

# Energieaudits für betriebliche Abwärmenutzung

Ein Leitfaden

Wien, 2022

## **Impressum**

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Autoren: Mag. DI Konstantin Kulterer, Oskar Mair am Tinkhof, MSc, Österreichische Energieagentur

Review: DI Jürgen Fluch, AEE Intec, DI Dr. Veronika Wilk, Austrian Institute of Technology GmbH

Wien, Jänner 2022

### **Copyright und Haftung:**

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet, alle sonstigen Rechte sind ohne schriftliche Zustimmung des Medieninhabers unzulässig.

Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung des BMK und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Rechtausführungen stellen die unverbindliche Meinung der Autorin/des Autors dar und können der Rechtsprechung der unabhängigen Gerichte keinesfalls vorgreifen.

Rückmeldungen: Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an [eebetriebe@energyagency.at](mailto:eebetriebe@energyagency.at)

## Inhalt

<b>1 Leitfaden und Ablauf eines Energieaudits nach EN 16247.....</b>	<b>7</b>
1.1 Ablauf eines Energieaudits nach ÖNORM EN 16247.....	8
1.2 Allgemeine Anforderungen an das Energieaudit.....	11
1.2.1 Vertrauliche Ergebnisse, objektive Beratung .....	11
1.2.2 Eine Ansprechperson im Unternehmen .....	11
1.2.3 Bewertung der bereitgestellten Information .....	11
1.2.4 Vorauswahl bei komplexen Einheiten .....	11
1.2.5 Ableitung von Leistungskennzahlen .....	12
1.2.6 Beachtung von Betriebsgrößen und Einflussfaktoren.....	12
1.2.7 Erhebung zusätzlicher Dokumente.....	12
<b>2 Prozessauswahl und Datenerhebung.....</b>	<b>13</b>
2.1 Schritt 1: Identifikation von Prozessen als Abwärmeequellen und -senken.....	14
2.2 Schritt 2: Bilanzierung.....	15
2.2.1 Kälte- und wärmeverbrauchende Prozesse.....	15
2.3 Schritt 3: Prozessauswahl zur näheren Betrachtung.....	16
2.4 Schritt 4: Datenaufnahme der ausgewählten Prozesse .....	18
2.5 Schritt 5: Berechnung beziehungsweise Messung der relevanten Daten.....	20
<b>3 Messung.....</b>	<b>22</b>
3.1 Temperaturmessungen für alle Medien.....	23
3.1.1 Arten von Temperaturmessung.....	24
3.2 Durchflussmessung von Flüssigkeiten .....	25
3.3 Volumenstrommessung von gasförmigen Medien .....	26
<b>4 Vermeidung und Minimierung der Abwärmeströme .....</b>	<b>27</b>
<b>5 Optimierung des Wärmetauschers und Wärmetauscher-Netzwerkes.....</b>	<b>29</b>
5.1 Analyse der Temperaturen und Nutzung der Wärmetauscher.....	29
5.1.1 Temperaturen- und Massenstrom-Check.....	30
5.1.2 Nutzungs-Check .....	32
5.2 Analyse des Gesamtsystems.....	32
<b>6 Nutzung betrieblicher Abwärme.....</b>	<b>35</b>
6.1 Grobanalyse .....	35
6.1.1 Qualitative Bewertung.....	36
6.1.2 Quantitative Bewertung .....	37
6.1.3 Zeitliche Bewertung .....	38
6.1.4 Exkurs Stromerzeugung .....	38

6.1.5	Einschränkungen zur Kombination von Energieströmen .....	39
6.2	Analyse mit der Pinch-Methode .....	39
6.2.1	Einführung in die Pinch-Methode.....	39
6.2.2	Verbundkurven (auch Composite Curves).....	40
6.2.3	Aussage der Verbundkurven.....	44
6.2.4	Gesamtverbundkurve .....	45
6.3	Auswahl der Abwärmenutzungsmöglichkeit mit dem klimaaktiv Pinch-Tool.....	48
6.4	Wirtschaftlichkeitsrechnung.....	50
6.4.1	Kostenvergleichsrechnung.....	50
6.4.2	Return on Investment.....	51
6.4.3	Dynamische Wirtschaftlichkeitsrechnung .....	51
6.5	Monitoring .....	53
<b>7</b>	<b>Technologien zur Nutzung von Abwärmeströmen .....</b>	<b>54</b>
7.1	Wärmetauscher .....	54
7.1.1	Physikalische Grundlagen .....	54
7.1.2	Arten von Wärmetauschern .....	60
7.1.3	Auswahl / Dimensionierung von Wärmetauschern.....	67
7.1.4	Investitionskosten.....	71
7.1.5	Informationen für Analyse.....	71
7.2	Warmwasserspeicher .....	73
7.2.1	Physikalische Grundlagen .....	73
7.2.2	Arten .....	73
7.2.3	Auswahl und Dimensionierung.....	74
7.2.4	Dämmung.....	75
7.2.5	Kostenbewertung.....	75
7.2.6	Informationen aus Analyse .....	76
7.3	Wärmepumpen.....	77
7.3.1	Anwendungsgebiete industrieller Wärmepumpen .....	78
7.3.2	Überblick Arten von industriellen Wärmepumpen .....	81
7.3.3	Kompressionswärmepumpen.....	82
7.3.4	Brüdenverdichter .....	92
7.3.5	Absorptionswärmepumpe (Typ I).....	100
7.3.6	Absorptionswärmeübertrager (Type II).....	101
<b>8</b>	<b>Wärmetauscherkosten .....</b>	<b>102</b>
<b>9</b>	<b>Angebote und Tools .....</b>	<b>109</b>
9.1	Energiemanagement und Benchmarking .....	109

<b>10</b>	<b>Über klimaaktiv.....</b>	<b>111</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>112</b>
	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>115</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>116</b>



# 1 Leitfaden und Ablauf eines Energieaudits nach EN 16247

In Österreich werden zwei Drittel der eingesetzten Energie in der Sachgüterproduktion für Wärmeanwendungen benötigt. Bei vielen Prozessen zur Wärmeumwandlung bleiben große Mengen an Abwärme ungenutzt. Beispiele dafür sind Schmelzen, Backen, Destillieren, Eindampfen, Waschen und Reinigen, Trocknen. Auch bei der Druckluft- und Kälteerzeugung entsteht nutzbare Wärme.

Bis zu 70 % der eingesetzten Wärme gehen über Abluft oder Abwasser verloren. Diese Wärme kann aber in einem Wärmerückgewinnungssystem wiedergewonnen werden.

Dieser Leitfaden soll Energieauditor:innen, Energieberater:innen und Energiemanager:innen helfen, Abwärmeströme detaillierter zu untersuchen und das Optimierungspotenzial abzuschätzen.

Der Schwerpunkt des Leitfadens ist die Untersuchung und Bewertung von verschiedenen Abwärmeströmen und deren mögliche Nutzung.

Nach Informationen zur Prozessauswahl und Datenerhebung wird eine strukturierte Vorgangsweise zur Identifikation von Prozessen als Abwärmequellen und -senken (also von Prozessen mit Wärmeüberschuss und Wärmebedarf) und der groben Bilanzierung bis zur detaillierten Datenaufnahme gegeben.

Auf Basis dieser Daten folgt dann die Datenanalyse. Folgende Maßnahmen zur Optimierung des Wärmbedarfs in Unternehmen mit dem Schwerpunkt Abwärmenutzung sind zu analysieren:

- Vermeidung beziehungsweise Minimierung der Abwärmeströme
- Optimierung bestehender Wärmetauscher und des Wärmetauscher-Netzwerkes (dieser Schritt sollte jedenfalls bei Durchführung von Abwärmeanalysen durchgeführt werden).
- Zur eigentlichen Nutzung betrieblicher Abwärme wird zunächst eine Grobanalyse, die unter anderem qualitative, quantitative und zeitliche Kriterien berücksichtigt, vorgeschlagen. Zusätzlich oder alternativ soll bei diesem Schritt die Pinch-Analyse beziehungsweise das klimaaktiv Pinch-Tool eingesetzt werden.
- Zu folgenden technologischen Möglichkeiten zur Nutzung nicht vermeidbarer Abwärmeströme werden Informationen angeführt.
- Wärmerückgewinnung über Wärmetauscher
- Nutzung von Speichern
- Wärmerückgewinnung über Wärmepumpen
- Wärmerückgewinnung aus Druckluft-, Kälte-, Dampf-, und Ventilatorsystemen werden in den entsprechenden Leitfäden berücksichtigt. Einspeisung von Abwärme in Nah- und Fernwärmenetze ist kein Schwerpunkt dieses Leitfadens.

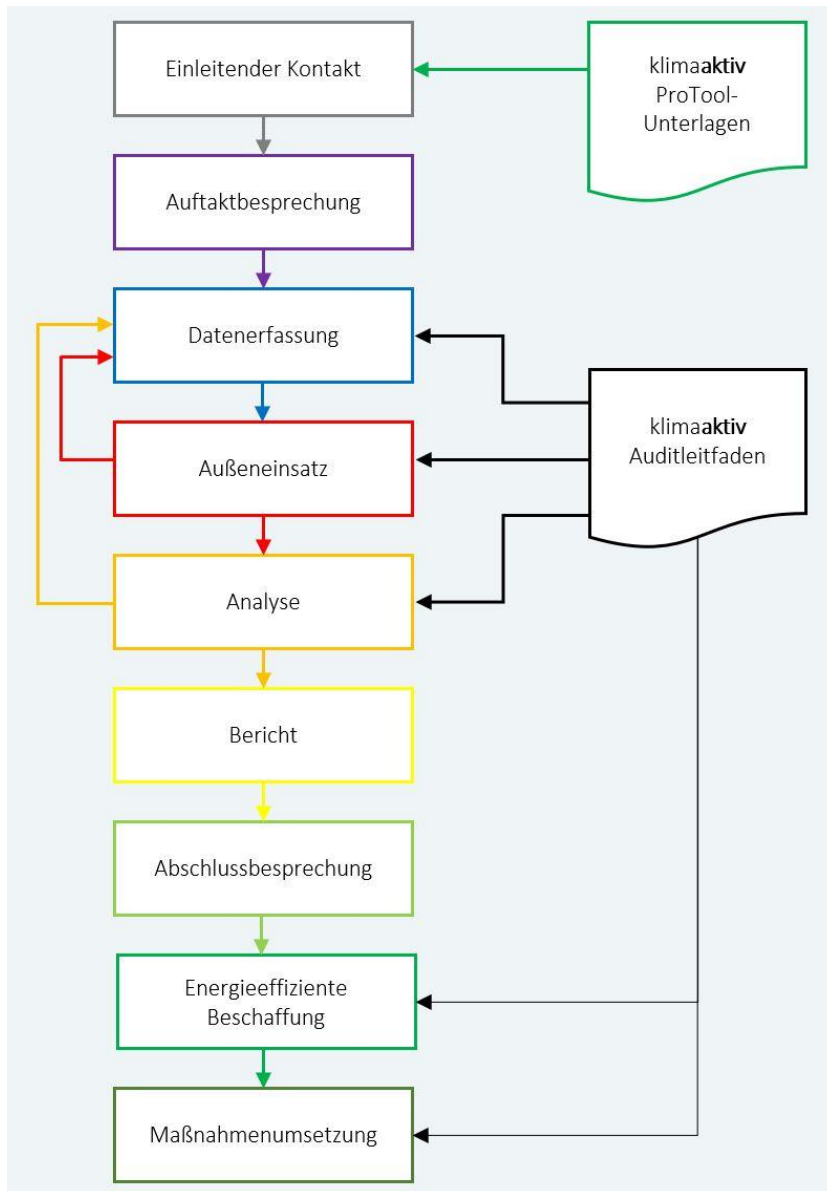
Der Leitfaden ist eine Hilfestellung für die Durchführung eines Energieaudits für betriebliche Abwärmenutzung. Wird ein Energieaudit nach der ÖNORM EN 16247 Teil 1 und Teil 3 durchgeführt, sind weitere Aspekte zu beachten. Der Ablauf eines solchen Audits ist im folgenden Abschnitt beschrieben.

## **1.1 Ablauf eines Energieaudits nach ÖNORM EN 16247**

Bezüglich des Ablaufs eines Energieaudits wird auf die ÖNORM EN 16247-1 2012 verwiesen. Die Norm versteht unter einem Energieaudit die „systematische Inspektion und Analyse des Energieeinsatzes und des Energieverbrauchs eines Systems oder einer Organisation mit dem Ziel, Energieflüsse und das Potential für Energieeffizienzverbesserungen zu identifizieren und diese zu berichten“ (Quelle: ÖNORM EN 16247-1 2012).



Abbildung 1: Ablauf eines Energieaudits



Quelle: Adaptiert aus ÖNORM EN 16247-1, 2012), Darstellung: Österreichische Energieagentur

Die konkreten Tätigkeiten und Inhalte der in Abbildung 2 dargestellten Schritte sind in der Norm nachzulesen.

Zusammenfassend dargestellt beginnt der prinzipielle Ablauf eines Energieaudits mit einem einleitenden Kontakt, in dem man sich mit dem Unternehmen hinsichtlich Zielen, Erfordernissen und Erwartungen an das Energieaudit einigt.

Danach sind in einer **Auftaktbesprechung** alle interessierten Kreise über die festgelegten Ziele, den Anwendungsbereich, die Grenzen und die Tiefe des Energieaudits zu informieren. Diese beiden Schritte werden von klimaaktiv durch ein standardisiertes Anschreiben an die Unternehmen und den Einsatz des klimaaktiv Audittools „Protocol“ unterstützt.

Gemeinsam mit dem Unternehmen (beziehungsweise einer vom Unternehmen zu Verfügung gestellten Ansprechperson) sind dann anschließend alle **relevanten Daten zu erfassen** und die zu prüfenden Objekte vor Ort zu inspizieren. In einem nächsten Schritt sind die gesammelten **Daten und Informationen zu analysieren**, um die Energieeinsparmöglichkeiten identifizieren zu können. Bei diesen Schritten können die von klimaaktiv entwickelten Auditleitfäden als Hilfestellung herangezogen werden ([klimaaktiv.at/eebetriebe](http://klimaaktiv.at/eebetriebe)).

Die Ergebnisse des Energieaudits sind abschließend zu dokumentieren und dem Unternehmen vorzulegen. Hierfür wurde von klimaaktiv eine **Berichtsvorlage** erstellt, die den Vorgaben und Anforderungen der ÖNORM EN 16247-1 im Wesentlichen entspricht ([klimaaktiv.at/eebetriebe](http://klimaaktiv.at/eebetriebe)).

Für die Durchführung von Energieaudits in Betrieben mit dem Fokus Abwärmenutzung finden sich in dem vorliegenden Dokument zusätzliche Anleitungen und Hilfestellungen. Weitere allgemeine Informationen zur Durchführung von Energieaudits finden sich in der ÖNORM EN 16247-1. Spezielle Anforderungen an das Energieaudit in Gebäuden, an Industriestandorten und in Transportsystemen werden in den Normen ÖNORM EN 16247 Teil 2, Teil 3 und Teil 4 beschrieben.

Hinsichtlich der Qualifikation der Energieauditor:innen gilt: diese müssen angemessen qualifiziert sein, alle von der Organisation gelieferten Informationen **vertraulich** behandeln und auf **objektive Art und Weise** handeln. Konkrete Anforderungen an die Qualifizierung von Energieauditor:innen werden im fünften Teil der Energieauditnorm „Qualifikation von Energieauditoren“ behandelt. Außerdem sind im Bundesenergieeffizienzgesetz allgemeine Vorgaben enthalten.

## 1.2 Allgemeine Anforderungen an das Energieaudit

Aus der bisherigen Erfahrung hat sich gezeigt, dass insbesondere folgende Vorgaben aus der ÖNORM EN 16247 zu beachten sind:

### 1.2.1 Vertrauliche Ergebnisse, objektive Beratung

Die durch das Audit erhaltenen Ergebnisse müssen vertraulich behandelt werden. Die Energieauditor:innen muss das Unternehmen **objektiv beraten** und die erzielten Ergebnisse transparent darstellen.

### 1.2.2 Eine Ansprechperson im Unternehmen

Das betroffene Unternehmen muss eine **Ansprechperson** nominieren, die mit der Energieauditorin oder dem Energieauditor zusammenarbeitet, dafür Sorge trägt, dass alle angeforderten Daten zu Verfügung stehen bzw. bei der Erhebung der Daten (auch vor Ort) unterstützt.

### 1.2.3 Bewertung der bereitgestellten Information

Die Energieauditor:innen müssen bewerten, ob die vom Unternehmen **bereitgestellten** Informationen ausreichen, um die vereinbarten Zielsetzungen zu erreichen. Ist dies nicht der Fall, stellt dies ein Abbruchkriterium des Energieaudits dar beziehungsweise ist der Schwerpunkt auf die Datenerfassung (auch über längeren Zeitraum als Energiedatenerfassung) zu legen.

### 1.2.4 Vorauswahl bei komplexen Einheiten

Bei einer entsprechenden Größe des Unternehmens und der damit verbundenen hohen Anzahl an zu untersuchenden Einheiten ist eine **Vorauswahl** zu treffen beziehungsweise der Umfang des Energieaudits genau festzulegen. Um ein strukturiertes Vorgehen zu gewährleisten, sollten zuallererst Maßnahmen dort gesetzt werden, wo die höchsten energetischen Einsparungen erzielt werden können (unter Berücksichtigung der damit verbundenen Kosten).

### 1.2.5 Ableitung von Leistungskennzahlen

Für die Darstellung der Energieeffizienz im Unternehmen sind **quantifizierbare Parameter**, die einen **Einfluss auf den Energieverbrauch** des Unternehmens beziehungsweise der mit den einzelnen Technologien versorgten **Prozesse** haben, zu berücksichtigen. Das können z. B. Durchsatz in der Produktion, weitere Input-, Outputfaktoren, Betriebszeiten der Maschinen, Arbeitszeit, Helligkeit, Innentemperatur, Wetterbedingungen und so weiter sein (der Begriff in der Norm ist dafür „Anpassungsfaktor“). Es obliegt der Verantwortung der Energieauditor:innen diese in Absprache mit dem Unternehmen festzulegen. Nach der Berücksichtigung aller auf den Energieverbrauch Einfluss nehmenden Faktoren ist daraus eine **Leistungskennzahl** zu wählen, mit der die Energieintensität des Unternehmens, eines Systems oder Prozesses abgebildet werden kann. Unter dem Begriff Energieeffizienz ist das Verhältnis zwischen einer erzielten Leistung beziehungsweise Ertrag an Dienstleistung, Gütern oder Energie und der eingesetzten Energie zu verstehen. Beispiele für Leistungskennzahlen sind: kWh/Durchsatz in Produktion, kWh/m<sup>2</sup>, kWh/Mitarbeiter, kWh/Dienstleistung et cetera.

### 1.2.6 Beachtung von Betriebsgrößen und Einflussfaktoren

Prinzipiell sind **Messungen von benötigten Betriebsgrößen** (z. B. Energieverbrauch, Leistungsbedarf, Volumenstrom, Druck, Betriebszeit etc.) immer Hochrechnungen oder Abschätzungen dieser Größen vorzuziehen.

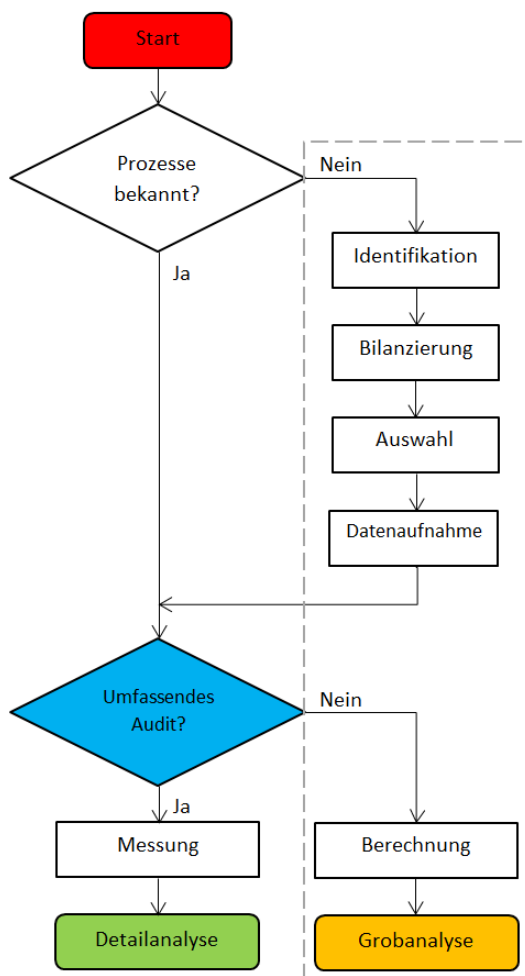
### 1.2.7 Erhebung zusätzlicher Dokumente

Neben dem Energieverbrauch sind gegebenenfalls auch relevante bereits durchgeführte Messungen, **Betriebs- und Wartungsdokumente**, **Nutzerverhalten** und relevante Wirtschaftsdaten, wie z. B. den derzeitigen Verrechnungstarif zu erheben.

## 2 Prozessauswahl und Datenerhebung

In dem folgenden Kapitel sind die wesentlichen Informationen zur Identifikation, Bilanzierung und Auswahl der Prozesse, sowie zur Datenaufnahme und Berechnung der wesentlichen Parameter beschrieben. Diese Schritte sind immer dann erforderlich, wenn die Prozesse im Unternehmen nicht bekannt sind beziehungsweise nur eine Grobanalyse durchgeführt wird (vergleiche Abbildung 2).

Abbildung 2: Vorgehensweise bei der Prozessauswahl beziehungsweise bei der Durchführung einer Detail- beziehungsweise Grobanalyse



Quelle: Österreichische Energieagentur

## 2.1 Schritt 1: Identifikation von Prozessen als Abwärmequellen und -senken

Zunächst ist abzuklären, ob das Energieaudit sämtliche Abwärmeströme eines Unternehmens beinhalten soll oder nur vom Unternehmen oder von der Auditorin oder dem Auditor ausgewählte Abwärmeströme untersucht werden sollen.

Bezieht sich das Energieaudit auf einen ausgewählten Abwärmestrom und sind die wesentlichen Parameter der Abwärmequelle und Abwärmesenke bekannt, wird auf das Kapitel 3 - Messung - verwiesen.

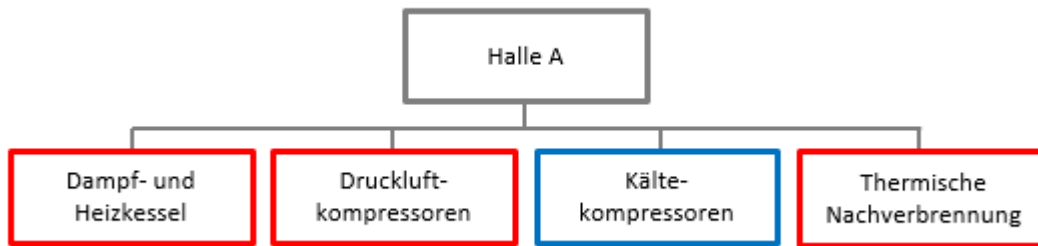
Sind die wesentlichen Prozesse mit Wärmebedarf oder anfallender Abwärme im Unternehmen nicht bekannt, wird grundsätzlich empfohlen, sich einen Überblick über das Energiesystem und die betroffenen Prozesse zu verschaffen.

Dazu ist eine Tabelle oder ein Flow-Chart mit den wichtigsten Prozessen mit Wärme- und Kältebedarf sowie mit anfallenden Abwärmeströmen aus Prozessen und Anlagen zu erstellen. Dabei sind sowohl branchenspezifische und sogenannte Querschnittstechnologien zu erheben. Zu diesen gehören Anlagen zur Kälte- und Wärmeversorgung, Lüftungsanlagen sowie Druckluftkompressoren, da diese mögliche Abwärmequellen darstellen.

Beispiele für branchenspezifische Prozesse

- Trocknung
- Reinigung
- Waschen
- Kochen
- Pasteurisieren
- Sterilisieren
- Färben
- Destillieren
- Extrahieren
- Eindampfen
- Bleichen
- Wärmebehandlung
- Schmelzen

Abbildung 3: Beispiele für Querschnittstechnologien



Legende: Rot: Wärme, Blau: Kälte

## 2.2 Schritt 2: Bilanzierung

### 2.2.1 Kälte- und wärmeverbrauchende Prozesse

In einem nächsten Schritt soll eine grobe Energiebilanz erstellt werden, um zu prüfen, welche Prozesse die wesentlichen Wärme- und Kälteverbraucher im Betrieb sind. Dies soll zunächst für die verschiedenen Energieträger getrennt erfolgen. Dazu ist es sinnvoll vor der detaillierten Analyse zunächst eine etwas gröbere Darstellung zu wählen.

Folgende Daten sind für diesen Schritt notwendig (siehe Tabelle 1):

- Leistung
- Auslastung
- Betriebszeit

#### 2.2.1.1 Leistung

Generell werden Energieversorgungsanlagen beziehungsweise Wärmeübertrager so ausgelegt, dass sie die Energiebereitstellung in unterschiedlichen Betriebszuständen über definierte Zeitintervalle sicherstellen können. Das hat zur Folge, dass sie zu gewissen Zeiten nicht in Vollast betrieben werden.

In einer ersten Annäherung ist zunächst die thermische Leistung des Prozesses, der Maschine oder des Wärmetauschers zu erheben. Diese kann dem Typenschild oder der Herstellerinformation entnommen werden. Zur Bilanzierung sind unterschiedliche

Leistungsangaben oder weitere Herstellerangaben wie z.B. Dampfverbrauch pro Stunde in eine einheitliche Einheit umzurechnen. Oft verwendet wird die Einheit [kW].

Ein weiterer wichtiger Parameter ist die **Auslastung**: Viele Maschinen arbeiten tatsächlich mit einer geringeren Auslastung als ursprünglich geplant. Hier ist bei der Begehung festzustellen, welche maximale Kapazität (Leistung) die Maschine hat und welche Kapazität derzeit benötigt wird. Hilfreich sind dabei Listen beziehungsweise die Einschätzung des Maschinenführers, elektronische Steuerungen oder Produktionsaufzeichnungen. Oft erfolgen solche Aufzeichnungen auch in Produktions- oder Einsatzmenge oder Stück pro Stunde/Schicht/Tag, dies ist am besten vor Ort auch in [kg] zu erheben.

Die **Betriebszeit** kann meist über die Einschaltdauer – Ein- und Ausschaltzeit pro 24 h – erhoben werden. Weiters ist die Anzahl der Tage pro Jahr zu erheben, an denen die Anlage eingeschaltet ist.

Im Anhang „Mustervorlagen für Audits zur Abwärmenutzung finden Sie unter Punkt 1.1 eine Excel-Vorlage, in die Sie die notwendigen Daten zur Bilanzierung der Prozesse nach Energieversorgungssystem getrennt eintragen können.

Für die weitere Betrachtung sind aber auch **Abwärmeströme aus den Querschnittstechnologien und Kälte- und Wärmeversorgungsprozessen** zu erheben und zu bewerten. Dazu sind insbesondere die verfügbaren Leistungen, Temperaturniveaus und Betriebszeiten abzuschätzen. Für Details zu Abwärmenutzung aus Druckluft-, Kälte-, Ventilator- und Dampfsystemen siehe klimaaktiv Druckluft -, Kälte-, Ventilator- und Dampfsysteme Leitfadens.

### 2.3 Schritt 3: Prozessauswahl zur näheren Betrachtung

Die Relevanz für die weitere Betrachtung müssen die Energieauditor:innen gemeinsam mit dem Unternehmen bewerten.

Mögliche Kriterien für die weitere Betrachtung der Prozesse:

- Größenordnung des Energieverbrauchs des Prozesses
- Temperaturniveau der zu- und abströmenden Medien



- Art der Medien (Feststoffe eignen sich meist wenig für Wärmerückgewinnung)
- Betriebszeiten
- Inhaltsstoffe (Verunreinigungen wie z. B. Feststoffe, Flusen sind bei der Auslegung zu beachten)

Hier folgen Beispiele für Prozesse, bei denen erfahrungsgemäß häufig nutzbare Abwärme anfällt beziehungsweise Abwärme genutzt werden kann.

Abwärmequellen in Industrieprozessen:

- Wärme in Abgasen von Industrie-, Backöfen und weiteren Verbrennungsprozessen
- Prozessabluft
- Abluft aus Trocknungsanlagen
- Brühdampf aus Destillations- und Verdampfungsanlagen
- Wärme in gasförmigen und flüssigen Strömen aus Prozessen (z. B. Abwasser)
- Konvektions- und Strahlungswärme von heißen Oberflächen von Maschinen und Anlagen
- Wärmeverluste über (warmes) Kühlwasser oder Schmiermittel
- Wärme in Produkten aus Prozessen
- Kühlen von hydraulischen Systemen

Abwärmequellen in Hilfsprozessen:

- Thermische Nachverbrennung
- Wärme von Druckluftkompressoren
- Wärme aus Kälteanlagen
- Wärme aus Lüftungsanlagen (Abluft)
- Dampfkessel-Abschlammung
- Kondensatrücklauf
- Abluft Dampfkessel, Heizkessel

Nachstehend sind sogenannte Senken, also Prozesse genannt, die Abwärme nutzen können. Hier ist wichtig zu beachten, dass nach der Vermeidung der Abwärme, die unmittelbare Nutzung im selben Prozess Vorrang vor allen weiteren Möglichkeiten der Abwärmenutzung hat. Der Grund liegt in der zeitlichen und räumlichen Übereinstimmung von verfügbarer Abwärme zum Wärmebedarf.

