

Der Kühlwasserkreislauf an Mischeranlagen

Vortrag von Dipl.-Ing. Klaus Reisner

Ingenieurbüro für Kältetechnik Reisner + Kettler GmbH

Inhalt

- Vorgang
- Wärmebilanz
- Wärmedurchgang, Wärmetransport
- Methoden
 - Nasskühlung
 - Trockenkühler
 - Kältemaschinen
 - Abwärmenutzung

Wärme/ Energie

- Wärme ist eine Form von Energie
 - Wärme bringt die Moleküle zum Schwingen
 - Je mehr Wärme dem Stoff zugeführt wird, desto größer die Schwingungsintensität

Die Schwingung bewirkt die Temperaturerhöhung.

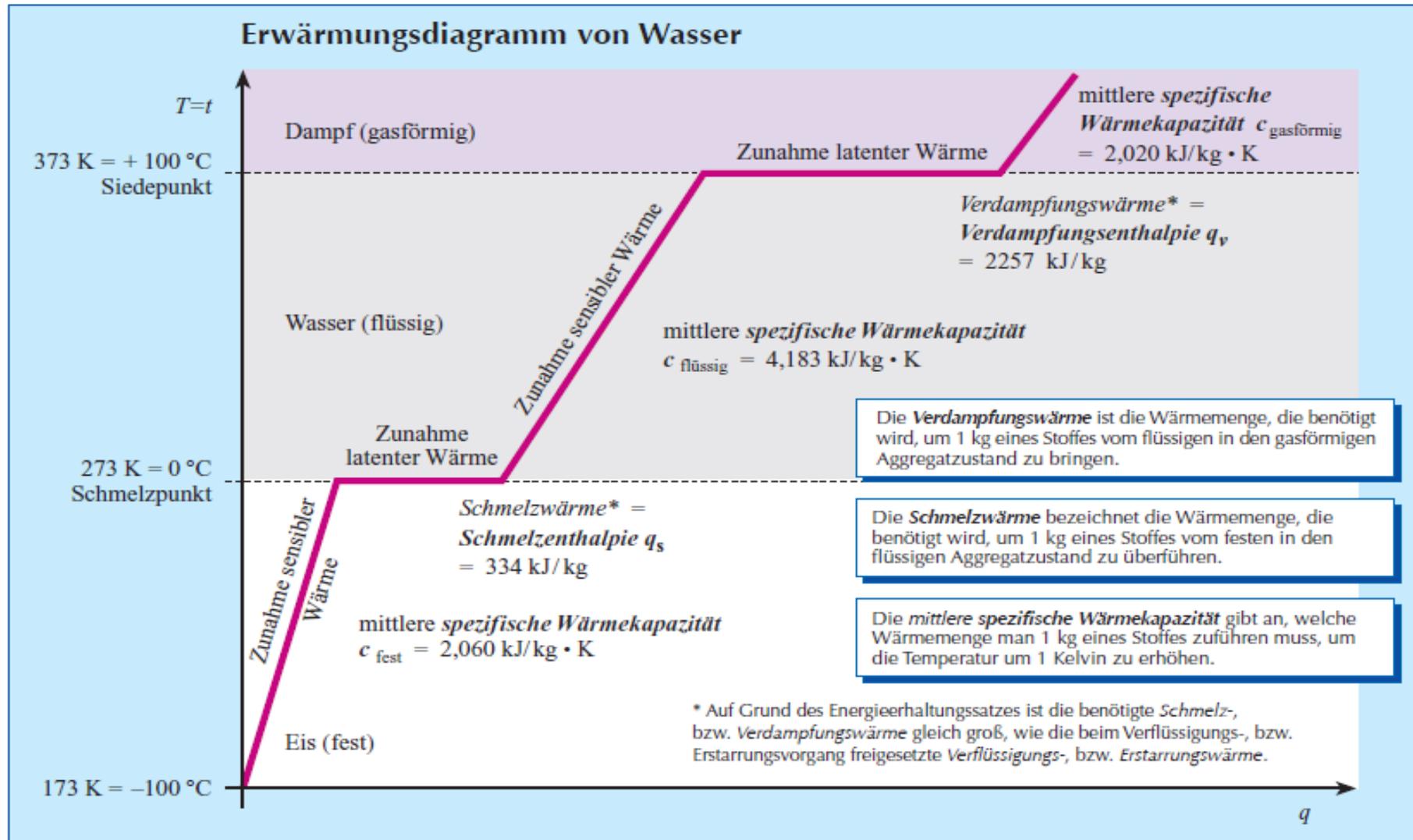
Temperatur ist ein Maß für die Schwingungsintensität, nicht mit der Wärmeenergie selbst zu verwechseln.

Einheit der Temperatur ist das °K bzw. °C , Formelzeichen T



6

Abbildung 1.5: Erwärmungsdiagramm von Wasser



1 Grundlagen

Erwärmung unterschiedlicher Materialien

- Unterschiedliche Materialien zeichnen sich aus durch eine unterschiedliche molekulare Struktur.
- Bei gleicher Wärmezufuhr nehmen sie eine unterschiedliche Temperatur an.
- Für eine Temperaturerhöhung um 1 K benötigt es eine Wärmemenge, die spez. Wärmekapazität genannt wird.
- Bei Kunststoffen ist die spez. Wärmekapazität oft an verschiedensten Temperaturpunkten sehr unterschiedlich. Als Rechenmethode muss der gesamte Wärmeinhalt = Enthalpie eingeführt werden.

Vorgang des Kühlens

- Kühlen heißt immer Wärmetransport
- Wärme strömt zu keinem wärmeren System, sondern nur temperaturabwärts

Beispiel

- Kommen zwei Systeme mit unterschiedlichen Temperaturen in Kontakt, fließt Wärme zum kälteren System, bis beide Systeme die gleiche Temperatur haben. Noch nie ist der umgekehrte Vorgang beobachtet worden.

Vorgang des Kühlens

- **Wärme** = transportierte thermische Energie

Prozessgröße

Formelzeichen: Q
SI-Einheit: J (Joule)

Eine Wärmeübertragung (ΔQ) ist entweder mit einer **Temperaturänderung** ¹⁾ oder mit einer **Phasenumwandlung** ²⁾ (fest → flüssig // flüssig → gasförmig) verbunden. Von alleine strömt Wärme immer vom wärmeren zum kälteren System.

