

Abwärmennutzung im Betrieb

Klima schützen – Kosten senken



energie



Bayerisches Landesamt für
Umwelt



Abwärmennutzung im Betrieb

Klima schützen - Kosten senken



Industrie- und Handelskammern
in Bayern

UmweltSpezial

Impressum

Abwärmenutzung im Betrieb
Klima schützen - Kosten senken

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
86179 Augsburg
Tel.: 0821 9071-0
Fax: 0821 9071-5556
E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de
Internet: www.lfu.bayern.de

Bearbeitung/Text/Konzept:

EU-Consult GmbH, Winfried Schmitz,
Ingenieurbüro für Energie- und Umwelttechnik
Büro Ingolstadt
Marie Curie-Str. 8
85055 Ingolstadt

LfU, Referat 22, Vera Linckh

Redaktion:

Wertarbeit, Stefan Jackl,
Westendstr. 87, 80339 München
www.die-wertarbeit.de

LfU, Referat 22., Vera Linckh

Bildnachweis:

Bernhard Linz, aia orange, Büro für Gestaltung, Am Mittleren Moos 48, 86167 Augsburg, S. 18, 20, 25, 37
EU-Consult GmbH (s. o.) S. 34
Geese Beratende Ingenieure, Energiesystemtechnik, www.ing-geese.de, S. 22, 23, 35, 36

Druck:

Druckerei Joh. Walch GmbH & Co. KG
Im Gries 6
86179 Augsburg

Gedruckt auf Papier aus 100 % Altpapier.

Stand:

Januar 2012, 1. Auflage: 3.000 Exemplare
November 2012, 2. Auflage: 6.000 Exemplare

Diese Druckschrift wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Sofern in dieser Druckschrift auf Internetangebote Dritter hingewiesen wird, sind wir für deren Inhalte nicht verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Faktoren für eine Abwärmenutzung	6
2.1	Das Temperaturniveau der Abwärmequelle	6
2.2	Verfügbare Wärmemengen	7
2.3	Der Wärmebedarf	8
2.4	Der zeitliche Verlauf	9
2.5	Die örtlichen Gegebenheiten	10
2.6	Die Dimensionierung von Anlagen zur Abwärmenutzung	10
2.7	Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit	11
2.8	Eckpunkte bei der Planung einer effektiven Abwärmenutzung	11
3	Typische Abwärmequellen und ihre Eigenschaften	14
3.1	Druckluftanlagen	14
3.2	Raumluftechnische Anlagen	15
3.3	Trocknungsanlagen	17
3.4	Kälteanlagen, Maschinen- und Werkzeugkühlung	18
3.5	Abgase bei Verbrennungsanlagen	20
3.6	Thermische Nachverbrennung	22
3.7	Prozessabluft	23
3.8	Dampf und Brüddampf (Schwadendampf)	24
3.9	Kraft-Wärme-Kopplung und Blockheizkraftwerke	25
3.10	Abwassernutzung	26
3.11	Solarthermische Prozesswärme	26
4	Einsatz von Abwärme	27
4.1	Heizung und Heizungsunterstützung	27
4.2	Brauchwarmwasserbereitung und -unterstützung	28
4.3	Prozesswärme	28
4.4	Abwärmenutzung mit Wärmepumpe	29
4.5	Kälteerzeugung	30
4.6	Stromerzeugung mit einer ORC-Turbine	31

5	Abwärmeauskopplung	32
5.1	Medien zur Wärmeübertragung	32
5.2	Wärmetauscher	33
6	Speicherung/Pufferung von Abwärme	35
6.1	Sensible/Kapazitive Wärmespeicher	35
6.2	Latentwärmespeicher	36
7	Typische Beispiele	37
7.1	Abwärmenutzung aus Backöfen (Dampf und Abgas)	37
7.2	Nutzung von Abwärme in einer Wäscherei (Prozessabluft, Druckluft, Trocknung)	38
7.3	Abwärmenutzung von Kälteanlagen	39
7.4	Dampfkessel mit Economiser und Brennwertnutzung	40
7.5	Thermische Nachverbrennung	41
7.6	Wärmerückgewinnung in einer Flaschenspülanlage	42
8	Checklisten	43
8.1	Richtiges Vorgehen beim Planen einer Abwärmenutzung	43
8.2	Erstbeurteilung von Abwärme	44
8.3	Möglichkeit der Abwärmenutzung	45
9	Anhang	46

1 Einleitung

Abwärme fällt in Handwerks- und Industriebetrieben, bei Produktionsprozessen oder beim Betrieb von Gebäuden und Nebenanlagen an. Die Abwärmequellen sind dabei sehr unterschiedlicher Natur und reichen von Raumluftechnischen Anlagen über Elektromotorsysteme bis hin zu Prozessanlagen (Trockner, Öfen, Kessel). Die Abwärme kann an bestimmte Medien gebunden sein oder diffus über die Oberfläche abgegeben werden. Dabei ist die an Medien gebundene Abwärme deutlich leichter zu nutzen.

Durch energieeffiziente Komponenten, eine gute Dämmung der Anlagen und eine effiziente Betriebsweise kann die Abwärmemenge zwar reduziert, jedoch nie vollständig vermieden werden.

Im Vordergrund sollte immer die Vermeidung von Abwärme stehen, d. h. es gilt

- nicht unnötig Energie zu verbrauchen
- den Energiebedarf zu reduzieren (Optimieren des Betriebs).

Nach Ausschöpfen dieser Möglichkeiten kann durch Nutzung nicht vermeidbarer Abwärme die Energieeffizienz und damit die Wirtschaftlichkeit eines Betriebes häufig gesteigert werden.

Neben der Verminderung des Primärenergiebedarfs und dadurch der Energiekosten bietet die Nutzung von Abwärme oft einen weiteren Zusatznutzen:

- eine Entlastung der bestehenden Wärmeversorgung bzw. Kühlanlage
- einen reduzierten Investitionsaufwand, wenn die Wärmeversorgung oder die Kühlanlage erneuert bzw. erweitert werden sollen.

Abwärme lässt sich unterschiedlich nutzen:

Bei der Wärmerückgewinnung wird die Abwärme im Prozess in derselben Anlage ohne wesentliche Zeitverschiebung wieder genutzt. Dadurch wird der Wirkungsgrad der Anlage erhöht (z. B. in Lüftungs- oder Raumluftechnischen Anlagen). Für die Wärmerückgewinnung stehen häufig standardisierte Verfahren zu Verfügung.

Bei der Abwärmennutzung wird die Abwärme dagegen in einem anderen Prozess eingesetzt.

Der folgende Leitfaden soll es Unternehmen ermöglichen, ungenutzte Abwärmepotenziale und geeignete Anwendungen in ihrem Betrieb zu identifizieren und so die Energieeffizienz des Betriebes zu erhöhen. Für die wichtigsten Abwärmequellen und deren Nutzungsmöglichkeiten wird ein Überblick gegeben und es werden die wichtigen Aspekte für eine Anlagenkonzeption dargestellt.

2 Faktoren für eine Abwärmenutzung

Um herauszufinden, wo Abwärmepotenziale liegen und wer als Wärmeverbraucher dafür in Frage kommt, müssen Prozesse und Anlagen eines Betriebes zunächst in einer Grobanalyse betrachtet werden. Eine Hilfestellung dazu können Prozessschemata und Lagepläne mit Übersicht der vorhandenen Anlagen geben.

In der anschließenden detaillierten Analyse sollten jede Abwärmequelle und jeder potenzielle Wärmeverbraucher hinsichtlich folgender Kriterien geprüft werden:

- Temperaturniveau
- Verfügbare Wärmemenge, Maximal- und Durchschnittsleistung
- Zeitlicher Verlauf von Wärmeangebot und Wärmebedarf
- Wärmeträgermedium (spezifische Wärmekapazität und Zusammensetzung)
- Örtliche Gegebenheiten: Platzverfügbarkeit, Distanz zur Wärmequelle

2.1 Das Temperaturniveau der Abwärmequelle

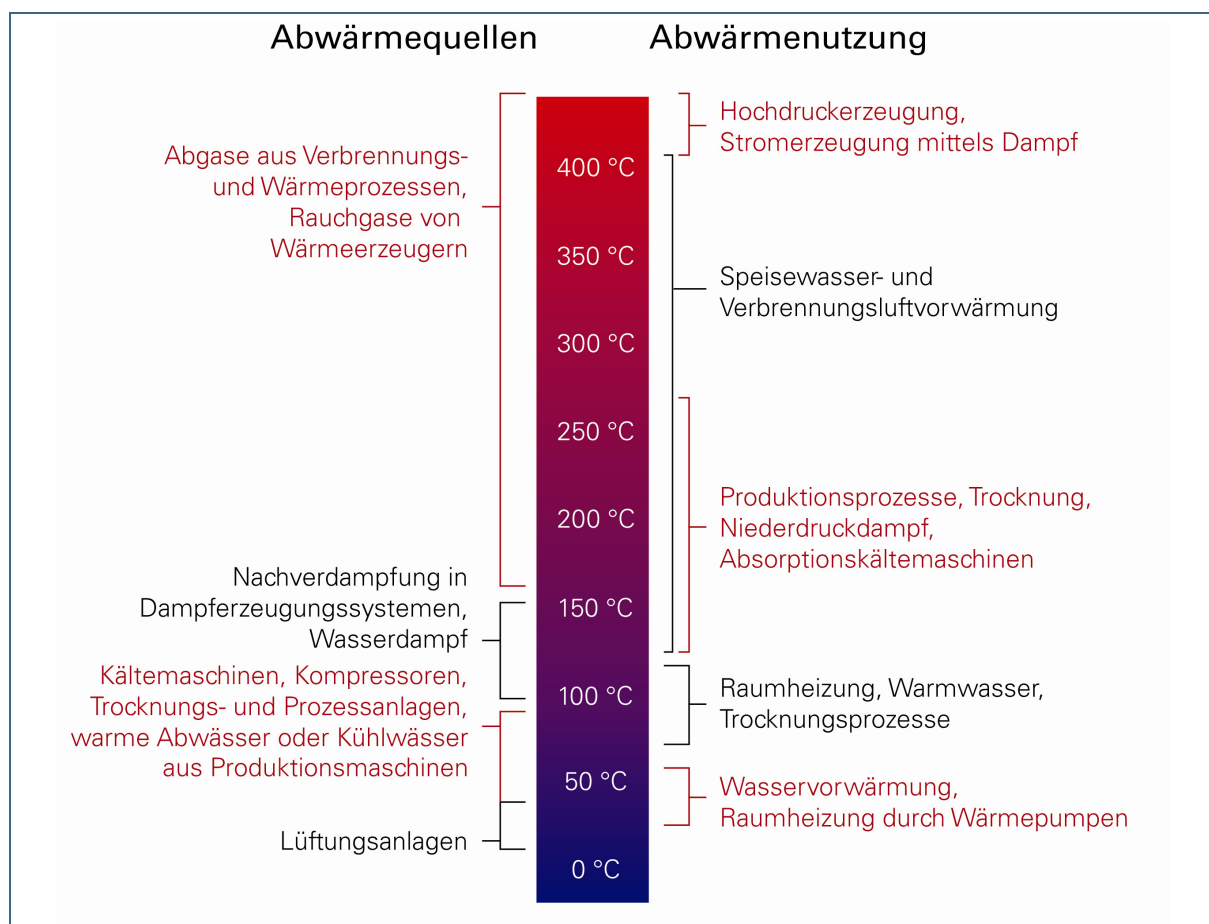


Abb. 1: Verschiedene Abwärmequellen bieten je nach Temperatur unterschiedliche Nutzungsmöglichkeiten.

Abbildung 1 gibt einen ersten Überblick über die unterschiedlichen Temperaturniveaus von Abwärmequellen und -senken. Allerdings muss für jede Anwendung im Detail geprüft werden, welche Anlagen miteinander kombiniert werden können.

Je niedriger die für eine Wärmenutzung erforderliche Temperatur, desto mehr Abwärmequellen kommen dafür in Frage. Grundsätzlich muss die Temperatur der Abwärmequelle um einige Kelvin höher liegen als die Temperatur, die der Wärmeverbraucher benötigt. Je höher die Temperaturdifferenz, desto kleiner kann der Wärmetauscher gewählt werden und desto geringer sind die Investitionskosten.

Abwärme steht meist auf einem eher niedrigen Temperaturniveau zur Verfügung bzw. es wird die Abwärme auf hohem Temperaturniveau bereits für andere Zwecke im Betrieb verwendet. Deshalb eignen sich für die Abwärmenutzung vor allem Niedertemperatursysteme (z. B. Fußbodenheizung) bzw. Systeme mit niedriger Eingangstemperatur (z. B. Verbrennungsluftvorwärmung bei Kesseln).

Wird für die Wärmenutzung ein höheres Temperaturniveau benötigt als es die Kombination mit der verfügbaren Wärmequelle bietet, besteht die Möglichkeit der Vorwärmung. Zur Nachheizung muss dann ein anderer Energieträger (z. B. Erdgas, Heizöl) herangezogen werden. So kann für die Brauchwasser-Erwärmung Trinkwasser, das meist mit acht bis zwölf °C aus der Leitung kommt, auf 35 °C vorgewärmt, um anschließend z. B. auf 65 °C nachgeheizt zu werden (Brauchwarmwasser-Unterstützung).

Je niedriger die geforderte Temperatur, desto mehr Abwärmepotenziale können genutzt werden.

Reicht das Temperaturniveau der Wärmequelle nicht für eine Wärmenutzung aus, kann die Temperatur mit einer Wärmepumpe erhöht werden (siehe Kapitel 4.4).

2.2 Verfügbare Wärmemengen

Basis einer optimalen Abwärmenutzung ist die Ermittlung der verfügbaren Wärmemenge. Die verfügbare Wärmemenge hängt von der nutzbaren Temperaturdifferenz, dem Massen- bzw. Volumenstrom, der zeitlichen Verfügbarkeit sowie der spezifischen Wärmekapazität des Wärmeträgermediums ab.

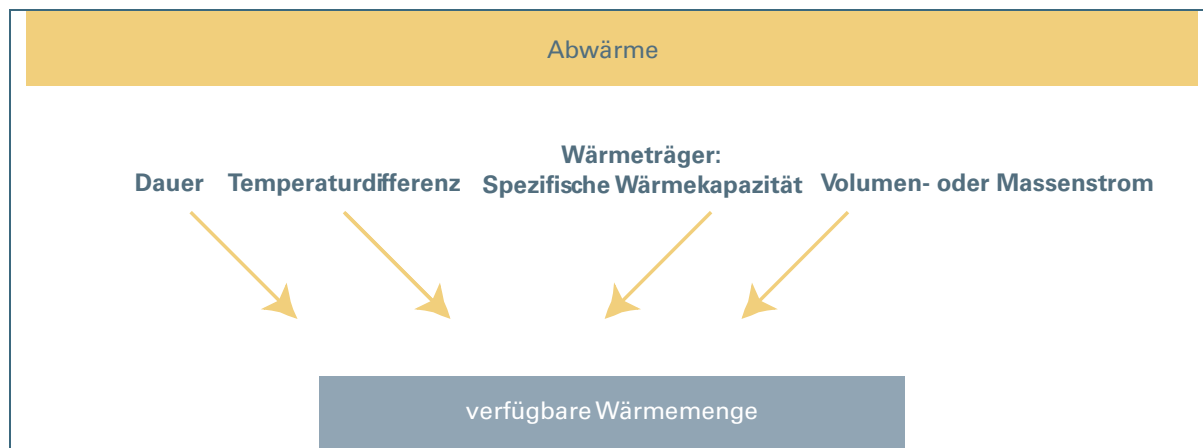


Abb. 2: Die verfügbare Wärmemenge wird von mehreren Faktoren bestimmt.

Der Massenstrom einer Flüssigkeit (z. B. Wasser oder Wasser-Glykol-Gemisch) bzw. der Volumenstrom eines Gases (z. B. Luft oder Abgas) kann den technischen Unterlagen der Anlage entnommen werden. Hierbei gilt es zu berücksichtigen, dass industrielle Anlagen häufig nicht unter Volllast betrieben werden.

Gegebenenfalls kann die verfügbare Wärmemenge auch abgeschätzt werden, indem man die Energieaufnahme (Strom- und Brennstoffverbrauch) und den Wirkungsgrad einer Anlage betrachtet. Einen Anhaltspunkt liefern auch Schätzungen des technischen Personals zur Auslastung einer Anlage.

Falls entsprechende Daten nicht zur Verfügung stehen, sollten Messungen durchgeführt werden. Für eine optimale Abwärmenutzung empfiehlt es sich dabei, die Massen- und Volumenströme über einen längeren, repräsentativen Zeitraum zu messen. So kann eine falsche Dimensionierung ausgeschlossen werden.

2.3 Der Wärmebedarf

Der Wärmebedarf eines Wärmenutzers muss nicht mit dem Abwärmepotenzial übereinstimmen.

Liegt das Wärmeangebot höher als die Nachfrage, kann die verbleibende Restwärme anderweitig genutzt oder muss an die Umwelt abgegeben werden. Liegt die Wärmenachfrage höher als das Angebot, muss mit einer alternativen Energiequelle nachgeheizt werden.

Bei der Einbindung mehrerer Wärmequellen oder -senken ist es notwendig, die verschiedenen Temperaturniveaus und Leistungen sowie das zeitliche Angebot bzw. die zeitliche Nachfrage aufeinander abzustimmen.