Senken – Prozesse, die die Abwärme nutzen können:

- Beheizung, Vorheizung industrieller Prozesse
- Vorwärmen von Brenngasen für Öfen, Heizkessel
- Beheizung von Gebäuden
- Warmwasseraufbereitung, inklusive Vorwärmen des Wassers für den Kessel
- Trocknung
- Stromerzeugung

## 2.4 Schritt 4: Datenaufnahme der ausgewählten Prozesse

Nach dem vorhergehenden Schritt, wo nach bestimmten Kriterien bestimmte Prozesse zur genauen Analyse ausgewählt wurden, folgt nun die detailliertere Erhebung dieser Prozesse. Dazu sind folgende Parameter zu erfassen.

- Medium
- Temperaturen beim Ein- und Ausgang
- Massenstromdichte beziehungsweise Volumenstromdichte
- Spezifische Wärmekapazität
- Leistung
- Auslastung
- Prozessart (Batch versus kontinuierlicher Prozess)
- Betriebszeit
- Derzeitige Versorgungstemperatur und -art (Dampf, Warmwasser)
- Druck
- Kritische Stoffe
- Örtliche Gegebenheit
- Derzeitige Nutzung der Abwärme
- Vorhandene Speicher

**Medien:** Für jeden Prozess ist zu prüfen, welches Medium beziehungsweise welche Medien für den Prozess benötigt werden, welche Medien austreten und welche Temperatur- und Druckniveaus herrschen und ob gegebenenfalls kritische Stoffe enthalten sind.

Hier sind zunächst die Massenströme pro Stunde [kg/h] abzuschätzen (oft über Tageswerte zu errechnen). Dies erfolgt in den allermeisten Fällen über eine Volumstrommessung (siehe dazu klima**aktiv** Messleitfaden II). In weiterer Folge sollte dieser Wert auch für eine Jahresbetriebsdauer ermittelt werden.

Für die Medien sind dabei auch die spezifischen Wärmekapazitäten zu erheben. Das klima**aktiv** Pinch-Tool enthält eine Tabelle mit vielen Wärmekapazitäten.

Relevante Temperaturniveaus:

- Temperatureintritt
- Zieltemperatur - auf welche Temperatur wird gekühlt oder aufgewärmt?
- Mit welcher Temperatur verlässt das Prozessmedium den Prozess oder die Anlage?
- Welche Temperaturen haben die Abluftströme oder die Abwasserströme?
- Gegebenenfalls ist eine Information wichtig, auf welche Temperatur diese Abluftströme oder Abwasserströme abgekühlt werden können. Hier ist insbesondere Kondensation, Frieren und ähnliches gemeint.

Bei diesem Schritt sind auch die Temperaturanforderungen zu hinterfragen beziehungsweise zu achten, dass z. B. aufgrund von zu langer Lagerung nach dem vorgelagerten Prozessschritt Wärmeaustausch mit der Umgebung erfolgt sein kann.

**Druck:** Abwasserdrücke und Abluftdrücke sind zu erheben. Diese werden für die Auslegung von möglichen Wärmetauschsystemen benötigt.

**Leistung:** Die Leistung wurde bereits im ersten Schritt erhoben beziehungsweise unter Prozessschritt Bilanzierung, siehe Anmerkungen oben. Ergänzend soll die derzeitige Beladung der Maschinen (und Gesamtproduktion) erhoben werden.

**Auslastung, derzeitiger Betriebszustand:** Siehe dazu Anmerkungen oben. Für eine detaillierte Analyse ist aber noch folgender Zusammenhang relevant: Manche thermischen Maschinen nehmen unabhängig von ihrer Auslastung relevante thermische Leistung auf beziehungsweise haben ein sehr schlechtes Teillastverhalten. Die Ursache liegt beispielsweise in den Abstrahlungsverlusten, die unabhängig von der Beschickung gleich hoch sein können. Wenn möglich, ist hier das Regelverhalten der Maschine zu erheben und zu prüfen, ob die thermische Leistung und damit der Energieinhalt der Abluft- und Abwasserströme bei geringerer Last tatsächlich niedriger ist.

**Prozessbetriebsart, zeitlicher Verlauf, Betriebszeiten:** Zu den Betriebszeiten siehe Anmerkung oben unter Grobanalyse.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist, ob die Leistung kontinuierlich oder diskontinuierlich in Spitzen abgefragt wird. Die notwendige Leistung kann entweder gemessen oder berechnet werden.

Für die Auslegung von Wärmerückgewinnungsanlagen ist vorrangig die Grundlast ausschlaggebend. Das ist jene Wärmeleistung, die unabhängig von Spitzenlastzeiten zur Verfügung zu stellen ist beziehungsweise bereitgestellt wird.

**Kritische Stoffe:** Kritische Stoffe sind insbesondere Stoffe, die nach Temperaturabsenkung (Kondensation) korrosive Wirkung haben (CO), weiters Stoffe, die die Funktionsfähigkeit des Wärmetauschers beschränken (Flusen).

**Örtliche Gegebenheiten:** Generell ist zur Abwärmenutzung am Ort oder in der Nähe der Abwärmequelle ausreichend Installationsraum für die Komponenten vorzusehen. Lange Transportwege der Trägermedien erhöhen die Energiekosten und verringern die Gewinne aufgrund des Wärmeverlustes. Welche Distanz noch wirtschaftlich ist, hängt vom spezifischen Projekt ab (Bayrisches Landesamt für Umwelt, 2012).

## 2.5 Schritt 5: Berechnung beziehungsweise Messung der relevanten Daten

In Abhängigkeit der Tiefe des Energieaudits sind entweder Berechnungen anzustellen oder Messungen durchzuführen.

Für die Grobanalyse können Energieströme mittels Multiplikation der erhobenen Parameter berechnet werden (z. B. Leistung mal Volllaststunden). Die Energieströme können allerdings auch mit dem klimaaktiv Pinch-Tool automatisch berechnet und weiter analysiert werden.

Abbildung 4: Formel zur Berechnung des Abwärmestroms

$$\dot{Q} = m_1 \cdot c_p \cdot \Delta T$$

$\dot{Q}$ ... Abwärmestrom Leistung in [kJ/s] (Umrechnung in kW=kJ/3.600)

m ... Massenstrom [kg/s]

$c_p$ ... spezifische Wärmekapazität des Abwärmestroms [kJ/kgK]

$\Delta T$ ... Temperaturdifferenz, auf die ein Abwärmestrom abgekühlt werden kann [K]

Für die Detailanalyse sind Messungen vor Ort über einen bestimmten Zeitraum durchzuführen. Dadurch ist es möglich, die Prozesse genauer zu analysieren.

Falls möglich sind Messungen der Berechnung vorzuziehen! Im nächsten Kapitel finden sich deshalb weitere Informationen zum Thema Messung.

# 3 Messung

Energieflüsse können entweder auf der Primärseite der Energiezufuhr oder auf der Sekundärseite (Prozessmedium) gemessen werden. Die Wahl ist üblicherweise von der Verfügbarkeit der möglichen Messpunkte abhängig (Zugang zu den Leitungen, Isolierung, Zustand der Leitungen, Regelung et cetera).

Mögliche Messungen auf der Prozessmedium-Seite („Sekundärseite“):

- Messungen am Prozessmedium (Wasser, Luft, Produktflüsse), das im Prozess erwärmt wird
- Messungen am Frischwasser, das einem Behälter zugeführt wird und kontinuierlich auf einer bestimmten Temperatur gehalten wird (z. B. in Waschanlagen)

Mögliche Messungen auf der Wärmeversorgungsseite („Primärseite“):

- Messungen an der Warmwasserzuleitung und Temperaturmessungen vor und nach dem Wärmetauscher (bei indirekter Energieversorgung)
- Messungen an der Warmwasserzuleitung und der Temperatur des Warmwassers (bei direkter Energieversorgung)
- Messungen an der Dampf- oder Kondensatleitung eines Prozesses (oder mehrerer Prozesse, wenn das Regelschema so gestaltet ist, dass die Messdaten danach den einzelnen Prozessen zugeordnet werden können)
- Messungen am Frischwasser, das in das Dampfsystem eingeleitet wird „zur Bestimmung der Energie, die als Direktampf verwendet wird“ (Schweiger, 2011, Seite 50)

Diese Parameter können in unterschiedlicher Genauigkeit aufgenommen werden. Vorhandene Sub-Zähler und Prozesssteuerungen sind zu berücksichtigen.

Tabelle 1: Überblick über mögliche Methoden zur Abschätzung von relevanten Parametern

Bereiche	Methoden zur Abschätzung, Messvarianten, Messinstrumente
Temperatur	Installierte Messinstrumente Infrarotpistole Thermoelement
Volumenstrom	Maximales Fördervolumen Pumpe Maximaler Förderstrom Ventilator Volumenstrommessung
Betriebszeiten	Betriebszeiten-Aufzeichnungen Regelung der Anlagen überprüfen Tag-, Nacht-, Wochenendabschaltung

### 3.1 Temperaturmessungen für alle Medien

Bei der Beurteilung des Abwärmepotentials in Betrieben ist die Höhe der Temperaturen einer der entscheidenden Faktoren. Eine erste Hilfe bieten dazu installierte Messinstrumente, deren Anzeige ist auf Plausibilität zu prüfen.

Für viele Medien sind Temperaturen im Betrieb bekannt beziehungsweise werden diese zur Prozesssteuerung verwendet. Diese messen zwar meist den Prozess aber nicht Abgas- oder Abwassertemperaturen. Eine Ausnahme bilden Abwassertemperaturen des zentralen Abwasserkanals, da diese Temperaturen meist per Bescheid vorgegeben sind.

Die Messung selbst sollte zu einem Zeitpunkt erfolgen, an dem der entsprechende Prozess oder die Maschine den häufigsten Betriebspunkt erreicht hat. Auch der Ort der Messung ist entscheidend, hier ist beispielsweise bei Abluftkanälen zu prüfen, ob nicht vorher bereits Frischluft zugemischt wurde.

Wenn der Massenfluss in Rohren (Wärmeversorgungsflüsse, Produktströme oder Kälteversorgungsflüsse) bekannt ist, kann die über einige Stunden am Rohr gemessene Vor- und Rücklauftemperatur schon ausreichende Informationen für die Berechnung der Wärme oder Kälte, die über das Rohr zugeführt wird, liefern (Schweiger, 2011, Seite 49).

Mit Infrarotpistolen können an (nicht-isolierten) Behältern und Rohren Messungen durchgeführt werden, die Rückschlüsse auf die Temperaturen während des Betriebs erlauben.

Generell sind Kontaktmessungen mit Thermoelementen an der Behälter- beziehungsweise Rohroberfläche eine sehr gute Möglichkeit Temperaturen zu messen, da viele Fehlerquellen, die bei Infrarotanwendungen auftreten, ausgeblendet sind. Dazu ist gegebenenfalls Dämmmaterial und eventuell Grünspan auf den Rohren zu entfernen. Die Temperaturmessung bei mittleren und hohen Temperaturen ist mit der entsprechenden Sicherheitsausrüstung durchzuführen.

Sollte die Prozesstemperatur schnellen Veränderungen unterworfen sein, so lassen sich Thermoelemente mit Datenschreibern, die die Daten während der Besichtigung speichern, schnell installieren. Auf Basis von Temperaturmessungen an isolierten Behältern oder Rohren können Wärmeverluste berechnet werden. (Schweiger, 2011, Seite 49)

### 3.1.1 Arten von Temperaturmessung

**Widerstandsthermometer (RTD):** Bevorzugt kommen metallische Widerstände zum Einsatz, insbesondere Platin und Nickel, deren Widerstand gut reproduzierbar mit der Temperatur ansteigt. Es ist die am höchsten entwickelte Technologie mit internen Signalen zur Kalibrierung. Resetting ist möglich, die Thermometer haben eine hohe Genauigkeit. Widerstandsthermometer basieren auf dem Messprinzip, dass der elektrische Widerstand eines Leiters oder Halbleiters von der Temperatur abhängt.

**Thermoelemente:** Dazu werden zwei Leiter aus unterschiedlichen Materialien elektrisch miteinander verbunden. Zwischen ihren Enden liegt dabei eine Spannung an, die von der Temperaturdifferenz zwischen den Enden und der Kontaktstelle abhängt. Sie haben einen weiten Temperaturbereich und sind tragbar, benötigen aber Kalibrierung und erzeugen ein schwaches Signal, was beim industriellen Einsatz zu Ungenauigkeiten führen kann.

**Thermistoren** werden für permanente Messungen genutzt. Sie haben niedrige Kosten, automatisches Resetten ist möglich. Thermistoren werden aus Metalloxid-Halbleitermaterial hergestellt, deren Widerstand sich mit der Temperatur ändert und sind in einer Glas- oder Epoxidperle eingeschlossen. ([ni.com/white-paper/7112/de/](http://ni.com/white-paper/7112/de/))



**Infrarot-Thermometer:** Diese messen die Temperaturen über die thermische Strahlung auf Distanz, sind insbesondere zur Identifikation von „hot spots“ und ungenügender Isolierung geeignet, allerdings nicht für gewölbte Oberflächen (also Rohre). Sie sind preisgünstig und praktisch bei Begehungen. Infrarot-Thermometer decken in der Regel einen Bereich von -50 Grad Celsius bis zu mehreren Hundert oder gar Tausend Grad ab. Wichtig ist der einzustellende Korrektor für Emissionsgrade. Meist ist eine Tabelle mit den gängigen Werkstoffen integriert (ab circa 50 EUR).

Tabelle 2: Beispiele für Emissionsgrade von Aluminium

Spezifikation	Temperatur	Spektrum	Emissionsgrad
Blech, 4 Muster unterschiedlich zerkratzt	70 °C	8 µm bis 5 µm	0,03 bis 0,06
Eloxiertes Blech	100 °C	Gesamtspektrum	0,55
Folie	27 °C	3 µm	0,09

**Infrarot-Kameras:** Diese werden meist für Oberflächentemperaturen, z. B. Isolierung von Leitungen genutzt. Dazu muss aber der Emissionsgrad des Materials bekannt sein, für rostfreien Stahl und allgemein für polierte Metalle beziehungsweise Substanzen mit niedrigem Emissionsgrad ist diese Technik nicht geeignet. Kosten: 1.500 EUR- 8.000 EUR

### 3.2 Durchflussmessung von Flüssigkeiten

Zur Durchflussmessung von Flüssigkeiten hat sich für Energieaudits in Österreich die Clap-on Ultraschalldurchflussmessung durchgesetzt:

Dabei wird die Geschwindigkeit eines strömenden Mediums (Gas, Flüssigkeiten) mit Hilfe akustischer Wellen gemessen. Die Messung ist weitgehend unabhängig von den Eigenschaften der Medien: elektrische Leitfähigkeit, Dichte, Temperatur und Viskosität.

Clap-on ist eine Sonderform der Ultraschalldurchflussmessung, bei der die Messinstrumente außen am Rohr angebracht werden und daher keine Eingriffe in das Rohr benötigen. Dabei kann die Menge beziehungsweise die Fließgeschwindigkeit bestimmt werden. In Kombination mit Temperaturmessungen können daraus rasch die Energieflüsse errechnet werden. Kurzfristige Messungen (z. B. über einige Stunden) geben

nur einen Abschnitt der Gesamtproduktion wieder, und zwar besonders dann, wenn die Produktionsabläufe sehr zeitabhängig sind.

Die Einsatzbereiche liegen bei Nennweiten DN 5 bis DN 6000.

Die wesentlichen Vorteile von Clamp-On sind:

- Einsetzbar für alle homogenen Medien in schalldurchlässigen Rohren, auch mit Auskleidung
- Großer Messstofftemperaturbereich  $-40\text{ °C}$  bis  $+170\text{ °C}$
- Ideal für Nachrüstungen da Rohre nicht aufzubohren sind
- Kein Druckverlust im Rohr
- Preisgünstig, insbesondere bei großen Nennweiten

### **3.3 Volumenstrommessung von gasförmigen Medien**

Für Volumenstrommessung (und der Luftgeschwindigkeit) an Lüftungskanälen können Flügelrad-Anemometer eingesetzt werden.

Eine weitere Möglichkeit besteht über die Messung der elektrischen Leistungsaufnahme des Elektromotors. Über diese Leistung kann mithilfe des Datenblattes des Ventilators der geförderte Volumenstrom abgeschätzt werden.

# 4 Vermeidung und Minimierung der Abwärmeströme

Bevor über eine Nutzung der Abwärme- und -Kälteströme nachgedacht wird, sind folgende Möglichkeiten zur Reduktion der Abwärme- und -Kälteströme zu untersuchen.

Prozesssteuerung:

- Prüfung der Regelung (z. B. CO<sub>2</sub> Sensoren zur Belüftung) und Einstellung (Temperatureinstellung für den Prozess)
- Prüfen, ob ineffiziente Betriebspunkte oder Leerläufe vermieden werden
- Prüfen, ob unnötige Aufheiz- oder Abkühlphasen vermieden werden
- Zeitliches Abschalten der Prozesse, falls diese ohne Notwendigkeit in Betrieb sind (Beispiel: Lüftungsanlagen außerhalb der Betriebszeit, Spülvorgänge ohne Produktbeladung)
- Einbau von Sensoren, beispielsweise um die Trocknungsdauer auf die notwendige Dauer zu beschränken
- Reduktion der Belüftungsraten auf das erforderliche Niveau. Dieses kann sich neben Anforderungen des Betriebes aus gesetzlichen und Bescheid-Vorgaben oder aus Arbeitnehmer:innenschutzbestimmungen ergeben.
- Prozess-Steuerung, um neuerliches Abkühlen und Wiederaufwärmen zu vermeiden; Eventuell ist es dazu möglich, Prozesse vom Ende der letzten Schicht auf den Beginn der ersten Schicht zu verlegen, damit über Nacht nicht Wärmeverluste beziehungsweise Wärmeeintrag vor dem nächsten Bearbeitungsschritt auftreten.

#### Temperaturoptimierung:

- Prüfen, ob das derzeit gewählte Temperaturniveau erforderlich ist oder gesenkt werden kann
- Prüfen, ob es möglich ist, Zonen mit unterschiedlichen Temperaturniveaus zu versorgen in Abhängigkeit der Prozessschritte
- Optimierung der Aus- und Einlagerung von Produkten und Beladung und Entladung von Maschinen, um Dauer der Öffnungszeiten beziehungsweise notwendige Wärmezufuhr und Kältezufuhr zu beschränken
- Prüfen, ob Rezirkulation also direkte Nutzung des warmen Austrittsmediums möglich ist

#### Dämmung:

- Zur Reduktion der Abstrahlverluste ist die Dämmung der Maschinen und Anlagen und das Abdecken von offenen Bädern erforderlich.

#### Ersatz der Anlage:

- Ersatz der Maschine durch eine andere mit höherer Effizienz oder geringerer Abstrahlung

# 5 Optimierung des Wärmetauschers und Wärmetauscher-Netzwerkes

Die Optimierung bestehender Wärmetauscher und des bestehenden Wärmetauschernetzwerkes stellt ein wesentliches Element bei der Verbesserung der Abwärmenutzung dar. In vielen Unternehmen sind bereits Wärmetauscher zur Abwärmenutzung installiert, die aber oft nicht optimal genutzt werden. Zur Analyse gibt es mehrere Softwareprogramme, die auch eine umfassende Dateneingabe erfordern. In diesem Kapitel werden zwei unterschiedliche Zugänge zur Optimierung vorgeschlagen:

- Eine Analyse der Temperaturen und der Nutzung bestehender Wärmetauscher zur Beurteilung, ob die Wärmetauscher optimal betrieben wird
- Eine Analyse des Gesamtsystems zur Beurteilung, ob die Wärmetauscher richtig ausgelegt sind beziehungsweise Prozessströme (Wärmequelle und -senke) optimal kombinieren. Dazu ist auch eine Durchführung der Pinch-Analyse sinnvoll.

## 5.1 Analyse der Temperaturen und Nutzung der Wärmetauscher

Wie oben erwähnt, dient die folgende Analyse dazu, einzelne Wärmetauscher zu bewerten, kann aber keine Aussage treffen, ob die Wärmetauscher überhaupt die „richtigen“ Prozessströme verbinden. Dazu ist dann die Pinch-Analyse geeignet.

Zunächst sind sämtliche bereits vorhandenen Wärmetauscher aufzulisten und nach den Leistungen von groß nach klein zu priorisieren. Dazu sind soweit verfügbar Auslegungs- und reale Daten für Massenstrom, Temperaturen und Leistung zu primär- und sekundärseitigen Strömen, also der Wärmequelle und -senke, aufzunehmen. Vor Ort kann der Zustand der Anlage überprüft werden, ob beispielsweise eine Temperatur- oder Mengenmessung installiert ist, ob die Anlage ordnungsgemäß gewartet wird, ob Filter vorhanden sind und ob diese regelmäßig getauscht werden.

In nachstehender Tabelle und im Anhang „Mustervorlagen für Audits zur Abwärmenutzung“ finden Sie unter Punkt 1.2 und Punkt 1.3 eine Excel-Vorlage, in die Sie die notwendigen Daten von bestehenden Wärmetauschern eintragen können.  $t_1/t_2$  in

dieser Tabelle bedeutet Temperatur Primärseite (Warmes Medium) Eingang/Ausgang jeweils für den Auslegungszustand (Ausl.) und den tatsächlichen Zustand (real). t3/t4 steht für Temperatur Sekundärseite (Kaltes Medium) Eingang/Ausgang.

Tabelle 3: Datenaufnahme für bestehende Wärmetauscher (WT) für den Auslegungszustand und den realen Betrieb

Zu erhebende Daten	Angaben
Bezeichnung, Ort des Wärmetauschers, Prozess	Zu erheben
Art des Wärmetauschers	Zu erheben
Leistung [kW/kW] (Ausl./ real)	Zu erheben
Strombezeichnung primär	Zu erheben
Temperatur primär t1/t2 (Auslastung/real) [°C]/ [°C]/ [°C]/ [°C]	Zu erheben
Durchsatz primär [kg/s]/ [kg/s] (Auslastung/real) Aggregatzustand	Zu erheben
Strombezeichnung sekundär	Zu erheben
Temperatur sekundär t3/t4 (Auslastung/real) [°C]/ [°C]/ [°C]/ [°C]	Zu erheben
Durchsatz sekundär [kg/s]/ [kg/s] (Auslastung/real) Aggregatzustand	Zu erheben

### 5.1.1 Temperaturen- und Massenstrom-Check

Zunächst sind die Auslegungsdaten der Wärmetauscher den realen Betriebsdaten gegenüberzustellen. Dazu sind folgende Fragen zu beantworten:

- Stimmen die geplanten und realen Ein- und Austrittstemperaturen der Ströme überein?
- Stimmen die geplanten und realen Massenströme von Wärmequelle- und senke überein?

Gegebenenfalls sind die Temperaturen zu messen oder abzuschätzen.

Abbildung 5: Formel zur Berechnung der Temperaturdifferenz auf der Sekundärseite

$$\Delta T_2 = \frac{m_1 \cdot c_{p1} \cdot \Delta T_1}{m_2 \cdot c_{p2}}$$

$\Delta T_1$ ... Temperaturdifferenz auf der Primärseite (Heiz-Fluid) [K]

$m_1$  ... Massenstrom auf der Primärseite (Heiz-Fluid) [kg/s]

$c_{p1}$ ... spezifische Wärmekapazität des Mediums auf der Primärseite (Heiz-Fluid) [kJ/kgK]

$\Delta T_2$ ... Temperaturdifferenz auf der Sekundärseite (Kühl-Fluid) [K]

$m_2$  ... Massenstrom auf der Sekundärseite (Kühl-Fluid) [kg/s]

$c_{p2}$ ... spezifische Wärmekapazität des Mediums auf der Sekundärseite (Kühl-Fluid) [kJ/kgK]

Mögliche Ursachen, dass die erwarteten Temperaturbereiche nicht erreicht werden, können sein:

- Falscher Anschluss (im Gleichstrom, statt im Gegenstrom, damit geringere Leistung des Wärmetauschers)
- Veränderte Eingangstemperaturen gegenüber der Auslegungssituation
- Veränderter Massenstrom gegenüber der Auslegungssituation (sowohl primär- als auch sekundärseitig)
- Verkalkung, Fouling des Wärmetauschers
- Verstopfte Filter vor dem Wärmetauscher
- Lufteinschluss im Wärmetauscher (damit verringerter Wärmeübergang)
- Schlechte Dämmung des Wärmetauschers

Allgemein führt ein geringerer Massenstrom auf der Primärseite zu niedrigerem Wärmeeintrag in das Sekundärmedium.

Ein höherer Massenstrom führt bis zu einem gewissen Punkt aufgrund höherer Geschwindigkeit und stärkerer Turbulenz zu einem höheren Wärmeübergang. Ab einem bestimmten Massenstrom kann aber aufgrund der begrenzten Wärmeübertragungsfläche keine weitere Wärmeübertragung erfolgen, dadurch strömt dann der warme Eingangsstrom mit höherer Temperatur als erwartet aus dem Wärmetauscher aus.

Bei Wärmetauschern, die über Dampfsysteme versorgt werden (also nicht zur Rückgewinnung genutzt werden), oder von Wärmetauschern in Dampfsystemen (zur

Rückgewinnung von Brühdampf, Nachdampf) können unter anderem folgende Gründe dazu führen, dass die berechnete Leistung nicht erbracht wird:

- Lufteinschluss
- Ungünstige Platzierung der Kondensatableiter (Rückstau von Kondensat)
- Defekter Kondensatableiter

Aus dieser Analyse sind die entsprechenden Korrekturmaßnahmen abzuleiten.

### **5.1.2 Nutzungs-Check**

Nachdem geprüft wurde, ob die Wärmetauscher optimal betrieben werden, ist zu prüfen, ob die vom Wärmetauscher übertragene Wärme auch optimal genutzt wird:

- Wird die Wärme zeitlich optimal zu Verfügung gestellt? (eventuell erfolgt die Nutzung zeitlich versetzt, über einen Speicher könnte mehr Energie übertragen werden)
- Falls der Wärmetauscher die Wärme in einen Speicher überträgt und hier nicht die erwartete Menge übertragen wird, können dafür mehrere Gründe vorliegen. Z. B. wurde der Speicher über Nacht und am Vormittag bereits mit konventioneller Heizung beheizt; oder der Speicher wird bereits über einen anderen Wärmetauscher gefüllt, oder der Speicher ermöglicht nur bestimmte Temperaturniveaus.

## **5.2 Analyse des Gesamtsystems**

In diesem Schritt soll das Gesamtsystem beurteilt werden, und darauf geachtet werden, ob die Wärmetauscher richtig ausgelegt sind beziehungsweise Prozessströme (Wärmequelle und -senke) optimal kombinieren.

Auf folgende Punkte ist zu achten:

- Wurden die Wärmetauscher exergetisch optimal ausgelegt beziehungsweise werden hohe Temperaturen von Abwärmequellen auch für hohe Temperaturen auf der Senkenseite genutzt?
- Sind die Wärmetauscher möglichst groß ausgelegt?
- Werden die Wärmetauscher genutzt, um möglichst hohe Energiemengen zu übertragen?

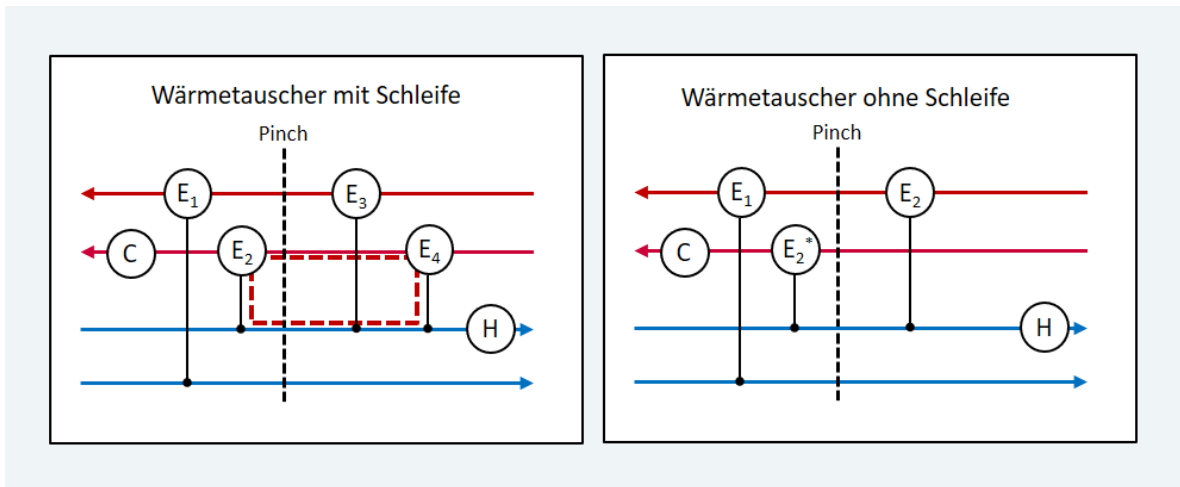


Auf Unternehmensebene kann auch die Pinch-Methode genutzt werden, um Wärmetauschernetzwerke zu optimieren. Dazu soll zunächst eine graphische Erfassung der Wärmeströme, inklusive Wärmerückgewinnungen erfolgen.