1) Wärmeübertragung

$$\Delta Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

spez. Wärmekapazität (above c)
Temperaturdifferenz (above ΔT)
mittlere spez. Wärmekapazität (below c)

2) Schmelz-/Erstarrungs- oder Verdampfungs-/Kondensationstemperatur

$$\Delta Q = m \cdot q$$

Wärmeübertragung (below ΔQ)
Masse (below m)
Phasenumwandlungswärme (below q)



© diGraph, Lahr

Vorgang des Kühlens

Beispiel:

- Es gibt zwei Arten von Vorgängen in Systemen: **Reversible Vorgänge (umkehrbar)** und **irreversible Vorgänge (nicht umkehrbar)**.
- **Reversible Prozesse** lassen sich wieder rückgängig machen, die Wiederherstellung des Anfangszustandes erfordert keine Energiezufuhr von außen.

Wärmebilanz

- Wichtigste Fragen:
 - Welche Wärmemenge steht an?
 - Welche Wärmeleistung muss in der Zeit abgebaut werden?
 - Wo und wie entsteht diese Wärme?
- Dazu müssen alle Wärmequellen aufgezeigt werden, an denen die Wärmeenergie abgeführt werden soll.
- Bei Material der Wärmeinhalt, auch Enthalpie genannt.
- Bei Antriebsleistungen die energetische Umwandlung in Wärmeenergie.

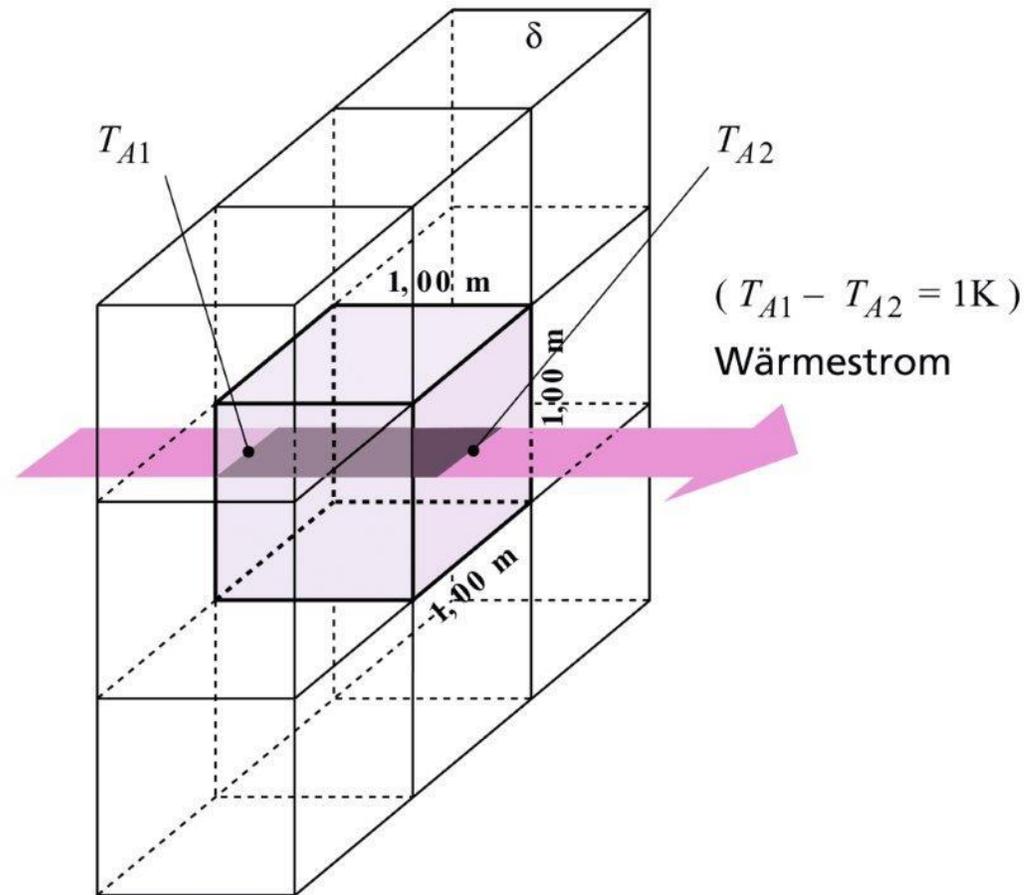
Auslegung der Kühlanlage

- An Mischern ergibt sich die Kühlleistung i.a. nur durch die Leistung des Antriebsmotors, mehr nicht.
- Deshalb muss die Leistung einer Kühlanlage auch nicht größer sein.
- Wichtig: Intensiver Kaltwasserstrom zur guten Wärmeübertragungen

Wärmedurchgang - Wärmetransport

- Die Kühlung des Mischprozesses erfolgt allgemein mit kaltem Wasser
- Wärme strömt aus dem Produkt über die Oberfläche in die Kühlkanäle zum strömenden Kaltwasser
- Übertragung durch Wärmedurchgang und Wärmeübergang
- Der Wärmedurchgang wird durch die Wärmedurchgangszahl **Lambda** gekennzeichnet
 - Der Wert **Lambda** ist abhängig von den stofflichen Eigenschaften des Gases oder der Flüssigkeit

Wärmedurchgang - Wärmetransport



© diGraph, Lahr

Wärmeleitzaahl

Wärmeleitzaahl λ
in Einheiten:

$$\frac{W \cdot m}{m^2 \cdot K} = \frac{W}{m \cdot K}$$

Einfluss auf Wärmetransport

a) Wärmeübergang vom Material auf die Mischoberfläche

b) Wärmedurchgang

- Bestimmt durch die Art des Materials, die wiederum die Wärmedurchgangszahl bestimmt sowie die Temperaturdifferenz.
- Material / Oberflächentemperatur

Einfluss auf Wärmetransport

Potential zur Verbesserung:

- Sauberkeit der Kühloberfläche
- Wärmeübergang des Wassers auf das Material mittels Strömungsturbolenzen
- Materialauswahl
- Temperaturdifferenz