Sensible Prozesse müssen genauer betrachtet werden: Durch den Wärmeentzug können die Prozessparameter verändert werden. Eine Nutzung der Abwärme aus dem Abgas kann auch durch zu hohen Wärmeentzug zu Korrosion führen. Hier muss die Wärmemenge unter Berücksichtigung der prozesstechnischen Grenztemperaturen berechnet werden. Im Zweifelsfall ist die Rückgewinnung von Wärme zugunsten des reibungslosen Betriebsablaufs zu reduzieren.

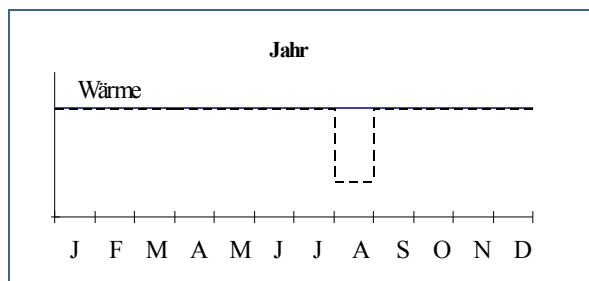
Es empfiehlt sich, erzielte Einsparungen durch ein Energiecontrolling zu verfolgen. Dazu sind entsprechende Wärmemengenzähler (z. B. auf der Wärmenutzerseite) in die Anlage zu integrieren bzw. ist die Anlage auf eine bestehende Prozessleittechnik aufzuschalten, um mindestens den Wärmeübergang am Wärmetauscher zu kontrollieren. Ein entsprechendes Monitoring-System ermöglicht die fortlaufende Optimierung der Wärmenutzungsanlage (z. B. Veränderung des Volumenstroms, Versorgung weiterer Wärmeverbraucher).

Oftmals werden Wärmenutzungs-Anlagen lediglich grob ausgelegt, da nicht genügend Ausgangsdaten zur Verfügung stehen. Hier ist ein Monitoring-System in jedem Fall sehr hilfreich, denn es liefert belastbare Zahlen für den Betrieb einer Abwärmenutzungsanlage.

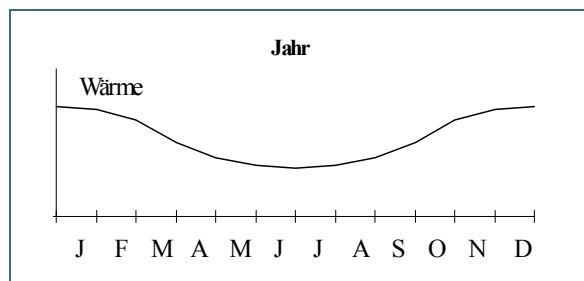
2.4 Der zeitliche Verlauf

Neben dem Temperaturniveau, der Maximalleistung und den Jahresenergiemengen müssen auch das Wärmeangebotsprofil und der Verlauf erfasst werden. Nachfolgend sind zeitliche Verläufe von Wärmeangebot und Wärmebedarf über das Jahr, über die Woche und über den Tag dargestellt.

Typische Jahresganglinien

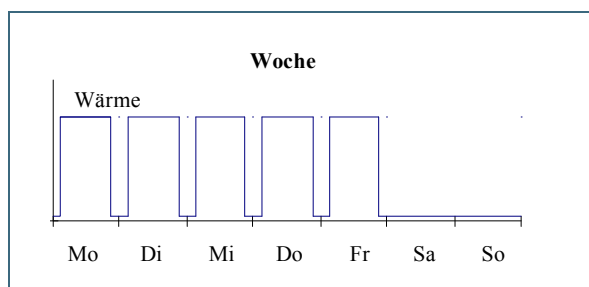


Gleichmäßiger Wärmeanfall/-bedarf im Jahresverlauf

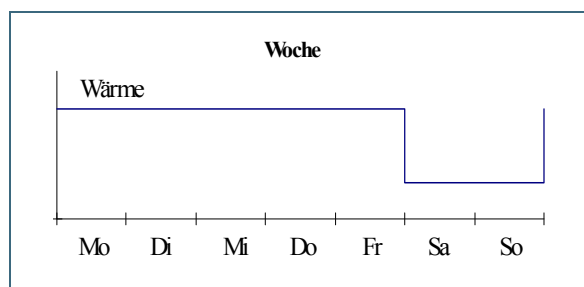


Verminderter Wärmeanfall/-bedarf in den Sommermonaten

Typische Wochenganglinien

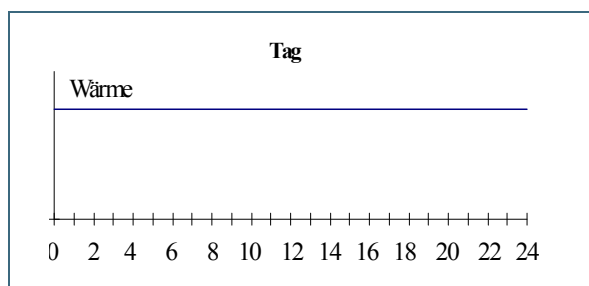


Typischer Wärmeanfall/-bedarf im Wochenverlauf

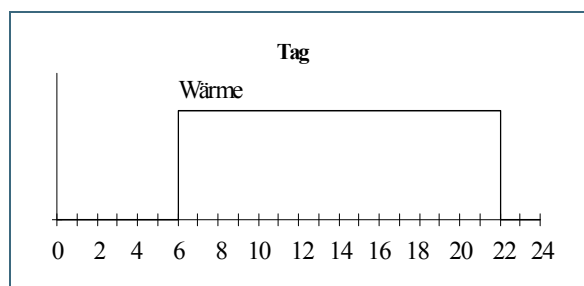


Kein/Verminderter Wärmeanfall/-bedarf an den Wochenenden bzw. außerhalb der Arbeitszeit

Typischer Tagesganglinien



Gleichmäßiger Wärmebedarf im Tagesverlauf



Kein/Verminderter Wärmebedarf außerhalb der Arbeitszeiten

Bei diskontinuierlichem Anlagenbetrieb können allerdings auch kurzfristige, im Einzelfall sehr hohe Leistungsspitzen auftreten.

Im günstigsten Fall stimmen die zeitlichen Verläufe der Abwärmeverfügbarkeit und des Wärmebedarfs überein. Dies gilt vor allem dann, wenn die Abwärme an der gleichen Anlage, an der sie anfällt, oder für den gleichen Zweck verwendet wird (z. B. bei der Gebäudelüftung und -heizung).

2.5 Die örtlichen Gegebenheiten

Neben der Frage, ob ausreichend Installationsraum für die Komponenten zur Verfügung steht, spielt die Distanz zwischen der Wärmequelle und dem Wärmenutzer eine große Rolle. Lange Transportwege der Wärmeträgermedien führen zu Wärmeverlusten und erhöhen den Transportaufwand und damit die Investitions- und Betriebskosten (Rohrleitungen, Kanäle, Pumpen). Welche Distanz noch wirtschaftlich überbrückt werden kann, muss im Einzelfall geprüft werden und hängt davon ab, welche Wärmemenge übertragen werden soll, wie hoch die Investitionskosten für die restliche Wärmenutzungsanlage und der spezifische Preis des substituierten Brennstoffes sind.

2.6 Die Dimensionierung von Anlagen zur Abwärmenutzung

Generell gibt es verschiedene Möglichkeiten der Anlagenauslegung, z. B. die höchstmögliche Abwärmenutzung oder das betriebswirtschaftliche Optimum. Meist empfiehlt es sich, die Anlage auf die Grundlast der Wärmequelle bzw. der Wärmesenke auszulegen. Die zu installierende Leistung und damit auch die Kosten können auf diese Weise verringert werden, die Vollbenutzungsstunden und damit die Anlagenauslastung lassen sich erhöhen. Eine Auslegung auf die Grundlast des Wärmebedarfs ist vor allem sinnvoll, wenn eine bestehende Wärmeerzeugungsanlage den Wärmebedarf bereits abdeckt.

Eine kostengünstige Auslegung einer Anlage orientiert sich meist an der Grundlast des Wärmebedarfs. Dies soll am Beispiel der Abwärmenutzung in einer Bäckerei verdeutlicht werden (Abb. 3):

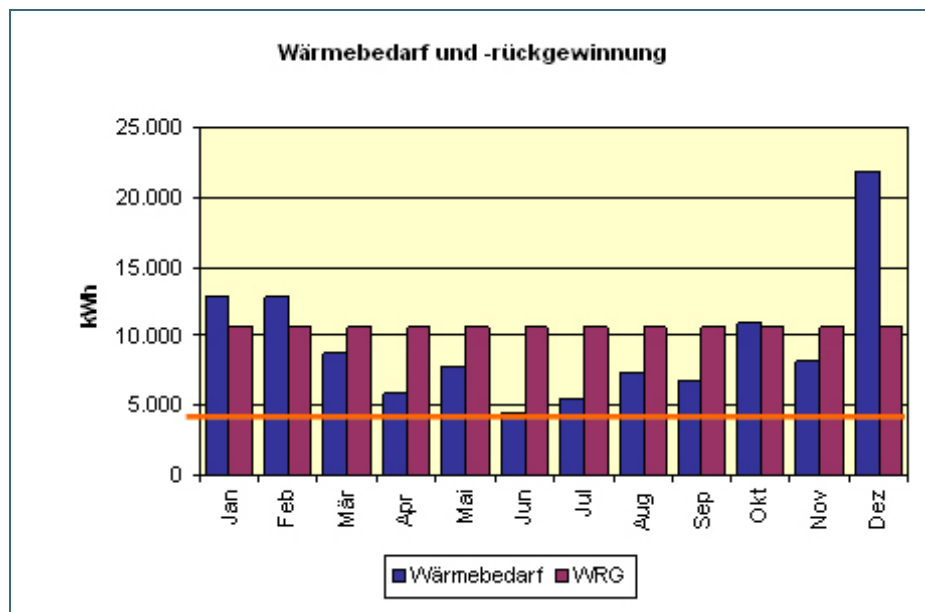


Abb. 3:
Wärmebedarf und
Wärmerückgewinnung
in einer Bäckerei im
Jahresverlauf

Die Abwärme aus Schwaden und Abgas reicht zur Abdeckung von Brauchwarmwasser- und Heizwärmebedarf aus. Im Sommer liegt der Wärmebedarf jedoch deutlich niedriger als die verfügbare Abwärmemenge der Backöfen. Um eine längstmögliche Dauer der Abwärmenutzung zu erreichen, sollte die Anlage auf den minimalen Wärmebedarf der Wärmesenke ausgelegt werden (Sommerlastfall: orangefarbene Linie).

Dadurch lassen sich deutlich geringere Anlagenkosten mit einer hohen Vollbenutzungsstundenzahl kombinieren und das eingesetzte Kapital optimal nutzen.

Anhand einer Jahresdauerlinie lässt sich bei einer Anlagenauslegung auf Teillast abschätzen, welcher Anteil des Wärmebedarfs damit abgedeckt werden kann. Abbildung 4 zeigt dies am Beispiel einer Jahresdauerlinie für eine Heizungsanlage. Die Spitzenleistung wird nur wenige Stunden im Jahr benötigt. Bei einer Auslegung der Anlage auf 15 bis 25 % des Leistungsbedarfs können aber bereits 50 bis 70 % des Wärmebedarfs abgedeckt werden.

Für andere, insbesondere industrielle Anwendungen ist jeweils eine Einzelfallbetrachtung erforderlich.

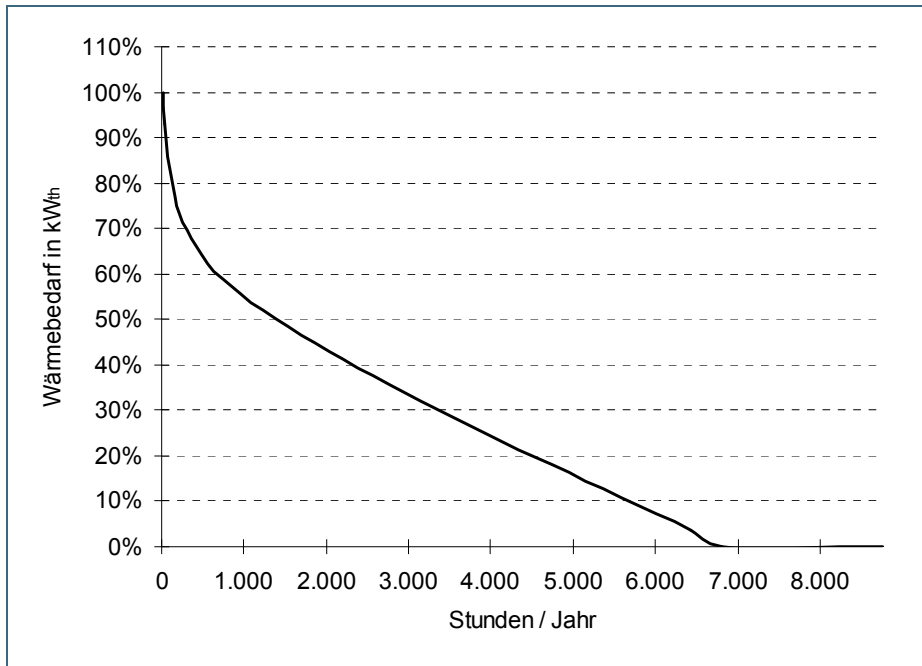


Abb. 4:
Die Jahresdauerlinie der Heizungsanlage zeigt, dass die Höchstleistung nur wenige Stunden im Jahr benötigt wird.

2.7 Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit

In der Praxis wird oft die Amortisationszeit als alleiniges Kriterium verwendet. Die Amortisationszeit gibt jedoch nur an, wann das eingesetzte Kapital zurückgeflossen ist, trifft aber keine Aussage zur Rentabilität.

Bei Investitionen im Energiebereich, die sich durch eine lange Nutzungszeit auszeichnen, sollte in jedem Fall die Rentabilität betrachtet werden. Ein geeignetes Maß ist die Kapitalrendite (innere Verzinsung).

Zusätzlich zu den Investitionskosten müssen auch die zu erwartenden Betriebskosten ermittelt werden. Dies sind vor allem:

- Höhe des Stromverbrauchs des Ventilators, der Umwälzpumpe bzw. der Abwärmenutzungsanlage
- Wartungs- und Instandhaltungskosten (jährlich meist eineinhalb bis zwei Prozent der Investitionskosten, bei Abgaswärmenutzung ca. zwei bis drei Prozent).

2.8 Eckpunkte bei der Planung einer effektiven Abwärmenutzung

- Langfristige Produktionsplanung: Vor der Umsetzung einer Wärmerückgewinnung bzw. Abwärmenutzung sollten die weiteren betrieblichen Planungen berücksichtigt werden. Wird auch in Zukunft

noch das gleiche Abwärmepotenzial zur Verfügung stehen (Beispiel: Verminderung des Abwärmepotenzials durch Einsatz einer effizienteren Produktionsmaschine)? Wird sich an der Wärmenachfrage etwas ändern (Beispiel: Verminderung des Heizwärmebedarfs durch eine Gebäudesanierung)?

- Der Planer sollte sich um eine sorgfältige Abstimmung mit Anlagenbetreiber und Anlagenhersteller bemühen.
- Abwärme steht häufig auf niedrigem Temperaturniveau zur Verfügung. Je niedriger die Temperaturanforderung einer Wärmenutzung, desto mehr Abwärmequellen kommen in Frage.
- Hydraulische Regelung: Bei zu geringem Durchfluss durch den Wärmetauscher kann die Leistung nicht in vollem Umfang übertragen werden. Bei zu hohem Durchfluss kann dagegen die Temperaturdifferenz nicht optimal genutzt werden.
- Leistungsregelung: Um eine „Zwangsheizung“ zu vermeiden, sollte die Anlage mit einer Leistungssteuerung ausgestattet werden (z. B. Bypassklappen bei Lüftungskanälen und Wärmerohren bzw. Drehzahlsteuerung bei Rotationswärmetauschern).
- Über-/Unterdimensionierung vermeiden: Bei Überhitzung des Wärmetauschers kann es zu Spannungen und schließlich zur Zerstörung des Wärmetauschers kommen (z. B. durch zu geringe Abnahmeleistung und träge Abgasregelklappen).
- Vereisungsgefahr: Vereisungen vor allem in Kreuzstromwärmetauschern oder Rotationswärmetauschern sind durch einen Bypass oder Vorwärmer vorzubeugen, da die Wärmetauscherleistung durch Eis verringert wird.

