

1 Grundlagen

1.1 Vom Aufbau der Materie

Unter den verschiedenen Stoffen der Materie lassen sich auf den ersten Blick drei Gruppen erkennen: *feste Körper*, *Flüssigkeiten* und *Gase*.

Selbst im alltäglichen Umgang begegnet man jedoch einer Reihe von Stoffen, die sich bei genauerer Betrachtung in mehr als eine dieser Gruppen einordnen lassen. So kennen wir beispielsweise Wasser als Flüssigkeit, aber ebenso als festen Körper in Form von Eis und schließlich als Gas in Form von Dampf.

Dass es sich dabei wirklich um verschiedene Erscheinungsformen desselben Stoffs handelt, lässt sich mit einem Versuch unschwer beweisen:

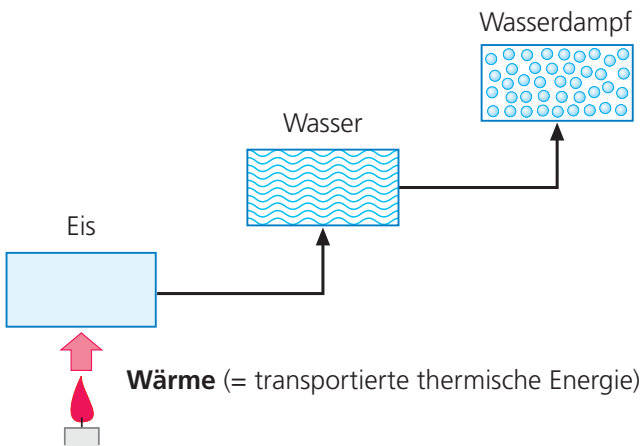


Abbildung 1.1: Versuch 1

Wird Eis erhitzt, so entsteht Wasser. Durch weiteres Erhitzen (bis zum Siedepunkt) geht das (flüssige) Wasser in den gasförmigen Aggregatzustand (Wasserdampf) über.

Demzufolge lässt sich die äußere Erscheinungsform eines Stoffs durch die bloße Zufuhr von thermischer Energie verändern.

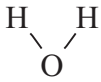
Um diesen Vorgang verstehen zu können, bedarf es eines kurzen Rückgriffs auf unser physikalisches Schulwissen:

Bekanntlich bestehen alle Stoffe der Materie aus einer begrenzten Anzahl chemischer Elemente. Diese Elemente bilden die Grundstoffe, aus denen sich alle anderen Stoffe, die sogenannten chemischen Verbindungen, zusammensetzen. Kennzeichnend für ein chemisches Element ist, dass es sich durch kein chemisches Verfahren in einfachere Stoffe zerlegen lässt. Die besonderen Eigenschaften eines chemischen Elements (durch die es sich von anderen Elementen unterscheidet) ergeben sich aus dem inneren Aufbau seiner *Atome*.

Chemische Elemente bestehen aus extrem kleinen Teilchen, den Atomen.

Die kleinsten Teile aller übrigen Stoffe (jener Stoffe, die keine chemischen Elemente, sondern Verbindungen aus diesen sind) nennt man *Moleküle*. Ein Molekül ist eine Verbindung mehrerer Atome, bei der durch chemische Bindungskräfte ein völlig neuer, andersartiger Stoff entstanden ist.¹⁾

So ist beispielsweise Wasser eine Verbindung der Elemente Wasserstoff (chemisches Zeichen H) und Sauerstoff (chemisches Zeichen O). Ein Wasser-Molekül besteht aus zwei Wasserstoff-Atomen und einem Sauerstoff-Atom, weshalb seine chemische Bezeichnung H_2O lautet.



Strukturformel

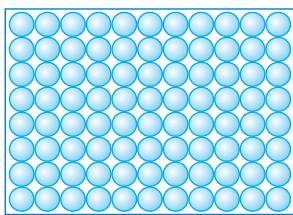
Der Verbindungsstrich zwischen den jeweiligen chemischen Zeichen stellt die chemische Bindung zwischen Atomen dar.

Aufgrund ihres inneren Aufbaus üben die Atome bzw. Moleküle eines Stoffes Kräfte aufeinander aus, die eine gegenseitige Anziehung bewirken. Diese sogenannten *Kohäsionskräfte* sorgen für den inneren Zusammenhalt der Stoffe; ihre jeweilige Stärke hängt von der Beschaffenheit der Atome bzw. Moleküle und dem Aggregatzustand ab. So sind die Kohäsionskräfte bei Stoffen hoher Festigkeit, z. B. bei Metallen, besonders stark; die Moleküle lagern sich eng aneinander und bilden eine Gitterstruktur.