Wärmedurchgang

- Das Vermögen eines Stoffes, thermische Energie in Form von Wärme zu transportieren, ist die Wärmeleitfähigkeit
- Wärmeleitfähigkeit wird gekennzeichnet durch den Wärmeleitkoeffizienten (λ)
- Messung des Wärmestroms muss durch eine auf Bezugsmaß verallgemeinerte Oberfläche ($A = 1\text{m}^2$) und auf eine festgelegte Schichtdecke ($A = 1\text{m}^2$)
- Temperaturdifferenz Formel eintragen

Wärmedurchgang - Wärmetransport

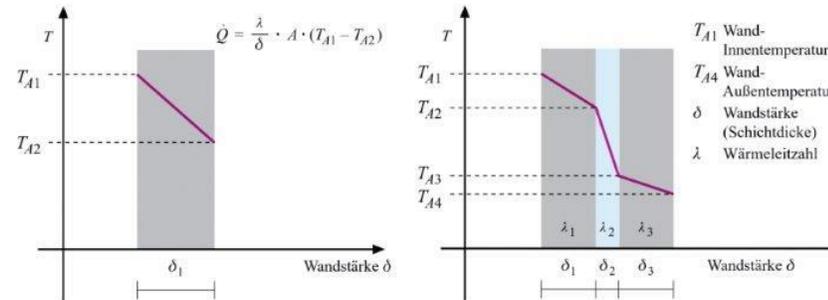
- Wärmeleitfähigkeit (λ) kennzeichnet das Vermögen eines Stoffes
- Durch eine auf Bezugsmaße verallgemeinerte Oberfläche ($A = 1\text{m}^2$) und Schichtdicke ($\delta = 1\text{ m}$) bezogen, liefert die Messung des Wärmestroms die Wärmeleistung (Berechnungsfaktor) für verschiedene Stoffe
- Temperaturdifferenz $\Delta T = (T_{A1} - T_{A2})$ beträgt dabei 1K
- Wärmestrom Q
 - Wird in Watt (W) oder in Joule (J) pro Sekunde (s) angegeben

Wärmedurchgang - Wärmetransport

- Geschwindigkeit des Wärmestroms innerhalb des Stoffes hängt von dessen Wärmeleitfähigkeit ab.
- Wärmeleistung
 - Wird am besten veranschaulicht mittels eines „Trennungsmediums“, das zwei weitere Stoffe mit unterschiedlichen Temperaturen trennt.
 - Die Wärme wird durch das Trennmedium geleitet

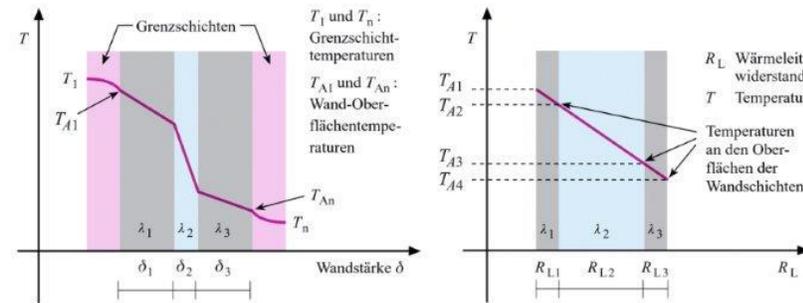
Wärmedurchgang/ Übergang – Wärmetransport

Wärmedurchlasswiderstand, Temperaturverlauf und U-Wert



a) Temperaturverlauf in einer einschichtigen Wand

b) Temperaturverlauf, aufgetragen in einer mehrschichtigen Wand



c) Temperaturverlauf, aufgetragen unter Berücksichtigung des konvektiven Wärmeübergangs

d) Temperaturverlauf, aufgetragen über den Wärmeleitwiderstand

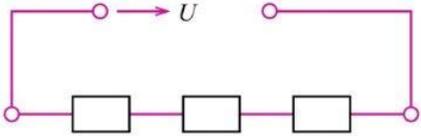
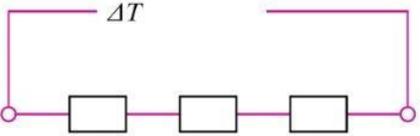
© dtGraph, Lahr

Wärmedurchgangszahl (U-Wert)

$$U = \frac{1}{r_{\alpha i} + r_L + r_{\alpha a}} = \frac{1}{r_{\text{ges}}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_a}}$$

Vergleich Wärmestrom zu elektrischem Stromfluss

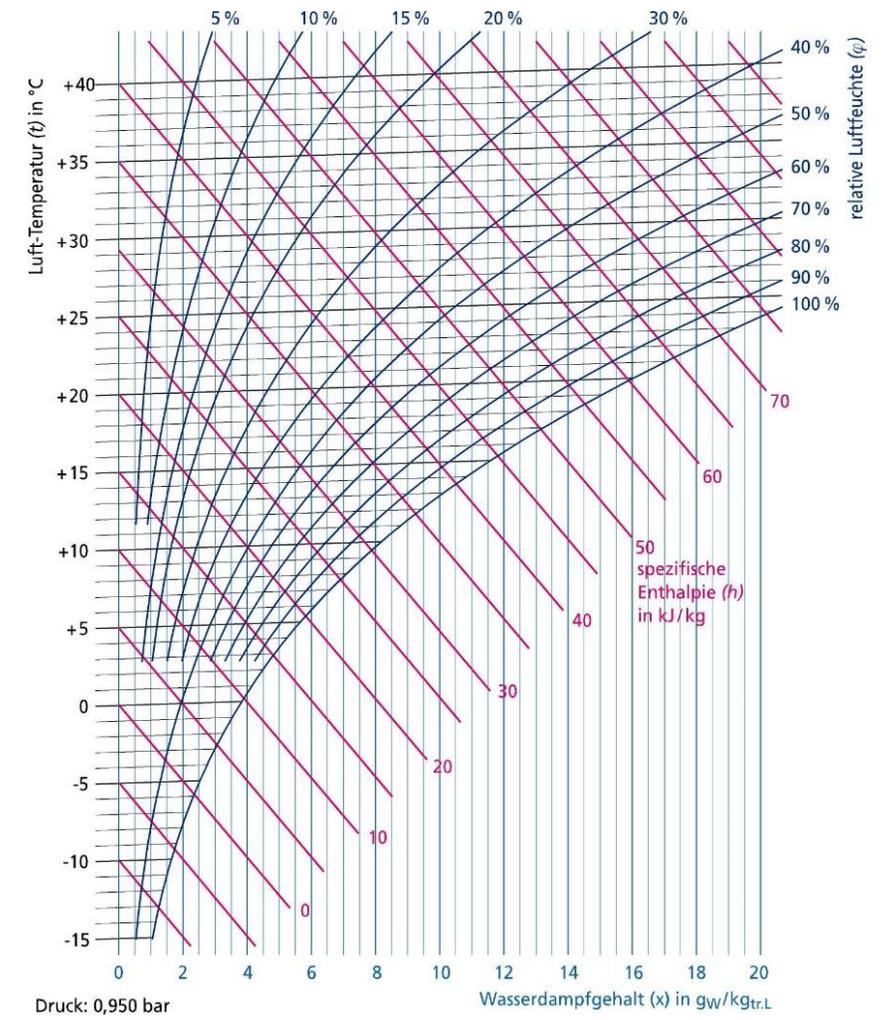
Wärmeübertragungs-Widerstand (Vergleich Wärmefluss und elektrischer Strom)