Folgende fünf Punkte sollen dabei untersucht werden, wobei die ersten drei Punkte den drei Pinch-Hauptregeln entsprechen:

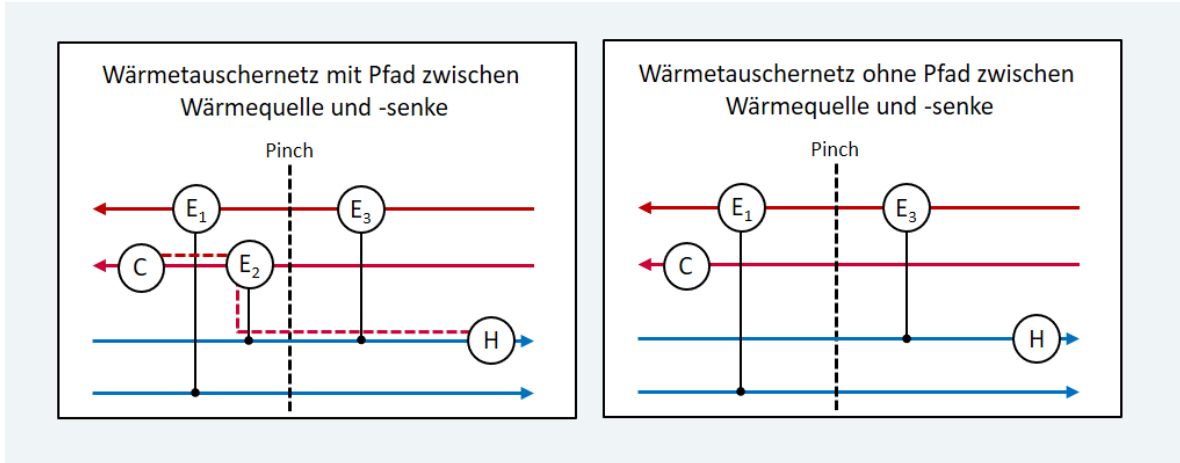
- Kein Heizen unter dem Pinch: Unter einer bestimmten Temperatur (dem Pinch) sollte theoretisch nicht geheizt werden, da genügend Abwärme aus anderen Prozessen mit einer höheren Temperatur verfügbar wären.
- Kein Kühlen über dem Pinch: Über einer bestimmten Temperatur (dem Pinch) sollte theoretisch nicht gekühlt werden, da genügend Senken mit einer niedrigeren Temperatur verfügbar wären, um diesen Prozess abzukühlen.
- Keine Wärme über den Pinch übertragen (das entspricht den ersten zwei Regeln)
- Schleifen identifizieren und aufbrechen: Schleifen entstehen, wenn die selben Ströme zweimal miteinander verbunden sind, wobei die Wärme in unterschiedliche Richtungen fließt. Diese sind zu vermeiden.
- Pfade identifizieren und aufbrechen: Dabei soll das Übertragen von Wärme von einem kalten Strom, also einem Strom der später erwärmt wird, zu einem warmen Strom vermieden werden.

Abbildung 6: Vermeidung von Schleifen im Wärmetauschernetz



Quelle: Universität Duisburg, Essen, o.J., Darstellung: Österreichische Energieagentur

Abbildung 7: Vermeidung eines Pfades zwischen Wärmequelle und -senke im Wärmetauschernetz



Quelle: Universität Duisburg, Essen, o.J., Darstellung: Österreichische Energieagentur

# 6 Nutzung betrieblicher Abwärme

Aus den aufgenommenen Daten sind Möglichkeiten zur Nutzung vorhandener Abwärme- und Abkälteströme zu definieren. Aufbauend auf der physikalischen und ökonomischen Analyse erfolgt die Auswahl der Technologie zur Nutzung betrieblicher Abwärme. Je nach Temperatur- und Anwendungsbereich sind verschiedene Technologien dafür geeignet. In diesem Leitfaden werden insbesondere Wärmetauscher, Wärmepumpen und Warmwasserspeicher näher behandelt.

- Wärmetauscher
- Wärmepumpen
- Warmwasserspeicher
- ORC (Organic Rankine Cycle) - Prozess, Dampfturbine (im Detail in diesem Leitfaden nicht behandelt)

## 6.1 Grobanalyse

Beim Wärmetausch von Prozess zu Prozess oder beim Einsatz von Wärmepumpen gilt es folgende Bewertungen durchzuführen:

- Qualitative Bewertung: Wärmequellen mit hoher beziehungsweise ausreichender Temperatur sind mit Wärmesenken mit niedriger Temperatur zu kombinieren.
- Quantitative Bewertung: Wärmeeinfall und -bedarf sollen möglichst gut übereinstimmen.
- Zeitliche Bewertung: Der Wärmeeinfall und -bedarf sollen möglichst zeitnah erfolgen.

Bei zu geringer Temperatur können Wärmepumpen, bei zu hohem zeitlichem Abstand Wärmespeicher eingesetzt werden.

Folgende Parameter sollen daher zumindest aus dem Schritt Datenerhebung vorhanden sein:

- Temperaturbereich Wärmequelle und -senke
- Abwärmemedium
- Betriebsstunden Wärmequelle und -senke (damit auch zeitliche Überlappung)
- Thermische Leistung der Wärmequelle und -senke
- Verfügbarer Platz für den Wärmetauscher

### **6.1.1 Qualitative Bewertung**

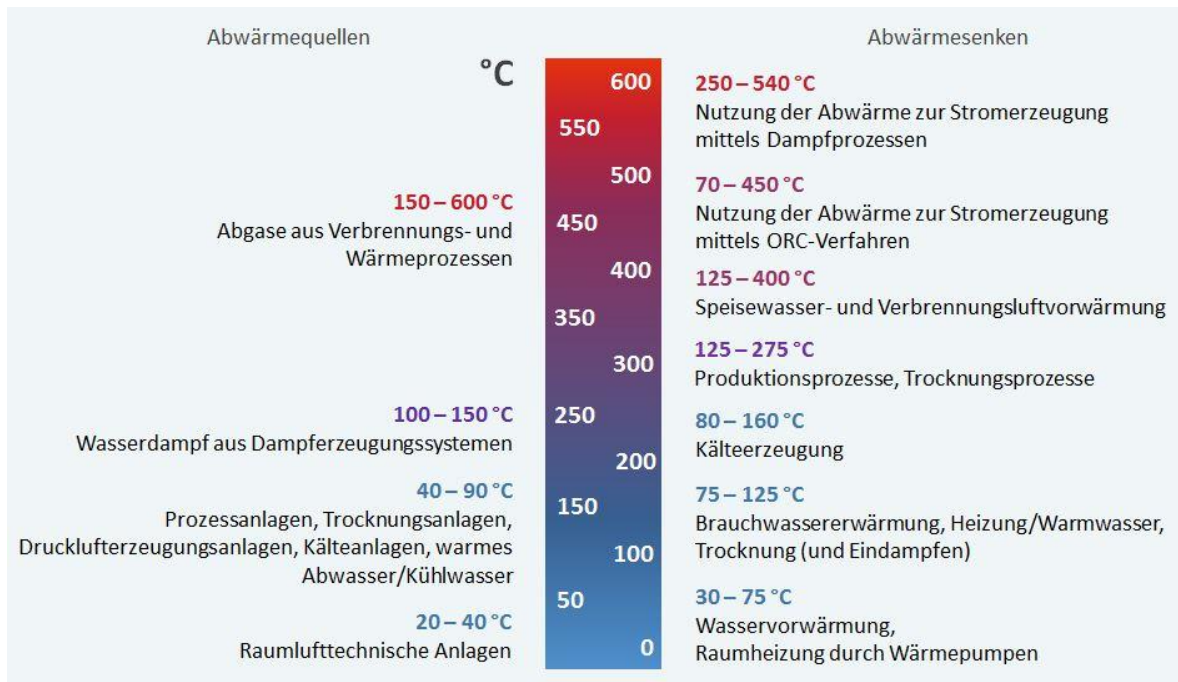
Als qualitative Bewertung wird die Bewertung hinsichtlich des Temperaturniveaus zu verstehen. Die Nutzbarkeit der rückgewonnenen Abwärme ist insbesondere vom verfügbaren Temperaturniveau abhängig. Je höher die Temperatur, desto mehr Anwendungsmöglichkeiten stehen zu Verfügung. Daher sollten auch Abwärmeströme mit hohen Temperaturen zunächst zum Aufwärmen von Strömen verwendet werden, die hohe Temperaturniveaus benötigen.

Auch zur Nutzung niedriger Temperaturniveaus unter 50 °C gibt es viele Anwendungsgebiete im Betrieb:

- Niedertemperatursysteme (Fußbodenheizung)
- Systeme mit niedriger Eingangstemperatur (Verbrennungs-, Trocknungs-, Frischluftvorwärmung, Frischwasser-, Speisewasser-, Wasservorwärmung). Die Abwärme kann dabei sowohl prozessintern als auch betriebsintern genutzt werden, die Endtemperatur kann über andere Wärmequellen erreicht werden.

Eine weitere Möglichkeit stellen Wärmepumpen zur Anhebung des Temperaturniveaus dar. Die folgende Abbildung gibt eine Übersicht über Temperaturniveaus von Abwärmequellen und Abwärmenutzung.

Abbildung 8: Verschiedene Abwärmequellen und Abwärmesenken nach Temperaturniveau



Quelle: Österreichische Energieagentur (auf Basis DENA, 2015)

### 6.1.2 Quantitative Bewertung

Für die quantitative Bewertung ist eine Abschätzung der durchschnittlichen Leistung der Abwärmequelle erforderlich. Generell sollte man zunächst die großen Leistungen analysieren. Ab 10 kW ist es jedenfalls sinnvoll, alle Varianten der Abwärmenutzung zu prüfen.

Für gasförmige Medien sind zur Übertragung gleicher Leistung im Vergleich zu Flüssigkeiten viel größere Wärmeübertrager notwendig und daher ist auch der Platzbedarf größer.

Falls die versorgte Nutzleistung höher als die Abwärmeleistung ist, muss für betriebsinterne Wärmenutzung eine Zusatzheizung installiert sein beziehungsweise bleiben.

### **6.1.3 Zeitliche Bewertung**

Eine lange jährliche Betriebsdauer der Abwärmequelle und -senke mit hoher Grundlast wirkt sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit der Abwärmenutzung aus. Dabei ist auch die Gleichzeitigkeit wichtig. Bei prozessinterner Wärmerückgewinnung ist die zeitliche Überlappung oft sehr hoch, nur beim Start des Prozesses ist diese Wärme oft noch nicht verfügbar. Manche Prozesse haben auch zyklische Betriebsweisen, was sich auf die nutzbare Energiemenge auswirkt. Bei den Abwärmesenken ist auf den zeitlichen Auftritt der Maximallast zu achten. Generell sollten Wärmetauscher und Wärmepumpen auf die Grundlast ausgelegt werden, um eine hohe Laufzeit, niedrige Kosten und damit eine hohe Wirtschaftlichkeit zu erreichen.

Die Nachteile der fehlenden Gleichzeitigkeit und auftretenden Lastschwankungen können durch den Einsatz von Wärmespeichern behoben werden.

### **6.1.4 Exkurs Stromerzeugung**

Ergänzend für Stromerzeugung aus Abwärme, die in diesem Leitfadens nicht näher betrachtet wird:

ORC-Anlagen können für Temperaturniveaus ab 75 °C eingesetzt werden, der Wirkungsgrad nimmt mit dem Temperaturniveau zu. Während bei Niedertemperaturanlagen im Temperaturbereich von 90 °C bis 150 °C der Wirkungsgrad bei 6 % bis 10 % liegt, erreicht er bei Hochtemperaturanlagen mit 300 °C circa 20 %. Auch Kleinanlagen mit einer elektrischen Leistung von unter 100 kW<sub>el</sub> sind verfügbar. Bei erzeugbaren elektrischen Leistungen unterhalb von 2 MW<sub>el</sub> erweisen sich ORC-Anlagen häufig als ökonomischer als herkömmliche Dampfturbinen. (Getec Holding GmbH).

Bei Abwärmemetemperaturen von 350° C gelten Dampfprozesse als effienteste Lösung zur Verstromung von Abwärme, prinzipiell einsetzbar sind sie aber bereits bei Temperaturen von 150 °C (DENA, 2015).

### 6.1.5 Einschränkungen zur Kombination von Energieströmen

Allerdings können nicht alle Energieströme, die die oben genannten Kriterien erfüllen, kombiniert werden. Die Gründe können sein:

- Die Ströme liegen zu weit voneinander entfernt.
- Es gibt keinen Platz für den Wärmetauscher.
- Prozesstechnische Gründe, z. B. konstruktiv nicht möglich oder Energiestrom ist ein festes Produkt
- Sicherheitstechnische Gründe (Gefahr von Verunreinigung)
- Aus Flexibilitätsgründen (Verknüpfung zweier Energieströme würde An- und Abfahren der Anlage erschweren)
- Korrosionstechnisch (korrosive Stoffpaarungen)

## 6.2 Analyse mit der Pinch-Methode

### 6.2.1 Einführung in die Pinch-Methode

Die Pinch-Methode ist ein theoretisches Verfahren zur Bestimmung des Energiesparpotenzials durch Wärmerückgewinnung in einem Betrieb. Die Pinch-Analyse stellt dazu den Wärme- und Kältebedarf des gesamten Systems in einem einfachen Diagramm dar, das den Energiebedarf (Heizen und Kühlen) der Prozesse und die jeweils erforderlichen Temperaturniveaus ausweist.

Vorteile der Pinch-Methode:

- Quantifizierung der möglichen Energieeinsparung durch Wärmerückgewinnung (als Bezugspunkt zum Vergleich mit realen Situationen)
- Richtlinie zur Bewertung bestehender Wärmetauscher-Netzwerke
- Bestimmung des externen Wärmebedarfs und des erforderlichen Temperaturniveaus
- Bestimmung des externen Kältebedarfs und des erforderlichen Temperaturniveaus

Nachteile Pinch-Methode:

- Der einzugebende Datenumfang (mithilfe des klimaaktiv Pinch-Tools wird eine Unterstützung geliefert, um die Eingabe rasch abarbeiten zu können)
- Die Pinch-Methode errechnet ein theoretisches Potenzial und damit einen Referenzpunkt, der praktisch nur unter Umständen erreichbar ist.

## 6.2.2 Verbundkurven (auch Composite Curves)

Die Auswertung eines Pinch-Programms erfolgt mit Verbund- oder Composite-Kurven. Diese dienen dazu, einen Zielwert für den minimalen Energieverbrauch eines Prozesses zu ermitteln. Die Kurven sind

- Profile der Quellen, also des Wärmeangebots im Prozess (Hot Composite Curve = Wärmeverbundkurve, zu kühlende Ströme) und
- Profile der Senken, also des Wärmebedarfs im Prozess (Cold Composite Curve = Kälteverbundkurve, aufzuwärmende Ströme).

Auch Ströme, die für den Prozess nicht unbedingt erforderlich sind (wie z. B. Abwasser, das zum Abfluss fließt), können in die Analyse aufgenommen werden, sofern sie als Heiz- oder Kühlmittel für andere Ströme eingesetzt werden können.

Die Pinch-Theorie unterteilt die Wärmeflüsse im System basierend auf den Temperaturstufen in einen kalten Teil, in dem Überschusswärme anfällt und gekühlt werden muss, und einen warmen Teil, der beheizt werden muss.

Diese Trennung erfolgt durch die Verbindung der Temperatur-Enthalpiekurven aller zu beheizenden Ströme (Cold Composite Curve) und aller zu kühlenden Ströme (Hot Composite Curve) in einem Temperaturbetriebs-Diagramm. Der Überdeckungsgrad dieser Kurven ist ein Maß für das Wärmerückgewinnungs-Potenzial.

Untenstehende Tabelle zeigt ein Beispiel von verschiedenen Strömen:

Die Wärmekapazitäts-Flussrate  $CP$  ist der (Massenstrom) \* (Wärmekapazität) und wird anhand der Enthalpieänderung je Temperatureinheit [ $\text{kW}/^\circ\text{C}$ ] gemessen. Strom 2 muss beispielsweise 18,5 kW an Wärme zugeführt werden und wird dabei um 90K erwärmt, die Enthalpieänderung beträgt daher 0,2055  $\text{kW}/^\circ\text{C}$ .



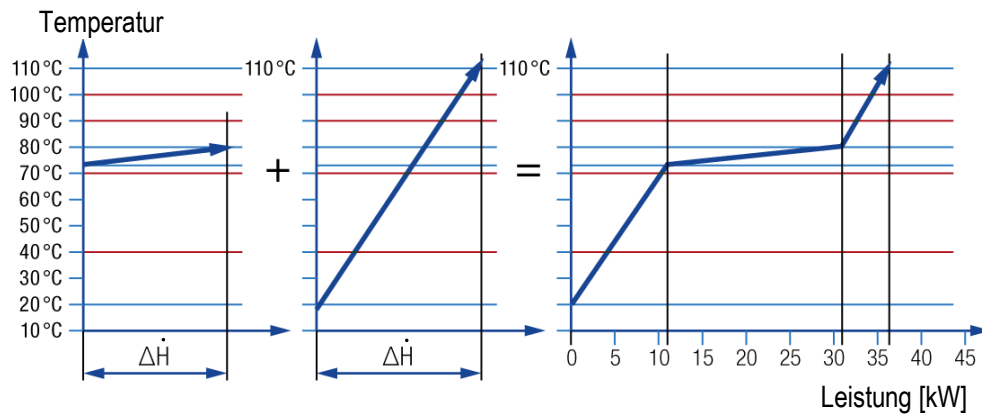
Tabelle 4: Erforderliche Daten für die Pinch-Analyse (die letzten drei Spalten benötigen Sie auch für das klimaaktiv Pinch-Tool)

Strom	Strom-typ	Start-temperatur in °C	End-temperatur in °C	Leistung in kW	CP (Wärmekapazitäts-Flussrate) kW/°C	Massenstrom [kg/s]	Medium	Betriebsstunden
1	Kalt (Senke)	72 °C	80°C	18,5 kW	2,3125	Zu erheben	Zu erheben	Zu erheben
2	Kalt (Senke)	20 °C	110°C	18,5 kW	0,2055	Zu erheben	Zu erheben	Zu erheben

Die Wärmeverbundkurve wird gebildet, indem die Enthalpieänderungen der Ströme in den jeweiligen Temperaturbereichen addiert werden.

- Im Temperaturintervall zwischen 20 °C und 72 °C ist nur ein Temperaturstrom vorhanden. Daher entspricht der Wärmekapazitätsstrom der Verbundkurve dem Wärmekapazitätsstrom von Strom 2. Leistung für diesen Bereich daher:  $\Delta T (52K) * CP (0,2055 \text{ kW/}^\circ\text{C}) = 10,7 \text{ kW}$ .
- Im Temperaturintervall zwischen 72 °C und 80 °C sind Strom 1 und Strom 2 vorhanden, die Summe der Wärmekapazitätsströme beträgt 2,52 kW/°C. Leistung für diesen Bereich daher:  $\Delta T (8K) * CP (2,52 \text{ kW/}^\circ\text{C}) = 20,1 \text{ kW}$ . Je höher der Wert für CP, desto flacher die Kurve (Summe der Kurve bisher 30,9 kW).
- Im Temperaturbereich von 80 °C bis 110 °C ist wiederum nur der zweite Strom vorhanden. Leistung für diesen Bereich daher:  $\Delta T (30 \text{ }^\circ\text{C}) * CP (0,2055 \text{ kW/}^\circ\text{C}) = 6,2 \text{ kW}$ . Summe gesamt wieder 37 kW.

Abbildung 9: Thermodynamische Verbindung der kalten Ströme



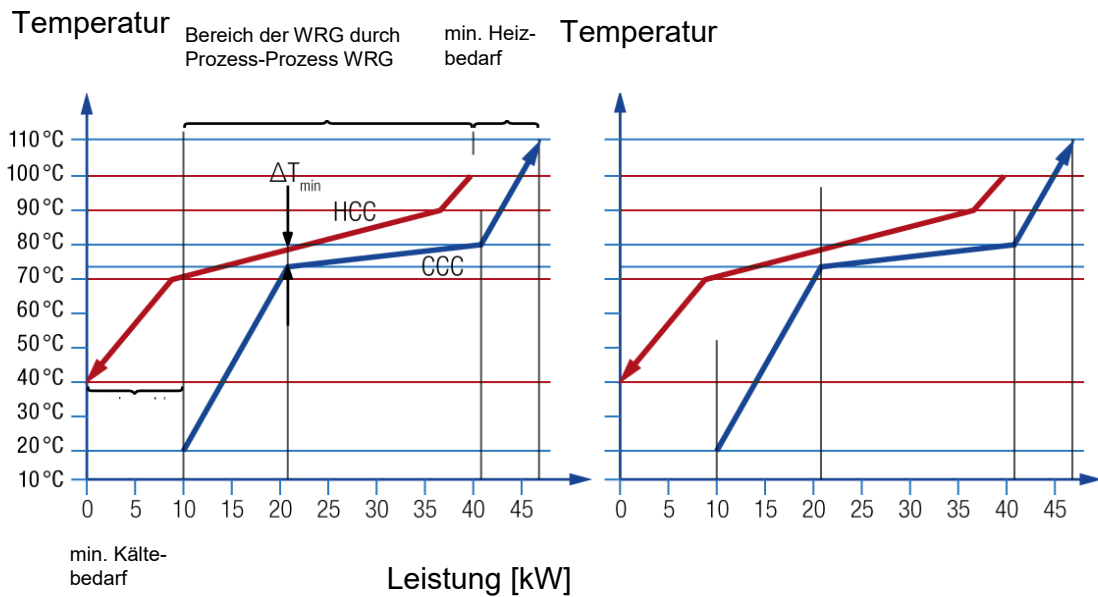
Quelle: Schweiger, 2011, Seite 25

Die Verbundkurve entsteht durch Addition der Enthalpieänderungen der einzelnen Ströme innerhalb der einzelnen Temperaturintervalle.

Die Warmströme werden genauso verbunden.

Um das Energieoptimum (Ziel, Target) zu ermitteln, werden die Wärme- und Kälteverbundkurve in einem Diagramm dargestellt. Dann wird die Kälteverbundkurve solange horizontal nach links verschoben, bis der vertikale Abstand der heißen und kalten Kurven der minimal zulässigen Temperaturdifferenz entspricht. (Kälteverbundkurve unter der Wärmeverbundkurve). Das Verschieben ist möglich, da die Enthalpiedifferenz immer eine relative und nicht eine absolute Größe ist.

Abbildung 10: Darstellung der Kombination der Kälte- und Wärmeverbundkurven



Quelle: Schweiger, 2011, Seite 25

Folgende Faktoren sind für die Bestimmung der minimalen Temperaturdifferenz  $\Delta T_{min}$  (dieser Punkt entspricht dem minimalen  $\Delta T$  für einen Wärmetauscher im System) zu berücksichtigen:

- Je kleiner das  $\Delta T_{min}$  desto größer die Wärmetauscherfläche und desto höher die Investitionskosten.
- Für nahezu parallele Composite-Kurven wird ein höheres  $\Delta T_{min}$  ausgewählt, als für stark divergierende Systeme.
- Für Systeme, die leicht verschmutzen oder Systeme mit geringen Wärmedurchgangskoeffizienten werden normalerweise höhere Werte verwendet (30 K bis 40 K).
- Für chemische Prozesse und für Prozesse mit Hilfsstoffen zur Wärmeübertragung liegen die Werte zwischen 10 K und 20 K. Bei Prozessen unterhalb der Umgebungstemperatur werden Werte zwischen 3 K und 5 K verwendet.

Tabelle 5: Typische  $\Delta T_{\min}$ -Werte verschiedener Prozesse

Industrieller Sektor	$\Delta T_{\min}$ -Erfahrungswert
Ölraffinierung	20 K bis 40 °K
Petrochemie	10 K bis 20 °K
Chemie	10 K bis 20 °K
Niedrigtemperaturprozesse	3 K bis 5 °K

Quelle: Linhoff March nach Schweiger, 2011, Seite 26

### 6.2.3 Aussage der Verbundkurven

Die Kurven sind durch einen Punkt der niedrigsten Temperaturdifferenz  $\Delta T_{\min}$  voneinander getrennt. Dieses  $\Delta T_{\min}$  bestimmt jenes Temperaturniveau im System, das als thermodynamische Einschnürung des Prozesses oder als „Pinch“ bezeichnet wird. Die Pinch-Temperatur teilt das System in zwei Hälften.

- Oberhalb des Pinch ist der Prozess im Wärmedefizit, also nicht genügend Wärme vorhanden, die durch Wärmezufuhr (Heizen) ausgeglichen werden muss.
- Unterhalb des Pinch ist der Prozess im Wärmeüberschuss, der durch Kühlen (Wärmeabfuhr) abgebaut werden muss oder an die Umgebung abgegeben wird.

Daraus ergeben sich drei wichtige Regeln für die Wärmeintegration:

- Theoretisch ist keine externe Wärmezufuhr unterhalb der Pinch-Temperatur nötig, da ausreichend Abwärme vorhanden ist
- Theoretisch ist keine externe Kühlung oberhalb der Pinch-Temperatur nötig, da die Kühlung durch das Heizen anderer Prozessströme erreicht werden kann
- Es soll theoretisch kein Wärmeaustausch über den Pinch erfolgen: Abwärme, mit einer Temperatur über der Pinch-Temperatur soll nicht zum Aufheizen eines Beckens unter Pinch-Temperatur (ein Temperaturbereich, wo bereits Wärmeüberschuss vorhanden war) herangezogen werden.

Die Überschneidung der Kurven zeigt die größtmögliche Prozesswärmerückgewinnung. Auch der minimale Heizbedarf und der minimale Kühlbedarf können aus der Abbildung 10 abgelesen werden.

Dies sind aber theoretische Werte und sind in der Praxis kaum erreichbar. Die Gründe dafür sind Schwierigkeiten bei der Nutzung von Prozessströmen, die verschmutzt, korrosiv oder zu weit entfernt sind. Trotzdem bietet die Pinch-Analyse einen guten Überblick über die verschiedenen thermodynamischen Möglichkeiten.

#### **6.2.4 Gesamtverbundkurve**

Die Gesamtverbundkurve (Grand Composite Curve - GCC) ist eine andere Methode ein Wärmequellen- und Wärmesenkenprofil eines Prozesses darzustellen. Mit dieser kann man den Pinch-Punkt, den minimalen Heiz- und Kühlbedarf und das optimale Temperaturniveau der zuzuführenden Heiz- und Kühlenergie bestimmen.

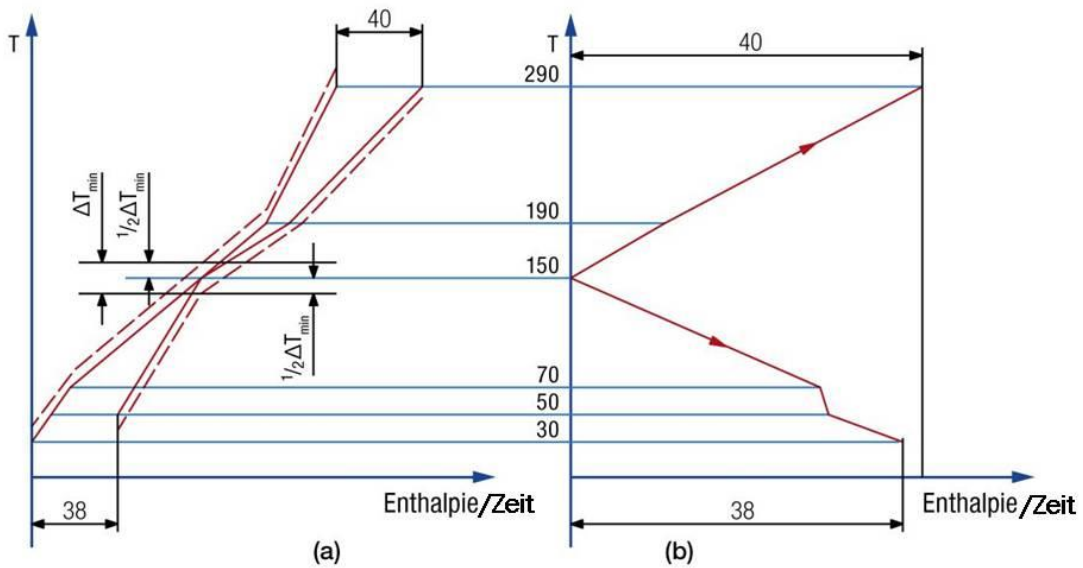
Zur Erzeugung der Grand Composite Curve müssen die Heat Composite Curve (Wärmeverbundkurve) und die Cold Composite Curve (Kälteverbundkurve) um  $\Delta T_{\min}/2$  zueinander verschoben werden, so dass sie sich am Pinch-Punkt berühren. Die horizontale Differenz zwischen den beiden Kurven wird dann in eine neue T-H-Kurve eingezeichnet, die dann die GCC ergibt.

Dies bedeutet, dass bei den abgelesenen Temperaturen der Gesamtverbundkurve  $\Delta T_{\min}/2$  auf der Heizseite jeweils addiert beziehungsweise auf der kalten Seite subtrahiert werden muss, um die Mediumstemperaturen für Heiß- oder Kühlwasser zu erhalten.

Wird der Wärmefluss mit steigenden Temperaturen größer, so ist der Prozess eine Wärmesenke (bei dieser Temperatur wird mehr Energie benötigt als gegeben ist). Wird der Wärmefluss mit sinkenden Temperaturen größer, so wirkt der Prozess als Wärmequelle.

