 – IR Abluft Rampe	158,65	211,53	290,85	185,09	343,73	229,16
25	Coater 3 – IR Abluft offene Haube	-1,53	-0,88	3,51	7,19	32,80	3,05
27	Coater 3 - Airfoil Trockner	168,50	340,09	237,25	321,24	372,61	197,85
28	Coater 4 – IR Abluft Rampe	231,68	273,23	299,67	461,97	220,34	122,46
29	Coater 4 - IR Abluft offene Haube	-38,38	-2,55	33,77	36,44	74,44	-23,49
31	Coater 4 - Airfoil Trockner	176,62	157,30	210,14	145,46	321,09	116,35
32	Coater 5 - IR Abluft Rampe	330,86	334,92	211,53	361,36	326,11	308,48

Potenzialanalyse zur Abwärmenutzung in der Sappi Gratkorn

33	Coater 5 - IR Abluft offene Haube	-82,31	91,05	36,11	62,99	73,82	32,22
35	Coater 5 - Airfoil Trockner	12,36	137,11	223,34	120,41	250,61	194,03
36	Coater 6 - IR Abluft Rampe	308,48	255,60	872,56	264,41	176,27	409,43
39	Coater 6 - Airfoil Trockner	74,79	152,44	531,80	112,51	131,74	83,39

Die Wärmeleistungen aller Messpunkte zusammen werden bestimmt und mithilfe der in Tabelle 3 dargestellten Produktionszeiten den einzelnen Papiersorten für die direkte Abwärmenutzung zugewiesen, wie in Tabelle 11 aufgezeigt wird. Negative Wärmeleistungen werden nicht in die Aufsummierung miteinbezogen, sondern vernachlässigt, da die Abluft die notwendige Wärmemenge nicht aufweisen kann.

Tabelle 11: Übersicht aller mittleren Abluftwärmeleistungen zu den einzelnen Papiersorten für die direkte Abwärmenutzung mit einer Abkühltemperatur von 150 °C

Sorte	Grammatur /gm⁻²	Q_{N,mittel} /kW	Q_{N,mittel} /MWh
Gloss 1	115	110,11	115,42
Silk 1	115	861,57	514,30
Silk 1	130/35	861,57	696,35
Gloss 1	130/35	861,57	755,77
Gloss 1	150	1222,92	620,70
Silk 1	150	1222,92	898,40
Gloss 1	170	1222,92	1.297,41
Silk 1	170	687,47	298,11
Gloss 1	200	687,47	191,53
Silk 1	200	1106,89	302,89
Gloss 1	250	1106,89	520,90
Silk 1	250	208,27	161,21
Silk 1	300	208,27	174,08

Potenzialanalyse zur Abwärmenutzung in der Sappi Gratkorn

Für die direkte Nutzung ist eine durchschnittliche verfügbare Wärmeleistung von 751,52 kW zu erwarten. Hochgerechnet für ein Betriebsjahr ergibt sich eine vorhandene Wärmemenge von 6.547,07 MWh bzw. 23.569,45 GJ.

Die zusammengefassten Wärmeleistungen zu den einzelnen Papiersorten für die indirekte Abwärmenutzung werden in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Übersicht aller mittleren Abluftwärmeleistungen zu den einzelnen Papiersorten für die indirekte Abwärmenutzung mit einer Abkühltemperatur von 80 °C

Sorte	Grammatur /gm ⁻²	Q _{N,mittel} /kW	Q _{N,mittel} /MWh
Gloss 1	115	1.461,95	1.532,45
Silk 1	115	1.953,26	1.165,96
Silk 1	130/35	1.953,26	1.578,69
Gloss 1	130/35	1.953,26	1.713,39
Gloss 1	150	2.950,53	1.497,57
Silk 1	150	2.950,53	2.167,57
Gloss 1	170	2.950,53	3.130,24
Silk 1	170	2.079,07	901,55
Gloss 1	200	2.079,07	579,24
Silk 1	200	2.323,57	635,82
Gloss 1	250	2.323,57	1.093,46
Silk 1	250	1.696,41	1.313,07
Silk 1	300	1.696,41	1.417,89

Hier ist eine durchschnittliche Leistung von 2.132,54 kW und eine Gesamtwärmemenge von 18.553,13 MWh bzw. 66.791,25 GJ vorhanden.

5.3.2.7 Auslegung der ausgewählten Abwärmenutzungstechnologien

Die im vorherigen Kapitel ausführlich durchgerechneten Wärmeleistungen der einzelnen Abluftströme für jede produzierte Papiersorte können nun zur Auslegung des Verdampfers, Wärmetauschers und der Wärmepumpe herangezogen werden. Die Dimensionen und Kosten des Verdampfers wie auch Wärmetauschers wurden bei dem Hersteller Kelvion angefragt und die der Wärmepumpe bei der Firma Stepsahead. Zum Zeitpunkt der Abgabe dieser Arbeit sind keine fertigen Angebote vorhanden. Daher stützen sich alle nachfolgenden Beschreibungen auf grobe Auslegungsberechnungen. Die Kosten der einzelnen Aggregate sind in Kapitel 5.3.2.8 angeführt und die Auslegungsberechnungen sind dem Anhang zu entnehmen.

Der hier eingesetzte Abluft-Wasser-Verdampfer von Kelvion wird so ausgelegt, dass dieser Dampf mit 142 °C und 3,8 bar generieren kann. Dafür soll die Abluft, welche sich außerhalb der Rohre befindet, eine Wärmeleistung von ungefähr 750 kW auf das in den Rohren befindliche Wasser übertragen und dabei auf 150 °C abkühlen. Der Verdampfer wird als stahlverzinkter Rippenrohr-Wärmetauscher in C-Stahl mit einer Heizfläche von 480 m² ausgeführt, welcher in Abbildung 25 dargestellt ist. Prinzipiell handelt es sich hier um ein Einzelrohrsystem, welches für Wasser, Dampf und Öl als Heiz- oder Kühlmedium geeignet ist. Die Wärmetauscher werden aus einzelnen elliptischen oder runden Rippen- oder Glattrohren zusammengebaut. Für die Herstellung können die Werkstoffe Stahl, Stahl verzinkt, Edelstahl und Buntmetall verwendet werden. Die Lufterhitzer haben einen gleitenden Rohrboden, damit sich das Rohrbündel unabhängig vom Anschlussrahmen ausdehnen kann. Die wasser- bzw. dampfseitigen Anschlüsse müssen so verlegt werden, dass die Ausdehnung nicht blockiert wird. Bei Lufterhitzern für Heißwasser können geteilte Umlenkammern eingesetzt werden, damit die durch die Temperaturdifferenz zwischen Wassereintritt und -austritt auftretenden Wärmespannungen ausgeglichen werden. Luftkühler können mit einer Auffangwanne für Schwitzwasser ausgerüstet werden. Diese Art von Wärmetauscher werden üblicherweise als Lufterhitzer in Trocknungsprozesse, Luftkühler in der Chemiebranche oder Luftvorwärmer in Kesselanlagen eingesetzt.

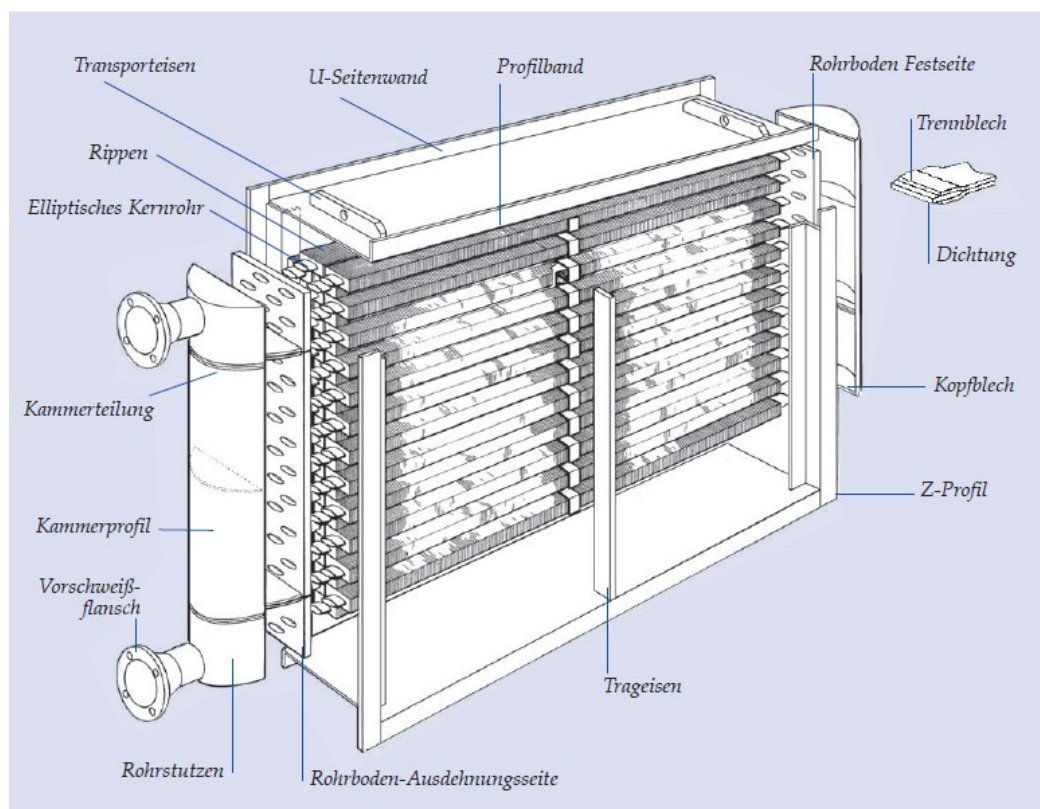


Abbildung 25: Aufbau eines Rippenrohr-Wärmetauschers [46]

Bei dem zweiten Wärmetauscher handelt es sich ebenfalls um einen stahlverzinkten Rippenrohr-Wärmetauscher aus C-Stahl mit jedoch einer wesentlich größeren Heizfläche von 3324 m² und einem vierfachen Register. Dieser soll die Abluft auf 80 °C runterkühlen und dabei Wasser mit einer Eintrittstemperatur von 75 °C auf 115 °C erwärmen. Hierbei wird eine Wärmeleistung von ungefähr 2.200 kW übertragen.