Kriterien für eine Abwärmenutzung

Systeme zur Wärmerückgewinnung bzw. Abwärmenutzung können in vielen Fällen wirtschaftlich umgesetzt und betrieben werden. Voraussetzung ist, dass die Abwärmequelle und die Wärmesenken zueinander passen. Wichtige Kriterien sind:

- **Nutzbares Temperaturniveau:**
Die Temperatur der Abwärme muss über derjenigen der Wärmesenke liegen (mindestens 5-10 K). Je höher die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke, desto besser die Wärmeübertragung.
- **Wärmemenge und Wärmeleistung:**
Stimmen die zur Verfügung stehende Abwärmemenge und die benötigte Wärmeleistung nicht überein, muss die Spitzenlast gegebenenfalls durch einen weiteren Wärmeerzeuger abgedeckt werden.
- **Kontinuität bei der Nutzung:**
Eine Rückgewinnung der Wärme kann sich auch schon bei geringen Abwärmemengen rechnen, wenn die Anlage z. B. eine hohe Vollbenutzungsstundenzahl erreicht.
- **Räumliche Nähe:**
Abwärmequelle und Wärmesenke sollten möglichst nah beieinander liegen, um Transportverluste und Leitungskosten gering zu halten.
- **Zeitliche Differenz zwischen Wärmeangebot und -bedarf:**
Je besser Wärmequelle und Wärmesenke im zeitlichen Verlauf übereinstimmen, desto besser kann die Abwärme genutzt werden. Häufig passt das Bedarfsprofil jedoch nicht vollständig zum Angebotsprofil. In diesem Fall besteht die Möglichkeit, mit einem Wärmespeicher Leistungsspitzen und zeitliche Differenzen abzuf puffern (siehe Kapitel 6).
- **Jährliche Betriebsstunden und Nutzungsdauer der Anlage:**
Je länger eine Anlage in Betrieb ist und je mehr Vollbenutzungsstunden erreicht werden, desto wirtschaftlicher arbeitet diese Anlage.
- **Investitionskosten:**
Die Wärme muss mit vertretbarem Aufwand gesammelt und transportiert werden können. Je aufwändiger das Sammeln und der Transport der Wärme, desto höher liegen die Investitionskosten.
- **Versorgungssicherheit:**
Wird ein Prozess ausschließlich mit Abwärme betrieben, ist häufig ein redundantes System erforderlich, um den durchgängigen Anlagenbetrieb auch bei Ausfall der Abwärmequelle zu gewährleisten. Handelt es sich um einen sensiblen Prozess, der von einem bestimmten Temperaturniveau abhängt, müssen die prozesstechnischen Rahmenbedingungen unbedingt im Detail geprüft werden.
- **Zusatznutzen**
Mitunter lässt sich durch die Nutzung von Abwärme eine Erweiterung oder eine Erneuerung einer Energieerzeugungsanlage vermeiden. Dies ist bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu berücksichtigen.

3 Typische Abwärmequellen und ihre Eigenschaften

Grundsätzlich ist es erforderlich, für jeden Betrieb ein individuelles Abwärmekonzept auszuarbeiten, da die konkreten Anforderungen und Leistungsdaten stark variieren. Für Standardfälle sollen hier dennoch einige Anhaltswerte angegeben werden. Diese Angaben beziehen sich dabei nur auf die Anlage zur Wärmerückgewinnung, nicht auf das Wärmenutzungssystem. Die zu erwartenden Kosten für große Anlagen sowie für einfache Anwendungsfälle mit geringen technischen Anforderungen liegen niedriger. Für kleinere Anlagen bzw. für Anlagen mit hohem technischem Aufwand liegen die Investitionskosten entsprechend höher.

3.1 Druckluftanlagen

Die erzeugte Druckluft muss durch Luft, Wasser oder Öl gekühlt werden (im sogenannten Nachkühler). Diese Abwärme kann zurückgewonnen werden, ebenso wie die Abwärme des Druckluftkompressors.

Eine einfache Möglichkeit ist, die erwärmte Kühlluft direkt zur Gebäudeheizung zu nutzen. Die Kompressor-Abwärme lässt sich aber auch in vorhandene Warmwasser-Heizsysteme und Brauchwarmwasser-Anlagen einspeisen.

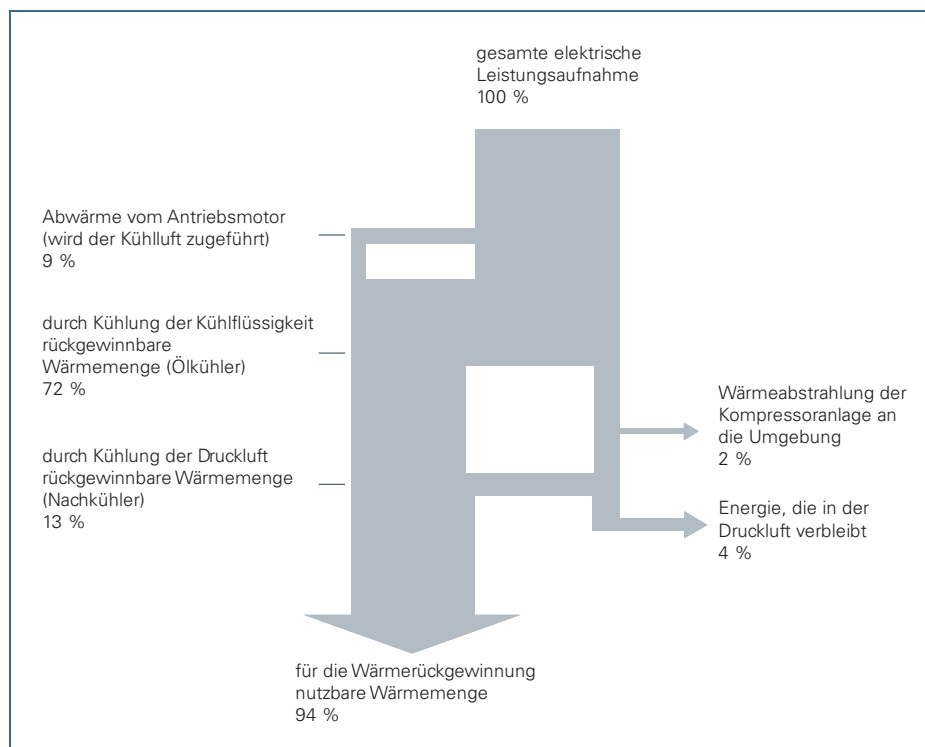


Abb. 5:
Bei der Erzeugung von Druckluft verbleiben nur etwa vier Prozent der eingesetzten Energie in der Druckluft. Der Rest geht als Abwärme verloren. 70 bis 90 % der eingesetzten Energie lassen sich als Wärme zurückgewinnen.

Bei der Abwärmenutzung aus Druckluftanlagen lassen sich Wassertemperaturen von 70 bis 80 °C erreichen. Ab einer Leistung von rund fünf kW werden für neue Druckluftanlagen bereits Systeme zur Wärmerückgewinnung angeboten. Aber auch ältere Kompressoren lassen sich nachrüsten, wobei die Investitionskosten hier ca. 30 % höher liegen.

Die Amortisationszeit für Systeme mit Plattenwärmetauschern zur Wärmeeinspeisung in Heizsysteme wird von Herstellern mit einem halben bis zwei Jahre angegeben. Die Wirtschaftlichkeit der Anlagen bleibt jedoch im Einzelfall zu prüfen und hängt sehr stark vom zeitlichen Nutzungsprofil der Anlage ab.

Abwärmenutzung von Druckluftherzeugern	
Nutzbare Abwärmemenge	Bis zu 90 % der elektrischen Antriebsleistung der Druckluft-Kompressoren
Wirtschaftlicher Einsatz	Eine Abwärmenutzung rechnet sich ab ca. 5 kW elektrischer Antriebsleistung der Druckluft-Kompressoren und mehr als 2000 Betriebsstunden pro Jahr in der Heizperiode. Optimal sind Wärmenutzer mit ganzjähriger Wärmeabnahme.
Spezifischer Investitionsbedarf	35 bis 460 € je kW Abwärmenutzung: - Niedrige Kosten ergeben sich bei einfachen Systemen mit direkter Abluftnutzung sowie bei werkseitig bereits für die Wärmenutzung vorbereiteten Kompressoren. - Höhere Kosten ergeben sich bei aufwändigen Systemen mit Wärmetauschern und Heizwasserkreisläufen sowie bei nachträglichem Einbau von Wärmerückgewinnungs-Anlagen.
Verfahren	Direkte Luftheizung durch Abluft des Druckluft-Verdichters Heiz- oder Brauchwasser-Erwärmung

3.2 Raumluftechnische Anlagen

In Raumluftechnischen Anlagen kann Wärme oder auch Kälte, die mit der Abluft verloren geht, durch einen Wärmetauscher für die Vorwärmung der Frischluft zurückgewonnen werden.

Dabei wird die warme Abluft aus den Räumen durch den Abluftwärmetauscher geleitet und gibt ihre Wärme an die sekundärseitig nach innen strömende Zuluft ab. Wärmerückgewinnung bei Raumluftechnischen Anlagen ist Stand der Technik.

Die folgende Grafik zeigt das Anlagenschema einer Wärmerückgewinnung in einer Raumluftechnischen Anlage. Die Außenluft wird auf 15,6 °C angewärmt.

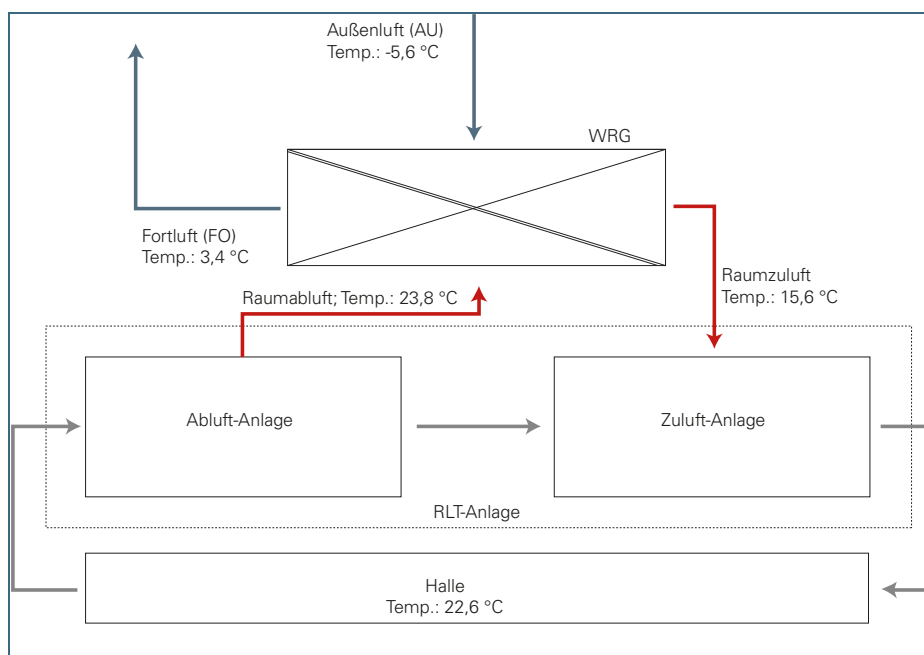


Abb. 6: Mithilfe der Wärmerückgewinnung (WRG) aus der Raumabluft (23,8 °C) wird die Außenluft auf 15,6 °C angewärmt.

Nach der Energieeinsparverordnung 2009 (EnEV 2009) müssen Anlagen mit einer Nennleistung für den Kältebedarf von mehr als 12 kW oder einem Zuluft-Volumenstrom von mindestens 4.000 m³/h bei Neubau oder Erneuerung mit einer Wärmerückgewinnungs-Anlage ausgestattet werden.

Doch auch bei Anlagen mit geringerer Leistung sollte die Wärmerückgewinnung an einer Raumluftechnischen Anlage Standard sein.

Der Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung in einer Raumluftechnischen Anlage kann heute in Abhängigkeit des Wärmetauschers bei 40 bis etwa 90 % liegen. Wenn man, um eine möglichst hohe Rückwärmezahl zu erreichen, den Wärmetauscher vergrößert, so erhöhen sich dadurch aber nicht nur die Investitionskosten, sondern es steigen auch der Druckverlust und der elektrische Aufwand für den Ventilatorantrieb an.

Auch bestehende Anlagen können mit einer Wärmerückgewinnungs-Anlage nachgerüstet werden, sofern für die Installation des Wärmetauschers ausreichend Platz zur Verfügung steht.

Wärmerückgewinnung in Raumluftechnischen Anlagen	
Nutzbare Abwärmemenge	35 bis 90 % der Abluft-/Fortluftenergie können zur Vorwärmung der Frischluft zurückgewonnen werden.
Wirtschaftlicher Einsatz	Wärmerückgewinnung rechnet sich ab ca. 60 m³/h Frischluftmenge. Bei allen Raumluftechnischen Systemen ist Wärmerückgewinnung Stand der Technik. Bei Raumluftechnischen Systemen ab 4.000 m³/h Frischluft ist Wärmerückgewinnung gesetzlich vorgeschrieben.
Spezifischer Investitionsbedarf	300 bis 1.300 € je 1.000 m³/h Frischluftmenge: • Niedrige Werte ergeben sich bei Platten- oder Rotationswärmetauschern. • Höhere Werte ergeben sich bei Kreislaufverbundsystemen oder Wärmerohren.
Verfahren	Wärmetausch zwischen Ab- und Zuluft

3.3 Trocknungsanlagen

Anlagen zur Trocknung werden im landwirtschaftlichen Bereich (z. B. bei Bandtrocknern zur Grünfüttertrocknung) ebenso eingesetzt wie in vielen Industriebereichen, etwa in der Keramik-, Papier-, Chemie- oder Lebensmittelindustrie. Die Abwärmenutzung aus Trocknungsprozessen ist derjenigen aus Prozessabgas vergleichbar.

Zur Verdampfung von Wasser oder Lösungsmitteln sind enorme Energiemengen erforderlich. Das Temperaturniveau hängt dabei vom jeweiligen Trocknungsprozess ab. In der Lebensmittelindustrie werden beispielsweise Temperaturen von 30 °C bis zu 250 °C benötigt.

Die im Trocknungsabgas und in dem damit abgeführten Dampf (Brüden- oder Schwadendampf) enthaltene Energie kann mittels Wärmetauschern im Abgaskanal zurückgewonnen werden. Gegebenenfalls kommt hier zusätzlich auch die Rückgewinnung der Kondensationswärme in Betracht.

Eine zeitliche Übereinstimmung im Betrieb von Abwärmequelle und Wärmesenke wird erreicht, indem man die Abwärme zur Vorwärmung der Trocknungsluft bzw. des zu trocknenden Produktes einsetzt. Alternativ könnte die Wärme z. B. auch zur Vorwärmung der Zuluft einer Lüftungsanlage oder als Energiequelle für den Betrieb einer Wärmepumpe genutzt werden.

Handelt es sich um staub- oder schadstoffbelastete Abgase (z. B. bei der Trocknung von Lösungsmitteln), muss die Anlage daran angepasst werden. Bei feuchtebeladenem Trocknungsabgas ist eine Kondensatabführung erforderlich. Wenn die Trocknungsabluft korrosive Bestandteile enthält, darf eine Mindesttemperatur nicht unterschritten werden.

Abwärmenutzung bei Trocknungsanlagen	
Nutzbare Abwärmemenge	35 bis 85 % der Abluft-/Fortluftenergie können zur Vorwärmung der Frischluft oder zur Brauchwarmwasser-/Heiz-/Prozesswärmeerzeugung zurückgewonnen werden. Das Temperaturniveau der Abluft liegt meist zwischen 30 und 250 °C.
Wirtschaftlicher Einsatz	Abwärmenutzung rechnet sich ab ca. 50 m³/h Abluftmenge. Die Betriebszeit sollte mehr als 2.000 Stunden in der Heizperiode betragen, optimal ist eine ganzjährige Prozesswärmenutzung.
Spezifischer Investitionsbedarf	70 bis 450 €/kWh Abwärmeleistung (ohne Wärmenutzungssystem): • Bei großen Anlagenleistungen ergeben sich niedrigere Werte. • Bei kleineren Anlagenleistungen bzw. bei belasteten Abluftströmen ergeben sich höhere Werte.
Verfahren	Wärmetauscher in Ab-/Fortluft Gegebenenfalls auch mit einem Wärmepumpensystem kombinierbar

3.4 Kälteanlagen, Maschinen- und Werkzeugkühlung

Bei der Kälteerzeugung fällt, ebenso wie bei der Maschinen- und Werkzeugkühlung (z. B. bei Druckmaschinen oder Extrudern für die Kunststoffproduktion), Wärme an.

Zum einen kann die Abwärme aus dem Kühlkreislauf einer Kälteanlage oder einer Maschinenkühlung durch Einbau eines Wärmetauschers zwischen Verdichter und Verflüssiger genutzt werden. Das Temperaturniveau liegt dabei meist sehr niedrig (unterhalb 35 °C), so dass eine Wärmenutzung nur in Verbindung mit Niedertemperatursystemen oder alternativ in Kombination mit einer Wärmepumpe zur Temperaturerhöhung möglich ist. Abbildung Nr. 7 zeigt schematisch eine Kälteanlage mit Wärmerückgewinnung.

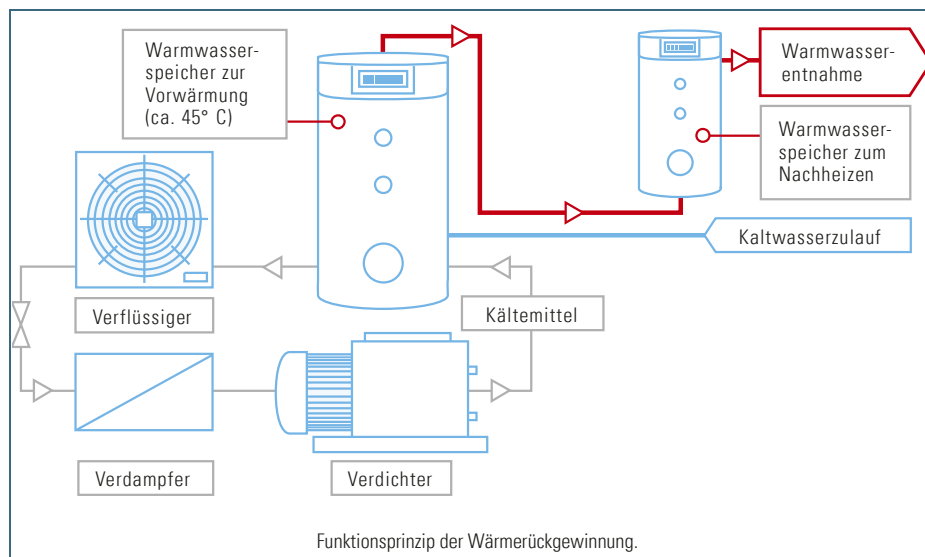


Abb. 7:
Funktionsprinzip der
Wärmerückgewinnung
bei einer Kälteanlage

Zum anderen kann die Abwärme des Kältekompressors selbst (50 bis max. 70 °C) genutzt werden. Bei wassergekühlten Kompressoren kann diese Wärme über einen Wärmetauscher in ein Heizsystem eingespeist werden. Bei luftgekühlten Kompressoren bietet sich die Direktnutzung der erwärmten Abluft an.