<p>Elektrisch:</p>  <p>in Reihe geschaltete Widerstände addieren sich</p> $R_{\text{ges}} = R_1 + R_2 + R_3$	<p>Wärmetechnisch:</p>  <p>jede Wandschicht stellt einen Widerstand R_L dar. Diese Widerstände addieren sich</p> $R_{L\text{ges}} = R_{L1} + R_{L2} + R_{L3}$
<p>Der Stromfluss wird durch die Spannung in Gang gebracht</p> $I = \frac{U}{R}$	<p>Der Wärmefluss wird durch die Temperaturdifferenz in Gang gebracht</p> $\dot{Q} = \frac{T_{A1} - T_{A2}}{R_L}$
<p>Ein Leitungswiderstand hat:</p> $R = \frac{l}{\kappa \cdot A}$	<p>Der Wärmeleitwiderstand hat:</p> $R_L = \frac{\delta}{\lambda \cdot A}$

© dtGraph, Lahr

Kühlverfahren

- Es gibt Kältemaschinen für tiefe Temperaturen
- Verdunstungskühltürme, (oft an Mischern eingesetzt)
- Trockene Kühlsysteme (modernere Bauform)



Nasskühlung/Kühlturm

- Nasskühlung ist die häufigste angewendete Methode im Bereich Kautschuk.
- Das zu kühlende Wasser wird in feine Tropfen zerstäubt
- Oberfläche dieser Tropfen bildet die Kühlfläche
- Bedeutend größerer Teil der Kühlleistung ergibt sich jedoch durch teilweise Verdunstung des Wassers (Wärmeaufnahme durch Änderung des Aggregatzustandes bei $T = \text{const}$)

Methoden der Kühlung

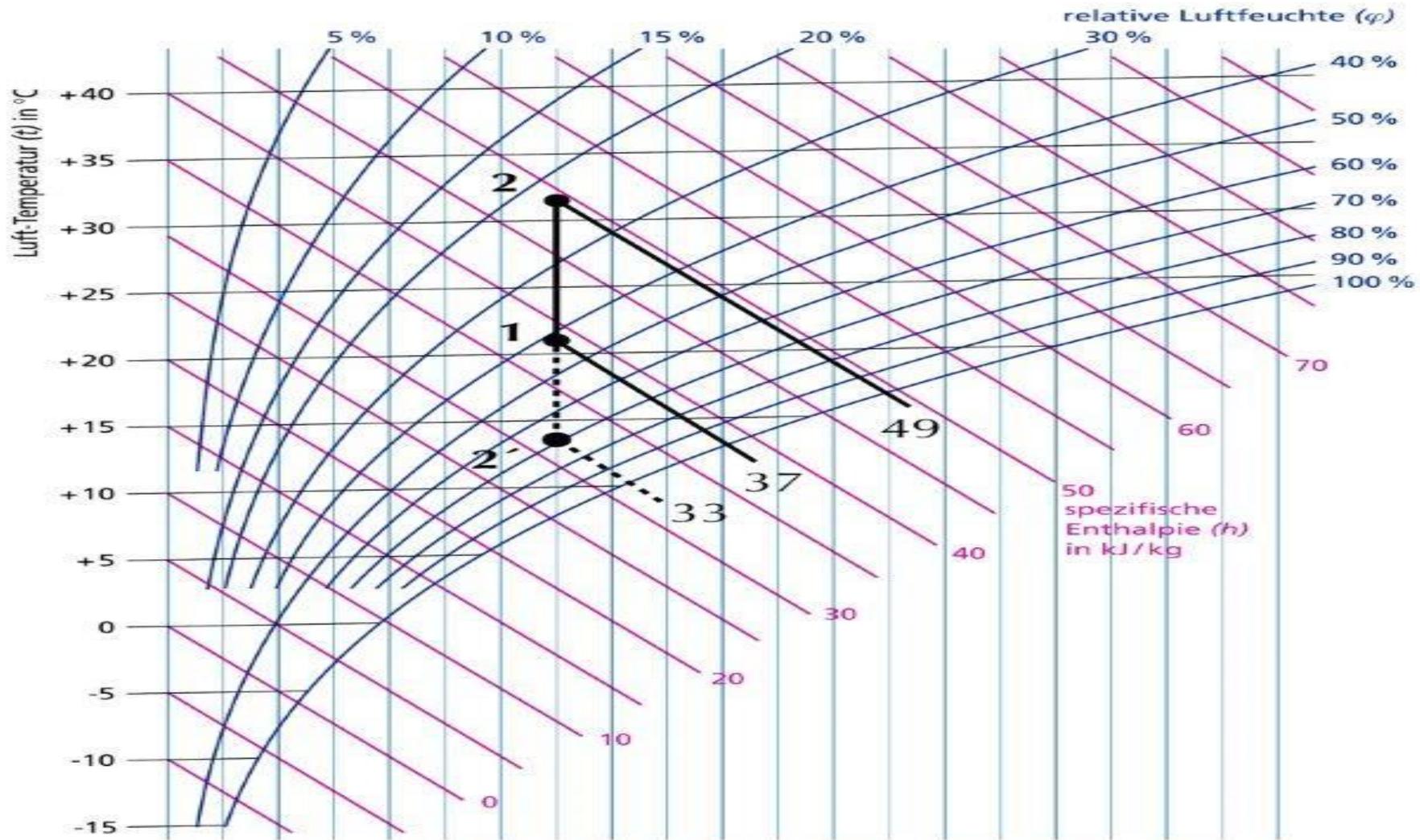
Nasskühlung/Kühlturm

- Leistung der Nasskühlung wird durch folgende Größen bestimmt:

1. Die Luftfeuchtigkeit, also die Wasser- Aufnahmefähigkeit der Luft
2. Der Luftstrom mit einer bestimmten Temperatur
3. Der Größe des Wasserstromes
4. Der Luftleistung pro Runde

Zu 2 Kühlgrenztemperatur (Feuchtkugeltemp.) bestimmt die Endtemperatur des kalten Wassers (Kaltwasser- Austritt nie kälter als 3K über Kühlgrenztemp.)
(Nicht zu verwechseln mit dem Taupunkt)

Der Taupunkt im H,x- Diagramm



Kühlturm



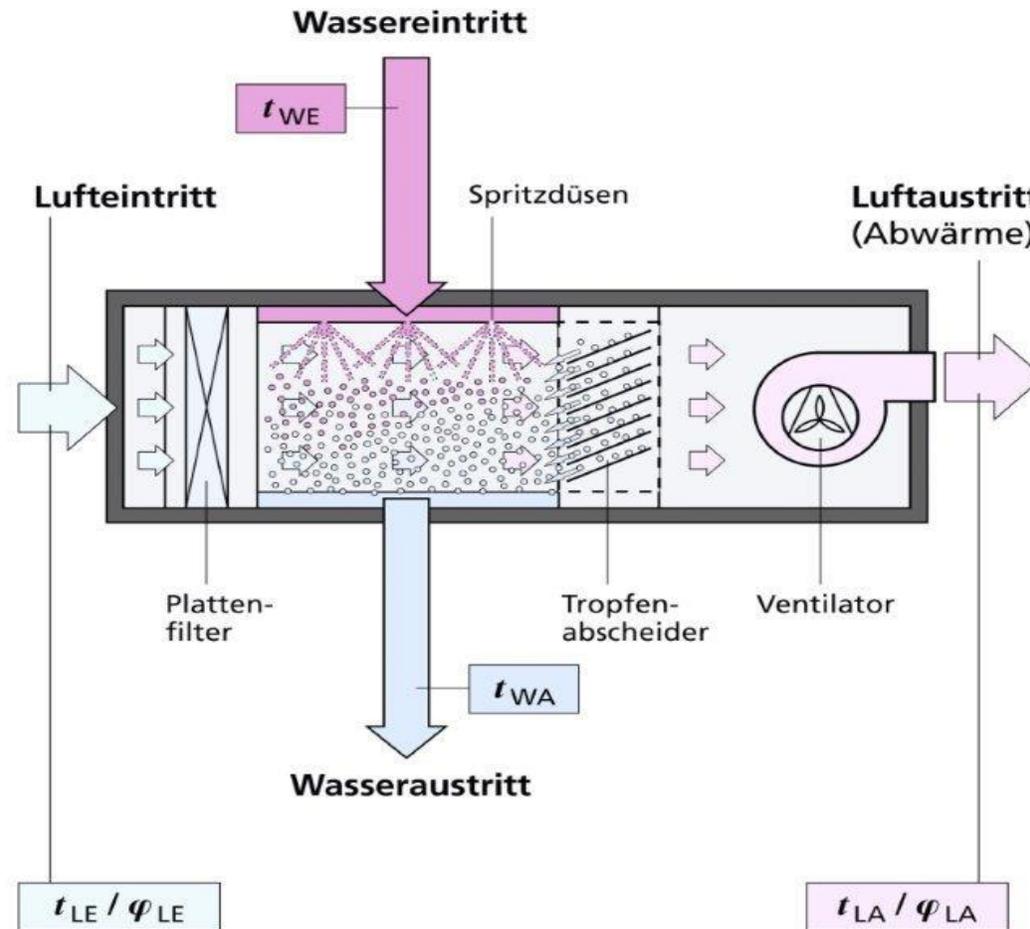
Der Kühlwasserkreislauf an Mischeranlagen Vortrag DIK e.V.
20.6.2017 von Dipl.-Ing. Klaus Reisner