Das erwärmte Wasser aus dem zweiten Wärmetauscher soll eine Absorptionswärmepumpe der Kategorie 2 von Stepshead speisen. Diese besteht aus den folgenden vier Bereichen:

- Verdampfer
- Absorber
- Generator
- Kondensator

Im Verdampfer wird Wasser bei niedrigem Druck durch die Aufnahme der Abwärme (Antriebswärme) mit einer Leistung von 2,2 MW verdampft. Der daraus entstehende Dampf wird von einer Lithiumbromidsalzlösung im Absorber bei maximal 155 °C absorbiert, wobei die aufgenommene Wärme bei einem höheren Temperaturniveau mit 142 °C wieder abgegeben wird. Die wässrige Salzlösung wird zum Generator befördert, in welchem der Wasseranteil aus dieser durch die Antriebswärme bei einem höheren Druck verdampft wird. Die wieder konzentrierte Salzlösung kann dadurch wieder im Absorber eingesetzt werden. Der Dampf im Generator wird in den Kondensator überführt und kondensiert unter Wärmeabgabe an einem Wärmetauscher aus. Das erhaltende Wasser kann ebenfalls erneut im Verdampfer eingesetzt werden. Das beschriebene Verfahren wird in Abbildung 26 schematisch dargestellt

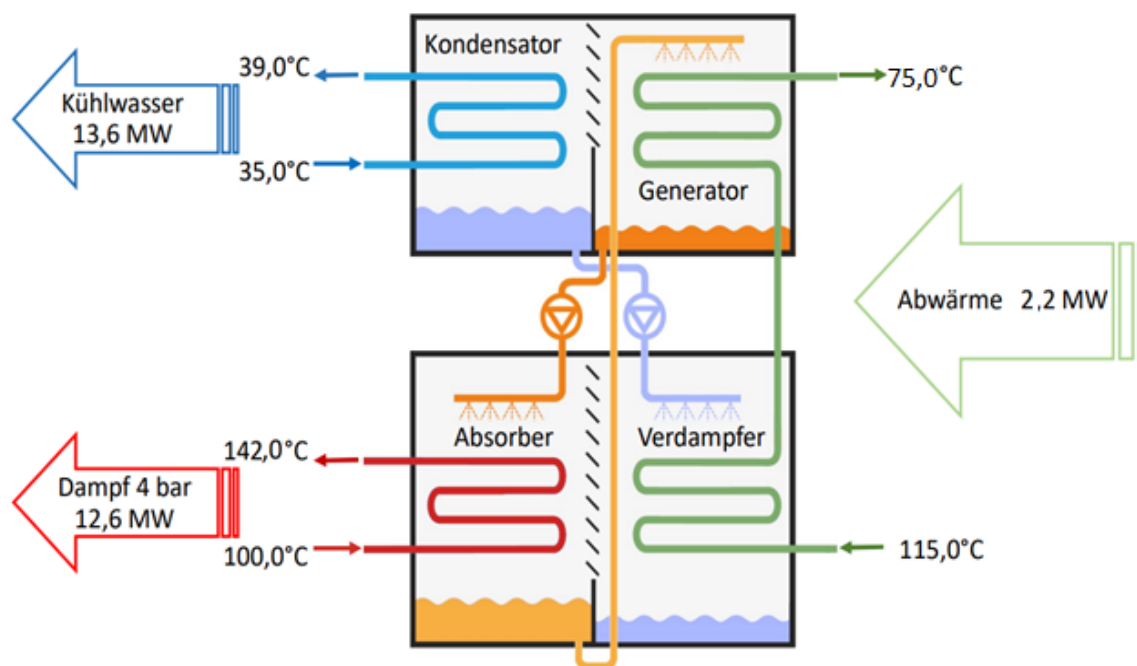


Abbildung 26: Aufbau einer Absorptionswärmepumpe der Kategorie 2 [47]

Bei diesem Prinzip entstehen aus einer Wärmemenge mit mittlerer Temperatur zwei Wärmemengen im Absorber und Kondensator mit einer höheren und niedrigeren Temperatur. Die Wärme auf höherem Temperaturniveau wird für die Dampferstellung verwendet, während jene mit niedrigerer Temperatur an den Kühlturm abgegeben wird. Der große Unterschied zwischen einer Absorptionswärmepumpe der Kategorie 1 und 2 liegt darin, dass bei einer Kategorie 1 Wärmepumpe Abwärme auf niedrigem Temperaturniveau mithilfe von Antriebsenergie auf ein hohes gehoben und dadurch nutzbar gemacht wird. Bei der Kategorie 2 Wärmepumpe hingegen stellt die Abwärme bereits die Antriebsenergie dar. Hier wird allerdings etwa die Hälfte der zur Verfügung stehenden Abwärme wieder an die Umgebung abgegeben ($COP = 0,5$). Beide Varianten werden mit Wärme statt mit Strom angetrieben, wodurch die Betriebskosten vernachlässigbar sind. Elektrische Energie wird lediglich für Nebenaggregate eingesetzt. Die Lithiumbromidsalzlösung wird aufgrund ihrer relativ umweltfreundlichen Eigenschaften eingesetzt.

5.3.2.8 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung werden die durch die Abwärmenutzungstechnologien erreichten finanziellen Einsparungen für ein Jahr betrachtet, welche durch die Kosten der eingesparten Brennstoff- und CO_2 -Mengen ausgedrückt werden, und den zu investierenden Kosten gegenübergestellt. Zur Darstellung der Ergebnisse dienen die betriebswirtschaftlichen Kennzahlen der ROI- und Payback-Period-Methode.

Zur Berechnung der Einsparungen werden die in Kapitel 5.3.2.6 dargestellten berechneten Wärmemengen der Abwärme auf die erhaltenen Niederdruckdampfmenen umgerechnet. Hierfür wird die Wärmeleistung für die direkte Abwärmenutzung \dot{Q}_{direkt} mit dem Wirkungsgrad des Verdampfers η_{vap} , des Wärmetauschers η_{WT} und der Leistungszahl der Absorptionswärmepumpe COP_{AWP} multipliziert. Bei der Wärmeleistung für die indirekte Abwärmenutzung $\dot{Q}_{indirekt}$ wird nur der Wirkungsgrad des Wärmetauschers und die Leistungszahl der AWP berücksichtigt. Beide erhaltenen Energien für die Dampferzeugung $\dot{Q}_{Dampf,direkt}$ und $\dot{Q}_{Dampf,indirekt}$ werden noch zusätzlichen mit 10 % Verlusten beaufschlagt, um die Gesamtdampfmenge $\dot{Q}_{Dampf,ges}$ zu erhalten. Anschließend wird die Berechnung der Dampfmenen schematisch dargestellt.

Berechnung: Durch Abwärme erzeugte Dampfmenge

$$\dot{Q}_{direkt} = 23.569,45 \text{ GJ}$$

$$\dot{Q}_{indirekt} = 66.791,25 \text{ GJ}$$

$$\eta_{WT} = 0,98$$

$$\eta_{Verd} = 0,98$$

$$\eta_V = 0,90$$

$$COP_{AWP} = 0,5$$

$$\dot{Q}_{Dampf,direkt} = \dot{Q}_{direkt} * \eta_{Verd} = 23.569,45 * 0,98 = 23.098,06 \text{ GJ}$$

$$\dot{Q}_{Dampf,indirekt} = \dot{Q}_{indirekt} * \eta_{WT} * COP_{AWP} = 66.791,25 * 0,98 * 0,5 = 32.727,71 \text{ GJ}$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{Dampf,ges} &= (\dot{Q}_{Dampf,direkt} + \dot{Q}_{Dampf,indirekt}) * \eta_V = (23.098,06 + 32.727,71) * 0,90 \\ &= 50.243,20 \text{ GJ} = 13.956,44 \text{ MWh} \end{aligned}$$

Um die erzeugte Dampfmenge auf das eingesparte Erdgasvolumen V_{Erdgas} umzurechnen, werden der Gesamtwirkungsgrad des Kraftwerkes η_{KW} und der untere Heizwert des Erdgases $H_{U,Erdgas}$ berücksichtigt, wie aus nachfolgender Berechnung hervorgeht.

Berechnung: Eingesparte Erdgasmenge

$$\eta_{KW} = 0,90$$

$$H_{U,Erdgas} = 36.611,00 \frac{\text{kJ}}{\text{Nm}^3}$$

$$\dot{Q}_{Erdgas} = \frac{\dot{Q}_{Dampf,ges}}{\eta_{KW}} = \frac{13.956,44}{0,90} = 15.507,19 \text{ MWh}$$

$$V_{Erdgas} = \frac{\dot{Q}_{Erdgas}}{H_{U,Erdgas}} = \frac{15.507,19}{36.611,00} = 1.524,84 \text{ kNm}^3$$

Die dazugehörigen CO_2 -Mengen m_{CO_2} bilden sich aus dem Emissionsfaktor des Erdgases EF_{CO_2} .

Berechnung: Eingesparte CO_2 -Menge

$$EF_{\text{CO}_2} = 0,2002 \frac{\text{t CO}_2}{\text{MWh}}$$

$$m_{\text{CO}_2} = EF_{\text{CO}_2} * V_{Erdgas} = 0,2002 * 1.524,84 = 3.104,53 \text{ t}$$

Mit den ermittelten Erdgas- und CO_2 -Mengen können nun die eingesparten Kosten für den Brennstoffeinsatz K_{Erdgas} und die CO_2 -Zertifikate K_{CO_2} bestimmt werden. Der Erdgas- und CO_2 -Preissatz (p_{Erdgas} und p_{CO_2}) beziehen sich dabei auf das Quartal 3 für das Jahr 2022.

Berechnung: Eingesparte Erdgas- und CO_2 -Kosten

$$p_{Erdgas} = 1.171,00 \frac{\text{€}}{\text{kNm}^3 \text{ Erdgas}}$$

$$p_{\text{CO}_2} = 80,00 \frac{\text{€}}{\text{t CO}_2}$$

$$K_{Erdgas} = p_{Erdgas} * V_{Erdgas} = 1.171,00 * 1.524,84 = 1.785,58 \text{ k€}$$

Potenzialanalyse zur Abwärmenutzung in der Sappi Gratkorn

$$K_{CO_2} = p_{CO_2} * m_{CO_2} = 80,00 * 3.104,53 = 248,36 \text{ k€}$$

Die jährlichen Gesamtkosten belaufen sich daher auf etwa 2,0 Mio EUR.

Tabelle 13 soll als Übersicht der hier angeführten Werte dienen.

Tabelle 13: Übersicht der eingesparten Dampf- und Brennstoffmengen sowie CO₂-Zertifikate

	Bezeichnung	Symbol	Wert
Abwärme			
	Wärmeleistung (direkt)	\dot{Q}_{direkt}	23.569,45 GJ
	Wärmeleistung (indirekt)	$\dot{Q}_{indirekt}$	66.791,25 GJ
	Wirkungsgrad Wärmetauscher	η_{WT}	0,98
	Wirkungsgrad Verdampfer	η_{Verd}	0,98
	Wirkungsgrad Verluste	η_V	0,9
Dampf			
	Dampfmenge (direkt)	$\dot{Q}_{Dampf,direkt}$	23.098,06 GJ
	Dampfmenge (indirekt)	$\dot{Q}_{Dampf,indirekt}$	32.727,71 GJ
	Dampfmenge (gesamt + Verluste)	$\dot{Q}_{Dampf,ges}$	50243,20 GJ
			13.956,44 MWh
Brennstoff			
	Wirkungsgrad Kraftwerk	η_{KW}	0,9
	Brennstoffbedarf eingespart	\dot{Q}_{Erdgas}	15.507,16 MWh
	Unterer Heizwert Erdgas	$H_{U,Erdgas}$	36.611,00 kJ/Nm ³
	Erdgasvolumen eingespart	V_{Erdgas}	1.524,84 kNm ³
CO₂			
	Emissionsfaktor CO ₂ bezogen auf Erdgas	EF_{CO_2}	0,2002 t CO ₂ / MWh
	CO ₂ -Menge eingespart	m_{CO_2}	3104,53 t CO ₂
OPEX Einsparung			
	Erdgas-Kostenansatz Q3/22	p_{Erdgas}	1.171,00 €/kNm ³
	CO ₂ -Zertifikate Kostenansatz	p_{CO_2}	80,00 €/t CO ₂
	Einsparung Erdgas	K_{Erdgas}	1.785,58 k€
	Einsparung CO ₂	K_{CO_2}	248,36 k€
	Gesamteinsparung	$K_{eingespart}$	2.033,95 k€

Potenzialanalyse zur Abwärmenutzung in der Sappi Gratkorn

Die Investitionskosten fassen sämtliche Aufwendungen, welche für die Umsetzung der Abwärmenutzungstechnologien notwendig sind, zusammen. Diese werden in Tabelle 14 aufgelistet. Die Preise stammen teilweise aus den Auslegungsberechnungen bzw. aus Abschätzungen.