Schraffierte Dreiecke sind Zonen, in denen eine prozessinterne Wärmerückgewinnung möglich ist und daher keine externe Wärmezufuhr oder -abfuhr benötigt (Bundesamt für Energie, 2006, Seite 33).

Abbildung 11: Sich überschneidende HCC und CCC (a) und die Entwicklung der GCC (b)



Quelle: Schweiger, 2011, Seite 27

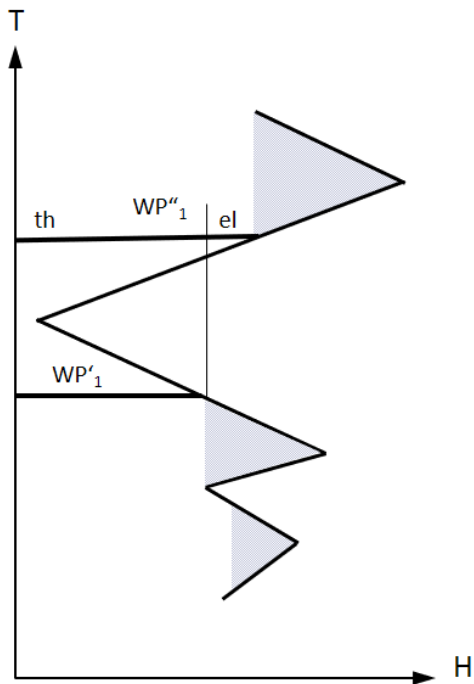
Bei der Optimierung der Energieversorgung, also der Bestimmung, welche Wärmequelle Wärme zu Wärmesenken der Prozesse transportieren kann, wird der verbleibende Wärmebedarf nur dann von externen Energiequellen abgedeckt, wenn keine Abwärme zur Verfügung steht. Wärmeintegration ist praktisch immer wirtschaftlicher als Projekte mit Wärmepumpen.

Aus der Gesamtverbundkurve kann die Wärme- und Kälteleistung sowie das günstigste Temperaturniveau abgelesen werden.

Heizenergie wird auf dem tiefstmöglichen Temperaturniveau, Kälteenergie auf dem höchst möglichen Temperaturniveau platziert. Es werden also jene Energiequellen eingesetzt werden, die für den jeweiligen Temperaturbereich optimal sind.

Für Wärmepumpen soll die Wärmequelle unterhalb der Pinch-Temperatur also im Bereich mit Wärmeüberschuss liegen, die Wärmeabgabe soll oberhalb der Pinch-Temperatur liegen.

Abbildung 12: Platzierung von Wärmepumpen mit der Gesamtverbundkurve



Quelle: Österreichische Energieagentur

Wärmepumpen können im Rahmen der Pinch-Analyse in vier Kategorien eingeteilt werden.

Tabelle 6: Arten von Wärmepumpen

Art der Wärmepumpe	Beschreibung
<b>Prozess-Prozess Wärmepumpe</b>	Wärmepumpe nimmt Wärme aus Prozess auf und gibt Wärme in Prozess ab. Sie sparen sowohl heiße als auch kalte Betriebsmittel.
<b>Prozess-Utility Wärmepumpe</b>	Wärmepumpe nimmt Wärme aus Prozess unter Pinch auf und gibt (z. B Dampf) ins Utility System ab.
<b>Utility-Prozess Wärmepumpe</b>	Wärmepumpe nimmt Wärme aus Utility über dem Pinch auf und gibt Wärme in Prozess ab.
<b>Utility-Utility Wärmepumpe</b>	Wärmepumpe ist ins Utility System integriert und arbeitet im Prozessdampfnetz. Wird angewendet, wenn aufgrund Prozessänderung höheres Dampfdruckniveau erforderlich ist und keine KWK eingesetzt wird.

Quelle: STENUM, 2011

Die Analyse der Gesamtverbundkurve liefert die oberen Grenzwerte für die mögliche Wärmeleistung. In der Realität muss man beachten, um welche Wärmeströme und um welche Temperaturniveaus es sich handelt. Das Wärmepotential enthält den Wärmeinhalt von mehreren Strömen. Diese Ströme können jedoch nicht immer verwendet werden. Meist wird nur ein Strom, möglichst jener mit der höchsten Leistung, als Wärmequelle oder Wärmesenke vorgesehen.

Tabelle 7: Auswahl von Wärmepumpen mit Unterstützung der Pinch-Analyse

Wärmepumpenart	Notwendige Kennwerte aus der Gesamtverbundkurve
<b>Brüdenverdichter</b>	T-Differenz von maximal 20 °C bis 30 °C, große Wärmeleistungen, möglichst flache, horizontale Gesamtverbundkurven-Äste
<b>Geschlossene Kompressionswärmepumpen</b>	Prozesse mit möglichst flachen, horizontalen Gesamtverbundkurven-Ästen
<b>Gasmotoren</b>	Nutzung des Wärmeinhalts des Abgases und Kühlwassers zur Beheizung eines kalten Prozesstroms, Pinchtemperatur über 90 °C
<b>Absorptionswärmepumpe (Typ I)</b>	Prozesse mit möglichst flachen, horizontalen Gesamtverbundkurven-Ästen
<b>Absorptionswärmetransformatoren (Typ II)</b>	Ast über Pinch benötigt doppelte Leistung, wie Ast unter Pinch

Quelle: STENUM, 2011

### 6.3 Auswahl der Abwärmenutzungsmöglichkeit mit dem klimaaktiv Pinch-Tool

Das klimaaktiv Pinch-Tool ermöglicht eine sehr rasche und unkomplizierte Durchführung der Pinch-Analyse zur Bestimmung der optimalen Abwärmenutzung.

Das Tool bietet dem Anwender die Möglichkeit, basierend auf realen Betriebsdaten von

- Prozessströmen und
- Abwärmeströmen aus der Energieversorgung

ein Wärmetauschernetzwerk zu kreieren und zu bewerten.

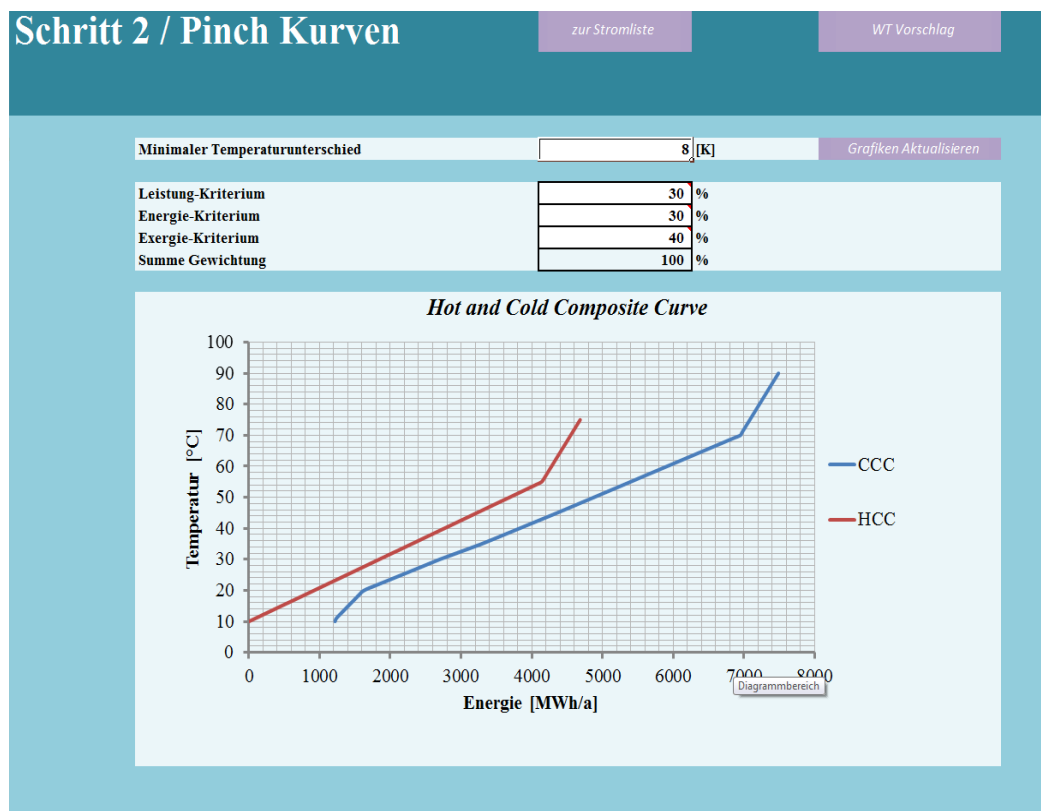


Das Tool unterstützt die Analyse in fünf Schritten:

1. Eingabe der Liste der Wärme- und Kälteströme über den Anwender
2. Darstellung der Pinch-Kurven
3. Vorschläge für die einzusetzenden Wärmetauscher
4. Möglichkeit zur manuellen Adaptierung der Wärmetauscher
5. Ökonomische und ökologische Bewertung der Wärmetauscher

Die genaue Vorgangsweise entnehmen Sie bitte dem Handbuch zum Tool.

Abbildung 13: Screenshot aus dem klimaaktiv Pinch-Tool



Quelle: Österreichische Energieagentur

## 6.4 Wirtschaftlichkeitsrechnung

Zur Beurteilung der konkreten Maßnahmen (Einsatz von Wärmetauscher, Wärmepumpe) ist eine Wirtschaftlichkeitsrechnung durchzuführen. Technische Details zur Bewertung der Einsparungen beziehungsweise übertragene Wärme sind dem Kapitel zu den Technologien zur Abwärmenutzung zu entnehmen.

Für eine Bewertung sind die Gesamtkosten pro Jahr zu ermitteln. Diese setzen sich aus den folgenden Kostenarten zusammen:

- Investitionskosten (Installationsmaterial und Montage)
- Laufende Kosten (Energiekosten, Wartungs- und Instandhaltungskosten)

Bei der Abwärmenutzung werden Wärmeenergie und Wärmekosten eingespart. Zur Bestimmung der laufenden Kosten sind auch die zu erwartenden Betriebskosten für den Stromverbrauch des Ventilators, der Umwälzpumpe und die Wartungskosten und Instandhaltungskosten (1,5 % bis 3 % der Investitionskosten) erforderlich.

Bei Wärmetauschern, Wärmepumpen und Wärmespeichern ist zu beachten, dass die Installationskosten einen großen Anteil an den Investitionskosten haben können.

In der Regel bieten sich die statischen Investitionsrechenverfahren der Kostenvergleichsrechnung und der Rentabilitätsrechnung für die wirtschaftliche Bewertung der Maßnahmen an.

### 6.4.1 Kostenvergleichsrechnung

Die Amortisationszeit gibt nur an, wann das eingesetzte Kapital zurückgeflossen ist und ist daher eine Risikobewertung. Sämtliche Kosteneinsparungen nach der errechneten Amortisationszeit (z. B. nach drei Jahren) werden nicht berücksichtigt und dieses Kriterium gibt keine Aussagen zur Rentabilität. Dennoch wird dieses Kriterium von vielen Betrieben zur Bewertung von Projekten im Bereich Energietechnik angewendet.

Der Zeitpunkt ab dem ein Kostenvorteil entsteht, kann anhand der folgenden Formel errechnet werden.

Abbildung 14: Formel für die Kostenvergleichsrechnung

$$A = \frac{\text{Investitionskosten}}{\text{Differenz der laufende Kosten}}$$

A... statische Amortisationsdauer [a]  
Investitionskosten [€]  
Differenz der laufenden Kosten [€/a]

### 6.4.2 Return on Investment

Bei der Berechnung des Returns on Investment (ROI) geht es darum, durch die Kosteneinsparung eine höhere Verzinsung zu erwirtschaften, als eine risikolose Anlageform. Dabei gilt: Desto höher der ROI desto besser. Der ROI kann folgendermaßen berechnet werden.

Abbildung 15: Formel zur Berechnung des Return on Investment

$$\text{ROI} = \frac{\text{Differenz der laufenden Kosten}}{\text{Investitionskosten}} \cdot 100\%$$

ROI... Return on Investment [%]  
Investitionskosten [€]  
Differenz der laufenden Kosten [€/a]

### 6.4.3 Dynamische Wirtschaftlichkeitsrechnung

Zur Durchführung der dynamischen Wirtschaftlichkeitsberechnung eignen sich für hier relevante Projekte mehrere Methoden.

Der interne Zinssatz ist jener Zinssatz bei dem der Kapitalwert Null ist. Dieser Wert gibt die durchschnittliche jährliche Rendite einer Investition an. Allerdings handelt es sich nur um die Effektivverzinsung des jeweils noch gebundenen Kapitals, die Rückflüsse pro Periode (Einsparungen) müssten nochmals zum internen Zinsfuß angelegt werden können.

Dieser wird beispielsweise im Excel (Funktion IKV) berechnet und liefert insbesondere dann gute Ergebnisse, wenn zunächst ein negativer Auszahlungsstrom (die Investition) erfolgt und in den Folgejahren positive Rückflüsse, also Energiekosteneinsparungen

generiert werden. Im Excel ist dazu eine Spalte mit den Cash-Flows (der Differenz aus Erträge und Aufwand) für jedes Jahr anzulegen. Hier ist die Energiepreissteigerung zu berücksichtigen, das heißt, die Einsparungen sind für jedes Jahr aufzuzinsen. Wenn der interne Zinssatz über dem Marktzinssatz beziehungsweise über der vorgegebenen Mindestverzinsung liegt, sollte das Projekt durchgeführt werden.

Für Wärmerückgewinnungsprojekte können Lebensdauern von acht Jahren angesetzt werden.

Bei alternativen Investitionsmöglichkeiten wird die Beurteilung mithilfe der Kapitalwert- oder Annuitätenmethode empfohlen.

Der Kapitalwert bewertet den Wert der Einsparungen über die gesamte Laufzeit zum Investitionszeitpunkt unter Berücksichtigung des angenommenen Zinssatzes und zieht davon die Investitionskosten oder Kreditzahlungen (ebenfalls zum Investitionszeitpunkt) ab. Bei einem Kapitalwert von 0 erhält man genau das eingesetzte Kapital über den monetären Wert der Einsparungen zurück. Bei alternativen Investitionen ist jene Investition mit dem höchsten Kapitalwert zu wählen.

Bei der Annuitätenmethode geben die Annuitäten die, über die Laufzeit gestreckt, durchschnittlichen jährlichen Einsparungen wieder. Annuität bedeutet eine über die Laufzeit gleichbleibende Zahlung. Eine Investition ist dann positiv zu beurteilen, wenn die Annuität größer oder gleich Null ist. In diesem Fall erhält man mindestens das eingesetzte Kapital verzinst mit dem Kalkulationszinssatz zurück.

Der Unterschied der beiden Methoden ist unter anderem., dass die Annuitätenmethode die Auswirkung der Einsparmaßnahme auf den jährlichen Cash-Flow berücksichtigen kann. Die Kapitalwertmethode geht hingegen davon aus, dass sämtliche Einsparungen bereits zum Anfangszeitpunkt lukriert werden.

## 6.5 Monitoring

Es empfiehlt sich, Energieeinsparungen durch Energiecontrolling zu verifizieren. Dazu sollen laut internationalen Protokollen (IPMVP) der Energieverbrauch und Einflussfaktoren vor (Referenzzeitraum) und nach Umsetzung der Energiesparmaßnahme (Berichtszeitraum) gemessen und analysiert werden. Der Energieverbrauch vor Umsetzung der Maßnahme wird dann zunächst an die Bedingungen des Berichtszeitraums angepasst, beispielsweise durch Anpassung an die tatsächlich produzierte (getrocknete, gebackene) Menge. Von diesem Betrag wird dann der im Berichtszeitraum gemessene Energieverbrauch abgezogen.

Dazu sind beispielsweise Gas- oder Wärmemengenzähler, die Aufzeichnung der produzierten Einheiten und gegebenenfalls Temperaturmessungen und Brennerlaufzeiten erforderlich.

# 7 Technologien zur Nutzung von Abwärmeströmen

In dem folgenden Kapitel werden mögliche Technologien zur Nutzung von Abwärmeströmen vorgestellt.

## 7.1 Wärmetauscher

Der folgende Abschnitt beschreibt physikalische Grundlagen von Wärmetauschern und geht auf unterschiedliche konstruktive Ausführungen ein.

### 7.1.1 Physikalische Grundlagen

Wärmetauscher oder Wärmeübertrager sind technische Apparate, welche die Übertragung von Wärme von einem Fluid auf ein anderes ermöglichen. Damit dies gelingt, muss der Wärmeübertrager von zumindest zwei Fluiden unterschiedlicher Temperatur durchströmt werden. Aus physikalischer Sicht ist die Wärmeübertragung eine Kombination aus Wärmeleitung und Wärmedurchgang. Die Wärmeleitung beschreibt dabei die physikalischen Eigenschaften des leitenden Materials (Wärmeleitfähigkeit); der Wärmedurchgang hingegen beschreibt den Prozess der Übertragung. Dieser lässt sich für eine ebene Wand mathematisch folgendermaßen ausdrücken (Achtung: gilt nur für Fluide ohne Änderung des Aggregatzustandes).

Abbildung 16: Formel zur Berechnung des Wärmestroms

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot (t_i - t_a)$$

$\dot{Q}$ ... Wärmestrom [W]

$k$ ... Wärmedurchgangskoeffizient [W/m<sup>2</sup>K]

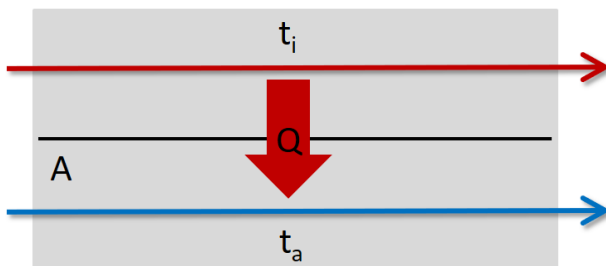
$A$ ... Fläche [m<sup>2</sup>]

$t_i$ ... Temperatur innen [K]

$t_a$ ... Temperatur außen [K]

$k = f$  (Wärmeübertragungskoeffizient, Schichtdicke, Wärmeleitfähigkeit, Wärmedurchgangswiderstand, Verschmutzungsfaktor)

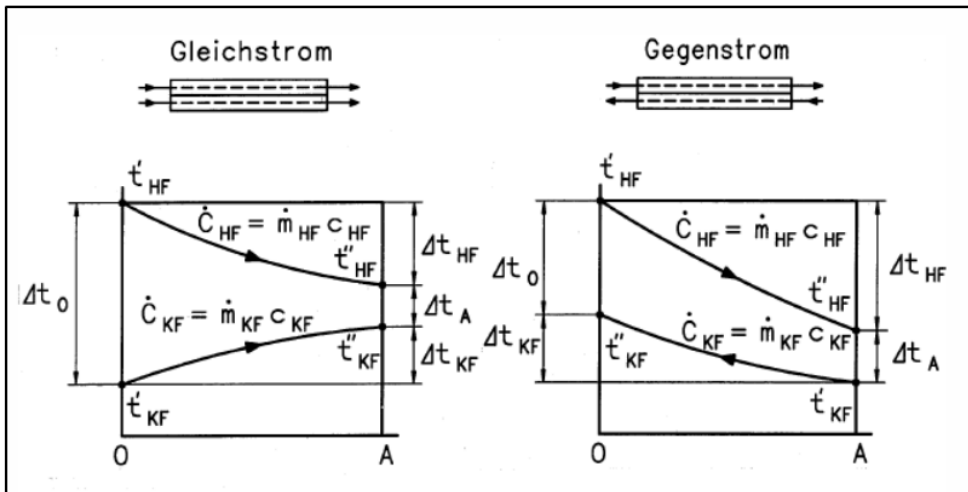
Abbildung 17: Idealisierte Wärmeübertragung längs der ebenen Wand aufgrund unterschiedlicher Temperaturen



Quelle: Österreichische Energieagentur

In der Regel ist die Temperatur innen und außen längs der ebenen Wand nicht konstant. Die Temperaturverläufe beim Gleichstrom- beziehungsweise Gegenstrom-Wärmeübertrager lassen sich wie folgt darstellen.

Abbildung 18: Temperaturverläufe bei Gleich- beziehungsweise Gegenstrom-Wärmeübertragern



O oder `... Eintritt

A oder ``... Austritt

HF... Heiz-Fluidstrom

KF... Kühl-Fluidstrom

$\dot{C}$ ... Wärmekapazitätsstrom des Fluidstroms [kg/s]

$\dot{m}$ ... Massenstrom des Fluids [kg/s]

c... Wärmekapazität des Fluids [kJ/kgK]

Quelle: Recknagel et alii, 2010

Zur exakten mathematischen Abbildung ist daher die Ermittlung einer mittleren Temperaturdifferenz erforderlich. Diese kann folgendermaßen berechnet werden.



Abbildung 19: Formel zur Ermittlung einer mittleren Temperaturdifferenz

Arithmetisches Mittel (anwendbar:  $\Delta t_A / \Delta t_0 \geq 0,7$ )

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_0 + \Delta t_A}{2}$$

Logarithmisches Mittel (empfohlener Wert)

$$LMTD = \frac{\Delta t_0 - \Delta t_A}{\ln \frac{\Delta t_0}{\Delta t_A}}$$

*Gleichstromwärmetauscher:*

$\Delta t_0$ ...Differenz Eintrittstemperaturen Heiz-, Kühlfluidstrom [K]

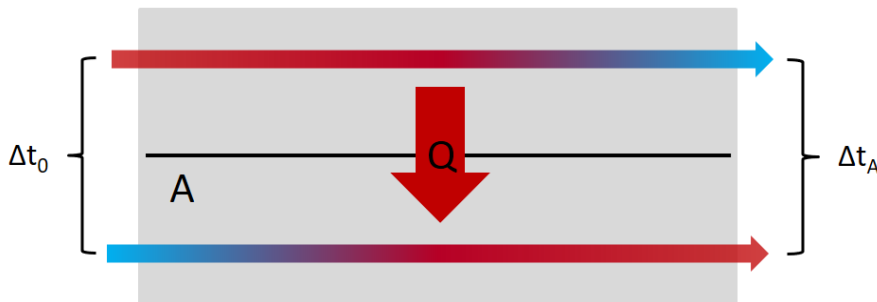
$\Delta t_A$ ...Differenz Austrittstemperaturen Heiz-, Kühlfluidstrom [K]

*Gegenstromwärmetauscher:*

$\Delta t_0$ ...Differenz Eintrittstemperaturen Heiz-Fluidstrom, Austrittstemperatur Kühl-Fluidstrom [K]

$\Delta t_A$ ...Differenz Austrittstemperaturen Heiz-Fluidstrom, Eintrittstemperatur Kühl-Fluidstrom [K]

Abbildung 20: Wärmeübertragung längs der ebenen Wand unter Darstellung der Temperaturänderung



Quelle: Österreichische Energieagentur

Zur Auslegung des Wärmetauschers sind folgende Formeln relevant:

Abbildung 21: Formel zur Berechnung der Auslegung des Wärmetauschers

$$\dot{Q} = m_1 \cdot c_{p1} \cdot \Delta T_1 = m_2 \cdot c_{p2} \cdot \Delta T_2$$

m ... Massenstrom [kg/s]

$c_{p1,2}$ ... spezifische Wärmekapazität des Kühl-Fluidstrom (1) und des Heiz-Fluidstrom (2) [kJ/kgK]

$\Delta T_{1,2}$ ... Temperaturdifferenz des Kühl-Fluidstrom (1) und des Heiz-Fluidstrom (2) [K]

$\dot{Q}$ ... Wärmestrom [kJ]

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot LMTD$$

$\dot{Q}$ ... Wärmestrom [W]

k... Wärmedurchgangskoeffizient [W/m<sup>2</sup>K]

A... Fläche [m<sup>2</sup>]

**Thermische Länge/Number of Transfer Units (NTU):** Die Logarithmische

Temperaturdifferenz kann aber, wenn eine Ausgangstemperatur nicht bekannt ist, nicht einfach angewendet werden. Dabei kann man sich eines anderen Wertes, des NTU-Wertes, bedienen. Bei dieser Methode muss dafür die Wärmetauscherfläche und Wärmedurchgangskoeffizient bekannt sein.

Diese dimensionslose Kenngröße gibt an, in welchem Verhältnis die Wärmeübertragungseinheiten zur vorhandenen Wärmekapazität stehen:

- Große NTUs bedeuten, dass beispielsweise auf Grund einer großen Übertragungsfläche die vorhandene Wärmemenge eines Stromes schnell übertragen wird. Man spricht von großer thermischer Länge des Wärmetauschers. Geringe Temperaturunterschiede reichen aus, um relevante Wärmemenge zu übertragen
- Bei kleinen NTUs dauert die Wärmeübertragung länger, sie haben eine kleine thermische Länge

Die mögliche Effizienzsteigerung durch Vergrößerung der Fläche ist für kleine NTUs (bis zu einem Wert von circa 1,5) größer als für größere NTUs (ab 3). Wenn sich dieser Wert verdoppelt, steigt die Effizienz nicht um das Zweifache. Für größere NTUs zahlt es sich daher eher nicht aus, die Fläche zu vergrößern.

Abbildung 22: Formel zur Berechnung des Verhältnisses der Wärmeübertragungseinheiten zur vorhandenen Wärmekapazität

$$NTU = \frac{k \cdot A}{\dot{C}}$$

k... Wärmedurchgangskoeffizient [W/m<sup>2</sup>K]

A... Fläche [m<sup>2</sup>]

$\dot{C}$ ... Wärmekapazitätsstrom [W/K]:  $m \cdot c_p$  (in W umrechnen kJ/3.600)

m... Massenstrom [kg/s]

$c_p$ ... spezifische Wärmekapazität des Mediums [kJ/kgK]

Hier ist von den beiden Wärmekapazitätsströmen (kalt und warm) der kleinere anzusetzen (also jener, der tatsächlich übertragen werden kann):

Dieser Wert kann auch in Temperaturen ausgedrückt werden, sowohl für die kalte als auch warme Seite (Heiz-, Kühlfluidstrom):

$$NTU = \frac{\Delta T}{LMTD}$$

$\Delta T$ ... Temperaturdifferenz des jeweiligen Stromes Eingang, Ausgang

LMTD Logarithmische Temperaturdifferenz, siehe oben

Ein weiterer relevanter Wert ist das Verhältnis der Wärmekapazitätsströme aus kleinerem ( $\dot{C}_1$ ) und größerem Wärmekapazitätsstrom ( $\dot{C}_2$ ). Dieser Wert beeinflusst die übertragene Wärmemenge und damit den Wirkungsgrad. Ist der Wert 1, ist die Effizienz am niedrigsten.

$$\mu = \frac{\dot{C}_1}{\dot{C}_2}$$

Diese Werte können in einem NTU Diagramm verwendet werden, um das Temperaturverhältnis und damit die Endtemperaturen der Wärmeströme aus dem Wärmetauscher zu berechnen.

**Turbulente Strömung, Fließgeschwindigkeit:** Eine hohe Fließgeschwindigkeit erhöht die Wärmeübertragung beziehungsweise vergrößert den Wärmeübergang, ermöglicht Selbstreinigung und verringert die Ablagerung von Schlamm und Kalk.

Niedrige Fließgeschwindigkeit kann zu laminarer Strömung und damit geringem Wärmübergang führen, außerdem verlängert sich die Verweildauer im Wärmetauscher.

Empfohlene Fließgeschwindigkeiten zur Herstellung turbulenter Verhältnisse sind 0,3 m/s bis 0,9 m/s für Platten, 1,3 m/s für Rohrbündelwärmetauscher.

**Druckverlust:** Der Druckverlust von Wärmetauschern ist eine wichtige Kenngröße, da unter Umständen Pumpen benötigt werden, um den Druckverlust im Wärmetauscher auszugleichen.

Ein zu geringer Druckverlust kann dazu führen, dass die Strömung innerhalb des Wärmetauschers von turbulenter zu laminarer Strömung übergeht und dieser Übergang mit einem Leistungsverlust einhergeht.

Ein zu hoher Druckverlust führt zum Rückgang des Volumenstromes oder zu einer höheren Pumpenleistung. Falls der Druckverlust über dem Druckabfall über das Regelventil liegt, kann dieses nicht mehr regeln.

Empfohlene Druckverluste für Plattenwärmetauscher liegen bei 0,25 bar bis 0,3 bar (25 kPa bis 30 kPa).

## **7.1.2 Arten von Wärmetauschern**

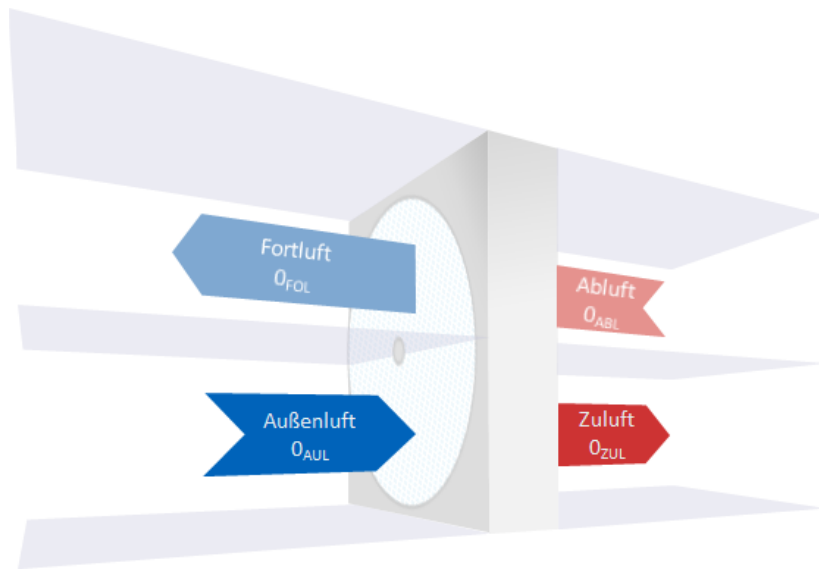
Nach der thermischen Auslegung kann zwischen Regeneratoren, Rekuperatoren und Mischwärmeübertragern unterschieden werden. Der Unterschied wird im nachfolgenden Text genauer erläutert.