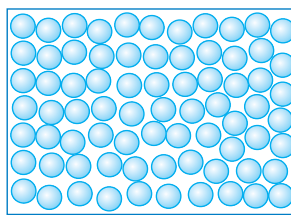
Bei Flüssigkeiten sind die Kohäsionskräfte geringer, die Moleküle sind weniger eng verbunden. (Dies ist der Grund dafür, dass ein flüssiger Stoff eben nicht fest ist, sondern flüssig.)

Bei gasförmigen Stoffen gibt es aufgrund schwacher Kohäsionskräfte nur einen sehr lockeren Verbund ihrer Moleküle, deshalb sind diese Stoffe sehr flüchtig.

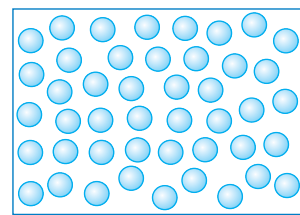
Die Art des Molekülverbunds bietet auch die Erklärung dafür, dass sich gasförmige Stoffe sehr stark zusammenpressen (komprimieren) lassen, Flüssigkeiten hingegen weniger stark und feste Stoffe kaum. Die nachstehende Abbildung verdeutlicht diesen Zusammenhang.



fest
(Gitterstruktur)



flüssig
(Teilchen bleiben noch
beieinander)



gasförmig
(Teilchen können sich
frei und unabhängig
voneinander bewegen)

● = 1 Molekül

Abbildung 1.2: Molekülverbund in den drei Aggregatzuständen eines Stoffes

Der geschilderte Versuch hat gezeigt, dass sich die äußere Erscheinungsform des Wassers durch bloße Wärmezufuhr verändert: vom festen Körper (Eis) über die Flüssigkeit bis hin zum Gas (Wasserdampf).

¹⁾ Moleküle, die ausschließlich aus gleichen Atomen bestehen (Elemente), werden hier – im Interesse didaktischer Klarheit – nicht näher definiert.

Wir wissen nun, dass diese Erscheinungsformen auf unterschiedliche Arten des Molekülverbands zurückzuführen sind. Sie werden als Aggregatzustände bezeichnet. Von jedem Stoff gibt es drei eindeutig unterscheidbare „klassische“ Aggregatzustände: *fest*, *flüssig* und *gasförmig*²⁾.

Da offenbar die Wärmezufuhr die Änderung der Aggregatzustände bewirkt, ist nun zu klären, welchen Einfluss sie auf die Kohäsionskräfte der Moleküle ausübt. Zuvor soll jedoch die anfängliche Versuchsanordnung ein wenig verändert und zugleich präzisiert werden.

1.2 Erwärmung unterschiedlicher Stoffe

In diesem zweiten Versuch werden gleiche Mengen unterschiedlicher Flüssigkeiten unter genau gleicher Wärmezufuhr erhitzt: Wasser, Alkohol (Ethanol) und Aceton (Propanol). Während der Wärmezufuhr wird jeweils die Temperatur gemessen.

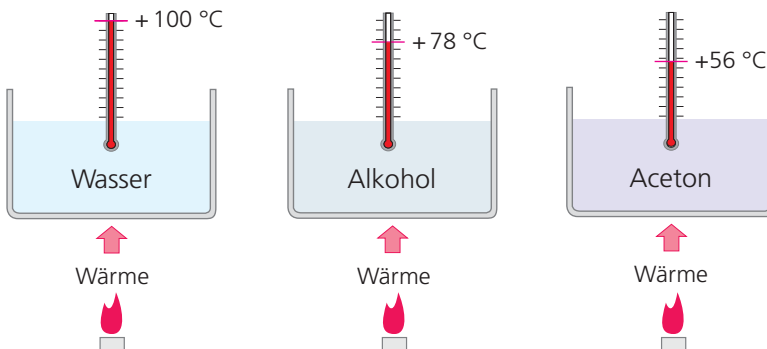


Abbildung 1.3: Versuch 2

Der Versuch zeigt:

1. Die Temperaturen steigen so lange gleichmäßig an, bis die Flüssigkeiten zu sieden beginnen. Die gemessenen Siedetemperaturen betragen:

Wasser	+100 °C
Alkohol	+ 78 °C
Aceton	+ 56 °C

Der Temperaturanstieg endet bei der jeweiligen *Siedetemperatur*.

2. Die verschiedenen Flüssigkeiten erwärmen sich – trotz gleicher Menge und gleicher Wärmezufuhr – unterschiedlich schnell.
3. Die Wärme strömt von der Wärmequelle zur kälteren Flüssigkeit – mithin: von der warmen zur kälteren Seite, von der hohen Temperatur zur niedrigen. Diese banal klingende Feststellung ist, wie wir noch sehen werden, von grundlegender Bedeutung.