Tabelle 14: Übersicht der Investitionskosten für die Anschaffung der Abwärmenutzungstechnologien

Leistung	Kosten /€
Wärmepumpe	
Anschaffungskosten	500.000,00*
Montage und Anschluss (hydraulische, elektrische Einbindung)	**
Inbetriebnahme	**
Stromkosten /a	**
Wartung	**
Wärmetauscher	
Anschaffungskosten	103.870,00
Montage und Anschluss (hydraulische, elektrische Einbindung)	**
IBN	**
Wartung	**
Verdampfer	
Anschaffungskosten	28.960,00
Montage und Integration (hydraulische, elektrische Einbindung)	**
IBN	**
Wartung	**
Planungskosten	
Mechanik	10.000,00*
Elektrik	10.000,00*
MSR-Technik	10.000,00*
Baukosten	
Maschinenfundamente (maschinenzugeordnete Bautätigkeiten)	**
Infrastruktur (Hebe- und Gleisanlagen, Transport)	**
Gebäude und Gebäudeeinrichtungen	**
Verrohrung + Isolierung	2.000.000,00

E-Anlagen

Steuerungsanlagen inkl. Sensorik	20.000,00*
Motore und Antriebe	30.000,00*
Beleuchtungsanlagen	10.000,00*
Kommunikationseinrichtungen	7.000,00*
Verkabelung inkl. Montage	10.000,00*

MSR-Anlagen

	50.000,00*
Feldgeräte	15.000,00*
Armaturen	20.000,00*
Prozeßleitsystem - PLS	20.000,00*
Qualitätskontrollsysteme	5.000,00*
Überwachungssysteme	5.000,00*
Verkabelung inkl. Montage	10.000,00*

IT - Anschaffungen

Hardware	2.000,00*
Software	5.000,00*
Beratungen, sonst. IT-Unterstützung	500,00*

Gesamtinvestition

2.822.330,00

Förderungen durch das Land Steiermark „Innovative Wärmepumpen“ -1.000.000,00

Nettoinvestition

1.822.330,00

* geschätzt

** vernachlässigt

Die Investitionskosten für die Anschaffung der Abwärmenutzungstechnologien belaufen sich nach einer groben Abschätzung auf etwa 2,8 Mio EUR. Unter Berücksichtigung der steirischen Ökofonds-Ausschreibung für innovative Wärmepumpen, in welcher „thermisch angetriebene Wärmepumpen mit natürlichem Kältemittel“ [48] ab 50 kW mit einem Zuschuss von 1 Mio EUR entlasten werden, reduziert sich das Investmentkapitel auf 1,8 Mio EUR.

Die Gegenüberstellung der Investitions- und Einsparungskosten wird in nachfolgender Berechnung als ROI und Payback-Period dargestellt. Die ROI-Kennzahl gibt Auskunft über die

Potenzialanalyse zur Abwärmennutzung in der Sappi Gratkorn

Rentabilität eines Kapitals, während die Payback-Period die erforderliche Zeit angibt, in der die Investitionskosten gedeckt werden.

Berechnung: ROI und Payback-Period

$$K_{\text{eingespart}} = 2.033.945,76 \text{ €}$$

$$K_{\text{Invest}} = 1.822.330,00 \text{ €}$$

$$ROI = \frac{K_{\text{eingespart}} - K_{\text{Invest}}}{K_{\text{Invest}}} = \frac{2.033.945,76 - 1.822.330,00}{1.822.330,00} = 0,12$$

$$Paybackperiod = \frac{K_{\text{Invest}}}{K_{\text{eingespart}}} = \frac{1.822.330,00}{2.033.945,76} = 0,90 \text{ a}$$

Bei einem positiven ROI sind die Rendite des Kapitals höher als das eingesetzte Kapital, wodurch man einen Nettogewinn erwirtschaftet. Ein ROI von 0,12 bedeutet, dass man im ersten Geschäftsjahr das komplette Investitionskapital inklusive 12 % des eingesetzten Kapitals wieder einnimmt. Die Payback-Period von 0,9 zeigt auf, dass elf Monate notwendig sind, um das investierte Kapitel wieder zurück zu gewinnen.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Abwärmenutzungspotenziale in der Produktionslinie 4 der Sappi Gratkorn erhoben sowie deren Eignung zu unterschiedlichen Nutzungsmöglichkeiten untersucht. Für die Analyse der Machbarkeit wurde der Fokus auf die Erzeugung von Niederdruckdampf bei 142 °C und 3,8 bar (abs) gelegt. Durch die Auswahl und Auslegung von geeigneten Technologien zur Abwärmenutzung konnte zusätzlich die Wirtschaftlichkeit dieser Studie beurteilt werden. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen als Grundlage für die Entscheidung, ob in der Sappi Gratkorn ein Projekt zu dieser Thematik initiiert wird. Durch die Integration von Abwärmenutzungstechnologien zur Dampfgenerierung kann ein wesentlicher Anteil der eingesetzten Wärme wieder rückgewonnen werden, wodurch Brennstoff- und CO₂-Kosten eingespart werden können.

Als Grundlage der Untersuchung diente die Betrachtung sämtlicher Wärmeströme aus Produktions- und Sekundärprozessen der Papier- und Streichmaschine 11. Dadurch konnten gefundene Abwärmequellen und dazu geeignete Senken aufgezeigt werden. Durch Berechnung und Interpretation der Wärmeleistungen jener Abwärmequellen unter Einbeziehung der wärmetechnischen Hersteller Exodraft, Stepsahead, Viessmann und Ochsner konnte eine erste Bewertung zur Eignung der Abwärmequellen getroffen werden. Vor allem im Abwasser und in den Kühlungsprozessen der Kühltürme konnten beträchtliche Mengen an Wärme festgestellt werden. Für die Herstellung von Niederdruckdampf eignen sich lediglich die Abluftströme der Streichaggregate (Coater), da diese neben großen Wärmeleistungen auch hohe Temperaturen aufweisen. Auf Basis von diversen Temperatur- und Geschwindigkeitsmessungen der Abluftströme zu unterschiedlichen Papiersorten (Grammaturen) wurden grobe Lastprofile erstellt. Dadurch konnten jene Abluftströme ermittelt werden, die heiß genug für die Niederdruckdampferzeugung durch direkte Abwärmenutzung geeignet sind. Besonders die Abluft der IR-Trockner kann für eine direkte Erzeugung mittels Wärmetauscher von Kelvion herangezogen werden. Jene der Airfoiltrockner und offenen Hauben wie auch die der bereits einmal abgekühlten IR-Trockner lässt sich über eine Absorptionswärmepumpe der Firma Stepsahead nutzbar machen. Als Basis zur Auslegung der Abwärmenutzungstechnologien sollen die heißen Abluftströme auf 150 °C und die restliche auf 80 °C abgekühlt werden. Die übertragene Wärme soll im ersten Fall zur direkten Dampferzeugung dienen und im zweiten Fall mithilfe einer Wärmepumpe auf ein höheres Temperaturniveau gebracht werden, um anschließend Niederdruckdampf herzustellen. Der durch Abwärme generierte Dampf kann direkt vor Ort an der PL 4 in die Niederdruckschiene eingespeist werden. Durch diese Maßnahme können relevante Frischdampfmenge eingespart werden. Die Berechnungen der Wärmeleistungen ergaben eine nutzbare Abwärmemenge von etwa 750 kW für die direkte und 2,2 MW für die indirekte

Nutzung. Im Zuge einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung konnten anhand der berechneten Jahresdampfmenge von etwa 50 TJ wie auch der Brennstoff- und CO₂-Preise bezogen auf das letzte Quartal des Jahres 2022 Einsparungen von etwa 2,0 Mio EUR ermittelt werden, während sich die Investitionskosten nach groben Abschätzung auf 2,8 Mio EUR belaufen. Unter Berücksichtigung einer einmaligen Förderung von 1,0 Mio EUR laut der steirischen Ökofonds-Ausschreibung für innovative Wärmepumpen lassen sich die Investitionskosten auf 1,8 Mio EUR senken. Infolgedessen lässt sich ein ROI von 0,12 und eine Payback-Period von 0,9 bestimmen. Diese Kennzahlen schließen auf einen Gewinn bereits nach elf Monaten des ersten Investitionsjahres.

7 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] BUNDESMINISTERIUM FÜR KLIMASCHUTZ, UMWELT, ENERGIE, MOBILITÄT, INNOVATION UND TECHNOLOGIE: *Energie in Österreich - Zahlen, Daten, Fakten*. Wien, 2020
- [2] DEUTSCHE HANDELSKAMMER IN ÖSTERREICH: *Österreich - Energieeffizienz bei industriellen Anlagen und in Industriegebäuden - Zielmarktanalyse 2019 mit Profilen der Marktakteure*. Wien, 2018
- [3] STATISTIK AUSTRIA: *Energiebilanzen für Österreich ab 1970*. Wien, 2021
- [4] PEHNT, M. (Hrsg.): *Energieeffizienz: ein Lehr- und Handbuch*. 1., korrigierter Nachdr. Berlin Heidelberg : Springer, 2010 — ISBN 978-3-642-14250-5
- [5] STADT WIEN: *Energie! voraus - Energiebericht 2021 der Stadt Wien*. Wien, 2021
- [6] WIEN ENERGIE GMBH: *Abwärme - vorhandene Wärme klimafreundlich nutzen*. URL <https://positionen.wienenergie.at/themen/waermewende/abwaerme/>
- [7] ARPAGAU, C.: *Hochtemperatur-Wärmepumpen: Marktübersicht, Stand der Technik und Anwendungspotenziale*. Berlin Offenbach : VDE Verlag GmbH, 2019 — ISBN 978-3-8007-4550-0
- [8] EDER, W. ; MOSER, F. ; KÖGL, B.: *Die Wärmepumpe in der Verfahrenstechnik*. Wien : Springer Wien, 2014 — ISBN 978-3-7091-2252-5
- [9] HIRZEL, S. ; SONTAG, B. ; ROHDE, C.: *Industrielle Abwärmenutzung*. Karlsruhe : Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
- [10] SÄCHSISCHE ENERGIEAGENTUR - SAENA GMBH: *Technologien der Abwärmenutzung*. Dresden, 2016
- [11] TITZE, H.: *Elemente des Apparatebaues*. Ludwigshafen am Rhein : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1967 — ISBN 978-3-662-00190-5
- [12] SHAH, R. K. ; SEKULIĆ, D. P.: *Fundamentals of heat exchanger design*. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2003 — ISBN 978-0-471-32171-2
- [13] BONIN, J. ; DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (Hrsg.): *Handbuch Wärmepumpen: Planung und Projektierung, Praxis*. 3., überarbeitete Auflage. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2017 — ISBN 978-3-410-26868-0
- [14] WOLF, S.: *Integration von Wärmepumpen in industrielle Produktionssysteme - Potenziale und Instrumente zur Potenzialerschließung*. Stuttgart, Universität Stuttgart, 2017
- [15] BLES, M. ; KESSLER, A.: *Energieeffizienz in der Industrie*. 2. Auflage. Berlin Heidelberg : Springer Vieweg, 2017 — ISBN 978-3-662-55998-7