### **7.1.2.1 Regeneratoren**

In Regeneratoren wird ein und dieselbe Heizfläche (Platten, Kammern) abwechselnd von dem heißen und kalten Fluid umströmt. Beim Durchströmen des heißen Fluids nimmt die Heizfläche die Wärme auf und speichert sie, um sie nach dem Umschalten an das kalte Fluid wieder abzugeben. Beispiele sind die Regeneratoren der Siemens-Martin- und anderer Industrieöfen, Winderhitzer für Hochöfen und Ljungström-Luftvorwärmer.

Generell unterscheidet man zwischen feststehenden Regeneratoren (Speichermasse wird abwechselnd vom warmen beziehungsweise kaltem Fluid durchströmt) und rotierenden Regeneratoren (Speichermasse rotiert und bewegt sich innerhalb der Fluidströme). Einsatzgebiete sind die Lüftungs- und Klimatechnik, sowie die Prozesslufttechnik.

Abbildung 23: Sorptionsregenerator



Quelle: Österreichische Energieagentur

### 7.1.2.2 Rekuperatoren

In Rekuperatoren werden die Medien getrennt aneinander vorbeigeführt und dabei Wärme von höherem Temperaturniveau auf niedrigeres Temperaturniveau transportiert. Bei den Rekuperatoren unterscheidet man nach der Strömungsrichtung der strömenden Medien:

- Gleichstromwärmeübertrager
- Gegenstromwärmeübertrager
- Kreuzstromwärmeübertrager

In der Praxis kommen diese reinen Strömungsfälle auch oft vermischt vor, so z. B. gleichzeitig Gleich- und Gegenstrom oder mehrfacher Kreuzstrom. Einsatzgebiete von Rekuperatoren sind der Anlagenbau und die Gebäudetechnik.

In der nachfolgenden Tabelle werden die verschiedenen Arten von Rekuperatoren aus physikalischer Sicht betrachtet und wie diese sich voneinander unterscheiden (Wagner, 2005).

Tabelle 8: Arten von Rekuperatoren aus physikalischer Sicht

Wärmeüberträger	Vorteile	Nachteile
<b>Gleichstrom</b>	Niedrige Wandtemperatur, Selbstbegrenzung ( $v_2''$ )	Größere Fläche bei gleicher Leistung ( $v_1'' > v_2''$ ) Temperaturerhöhung ist auf eine mittlere Temperatur begrenzt.
<b>Gegenstrom</b>	Kleinere Fläche bei gleicher Leistung ( $v_1'' > v_2''$ ) Theoretisch ist es möglich, kalten Strom auf das Temperaturniveau des warmen Stromes anzuheben.	Hohe Wandtemperatur
<b>Reiner Kreuzgegenstrom, Kreuzgegenstrom, kombinierter Strom</b>	Keine Angabe	Heiße beziehungsweise kalte Ecken

Aus konstruktiver Sicht können Rekuperatoren folgendermaßen unterschieden werden:

**Plattenwärmetauscher:** Wärmeaustausch erfolgt über parallel angeordnete, feststehende, sehr gut wärmeleitende Glas- oder Metallplatten, die wechselweise von Fort- und Außenluft durchflossen werden.

Unterschieden wird in gelötete und gedichtete Plattenwärmetauscher:

**Gelötete Plattenwärmetauscher** bestehen aus unlösbar durch Löten verbundene Platten aus Kupfer oder Nickel.

Einsatzgebiete:

- Produktkühlung oder-erwärmung
- Wärmerückgewinnung
- Kühlung und Klimatisierung
- Schwimmbecken
- Heizungstechnik
- Ölvorwärmer

Abbildung 24: Gelöteter Plattenwärmetauscher



Quelle: Fischer, o.J./Rollings, D., 2014

Vorteile:

- Kompakte Bauweise
- Einbau auf engstem Raum möglich
- Erweiterbar
- Reinigungsmöglichkeit
- Günstig

Nachteil:

- Geringe Betriebsdrücke

Abbildung 25: Gedichteter Plattenwärmetauscher



Quelle: Fischer, o.J./Rollings, D., 2014

**Gedichtete Plattenwärmetauscher** bestehen aus mit einem Rahmen zusammengehaltenen Platten, die durch Dichtungen getrennt sind.

Vorteile:

- Individuelle Anpassung möglich
- Umbau- und Erweiterung möglich (Leistungssteigerung)
- Vielzahl von Plattenprofilen
- Wartungsfreundlich

Nachteil:

- Dichtungen limitieren Einsatz bis circa 150 °C

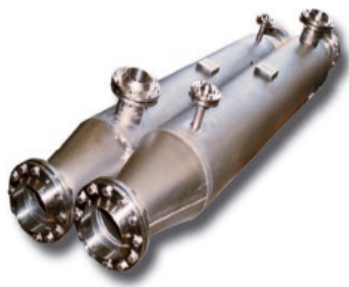
**Rohrbündelwärmetauscher:** Rohrbündel in einem Mantelraum angeordnet. Das kalte Fluid durchströmt das Rohrbündel, das heiße Fluid umströmt das Rohrbündel im Mantelraum. Einsatzgebiete sind:

- Abwasser
- Dampfkondensation
- Abgasrückgewinnung



- Luftkühlung
- Autoindustrie
- Kühlung und Klimatisierung
- Lebensmittelindustrie
- Heizungstechnik im Wohnbau
- Produktkühlung und Produkterwärmung

Abbildung 26: Rohrbündel-Wärmetauscher



Quelle: Fischer, o.J./Rollings, D., 2014

#### Vorteile:

- Hohe und tiefe Temperaturen erreichbar
- Große Durchsatzmengen
- Ausgereifte Technik
- Befriedigender Wirkungsgrad
- Befriedigendes Preis-Leistungsverhältnis
- Unempfindlich gegen Druckstöße

#### Nachteil:

- Ungeeignet für verschmutzte Medien

**Doppelrohrwärmetauscher:** In ihm strömt das eine Fluid im Innenrohr, das andere Fluid im Mantelraum. Zur Erhöhung des Wärmeübergangs kann das Innenrohr außen berippt werden.

Vorteile:

- Für Viskose Medien
- Für Medien mit Partikeln oder Fasern
- Hohe Drücke im Innenrohr möglich

Nachteile:

- Geringer Wirkungsgrad
- Geringe Wärmeübertragungsfläche

**Hybride Wärmeübertrager:** Vollverschweißte Wärmetauscher: Mantel und Innenteil sind zusammengeschweißt oder komplett verschweißte Platten. Einsatzgebiete sind:

- Hybridwärmetauscher
- Dickflüssigere Medien
- Abgasrückgewinnung
- Hoher Druck
- Chemische /Petrochemische Industrie
- Öl- und Gasindustrie
- Heizungstechnik
- Zuckerverarbeitung
- Zellstoff- und Papierindustrie

**Wärmerohr:** Ein Wärmerohr ist ein in der Mitte geteiltes Gehäuse, in dem sich mehrere Reihen von evakuierten Rohren befinden. In diesen Rohren, die zum besseren Wärmeübergang mit Rippen ausgestattet sind, befindet sich Kältemittel. Die warme Fortluft durchströmt den unteren Teil des Wärmerohrs und erwärmt dadurch das Kältemittel. Es verdampft und steigt nach oben in den kalten Außenluftstrom. Dort kondensiert es und überträgt dabei die Verdampfungswärme von der Fortluft auf die Außenluft.

Wärmerohre werden bevorzugt verwendet, wenn

- keine Feuchte übertragen werden soll,
- keine Kontamination der Außenluft stattfinden darf, oder
- bei großen Luftleistungen kleine Geräteabmessungen gefordert sind.
- Auch bei sehr hohen Temperaturen (ab circa 200 °C)

### **7.1.2.3 Mischwärmeübertrager**

Bei der Wärmeübertragung durch Mischung gelangt die Wärme von dem heißen an das kalte Fluid durch unmittelbare Berührung. Dabei geht stets gleichzeitig ein Stofftransport vor sich. Beispiele dazu sind Verdunstungskühltürme und Mischkondensatoren.

### **7.1.3 Auswahl / Dimensionierung von Wärmetauschern**

Generell sind bei der Auswahl beziehungsweise der Dimensionierung von Wärmeübertragern folgende Überlegungen anzustellen.

- Einsatzmöglichkeiten erkennen
  - Ist eine direkte Übertragung der Wärme ohne Wärmeübertrager möglich - Wärmetauscher können oftmals ein Nadelöhr bilden
  - Reicht eine Standardlösung oder braucht man auf eine Speziallösung (Je spezifischer die Anforderungen an den Wärmeübertrager, desto höher die Investitionskosten)
- Richtige Auswahl der Wärmetauscher
  - Betriebsart
  - Zukünftige Anforderungen hinsichtlich der Leistung
  - Eigenschaften des Medium (Temperaturzustände, Reinheit)
  - Materialwahl
  - Durchflussleistung, notwendige Durchgänge
- Richtige Dimensionierung
  - Wärmeanforderung, Arbeitstemperaturen, Druckabfall, Turbulenzen
  - Pumpengröße, Betriebskosten
  - Isolierung
  - Standort/Platzbedarf
  - Zugänglichkeit (Wartung)

In der Regel gilt es, die Wärmeübertragerfläche und somit die Größe des Wärmeübertragers zu bestimmen. Anhand des folgenden Beispiels kann man erkennen, dass die Fläche im Wesentlichen von der zu überwindenden Temperaturdifferenz abhängt ist (Formel vergleiche Abschnitt 7.1.1). Dabei gilt: Je geringer die Temperaturdifferenz, desto größer die erforderliche Wärmeübertragerfläche.

Variante 1:

- Vor- und Rücklauf Primärseite [°C]: 70/60
- Temperaturdifferenz [K]: 32,12
- Fläche [m<sup>2</sup>]: 0,35

Abbildung 27: Wärmetauscher Variante 1



Quelle: Fischer, o.J

Variante 2:

- Volumenstrom Primär- und Sekundärseite [m<sup>3</sup>/h]: 5
- Leistung [kW]: 56,4 bis 57,7
- Vor- und Rücklauf Sekundärseite [°C]: 28/37,75
- Vor- und Rücklauf Primärseite [°C]: 45/35
- Temperaturdifferenz [K]: 7,02
- Fläche [m<sup>2</sup>]: 1,84

Abbildung 28: Wärmetauscher Variante 2



Quelle: Fischer, o.J

### Variante 3

- Vor-und Rücklauf Primärseite [°C]: 40/30
- Temperaturdifferenz [K]: 2,01
- Fläche [m<sup>2</sup>]: 8,46

Abbildung 29 : Wärmetauscher Variante 3



Quelle: Fischer, o.J

In der Detailplanung geht es bei Wärmeübertragern insbesondere um die Optimierung des Wärmedurchgangskoeffizienten. Dieser wird vorwiegend durch den Wärmeübertragungskoeffizienten bestimmt. Dieser bewegt sich in der Regel in der folgenden Bandbreite.

Tabelle 9: Wärmeübertragungskoeffizienten

Art	Wärmeübertragungskoeffizient (W/m <sup>2</sup> K)
Freie Konvektion Gase	1 bis 60
Erzwungene Konvektion Gase	10 bis 250
Wasser freie Konvektion	300 bis 600
Wasser erzwungene Konvektion	500 bis 2.500
Filmkondensation	5.000 bis 15.000
Blasenverdampfung	2.500 bis 50.000

Ein weiteres zentrales Kriterium ist auch der mögliche Verschmutzungsgrad durch verschiedene Medien (vergleiche Tabelle 10). Der Verschmutzungsfaktor reduziert den Wärmedurchgang und muss bei der Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten berücksichtigt werden (vergleiche Abschnitt 7.1.1).

Tabelle 10: Verschmutzungsfaktoren ausgewählter Medien

Medien	Verschmutzungsgrad
Meerwasser	0,0001 bis 0,0002
Fluss- oder Kühlturmwasser	0,0002 bis 0,0004
Abwasser	0,0005 bis 0,001
Kondensat	0,0001 bis 0,0002
Wärmeträgeröl	0,0002
Wasserdampf	0,0001
Luft	0,0004
Organische Dämpfe	0,0002

Bei der Dimensionierung von Wärmeübertragern muss auch die Isolierung berücksichtigt werden. Auch diese muss im für den Anwendungsfall richtig dimensioniert werden (zu beachten: Temperaturniveau, Kondensation, Spezialanfertigung versus Standardlösungen).

#### **7.1.4 Investitionskosten**

Die Investitionskosten sind in erster Linie von

- der Bauart des Wärmeübertragers,
- der Fläche (Leistung),
- dem Material,
- den Wärmeträgermedien,
- der eingesetzten Dichtung,
- dem Druck und Temperaturanforderung im System und
- dem Gestell

abhängig. Wärmeübertrager werden meist auf spezielle Anwendungsfälle hin konzipiert und kalkuliert, wodurch Preislisten selten vorliegen.

Im **Anhang Wärmetauscherkosten** sind Informationen zu Wärmetauscherkosten angeführt.

#### **7.1.5 Informationen für Analyse**

Für die Analyse des Prozesses sind folgende Informationen erforderlich:

Primärseite:

- Medium Primärseite
- Temperatureintritt
- Temperature Austritt
- Betriebsdruck
- Druckverlust
- Massenstrom

Sekundärseite:

- Medium Sekundärseite
- Temperatureintritt
- Temperature Austritt
- Betriebsdruck
- Druckverlust
- Massenstrom

Im Anhang „Mustervorlagen für Audits zur Abwärmenutzung finden Sie unter Punkt 1.5 eine Excel-Vorlage, in die Sie die notwendigen Daten für Wärmeübertrager eintragen können.

Abbildung 30: Erforderliche Informationen für die Datenweitergabe an den Wärmetauscherlieferanten am Beispiel eines Herstellers

Projekt:		
Leistung: <input type="text"/> kW		
<input type="text"/> Betriebsdruck bar Medium – Primärseite		<input type="text"/> Betriebsdruck bar Medium – Sekundärseite
<input type="text"/> Temp Aus °C		<input type="text"/> Temp Ein °C
<input type="text"/> Druckverlust kpa		<input type="text"/> Druckverlust kpa
<input type="text"/> Temp Ein °C		<input type="text"/> Temp Aus °C
<input type="checkbox"/> Gelöteter PWT	<input type="checkbox"/> Gedichteter PWT	<input type="checkbox"/> Sonstiger
Isolierung:	<input type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nein

Quelle: UNEX HEATEXCHANGER Engineering GmbH



## 7.2 Warmwasserspeicher

In dem folgenden Abschnitt sind die wesentlichen Informationen zu Warmwasserspeichern beschrieben.

### 7.2.1 Physikalische Grundlagen

(Warmwasser-)Speicher werden dazu verwendet, Energie aus Abwärmeströmen zu speichern und zu einem späteren Zeitpunkt wieder abzugeben. Dies ermöglicht die Entkoppelung von der Erzeugung vom Verbrauch. Von zentraler Bedeutung ist dabei die (spezifische) Wärmekapazität der Wärmespeichermaterialien. Wie in der folgenden Tabelle dargestellt, eignet sich Wasser als Speichermedium besonders gut.

Tabelle 11: Spezifische Wärmekapazität ausgewählter Medien

Medium	Temperaturbereich [°C]	Spezifische Wärmekapazität [Wh/kg K]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]
Wasser	0 bis 100	1,16	998
Luft	-273 bis >1.000	0,28	1,1
Öl	0 bis 400	0,44 bis 0,5	800 bis 900
Kies, Sand	0 bis 800	0,2	1.800 bis 2.000
Salzschmelzen	150 bis 450	0,36	2.561 bis 2.243

### 7.2.2 Arten

Generell unterscheidet man zwischen thermischen und chemischen Speichern. Für die Abwärmenutzung sind vorwiegend die thermischen Speicher von Interesse. Diese lassen sich wiederum in Speicher mit fühlbarer Wärme (Wasserspeicher beziehungsweise Gesteinsspeicher) oder in Speicher mit latenter Wärme (fest-flüssig beziehungsweise flüssig-gasförmig) unterscheiden. In der Industrie werden aber vorwiegend Wasserspeicher genutzt.

### 7.2.3 Auswahl und Dimensionierung

Zunächst sind die Betriebszeiten der Wärmequellen und -senken zu ermitteln.

Daraus ist ersichtlich, ob man überhaupt einen Speicher benötigt. Ein Speicher ist nicht sinnvoll, wenn die Wärmequelle und -senke gleiche Betriebszeiten haben und die Wärmesenke einen geringeren Leistungsbedarf hat als die Wärmequelle abgeben kann.

Das heißt, man simuliert oder misst den stündlichen Wärmebedarf und die verfügbare Abwärme. Daraus errechnet man die Differenz von Wärmebereitstellung und Wärmebedarf. Bei positivem Ergebnis ist die mögliche Bereitstellung größer, der Speicher könnte geladen werden (z. B. in der Nacht). Bei negativem Ergebnis ist der Bedarf höher als die Bereitstellung, der Speicher müsste entladen werden (z. B. in der Früh).

- Wenn die verfügbare Abwärme größer als der Wärmebedarf für eine Woche ist, gibt der Wärmebedarf die maximale Speichergröße vor.
- Wenn die verfügbare Abwärme kleiner ist als der Wärmebedarf für eine Woche, so gibt der Wärmebedarf die notwendige, maximale Speichergröße vor (Fluch, Brunner 2013).

Generell kann die speicherbare Energiemenge folgendermaßen berechnet werden:

Abbildung 31: Formel zur Berechnung der speicherbaren Energiemenge

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T + m \cdot L_f + m \cdot L_v$$

Q ... Speicherfähigkeit [kJ]	Werte für Wasser
m... Masse [kg]	$c_p = 4,18 \text{ kJ/kg K}$
$c_p$ ... spezifische Wärmekapazität [kJ/kg K]	$L_f = 333,7 \text{ kJ/kg}$
$\Delta T$ ... Temperaturdifferenz [K]	$L_v = 2.258 \text{ kJ/kg}$
$L_f$ ... Schmelzwärme [kJ/kg]	
$L_v$ ... Verdampfungswärme [kJ/kg]	

Ein sehr wichtiges Kriterium bei der Speicherauslegung ist die Platzverfügbarkeit: Bei notwendigen Umbauarbeiten im Baubestand aufgrund der erforderlichen Speichergröße erhöhen sich die Kosten, ab circa 10 m<sup>3</sup> Speichergröße sind auch Spezialtransporte notwendig.

Speicher Cascaden aus kleineren Einzeltanks erleichtern diesen Punkt, haben aber folgende Nachteile (Wilhelms, 2009):

- Höhere Kosten
- Komplexe hydraulische Einbindung
- Aufwendige Montage
- Höhere Wärmeverluste
- Höherer Raumbedarf

### 7.2.4 Dämmung

Je nach Wärmedämmmaterial erhöht sich das Bruttospeichervolumen. In untenstehender Tabelle sind für einen zehn Quadratmeter umfassenden und drei Meter hohen Speicher und einen anzustrebenden U-Wert von  $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$  die sich ergebenden Bruttospeichervolumina je nach Dämmmaterial angegeben.

Tabelle 12: Bruttospeichergröße in Abhängigkeit des Dämmmaterials (Speicher  $10 \text{ m}^3$ , 3 m hoch)

Material	Erforderl. Dämmstärke (für U-Wert $0,2 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ )	Bruttospeichergröße
VIP (Vakuum Isolations Paneele)	2,5 cm	circa $11 \text{ m}^3$
PU-Hart	12,5 cm	circa $13 \text{ m}^3$
EPS, XPS, Mineralwolle	20,0 cm	circa $16 \text{ m}^3$

Quelle: Wilhelms, 2009

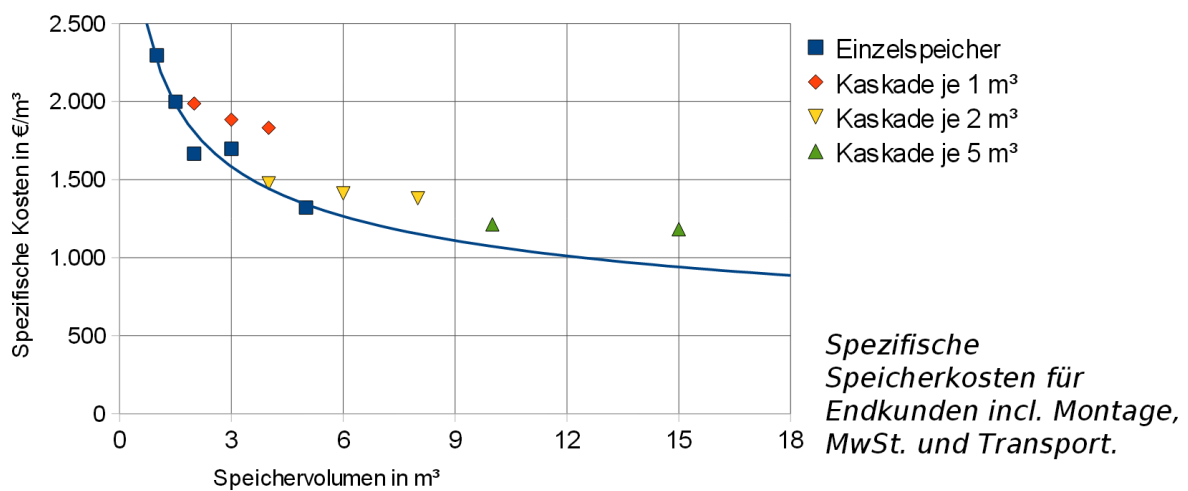
Um die Wärmeverluste von Speichern zu begrenzen, sind neben dem Speicher selbst aber auch die Füße und Anschlüsse und die Zu- und Ableitungen zu isolieren.

### 7.2.5 Kostenbewertung

Die Kosten der über den Speicher zusätzlich wieder nutzbaren Wärme muss (beispielsweise über zehn Jahre) größer sein als die Investitionskosten, damit sich ein Speicher auszahlt.

Bei der Bestimmung der nutzbaren Wärme sind auch die Speicherverluste zu berücksichtigen: Diese sind abhängig von der Oberfläche, dem U-Wert und der Temperaturdifferenz. Zur Bestimmung der Temperaturdifferenz kann vereinfacht von einer Durchschnittstemperatur ausgegangen werden, im Detail müsste diese Bewertung über stündliche Simulation (mit eigenen Softwareprogrammen) erfolgen.

Abbildung 32: Spezifische Speicherkosten, inklusive Montage, Mehrwertsteuer und Transport



Quelle: Wilhelms, 2009

### 7.2.6 Informationen aus Analyse

Für die Analyse von bestehenden Speichern sind folgende Informationen erforderlich.

- Speichervolumen
- Vorlauftemperatur Speicherladung
- Rücklauftemperatur Speicherladung
- Vorlauftemperatur Speicherentnahme
- Rücklauftemperatur Speicherentnahme

Im Anhang „Mustervorlagen für Audits für Abwärmenutzung“ finden Sie unter Punkt 1.6 eine Excel-Vorlage, in die Sie die notwendigen Daten für die Analyse eintragen können.

## 7.3 Wärmepumpen

Hier sind die wesentlichen Informationen zu Wärmepumpen (Kompressionswärmepumpe, thermische und mechanische Brüdenverdichter und Absorptionswärmepumpen) beschrieben.

Der Vorteil von Wärmepumpen ist, dass sie das Temperaturniveau von Abwärmeströmen anheben und damit Ströme mit vorher nicht nutzbarem Temperaturniveau weiter genutzt werden können.

Weitere Einsatzbereiche ergeben sich daraus, dass ein größerer Abstand zwischen Wärmesenke und Wärmequelle vorhanden sein kann. Zum stabilen Betrieb der Wärmepumpe können allerdings große Wärmespeicher, um schwankende Temperaturen abfangen zu können, erforderlich sein.

Häufigste **Wärmequellen** für Wärmepumpen:

- Kühlwasser
- Abwasser
- Kondensat
- Dampf, Brüden
- Abwärme aus Verflüssigern von Kälteanlagen
- Abluft
- Abwärme aus Serverräumen
- Prozessströme

Häufigste **Anwendungsgebiete** für Wärmepumpen:

- Raumheizung
- Brauchwasser
- Wassererwärmung für Waschanlagen und zu Reinigungszwecken
- Dampfproduktion
- Trocknung, Entfeuchtung
- Verdampfung
- Destillation
- Konzentration
- Bereitstellung von Fern- und Nahwärme

Eine vom AIT durchgeführte Studie analysierte die Quellen und Senken von 68 derzeit in Österreich in Betrieb stehenden Wärmepumpen:

- Die gebräuchlichsten Wärmequellen sind Prozesse, die gekühlt werden müssen, und Abwärmeströme, denen noch Wärme entzogen werden kann. Darüber hinaus wird die Abwärme von Kältemaschinen und Druckluftanlagen sowie die Rauchgaskondensation genutzt.
- Industrielle Wärmepumpen werden am häufigsten zur Beheizung von Gebäuden (33 Beispiele) oder zur Bereitstellung von Fernwärme (19 Beispiele) eingesetzt. Wärmebereitstellung für Prozesse erfolgt in 13 Beispielen. (Wilk et alii, 2020)

### 7.3.1 Anwendungsgebiete industrieller Wärmepumpen

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über Einsatzgebiete von Wärmepumpen in Produktionsbetrieben.

Nutzung **Niedertemperatur-Abwärme (bis 30 °C)** zur Bereitstellung von Raum- und Prozesswärme: Insbesondere bei mechanischen Prozessen oder Kühlprozessen in der Chemie-, Pharma- und Lebensmittelindustrie (inklusive Molkereien) ist Niedertemperatur-Abwärme, die mit konventionellen Wärmetauschern nicht mehr verwendet werden kann, in großen Mengen ungenützt vorhanden. Durch den Einsatz von Kompressionswärmepumpen kann Niedertemperatur-Abwärme (bis 30 °C) aus industriellen Prozessen für Raum- und Prozesswärme (bis 98 °C) genutzt werden. (Ochsner, 2014)

Nutzung von **Mitteltemperatur-Abwärme (35 °C bis 55 °C)**: Aus dem Rauchgas (Heizwerke), aus dem Rücklauf von Fernwärmenetzen, chemischen und petrochemischen Prozessen sowie Kraftwerksprozessen aber auch aus Kühlwasser (z. B. aus Kunststoffspritzmaschinen), Abwasser und Waschwasser können Wärmeströme von 35 °C bis 55 °C von Kompressionswärmepumpen genutzt und auf Vorlauftemperaturen von bis zu 98 °C zur Erzeugung von Prozesswärme oder Fernwärme bis 98 °C wirtschaftlich gehoben werden. Dabei können COPs von 4,6 (Wasser 45 °C/Wasser 85 °C) realistisch angenommen werden. (Ochsner, 2014)

**Heißwassererzeugung bis 130 °C**: Für Lebensmittelindustrie, Molkereien, Schlachthöfe, Getränkeindustrie, unter anderem kann aus Prozessabwärme Heißwasser über Kompressionswärmepumpen bereitgestellt werden. (Ochsner, 2014)

Erwärmen von Prozesswasser über **Abwärme aus Kälteanlage**: Viele Industriezweige, insbesondere die Lebensmittelbranche, benötigen warmes Prozesswasser und Warmwasser zu Reinigungszwecken im Temperaturbereich von 40 °C bis 90 °C. Gleichzeitig müssen Produkte für den Transport gekühlt oder gefroren werden. Am häufigsten werden hier geschlossene Kompressionswärmepumpen genutzt. Abwärme aus der Kälteanlage hat einen **Temperaturbereich von 25 °C bis 30 °C**. Mit einer Kompressionswärmepumpe kann dies auf ein Temperaturniveau von bis zu 98 °C gehoben werden und gleichzeitig Kühltürme und Verflüssigerflächen ersetzt werden. (Ochsner, 2014)

Außerdem kann diese Wärmepumpe direkt an den Kältemittelkreislauf angeschlossen werden und durch weitere Verdichtung die Kältemitteltemperatur auf 80 °C erhöhen.

Die zu Verfügung stehende Leistung entspricht der dem Produkt abgeführten Wärme plus der elektrischen Leistung des Kältekompressors.

**Trocknung:** Wärmepumpen werden häufig in industriellen Entfeuchtungs- und Trocknungsprozessen bei Temperaturen bis maximal 100 °C eingesetzt (technisch sind mittlerweile auch höhere Temperaturen möglich). Die häufigsten Anwendungsgebiete sind Trocknung von Zellstoff und Papier, Lebensmittelprodukte und Holz. Wärmepumpentrockner haben COPs von fünf bis sieben und können die Qualität der Produkte erhöhen.

Zur Trocknung wird in den meisten Fällen über verschiedenen Medien aufgewärmte heiße Luft über das feuchte Produkt zirkuliert. Die feuchte, warme Luft wird dann teilweise abgeführt und teilweise mit vorgewärmter, trockener Frischluft vermischt und auf die gewünschte Trockentemperatur aufgeheizt.