Inside container



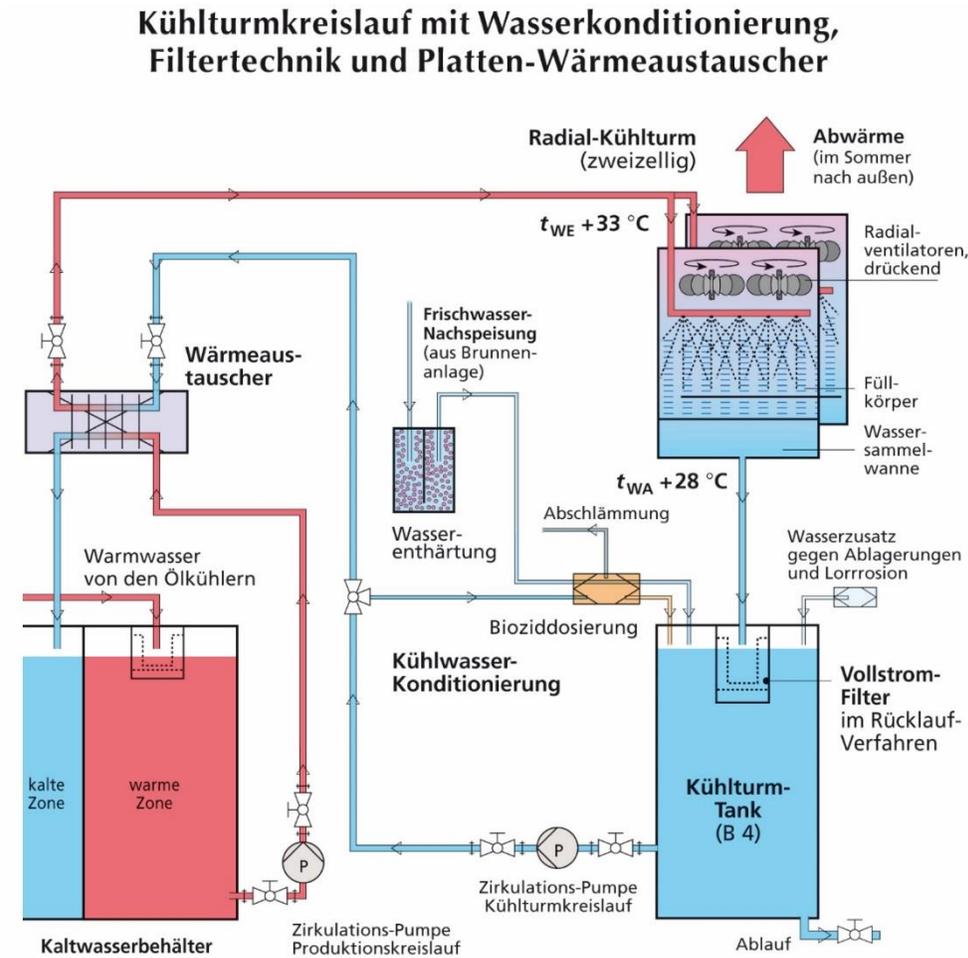
Nasskühlung

Das Prinzip der Nasskühlung



© diGraph, Lahr

Kühlkreislauf Kühlturm



Kühltürme



Wärmeaustauscher

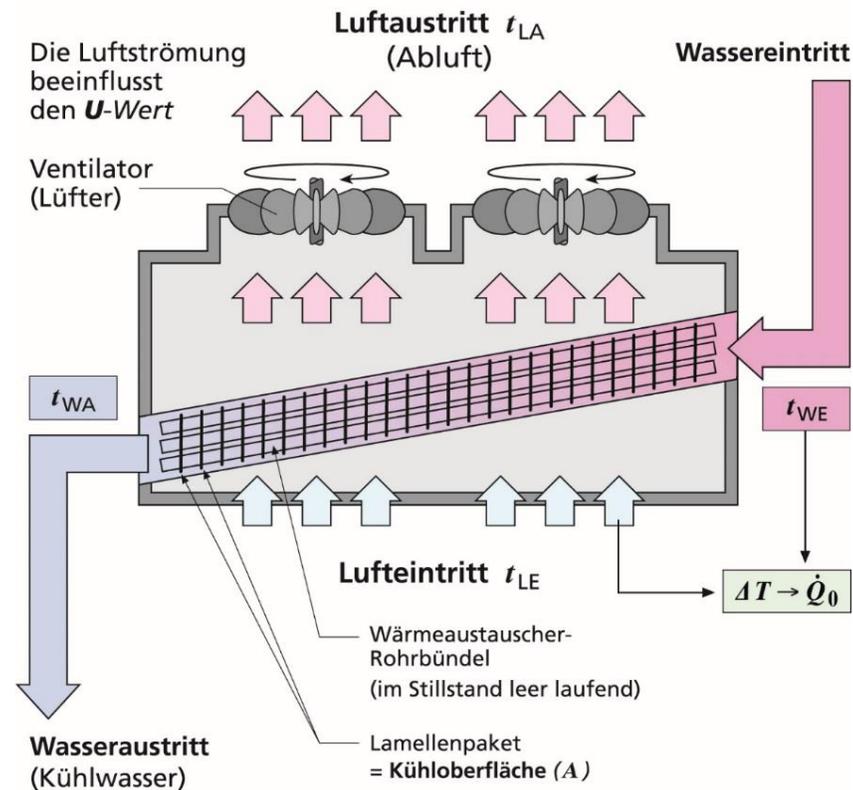


Trockenkühler, Alternative zum Nasskühler

- Trockenkühler besteht aus einem Rohrsystem, auf welches Aluminiumlamellen aufgedrückt sind.
- Zu erreichende Wassertemperatur liegt weit über der Lufttemperatur und deshalb ist die Kühlwirkung im Sommer nicht ausreichend
- Veränderung ebenfalls durch den Klimawandel
- Abhilfe schafft das Verfahren der Adiabaten Kühlung
 - Angesaugte Luft wird mit winzigen Wassertropfen befeuchtet. Dabei spritzt kein Wasser an die Lamellen

Darstellung Trockenkühler

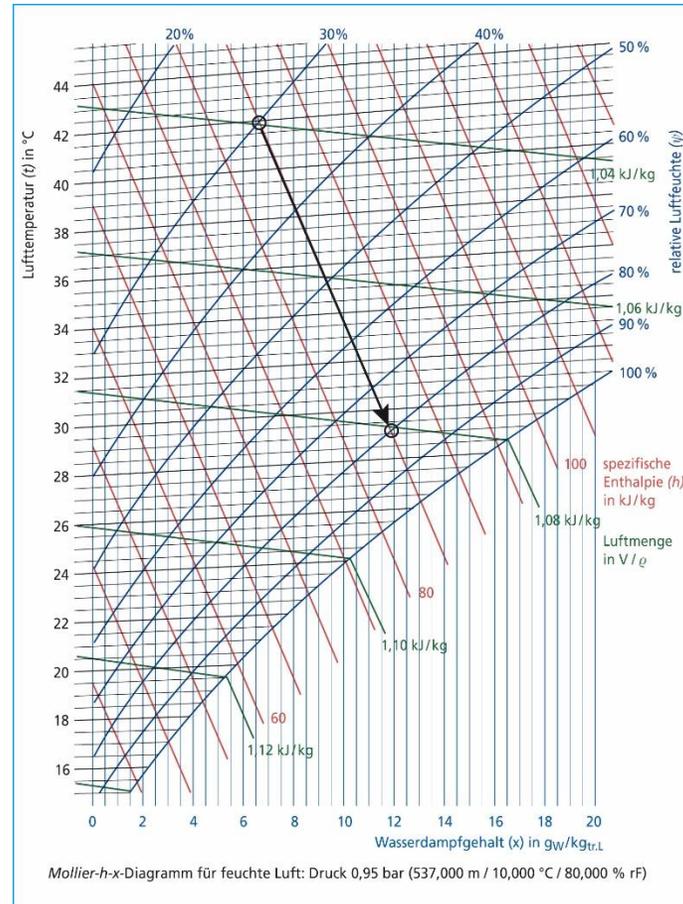
Das Prinzip der Trockenkühlung



Trockenkühler und Adiabate Unterstützung

- Kleine Wassertropfen = Aerosol
- Versprühung geschieht mit einem Wasserdruck von 9 bar über kleine Düsen
- Wasser muss aufbereitet sein, vollkommen sauber und kalk frei
- Wassertropfen bilden eine Oberfläche, auf der eine Verdampfung statt findet
- Das bedeutet, dass die Funktionsfähigkeit des Trockenkühlers gegeben ist