- [16] BUNDESAMT FÜR ENERGIE BFE: *Die Energieperspektiven 2035 - Band 4: Exkurse*. Ittigen, 2007
- [17] KPC: *Abwärmepotenzialerhebung 2012 im Auftrag der Kommunalkredit Public Consulting GmbH, Erhebung auerbetrieblicher Potenziale in österreichischen Industriebetrieben*. Wien, 2012
- [18] AUSFELDER, F. ; SEITZ, A. ; VON ROON, S.: *Flexibilitätsoptionen und Perspektiven in der Grundstoffindustrie, Kopernius-Projekt „SynErgie - Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung“*. Frankfurt am Main, 2018
- [19] STAATSMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, LANDESENTWICKLUNG UND ENERGIE: *Potenzial*. URL <https://www.energieatlas.bayern.de/energieatlas/lexikon/p/potenzial.html#:~:text=Als%20theoretisches%20Potenzial%20wird%20die%20maximal%20mögliche%20Umsetzung,Nachfrage%20ergibt%2C%20einschließlich%20künftiger%20zu%20erwartender%20neuer%20Techniken.-abgerufen+am+2022-08-12.> — Energie-Atlas Bayern
- [20] ROTH, H. ; LUCAS, K. ; SOLFRIAN, W. ; REBSTOCK, F.: *Die Nutzung industrieller Abwärme zur Fernwärmeversorgung: Analyse der Hemmnisse für die Nutzung industrieller Abwärme zur Fernwärmeversorgung*. Berlin : Umweltbundesamt, 1996
- [21] FRATZSCHER, W. ; STEPHAN, K. ; INTERDISZIPLINÄRE ARBEITSGRUPPE OPTIONEN ZUKÜNFTIGER INDUSTRIELLER PRODUKTIONSSYSTEME (Hrsg.): *Abfallenergienutzung: technische, wirtschaftliche und soziale Aspekte, Forschungsberichte / Interdisziplinäre Arbeitsgruppen*. Berlin : Akademie Verlag, 1995 — ISBN 978-3-05-501706-3
- [22] BÜCHELE, R. ; HAAS, R. ; HARTNER, M. ; HIRNER, R.: *Bewertung des Potenzials für den Einsatz der hocheffizienten KWK und effizienter Fernwärme- und Fernkälteversorgung*. Wien : Technische Universität Wien, 2015
- [23] INSTITUT FÜR ENERGIEWIRTSCHAFT UND RATIONELLE ENERGIEANWENDUNG: *Analyse des Potentials von Industrierärmepumpen in Deutschland* : Universität Stuttgart, 2014
- [24] ARPAGAUS, C. ; BLESS, F. ; UHLMANN, M. ; SCHIFFMANN, J.: *High temperature heat pumps: market overview, state of the art, research status, refrigerants and application potentials*
- [25] WOLF, S. ; BLES, M. ; FAHL, U.: *Industrial heat pumps in Germany: Potentials, technological development and market barriers*. In: *Summer Study on Energy Efficiency in Industry*. Stuttgart, 2012
- [26] PHILIPP, M. ; SCHUMM, G. ; SCHLOSSER, F. ; PEESEL, R.-H. ; HOLZHAMMER, U.: *Grundsatzfragen der Abwärmenutzung*. In: *BWK - Das Energie-Fachmagazin* Bd. 69 (2017), Nr. 4

- [27] BAYRISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (LFU): *Abwärmenutzung im Betrieb: Klima schützen - Kosten senken*. Augsburg, 2012
- [28] JOUHARA, H. ; KHORDEHGAH, N. ; ALMAHMOUD, S. ; DELPECH, B. ; CHAUHAN, A. ; TASSOU, S.: Waste Heat Recovery Technologies and Applications. In: *Thermal Science and Engineering Progress* (2018)
- [29] WILK, V ; ARNITZ, A ; RIEBERER, R: *IEA Wärmepumpen Annex 48: Industrielle Wärmepumpen Phase II, Berichte aus Energie- und Umweltforschung*. Wien : Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2020
- [30] KOMMUNALKREDIT PUBLIC CONSULTING GMBH: *Raus aus Öl und Gas -Erneuerbare Prozessenergie für Betriebe*. URL <https://www.umweltfoerderung.at/betriebe/raus-aus-oel-und-gas-erneuerbare-prozessenergie-fuer-betriebe.html>. - abgerufen am 2022-07-30. — Umweltförderungen Österreich
- [31] KOMMUNALKREDIT PUBLIC CONSULTING GMBH: *Förderungen von elektrisch betriebenen Wärmepumpen zur Bereitstellung von Heizwärme und/oder Warmwasser*. URL <https://www.umweltfoerderung.at/betriebe/waermepumpen.html>. - abgerufen am 2022-07-30. — Umweltförderungen Österreich
- [32] *Statistiken zur Papier- und Zellstoffindustrie in Österreich*. URL <https://de.statista.com/themen/5198/papier-und-zellstoffindustrie-in-oesterreich/#dossierKeyfigures>. - abgerufen am 2022-08-25. — Statista
- [33] *Gratkorn Mill*. URL <https://www.sappi.com/de/gratkorn-mill>. - abgerufen am 2022-08-25. — Sappi
- [34] BLECHSCHMIDT, J. (Hrsg.): *Taschenbuch der Papiertechnik: mit 85 Tabellen*. München : Fachbuchverl. Leipzig im Carl Hanser Verl, 2010 — ISBN 978-3-446-41967-4
- [35] SIXTA, H. (Hrsg.): *Handbook of pulp*. Weinheim : Chichester : Wiley-VCH ; John Wiley, distributor, 2006 — ISBN 978-3-527-30999-3
- [36] HOLIK, H. (Hrsg.): *Handbook of paper and board*. Second, revised and enlarged edition. Weinheim, Germany : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013 — ISBN 978-3-527-33184-0
- [37] BAUMANN, W. ; HERBERG-LIEDTKE, B.: *Papierchemikalien: Daten und Fakten zum Umweltschutz*. Berlin Heidelberg : Springer, 1993 — ISBN 978-3-540-56269-6
- [38] HUNTER, D.: *Papermaking: the history and technique of an ancient craft*. New York : Dover Publications, 1978 — ISBN 978-0-486-23619-3

- [39] BAUER, W.: *Papier- und Kartonherstellung (Vorlesung)* : Institut für Papier-, Zellstoff- und Fasertechnik, 2007
- [40] BIERMANN, C.J.: *Handbook of pulping and papermaking*. 2. Aufl. San Diego : Academic Press, 1996 — ISBN 978-0-12-097362-0
- [41] VERBAND DEUTSCHER PAPIERFABRIKEN E. V.: *Papier: ein Leistungsbericht*. Bonn, 2011
- [42] TREPPE, K. ; ZELM, R. ; SCHINKE, L. ; KUITUNEN, S.: *Energetische Optimierung der Trockenpartie: Wärmetechnische Bewertung zur Steigerung der Energieeffizienz (Nr. 117)* : Technische Universität Dresden, 2012
- [43] JUNG, H. ; HUTTER, A.: *Energierückgewinnung in der Papierindustrie*. Heidenau : Papiertechnische Stiftung (PTS), 2010
- [44] *Klimaschutz durch effiziente Energieverwendung in der Papierindustrie: Nutzung von Niedertemperaturabwärme*. Augsburg : Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, 2003
- [45] RIETHMÜLLER, M.: *Fördermittel für Abwärmenutzung in der Papierindustrie Teil 3*. URL <https://www.ecogreen-gruppe.de/foerdermittel-abwaermenutzung-papierindustrie/>. - abgerufen am 2022-08-28. — Ihre Fördermittel-Experten: ecogreen
- [46] GATTINGER, M.: *Auslegung Wärmetauscher Sappi Gratkorn durch Firma Kelvion*. URL <https://www.kelvion.com>
- [47] BLAZEK, H. ; BARNEK, M.: *Abwärmenutzung Sappi Gratkorn durch Firma Stepsahead*. URL <https://stepsahead.at>
- [48] ABTEILUNG 15 - ENERGIE, WOHNBAU, TECHNIK: *Ökofonds-Ausschreibung: Innovative Wärmepumpen*. Graz : Amt der Steiermärkischen Landesregierung, 2022

8 ANHANG

Anhang I: Temperatur-, Volumenstrom-, Feuchte- und Druckmessungen zu sämtlichen Abluftkaminen (Emissionsbescheid 2018)

Messpunkt Nr.	Anlagenpunkt Nr.	Bezeichnung	T ₂ /°C	\dot{V}_B /Bm ³ h ⁻¹	rel. Feuchte /%	p _B /hPa	d _{Kamin} /m
1.1	11 22 0028	PM-WRG Ebene	46	8.765	24	970	1,00
1.2	11 22 0029	PM-WRG Ebene	46	8.482	25	970	1,00
1.3	11 22 0061	SM-WRG Ebene	46	18.096	25	970	1,00
1.4	11 22 0060	SM-WRG Ebene	46	18.096	25	970	1,00
1.5	11 22 0027	PM-WRG Ebene	37	15.268	40	970	1,00
1.6	11 22 0059	SM-WRG Ebene	37	11.875	40	988	1,00
2.1	11 22 0050	Streichküche Nr.1	35	18.810	35	971	0,95
2.2	11 22 0051	Streichküche Nr.2	35	42.408	35	971	0,95
2.3	11 22 0052	Streichküche Nr.3	34	19.152	35	971	0,95
3.1	11 21 0021	PM-Naßpartie	42	96.895	41	969	1,87
3.2	11 21 0022	PM-Naßpartie	42	96.895	1	984	1,87
3.3	11 21 0023	PM-Naßpartie	42	96.895	1	984	1,87
3.4	11 21 0024	PM-Naßpartie	41	14.831	1	984	1,87
3.5	11 21 0025	PM-Naßpartie	42	96.895	1	984	1,87
4.1	11 21 0026	PM-Trockenpartie	41	96.895	1	984	1,87
4.2	11 21 0027	PM-Trockenpartie	41	15.820	1	984	1,87
5.1	11 21 0061	SM - Abluft	61	95.946	16	970	1,90
5.2	11 21 0062	SM - Abluft	63	96.967	18	970	1,90
5.3	11 21 0063	SM - Abluft	62	95.946	20	970	1,90
5.4	11 21 0064	SM - Abluft	62	94.925	17	970	1,90
5.5	11 21 0065	SM - Abluft	54	15.311	23	970	1,90
5.6	11 21 0066	SM - Abluft	45	16.331	35	970	1,90
5.7	11 21 0067	SM - Abluft	40	17.352	1	970	1,90
5.8	11 21 0068	SM - Abluft	61	96.967	18	970	1,90
5.9	11 21 0069	SM - Abluft	39	17.352	48	970	1,90
5.10	11 21 0070	SM - Abluft	43	16.331	18	970	0,50
6.1	31 21	Vakuumpumpen	46	2.191	100	969	0,50
6.2	31 21	Vakuumpumpen	46	2.191	100	969	0,50
6.3	31 21	Vakuumpumpen	46	2.262	100	969	0,50
6.4	31 21	Vakuumpumpen	46	2.545	100	969	0,50
6.5	31 21	Vakuumpumpen	46	2.403	100	969	0,50
6.6	31 21	Vakuumpumpen	46	2.333	100	969	1,40
7	31 22 0030	Siebraum Duoformer 1	38	87.560	100	971	1,60
8	31 22 0031	Siebraum Duoformer 2	39	121.602	90	971	0,56
41	31 22 0040	Vacuumschuh	38	9.576	80	971	0,63
42	43 12 0030	Pressenauflöser	42	17.619	100	971	0,80
9	31 22 0032	Absaugung Skimmer	42	33.869	70	971	1,80