Mit dem Verdampfer der Wärmepumpe kann dieser Abluft die Wärme entzogen werden, dabei wird die Abluft abgekühlt und entfeuchtet und die Luft kann dem Prozess wieder zugeführt werden. Über den Verflüssiger wird der Trockner beheizt.

Theoretisch kann daher der Trockner in einem geschlossenen System ausgeführt werden, was zu geringerer Geruchsbelastung führt. Praktisch werden auch Wärmepumpentrockner mit Zu- und Abluft ausgeführt. Zu diesem Zweck werden geschlossene Kompressionswärmepumpen und Brüdenverdichter eingesetzt. (De Kleijn)

**Verdampfung und Destillation:** Die meisten Wärmepumpen für diese Prozesse sind in der chemischen Industrie und in der Lebensmittelindustrie installiert. Bei Verdampfungsprozessen ist das eingedampfte Produkt das Hauptprodukt, während der Dampf (das Destillat) das Hauptprodukt bei Destillationsprozessen ist. Bei diesem Prozess werden halboffene Brüdenverdichter und geschlossene Kompressionswärmepumpen eingesetzt. Aufgrund des geringen Temperaturhubs sind COPs von 6 bis 30 möglich.

**Pasteurisierung:** Zur Pasteurisierung muss ein Produkt auf 70 °C erhitzt werden. Danach wird das Produkt wieder abgekühlt. In den meisten Pasteurisierungsprozessen ist daher bereits ein Wärmetauscher zwischen dem kalten und dem warmen Produktstrom eingebaut, das kalte Produkt vor der Pasteurisierung kühlt das warme Produkt nach der Pasteurisierung. Die zusätzliche Vorwärmung und Abkühlung erfolgt über Dampf und Kaltwasser. Eine Wärmepumpe kann hier eingesetzt werden. Dabei erhöht die Wärmepumpe die Verflüssigungstemperatur des Kältemittels von 25 °C bis 30 °C auf über 80 °C. Über diese Temperatur kann dann mit der am Verflüssiger abgegebenen Wärme der Pasteur erhitzt werden. Nach Kondensation und Druckreduktion im Expansionsventil wird das Kältemittel wieder in die Kälteanlage rückgeführt. (De Kleijn)

**Waschprozesse:** In industriellen Waschprozessen wird Heißwasser mit Lösemittel vermischt und über einem Produkt versprüht. Das Waschwasser wird über einen Wärmetauscher, der über ein konventionelles Heizsystem erwärmt wird, geführt. Über einen Ventilator wird das Wasser unter Druckerhöhung über das Produkt gesprüht. Ein Teil des Waschwassers verdampft, der größte Teil des Wassers wird aber im Kreislauf, also zunächst wieder in den Wassertank geführt. Viele Anlagen haben einen Ventilator zum Abzug des feuchten Dampfes, damit der Dampf nicht aus der Waschanlage unkontrolliert entweicht. Dieser Luftabzug stellt einen Unterdruck in der Maschine ein und bläst feuchte, warme Luft (z. B. 45 °C bei 95 % relativer Feuchte) in die Umgebung. Der Verdampfer einer Wärmepumpe kann die Temperatur der ausgehenden Luft auf unter den Taupunkt (35 °C und 100 % Restfeuchte) abkühlen (Wärmepumpenrücklauf 30 °C) und mit dem Verflüssiger über eine Vorlauftemperatur von 65 °C bis 70 °C das Wasser direkt erwärmen oder vorwärmen.

Parameter zur Beurteilung sind: Ein- und Ausgangstemperatur des Produkts, Menge des ausgehenden Wasserdampfes und die Wärmeverluste über die Oberfläche der Waschanlage. (De Kleijn)



**Dampferzeugung:** Hochtemperatur Wärmepumpen können Dampf bis zu einer Temperatur von 150 °C erzeugen. Dazu können halboffene und offene Brüdenverdampfer und geschlossene Kompressionswärmepumpen genutzt werden.

### 7.3.2 Überblick Arten von industriellen Wärmepumpen

Tabelle 13: Überblick über Arten von industriellen Wärmepumpen und ihren Eigenschaften

Art der Wärmepumpe	Quellentemperatur	Vorlauftemperatur	Maximale Temperaturerhöhung pro Stufe	Häufige COPs	Kosten inklusive Installation*
<b>Kompressions-Wärmepumpe (elektrisch)</b>	8 °C bis 100 °C	65 °C bis 98 °C (Spezialanfertigung: 120 °C)	50 °K	2,5 bis 5 (6)	250 EUR/kW <sub>th</sub> bis 700 EUR/kW <sub>th</sub>
<b>Mechanische Brüdenverdichter</b>	70 °C bis 80 °C	110 °C bis 150 °C (maximal 190 °C)	Einstufige Ventilatoren: 6 °K Zweistufige Ventilatoren 12 °K Einstufiger Radialkompressor: 12 °K bis 18 °K, maximal 30 °K	7,3 (10 bis 30)	135 EUR/kW <sub>th</sub> bis 450 EUR/kW <sub>th</sub>
<b>Thermische Brüdenverdichter</b>	0,1 barü bis 0,5 barü	Bis 200 °C	20 K	1,5	100 EUR/kW <sub>th</sub> bis 270 EUR/kW <sub>th</sub>
<b>Absorption WP (Typ I)</b>	20 °C bis 90 °C	65 °C bis 100 °C	50 °K	1,3 bis 1,6	400 EUR/kW <sub>th</sub> bis 1100 EUR/kW <sub>th</sub>
<b>Absorption WP (Typ II)</b>	Nicht angegeben	150 °C	60 °K	0,45	Nicht angegeben

Quelle: SAENA, o.J., IEA Heat Pump Center, GEA Wiegand, o.J., Wolf, 2017

COP: Leistungszahlen sind von den Einsatztemperaturen abhängig, in der Tabelle sind für einen Überblick erreichbare COP-Bereiche angeführt; Installationskosten sind bei Wärmepumpen sehr stark von den erforderlichen Umbauten im Wärmesystem abhängig.

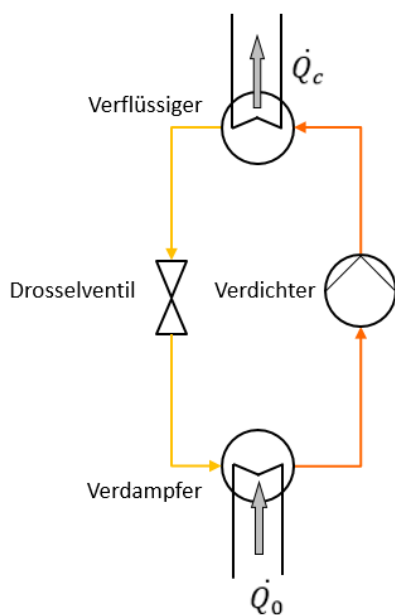
## 7.3.3 Kompressionswärmepumpen

### 7.3.3.1 Physikalische Grundlagen

Eine Wärmepumpe besteht prinzipiell aus den folgenden Bauteilen (vergleiche Abbildung 33):

- **Verdampfer:** Im Verdampfer wird Abwärme direkt oder indirekt auf das (flüssige) Kältemittel übertragen, welches in weiterer Folge verdampft.
- **Verdichter:** Im Verdichter wird das (kalte) dampfförmige Kältemittel verdichtet und dadurch auf ein höheres Temperaturniveau gehoben. Der Verdichter wird mittels elektrischer Energie angetrieben.
- **Kondensator:** Im Kondensator erfolgt die Wärmeübertragung vom Heißgas (dampfförmigen Kältemittel) auf die Wärmesenke. Das Kältemittel wird dabei wieder flüssig.
- **Expansionsventil (Drossel):** Im Expansionsventil wird der Druck gesenkt, wodurch die Temperatur des Kältemittels abnimmt. Dadurch kann das Kältemittel wieder Abwärme aufnehmen.

Abbildung 33: Wärmepumpenkreislauf



Quelle: Lambauer, 2014, Darstellung: Österreichische Energieagentur

Von industriellen Wärmepumpen spricht man ab 100 kW Leistung. Typische Leistungszahlen liegen beispielsweise bei COP 2,4 bis 6. Generell nimmt der COP mit Zunahme der Temperaturerhebung ab, daher ist auf einen geringen Temperaturhub zu achten.

Für hohe Temperaturhübe sind zweistufige Wärmepumpen notwendig. Diese haben höhere Leistungszahlen, aber höhere spezifische Investitionskosten. Die maximal nutzbaren Wärmequellentemperaturen und erreichbaren Vorlauftemperaturen sind von der Art des genutzten Kältemittels (und des Druckniveaus) abhängig.

Tabelle 14: Temperaturniveaus von Wärmequellen und Vorlauftemperaturen von Kompressionswärmepumpen

Art der Anlagen	Wärmequellen-temperaturbereich	Vorlauftemperatur max.	Beispiele für Leistungszahlen
<b>Einstufiger Kältekreis</b>	35 °C bis 55 °C	95 °C bis 130 °C bei niederen Wärmequellentemperaturen: 65 °C bis 75 °C	COP: 3 bis 5 W 40 °C/W 80 °C: COP 4,6
<b>Zweistufiger Kältekreis</b>	8 °C bis 25 °C	95 °C bis 130 °C	W 10 °C/W 85 °C: COP 2,5
<b>Sonderanlagen</b>	Nicht angegeben	120 °C bis 140 °C	Nicht angegeben

Quelle: Ochsner, 2014

Kriterien zum Einsatz von Wärmepumpen:

- Keine Möglichkeit der direkten Nutzung der Abwärme oder Einsatz von Wärmetauschern
- Gleichzeitiges Kühlen und Heizen notwendig
- Es gibt Wärmeströme im Bereich von 70 °C und darüber, die gekühlt werden müssen
- Es gibt Wärmeströme, die von Umgebungstemperatur auf 70 °C bis 100 (120) °C aufgewärmt werden müssen
- Hohe Energiepreise allgemein
- Hohe Preise für thermische Energie, niedrige Preise für elektrische Energie
- Die Temperaturdifferenz (Hub) bezogen auf die Prozessmedien soll 50 K nicht überschreiten

- Hohe Betriebszeiten
- Hohe gleichmäßige Wärmequellentemperatur
- Zeitliche Übereinstimmung der Wärmequellen und -senken (U. S. DOE, 2003)

### 7.3.3.2 Auswahl und Dimensionierung

Bei der Dimensionierung einer Wärmepumpenheizungsanlage ist der erste Schritt die Analyse der Wärmequelle. Dabei sollen Temperaturen, Massenstrom, Laufzeiten, zeitliche Verfügbarkeit, räumliche Verhältnisse und mögliche Verunreinigungen überprüft werden.

In einem nächsten Schritt muss der Wärmebedarf und das Nutzerverhalten analysiert werden. Um hohe Anlagenkosten und kurze Laufzeiten zu vermeiden, ist eine möglichst genaue Kenntnis dieser beiden Parameter von zentraler Bedeutung. Generell gilt: Je geringer die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke, desto wirtschaftlicher kann die Anlage betrieben werden.

### 7.3.3.3 Bestimmung übertragene Wärmemenge, Temperaturniveaus

Die Effizienz einer Wärmepumpe kann mit Hilfe der Leistungszahl - Coefficient of Performance; COP - beschrieben werden. Diese zeigt das Verhältnis zwischen der abgegebenen Wärmeleistung und der aufgenommenen elektrischen Leistung, gemessen unter normierten Prüfungsbedingungen.

Abbildung 34: Formel zur Bestimmung der übertragenen Wärmemenge

$$COP = \frac{P_c}{P_{el}}$$

COP... Leistungszahl [ ]

P<sub>c</sub>... Leistung am Kondensator [W]

P<sub>el</sub>... Aufgenommene elektrische Leistung [W]

In folgenden Annahmen wird vereinfacht die Leistung der Wärmepumpen über die Laufzeiten als konstant angenommen. Dies kann bei Prozesswärmepumpen der Fall sein. Zunächst ist die über die Wärmepumpe übertragene Wärmemenge zu bestimmen. Die

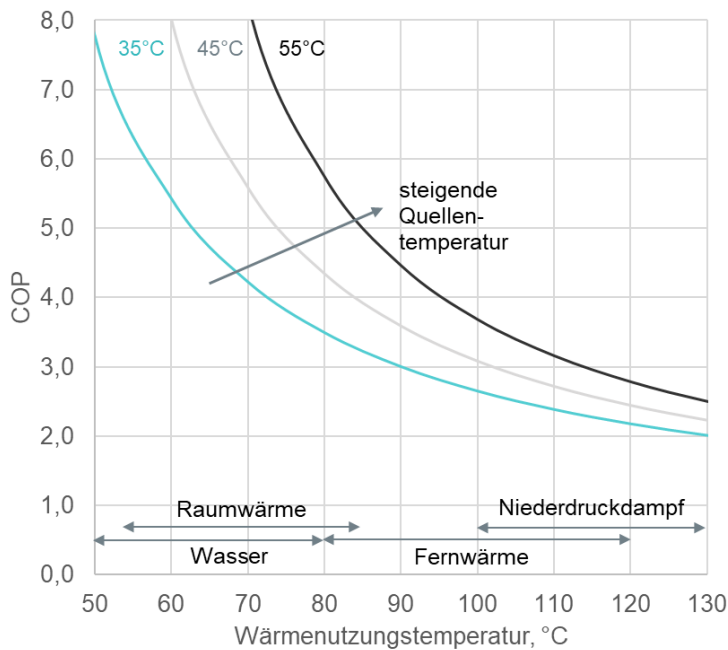
gelieferte Wärmemenge ergibt sich aus dem Temperaturverhältnis der zu verknüpfenden Ströme

- Zu bereitstellende Wärmeleistung am Kondensator ist gegeben ( $Q_c$ ), die Wärmesenke stellt die Begrenzung für die zu übertragene Wärme dar
- Wärmeleistung am Verdampfer ( $Q_o$ ) ist gegeben, die Wärmequelle stellt die Begrenzung für die zu übertragene Wärme dar

Zunächst ist näherungsweise die Leistungszahl über die Temperaturniveaus zu bestimmen.

Eine grobe Bestimmung kann über folgende Grafik erfolgen. Dieser Grafik liegen folgende Annahmen zugrunde: Quellen werden um 10 K abgekühlt, der Gütegrad der Wärmepumpe beträgt 50 %. Die Verdampfungstemperatur entspricht der Quellenaustrittstemperatur - 3K, die Kondensationstemperatur entspricht der Senkenaustrittstemperatur + 3K.

Abbildung 35: Leistungszahl (COP) von Kompressionswärmepumpen in Abhängigkeit der Quellentemperatur und Nutzutemperatur



Quellen: Veronika Wilk, AIT, Wärmepumpen, Abwärmenutzung. Effizienzsteigerung, klimaaktiv Abwärmeschulung 2020

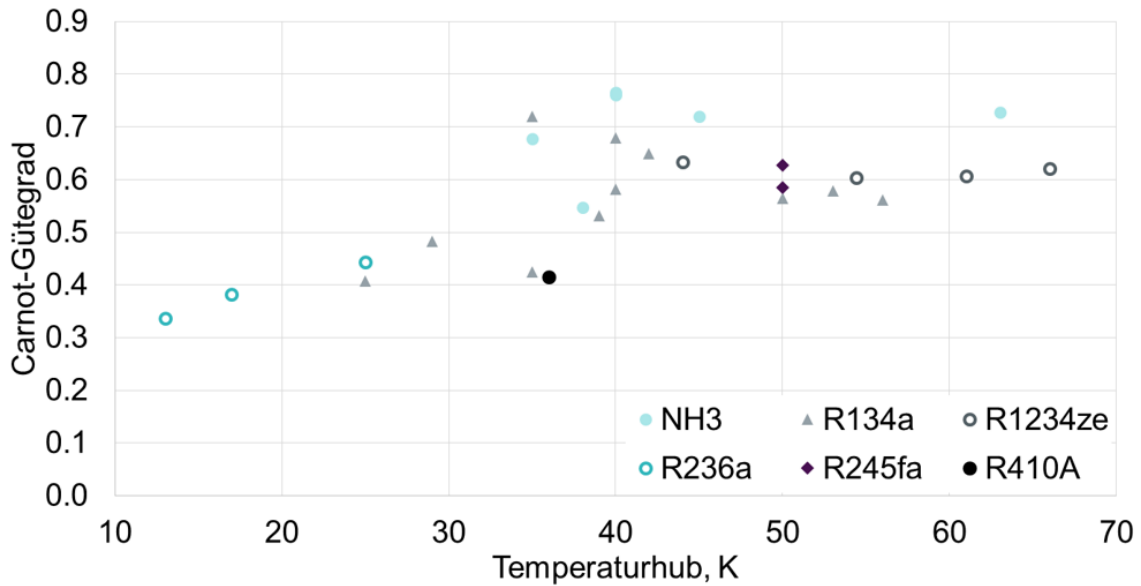
Eine nähere Bestimmung kann mithilfe folgender Formel und nachstehender Grafik erfolgen.

Abbildung 36: Formel zur Bestimmung der Leistungszahl über die Temperaturniveaus

$$COP = \frac{T_c}{T_c - T_o} * \eta_c$$

$T_c$	Verflüssigungstemperatur in [K] (Temperatur des Kältemittels = gewünschte Prozessmediumstemperatur der Wärmesenke nach Verflüssiger + 3 K)
{Equation.3}	Verflüssigungstemperatur in [K] (Temperatur des Kältemittels = gewünschte Prozessmediumstemperatur der Wärmesenke nach Verflüssiger + 3 K)
$\eta_c$	Gütegrad: Siehe nachstehende Grafik, Herstellerangabe oder vereinfacht: 0,5
COP	Leistungszahl

Abbildung 37: Gütegrad realer Anlagen in Abhängigkeit des Kältemittels und Temperaturhubes



Formel dazu:

$$(\Delta T_{hub} = t_{sink,out} - t_{source,out})$$

Quelle: V. Wilk et alli, Industrierärmepumpen in Österreich: Status Quo und Potential, 11. Internationale Energiewirtschaftstagung, Wien, 2019

### 7.3.3.4 Bestimmung elektrische Leistung

Im ersten Fall - maximal verwendbare Wärmeleistung (Wärmesenke) bekannt - kann die erforderliche elektrische Leistung (Arbeit) bestimmt werden.

Abbildung 38: Formel zur Bestimmung der elektrischen Leistung - erster Fall

$$P_{el} = \frac{Q_c}{COP}$$

$P_{el}$  elektrische Leistungsaufnahme Wärmepumpe [kW]

$Q_c$  abgegebene Wärmeleistung über Wärmepumpe an Wärmesenke [kW]

$COP$  Leistungszahl

Im zweiten Fall – die Wärmequelle ist bekannt und kann zu 100 % genutzt werden - kann die erforderliche elektrische Leistung (Arbeit) bestimmt werden.

Abbildung 39: Formel zur Bestimmung der elektrischen Leistung - zweiter Fall

$$P_{el} = \frac{Q_o}{(COP - 1)}$$

$P_{el}$  ...elektrische Leistungsaufnahme Wärmepumpe

$Q_o$  ...zugeführte Wärmeleistung über Wärmequelle [kW]

### 7.3.3.5 Energiekosteneinsparung

Die Kosteneinsparung über die Nutzung einer Wärmepumpe ergibt sich dann aus (nach U. S. DOE, 2003):

Abbildung 40: Formel zur Berechnung der Kosteneinsparung über die Nutzung einer Wärmepumpe

$$\Delta EK = (Q_c \times LZ \times K_{th}) - (P_{el} \times LZ \times K_{el})$$

$\Delta EK$  ... Energiekosteneinsparung (pro Jahr) [EUR/a]

$Q_c$  ... abgegebene Wärmeleistung über Wärmepumpe an Wärmesenke [kW]

$LZ$  ... Laufzeit der Wärmepumpe in Stunden pro Jahr [h]

$K_{th}$  ... Kosten der thermischen Nutzenergie [EUR/kWh] (Wärme, die direkt über die Wärmepumpe übertragen wird muss nicht erzeugt und verteilt werden, dies ist abh. von der Anwendung z.B.  $K_{th} = \text{Gaspreis}/0,75$  mit 0,75 als Wirkungsgrad Kessel mal Wirkungsgrad Wärmeverteilung)

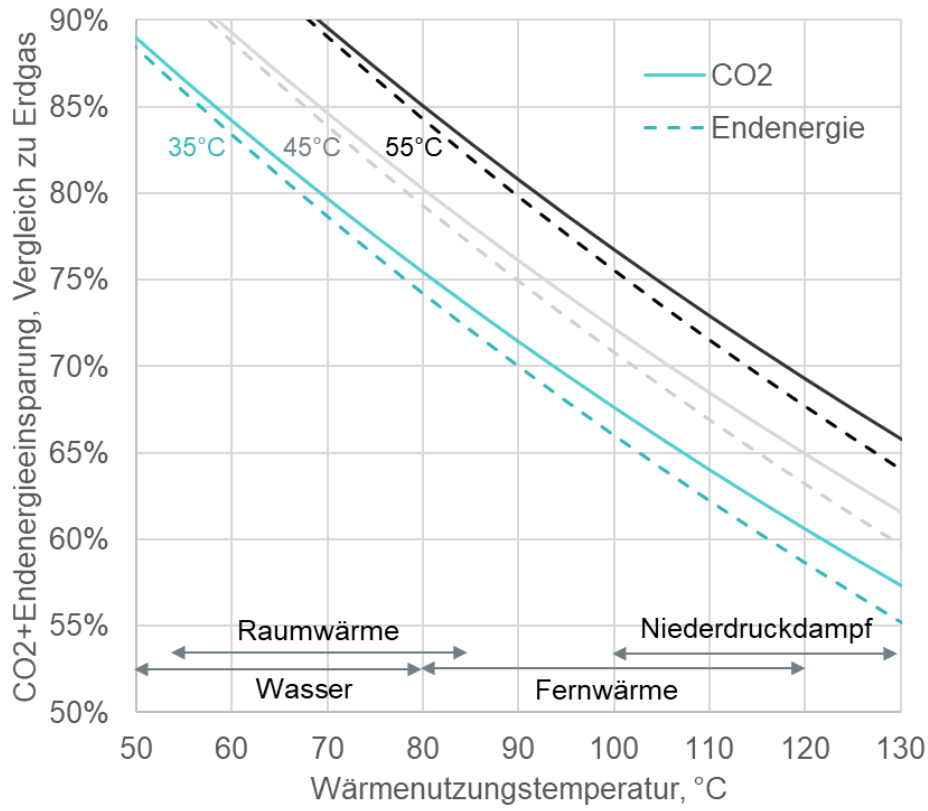
$K_{el}$  ... Stromkosten [EUR/kWh]

Nachstehend finden sich zwei Abbildungen zur Einsparung von Endenergie, CO<sub>2</sub>-Emissionen und Energiekosten. Diesen Abbildungen liegen folgende Annahmen zugrunde:

Als Endenergie wurden für den Wärmepumpenbetrieb Strom, für die Gaskessel Erdgas angenommen. Für die CO<sub>2</sub> Emissionen wurden folgende Emissionsfaktoren, die auch die Vorkette der Verarbeitung et cetera enthält angenommen: Gas: 271 g/kWh, Strom: 258 g/kWh. Für die Kosten: Stromkosten: 11,34 ct/kWh, Gaskosten: 3,56 ct/kWh (Stand 2019). Weitere Annahmen sind: 8.000 Volllaststunden für den Betrieb der Wärmepumpe und für den Wirkungsgrad des Gaskessels:  $\eta_{gas}=90\%$ .

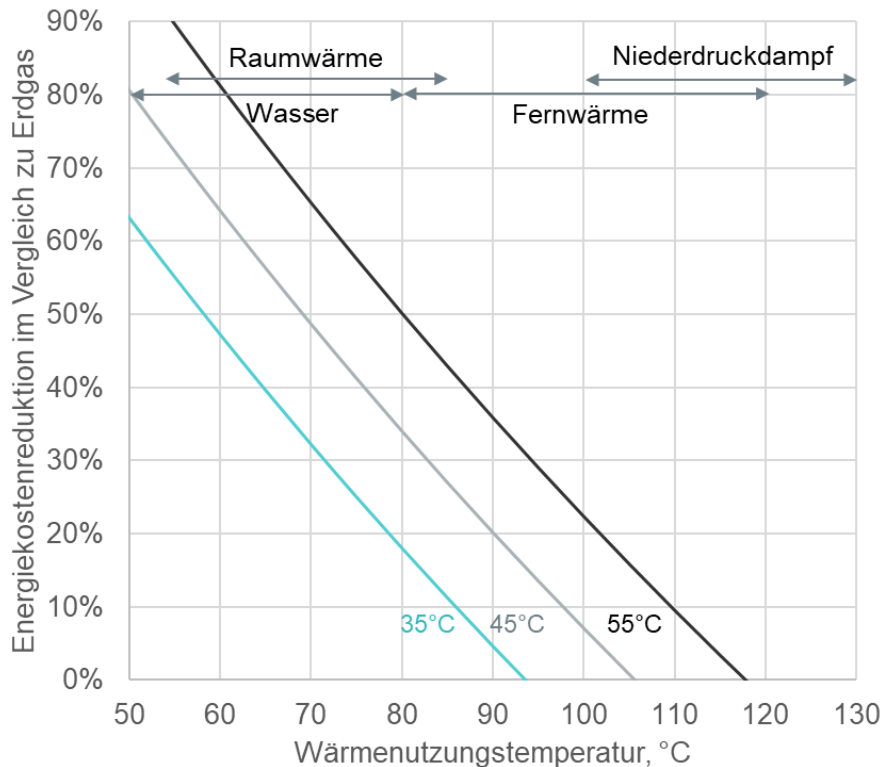


Abbildung 41: Einsparungen Energie und CO<sub>2</sub>



Quelle: Veronika Wilk, AIT, Wärmepumpen, Abwärmenutzung. Effizienzsteigerung, klimaaktiv  
Abwärmeschulung 2020

Abbildung 42: Einsparungen von Energiekosten



Quelle: Veronika Wilk, AIT, Wärmepumpen, Abwärmenutzung. Effizienzsteigerung, klimaaktiv  
Abwärmeschulung 2020

Eine **weitere Variante** stellt eine Wärmepumpe dar, die als Wärmequelle einen aktiv zu kühlenden Strom nutzt.

Führt die Wärmepumpe auch zur Reduktion der Kühllast, in dem ein sonst aktiv zu kühlender Strom als Wärmequelle genutzt wird, kann der sonst dafür notwendige Strombedarf für die Kälteanlage abgezogen werden. Falls die Kälteanlage nicht die gleichen Laufzeiten wie die Wärmepumpe hat, müssen die unterschiedlichen Laufzeiten der Wärmepumpe und der Kälteanlage berücksichtigt werden (nur die geringere Laufzeit kann herangezogen werden).

Abbildung 43: Formel zur Berechnung der Energieeinsparung bei Nutzung einer aktiv gekühlten Wärmequelle

$$\Delta EK = (Q_c \times LZ_{WP} \times K_{th}) + (Q_o \times \frac{1}{COP_{KA}} \times LZ_{KA} \times K_{el}) - (P_{el} \times LZ_{WP} \times K_{el})$$

$LZ_{WP}$  ... Laufzeit Wärmepumpe

$Q_o$  ... Von der aktiv gekühlten Wärmequelle aufgenommene Wärmeleistung [kW]

$COP_{KA}$  ... Durchschnittlicher COP der Kälteanlage über das ganze Jahr (bzw. Betriebszeit der Anlage) Hier wäre daher eigentlich ein Jahresnutzungsgrad, z. B. der ESEER einzusetzen (dieser gilt aber vorwiegend für Klimaanwendungen)

$LZ_{KA}$  ... Laufzeit bzw. Betriebszeit pro Jahr (z. B. April bis September) [h/a]

$K_{el}$  ... Stromkosten [EUR/kWh]

Falls nicht direkt der zu kühlende Prozess gekühlt wird, sondern die Wärmepumpe den Kaltwasserkreislauf vor dem Kühlturm nutzt, ist damit auch ein geringerer Strombedarf verbunden. Dieser kann aber vorab nur geschätzt beziehungsweise über Laufzeiten über unterschiedliche Betriebszustände modelliert werden. Dazu müsste die aufgenommene Energie am Kühlturm während der Betriebszeit der Wärmepumpe in Abhängigkeit der Rücklauftemperatur des Kaltwassers gemessen werden.

### 7.3.3.6 Investitionskosten

Generell setzen sich die Investitionskosten für eine Wärmepumpenanlage aus den Investitionskosten der Wärmepumpe und der Wärmequelle zusammen.

Folgende Werte für spezifische Investitionskosten für einstufige Anlagen (bis 50 K Temperaturhub) können laut (Wolf et alii, 2017) angenommen werden:

- 500 kWth Heizleistung: 450 €/kWth bis 700 €/kWth
- 10 MWth Heizleistung: 250 €/kWth bis 400 €/kWth

Mehrstufige Anlagen: Faktor 1,2 bis 1,4 der obenstehenden Werte

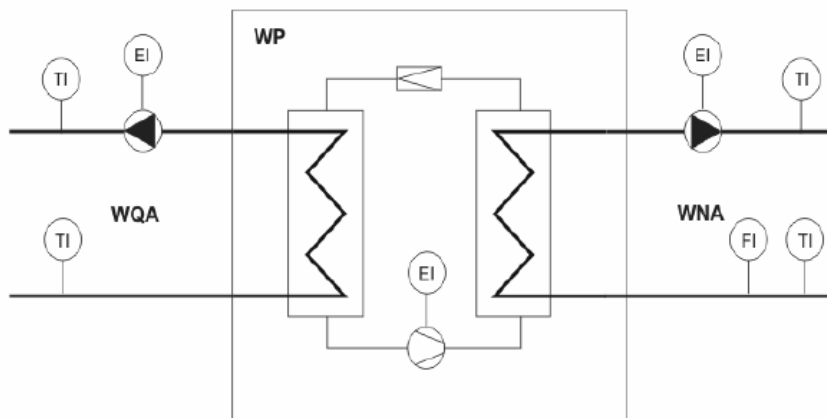
### 7.3.3.7 Informationen aus Analyse

Im Anhang „Mustervorlagen für Audits für Abwärmenutzung“ finden Sie unter Punkt 1.7 eine Excel-Vorlage, in die Sie die notwendigen Daten für die Analyse eintragen können.