Wie lassen sich diese Phänomene erklären?

Den Zustrom von *Wärme* (das ist thermische Energie) setzen die Moleküle der verschiedenen Stoffe in Bewegungsenergie (kinetische Energie) um. Bei festen Körpern, Flüssigkeiten und Gasen äußert sich die Bewegungsenergie in Form von Schwingungen der Moleküle.

²⁾ Wissenschaftlich bekannt sind noch weitere „nicht klassische“ Aggregatzustände, z. B. das Plasma. Für das Thema dieses Buchs sind sie jedoch ohne Belang.

Wärmezufuhr beschleunigt die Schwingungen der Moleküle eines Stoffs, wodurch eine Temperaturerhöhung bewirkt wird: Je stärker die Molekülschwingungen sind, desto höher ist die Temperatur.

Beim Erreichen eines bestimmten Temperaturwerts – des *Siedepunkts* – sind die Schwingungen so stark, dass der bisherige Molekülverbund „reißt“, wodurch der erwärmte Stoff vom flüssigen in den gasförmigen Zustand übergeht.

Die Wärme leistet Arbeit gegen die Kohäsionskräfte und bewirkt so eine beträchtliche Volumenvergrößerung des Stoffs. Die Temperatur einer siedenden Flüssigkeit bleibt trotz weiterer Wärmezufuhr konstant. Auf niedrigerem Temperaturniveau geschieht Vergleichbares, wenn ein Stoff vom festen in den flüssigen Aggregatzustand übergeht.

Die Temperatur, bei der sich ein fester Stoff verflüssigt, bezeichnet man als *Schmelztemperatur*. Sie beträgt z. B. bei Wasser 0 °C. Wird ein Wechsel des Aggregatzustands in umgekehrter Richtung – also durch Wärmeentzug statt durch Wärmezufuhr – bewirkt, so spricht man von *Erstarrungs-* und *Kondensationstemperatur* anstelle von Schmelz- und Siedetemperatur.

Die bei dem Versuch in Abbildung 1.3 gemessenen unterschiedlichen Siedetemperaturen zeigen, dass die Temperaturwerte, bei denen sich der Aggregatzustand ändert, bei verschiedenen Stoffen unterschiedlich hoch sind: Bei jedem Stoff vollzieht sich der Übergang von einem Aggregatzustand in einen anderen jeweils bei einer ganz bestimmten charakteristischen Temperatur.

Die zweite Feststellung anhand dieses Versuchs, dass sich die drei verschiedenen Flüssigkeiten trotz gleicher Menge und gleicher Wärmezufuhr unterschiedlich schnell erwärmen, macht deutlich, dass verschiedene Stoffe unterschiedlich große Wärmemengen erfordern, um einen bestimmten Temperaturanstieg zu erreichen.

Um eine festgelegte Masse eines Stoffs zu verdampfen, benötigt man eine bestimmte Wärmemenge.

Die Wärmemengen, die erforderlich sind, um jeweils einen Wechsel des Aggregatzustands hervorzurufen, bezeichnet man (je nachdem, ob es sich um Wärmezufuhr oder Wärmeentzug handelt) als *Verdampfungs-* oder *Verflüssigungswärme* bzw. als *Schmelz-* oder *Erstarrungswärme*.

Diese Wärmemengen bewirken keine messbare Temperaturänderung, sind also nicht sinnlich wahrnehmbar. Man spricht in diesem Fall von *latenter Wärme* (verborgener Wärme) im Gegensatz zu *sensibler Wärme* (fühlbarer Wärme).

Während sensible Wärme durch einen Temperaturanstieg wahrgenommen wird, lässt sich die tatsächliche Zunahme latenter Wärme in unserem Versuch daran erkennen, dass die Temperaturen der Flüssigkeiten nicht über den jeweiligen Siedepunkt ansteigen, obgleich die Wärmezufuhr nicht unterbrochen wird.

Daraus folgt: Die weiterhin zugeführte Wärme wird beim Wechsel des Aggregatzustands – also beim Verdampfen der Flüssigkeit – „verbraucht“. Richtiger ausgedrückt: Die latente Wärme wird vom gasförmigen Aggregatzustand gebunden, indem sie für das Aufbrechen der Kohäsionskräfte zwischen den einzelnen Molekülen gebraucht wird. Ohne entsprechend niedrige Kohäsionskräfte der Moleküle wäre der Stoff nicht gasförmig, sondern flüssig.