Auch bei Kleinanlagen mit geringer Leistung ist eine Wärmerückgewinnung sinnvoll, wenn das Wärmeangebot und die Wärmeabnahme kontinuierlich verfügbar sind. Interessant ist diese Technik insbesondere für die Lebensmittelbranche (z. B. Metzgereien oder Bäckereien), für Hotellerie und Gastronomie, da in diesen Wirtschaftszweigen stets große Mengen Warmwasser benötigt werden und das ganzjährige Abwärmeangebot aus den Kälteanlagen mit dem Wärmebedarfsprofil übereinstimmt. Wie eine entsprechende Anlage technisch umgesetzt werden kann und wie dies unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu bewerten ist, muss im Einzelfall geprüft werden.

Abbildung 8 gibt Anhaltswerte für die nutzbare Wärmeleistung von Kühl- bzw. Abwasser bei unterschiedlichen Temperaturen.

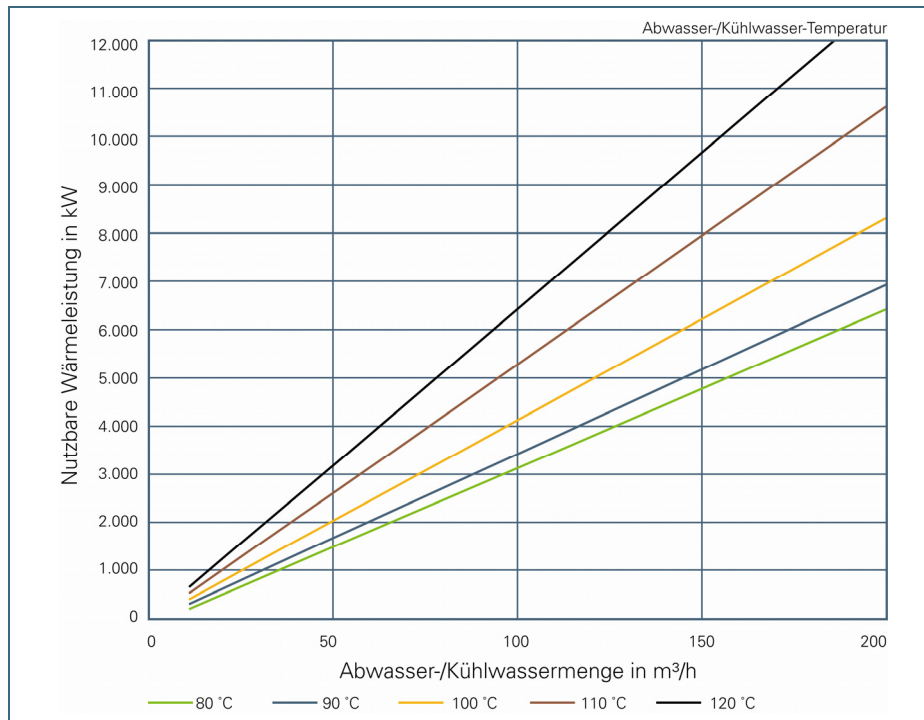


Abb. 8:
Anhaltswerte zur Abschätzung der nutzbaren Wärmeleistung von Kühl- bzw. Abwasser-Abwärmenutzungs-Anlagen für Temperaturen von 80 bis 120 °C

Abwärmenutzung bei Kälteanlagen und Kühlsystemen	
Nutzbare Abwärmemenge	35 bis 95 % der abzuführenden Kühlenergie können zur Brauchwarmwasser-/Heiz-/Prozesswärmeerzeugung zurückgewonnen werden. Das Temperaturniveau der Abluft liegt meist zwischen 25 und 100 °C.
Wirtschaftlicher Einsatz	Abhängig von der Art der Abwärmenutzung rechnet sich die Wärmerückgewinnung schon ab 1 kW bei direkter Einbindung der Wärmeverbraucher in das Abwärmesystem. Die Betriebszeit sollte mehr als 2.000 Stunden in der Heizperiode betragen, optimal ist eine ganzjährige Prozesswärmenutzung.
Spezifischer Investitionsbedarf	90 bis 560 €/kWh Abwärmeleistung (ohne Wärmenutzungssystem), je nach Größe der Anlagen
Verfahren	Direkte Einbindung der Wärmeverbraucher in den Kühlkreislauf Wärmetauscher im Kühlkreislauf bei Trennung von Kühl- und Wärmenutzungssystem Gegebenenfalls auch mit Wärmepumpensystem kombinierbar (je nach Temperaturniveau von Abwärmequelle und Wärmesenke)

3.5 Abgase bei Verbrennungsanlagen

Abgase nach Verbrennungsprozessen erreichen häufig sehr hohe Temperaturen. Für einige Kessel und Industrieöfen sind die üblichen Abgastemperaturen in der folgenden Tabelle angegeben.

Kessel-/Ofenart	Abgastemperatur in °C
Heißwasserkessel (mit Brennwertnutzung)	40 – 50
Heißwasserkessel (ohne Brennwertnutzung)	60 – 230
Schmelzöfen	400 – 700
Glasöfen (ohne Regenerator)	900 – 1.300
Glasöfen (mit Regenerator)	600 – 800
Dampfkessel	200 – 300
Warmöfen (ohne Regenerator)	700 – 1.200
Warmöfen (mit Regenerator)	300 – 600
Brennöfen Keramische Industrie	150 – 1.000

Tab. 1:
Übliche Abgastemperaturen von Kesseln und Industrieöfen

Zur Nutzung der Abgasabwärme wird üblicherweise ein Wärmetauscher zwischen dem Abgaserzeuger und dem Kamin installiert. Dabei müssen die Wärmetauscher die gleichen Anforderungen erfüllen wie Wärmetauscher für Dampferzeuger (Economizer). Für Feststofffeuerungen oder bei erhöhtem Staubanfall im Abgas bedarf es zusätzlich konstruktiver Maßnahmen am Abwärmetauscher und/oder Filter im Abgasweg.

Die zurückgewonnene Abgaswärme kann zur Vorwärmung der Verbrennungsluft oder des Kesselspeisewassers genutzt werden. Dies hat den Vorteil der zeitlichen Übereinstimmung von Wärmeeinfall und Wärmebedarf. Wegen der hohen Temperaturen eignet sich die Abwärme aber auch für zahlreiche andere Einsatzgebiete.

Die folgende Abbildung zeigt ein Abgas-Wärmenutzungssystem, mit dem ein Nahwärmenetz versorgt wird.

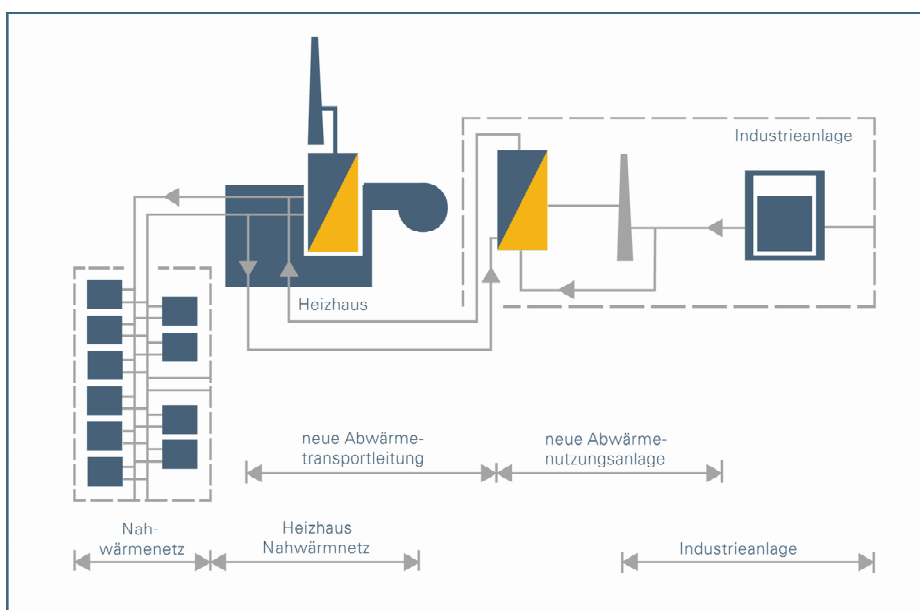


Abb. 9:
Große Mengen an Abgaswärme können beispielsweise in ein Nahwärmenetz eingespeist werden.

Zur Abschätzung der möglichen Abgaswärmeleistung ist in Abbildung 10 die theoretisch nutzbare Abgaswärmeleistung für verschiedene Feuerungswärmeleistungen angegeben. Die Berechnungen gehen davon aus, dass ein Heizwassernetz im Temperaturbereich Vorlauf/Rücklauf = 90/60 °C versorgt wird und die Abgastemperaturen bis auf unter 100 °C abgekühlt werden können. Dies erfordert je nach Abgaszusammensetzung Anlagen aus Edelstahl. Die Kosten für die Nachrüstung von Abgaswärmenutzungsanlagen liegen erfahrungsgemäß zwischen 70 €/kW und 450 €/kW.

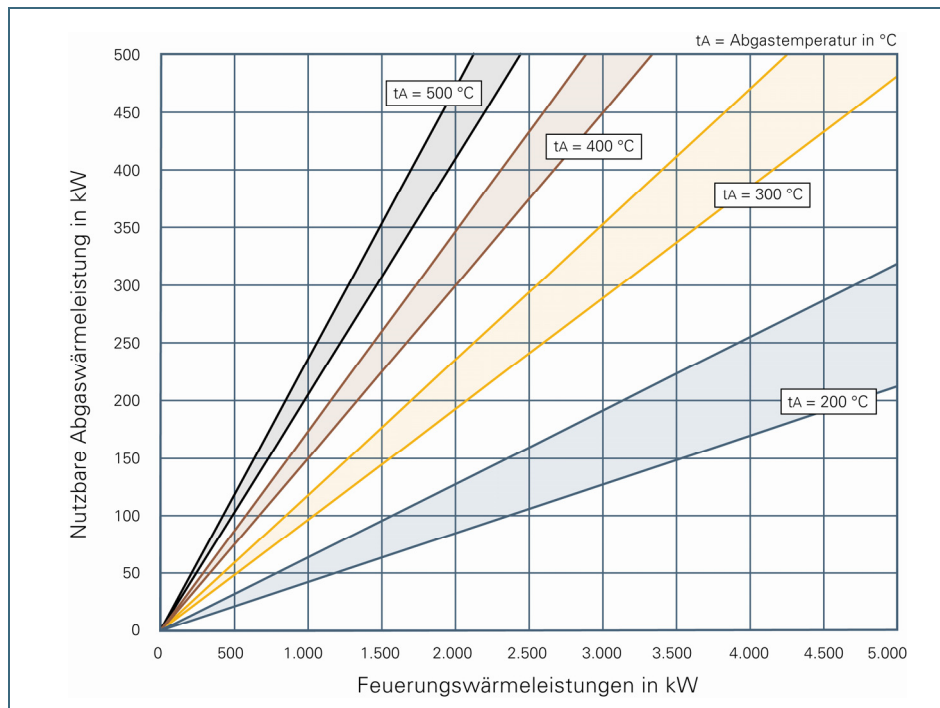


Abb. 10:
Mögliche Wärmeleistungen in Abhängigkeit von der Feuerungswärmeleistung als Anhaltswerte für eine Grobanalyse

Abgaswärmenutzung	
Nutzbare Abwärmemenge	Bis zu 95 % der Abgasenergie können zur Brauchwarmwasser-/Heiz-/Prozesswärmeerzeugung zurückgewonnen werden. Das Temperaturniveau der Abgassysteme liegt meist zwischen 130 und 300 °C.
Wirtschaftlicher Einsatz	Abhängig von der Abgas-Wärmenutzungsart rechnet sich die Wärmerückgewinnung üblicherweise schon ab 8 kW bei Brennwertnutzung von Heizkesseln. Die Betriebszeit sollte mehr als 2.000 Stunden in der Heizperiode betragen, optimal ist eine ganzjährige Prozesswärmenutzung.
Spezifischer Investitionsbedarf	70 bis 450 €/kWh Abgaswärmeleistung (ohne Wärmenutzungs-system): • geringere Kosten gelten für große Anlagenleistungen. • höhere Kosten gelten bei kleinen Anlagenleistungen.
Verfahren	Wärmetauscher im Abgassystem

3.6 Thermische Nachverbrennung

Die Thermische Nachverbrennung (TNV) ist ein häufig eingesetztes oxidatives Abgasreinigungsverfahren. Dabei werden organische Substanzen je nach Schadstoffart, Konzentration, Sauerstoffgehalt und Verweilzeit bei Temperaturen zwischen 750 und 1.000 °C umgesetzt. Das Abgas verlässt die Anlage mit Temperaturen zwischen 250 und 350 °C, die über einen Wärmetauscher dann anderweitig genutzt werden können.

Bei der regenerativen bzw. katalytischen Nachverbrennung, zwei speziellen thermischen Reinigungsverfahren, liegen die Abgastemperaturen zwischen 150 und 180 °C. Je nach Einsatz kann die Wärmerückgewinnung zur Vorwärmung der Verbrennungsluft, zur Dampferzeugung oder für andere Zwecke verwendet werden.

Eine Abwärmenutzungs-Anlage für die thermische Nachverbrennung entspricht der Abwärmenutzung aus Abgasen (vergleiche Kapitel 3.5).



Abb. 11: Thermische Nachverbrennung von Räucher-
rauch



Abb. 12: Regeneratiue thermische Oxidation

3.7 Prozessabluft

Bei der Produktionsmaschinen- bzw. der Produktionshallenentlüftung können Temperaturen bis zu 500 °C und mehr anfallen. Das tatsächliche Temperaturniveau muss im Einzelfall ermittelt werden. Zur Nutzung wird die Abwärme über bestehende oder eigens installierte Kanäle der Entlüftung angesaugt.



Abb. 13:
Die Abwärme wird an der Wärmequelle gefasst.

Wie im Fall der Feuerungsabgase gilt auch hier, dass hohe Staubanteile Filter vor dem Wärmetauscher und/oder andere konstruktive Maßnahmen erforderlich machen. Ist die Prozessabluft schadstoffbelastet oder korrosiv, müssen entsprechende Wärmetauschermaterialien gewählt werden.

Abwärmenutzung Prozessabluft	
Nutzbare Abwärmemenge	30 bis 90 % der Abluftenergie können zur Vorwärmung der Frischluft oder zur Brauchwarmwasser-/Heiz-/Prozesswärmeerzeugung zurückgewonnen werden. Das Temperaturniveau der Abluft liegt meist zwischen 40 und 500 °C.
Wirtschaftlicher Einsatz	Die Wärmerückgewinnung rechnet sich ab einer Abluftmenge von etwa 50 m³/h. Die Betriebszeit sollte mehr als 2.000 Stunden in der Heizperiode betragen, optimal ist eine ganzjährige Prozesswärmenutzung.
Spezifischer Investitionsbedarf	80 - 350 €/kWh Abgaswärmeleistung • große Anlagenleistungen und ein hohes Abwärmetemperaturniveau erfordern geringere Investitionen. • kleinere Anlagenleistungen und/oder belastete Abluftströme und /oder niedriges Abwärmetemperaturniveau führen zu höheren Kosten.
Verfahren	Wärmetauscher in Abluftanlagen Gegebenenfalls auch mit Wärmepumpensystemen kombinierbar

3.8 Dampf und Brüddampf (Schwadendampf)

Dampf wird häufig als Prozessstoff oder -energie benötigt. Stand der Technik bei der energetischen Nutzung von Dampf ist die Rückleitung des Kondensats in den Dampferzeuger - insofern findet hier bereits eine Wärmerückgewinnung statt. Doch wird die Restenergie, obwohl Dampf durchaus auf hohem Energieniveau zur Verfügung steht, oft ungenutzt an die Umgebung abgegeben. Neben der Wärmeenergie geht dabei auch das aufbereitete Speisewasser verloren.

Brüddampf entsteht beim Eindampfen oder Trocknen von Stoffen und wird ebenfalls häufig ungenutzt an die Atmosphäre abgegeben. Die Brüden enthalten nahezu die komplette zum Trocknen verwendete Wärme. Die in Dampf und Brüddampf verbleibende Energie kann zum einen durch Verwendung der Kondensationswärme und zum anderen durch Verwendung der im Kondensat verbleibenden Wärme genutzt werden. Um die verfügbare Kondensationsenergie zu steigern, kann man den Dampfdruck vor dem Eintritt in den Wärmetauscher reduzieren. Je niedriger der Dampfdruck, desto niedriger liegt die erzielbare Kondensattemperatur und desto höher liegt die Verdampfungs- bzw. Kondensationswärme.