Für die Analyse des Prozesses sind folgende Informationen erforderlich:

- Vorlauftemperatur Wärmequelle
- Rücklauftemperatur Wärmequelle
- Massenstrom Wärmequelle
- Vorlauftemperatur Wärmesenke
- Rücklauftemperatur Wärmesenke
- Massenstrom Wärmesenke
- Elektrische Energie Pumpe Wärmequelle
- Elektrische Energie Verdichterelement der Wärmepumpe
- Elektrische Energie Pumpe Wärmesenke
- Betriebsdruck Wärmequelle (bei Direktverdampfern)

Abbildung 44: Messkonzept Wärmepumpenanlage



Quelle: Huber, 2009

### 7.3.4 Brüdenverdichter

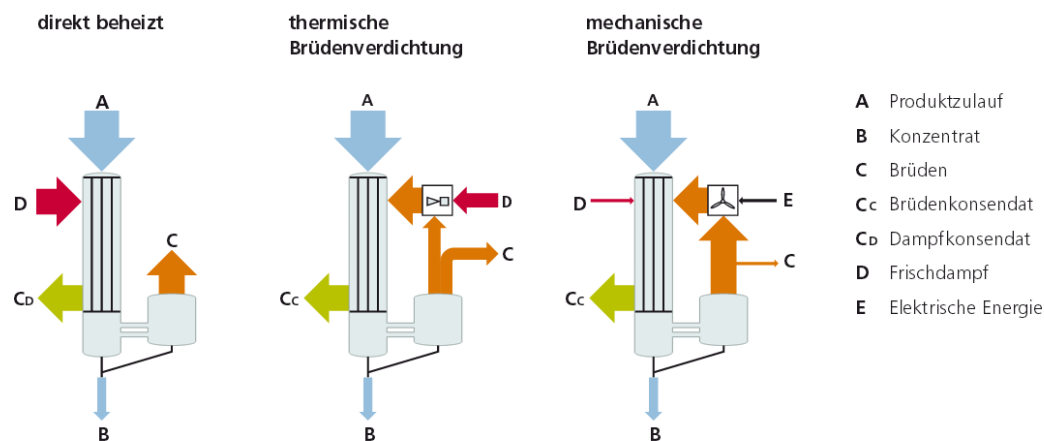
Dampf aus industriellen Prozessen (Dampf einer Flüssigkeit wird in der Verfahrenstechnik als Brüden bezeichnet) wird auf höheren Druck verdichtet und damit die Temperatur erhöht. Der Dampf wird dann unter Abgabe der Wärme in denselben Prozess wieder

kondensiert. Bei halboffenen Systemen wird die Wärme über einen Wärmetauscher übertragen.

Technologien zur Verdichtung sind elektrisch angetriebene, mechanische Kompressoren oder Ventilatoren und Dampfdrüsen.

Anwendungsgebiete finden sich insbesondere in der Nahrungsmittelindustrie zum Eindicken, Kochen von Flüssigkeiten. Weitere Anwendungsbereiche sind Chemieindustrie zum Eindicken von Abwasserströmen und Konzentration von Salzlösungen, Papier- und Holzindustrie zur Konzentration und Trocknung. Vakuumverdampfen bei niedrigen Temperaturen wird in geringem Umfang zum Entsalzen verwendet.

Abbildung 45: Brüdenverdichter im Vergleich (Beheizungsarten von Verdampfern)



Quelle: GEA Wiegand GmbH nach Piller, 2014

### 7.3.4.1 Thermische Brüdenverdichtung

Thermische Brüdenverdichter werden auch als Dampfstrahl-Verdichter oder Thermokompressoren bezeichnet. Voraussetzung für diesen Verdichter ist eine Dampfversorgung auf hohem bis mittlerem Druckniveau.

Dampfstrahl-Verdichter dienen zur Druckerhöhung von Abdampf, um ihn als Heizdampf wieder zu verwenden. Sie arbeiten nach dem Strahlpumpenprinzip und haben keine

bewegten Teile und somit keine Verschleißteile. Einsatzgebiete sind Eindampfen, Destillieren, Kühlen, Kristallisieren, Desodorieren, Entgasen und Trocknen unter Vakuum.

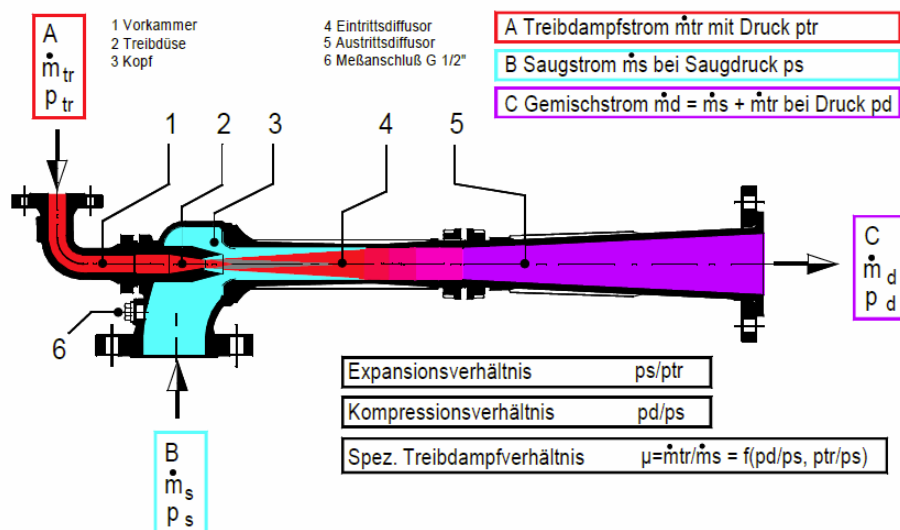
Dampf mit hohem Druck strömt auf der einen Seite in den Verdichter. Mit Hilfe einer Druckreduzierung und der damit verbundenen hohen Strömungsgeschwindigkeit des Dampfes wird ein Unterdruck im Verdichter erzeugt, um Niederdruckdampf aus einer Nachverdampfung anzusaugen.

Verdichter benötigen also immer einen Dampf mit höherem Druck, den sogenannten Treibdampf. Soll Dampf mit einem Druck von 0,5 barü angesaugt werden, so sollte mindestens ein Dampf mit einem Druck von 5 barü zur Verfügung stehen.

Das Verhältnis zwischen der Menge an Treibdampf und der Menge an angesaugtem Dampf vergrößert sich je niedriger der Treibdampfdruck ist. Je niedriger der Druck des Treibdampfes desto größer ist die Menge des Gemischdampfes.

Der Einsatz eines Verdichters hinsichtlich der Verwertung von Dampf mit niedrigem Druck (z. B. 0,1 barü bis 0,5 barü) ist als Energiesparmaßnahme immer vorteilhaft.

Abbildung 46: Aufbau eines Thermokompressors



Quelle: Spirax Sarco in Zoubek, Neuzil, 2014

### Vorteile:

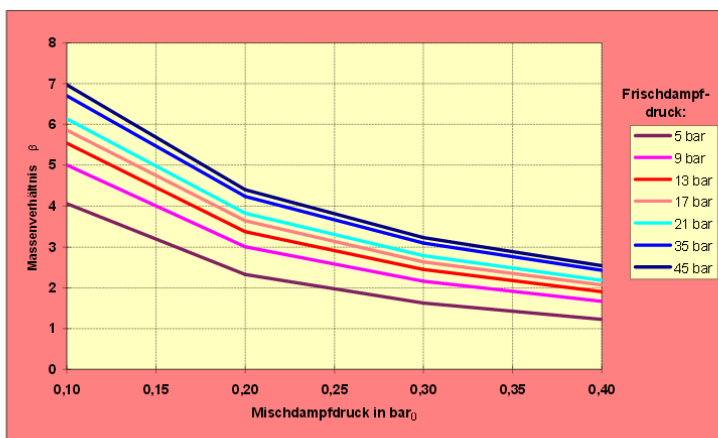
- Einfache Konstruktion
- Keine beweglichen Teile
- Hohe Zuverlässigkeit
- Keine Wartung
- Installation in nassen und Ex-Schutz Bereichen möglich

### Nachteile:

- Da Triebdampf zugeführt wird, kann auch nicht der gesamte Brügendampf weiterverwendet werden.
- Verdichter sind hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit anfällig bei schwankendem Druck, sowohl beim Gegendruck auf der Gemischseite, als auch bei schwankendem Druck auf der Saugseite. Regelungsmöglichkeiten bestehen aber über Triebdampfdruckdrosselung oder über Düsenadeln, die den Düsenquerschnitt verkleinern.

Das Massenverhältnis  $\beta$  von angesaugten Brüden zu Triebdampf ist abhängig vom Triebdampfdruck und dem gewünschten Mischdampfdruck, der sich aus der geforderten Heizmitteltemperatur ergibt:

Abbildung 47: Massenverhältnis  $\beta$  (Verhältnis der angesaugten Brüden zur Triebdampfmenge) in Abhängigkeit des Mischdampfdrucks und des Triebdampfdrucks



Quelle: Vey S., 2000

**Wärmeenergiebestimmung:** Die Energieeinsparung ergibt sich aus dem Wärmeinhalt in den Brüden, der über die Düse genutzt werden kann:

- Massenstrom der Brüden, der genutzt werden kann [t/h], [kg/s]
- Energieinhalt der Brüden (Enthalpie) [h1]

Falls dem Prozess gleich viel Dampf zugeführt wird, wie abgezogen, kann nicht die gesamte Brüdendampfmenge (aufgrund der zugeführten Treibdampfmenge) genutzt werden.

Abbildung 48: Formel zur Berechnung der Nutzwärmeleistung

$$\dot{Q}_N = \dot{m}_{BR} \times \left( \frac{\beta}{\beta+1} \right) \times h''_{BD}$$

$\dot{Q}_N$  ... Nutzwärmeleistung, die zusätzlich zur Treibdampfmenge weiter genutzt wird [kJ/h]

$\beta$  ... Massenverhältnis von angesaugten Brüden/Treibdampf [ ], Beta ( $\beta$ ) ergibt sich u.a. wie oben beschrieben aus den Druckverhältnissen und den Düsenparametern.

$\dot{m}_{BR}$  ... Massenstrom der Brüden [kg/h]

$h''_{BD}$  ... Enthalpie des Brüdendampfes (Verdampfungsenthalpie) [kJ/kg]

Abbildung 49: Formel zur Berechnung der Energiekosteneinsparung

$$\Delta EK = Q_N \times LZ \times K_{th}$$

$\Delta EK$  ... Energiekosteneinsparung (pro Jahr) [EUR/a]

$Q_N$  ... Nutzbare Wärmeleistung des Brüdenverdichters [kW]

$LZ$  ... Laufzeit des Brüdenverdichters in Stunden pro Jahr [h]

$K_{th}$  Kosten der thermischen Nutzenergie [EUR/kWh] (Wärme, die direkt über die Wärmepumpe übertragen wird muss nicht erzeugt und verteilt werden, dies ist abh. von der Anwendung z. B. Gaspreis/0,75)

Praktisch wäre zu prüfen, ob die **Treibdampfmenge** im System verbleibt, das heißt, ob die bisher zuzuführende Energiemenge ersetzt oder zusätzlich abgeführt werden muss. Falls letzter Fall zutrifft, muss die abzuführende Treibdampfmenge von der Energieeinsparung abgezogen werden.



### 7.3.4.2 Mechanische Brüdenverdichter

Die mechanische Brüdenverdichtung ermöglicht das Eindampfen von Flüssigkeiten im geschlossenen Prozess. Hier wird der in den industriellen Prozessen entstehende Prozessdampf (Brüden) eines Verdampfers mit einem Radialventilator oder einem Kompressor verdichtet und damit auch auf ein höheres Temperaturniveau gehoben und anschließend dem Prozess als frischer Heizdampf wieder zugeführt. Anwendungsgebiete sind: Verdampfung, Destillation, Kochen, Kristallisation, Stripping und Trocknung in der Chemie-, Papier- und Nahrungsmittelindustrie.

Tabelle 15: Verdichter

Verdichterart	Erreichbare Temperaturerhöhung
Einstufige Radialventilatoren	6 °K
Zweistufige Radialventilatoren	12 °K
Einstufige Radialkompression	14 (12-18) °K
Weitere Kompressionsarten, z. B. zweistufige Kolbenverdichter, Schraubenverdichter	Bis zu 80 °K

Vorteile:

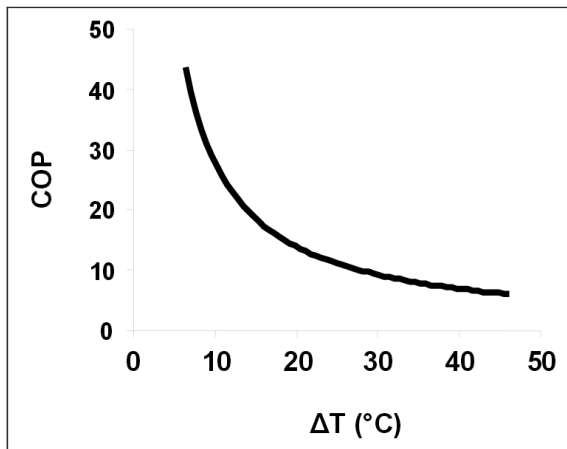
- Hohe Energieeinsparung
- Es kann die gesamte Brüden dampfmenge weiterverwendet werden (daher meist effizienter als thermische Brüdenverdichter)

Nachteile:

- Bedarf an elektrischer Energie
- Wartungsaufwand aufgrund beweglicher Teile

Um einen signifikanten Energieeinspareffekt zu erzielen, ist es notwendig auf niedrige Temperaturhübe zu achten, da der COP der Anlage gerade im Bereich mit niedrigen Delta T hoch ist.

Abbildung 50: Verhältnis des COP zur Temperaturdifferenz eines typischen Mechanischen Brüdenverdichter-Systems



Quelle: Europäische Kommission 2009

**Kompressorleistungsbedarf:** Die Bestimmung des Leistungsbedarfs des Kompressors und damit des Energiebedarfs kann über entsprechende Formeln (dann muss allerdings die spezifische Enthalpie nach Kompression bekannt sein) und auch über Nomogramme des jeweiligen Herstellers erfolgen. Folgende Werte sind dazu notwendig:

- Die Menge des angesaugten Gases als Massenstrom in [t/h]
- Molare Masse (M) des angesaugten Gases [g/Mol, kg/kMol], oft Wasserdampf (18 g/Mol)
- Temperatur des angesaugten Gases [°C], Ansaugtemperatur für untenstehendes Beispiels 119 °C
- Gewünschten Endtemperatur, die der Sattdampf Temperatur nach Verdichtung ( $p_2$ ) entspricht [bar]
- Kompressionsverhältnis (größer als 1) ergibt sich aus dem Druckverhältnis vor ( $p_1$ ) und nach der Verdichtung ( $p_2$ ) []
- Polytropenexponenten des Kompressors (Herstellerangabe, in untenstehender Grafik für eine einstufige Verdichtung von Sattdampf 1,33)

Abbildung 51: Formel zur Berechnung des Kompressorleistungsbedarfs

$$\Pi = \frac{p_2}{p_1}$$

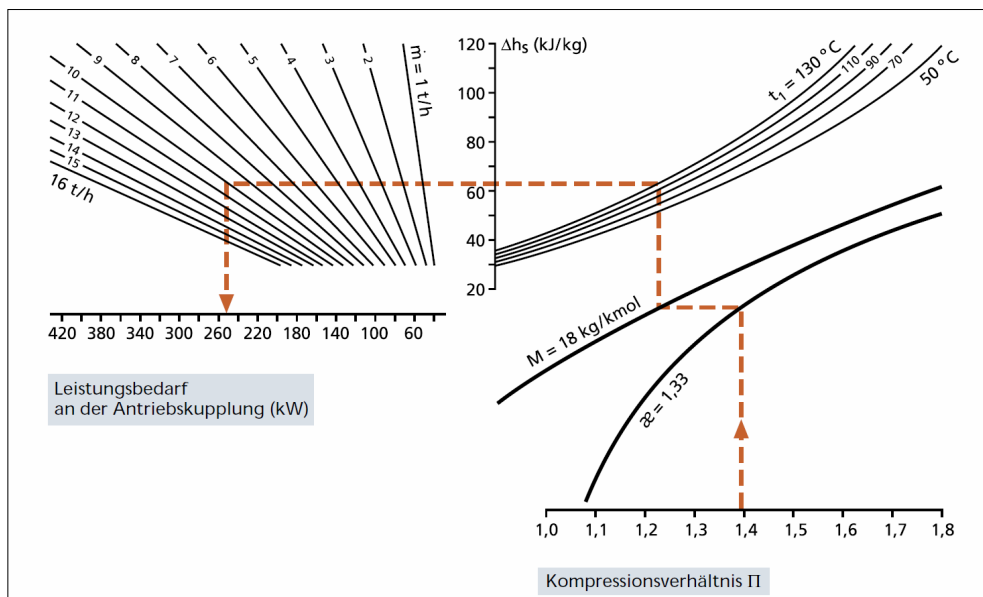
$\Pi$  ... Druckverhältnis

$p_1$  ... Saugdruck (Brühdampfdruck vor Kompression)

$p_2$  ... Verdichtungsenddruck (Satttdampfdruck, entsprechend der Temperatur, der für Verdampfung des Produkts notwendig ist)

Einstufige Radialkompressoren mit Standardlaufrädern erreichen Druckerhöhungen für Wasserdampf bis 1,8 – das entspricht, abhängig von den Ausgangstemperaturen, Temperaturerhebungen von 12 K bis 18 K Satttdampftemperatur.

Abbildung 52: Bestimmung der Antriebsleistung des Brüdenverdichters



Quelle: GEA Wiegand, o.J.

**Wärmeenergiebestimmung:** Zur Bestimmung der gewonnenen Wärmemenge sind notwendig:

- Die Menge des angesaugten Gases als Massenstrom in [t/h]
- Enthalpie nach der Verdichtung

Abbildung 53: Formel zur Bestimmung der gewonnenen Wärmemenge

$$\dot{Q}_N = \dot{m}_{BR} \times h''_{BD}$$

$\dot{Q}_N$  ... Nach der Verdichtung verfügbare Nutzwärmeleistung [kJ/h]

$\dot{m}_{BR}$  ... Massenstrom der verdichteten Brüden [kg/h]

$h''_{BD}$  ... Enthalpie des Brüden dampfes (Verdampfungsenthalpie) nach Verdichtung [kJ/kg]

#### **Energiekosteneinsparung**

$$\Delta EK = (Q_N \times LZ \times K_{th}) - (P_{el} \times LZ \times K_{el})$$

$\Delta EK$  ... Energiekosteneinsparung (pro Jahr) [EUR/a]

$Q_N$  ... Nutzbare Wärmeleistung des Brüdenverdichters [kW]

$LZ$  ... Laufzeit des Brüdenverdichters in Stunden pro Jahr [h]

$K_{th}$  ... Kosten der thermischen Nutzenergie [EUR/kWh] (Wärme, die direkt über die Wärmepumpe übertragen wird muss nicht erzeugt und verteilt werden, dies ist abh. von der Anwendung z.B. Gaspreis/0,75)

$P_{el}$  ... Elektrische Leistungsaufnahme des Brüdenverdichters [kW]

$K_{el}$  ... Stromkosten [EUR/kWh]

### **7.3.5 Absorptionswärmepumpe (Typ I)**

Statt über mechanische Verdichtung (Kompressor) erfolgt bei Absorptionswärmepumpen ein thermischer Antrieb der Maschine. Dieser besteht aus Absorber, Austreiber und Pumpe für das Lösungsmittel und Expansionsventil, die weiteren Komponenten gleichen jenen der Kompressionskälteanlagen: Verdampfer, Verflüssiger, Expansionsventil.

Je nach Temperaturniveau werden als Arbeits- oder Kältemittel Wasser und als Absorptions- oder Lösungsmittel Lithium-Bromid verwendet oder als Arbeits- oder Kältemittel Ammoniak und als Absorptions- oder Lösungsmittel Wasser.

Im **Verdampfer** wird über die Abwärmequelle von niedrigem Temperaturniveau aufgenommen und das Arbeitsmittel verdampft.

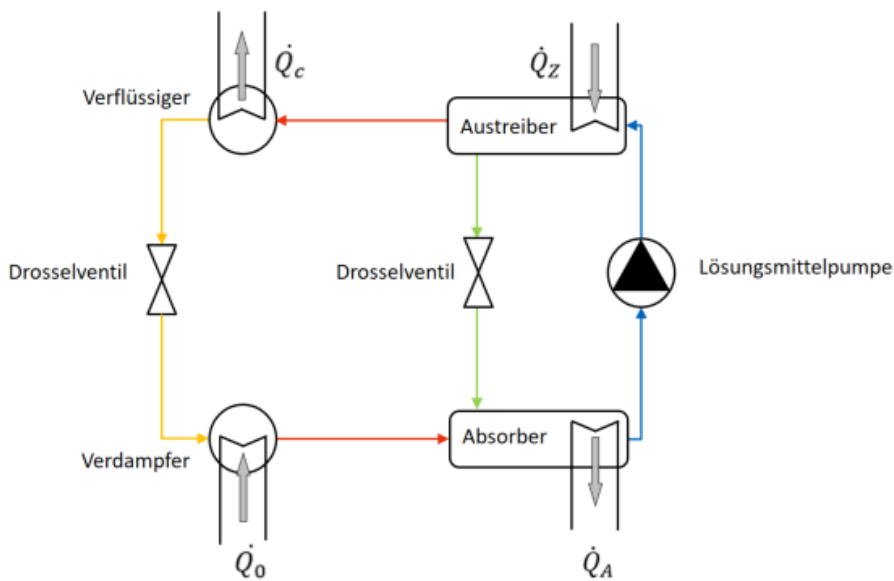
Dieses gelangt in den **Absorber**. Im Absorber wird Ammoniak (Kältemittel ist Arbeitsmittel) unter Wärmeabgabe in Wasser (Lösungsmittel) absorbiert.

Dieses Gemisch wird über eine Pumpe und damit höherem Druck und Wärmezufuhr im **Austreiber** wieder getrennt. Für die Austreibung wird Abwärme auf sehr hohem Temperaturniveau ab circa 500 °C oder Hochdruck-Dampf genutzt. Das Wasser (Lösungsmittel) wird über Drosselventil entspannt und zum Absorber zurückgeführt (Lösungsmittelkreislauf).

Das Arbeitsmittel verdampft und kondensiert wieder im **Verflüssiger**, wo die Nutzwärme bei circa 65 °C bis 100 °C abgegeben werden kann. Das Arbeitsmittel gelangt über das Expansionsventil wieder auf niedrigem Druck zum Verdampfer (Arbeitsmittelkreislauf).

Der COP dieser Maschinen beträgt 1,2 bis 1,4 (bis 1,6 möglich).

Abbildung 54: Aufbau Absorptionswärmepumpen



Quelle: Lambauer, 2012, Darstellung: Österreichische Energieagentur

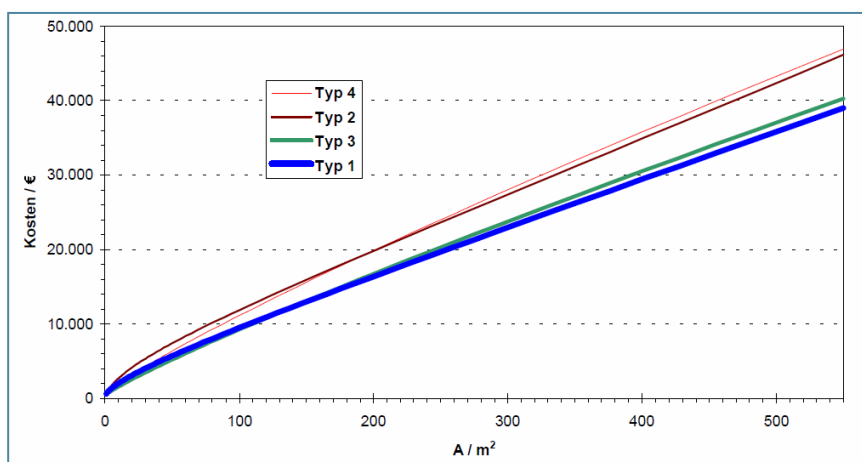
### 7.3.6 Absorptionswärmeübertrager (Type II)

Bei diesen Wärmepumpen wird Abwärme zum Verdampfer und Austreiber auf gleichem Temperaturniveau im mittleren Temperaturbereich (zwischen Bedarfsniveau und Umgebungstemperatur) gebracht. Die Nutzwärme wird am Absorber auf einer höheren Temperatur abgegeben. Sie werden mit Wasser und Lithium-Bromid betrieben. Senktemperaturen von 150 °C sind möglich, bei Temperaturerhöhung von 50 K. In diesen Arbeitspunkten erreicht man COPs von 0,45 bis 0,48.

## 8 Wärmetauscherkosten

In den folgenden Abbildungen sind spezifische beziehungsweise absolute Investitionskosten für ausgewählte Wärmeübertragertypen dargestellt. Die spezifischen Kosten beziehen sich auf die Kosten der Wärmeübertragerfläche. Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass es sich bei den vorliegenden Kosten um Richtwerte handelt, welche im Zuge einer wissenschaftlichen Arbeit entstanden sind (Kostenfunktionen für Komponenten der rationellen Energienutzung). Zudem werden Wärmeübertrager meist auf spezielle Anwendungsfälle hin konzipiert und kalkuliert, wodurch Preislisten selten vorliegen. Vielmehr werden Kosten mittels elektronischen Kalkulationsprogrammen bestimmt, welche aber eine genaue Kenntnis bezüglich der Konstruktion und Gestaltung voraussetzen.

Abbildung 55: Investitionskosten für Plattentypen



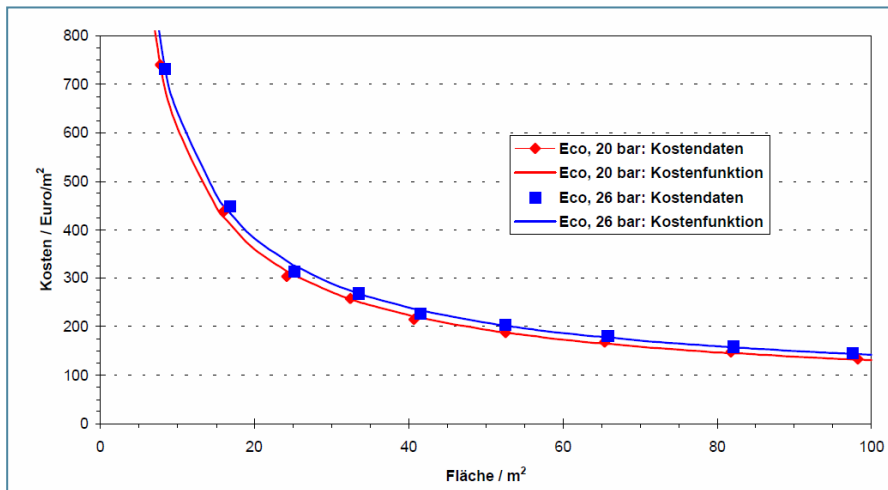
Quelle: Gebhardt et alii, 2002

Die oben dargestellte Kostenfunktion Investitionskosten für Plattentypen wurde auf Basis einer Kalkulationssoftware bestimmt und zeigt das lineare Verhalten von Kosten zur Fläche beziehungsweise der Anzahl der erforderlichen Platten. Bei zunehmender Fläche hat der Druck einen größeren Einfluss auf die Gesamtkosten. Der Einfluss der Temperatur ist relativ gering.