Anhang

10	31 42 0031	Wärmerückgewinnung 1	52	126.420	90	971	1,80
11	31 42 0033	Wärmerückgewinnung 2	57	152.071	92	971	1,80
12	31 42 0035	Wärmerückgewinnung 3	61	167.644	78	971	1,60
40	31 42 0101	Wärmerückgewinnung 3a	57	52.042	80	971	1,80
13	31 42 0037	Wärmerückgewinnung 4	65	168.560	1	971	0,80
14	43 12 0035	Pulper UR 111	35	9.048	1	971	0,80
15	43 12 0037	Randstreifenpulper 1	31	31.486	100	971	0,80
43	43 12 0038	Randstreifenpulper 2	31	36.553	100	971	0,80
44	43 12 0036	Pulper UR 112	35	31.486	44	971	0,75
45	43 12 0034	Maschinenauflöser	38	9.861	80	966	0,80
46	43 12 0031	Leimpresenauflöser	41	11.038	80	966	0,80
47	43 12 0039	Rollenschneiderauflöser	25	10.857	100	966	0,50
16	31 52 0016	Coater 1 - IR Abluft Rampe	228	30.460	1	971	0,90
17	31 52 0001	Coater 1 - IR Abluft offene Haube	70	29.677	24	971	0,80
18	31 52 0002	Coater 1 - IR geschlossene Haube	60	26.239	24	971	0,80
20	31 52 0003	Coater 2 - IR Abluft offene Haube	64	31.650	25	971	0,75
21	31 52 0017	Coater 2 - IR Abluft Rampe	170	30.460	2	971	0,90
22	31 52 0004	Coater 2 - IR geschlossene Haube	57	33.437	25	971	0,90
23	31 42 0043	Glättwerk - Haubenabluf	47	26.108	13	971	0,90
24	53 32 0002	Coater 3 - IR Abluft Rampe	257	14.476	1	971	1,60
25	53 22 0001	Coater 3 - IR Abluft offene Haube	118	18.981	3	971	0,70
26	53 22 0002	Coater 3 - IR geschlossene Haube	60	26.058	22	971	0,80
27	53 42 0007	Coater 3 - Airfoil Trockner	155	53.518	3	971	1,30
28	53 32 0006	Coater 4 - IR Abluft Rampe	300	43.429	1	971	1,60
29	53 22 0003	Coater 4 - IR Abluft offene Haube	183	18.703	2	971	0,70
30	53 22 0004	Coater 4 - IR geschlossene Haube	61	27.143	17	971	0,80

Anhang

31	53 42 0015	Coater 4 - Airfoil Trockner	118	44.439	4	971	1,30
32	53 32 0010	Coater 5 -971 IR Abluft Rampe	205	59.353	2	971	1,60
33	53 22 0005	Coater 5 - IR Abluft offene Haube	-	-	-	-	0,70
34	53 22 0006	Coater 5 - IR geschlossene Haube	55	26.058	25	971	0,80
35	53 42 0023	Coater 5 - Airfoil Trockner	139	50.173	3	971	1,30
36	53 32 0014	Coater 6 - IR Abluft Rampe	209	71.658	1	971	1,60
37	53 22 0007	Coater 6 - IR Abluft offene Haube	78	17.734	10	971	0,70
38	53 22 0008	Coater 6 - IR geschlossene Haube	54	25.877	24	971	0,80
39	53 42 0031	Coater 6 - Airfoil Trockner	134	54.473	2	971	1,30

Anhang II: Berechnete Normvolumenströme, spezifische Wärmekapazitäten und Normwärmeleistungen (Emissionsbescheid 2018)

Messpunkt Nr.	Bezeichnung	\dot{V}_N	cp (T, rel Feuchte)	\dot{Q}_N
		/Nm ³ h ⁻¹	/kJm ⁻³ K ⁻¹	/kW
1.1	PM-WRG Ebene	7.183	1,069	55,459
1.2	PM-WRG Ebene	6.952	1,069	53,670
1.3	SM-WRG Ebene	14.830	1,069	114,496
1.4	SM-WRG Ebene	14.830	1,069	114,496
1.5	PM-WRG Ebene	12.876	1,100	66,883
1.6	SM-WRG Ebene	10.015	1,100	52,020
2.1	Streichküche Nr.1	15.982	1,100	73,252
2.2	Streichküche Nr.2	36.033	1,100	165,150
2.3	Streichküche Nr.3	16.326	1,100	69,838
3.1	PM-Naßpartie	80.334	1,100	540,023
3.2	PM-Naßpartie	80.334	1,100	540,023
3.3	PM-Naßpartie	80.334	1,100	540,023
3.4	PM-Naßpartie	12.335	1,100	79,151
3.5	PM-Naßpartie	80.334	1,100	540,023
4.1	PM-Trockenpartie	80.590	1,100	517,118
4.2	PM-Trockenpartie	13.158	1,100	84,427
5.1	SM - Abluft	75.102	1,025	876,707
5.2	SM - Abluft	75.449	1,025	923,726
5.3	SM - Abluft	74.878	1,025	895,410
5.4	SM - Abluft	74.081	1,025	885,884
5.5	SM - Abluft	12.241	1,025	118,497
5.6	SM - Abluft	13.426	1,100	102,561
5.7	SM - Abluft	14.493	1,100	88,569
5.8	SM - Abluft	75.901	1,025	886,033
5.9	SM - Abluft	14.539	1,100	84,410
5.10	SM - Abluft	13.511	1,100	94,953
6.1	Vakuumpumpen	1.794	1,100	14,252
6.2	Vakuumpumpen	1.794	1,100	14,252
6.3	Vakuumpumpen	1.852	1,100	14,712
6.4	Vakuumpumpen	2.083	1,100	16,551
6.5	Vakuumpumpen	1.968	1,100	15,631
6.6	Vakuumpumpen	1.910	1,100	15,172
7	Siebraum Duoformer 1	73.679	1,100	405,237
8	Siebraum Duoformer 2	101.997	1,100	592,151
41	Vacuumschuh	8.058	1,100	44,320
42	Pressenauflöser	14.637	1,100	98,396
9	Absaugung Skimmer	28.138	1,100	189,150
10	Wärmerückgewinnung 1	101.799	1,100	995,368

Anhang

11	Wärmerückgewinnung 2	120.599	1,100	1363,442
12	Wärmerückgewinnung 3	131.358	1,100	1645,628
40	Wärmerückgewinnung 3a	41.272	1,100	466,597
13	Wärmerückgewinnung 4	130.514	1,100	1794,565
14	Pulper UR 111	7.688	1,100	35,235
15	Randstreifenpulper 1	27.105	1,100	91,102
43	Randstreifenpulper 2	31.466	1,100	105,762
44	Pulper UR 112	26.753	1,100	122,617
45	Maschinenauflöser	8.255	1,100	45,401
46	Leimpresenauflöser	9.152	1,100	58,728
47	Rollenschneiderauflöser	9.485	1,100	14,492
16	Coater 1 - IR Abluft Rampe	15.914	0,716	919,460
17	Coater 1 - IR Abluft offene Haube	22.643	1,003	314,493
18	Coater 1 - IR geschlossene Haube	20.621	1,003	229,123
20	Coater 2 - IR Abluft offene Haube	24.579	1,003	300,404
21	Coater 2 - IR Abluft Rampe	17.997	0,790	749,856
22	Coater 2 - IR geschlossene Haube	26.517	1,003	272,539
23	Glättwerk - Haubenabluf	21.352	1,100	160,140
24	Coater 3 - IR Abluft Rampe	7.149	0,698	470,673
25	Coater 3 - IR Abluft offene Haube	12.705	0,700	345,860
26	Coater 3 - IR geschlossene Haube	20.479	1,003	227,543
27	Coater 3 - Airfoil Trockner	32.727	0,800	1227,278
28	Coater 4 - IR Abluft Rampe	19.839	0,693	1543,055
29	Coater 4 - IR Abluft offene Haube	10.736	0,800	486,0828
30	Coater 4 - IR geschlossene Haube	21.268	1,000	242,222
31	Coater 4 - Airfoil Trockner	29.746	0,700	809,754
32	Coater 5 - IR Abluft Rampe	32.501	0,757	1670,175
33	Coater 5 - IR Abluft offene Haube	-	-	-
34	Coater 5 - IR geschlossene Haube	20.791	1,003	202,134
35	Coater 5 - Airfoil Trockner	31.873	0,800	1053,582
36	Coater 6 - IR Abluft Rampe	38.913	0,757	2042,939
37	Coater 6 - IR Abluft offene Haube	13.223	1,000	213,031
38	Coater 6 - IR geschlossene Haube	20.710	1,100	195,591
39	Coater 6 - Airfoil Trockner	35.030	0,750	1109,283

Anhang III: Gemessene Temperaturen zu unterschiedlichen Grammaturen

Grammaturen /gm ⁻²	115	130	150	170	200	300
Messpunkt Nr.	T _m /°C	T _m /°C	T _m /°C	T _m /°C	T _m /°C	T _m /°C
24	178,0	241,8	230,9	191,7	273,1	193,5
25	76,0	78,1	88,3	92,3	140,5	87,7
27	90,9	106,2	104,0	106,5	116,5	96,4
28	139,9	152,6	214,9	114,7	236,3	149,4
29	67,7	79,0	91,5	94,6	110,8	72,2
31	98,1	110,1	103,7	223,9	110,2	94,3
32	138,0	263,2	168,8	229,0	231,2	168,7
33	61,1	107,4	89,0	96,9	104,4	89,6
35	81,2	94,0	98,9	91,0	120,7	97,2
36	161,8	211,5	209,0	182,1	191,7	144,1
39	87,3	97,9	134,0	92,9	94,0	92,6

Anhang IV: Gemessene minimale Strömungsgeschwindigkeiten zu unterschiedlichen Grammaturen

Grammaturen /gm ⁻²	115	130	150	170	200	300
Messpunkt Nr.	v _{min} /ms ⁻¹	v _{min} /ms ⁻¹	v _{min} /ms ⁻¹	v _{min} /ms ⁻¹	v _{min} /ms ⁻¹	v _{min} /ms ⁻¹
24	0,7	0,9	1,3	0,7	3,5	0,9
25	0,7	1,3	0,8	0,7	1,5	0,8
27	10,0	8,8	9,3	10,1	8,9	9,0
28	2,9	2,6	2,1	8,3	1,8	1,0
29	9,.	8,5	9,7	8,2	8,8	9,5
31	7,1	2,3	8,1	0,6	7,1	6,7
32	3,8	1,4	1,0	2,8	2,6	1,4
33	13,3	11,4	13,8	13,2	10,9	10,2
35	3,4	5,6	9,1	7,8	2,5	6,4
36	1,3	1,5	8,2	2,3	0,6	3,4
39	6,5	5,9	10,6	6,3	7,2	4,7

Anhang V: Gemessene maximale Strömungsgeschwindigkeiten zu unterschiedlichen Grammaturen

Grammaturen /gm ⁻²	115	130	150	170	200	300
Messpunkt Nr.	V _{max} /ms ⁻¹	V _{max} /ms ⁻¹	V _{max} /ms ⁻¹	V _{max} /ms ⁻¹	V _{max} /ms ⁻¹	V _{max} /ms ⁻¹
24	2,5	3,7	4,0	3,2	4,6	4,0
25	1,7	2,2	2,0	2,6	2,8	3,0
27	17,2	17,2	12,0	15,7	16,5	16,7
28	4,9	4,6	4,0	10,8	3,3	2,3
29	10,8	9,9	11,2	9,5	9,8	10,8
31	11,7	9,4	11,5	3,7	8,7	10,7
32	5,4	4,4	4,1	4,9	4,6	4,1
33	14,7	13,4	14,7	14,1	12,5	12,9
35	13,7	14,2	14,4	15,3	10,6	16,2
36	5,2	4,0	11,0	4,7	3,1	6,1
39	14,2	11,4	12,1	11,5	13,2	12,1