Die erzielbare Wärmemenge muss für jede Anwendung separat anhand der vorliegenden Dampfparameter ermittelt werden (Wasserdampf tafeln). Wärmetauscher für die Rückgewinnung aus Dampf sind in der Regel ab Leistungsgrößen von 40 kW erhältlich.

Abwärmenutzung bei Dampf/Brüddampf	
Nutzbare Abwärmemenge	30 bis 90 % der Dampf-/Brüddampfenergie können zur Brauchwarmwasser-/Heiz- oder Prozesswärmeerzeugung zurückgewonnen werden. Das Temperaturniveau der Dampf-/Brüddampfenergie liegt meist über 60 °C.
Wirtschaftlicher Einsatz	Die Wärmerückgewinnung ist schon bei einer Dampf-/Brüddampfmenge von unter 25 kg/h wirtschaftlich einsetzbar. Die Betriebszeit sollte mehr als 1.800 Stunden in der Heizperiode betragen, optimal ist eine ganzjährige Prozesswärmenutzung.
Spezifischer Investitionsbedarf	Die Investitionskosten müssen für jeden Einzelfall kalkuliert werden. Standardsysteme kosten ca. 25 bis 200 €/kW Abwärmeleistung. - Niedrige Werte ergeben sich bei großen Anlagenleistungen und hohem Abwärmepotentialniveau. - Höhere Werte ergeben sich bei kleinen Anlagenleistungen und/oder bei belasteten Abluftströmen und /oder niedrigem Abwärmepotentialniveau.
Verfahren	Wärmetauscher in Abdampf/Brüddampfsystem Gegebenenfalls auch mit Wärmepumpensystemen kombinierbar

3.9 Kraft-Wärme-Kopplung und Blockheizkraftwerke

Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK-Anlagen) sind heute bereits Standard. Bei der Stromerzeugung mit Wirkungsgraden von 20 bis 45 % fallen sehr große Abwärmemengen an. Durch die Verwertung dieser Abwärme kann der Gesamtwirkungsgrad der Anlage auf bis zu 95 % erhöht werden. Zusätzlich lässt sich die Abwärme aus den Abgasen nach dem Verbrennungsprozess nutzen. Abbildung 14 zeigt das Schema eines Blockheizkraftwerks (BHKW).

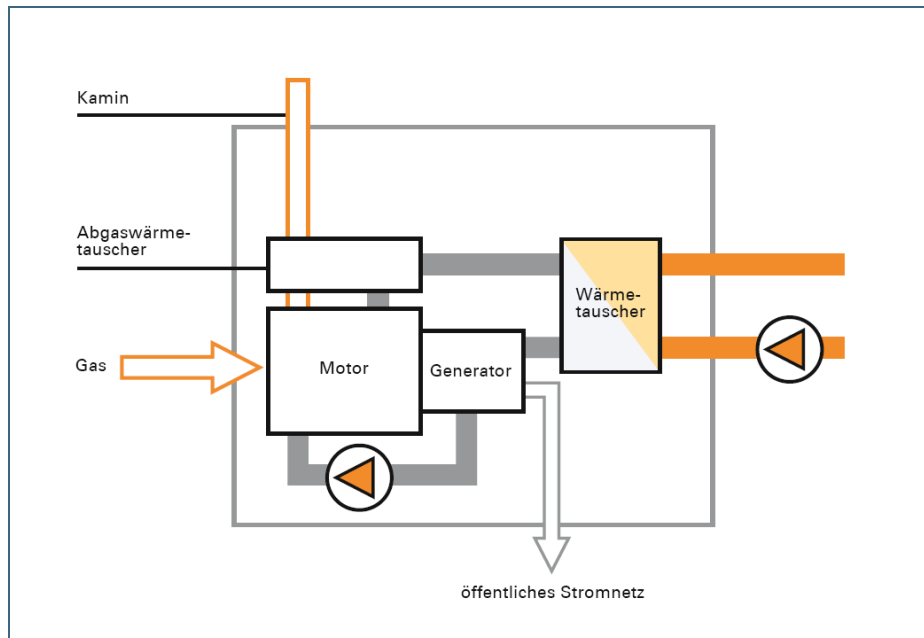


Abb. 14:
Schema eines BHKW

Das Temperaturniveau hängt von der Verstromungsanlage ab und beträgt bei BHKW üblicherweise 80 bis 90 °C. Die Betriebszeiten eines wärmegeführten BHKW werden an den Verlauf des Wärmebedarfs angepasst.

Abwärmenutzung bei Stromerzeugungsanlagen (Kraft-Wärme-Kopplung oder Blockheizkraftwerk)	
Nutzbare Abwärmemenge	Es sind Gesamtwirkungsgrade für Strom- und Wärmeerzeugung von 95 % erreichbar. Anhaltswert für die nutzbare Wärmemenge ist das ca. 1,0- bis 1,4-fache der elektrischen Leistung. Das Temperaturniveau der Wärmenutzung beträgt 80 bis 110 °C.
Wirtschaftlicher Einsatz	Die Wirtschaftlichkeit hängt von der Abwärmenutzungs-Art ab, BHKW-Anlagen sind schon ab 5 kW elektrischer Leistung erhältlich. Die Betriebszeit sollte mehr als 4.000 h/a betragen, d.h. es sollte eine ganzjährige Wärmenutzung angestrebt werden.
Spezifischer Investitionsbedarf	700 bis 1.500 €/kW bezogen auf die elektrische Anlagenleistung für das komplette Aggregat einschließlich Abgassystem (ohne Wärmenutzungssystem)
Verfahren	Die Abwärme des Kühlwasser- oder des Abgassystems wird über Wärmetauscher üblicherweise in Heizungsanlagen oder zur Beheizung von Absorptionskälteanlagen genutzt.

3.10 Abwassernutzung

Warmes Abwasser wird in Industriebetrieben oft ungenutzt in die Kanalisation geleitet (z. B. bei Wasch- und Färbeprozessen). Die Abwärme aus dem Abwassersystem lässt sich durch den Einbau eines Wärmetauschers unkompliziert nutzen. Je nach Anlage kann die Abwassertemperatur stark variieren. Heißes Abwasser aus Wäschereien wird beispielsweise häufig für die Vorwärmung des Frischwassers genutzt und schließlich mit Resttemperaturen von 30 bis 40 °C in das Abwassersystem entlassen. Eine Wärmenutzung verringert die Abwassertemperatur und damit auch die Wärmebelastung der nachgeschalteten Wasseraufbereitung.

Die Abwärmenutzung aus Abwasser funktioniert im Prinzip wie die Abwärmenutzung aus Kälteanlagen bzw. aus Maschinen- und Werkzeugkühlung (vergleiche Kapitel 3.4).

3.11 Solarthermische Prozesswärme

Mit solarthermischen Anlagen können in unseren Breiten nur vergleichsweise niedrige, ungleichmäßig über das Jahr verteilte Temperaturen erreicht werden. Je nach Kollektorbauart liegen sie zwischen 20 und 150 °C. Insofern ähnelt die solar erzeugte Wärme den hier bereits behandelten Abwärmequellen. Die spezifischen Investitionskosten zur Erzeugung solarer Prozesswärme variieren in Deutschland zwischen 180 und mehr als 500 € pro Quadratmeter. Dies hängt ab vom Anlagenkonzept, der Anlagengröße, den verwendeten Komponenten sowie dem Installationsaufwand. Bei Systemen zur solaren Trocknung entfällt üblicherweise der Pufferspeicher, was zu niedrigeren Kosten führt.

Der spezifische solare Wärmeertrag von Anlagen zur Prozesswärme-Erzeugung hängt ab vom gewünschten Temperaturniveau und dem Lastprofil. So ist z.B. die Erwärmung von Reinigungswasser in einem offenen System eine sinnvolle Anwendung: In Deutschland sind Erträge von bis zu 650 kWh pro Jahr und m² Kollektorfläche möglich.

Ebenso wie die Abwärmenutzung sollte die solare Prozesswärme erst nach einer energetischen Optimierung im Betrieb in Betracht gezogen werden. Wenn die Nutzung von Abwärme im Betrieb nicht möglich oder zu teuer ist, kann die solare Erzeugung von Prozesswärme geprüft werden. Die Temperaturanforderungen sollten maximal 80 °C, besser 60 °C betragen.

4 Einsatz von Abwärme

Nachfolgend wird ein Überblick über die Nutzungsmöglichkeiten von Abwärme gegeben. Die direkte Nutzung von Abwärme ist häufig die konstruktiv einfachste und kostengünstigste Variante.

4.1 Heizung und Heizungsunterstützung

Eine der klassischen Anwendungen der Abwärmenutzung stellt die Gebäudeheizung bzw. Heizungsunterstützung dar.

Im günstigsten Fall, d. h. wenn warme Abluft ausreichenden Temperaturniveaus und guter Luftqualität zur Verfügung steht (z. B. von Kompressoren oder Prozessabluft), kann diese Abluft unmittelbar in die zu beheizenden Räume geleitet werden.

Wenn diese verhältnismäßig einfache Möglichkeit nicht in Betracht kommt, kann die Wärme über einen Wärmetauscher in das Heizsystem eingebracht werden. Je nach Heizsystem liegt die Vorlauftemperatur normalerweise zwischen 35 und 90 °C.

Liegt die Temperatur der verfügbaren Abwärme über der Vorlauftemperatur des Heizsystems und steht ausreichend Wärme zur Verfügung, so kann die Beheizung vollständig mit Abwärme erfolgen. Wenn die Abwärme zwar die benötigte Vorlauftemperatur nicht erreicht, aber über der Rücklauftemperatur des Heiznetzes liegt, kann das Heizwasser im Rücklauf vorgewärmt werden und anschließend mit einem Kessel nacherwärmt werden. Auf diese Weise kann der Brennstoffbedarf reduziert und eventuell die notwendige Maximalleistung einer Heizungsanlage gesenkt werden.

In der folgenden Tabelle sind Energieverbrauchskennwerte für Nichtwohngebäude aus der „Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchskennwerte und der Vergleichswerte im Nichtwohngebäudebestand“ des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung angegeben:

Tab. 2: Ausgewählte Heizenergieverbrauchskennwerte je nach Gebäudekategorie

Gebäudekategorie	Vergleichswerte für den Gebäudebestand nach EnEV 2009 in kWh/(m² *a)
Verwaltungsgebäude	85
Rechenzentren	90
Gebäude für Produktion, Werkstätten, Lagergebäude	110
Geschlossene Lagerhäuser, Speditionen	30
Bürogebäude, nur beheizt	105
Bürogebäude mit Vollklimaanlage, Konditionierung	135

4.2 Brauchwarmwasserbereitung und -unterstützung

Die Nutzung von Abwärme zur Brauchwarmwasser-Bereitung stellt sich ähnlich dar wie die Nutzung zur Heizungsunterstützung. Kaltes Trinkwasser, das meist mit Temperaturen von acht bis zwölf °C aus den Versorgungsleitungen kommt, muss auf 40 bis 65 °C aufgeheizt werden.

Obwohl häufig ein übers Jahr relativ gleichmäßiger Wärmebedarf besteht, muss der tatsächliche Verlauf des Wärmebedarfs im Einzelfall geprüft werden. Wird Warmwasser beispielsweise für Mitarbeiterduschen benötigt, so besteht der höchste Wärmebedarf zu Zeiten des Schichtwechsels. Außerhalb der Betriebszeiten – z. B. am Wochenende –, wird hingegen keine Wärme benötigt.

Liegt das Temperaturniveau der Abwärme über der Zieltemperatur und reicht die Wärmemenge aus, so lässt sich der Brauchwarmwasser-Bedarf vollständig durch Abwärme decken. Liegen die Abwärmepemperaturen niedriger, kann das Brauchwarmwasser zumindest vorgewärmt werden. Eine Vorwärmung des Trinkwassers ist also mit nahezu jeder Abwärmequelle möglich. In den folgenden Tabellen sind typische Kennwerte für den Brauchwarmwasser-Bedarf in Betrieben aufgeführt.

Tab. 3: Warmwasserbedarf und Temperaturen für gewerbliche Zwecke (Recknagel-Sprenger)

Branche	Bedarf	Temperatur in °C
Bäckereien	105 – 150 l je Tag und Beschäftigter	45
	10 – 15 l je Tag für Reinigung	45
	40 – 50 l je 100 kg Mehl	70
Brauereien einschl. Produktion	250 – 300 l je 100 l Bier	60
Wäschereien	250 – 300 l je 100 kg Wäsche	75
Molkereien	1 – 1,5 l je l Milch	75
Metzgerei mit Produktion	2 – 3 m³ je t Fleisch	45

Tab. 4: Warmwasserbedarf für Wasch- und Duschanlagen in Industriebetrieben (Recknagel-Sprenger)

Verbrauchsstelle	Wärmeverbrauch je Benutzung in kWh	Temperatur in °C
Einzelwaschbecken	0,9	35
Reihenwaschbecken mit Auslaufventil	0,5 – 0,9	35
Dusche mit Zelle	2,3	35
Mittelwert einschl. Küchenbedarf	1,75 kWh je Tag und Kopf	40

4.3 Prozesswärme

Prinzipiell kann Abwärme in jeden Prozess, der Wärme benötigt, integriert werden. Voraussetzung ist eine ausreichend niedrige Temperaturanforderung. Typische Prozesse sind: Trocknung, Reinigung, Waschen, Kochen, Pasteurisieren, Sterilisieren, Färben, Destillieren, Extrahieren, Eindampfen, Bleichen, Wärmebehandlung und Schmelzen. Neben der Speisewasser- und Verbrennungsluftvorwärmung kann auch das Produkt vorgewärmt werden und somit die aufzuwendende Prozessenergie reduziert werden (z. B. bei Klärschlamm-trocknung).

In der folgenden Tabelle sind die Temperaturniveaus für einige industrielle Anwendungen aufgeführt.

Tab. 5: Je nach industrieller Anwendungen gibt es unterschiedliche typische Temperaturniveaus

Branche	Prozess	Temperatur in °C
Textilindustrie	Waschen	40 – 80
	Bleichen	60 – 100
	Trocknen	75 – 250
Papierindustrie	Zellstofftrocknung	95 – 120
	Papiertrocknung	95 – 200
Produktion und Verarbeitung von Steinen und Erden	Trocknen von Steinen, Ziegeln, Betonblöcken, Sand und anderen Mineralien	35 – 150
Lebensmittelindustrie z. B. Molkereien, Zuckerindustrie, Brauereien, Saffherstellung etc.	Trocknen	30 – 120
	Waschen	40 – 80
	Pasteurisieren	80 – 110
	Kochen	95 – 105
	Wärmebehandlung	40 – 60
	Entwässerung	38 – 104
Gewächshäuser	Heizen	15 – 80
Alle Sektoren	Vorwärmung von Wasser	30 – 100
	Kälte	55 – 180

4.4 Abwärmenutzung mit Wärmepumpe

Mit Wärmepumpen lässt sich Abwärme indirekt nutzen. Sie wird von einem niedrigen Temperaturniveau mit Hilfe zugeführter Antriebsenergie auf ein höheres Temperaturniveau (55 bis 75 °C) angehoben und dadurch für andere Zwecke nutzbar gemacht. Derzeit werden Wärmepumpen entwickelt, mit denen man bis zu 90 °C erreichen kann. Mit handelsüblichen Wärmepumpen können Wärmequellen von bis zu 30 °C genutzt werden. Für ein höheres Temperaturniveau werden Sonderfertigungen eingesetzt, deren Arbeitsmittel auf die gewünschten Temperaturen angepasst werden.

Im Verdampfer einer Wärmepumpe wird einem Medium die Wärme entzogen durch ein Arbeitsmittel, das bereits bei niedrigen Temperaturen und einem geringen Druck verdampft. Anschließend wird es verdichtet und gibt am Verflüssiger seine Energie auf einem höheren Temperaturniveau wieder ab.

Für die Effizienz einer Wärmepumpe ist die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Heizung entscheidend. Je geringer diese Differenz, umso höhere Leistungszahlen können erreicht werden. Dies bedeutet, dass bei gleichbleibender Wärmeanforderung (z. B. Heizungstemperatur) eine möglichst hohe Temperatur der Wärmequelle angestrebt werden sollte.

Wegen ihrer im Vergleich zu Umweltwärme verhältnismäßig hohen Temperaturen stellt Abwärme meist eine vorteilhafte Wärmequelle dar.

Beim gesamten Prozess sollte die Erwärmung so weit wie möglich über Abwärme realisiert und hochwertige Energie wie z. B. Strom gespart werden. Je höher das Temperaturniveau der Wärmequelle und je geringer das Temperaturniveau der Wärmesenke (z. B. Fußbodenheizung mit Vorlauftemperatur 35 °C), desto eher wird dies gelingen. Mindestens sollte eine Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe von 3 erreicht werden.

Die folgende Grafik zeigt, wie mit Hilfe einer Wärmepumpe die Temperatur eines Mediums (z. B. Luft oder Wasser) erhöht werden kann.