Tabelle 16: Erläuterung der Plattenwärmetauschertypen, (Gebhard et alii, 2002)

Typ	Temperatur	Druck	Plattenmaterial	Dichtungsmaterial
1	100 °C	10 bar	1.4401	NBR
2	100 °C	25 bar	1.4401	NBR
3	160 °C	10 bar	1.4401	EPDM
4	160 °C	25 bar	1.4401	EPDM

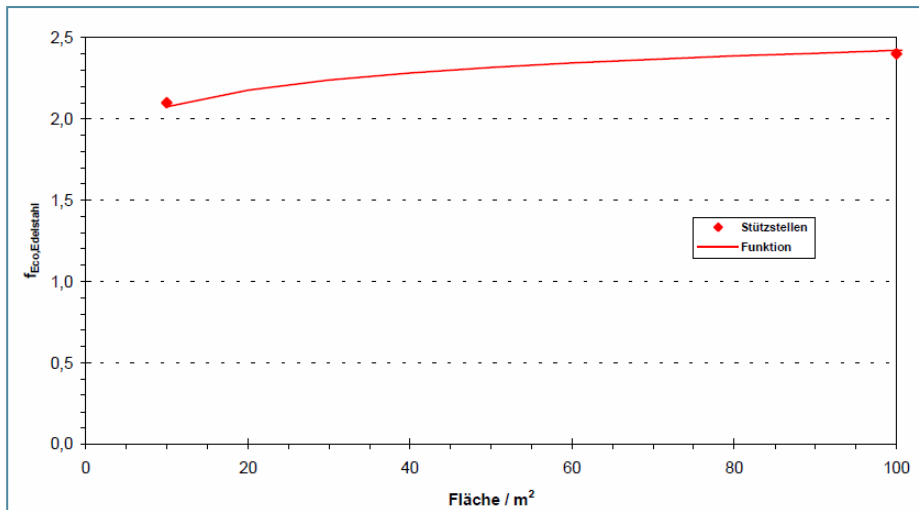
Abbildung 56: Investitionskosten für Rohrbündelapparate



Quelle: Gebhardt et alii, 2002

Grundlage für die Kostenkalkulation in obenstehender Abbildung zu Investitionskosten für Rohrbündelapparate war die Erstellung und Auswertung von Stücklisten (Materialmenge, Anzahl der Armaturen, und so weiter) von Economisern (Rauchgas/Wasser) beziehungsweise die Kostendaten eines Herstellers. Die Angaben beziehen sich auf einen Economiser aus Schwarzstahl ohne Isolierung. (Gebhard et alii, 2002)

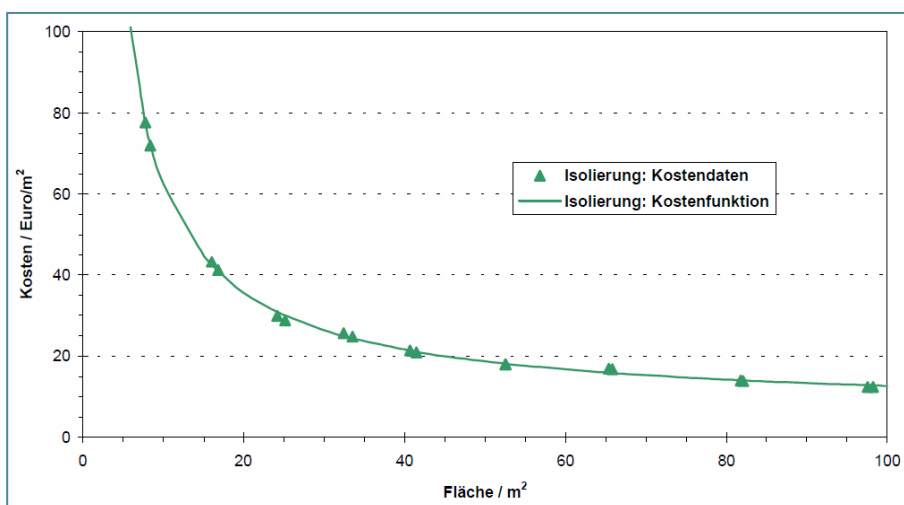
Abbildung 57: Korrekturfaktor für Rohrbündel-Wärmeübertrager aus Edelstahl



Quelle: Gebhardt et alii, 2002

Werden Economiser nicht aus Schwarzstahl, sondern aus Edelstahl gefertigt, sind die in Abbildung zu Investitionskosten von Rohbündel-Wärmeübertrager angegebenen Kosten, aufgrund des höheren Materialpreises für Edelstahl, mit dem in obenstehender Abbildung zu Korrekturfaktoren für Rohrbünde-Wärmeübertrager aus Edelstahl angegebenen Korrekturfaktor zu multiplizieren. (Gebhard et alii, 2002)

Abbildung 58: Investitionskosten für die Isolierung für Rohrbündel-Wärmeübertrager

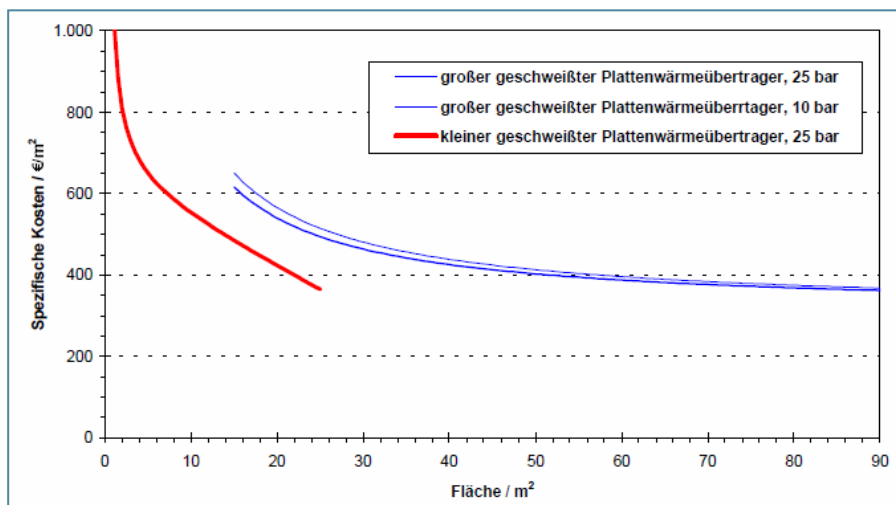


Quelle: Gebhardt et alii, 2002



Zur Bestimmung der Gesamtkosten sind die in der obenstehenden Abbildung zu Investitionskosten für die Isolierung für Rohrbündel-Wärmeübertrager gezeigten spezifischen Kosten für die Isolierung (Mineralwollmatten auf verzinktem Drahtgeflecht, Abstandhaltern und Schutzmantel aus Aluminiumblech) mit den spezifischen Kosten für den Economiser zu addieren. (Gebhard et alii, 2002)

Abbildung 59: Investitionskosten für hybride Wärmetauscher



Quelle: Gebhardt et alii, 2002

Die Kostenfunktion in obenstehender Abbildung zu Investitionskosten für hybride Wärmetauscher wurde auf Basis einer Kalkulationssoftware bestimmt. Aufgrund der zu bestimmenden Gestellkosten wurde zwischen großen (mit Gestell) und kleinen geschweißten Plattenwärmeübertragern (ohne Gestell) unterschieden. (Gebhard et alii, 2002)

Abbildung 60: Ausgewählte Daten von Wasser/Wasser-Wärmetauschern in Platten- und Rohrbündelausführung

Index [-]	Leistung [kW]	Wärmequelle EIN/AUS [°C]	Wärmesenke EIN/AUS [°C]	Spez. Kosten [€/kW]	Ausführung bzw. Material	Referenzdatum
1	100	125 / 65	60 / 80	5,5	Platten Edelstahl En 1.4404	Aug.07
2	500	95 / 73	13 / 65	2,4	Platten gelötet	Jun.08
3	500	95 / 73	13 / 65	3,4	Platten geschraubt	Jun.08
4	500	125 / 65	60 / 80	5,9	Platten Edelstahl En 1.4404	Aug.07
5	600	125 / 65	60 / 80	6,6	Platten Edelstahl En 1.4404	Aug.07
6	750	95 / 73	13 / 65	2,2	Platten gelötet	Jun.08
7	750	95 / 73	13 / 65	2,6	Platten geschraubt	Jun.08
8	828	105 / 95	60 / 90	4,0	Platten geschraubt	Nov.08
9	1.000	95 / 73	13 / 65	2,1	Platten gelötet	Jun.08
10	1.000	95 / 73	13 / 65	2,8	Platten geschraubt	Jun.08
11	1.023	105 / 95	60 / 90	3,6	Platten geschraubt	Nov.08
12	1.400	125 / 65	60 / 80	7,0	Platten Edelstahl En 1.4404	Aug.07
13	1.800	125 / 65	60 / 80	6,6	Platten Edelstahl En 1.4404	Aug.07
14	2.000	150 / 55	50 / 60,7	8,2	Rohrbündel Stahlglatrohr	Nov.06

Quelle: Theissing, M., 2009

Abbildung 61: Ausgewählte Daten unterschiedlicher Plattenwärmetauscher

Index [-]	Typ	Leistung [kW]	Wärmequelle EIN/AUS [°C]	Wärmesenke EIN/AUS [°C]	Spez. Kosten [€/kW]	Ausführung bzw. Material	Referenzdatum
1	Luft/Wasser	82	130 / 80	60 / 70	194,6	Edelstahlglattrohr	Nov.08
2	Dampf/Thermoöl	109	152 / 152	140 / 145	181,9	Platten geschraubt	Okt.08
3	Dampf/Thermoöl	224	152 / 152	140 / 145	145,0	Platten geschraubt	Okt.08
4	Luft/Wasser	244	60 / 50	35 / 55	132,2	Rippenrohr stahlverzinkt	Nov.08
5	Dampf/Thermoöl	273	152 / 152	140 / 145	45,1	Platten geschraubt	Okt.08
6	Luft/Wasser	305	67 / 65	13 / 52	33,3	Rippenrohr stahlverzinkt	Jul.08
7	Luft/Wasser	304	82 / 68	20 / 55	26,4	Rippenrohr stahlverzinkt	Jul.08
8	Thermoöl/Luft	456	125 / 85	20 / 70	35,0	Rippenrohr stahlverzinkt	Nov.08
9	Luft / Luft	674	130 / 82	20 / 82	40,8	Glasrohr	Nov.08
10	Luft / Luft	718	380-220 / 253 - 162	20 / 160 - 281	86,7	Platten	Jän.09
11	Luft / Luft	762	380-220 / 254 - 158	21 / 170 - 296	92,0	Platten	Feb.09
12	Thermoöl/Wasser	840	110 / 92	85 / 91	8,7	Platten geschraubt	Jän.09

Quelle: Theissing, M., 2009

Abbildung 62: Ausgewählte Daten von Abgaswärmetauschern

Index [-]	Typ	Leistung [kW]	Wärmequelle EIN/AUS [°C]	Wärmesenke EIN/AUS [°C]	Spez. Kosten [€/kW]	Ausführung bzw. Material	Referenzdatum
1	Abgas/ Wasser	273	300 / 120	96 / 105	24,3	Rippenrohr stahlverzinkt	Nov.08
2	Abgas/ Wasser	456	320 / 120	95 / 105	18,3	Rippenrohr stahlverzinkt	Nov.08
3	Abgas/ Wasser	810	420 / 120	95 / 105	29,3	Stahlglattrohr	Nov.08
4	Abgas/ Thermoöl	304	350 / 150	85 / 125	61,3	Edelstahlglattrohr	Nov.08
5	Abgas/ Thermoöl	840	138 / 106	92 / 110	83,7	Rippenrohr stahlverzinkt	Jän.09
6	Abgas/ Thermoöl	3220	275 / 140	100 / 230	84,6	Stahlglattrohr	Nov.08
7	Abgas/ Thermoöl	5102	300 / 180	140 / 260	97,0	Stahlglattrohr	Nov.08
8	Abgas/ Thermoöl	6800	300 / 180	140 / 260	82,4	Stahlglattrohr	Jän.09

Quelle: Theissing, M., 2009

# 9 Angebote und Tools

Um Betriebe bei der Optimierung häufig genutzter Technologien zu unterstützen, wurden im Programm klimaaktiv Energieeffiziente Betriebe weitere **Leitfäden** zu folgenden Querschnittstechnologien erstellt:

- Optimierung von Kältesystemen
- Optimierung von Druckluftsystemen
- Optimierung von Ventilatoren und Lüftungssystemen
- Optimierung von Dampfsystemen
- Optimierung von Pumpensystemen
- Optimierung von Beleuchtungssystemen
- Messleitfaden I zur Bewertung von Energieeinsparungen
- Messleitfaden II zur Messtechnik
- Optimierung der Wärmeverteilung und Hydraulik
- Technische Isolierung

## 9.1 Energiemanagement und Benchmarking

Ein Energiemanagement (EMS) beinhaltet die Umsetzung technischer, strategischer und organisatorischer Maßnahmen zur fortlaufenden Verbesserung der energiebezogenen Leistung. Wie ein Energiemanagementsystem nach der ISO 50001 Schritt für Schritt im Unternehmen verankert wird und wie die Anforderungen der Norm ISO 50001:2018 erfüllt werden, ist auf der klimaaktiv Website [energymanagement.at](https://www.klimaaktiv.at/energymanagement) beschrieben. Machen Sie den Erstbewertungscheck, um das Ausgangsniveau zur Einführung des EMS festzustellen.

Good Practice Beispiele von Betrieben zum Nachweis der energiebezogenen Leistung sowie Energie-, Material- und Ressourceneffizienz und Einhaltung von energierechtlichen Vorschriften im Rahmen der ISO 50001 finden Sie zusammengefasst in drei **Guidelines** auf [klimaaktiv.at/energiesparen/energiemanagement](https://www.klimaaktiv.at/energiesparen/energiemanagement).

- Einhaltung von energierechtlichen Vorschriften im Rahmen der ISO 50001
- Energieeffizienz und Synergien zur Materialeffizienz und zum Arbeitnehmerschutz
- Nachweis der Verbesserung der energiebezogenen Leistung

Weiters bietet klima**aktiv** Schulungen und Webinare, in denen Grundlagen und Lösungen zur Optimierung betrieblicher Systeme vermittelt werden. In diesen Schulungen werden unter anderem die nachfolgend erwähnten Tools vorgestellt. Aktuelle Termine finden Sie auf [klimaaktiv.at/betriebe-schulungen](https://klimaaktiv.at/betriebe-schulungen) oder im Energieeffiziente Betriebe Newsletter. Sie können sich unter [klimaaktiv.at/service/newsletter-an-abmeldung](https://klimaaktiv.at/service/newsletter-an-abmeldung) anmelden.

#### Tools:

- ProTool: Das klima**aktiv** ProTool ist ein Tool, das für eine umfassende Erstanalyse der Energieeffizienz im Betrieb eingesetzt werden kann und ermöglicht rasch Einsparpotenziale zu identifizieren.
- Pinch Tool: Die Pinch-Analyse ermöglicht eine rasche und unkomplizierte Bestimmung der optimalen Abwärmenutzung. Dieses Werkzeug erleichtert es, ein Wärmetauschernetzwerk basierend auf realen Betriebsdaten von Prozessströmen und Abwärmeströmen aus der Energieversorgung zu kreieren und zu bewerten.

# 10 Über klimaaktiv

klima**aktiv** ist die Klimaschutzinitiative des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). Seit 2004 bietet sie in den Themenschwerpunkten „Bauen und Sanieren“, „Energiesparen“, „Erneuerbare Energie“ und „Mobilität“ ein umfassendes, ständig wachsendes Spektrum an Information, Beratung sowie Weiterbildung und setzt Standards, die international Vorbildcharakter haben.

klima**aktiv** zeigt, dass jede Tat zählt: jede und jeder in Kommunen, Unternehmen, Vereinen und Haushalten kann einen aktiven Beitrag zur Erreichung der Klimaziele leisten. Damit trägt die Initiative zur Umsetzung des nationalen Energie- und Klimaplanes (NEKP) für Österreich bei. Näheres unter [klimaaktiv.at](http://klimaaktiv.at)

Das klima**aktiv** Programm Energieeffiziente Betriebe setzt gezielt Impulse zur Erhöhung der Energieeffizienz in österreichischen Produktions- und Gewerbebetrieben und unterstützt diese auf Ihrem Weg in Richtung Klimaneutralität. Informationen, Angebote und Good Practice Beispiele von umgesetzten Maßnahmen finden Sie unter [klimaaktiv.at/effizienz](http://klimaaktiv.at/effizienz)

## Kontakt

Strategische Gesamtsteuerung klima**aktiv**

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

Sektion Klima und Energie

Stabstelle Dialog zu Energiewende und Klimaschutz

Stubenbastei 5, 1010 Wien

Programmmanagement klima**aktiv** Energieeffiziente Betriebe

Österreichische Energieagentur

Petra Lackner

[eebetriebe@energyagency.at](mailto:eebetriebe@energyagency.at)

[klimaaktiv.at/effizienz](http://klimaaktiv.at/effizienz)

## Literaturverzeichnis

**Deutsche Energie-Agentur GmbH (DENA):** Erfolgreiche Abwärmenutzung in Unternehmen, 2015

**Schmitz, Winfried:** Bayrisches Landesamt für Umwelt (2012): Ingenieurbüro für Umwelttechnik, IHK Abwärmenutzung im Betrieb, Augsburg

**De Kleijn, Energy Consultants & Engineers:** Website Industrial Heat Pumps: [industrialheatpumps.nl/en/](http://industrialheatpumps.nl/en/) (abgerufen am 17.8.2014)

**Europäische Kommission:** Reference Documents on Best Available Techniques on Energy Efficiency, 2009

**Fischer, H. (o. J.):** Präsentation der Fischer Maschinen und Apparatebau AG: Mit Wärmetauschern Verbrauch senken

**Fluch, J./ Brunner, C.:** Unterlagen zur Vorlesung Thermische Energieversorgung und Wärmeintegration, Studiengang Energie- und Umweltmanagement, FH-Pinkafeld (2013/2014)

**GEA Wiegand GmbH (o.J.):** Eindampftechnik mit mechanischer Brüdenkompression, Ettlingen

**Gebhardt, M./Kohl, H., Steinrötter:** Ableitung von Kostenfunktionen für Komponenten der rationalen Energienutzung. Institut für Energie- und Umwelttechnik, Th. 2002, Duisburg

**Getec Holding GmbH:** [getec-energyservices.com/Start/Technologien/ORC-Prozess/](http://getec-energyservices.com/Start/Technologien/ORC-Prozess/) (abgerufen am 22.12.2021)

**Huber, H.:** Unterlagen zur Vorlesung Wärmepumpen, Studiengang Urbane Erneuerbare Energietechnologien, FH Technikum Wien (2009/2010)

**IEA Heat Pump Center, c/o SP Technical Research Institute of Sweden:** [heatpumpcentre.org/en/aboutheatpumps/heatpumpsinindustry/Sidor/default.aspx](http://heatpumpcentre.org/en/aboutheatpumps/heatpumpsinindustry/Sidor/default.aspx), abgerufen am 10.9.2014



**Lambauer, J:** Hochtemperatur-Wärmepumpen: Einsatzmöglichkeiten und Potenziale bei der Abwärmenutzung, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, Vortrag (2012)

**Morand R., Brunner R., Pfenninger H. P.:** Prozessintegration mit der Pinch-Methode, Bundesamt für Energie, Schweiz, Bern, Auflage 2006

**Ochsner, K.:** Persönliche Kommunikation per E-Mail (Ochsner Wärmepumpen) (2014):

**ÖNORM EN 16247-1:** Energieaudits, Austrian Standards Institute, Wien, Ausgabe 2012-09-01

**ÖNORM M 7755-1:** Elektrisch angetriebene Wärmepumpen - Allgemeine Anforderungen bei Planung und Errichtung von Wärmepumpen-Heizungsanlagen, 2000

**Piller:** Ventilatoren für die mechanische Brüdenverdichtung, 2014, [piller.de/fileadmin/pictures/cms/pdf/download/PIL\\_BRO\\_MBV\\_dt.pdf](http://piller.de/fileadmin/pictures/cms/pdf/download/PIL_BRO_MBV_dt.pdf)

**Rollings, D.:** Persönliche Kommunikation per E-Mail, UNEX HEATEXCHANGER Engineering GmbH, 2014

**SAENA Sächsische Energieagentur GmbH (o.J.):** Technologien der Abwärmenutzung, Dresden

**Schweiger, H. et alii:** Leitfaden für EINSTEIN Audits für thermische Energie, 2011, EINSTEIN II

**Theissing, M, et alii:** Instationarität von industrieller Abwärme als limitierender Faktor bei der Nutzung und Integration in Wärmeverteiler und wärmenetzsystem, Berichte aus Umwelt und Energie Forschung 34/2009, BMVIT, Wien

**Universität Duisburg-Essen (o. J.):** Foliensatz, Planung, Bau und Betrieb von Chemieanlagen: Energieintegration, [uni-due.de/imperia/md/content/verfahrenstechnik/pbbc\\_uebung\\_folie\\_9.pdf](http://uni-due.de/imperia/md/content/verfahrenstechnik/pbbc_uebung_folie_9.pdf), abgerufen am 15.9.2014

**U.S. Department of Energy, Industrial Technologies Program:** Industrial Heat Pumps for Steam and Fuel Savings, A Best Practices Steam Technical Brief, Washington, 2003

**Vey, S.:** Anlagenplanung in Brauereien und Getränkeabfüllbetrieben unter Verwenden von Standardsoftware, Lehrstuhl für Brauereianlagen und Lebensmittel-Verpackungstechnik, TU München, 2000

**Wagner, W.:** Wärmetauscher. Grundlagen, Aufbau und Funktion thermischer Apparate, Vogel Fachbuch, Würzburg, 2005

**Wilhelms, C., et alli:** Neue Konzepte für Warmwasserspeicher bis 50 m<sup>3</sup>, Marktübersicht, Kosten, Anwendungsgebiete, 2009, VDI-Wissensforum, Heizen und Kühlen mit der Sonne, Ludwigsburg

**Wilk V. et alli:** Industrierärmepumpen in Österreich: Status Quo und Potential, 11. Internationale Energiewirtschaftstagung, Wien, 2019

**Wilk V.:** Wärmepumpen, Abwärmenutzung und Effizienzsteigerung, AIT, klimaaktiv Abwärmeschulung 2020

**V. Wilk, A. Arnitz, R. Rieberer:** IEA HPT Annex 48: Industrielle Wärmepumpen Phase 2, BMK, 2020, Wien

**Wolf, S.:** Integration von Wärmepumpen in industrielle Produktionssysteme – Potenziale und Instrumente zur Potenzialerschließung, Dissertation, Universität Stuttgart, 2017

**Zoubek, L./Neuzil, M.:** Thermocompressors and energy conservation in industry – experiences, 5<sup>th</sup> International Conference for European EnergyManagers, Vienna, 14<sup>th</sup> to 15<sup>th</sup> May 2014

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick über mögliche Methoden zur Abschätzung von relevanten Parametern.....	23
Tabelle 2: Beispiele für Emissionsgrade von Aluminium .....	25
Tabelle 3: Datenaufnahme für bestehende Wärmetauscher (WT) für den Auslegungszustand und den realen Betrieb.....	30
Tabelle 4: Erforderliche Daten für die Pinch-Analyse (die letzten drei Spalten benötigen Sie auch für das klima <b>aktiv</b> Pinch-Tool) .....	41
Tabelle 5: Typische $\Delta T_{\min}$ -Werte verschiedener Prozesse .....	44
Tabelle 6: Arten von Wärmepumpen.....	47
Tabelle 7: Auswahl von Wärmepumpen mit Unterstützung der Pinch-Analyse .....	48
Tabelle 8: Arten von Rekuperatoren aus physikalischer Sicht.....	62
Tabelle 9: Wärmeübertragungskoeffizienten .....	70
Tabelle 10: Verschmutzungsfaktoren ausgewählter Medien .....	70
Tabelle 11: Spezifische Wärmekapazität ausgewählter Medien .....	73
Tabelle 12: Bruttospeichergröße in Abhängigkeit des Dämmmaterials (Speicher 10 m <sup>3</sup> , 3 m hoch).....	75
Tabelle 13: Überblick über Arten von industriellen Wärmepumpen und ihren Eigenschaften .....	81
Tabelle 14: Temperaturniveaus von Wärmequellen und Vorlauftemperaturen von Kompressionswärmepumpen .....	83
Tabelle 15: Verdichter .....	97
Tabelle 16: Erläuterung der Plattenwärmetauschertypen, (Gebhard et alii, 2002) .....	103

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ablauf eines Energieaudits .....	9
Abbildung 2: Vorgehensweise bei der Prozessauswahl beziehungsweise bei der Durchführung einer Detail- beziehungsweise Grobanalyse.....	13
Abbildung 3: Beispiele für Querschnittstechnologien .....	15
Abbildung 4: Formel zur Berechnung des Abwärmestroms .....	21
Abbildung 5: Formel zur Berechnung der Temperaturdifferenz auf der Sekundärseite .....	31
Abbildung 6: Vermeidung von Schleifen im Wärmetauschernetz.....	34
Abbildung 7: Vermeidung eines Pfades zwischen Wärmequelle und –senke im Wärmetauschernetz.....	34
Abbildung 8: Verschiedene Abwärmequellen und Abwärmesenken nach Temperaturniveau.....	37
Abbildung 9: Thermodynamische Verbindung der kalten Ströme .....	42
Abbildung 10: Darstellung der Kombination der Kälte- und Wärmeverbundkurven .....	43
Abbildung 11: Sich überschneidende HCC und CCC (a) und die Entwicklung der GCC (b) ..	46
Abbildung 12: Platzierung von Wärmepumpen mit der Gesamtverbundkurve.....	47
Abbildung 13: Screenshot aus dem klimaaktiv Pinch-Tool.....	49
Abbildung 14: Formel für die Kostenvergleichsrechnung.....	51
Abbildung 15: Formel zur Berechnung des Return on Investment.....	51
Abbildung 16: Formel zur Berechnung des Wärmestroms.....	55
Abbildung 17: Idealisierte Wärmeübertragung längs der ebenen Wand aufgrund unterschiedlicher Temperaturen .....	55
Abbildung 18: Temperaturverläufe bei Gleich- beziehungsweise Gegenstrom- Wärmeübertragern .....	56
Abbildung 19: Formel zur Ermittlung einer mittleren Temperaturdifferenz.....	57
Abbildung 20: Wärmeübertragung längs der ebenen Wand unter Darstellung der Temperaturänderung .....	57
Abbildung 21: Formel zur Berechnung der Auslegung des Wärmetauschers .....	58
Abbildung 22: Formel zur Berechnung des Verhältnisses der Wärmeübertragungseinheiten zur vorhandenen Wärmekapazität .....	59
Abbildung 23: Sorptionsregenerator.....	61
Abbildung 24: Gelöteter Plattenwärmetauscher .....	63
Abbildung 25: Gedichteter Plattenwärmetauscher .....	64
Abbildung 26: Rohrbündel-Wärmetauscher .....	65
Abbildung 27: Wärmetauscher Variante 1.....	68
Abbildung 28: Wärmetauscher Variante 2.....	69

Abbildung 29 : Wärmetauscher Variante 3.....	69
Abbildung 30: Erforderliche Informationen für die Datenweitergabe an den Wärmetauscherlieferanten am Beispiel eines Herstellers.....	72
Abbildung 31: Formel zur Berechnung der speicherbaren Energiemenge.....	74
Abbildung 32: Spezifische Speicherkosten, inklusive Montage, Mehrwertsteuer und Transport .....	76
Abbildung 33: Wärmepumpenkreislauf .....	82
Abbildung 34: Formel zur Bestimmung der übertragenen Wärmemenge .....	84
Abbildung 35: Leistungszahl (COP) von Kompressionswärmepumpen in Abhängigkeit der Quellentemperatur und Nutzutemperatur .....	85
Abbildung 36: Formel zur Bestimmung der Leistungszahl über die Temperaturniveaus....	86
Abbildung 37: Gütegrad realer Anlagen in Abhängigkeit des Kältemittels und Temperaturhubs.....	87
Abbildung 38: Formel zur Bestimmung der elektrischen Leistung - erster Fall.....	87
Abbildung 39: Formel zur Bestimmung der elektrischen Leistung - zweiter Fall.....	88
Abbildung 40: Formel zur Berechnung der Kosteneinsparung über die Nutzung einer Wärmepumpe .....	88
Abbildung 41: Einsparungen Energie und CO <sub>2</sub> .....	89
Abbildung 42: Einsparungen von Energiekosten .....	90
Abbildung 43: Formel zur Berechnung der Energieeinsparung bei Nutzung einer aktiv gekühlten Wärmequelle.....	91
Abbildung 44: Messkonzept Wärmepumpenanlage.....	92
Abbildung 45: Brüdenverdichter im Vergleich (Beheizungsarten von Verdampfern).....	93
Abbildung 46: Aufbau eines Thermokompressors.....	94
Abbildung 47: Massenverhältnis $\beta$ (Verhältnis der angesaugten Brüden zur Treibdampfmenge) in Abhängigkeit des Mischdampfdrucks und des Treibdampfdrucks ..	95
Abbildung 48: Formel zur Berechnung der Nutzwärmeleistung.....	96
Abbildung 49: Formel zur Berechnung der Energiekosteneinsparung .....	96
Abbildung 50: Verhältnis des COP zur Temperaturdifferenz eines typischen Mechanischen Brüdenverdichter-Systems .....	98
Abbildung 51: Formel zur Berechnung des Kompressorleistungsbedarfs.....	99
Abbildung 52: Bestimmung der Antriebsleistung des Brüdenverdichters.....	99
Abbildung 53: Formel zur Bestimmung der gewonnenen Wärmemenge .....	100
Abbildung 54: Aufbau Absorptionswärmepumpen .....	101
Abbildung 55: Investitionskosten für Plattentypen .....	102
Abbildung 56: Investitionskosten für Rohrbündelapparate.....	103
Abbildung 57: Korrekturfaktor für Rohrbündel-Wärmeübertrager aus Edelstahl.....	104

Abbildung 58: Investitionskosten für die Isolierung für Rohrbündel-Wärmeübertrager ..	104
Abbildung 59: Investitionskosten für hybride Wärmetauscher .....	105
Abbildung 60: Ausgewählte Daten von Wasser/Wasser-Wärmetauschern in Platten- und Rohrbündelausführung .....	106
Abbildung 61: Ausgewählte Daten unterschiedlicher Plattenwärmetauscher.....	107
Abbildung 62: Ausgewählte Daten von Abgaswärmetauschern.....	108





**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und  
Technologie**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

[bmk.gv.at](https://www.bmk.gv.at)