Anhang VI: Gemessene mittleren Strömungsgeschwindigkeiten zu unterschiedlichen Grammaturen

Grammaturen /gm ⁻²	115	130	150	170	200	300
Messpunkt Nr.	V _{mittel} /ms ⁻¹	V _{mittel} /ms ⁻¹	V _{mittel} /ms ⁻¹	V _{mittel} /ms ⁻¹	V _{mittel} /ms ⁻¹	V _{mittel} /ms ⁻¹
24	1,8	2,4	3,3	2,1	3,9	2,6
25	1,3	1,6	1,5	2,1	2,2	1,4
27	16,0	14,0	10,6	13,1	11,3	12,7
28	3,0	3,1	3,4	9,7	2,5	1,4
29	10,4	9,1	10,5	9,0	9,1	10,2
31	10,3	5,7	9,5	2,5	11,6	8,5
32	4,4	3,8	2,4	4,1	3,7	3,5
33	14,3	12,4	14,3	13,5	11,2	11,9
35	10,1	10,2	12,5	11,3	6,9	11,9
36	3,5	2,9	9,9	3,0	2,0	5,0
39	10,5	9,0	11,4	9,1	9,8	6,9

Anhang VII: Berechnete minimale Betriebsvolumenströme zu unterschiedlichen Grammaturen

Grammaturen /gm ⁻²	115	130	150	170	200	300
Messpunkt Nr.	$\dot{V}_{B,min}$ /Bm ³ h ⁻¹	$\dot{V}_{B,min}$ /Bm ³ h ⁻¹	$\dot{V}_{B,min}$ /Bm ³ h ⁻¹	$\dot{V}_{B,min}$ /Bm ³ h ⁻¹	$\dot{V}_{B,min}$ /Bm ³ h ⁻¹	$\dot{V}_{B,min}$ /Bm ³ h ⁻¹
24	5.066,61	6.514,21	9.409,42	5.066,61	25.333,06	6.514,21
25	969,78	1.801,02	1.108,32	969,78	2.078,10	1.108,32
27	47.782,22	42.048,35	44.437,46	48.260,04	42.526,17	43.003,99
28	20.990,25	18.818,84	15.199,83	60.075,53	13.028,43	7.238,02
29	12.468,61	11.775,91	13.438,40	11.360,29	12.191,53	13.161,31
31	33.925,37	10.989,91	38.703,59	2.866,933	33.925,37	32.014,08
32	27.504,46	10.133,22	7.238,02	20.266,45	18.818,84	10.133,22
33	18.425,84	15.793,58	19.118,54	18.287,30	15.100,88	14.131,10
35	16.245,95	26.758,04	43.481,82	37.270,13	11.945,55	30.580,62
36	9.409,42	10.857,02	59.351,73	16.647,44	4.342,81	24.609,25
39	31.058,44	28.191,51	50.649,15	30.102,80	34.403,20	22.457,64

Anhang VIII: Berechnete maximale Betriebsvolumenströme zu unterschiedlichen Grammaturen

Grammaturen /gm ⁻²	115	130	150	170	200	300
Messpunkt Nr.	$\dot{V}_{B,max}$ /Bm ³ h ⁻¹	$\dot{V}_{B,max}$ /Bm ³ h ⁻¹	$\dot{V}_{B,max}$ /Bm ³ h ⁻¹	$\dot{V}_{B,max}$ /Bm ³ h ⁻¹	$\dot{V}_{B,max}$ /Bm ³ h ⁻¹	$\dot{V}_{B,max}$ /Bm ³ h ⁻¹
24	18.095,04	26.780,66	28.952,06	23.161,65	33.294,87	28.952,06
25	2.355,18	3.047,88	2.770,80	3.602,04	3.879,12	4.156,21
27	82.185,41	82.185,41	57.338,66	75.018,08	78.840,66	79.796,30
28	35.466,28	33.294,87	28.952,06	78.170,57	23.885,45	16.647,44
29	14.962,34	13.715,48	15.516,50	13.161,31	13.576,94	14.962,34
31	55.905,19	44.915,28	54.949,55	17.679,42	41.570,51	51.126,97
32	39.085,29	31.847,27	29.675,87	35.466,28	33.294,88	29.675,87
33	20.365,40	18.564,38	20.365,40	19.534,16	17.317,52	17.871,68
35	65.461,64	67.850,75	68.806,39	73.106,79	50.649,15	77.407,19
36	37.637,68	28.952,06	79.618,18	34.018,68	22.437,85	44.151,90
39	67.850,75	54.471,73	57.816,48	54.949,55	63.072,52	57.816,48

Anhang IX: Berechnete mittlere Betriebsvolumenströme zu unterschiedlichen Grammaturen

Grammaturen /gm ⁻²	115	130	150	170	200	300
Messpunkt Nr.	$\dot{V}_{B,mittel}$ /Bm ³ h ⁻¹	$\dot{V}_{B,mittel}$ /Bm ³ h ⁻¹	$\dot{V}_{B,mittel}$ /Bm ³ h ⁻¹	$\dot{V}_{B,mittel}$ /Bm ³ h ⁻¹	$\dot{V}_{B,mittel}$ /Bm ³ h ⁻¹	$\dot{V}_{B,mittel}$ /Bm ³ h ⁻¹
24	13.028,43	17.371,24	23.885,45	15.199,83	28.228,26	18.818,84
25	1.801,02	2.216,64	2.078,10	2.909,34	3.047,88	1.939,56
27	76.451,54	66.895,10	50.649,15	62.594,70	53.993,90	60.683,41
28	21.714,05	22.437,85	24.609,25	70.208,76	18.095,04	10.133,22
29	14.408,18	12.607,15	14.546,72	12.468,61	12.607,15	14.131,10
31	49.215,68	27.235,86	45.393,10	11.945,55	55.427,37	40.614,88
32	31.847,27	27.504,46	17.371,24	29.675,87	26.780,66	25.333,06
33	19.811,24	17.178,98	19.741,97	18.702,92	15.516,50	16.486,28
35	48.260,04	48.737,86	59.727,77	53.993,90	32.969,73	56.860,84
36	25.333,06	20.990,25	71.656,36	21.714,05	14.476,03	36.190,08
39	50.171,33	43.003,99	54.471,73	43.481,82	46.826,57	32.969,73

Anhang X: Berechnete minimale Normvolumenströme zu unterschiedlichen Grammaturen

Grammaturen /gm ⁻²	115	130	150	170	200	300
Messpunkt Nr.	$\dot{V}_{N,min}$ /Nm ³ h ⁻¹	$\dot{V}_{N,min}$ /Nm ³ h ⁻¹	$\dot{V}_{N,min}$ /Nm ³ h ⁻¹	$\dot{V}_{N,min}$ /Nm ³ h ⁻¹	$\dot{V}_{N,min}$ /Nm ³ h ⁻¹	$\dot{V}_{N,min}$ /Nm ³ h ⁻¹
24	2.976,01	3.352,02	4.946,83	2.888,30	12.288,75	3.698,94
25	736,11	1.358,75	812,56	703,28	1.331,40	813,91
27	34.781,10	29.372,91	31.222,90	33.688,41	28.918,95	30.839,89
28	13.467,53	11.713,22	8.253,01	41.049,63	6.777,30	4.539,56
29	9.694,72	8.860,62	9.765,83	8.186,06	8.414,37	10.098,99
31	24.215,66	7.599,55	27.215,79	1.528,47	23.453,36	23.087,71
32	17.725,80	5.006,23	4.339,95	10.695,04	9.887,78	6.076,84
33	14.606,65	10.997,83	13.989,57	13.094,48	10.599,02	10.322,07
35	12.148,15	19.311,21	30.970,23	27.119,33	8.038,04	21.883,21
36	5.732,73	5.936,37	32.620,40	9.690,26	2.475,69	15.628,08
39	22.833,51	20.135,53	32.965,21	21.794,36	24.828,70	16.272,62

Anhang XI: Berechnete maximale Normvolumenströme zu unterschiedlichen Grammaturen

Grammaturen /gm ⁻²	115	130	150	170	200	300
Messpunkt Nr.	$\dot{V}_{N,max}$ /Nm ³ h ⁻¹	$\dot{V}_{N,max}$ /Nm ³ h ⁻¹	$\dot{V}_{N,max}$ /Nm ³ h ⁻¹	$\dot{V}_{N,max}$ /Nm ³ h ⁻¹	$\dot{V}_{N,max}$ /Nm ³ h ⁻¹	$\dot{V}_{N,max}$ /Nm ³ h ⁻¹
24	10.628,62	13.780,54	15.221,03	13.203,67	16.150,93	16.439,76
25	1.787,69	2.299,43	2.031,40	2.612,18	2.485,27	3.052,17
27	59.823,50	57.410,69	40.287,61	52.367,13	53.613,79	57.225,14
28	22.755,49	20.723,39	15.720,03	53.413,98	12.425,06	10.440,99
29	11.633,67	10.320,01	11.276,01	9.483,85	9.370,55	11.480,96
31	39.904,68	31.059,03	38.639,70	9.425,54	28.738,62	36.871,42
32	25.189,29	15.733,85	17.793,79	18.716,31	17.493,77	17.796,47
33	16.144,19	12.927,27	14.901,93	13.987,28	12.154,84	13.054,38
35	48.949,88	48.967,71	49.007,84	53.195,61	34.081,30	55.391,88
36	22.930,93	15.830,31	43.759,08	19.801,84	12.791,06	28.038,61
39	49.882,44	38.905,93	37.630,10	39.783,35	45.519,28	41.893,34

Anhang XII: Berechnete mittlere Normvolumenströme zu unterschiedlichen Grammaturen

Grammaturen /gm ⁻²	115	130	150	170	200	300
Messpunkt Nr.	$\dot{V}_{N,mittel}$ /Nm ³ h ⁻¹	$\dot{V}_{N,mittel}$ /Nm ³ h ⁻¹	$\dot{V}_{N,mittel}$ /Nm ³ h ⁻¹	$\dot{V}_{N,mittel}$ /Nm ³ h ⁻¹	$\dot{V}_{N,mittel}$ /Nm ³ h ⁻¹	$\dot{V}_{N,mittel}$ /Nm ³ h ⁻¹
24	7.652,60	8.938,73	12.557,35	8.664,91	13.693,18	10.685,84
25	1.367,06	1.672,31	1.523,55	2.109,84	1.952,71	1.424,34
27	55.649,77	46.729,63	35.587,39	43.694,87	36.717,32	43.518,52
28	13.931,93	13.965,76	13.362,02	47.973,67	9.412,92	6.355,38
29	11.202,79	9.486,07	10.571,26	8.984,70	8.701,23	10.843,13
31	35.129,76	18.833,67	31.919,75	6.368,61	38.318,16	29.290,38
32	20.524,61	13.588,33	10.415,87	15.660,59	14.071,08	15.192,11
33	15.704,90	11.962,55	14.445,75	13.392,08	10.890,74	12.042,41
35	36.087,14	35.173,99	42.541,53	39.288,26	22.185,00	40.689,10
36	15.434,28	11.476,97	39.383,17	12.639,47	8.252,30	22.982,47
39	36.884,90	30.715,21	35.453,15	31.480,74	33.794,62	23.889,59