Für jeden Stoff gibt es eine spezifische *Erwärmungskurve*, jeweils bezogen auf eine bestimmte Masse. In Abbildung 1.4 ist solch eine Temperatur-Verlaufskurve bei konstanter Wärmezufuhr zu 1 kg Wasser in einem Diagramm dargestellt.

2.5 Die Zusammenführung zum Kältemittelkreislauf

2.5.1 Der Carnot-Prozess in der Kältetechnik

In einer Kältemaschine durchläuft das Kältemittel einen Kreisprozess, in dem es über verschiedene Zustandsänderungen immer wieder in seinen Ausgangszustand zurückkehrt.

Der (reale) Kreisprozess kommt dem („linksläufigen“) *Carnot'schen Kreisprozess* sehr nahe, so dass dieser als *Vergleichsprozess* verwendet wird.

Der „klassische“ rechtsläufige Carnot-Prozess¹²⁾ ist ein *reversibler* (umkehrbarer) thermodynamischer Kreisprozess, der sich in zwei *isothermen* Bereichen (ohne Temperaturänderung) und zwei *adiabaten* Bereichen (ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung) vollzieht. Ihm liegt ein Gedankenexperiment für eine idealtypische Wärmekraftmaschine (keine Kältemaschine) – eine sogenannte „*Carnot-Maschine*“ – zugrunde: In einem geschlossenen Gefäß wird ein (ideales) Gas einer Folge von vier reversiblen (umkehrbaren) Zustandsänderungen unterworfen, sodass der Endzustand gleich dem Anfangszustand ist, siehe Abbildung 2.3.

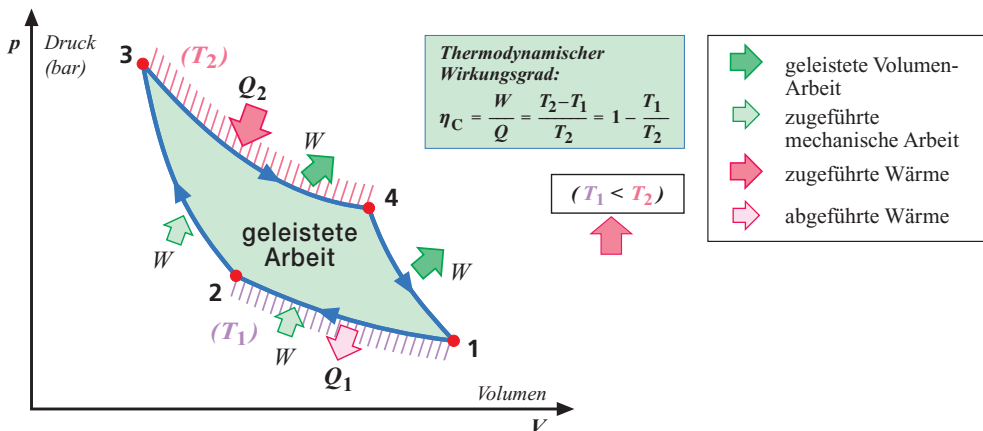


Abbildung 2.3: p,V-Diagramm des Carnot-Kreisprozesses

Die dabei gewonnene Arbeit (W) der Wärmekraftmaschine ist gleich der Differenz (Δ) der Wärmemengen $Q_1 - Q_2$.

Anders als bei einer Kältemaschine bleibt das Arbeitsmedium im Carnot-Prozess im gasförmigen Aggregatzustand, da sich *ideale Gase* nicht verflüssigen lassen. Wärmekraftmaschinen nutzen einen Wärmeunterschied, um mechanische Arbeit nach außen abzugeben bzw. um mechanische Arbeit zu gewinnen. Kältemaschinen hingegen nutzen die von außen zugeführte mechanische Arbeit, um Wärme zu transportieren.

Der Wirkungsgrad η einer Wärmekraftmaschine ist allgemein das Verhältnis abgegebener Leistung (Nutzen) zu zugeführter Leistung (Aufwand). Der *ideale Carnot-Wirkungsgrad* η_C hat den Wert 1 (= 100 %), der in der Realität – wegen technisch bedingter Verluste – nicht erreichbar ist. Deshalb sind in der Praxis erreichbare Wirkungsgrade immer kleiner als 100 %.

¹²⁾ Der Carnot-Prozess ist benannt nach dem französischen Physiker Nicolas Leonard Sadi Carnot (1796–1832).