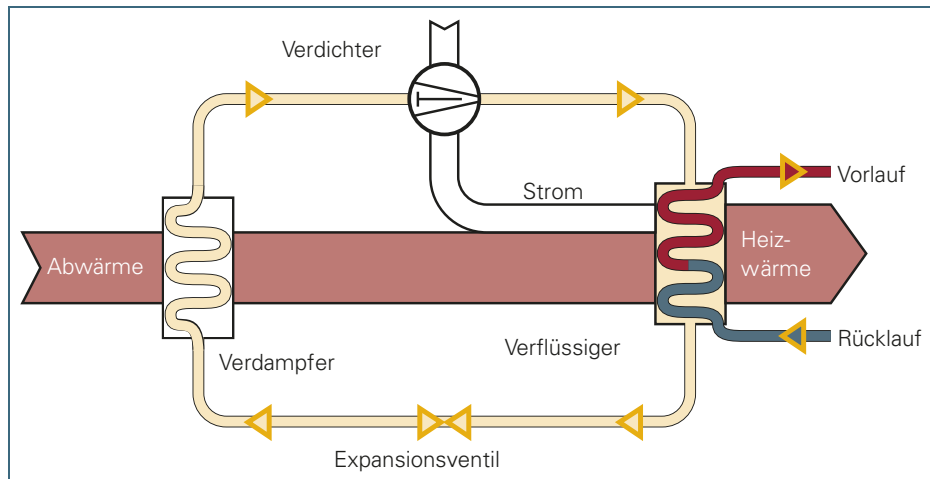


Abb. 15:
Funktionsprinzip einer
Wärmepumpe

4.5 Kälteerzeugung

Mit Hilfe von Wärme als Energiequelle kann mit Absorptions- und Adsorptionskälteanlagen Kälte erzeugt werden. Dafür werden spezielle thermische Kältemaschinen eingesetzt. Generell machen Kältemaschinen Verdunstungskälte nutzbar, die entsteht, wenn eine Flüssigkeit verdampft. Dieser physikalische Vorgang entzieht der Umgebung Wärme und senkt so die Temperatur.

Die Adsorptionskältemaschine gehört zu der Gruppe der periodisch arbeitenden Sorptionswärmepumpen. Im Leistungsprozess wird durch die Verdampfung des Kältemittels Wasser Kaltwasser im Bereich von 5 - 12 °C erzeugt.

Absorptionskältemaschinen bieten sich überall dort als wirtschaftliche Lösung zur Kälteerzeugung an, wo Abwärmepotenziale mit ausreichendem Temperaturniveau mit moderatem Investitionsaufwand erschlossen werden können. Voraussetzungen sind ein gleichzeitiges Wärmeangebot und Kältebedarf sowie lange Anlagenlaufzeiten. Das folgende Schema zeigt beispielhaft die Funktion einer Absorptionskältemaschine.

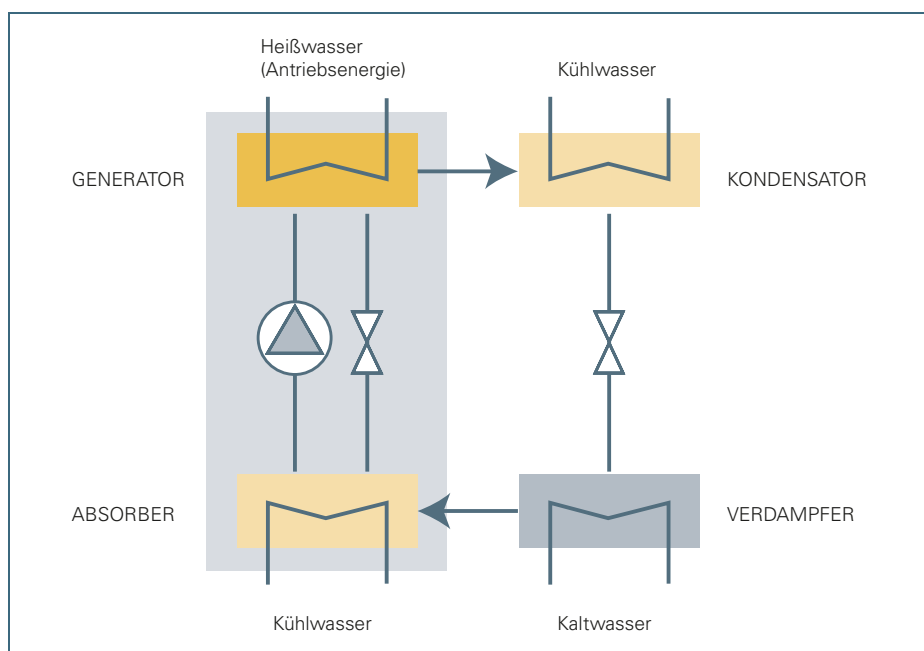


Abb. 16:
Absorptionskälteanlage

Serienmäßige Absorptionskältemaschinen sind für die Heizmedien Heißwasser und Dampf im Temperaturbereich von 80 bis 180 °C konzipiert. Mit Adsorptionskälteanlagen können dagegen auch noch niedrige Temperaturen von lediglich 55 °C genutzt werden.

4.6 Stromerzeugung mit einer ORC-Turbine

Bei ausreichend hohen Abwärmepertemperaturen (95 – 300 °C) bietet sich die Nutzung der Abwärme zur Stromerzeugung über einen so genannten Organic Rankine Cycle (ORC)-Prozess. Der ORC-Prozess entspricht dem Dampf-Kraft-Prozess und ist inzwischen ausgereift. Anstelle von Wasser kommt ein leicht siedendes organisches Arbeitsmedium zum Einsatz. Zur Verdampfung des Arbeitsmediums im ORC-Prozess wird Abwärme genutzt. Das verdampfte Arbeitsmedium wird über eine Turbine entspannt, die ihrerseits einen Generator zur Stromerzeugung antreibt. Die restliche, im Arbeitsmedium enthaltene Wärme, kann auch weiterhin für eine andere Wärmenutzung verwendet werden (Kaskade) oder wird – sofern kein Wärmebedarf vorhanden – über entsprechende Rückkühlwerke an die Umgebung abgegeben. Das verbleibende Temperaturniveau liegt bei 35 – 50 °C (max. 80 °C). Für einen möglichst hohen elektrischen Wirkungsgrad der Anlage sollte die Restwärme bei möglichst niedriger Temperatur ausgekoppelt werden.

ORC-Prozesse sollten mit einer hohen Volllaststundenzahl betrieben werden. Ebenso erhöht eine hohe Abwärmepertemperatur den Wirkungsgrad der Anlage. ORC-Turbinen finden ihren Einsatz üblicherweise in der geothermischen Stromerzeugung, aber auch bei der Stromerzeugung aus Abwärme z. B. von Biomasse-Heizkraftwerken.

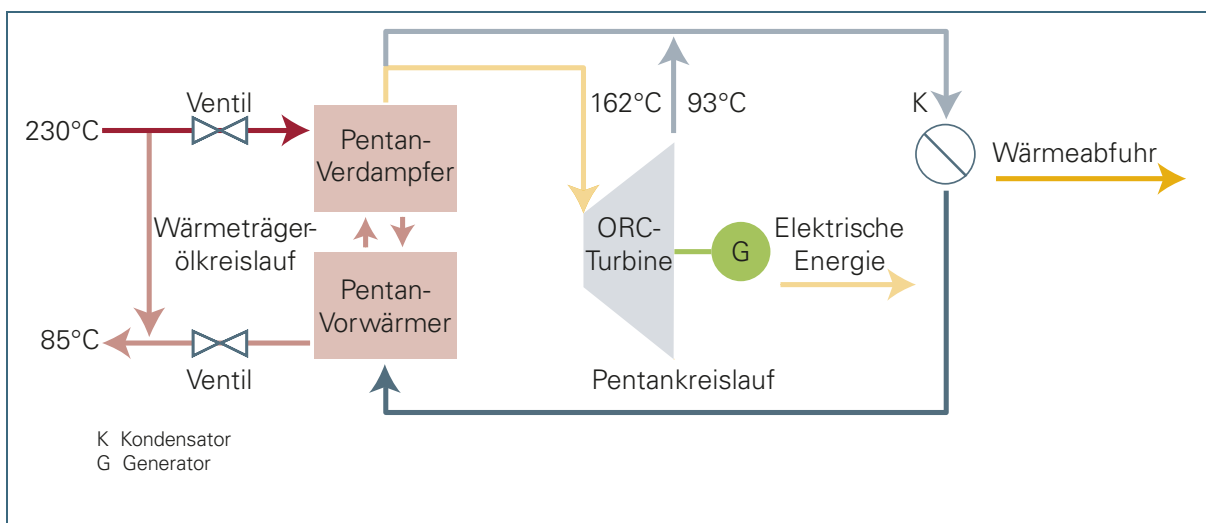


Abb. 17: Schema eines ORC-Prozesses

5 Abwärmeauskopplung

Kernstück jeder Wärmerückgewinnungs-Anlage ist der Wärmeübertrager, der die Wärmeenergie zwischen zwei Medienströmen überträgt. Je nach Bauart geschieht dies mit gleich- oder verschiedenartigen Medien, mit oder ohne Stoffaustausch.

5.1 Medien zur Wärmeübertragung

Die gängigsten Medien zur Wärmeübertragung sind Luft, Abgas, Warmwasser oder Wassergemische, Dampf und Thermoöl. Welche Medien sich zur Wärmeübertragung eignen, ergibt sich jeweils aus der vorhandenen Wärmequelle und der Energieform, die an der Wärmesenke benötigt wird.

- **Luft:**
Das Temperatur- und Druckniveau von Luft variiert je nach Abwärmequelle. Theoretisch können bei Luft alle Wärmetauschertypen zum Einsatz kommen. Bei regenerativen Wärmetauschern müssen jedoch Schadstoff- und Geruchsbelastungen berücksichtigt werden. Da durch die Abkühlung der Luft Wasser auskondensieren kann, muss in den Wärmetauschern eine Kondensatableitung vorgesehen werden. Luft hat im Vergleich zu Wasser eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit, weshalb Luftwärmetauscher sehr viel Platz benötigen.
Typische Abwärmequellen sind Druckluftanlagen, Raumluftheizungsanlagen (eventuell schadstoffbelastet), Trocknung, Kälteanlagen, Maschinen- und Werkzeugkühlung, Prozessabluft (eventuell schadstoffbelastet).
- **Abgas:**
Abgase können schadstoffbelastet sein. Bei der Anlagenplanung sind mögliche Korrosionsschäden an den Bauteilen durch Auskondensieren der enthaltenen Substanzen zu berücksichtigen. Spezielle Anlagenmaterialien erhöhen die Investitionskosten.
Typische Abwärmequellen sind Kesselabgase und thermische Luftreinigungsverfahren (z. B. Thermische Nachverbrennung).
- **Warmwasser/Wassergemisch:**
Wegen ihrer hohen spezifischen Wärmeleitfähigkeit (circa der 20-fache Wert im Vergleich zu Luft) eignen sich Wasser und Wassergemische (z. B. Wasser-Glykol) sehr gut zur Wärmeübertragung. Entsprechende Anlagen werden mit Rekuperatoren und Kreislaufverbundsystemen ausgestattet. Die Umsetzung gestaltet sich meist einfach.
Für Medien, die mit Schwebstoffen oder aggressiven Stoffen belastet sind, müssen die Wärmetauschermaterialien entsprechend angepasst werden, ebenso verkürzen sich die Reinigungsintervalle der Wärmetauscher.
Typische Abwärmequellen sind Druckluftkompressoren, Kälteanlagen, Maschinen- und Werkzeugkühlung, Dampf/Brühdampf (Schwadendampf), Abwärme von KWK/BHKW und solare Prozesswärme.
- **Dampf:**
Dampf kann je nach Produktionsprozess auch mit weiteren Stoffen verunreinigt sein (z. B. Brüden aus der Trocknung). Die im Dampf enthaltene Wärmemenge kann anhand von Dampfzählern bestimmt werden. Als Wärmetauscher bei sauberen Dämpfen kommen indirekt gekühlte Kondensatoren (z. B. Rohrbündelapparate) in Frage. Bei Dämpfen, die Fette, Öle und Staub enthalten, eignen sich Mischkondensatoren, bei denen die Dämpfe unmittelbar mit dem Kühlmittel in Kontakt gebracht werden.

- **Thermoöl:**

Thermoöle (synthetische oder organische Öle) weisen einen deutlich höheren Siedepunkt als Wasser auf (über 300 °C) und eignen sich deshalb insbesondere für die Wärmeübertragung bei hohen Temperaturen. Thermoöle werden häufig in Kälteanlagen sowie der Maschinen- und Werkzeugkühlung eingesetzt. Bei ausreichend hohem Temperaturniveau eignen sie sich besonders gut für die Stromerzeugung in ORC-Anlagen.

5.2 Wärmetauscher

Sofern es sich um einen Prozess handelt, bei dem die Produktion durch die Vermischung des Abwärme- und des Wärmesenkenmediums beeinträchtigt werden kann (z. B. in der Lebensmittelindustrie), sollte die Wärmenutzungs-Anlage mit einem zweiten Wärmetauscher ausgestattet werden (Sicherheitswärmetauscher). In den Zwischenkreislauf kann ein unbedenkliches Medium (z. B. Wasser) eingebracht und dadurch die Sicherheit der Anlage erhöht werden.

Die Auswahl eines geeigneten Wärmeübertragers orientiert sich an den eingesetzten Medien (z. B. hochtemperaturfest, nicht korrosiv, nicht abrasiv), den Temperaturbedingungen und den sonstigen betrieblichen Randbedingungen. Die Höhe des Wärmestroms ist proportional zur Wärme übertragenden Fläche und der Temperaturdifferenz. Der Wärmetauscher ist entsprechend den Temperaturniveaus und den Wärmeübertragungsmedien zu dimensionieren.

Im Folgenden werden die gängigsten Wärmeübertrager kurz dargestellt.

- **Regenerator (Rotationswärmetauscher):**

Der Regenerator ist ein klassischer Luft-Luft-Wärmeübertrager. Sein wesentliches Bauteil ist die rotierende Speichermasse. In ihr wird die auf der Abluftseite vorhandene Wärme gespeichert und zur Zuluftseite transportiert. Es findet ein offener Wärme- und Stoffaustausch einschließlich eines Feuchteaustausches (Nutzung der latenten Wärme) zwischen Zu- und Abluft statt. Eine hohe Wärmerückgewinnung ist möglich.

Der Regenerator ist nicht geeignet für geruchs- und schadstoffbelastete Luft. Außerdem muss ausreichend Platz vorhanden und ein offener Stoffaustausch zulässig sein. Die Leistung wird durch die Drehzahlregelung gesteuert.

- **Rekuperator:**

In Rekuperatoren können verschiedene Wärmeträgermedien eingesetzt werden (z. B. Wasser-Wasser, Wasser-Luft). Eine Trennwand zwischen beiden Stoffströmen verhindert einen Stoffaustausch. Es gibt Platten-, Rohrbündel-, Rippen- und Glattrohrwärmeübertrager.

Rekuperatoren besitzen keine beweglichen Teile und sind deshalb wartungsfrei. Die Wärmeübertragung bei Rekuperatoren kann durch Volumenstromänderung geregelt werden. Eine Abschaltung ist jedoch nur über einen Bypass möglich. Die Druckverluste eines rekuperativen Wärmetauschers liegen deutlich höher als die eines regenerativen Wärmetauschers, wodurch der Hilfsenergiebedarf für Motoren und Pumpen steigt. Auch kann das Abreinigen der Wärmetauscherflächen von Fall zu Fall mit erheblichem Aufwand verbunden sein.

- **Kreislaufverbundsystem:**

Im Kreislaufverbundsystem wird die Wärme von Abluft in einem Rekuperator an ein Arbeitsmedium (z. B. Glykolwasser) übertragen und zu einem zweiten Rekuperator gepumpt, wo es seine Wärme wieder an kalte Zuluft abgibt. Kreislaufverbund-Systeme haben einen schlechteren Gesamtwirkungsgrad durch den zusätzlichen Zwischenkreislauf und benötigen darüber hinaus Strom für den Betrieb der Umwälzpumpe. Kreislaufverbund-Systeme können größere Entfernungen zwischen Abwärmequelle und Abwärmesenke überbrücken, außerdem entstehen keine Probleme,

wenn sich Zu- und Abluftströme (im Hinblick auf Volumenstrom, Stoffzusammensetzung etc.) unterscheiden. Generell verfügen Kreislaufverbund-Systeme über eine einfache Regelung.

Die folgenden Abbildungen zeigen das Prinzip eines Rotationswärmetauschers, eines Gegenstromwärmetauschers und eines Kreislaufverbundsystems mit zusätzlichem Zwischenkreislauf.

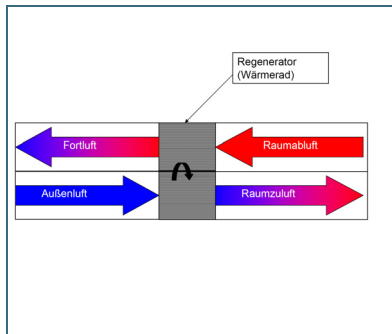


Abb. 18: Prinzip eines Wärmerades

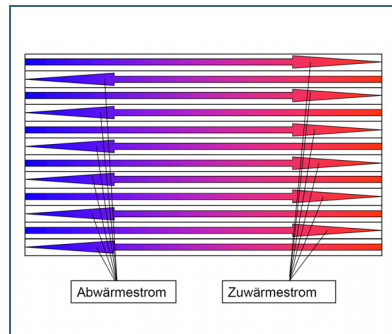


Abb. 19: Prinzip eines Gegenstrom-Wärmetauschers

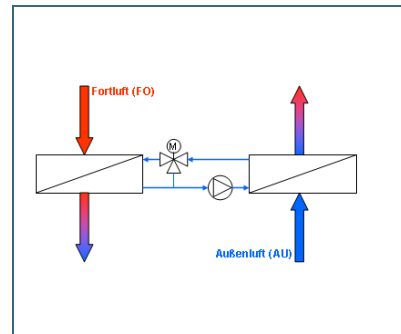


Abb. 20: Prinzip eines Kreislauf-Verbundsystems

Die Wahl des Wärmetauschers z. B. für Raumluftechnische Anlagen hängt von den Volumenströmen und der Qualität der Raumluft ab. Soll die Luftkonditionierung der Abluft beibehalten werden, so empfiehlt sich der Einsatz von Rotationswärmetauschern. Soll aufgrund erhöhter Schadstoff-, Feuchte- oder Geruchsbelastung der Abluft (z. B. aus Sanitärräumen) kein Stoffaustausch zwischen Zu- und Abluft stattfinden, sollten Rekuperatoren (z. B. Plattenwärmetauscher, Wärmerohr) oder ein Kreislaufverbundsystem verwendet werden.