Adiabatische Kühlung am Trockenkühler



Trockenkühler und Adiabate Unterstützung

- Eine Abkühlung der Luft um 7K ist durchaus möglich
- Großzügige Auslegung im Trockenbetrieb
- Wird die Luft bei 35°C – 40°C mit zusätzlicher Feuchtigkeit aufgeladen, dann steigt die relative Feuchtigkeit und zwangsläufig sinkt die Temperatur hier auf 25°C bei 80 % Feuchte
- Adiabatisch heißt, eine Zustandsänderung ohne äußeren Wärmeaustausch.
- Zustandsänderung erfolgt im Diagramm auf der Linie konstanter Enthalpie, weil sich der Wärmeinhalt praktisch nicht verändert

Trockenkühler und Adiabate Unterstützung

- Adiabatisch heißt, eine Zustandsänderung ohne äußeren Wärmeaustausch.
- Zustandsänderung erfolgt im Diagramm auf der Linie konstanter Enthalpie, weil sich der Wärmeinhalt praktisch nicht verändert

Kältemaschinen

Funktionsprinzip einer Kältemaschine:

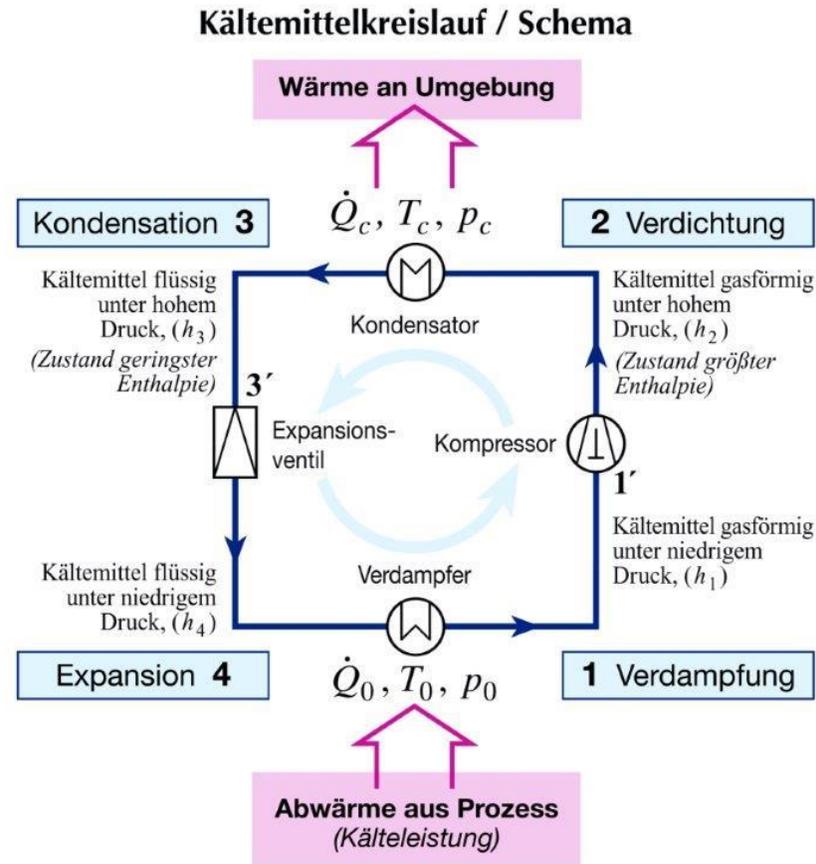
Die „Kälteleistung“ einer Kältemaschine beruht auf der Fähigkeit eines Mediums (Kältemittel), in einem Kreisprozess an einer Stelle Wärme aufzunehmen und sie – an einer anderen Stelle im Kreislauf – wieder abzugeben.

Dabei wird das Kältemittel verdampft, verdichtet, kondensiert (verflüssigt), dann wieder verdampft u.s.w.

Kältemaschinen

- Im Verdampfer wird dem Kühlwasser des Produktionsprozesses Wärme entzogen, die das flüssige Kältemittel verdampfen lässt.
- Danach saugt der Kompressor (Verdichter) das nun gasförmige Kältemittel an und verdichtet es auf hohen Druck und hohe Temperatur.
- Im nachfolgenden Kondensator gibt das Kältemittel seine Wärme an die Umgebungstemperatur ab.

Kältemaschine/ Wärmepumpe



© diGraph, Lehr

Kältemaschine

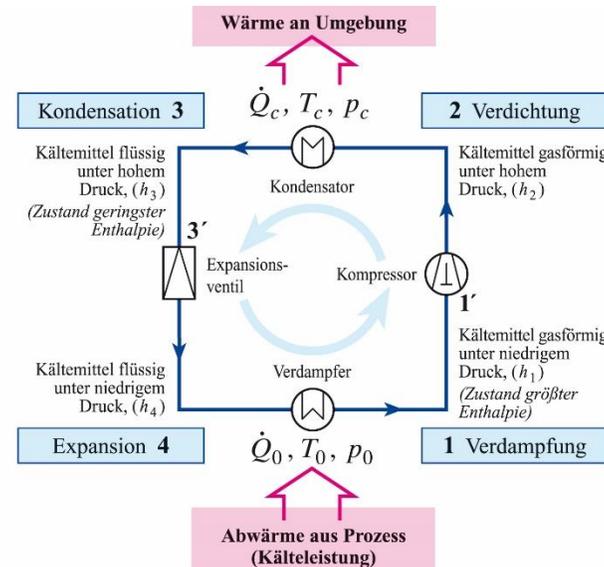
- Mit dieser Methode lässt sich jede Wassertemperatur erzeugen
- Wirkungsweise kann aber auch in der Mischtechnik hervorragend sein, weil ein Absenken der Kühlwassertemperatur eine bessere Effizienz bedeutet
- Antrieb der Kompressoren erfordert etwa 25% der Kälteleistung an elektrischer Energie

Erläuterung Kältekreislauf

Der Kältemittelkreislauf

Bei einem Kälte-Kreisprozess wird statt eines **Wirkungsgrades** (η) eine **Kälte- oder Leistungszahl** (ε) definiert. Der entstehende **Wärmestrom** (Q) heißt bei einer Kältemaschine **Kältestrom** und wird mit (\dot{Q}_0) bezeichnet. Die **Leistungszahl** einer Kältemaschine stellt das **Verhältnis der nutzbringenden Kälteleistung zur aufgenommenen Arbeitsleistung** dar.