Anhang XIII: Berechnete minimale Normwärmeleistungen mit einer Abkühlungstemperatur von 150 °C zu unterschiedlichen Grammaturen

Grammaturen /gm ⁻²	115	130	150	170	200	300
Messpunkt Nr.	$\dot{Q}_{N,min,150}$ /kW	$\dot{Q}_{N,min,150}$ /kW	$\dot{Q}_{N,min,150}$ /kW ¹	$\dot{Q}_{N,min,150}$ /kW	$\dot{Q}_{N,min,150}$ /kW	$\dot{Q}_{N,min,150}$ /kW
24	23,15	85,51	111,17	33,46	420,32	44,73
25	-15,14	-27,14	-13,93	-11,28	-3,53	-14,09
27	-570,99	-357,37	-398,96	-407,38	-268,84	-459,46
28	-37,91	8,46	148,78	-402,89	162,40	-0,80
29	-221,72	-174,67	-158,69	-125,97	-91,62	-218,25
31	-349,11	-84,30	-350,03	31,38	-259,51	-357,22
32	-58,92	157,46	22,66	234,70	223,02	31,62
33	-360,57	-130,14	-237,05	-193,02	-134,25	-173,09
35	-232,05	-300,22	-439,61	-444,20	-65,50	-321,16
36	18,79	101,41	534,61	86,40	28,68	-25,47
39	-397,68	-291,59	-146,51	-345,88	-385,99	-259,61

Anhang XIV: Berechnete maximale Normwärmeleistungen mit einer Abkühlungstemperatur von 150 °C zu unterschiedlichen Grammaturen

Grammaturen /gm ⁻²	115	130	150	170	200	300
Messpunkt Nr.	$\dot{Q}_{N,max,150}$ /kW	$\dot{Q}_{N,max,150}$ /kW	$\dot{Q}_{N,max,150}$ /kW	$\dot{Q}_{N,max,150}$ /kW	$\dot{Q}_{N,max,150}$ /kW	$\dot{Q}_{N,max,150}$ /kW
24	82,67	351,53	342,05	152,94	552,42	198,80
25	-36,76	-45,92	-34,82	-41,89	-6,58	-52,82
27	-982,10	-698,50	-514,79	-633,25	-498,41	-852,55
28	-64,05	14,97	283,40	-524,25	297,74	-1,84
29	-266,07	-203,44	-183,24	-145,95	-102,03	-248,12
31	-575,29	-344,53	-496,95	193,49	-317,99	-570,48
32	-83,73	494,89	92,92	410,72	394,58	92,61
33	-398,52	-152,97	-252,50	-206,18	-153,96	-218,90
35	-935,03	-761,27	-695,64	-871,32	-277,70	-812,93
36	75,16	270,43	717,16	176,57	148,16	-45,69
39	-868,79	-563,42	-167,24	-631,38	-707,66	-668,35

Anhang XV: Berechnete mittlere Normwärmeleistungen mit einer Abkühlungstemperatur von 150 °C zu unterschiedlichen Grammaturen

Grammaturen /gm ⁻²	115	130	150	170	200	300
Messpunkt Nr.	$\dot{Q}_{N,mittel,150}$ /kW	$\dot{Q}_{N,mittel,150}$ /kW	$\dot{Q}_{N,mittel,150}$ /kW ¹	$\dot{Q}_{N,mittel,150}$ /kW	$\dot{Q}_{N,mittel,150}$ /kW	$\dot{Q}_{N,mittel,150}$ /kW
24	59,52	228,02	282,19	100,37	468,36	129,22
25	-28,11	-33,40	-26,11	-33,84	-5,17	-24,65
27	-913,58	-568,54	-454,73	-528,38	-341,34	-648,35
28	-39,22	10,09	240,89	-470,85	225,56	-1,12
29	-256,21	-187,00	-171,78	-138,26	-94,75	-234,33
31	-506,45	-208,91	-410,52	130,73	-423,98	-453,19
32	-68,23	427,40	54,39	343,66	317,38	79,06
33	-387,68	-141,56	-244,78	-197,41	-137,95	-201,93
35	-689,33	-546,83	-603,85	-643,53	-180,77	-597,15
36	50,59	196,06	645,45	112,70	95,59	-37,45
39	-642,41	-444,80	-157,57	-499,61	-525,38	-381,13

Anhang XVI: Berechnete minimale Normwärmeleistungen mit einer Abkühlungstemperatur von 80 °C zu unterschiedlichen Grammaturen

Grammaturen /gm ⁻²	115	130	150	170	200	300
Messpunkt Nr.	$\dot{Q}_{N,min,80}$ /kW	$\dot{Q}_{N,min,80}$ /kW	$\dot{Q}_{N,min,80}$ /kW ¹	$\dot{Q}_{N,min,150}$ /kW	$\dot{Q}_{N,min,80}$ /kW	$\dot{Q}_{N,min,80}$ /kW
24	81,01	150,69	207,35	89,62	659,27	116,65
25	-0,82	-0,72	1,87	2,40	22,36	1,74
27	105,31	213,77	208,15	247,67	293,47	140,21
28	223,96	236,22	309,26	395,29	294,19	87,47
29	-33,21	-2,38	31,20	33,20	71,99	-21,88
31	121,75	63,47	179,17	61,10	196,53	91,71
32	285,75	254,81	107,05	442,66	415,29	149,78
33	-76,55	83,71	34,97	61,59	71,84	27,62
35	4,16	75,28	162,59	83,12	90,80	104,35
36	130,26	216,84	1.168,90	274,83	76,82	278,41
39	46,30	99,93	494,48	77,89	96,79	56,80

Anhang XVII: Berechnete maximale Normwärmeleistungen mit einer Abkühlungstemperatur von 80 °C zu unterschiedlichen Grammaturen

Grammaturen /gm ⁻²	115	130	150	170	200	300
Messpunkt Nr.	$\dot{Q}_{N,max,80}$ /kW	$\dot{Q}_{N,max,80}$ /kW	$\dot{Q}_{N,max,80}$ /kW	$\dot{Q}_{N,max,80}$ /kW	$\dot{Q}_{N,max,80}$ /kW	$\dot{Q}_{N,max,80}$ /kW
24	289,33	619,49	638,01	409,68	866,47	518,46
25	-2,00	-1,21	4,68	8,90	41,74	6,53
27	181,13	417,82	268,58	385,00	544,08	260,16
28	378,42	417,92	589,06	514,36	539,34	201,18
29	-39,86	-2,77	36,02	38,46	80,17	-24,88
31	200,63	259,40	254,38	376,76	240,82	146,46
32	406,06	800,82	438,91	774,65	734,74	438,65
33	-84,61	98,39	37,25	65,79	82,38	34,93
35	16,77	190,88	257,29	163,03	384,99	264,14
36	521,04	578,25	1.568,03	561,60	396,88	499,50
39	101,15	193,09	564,45	142,19	177,44	146,24

Anhang XVIII: Berechnete mittlere Normwärmeleistungen mit einer Abkühlungstemperatur von 80 °C zu unterschiedlichen Grammaturen

Grammaturen /gm ⁻²	115	130	150	170	200	300
Messpunkt Nr.	$\dot{Q}_{N,mittel,80}$ /kW	$\dot{Q}_{N,mittel,80}$ /kW	$\dot{Q}_{N,mittel,80}$ /kW ¹	$\dot{Q}_{N,mittel,80}$ /kW	$\dot{Q}_{N,mittel,80}$ /kW	$\dot{Q}_{N,mittel,80}$ /kW
24	208,32	401,83	526,36	268,85	734,61	337,00
25	-1,53	-0,88	3,51	7,19	32,80	3,05
27	168,50	340,09	237,25	321,24	372,61	197,85
28	231,68	281,64	500,70	461,97	408,59	122,46
29	-38,38	-2,55	33,77	36,44	74,44	-23,49
31	176,62	157,30	210,14	254,57	321,09	116,35
32	330,86	691,62	256,92	648,17	590,99	374,46
33	-82,31	91,05	36,11	62,99	73,82	32,22
35	12,36	137,11	223,34	120,41	250,61	194,03
36	350,70	419,23	1.411,23	358,47	256,05	409,43
39	74,79	152,44	531,80	112,51	131,74	83,39

Anhang XIX: Produzierte Papiersorten im Zeitraum 13.08.2022 16:09 Uhr – 19.08.2022 21:21 Uhr

St	Plan Beginn	Erze	Tl	V	P	Nr.	SoNr.	Sorten Name	Fig.erze	bestellt	Solldm.	Soll-Kg	Ist-Kg	Offen-Kg	MeterSoll	Ist-Lfm	offen Lfm	Laufzeit
F	13-08-22 16:09	6282	0	L		9	9000	GLOSS 1	121.5	170.0	1445	512364	507473	16777	498462	493704	16321	8:36
F	14-08-22 00:45	6283	0	P		3	9000	GLOSS 1	107.0	150.0	1250	162721	165785	1611	179758	183143	1780	3:04
F	14-08-22 03:49	6284	0	X		6	9000	GLOSS 1	107.0	150.0	1445	342625	332173	16196	379500	366953	17892	6:08
F	14-08-22 09:57	6285	0	X	P	5	9000	GLOSS 1	92.5	135.0	1445	275469	269159	9730	352015	343951	12434	5:24
F	14-08-22 15:22	6286	0	P	P	3	9000	GLOSS 1	89.5	130.0	1250	143786	156195	-71	189899	206288	-94	3:15
F	14-08-22 18:37	6287	0	X		7	9000	GLOSS 1	89.5	130.0	1447	362280	363845	-3361	478466	480533	-4438	7:15
F	15-08-22 01:52	6288	0	P		1	9000	GLOSS 1	80.0	115.0	1250	63257	53248	-579	93465	78676	-855	1:11
F	15-08-22 03:04	6289	0	X		15	9000	GLOSS 1	80.0	115.0	1437	798141	798626	56055	1179287	1180003	82824	17:49
F	15-08-22 20:54	6290	0	L		9	4000	SILK 1	79.5	115.0	1498	475602	484743	-2773	707141	720732	-4123	10:49
F	16-08-22 07:46	6291	0	X		6	4000	SILK 1	87.5	130.0	1495	299962	328401	-24261	405217	443635	-32774	6:40
F	16-08-22 14:28	6292	0	L		7	4000	SILK 1	91.0	135.0	1497	388483	390368	2640	504615	507064	3429	7:59
F	16-08-22 22:27	6293	0	X		12	4000	SILK 1	101.0	150.0	1496	659555	667655	2514	771897	781376	2942	13:19
F	17-08-22 11:46	6294	0	L		1	4000	SILK 1	117.5	170.0	1000	22569	57834	-881	22704	58180	-886	0:53
F	17-08-22 12:40	6295	0	L		7	4000	SILK 1	117.5	170.0	1485	422905	397039	2186	425436	399416	2199	6:59
F	17-08-22 19:40	6296	0	L		1	4000	SILK 1	146.0	200.0	1250	36019	55737	-1437	29161	45125	-1163	0:49
F	17-08-22 20:29	6298	0	L		5	4000	SILK 1	146.0	200.0	1499	310120	279247	20990	251077	226082	16994	4:09
F	18-08-22 00:38	6297	0	X		1	4000	SILK 1	196.5	250.0	1000	68925	53850	3090	41462	32393	1859	0:52
F	18-08-22 01:30	6299	0	X		18	4000	SILK 1	196.5	250.0	1476	908605	972493	-17908	546565	584997	-10773	13:10
F	18-08-22 14:40	6300	0	X		1	4000	SILK 1	241.0	300.0	1000	60649	51865	3713	29746	25438	1821	0:34
F	18-08-22 15:15	6301	0	X		23	4000	SILK 1	241.0	300.0	1477	1297479	1196852	81649	636375	587020	40047	14:35
F	19-08-22 05:51	6303	0	X		11	9000	GLOSS 1	197.0	250.0	1477	627058	627307	52302	376245	376395	31382	8:32
F	19-08-22 14:22	6302	0	X		1	9000	GLOSS 1	149.0	200.0	1250	43306	57474	-74	34355	45595	-59	0:50
F	19-08-22 15:12	6306	0	X	P	5	9000	GLOSS 1	149.0	200.0	1467	299179	287392	5794	237342	227991	4596	4:13
F	19-08-22 19:26	6304	0	L		2	9000	GLOSS 1	121.5	170.0	1250	83452	112725	-6463	81188	109666	-6287	1:55
F	19-08-22 21:21	6305	0	P	P	9	9000	GLOSS 1	121.5	170.0	1445	529923	507110	11546	515545	493350	11233	8:43