6 Speicherung/Pufferung von Abwärme

Wenn Wärmeangebot und Wärmebedarf zeitlich nicht übereinstimmen, empfiehlt es sich, Speichersysteme zu verwenden. Dabei nehmen Speicher Wärme vorübergehend auf und geben sie bei Bedarf wieder ab.

Vor der Aufstellung eines Speichers sollte in jedem Fall geprüft werden, ob ausreichend Platz zur Verfügung steht. Vor allem bei hohen Leistungen und sehr hohem Wärmebedarf können sehr große Speicher notwendig sein. Um Speichergröße und Investitionskosten zu begrenzen, sollte daher mit einem Speicher nur ein Teil der Leistung bzw. des Wärmebedarfs abgedeckt werden.



Abb. 21:
Heizwasserpufferspeicher mit 50 m³ Inhalt

6.1 Sensible Wärmespeicher

Sensible Wärmespeicher, insbesondere mit Wasser als Speichermedium, sind die am häufigsten verwendeten Wärmespeicher. Sie kommen etwa bei der Beheizung von Gebäuden zum Einsatz.

Die speicherbare Wärmemenge ist dabei proportional zur Masse des Speichermediums. Aufgrund der Differenz zwischen Speichermedium und Umgebungstemperatur ergeben sich Wärmeverluste. Eine ausreichende Dämmung der Speicher ist notwendig, um die Wärmeverluste gering zu halten und eine Wirtschaftlichkeit zu erzielen.

Heißwasserspeicher (unterhalb 100 °C) sind Standard. Sie zeichnen sich durch eine hohe spezifische Wärmekapazität aus. Die Kosten variieren zwischen 0,7 €/l bei 17.000 Litern Volumen und bis zu 16 €/l bei fünf Litern.

Dampfspeicher (oberhalb 100° C) bestehen aus einem oder mehreren druckdichten Stahlkesseln, die als Kurzzeitspeicher vor allem für die Bereitstellung von Prozesswärme in der Industrie genutzt werden.

Die folgenden Abbildungen zeigen beispielhaft den Lastverlauf des Dampfkessels einer Brauerei ohne und mit Betrieb des Sudhauses. Die zu hohe installierte Leistung zeigt sich im Ein- und Ausschalten des Dampferzeugers bei etwa 40% seiner maximalen Leistung. Durch eine Abwärmewischenspeicherung ließe sich eine Wärmeverschiebung vornehmen und die Lastabnahme vergleichmäßigen.

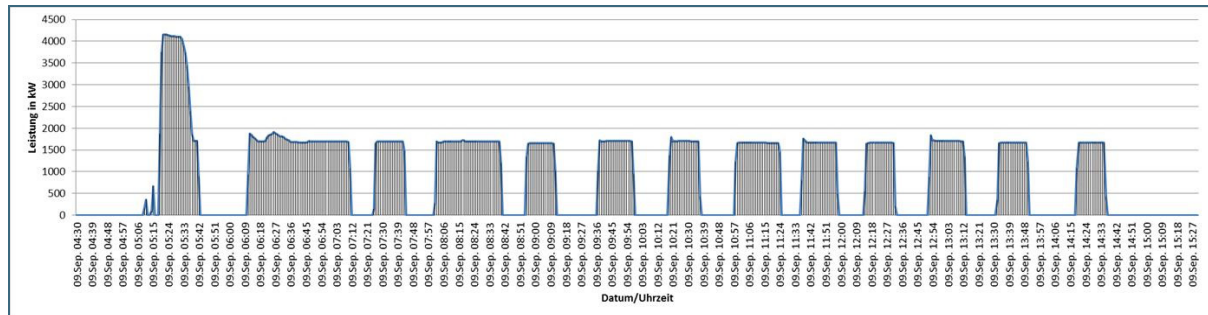


Abb. 22: Lastverlauf des Dampfkessels einer Brauerei ohne Betrieb des Sudhauses

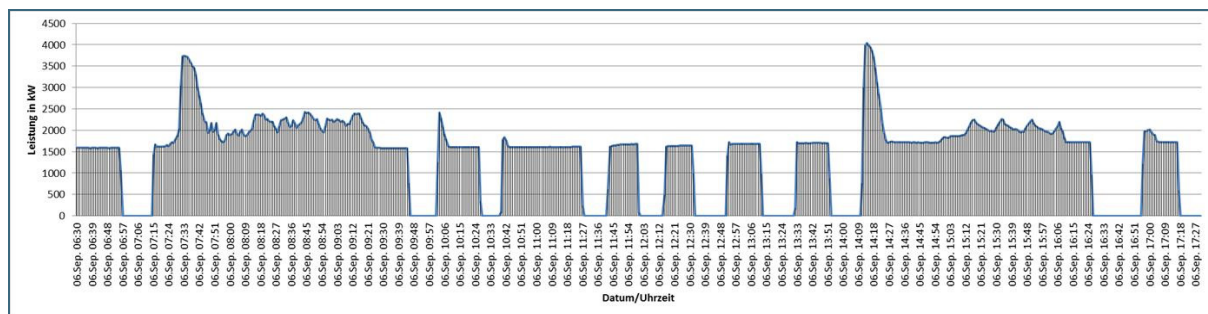


Abb. 23: Lastverlauf des Dampfkessels einer Brauerei mit Betrieb des Sudhauses

6.2 Latentwärmespeicher

Wärmespeichermedien, die Wärme nicht nur als sensible Wärme, d. h. durch Temperaturerhöhung, speichern, sondern einen Großteil durch eine Veränderung ihrer chemischen Zusammensetzung aufnehmen und wieder abgeben, werden als Phasenwechselmaterial (Phase Change Material, PCM) bezeichnet. Beim Be- und Entladen von Latentwärmespeichern verändert sich nicht das Temperaturniveau des Speichermediums, sondern in erster Linie dessen Aggregatzustand.

Die speicherbare Wärmemenge ist im Vergleich zu sensiblen Speichern deutlich höher, wodurch sich ein geringerer Platzbedarf ergibt. Ein Nachteil der Latentwärmespeicherung ist die niedrige Be- und Entladeleistung, die sich aus der geringen Wärmeleitfähigkeit der Speichermedien ergibt. Die Energiespeicherdichte liegt im Bereich von 250 – 400 kWh/m³. Für einen besseren Wärmeübergang werden zunehmend Paraffin und hochleistungsfähige Verbundmaterialien eingesetzt. Zahlreiche PCM-Produkte haben in den letzten Jahren Marktreife erreicht.

Latentwärmespeicher werden auch verwendet, um Temperaturschwankungen in einem System zu verhindern und Temperaturspitzen auszugleichen. Insbesondere für die Industrie stellen sie daher eine attraktive Option dar.

7 Typische Beispiele

7.1 Abwärmenutzung aus Backöfen (Dampf und Abgas)

Backöfen setzen heiße Abgase und Schwaden frei, die zur Warmwasserbereitung und Raumheizung eingesetzt werden können. Dabei muss die Wärmerückgewinnung so dimensioniert und eingebunden werden, dass Abwärmequellen und -senken (Wärmeverbraucher) so weit wie möglich übereinstimmen. Nur so lässt sich eine optimale, kostengünstige Nutzung erreichen.

Beim Backprozess gehen etwa 22 % der eingesetzten Energie als Schwaden und 20 % als Abgas verloren. Die Wärmemengen sind abhängig vom jeweiligen Backprogramm, der Wärmedämmung der Öfen, dem Abgasverlust bzw. der Beschwadung sowie der Effizienz des Brenners.

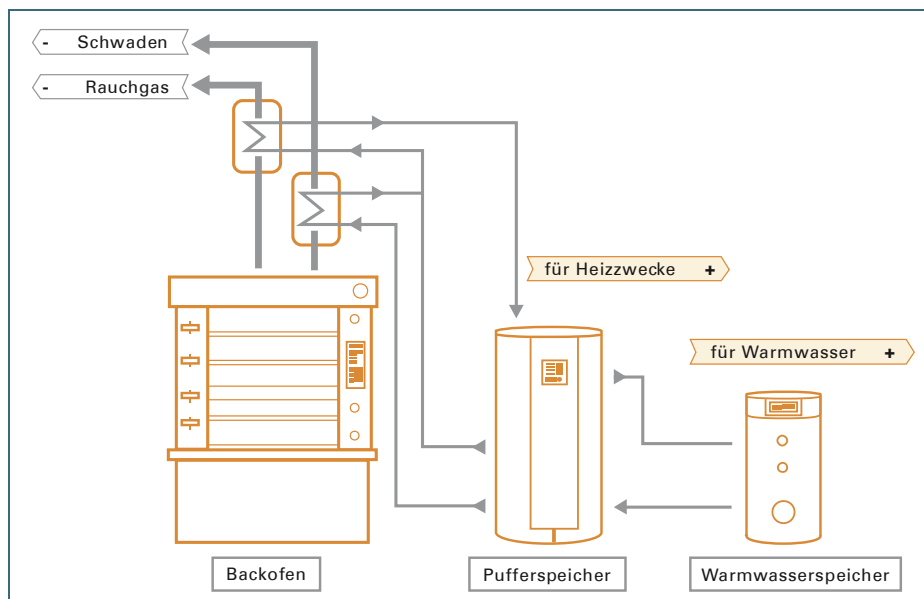


Abb. 24:
Abwärmenutzung aus
Backöfen

Mit Hilfe von Wärmetauschern kann diese Energie weiter genutzt werden. Die obige Grafik zeigt schematisch, wie eine Einbindung erfolgen kann: Die Wärme wird über den Wärmetauscher auf einen Warmwasserkreislauf übertragen, der einen Pufferspeicher (gegebenenfalls auch einen Schichtenspeicher) auflädt.

Beispiel: Eine Bäckerei hat einen Mehlerverbrauch von 500 t/a und einen Erdgasverbrauch von 700.000 kWh/a. Als Wärmesenken kommen Raumheizung und Warmwasserbereitung in Frage, die einen Gesamtwärmebedarf von ca. 113.000 kWh/a aufweisen.

Die Abwärme aus Schwaden und Abgas, die auf einem Temperaturniveau von bis zu 90 °C zur Verfügung gestellt werden kann, reicht für Raumheizung und Spülmaschinenbetrieb aus. In der Praxis lässt sich eine vollständige Nutzung der Abwärme jedoch kaum realisieren, da Abwärme und Wärmebedarf selten übereinstimmen: Im Sommer wird für die Warmwasserbereitung nur die Hälfte der verfügbaren Abwärmemenge aus den Backöfen benötigt. Eine Zwischenspeicherung lässt sich nur begrenzt umsetzen. Die folgende Grafik verdeutlicht das Problem:

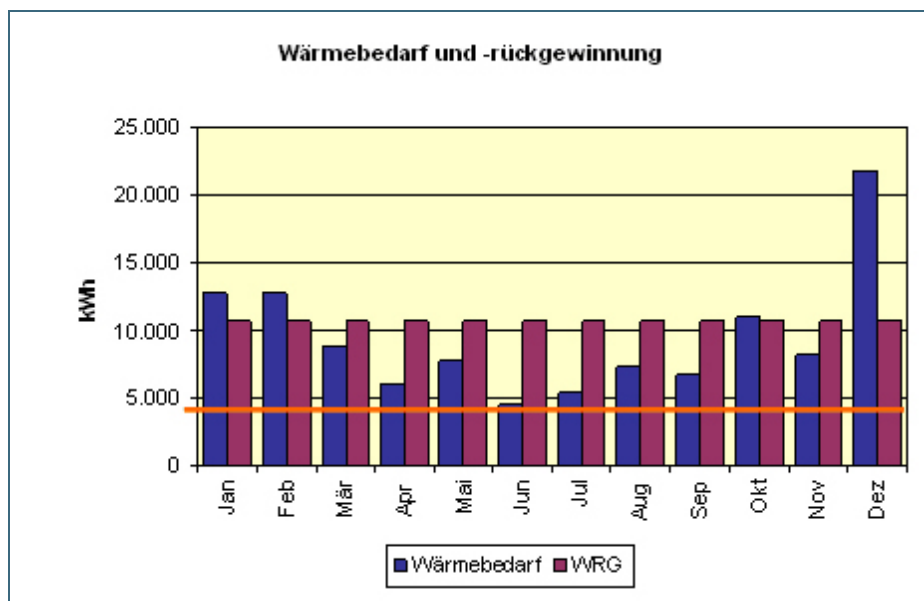


Abb. 25:
Eine Auslegung der Wärmerückgewinnung nach dem Wärmebedarf im Sommer (orange Linie) ist am wirtschaftlichsten.

Es empfiehlt sich daher, eine Anlage auf den Wärmebedarf im Sommer auszulegen (orange Linie). Die Investitionskosten lassen sich dadurch auf etwa die Hälfte reduzieren. Im Beispiel beträgt die im Grundlastbereich nutzbare Wärmemenge 54.000 kWh/a, was knapp 50 % des gesamten Wärmebedarfs entspricht. Etwa 4.200 €/a an Energiekosten lassen sich auf diese Weise einsparen. Installiert wird ein Wärmetauschersystem, an das sowohl die Abgas- als auch die Schwadenabzüge von drei Backöfen angeschlossen sind. Bei der Investition ist mit einem Betrag von etwa 30.000 € zu rechnen. Diese Investition rechnet innerhalb von sieben Jahren (statische Amortisationsrechnung).

7.2 Nutzung von Abwärme in einer Wäscherei (Prozessabluft, Druckluft, Trocknung)

Wäschereien haben einen hohen Bedarf an Prozesswärme, die hauptsächlich als Dampf und Warmwasser für Waschstraßen, Mangeln und Trockner benötigt wird. Abwärme wird in Form von Abluft, Abgas oder Abwasser abgegeben. Diese Abwärme kann betriebsintern genutzt werden, um Primärenergie einzusparen.

Beispiel: Eine Großwäscherei mit einem Erdgasverbrauch von etwa 2 Mio. m³/a und einem Wäschedurchsatz von 50 t/d.

Obwohl das warme Wasser aus den Waschprozessen bereits zur Frischwasservorwärmung verwendet wird, weist das Abwasser noch Temperaturen um 30 °C auf und kann weiter genutzt werden. Es kann durch Einsatz eines Wärmepumpensystems auf 50 °C angehoben werden, so dass das Wasser für Heizzwecke nicht mehr nachgeheizt werden muss.

Abwärme von über 100 °C entsteht außerdem an den Mangeln (Abluft, die bisher über Dach abgeleitet wird). Diese kann genutzt werden.

Druckluft wird zur Steuerung verschiedener Anlagen benötigt. Die Abwärme der beiden installierten Druckluftkompressoren lässt sich zur Vorwärmung des Kesselspeisewassers nutzen. Wegen des ganzjährigen Bedarfs an Speisewasser ist die betriebsinterne Wärme-Abnahme gewährleistet.

Abwärmequelle	Energieeinsparung kWh/a	Kosteneinsparung €/a
Mangeln	1.200.000	68.000
Abwasser	1.600.000	46.000
Kompressoren	300.000	17.000
Summe	3.100.000	131.300

Tab. 6:
Energie- und Kosteneinsparung durch Abwärmenutzung in einer Wäscherei

In der Summe können rund 3,1 Mio. kWh und Energiekosten in Höhe von etwa 131.300 € pro Jahr eingespart werden. Vorteilhaft sind der hohe Wärmebedarf und lange Anlagenlaufzeiten, daher amortisieren sich die drei Maßnahmen innerhalb von drei bis vier Jahren.

7.3 Abwärmenutzung von Kälteanlagen

Bei der Kälteerzeugung fällt Abwärme im Temperaturbereich von 30 bis etwa 40 °C an. Diese niedrige Abwärmtemperatur lässt sich am besten für die Warmwasserbereitung und Raumheizung verwenden.

Im Kältekreislauf wird vor dem Verflüssiger über einen Wärmetauscher ein Warmwasserspeicher eingebunden, über den Frischwasser vorgewärmt wird. Alternativ lässt sich die Abwärme auch zur Raumheizung nutzen. Voraussetzung hierfür ist ein Heizsystem, das mit geringen Vorlauftemperaturen arbeitet (z. B. Fußbodenheizung).

Am Beispiel eines Restaurants soll dies veranschaulicht werden. Um die Wärme der Kälteanlage vollständig nutzen zu können, wird der Speicher in die zentrale Warmwasserversorgung des Betriebs eingebunden. Die Wärme kann so allen Verbrauchern zur Verfügung gestellt werden, auch wenn in der Küche kein Warmwasserbedarf besteht.