Die Leistungszahl ist ein wichtiges Kriterium für die Qualität einer Kältemaschine.



Die „Kälteleistung“ beruht auf der Fähigkeit eines Mediums, **Wärme aus der Umgebung aufzunehmen** und – an anderer Stelle – **Wärme an die Umgebung abzugeben**.

Zu diesem Zweck wird das Kältemittel einem Kreislauf von **Verdampfung** und **Verdichtung**, **Kondensation** und **Expansion** unterworfen. Es wird abwechselnd **verdampft** und **verflüssigt**, **ausgedehnt** und **verdichtet**, um so das Volumen und den Wärmeinhalt (die spezifische Enthalpie) des Kältemittels dessen jeweiliger Teilaufgabe – **Wärmeaufnahme**, **Wärmetransport**, **Wärmeabfuhr** – anzupassen.

Nach der Expansion hat das Kältemittel wieder den gleichen Zustand erreicht wie vor der Verdampfung, also zu Beginn des Kreislaufs.

Abwärme aus Kompressionskältemaschinen

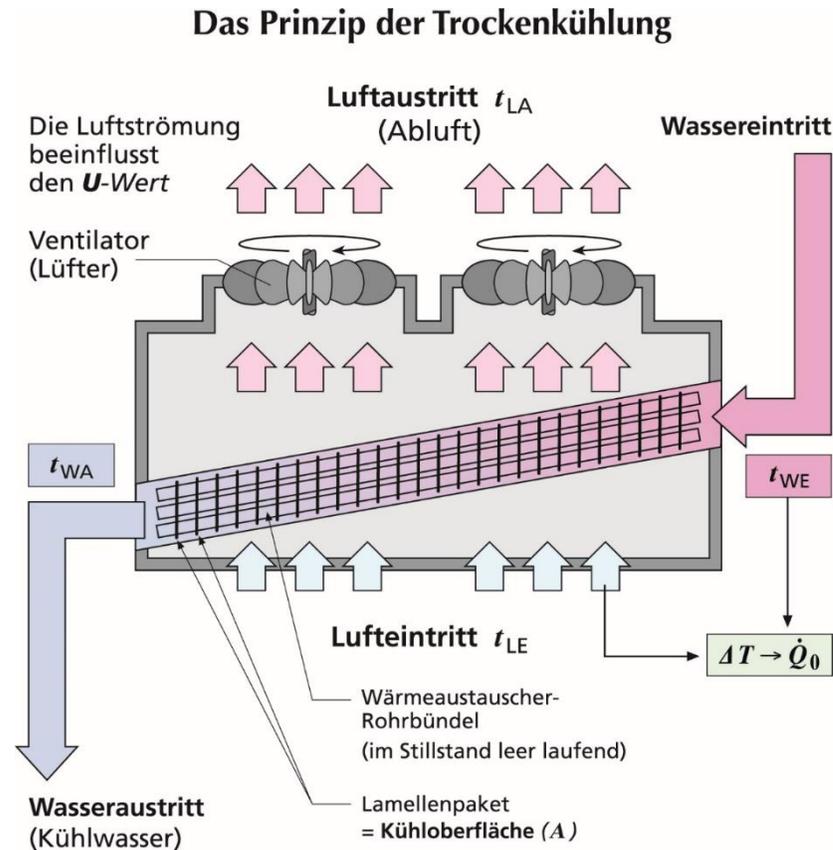
$$Q_c = Q_0 + W$$

Wärmerückgewinnung

- Kühlsysteme mit Kompressionskälteanlagen haben Möglichkeiten, die Abwärme zum Heizen oder für Temperierungszwecke zu nutzen
- Eine Kältemaschine ist nichts anderes als eine Wärmepumpenanlage. Ihre Energieverhältnisse drücken sich in der Leistungszahl aus
- Beim Kühlen mit der Kältemaschine kann man immer Wärme nutzen nach dem Wärmepumpenprinzip
- Wärme nützlich zum Heizen und Temperieren

- An Kühlturmkreislauf kann man auch eine Wärmepumpe anschließen, die dann mit hohen COP- Werten arbeitet.

Darstellung Trockenkühler



Theoretische und reale Leistungszahl

- Leistungszahl (Epsilon) einer Wärmepumpe oder einer Kältemaschine ist ein wichtiges Kriterium für die Qualität derartiger Maschinen
- Diese Werte bezeichnen das Verhältnis von erzeugter Wärmeleistung (Q_C) bzw. Kälteleistung (Q_0) zur eingesetzten elektrischen Leistung (W). Dabei ist zwischen der theoretisch erreichbaren Leistungszahl (der sog. Carnot-Leistungszahl) und der real erreichbaren Leistungszahl zu unterscheiden.

Theoretische und reale Leistungszahl

- A) Carnot`sche Leistungszahl
 - Für idealtheoretische (Verlustfreie) Kreisprozesse
- B) Reale Leistungszahl
 - Für reale Kreisprozesse (berücksichtigt nur die Leistungsaufnahme des Verdichters)
- Angabe der Leistungszahl bezieht sich immer auf einen bestimmten Lastpunkt, d.h. einen Wert, der zu einer bestimmten Zeit vorhanden ist, in der Regel auf Maximalbedingungen.

COP – EER - Wert

- COP = Coefficient of Performance
- EER = Energy Efficiency Ratio

- Für reale Kreisprozesse unter Berücksichtigung der Leistungsaufnahme der Gesamtanlage
- Prüfkriterium zur energetischen Bewertung einer Wärmepumpe ist der COP-Wert

Jahresarbeitszahl

- Die JAZ (Jahresarbeitszahl) kann somit als wichtigste Kennzahl zur tatsächlichen Energieeffizienz einer Wärmepumpe genutzt werden.