Anhang XX: Auslegungsberechnung zum Verdampfer für die direkte Dampferzeugung von Kelvion vom 28.09.2022

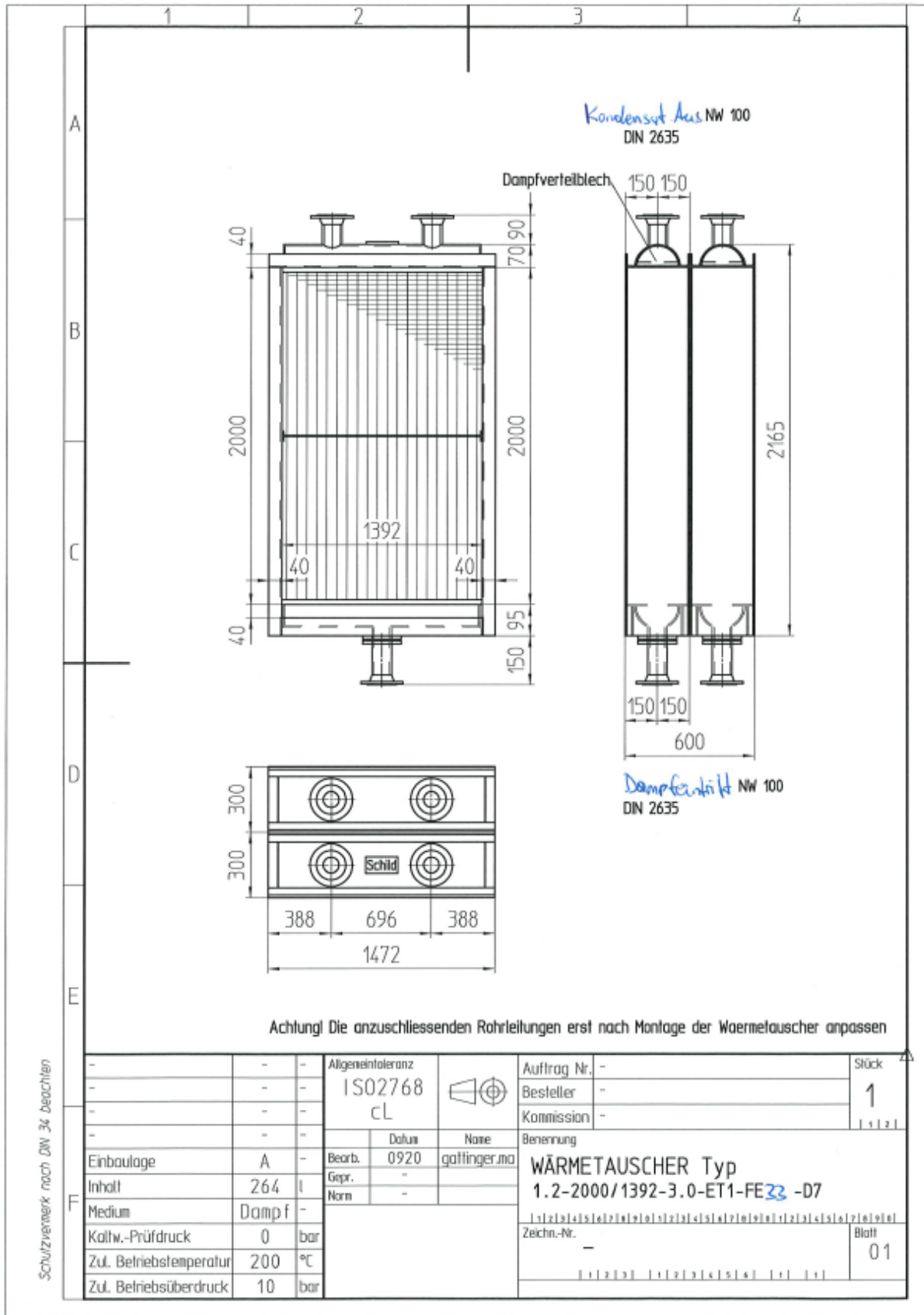
KELVION
 WÄRMEÜBERTRÄGERELEMENTBAUWEISE
 FOLGENDES ANGEBOT UMFASST UNSERE SERIENMAESS. AUSFÜHRUNG
 OHNE JEGLICHES NICHT GESONDERT AUFGEFÜHRTES ZUBEHÖR

KUNDE: PROJEKT-NR.: POS.: Verdampfer

BETRIEBSDATEN	KUEHLER	DIMENSION	UM DIE ROHRE	DURCH DIE ROHRE	H2O-DAMPF
1 MEDIUM	-->		LUFT		
2 VOLUMEN-STROM	M3/H		25000		542.8
3 BEZUGS-TEMP./DRUCK (VOLUMEN)	GRD C / BAR		.0 / 1.013		141.8 / 3.800
4 MASEN-STROM	KG/H		29949		1119.3
5 TEMPERATUR	EIN / AUS		GRD C	220.00 / 150.00	141.78 / 141.78
6 ENTHALPIE	EIN / AUS		KJ/KG	663.69 / 571.81	VERDAMPFUNG
7 DAMPFGEHALT	EIN / AUS		G/KG	150.00 / 150.00	
8					
9					
10 BAROMETERSTAND / HOEHE UEBER NN	HPA (MBAR) / M			1013.25 /	0.
11 BETRIEBS-DRUCK (ABS.)	BAR			1.013	3.800
12 DRUCK-ABFALL	N/M2 (PA)			324.5	
13 WÄRME-LEISTUNG	KW=KJ/H=KCAL/H			664.7 =	2392798 = 571510
14 WT BESTEHT AUS ELEMENT-TYPE(N)			1.2 - 2000/1392 - 3.0 - ET 1 - FE33		- D7
15 MATERIAL (WT-FLAECHE)/VERBINDUNG			STAHLL ; RIPPEN:	STAHLL / VERZINKT	
16					
17 BAU-TIEFE(D) / ANSCHL. JE ELEM.			600 MM / EIN: 2*DN 100		AUS: 2*DN 100
18 KONSTRUKT.-(UEBER)-DRUCK/TEMP.			10.0 BAR /		200 GRD C
19 GEWICHT / INHALT / ABNAHME			1903 KG /		264 L / WC7WWERK
20 PREIS D. WT - ELEMENTE(S)					
25 NOTIZEN:					

Doppelbündel
Heizfläche: 480m²
Reserve: 8%
Rippenteilung: 3mm
komplett in C-Stahl
Anstrichquerschnitt
2000 x 1392 mm

KELVION GMBH - DATUM/NAME/TEL.: 29- 9-2022



Achtung! Die anzuschliessenden Rohrleitungen erst nach Montage der Waermetauscher anpassen

Schutzvermerk nach DIN 34 beachten

-	-	-	Allgemeintoleranz	ISO 2768 cL		Auftrag Nr.	-	Stück 1
-	-	-	Datum			0920	Name	
-	-	-	Bearb.	-	-	Kommission	-	Benennung WÄRMETAUSCHER Typ 1.2-2000/1392-3.0-ET1-FE33 -D7
Einbaulage	A	-	Gepr.	-	-	Zeichn.-Nr.	-	
Inhalt	264	l	Norm	-	-	1 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100		
Medium	Dampf	-						
Kaltw.-Prüfdruck	0	bar						
Zul. Betriebstemperatur	200	°C						
Zul. Betriebsüberdruck	10	bar						

Anhang XXI: Auslegungsberechnung zum Wärmetauscher für die indirekte Dampferzeugung von Kelvion vom 28.09.2022

WÄRMEÜBERTRÄGERELEMENTBAUWEISE
 FOLGENDES ANGEBOT UMFASST UNSERE SERIENMASS. AUSFÜHRUNG
 OHNE JEGLICHES NICHT GESONDERT AUFGEFÜHRTES ZUBEHÖR

PROJEKT-NR.: .
 POS.: Luft/Wasser Wärmetauscher
4-fach Register
Heizfläche: 332,5m²
Reserve: 5%

KUNDE:	PROJEKT-NR.:	DIMENSION	UM DIE ROHRE	DURCH DIE ROHRE	WASSER
1 MEDIUM	I	I	I LUFT	I	I WASSER
2 VOLUMEN-STROM	I	I M ³ /H	I 100000	I	I 58.6
3 BEZUGS-TEMP./DRUCK (VOLUMEN)	I	I GRD C / BAR	I 0. / 1.013	I	I 95.0/ 6.000
4 MASEN-STROM	I	I KG/H	I 119798	I	I 56371.4
5 TEMPERATUR	I	I GRD C	I 150.00/ 80.00	I	I 75.00/115.00
6 ENTHALPIE	I	I KJ/KG	I 570.31/479.13	I	I
7 DAMPFGEHALT	I	I G/KG	I 150.00/150.00	I	I
8	I	I	I	I	I
9	I	I	I	I	I
10 BAROMETERSTAND / HOEHE ÜBER NN	I	I HPA (MBAR) / M	I 1013.25 /	I	I 0.
11 BETRIEBS-DRUCK (ABS.)	I	I BAR	I 1.013	I	I 16.000
12 DRUCK-ABFALL	I	I N/M2 (PA)	I 574.3	I	I 48953.9
13 WÄRME-LEISTUNG	I	I KW=KJ/H=KCAL/H	I 2638.4	I	I 9498271 = 2268623
14 WT BESTeht AUS ELEMENT-TYPE(N)	I	I 1.4 - 4000/2405 - 3.0 - ET 4 - FE33	I	I	I - D7
15 MATERIAL (WT-FLÄCHE) / VERBINDUNG	I	I ROHRE:	I STAHL ; RIPPEN:	I STAHL / VERZINKT	I
16	I	I	I	I	I
17 BAU-TIEFE (D) / ANSCHL. JE ELEM.	I	I 1200 MM / EIN: 1*DN 100; AUS: 1*DN 100	I	I	I
18 KONSTRUKT. - (UEBER) - DRUCK/TEMP.	I	I 10.0 BAR / 160 GRD C	I	I	I
19 GEWICHT / INHALT / ABNAHME	I	I 11415 KG / 1525 L / WC7WNERK	I	I	I
20 PREIS D. WT - ELEMENTE (S)	I	I	I	I	I
25 NOTIZEN:	I	I	I	I	I
6	I	I	I	I	I

Rippenabteilung: 3mm
komplett in C-Stahl

Anströmquerschnitt
4000 x 2405mm

- DATUM/NAME/TEL.: 28-9-2022

KELVION GMBH