Zwei Warmwasserspeicher werden installiert und hintereinander (als Kaskade) geschaltet. Über den Wärmetauscher wird das Kaltwasser im ersten Speicher vorgewärmt. Die niedrige Temperatur des Kaltwassers sorgt für eine gute Wärmeübertragung. Im nachgeschalteten zweiten Speicher wird das vorgewärmte Wasser bei Bedarf durch einen Heizkessel oder ein BHKW nachgeheizt. Auf diese Weise wird die Versorgung mit Warmwasser in jedem Fall sichergestellt. Die Verbraucher bleiben an den zweiten Speicher angeschlossen. Durch die Nutzung der Abwärme aus der Kälteanlage können jährlich ca. 43.600 kWh Wärme gewonnen werden, die eine Wassermenge von 236 l/h um 40 K erwärmen (siehe Tab. 7).

Nutzung der Abwärme einer Kälteanlage	
Nutzbare Wärmeleistung der Kälteanlage	11 kW
Betriebszeit	3960 h/a
Wärmegewinn	43.600 kWh/a
Jahresnutzungsgrad der Heizung	75 %
Kosteneinsparung	3.190 €/a
Investition	9.000 €
Amortisation	3,5 Jahre

Tab. 7:
Wärmerückgewinnung einer Kälteanlage

7.4 Dampfkessel mit Economiser und Brennwertnutzung

Zur Dampfversorgung eines Unternehmens ist ein Dampfkessel von 3.400 kW installiert. Um die im Abgas noch enthaltene, bedeutende Wärmemenge nutzen zu können, wurde ein Economiser mit Brennwertnutzung integriert. Die Abwärme wird nun zur Beheizung einer Schlosserei und zur Prozesswassererwärmung eingesetzt.

Es wurden zwei Wärmetauscher gewählt, die die Wärme aus dem Abgas zurückgewinnen:

Abgaswärmetauscher 1: 180 kW

Abgaswärmetauscher 2: 230 kW (aus Edelstahl zur Brennwertnutzung)

Folgende Grafik zeigt die Deckung des Wärmebedarfs durch Wärmetauscher und externe Heizung:

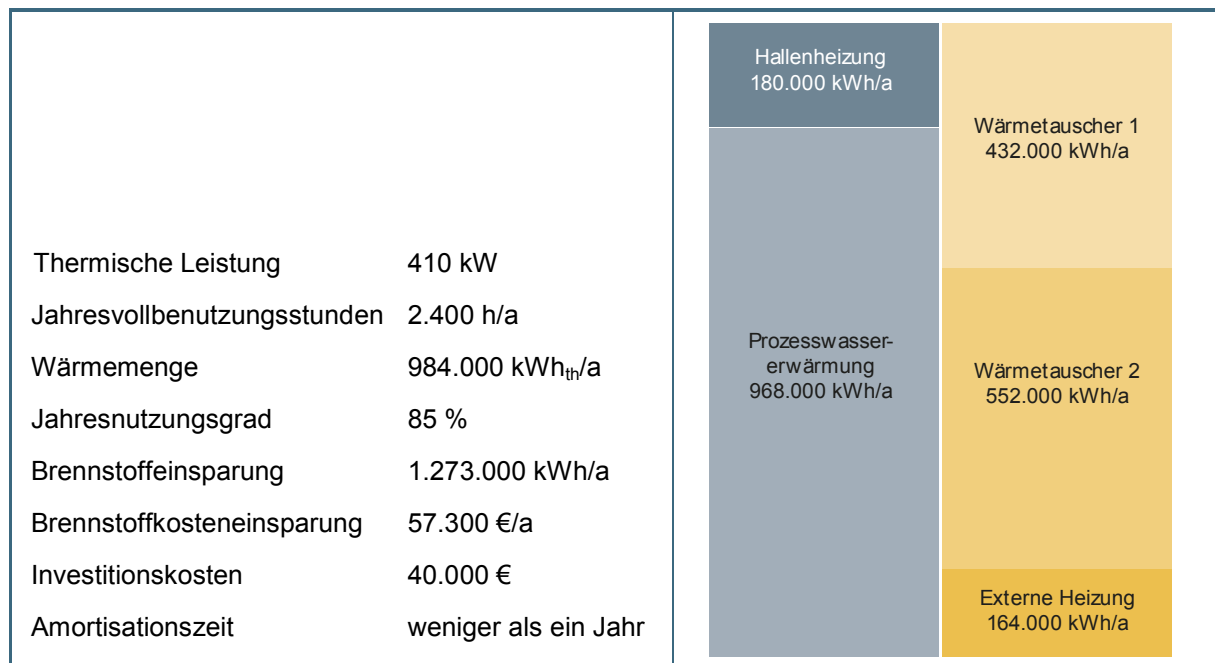


Abb. 26: Der Gesamtwärmebedarf kann durch die Wärmerückgewinnung zu 85 % gedeckt werden.

7.5 Thermische Nachverbrennung

In einer Fabrik entstehen bei der Fertigung Abgase, die mit Lösemitteln beladen sind und daher einer separaten erdgasgestützten Anlage zur thermischen Nachverbrennung (TNV) zugeführt werden.

Die TNV-Anlage verfügt über eine integrierte Luftvorwärmung, in der das schadstoffbeladene Abgas auf ca. 540 bis 550 °C vorgewärmt wird und anschließend bei circa 710 °C verbrannt wird. In der Brennkammer werden die Schadstoffe zerstört, anschließend wird das Reingas über den Luftvorwärmer geleitet und abgekühlt. Die verbleibende Restwärme im Reingas von ca. 260 °C kann dazu genutzt werden, über einen Abgaswärmetauscher Heißwasser mit 160 °C zu erzeugen und dieses in das bestehende Versorgungssystem einzuspeisen.

Betriebsdaten der TNV-Anlage:	
Abluftmenge:	ca. 10.000 m³/h (ca. 5 Tage) ca. 8.000 m³/h (ca. 1 Tag) ca. 9.700 m³/h im Mittel
Vorwärmung Abluft:	ca. 540 - 550 °C
Verbrennungstemperatur:	ca. 710 - 720 °C
Reingastemperatur:	ca. 250 - 260 °C
Brennerleistung	ca. 750 - 900 kW
Betriebszeit	ca. 6.000 h/a

Tab. 8:
Betriebsdaten der Anlage zur thermischen Nachverbrennung (TNV)

Die Abwärme wird dabei zur Rücklauf Temperaturerhöhung genutzt und deswegen in die Rücklaufsammeleleitung im Kesselhaus eingespeist. Die Dimensionierung des Abgaswärmetauschers orientiert sich am maximal möglichen Abluftstrom der TNV-Anlage in Höhe von 15.000 m³/h und einer Reingastemperatur von 280 °C. Im Betrieb wird nur eine Leistung von 400 kW erreicht.

Wärmetauscherleistung maximal:	ca. 720 kW
Wärmeübertragungsleistung in Betrieb:	ca. 400 kW
Jahreswärmerückgewinnung:	ca. 1.940 MWh/a

Wirtschaftlichkeit der Wärmerückgewinnung	
Investition	91.300 €
Kapitalkosten	7.960 €/a
Betriebskosten	1.660 €/a
Verbrauchskosten	1.188 €/a
Jahreskosten	10.808 €/a
Gutschrift Wärmerückgewinnung	64.330 €/a
Jahresüberschuss	-53.500 €/a
Einsparung von Betriebs- und Verbrauchskosten	61.482 €/a
statische Amortisationsdauer	1,5 Jahre

Tab. 9:
Wirtschaftlichkeit der Wärmerückgewinnung aus einer TNV

Es kann, wie die Tabelle 9 zeigt, bei relativ niedrigen Investitionskosten viel Wärme zurückgewonnen werden. Die Anlage hat sich etwa in anderthalb Jahren amortisiert.

7.6 Wärmerückgewinnung in einer Flaschenspülanlage

Bei der Einleitung des Abwassers aus einer Flaschenspülanlage in die Kanalisation mit 55 °C treten erhebliche Wärmeverluste auf. Die Wärme des Abwassers ließe sich über einen Wärmetauscher zurückgewinnen und zur Vorwärmung des Frischwassers verwenden. Hierbei wird das Abwasser von 55 °C auf 15 °C abgekühlt, während das Frischwasser von 10 °C auf 48 °C erwärmt wird. Durch die Wärmerückgewinnung ergeben sich Brennstoffeinsparungen von ca. 21.000 €/a, die Investition rechnet sich innerhalb eines Jahres.

Tab. 10: Wirtschaftlichkeit der Wärmerückgewinnung einer Flaschenwaschanlage

Flaschenspülanlage mit Wärmerückgewinnung	
Abwasser- bzw. Frischwassermenge	1.835.000 l/a
Eingesparte Wärmeenergie	809.500 kWh/a
Brennstoffeinsparung (Nutzungsgrad des Dampfkessels 90 %)	ca. 900.000 kWh/a
Investition	15.000 €
Energiekosten	21.050 €/a
Statische Amortisation	9 Monate

8 Checklisten

8.1 Richtiges Vorgehen beim Planen einer Abwärmenutzung

Fragestellung	Bemerkungen
Welche Abwärme ist vermeidbar?	Abwärme zu vermeiden ist immer wirtschaftlicher als sie zu nutzen! Der nötige Investitionsaufwand ist vergleichsweise gering. Erhöhung der Energieeffizienz: - Konzeptionelle Verbesserungen der bestehenden Anlagen von Wärmesenke und Abwärmequelle (hocheffiziente elektrische Antriebe, Wärmedämmung, Optimierung des Systems, energieoptimierte Steuerung) - Prozess- bzw. Verfahrensoptimierung
Betrachtung nicht vermeidbarer Abwärme: Mögliche Abwärmequelle untersuchen Abwärmesenke (Nutzung) suchen Wärmerückgewinnung (prozessinterne Nutzung) Abwärmenutzung im eigenen Betrieb in der Reihenfolge - Direkte Wärmeauskopplung (Heizen, Erwärmen, Trocknen) - Wärmepumpen: Indirektes Verfahren - Innovative Techniken (z. B: Organic Rankine Cycle, Absorptionskälteprozess)	Checkliste auf S. 44 Checkliste auf S. 45 Hohe Wirtschaftlichkeit, mittlerer Investitionsaufwand Mittlere Wirtschaftlichkeit, mittlere bis hohe (sehr hohe) Investitionskosten Langfristige Investition, 8 bis 20 Jahre
Berücksichtigung von Randbedingungen: Energiespeicherung notwendig? Wirtschaftlichkeit	Kurzfristige Speicherung - Investitionskosten erhöhen sich durch zusätzliche Wärmelogistik für Speicherung, gegebenenfalls ist bei variierendem Anfall eine Nacherwärmung notwendig. Zu berücksichtigen: - Neben der Amortisationsrechnung auch Barwert-Methode oder interne Verzinsung berücksichtigen: selbst bei langen Amortisationszeiten lassen sich hohe Renditen erzielen. - Variable Kosten werden reduziert (Energiebedarf), fixe Kosten erhöhen sich (Anlagen) - Redundante Anlagen sind eventuell notwendig

8.2 Erstbeurteilung von Abwärme

1. Abwärmequelle				
Standort:				☐ Lageplan vorhanden
Anlagenbezeichnung				
☐ Druckluft	☐ Abgas	☐ Prozessabluft		
☐ Raumluftheizungsanlage	☐ TNV	☐ Dampf/Brühdampf		
☐ Trocknung	☐ Kältemaschine	☐ Sonstiges		
☐ KWK/BHKW	☐ Maschinen-/Werkzeugkühlung			
2. Eingesetzte Energie				
Elektrische Energie		Max. Leistungsbedarf	kW	
		Jahresverbrauch	kWh/a	
Brennstoffe	☐ Erdgas	Max. Feuerungsleistung	kW	
		Jahresverbrauch	kWh/a bzw. m³/a	
	☐ Heizöl	Max. Feuerungsleistung	kW	
		Jahresverbrauch	kWh/a bzw. l/a	
	☐ Sonstiges	Max. Leistung	kW	
		Jahresverbrauch	kWh/a	
3. Vorhandene Abwärme				
☐ Abluft	Menge	m³/h		
	Temperatur	°C		
	Druck	bar		
	Kritische Stoffe			
☐ Abwasser	Menge	m³/h		
	Temperatur	°C		
	Druck	bar		
	Kritische Stoffe			
☐ Abgas	Menge	m³/h		
	Temperatur	°C		
	Druck	bar		
	Kritische Stoffe			
☐ Kühlflüssigkeit	Menge	m³		
	Temperatur: Vorlauf/Rücklauf	VL:	°C	RL: °C
	Druck	bar		
	Spez. Wärmekapazität	kJ/(kg*K)		
☐ Sonstige Abwärme, z. B. Dampf	Wärmeträgermedium			
	Spez. Wärmekapazität	kJ/(kg*K)		
	Temperatur	°C		
	Menge bzw. Leistung	m³/h bzw. kW		
4. Zeitlicher Verlauf von Wärmebedarf und Abwärmeangebot				
Vollbenutzungsstunden		h/d – h/mon – h/a		
Wochenendbetrieb	☐ Ja ☐ Nein	Betriebszeiten	von	bis Uhr
Ganzjähriger Betrieb	☐ Ja ☐ Nein	Stillstand	von	bis

8.3 Möglichkeit der Abwärmenutzung

1. Art des Wärmebedarfs		
Standort		☐ Lageplan vorhanden
☐ Gebäudeheizung	Gebäude:	
☐ Brauchwassererwärmung	Nutzung für:	
☐ Produktionsprozess	Bezeichnung:	
☐ Trocknung	Nutzung für:	
☐ Kältebedarf	Bezeichnung:	
2. Derzeit eingesetzte Energie		
Elektrische Energie	Leistung	kW
	Jahresverbrauch	kWh/a
Brennstoffe		
☐ Erdgas	Feuerungsleistung	kW
	Jahresverbrauch	kWh/a bzw. m³/a
☐ Heizöl	Leistung	kW
	Jahresverbrauch	kWh/a bzw. l/a
☐ Dampf	Volumenstrom	m³/h
	Temperatur	°C
	Druck	bar
	Jahresverbrauch	t/a
☐ Sonstiges	Leistung	kW
	Jahresverbrauch	kWh/a
3. Wärmebedarf		
☐ Warmluft	Wärmeleistung	kW
	Jahreswärmemenge	kWh/a
	Erforderliche Temperatur	°C
☐ Heizwasser	Wärmeleistung	m³/h
	Jahreswärmemenge	kWh/a
	Erforderl. Temp.: Vorlauf/Rücklauf	VL: °C / RL: °C
	Heiznetzdruck	bar
☐ Brauchwarmwasser	Erforderl. Temperatur	°C
	Brauchwarmwasser stündlich	m³/h
	Jahresbedarf	m³/a
☐ Kühlung	Kühlleistung	kW
	Jahreskühlenergiebedarf	kWh/a
	Erforderl. Temp.: Vorlauf/Rücklauf	VL: °C / RL: °C
	Kühlmedium	
☐ Produktionsprozess	Wärmeleistung	kW
	Jahreswärmemenge	kWh/a
	Erforderl. Temp.: Vorlauf/Rücklauf	VL: °C / RL: °C
	Wärmeträgermedium	
☐ Sonstiges	Netzdruck	bar
	Medium	

9 Anhang

Ergänzende Informationen

Bayerisches Landesamt für Umwelt: www.lfu.bayern.de > Energie > Energieeffizienz

Energie-Atlas Bayern: http://www.energieatlas.bayern.de/thema_abwaerme.html

Sächsische Energieagentur: www.abwaermeatlas-sachsen.de/

Solare Prozesswärme (So-Pro), EU-Projekt: www.solar-process-heat.eu

Ergänzende Literatur

Amt der Oberösterreichischen Landesregierung: Industrielle Abwärmenutzung, Beispiele und Technologien Linz, 2008

Bayerisches Landesamt für Umwelt: Leitfaden zur Abwärmenutzung in Kommunen, Augsburg, 2008

Bundesamt für Energiewirtschaft, (BfE): Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung, RAVEL, Bern, 1993

Bundesamt für Energiewirtschaft, (BfE): Zukunftsweisende Planungshilfen für Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung, RAVEL, Neuenhof, 1997

Energieeinsparverordnung für Gebäude (EnEV), 2009

Recknagel, Sprenger, Schramek: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 2007/2008, München

Schaumann, Schmitz: Kraft-Wärme-Kopplung, 4. Auflage, Springer Verlag, 2009

Ansprechpartner der bayerischen Industrie und Handelskammern

IHK Aschaffenburg	Andreas Elsner	elsner@aschaffenburg.ihk.de
IHK zu Coburg	Rico Seyd	seyd@coburg.ihk.de
IHK für München und Oberbayern	Ulrike Pflugfelder Dr. Norbert Ammann	ulrike.pflugfelder@muenchen.ihk.de norbert.ammann@muenchen.ihk.de
IHK Nürnberg für Mittelfranken	Dr. Robert Schmidt Dr. Ronald Künneth	iu@nuernberg.ihk.de kuenneth@nuernberg.ihk.de
IHK für Oberfranken Bayreuth	Franz Lechner	lechner@bayreuth.ihk.de
IHK für Niederbayern in Passau	Erich Doblinger	doblinger@passau.ihk.de
IHK Regensburg für Oberpfalz/Kehlheim	Werner Beck	beck@regensburg.ihk.de
IHK Schwaben	Franz Bihler Monika Kees	franz.bihler@schwaben.ihk.de monika.kees@schwaben.ihk.de
IHK Würzburg-Schweinfurt	Oliver Freitag	oliver.Freitag@wuerzburg.ihk.de