2 Der Kältemittelkreislauf

Der Carnot-Kreisprozess besteht aus vier (vollständig reversibel) ablaufenden Prozessschritten. Bei jedem Schritt wird Arbeit am oder vom Gas verrichtet:

Prozessschritt 1 → 2: *Isotherme Kompression*

Das Gas wird unter Zufuhr mechanischer Arbeit *isotherm* komprimiert, d. h., die Kompression erfolgt so langsam, dass jede entstehende Temperaturdifferenz zwischen System und kälterem Reservoir (T_1), die durch die Kompression entsteht (siehe Kapitel 1.11, *Ideale Gase*), sofort ausgeglichen wird. (Die Temperaturdifferenz ist also gleich null, was in der Realität nicht möglich ist.) Dabei wird die Wärmemenge Q_1 an das kältere Reservoir abgegeben.

Prozessschritt 2 → 3: *Adiabatische Kompression*

Das Gas wird unter Zufuhr mechanischer Arbeit adiabatisch komprimiert, d. h. ohne Wärmeübertragung an die Umgebung. Seine Temperatur ändert sich dabei (durch die Kompression) auf die Höhe des wärmeren Reservoirs (T_2).

Prozessschritt 3 → 4: *Isotherme Expansion*

Das Gas wird *isotherm expandiert*, d. h., die Expansion erfolgt so langsam, dass jede Temperaturdifferenz zwischen System und wärmerem Reservoir (T_2) sofort ausgeglichen wird (analog Schritt 1 → 2). Dabei wird die Wärmemenge Q_2 aus dem wärmeren Reservoir aufgenommen. Durch die Volumenvergrößerung des Gases (durch die Wärmezufuhr) wird eine Arbeit nach außen verrichtet.

Prozessschritt 4 → 1: *Adiabatische Expansion*

Das Gas wird *adiabatisch expandiert*. Seine Temperatur ändert sich dabei wieder auf die Ausgangstemperatur (T_1). Auch hier wird durch die Volumenvergrößerung Arbeit nach außen verrichtet. Die umschlossene Fläche im Diagramm ist ein Produkt aus Druck- und Volumendifferenzen und hat daher die Dimension einer Arbeit ($W = \Delta p \cdot \Delta V$, siehe Kapitel 1.11). Diese Arbeit kann z. B. zum Antrieb einer Kurbelwelle benutzt werden.

Bei einem entgegengesetzt (linksläufig) ablaufenden Kreisprozess nimmt die Maschine unter Zufuhr von Arbeit Wärme aus dem Reservoir mit der niedrigeren Temperatur auf und gibt Wärme an das Reservoir mit der höheren Temperatur ab. Aus einer *Wärmekraftmaschine* wird so eine *Kältemaschine*. Abbildung 2.4 demonstriert den Unterschied zwischen der oben beschriebenen Wärmekraftmaschine und einer Kältemaschine.

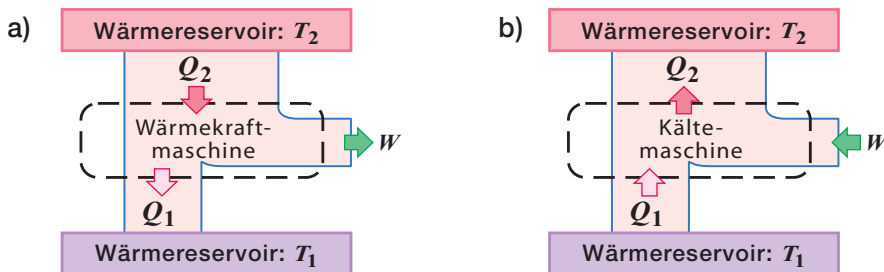


Abbildung 2.4: Energieflussschemata

Die energetische Bewertung einer Wärmekraftmaschine wird mittels des Wirkungsgrads (η) definiert. Bei dem linksläufigen Kreisprozess einer *Wärmepumpe* oder einer *Kältemaschine* wird

die energetische Bewertung durch die *Leistungszahl* (ϵ) beschrieben. Der entstehende *Wärmestrom* (\dot{Q}) heißt bei einer Kältemaschine *Kältestrom* und wird mit (\dot{Q}_0) bezeichnet.

Diese Kennwerte stellen das Verhältnis der nutzbringenden Wärme- oder Kälteleistung zur aufgenommenen Arbeitsleistung dar, ohne Berücksichtigung der Leistungsaufnahme von Hilfsaggregaten (z. B. Ventilatoren, Pumpen u. a.) der Gesamtanlage (siehe dazu Kapitel 2.5.4).

Wirkungsgrad und Leistungszahl sind wichtige Kriterien für die Qualität von Wärmekraftmaschinen, Wärmepumpen und Kältemaschinen (siehe dazu Kapitel 6.1).

Eine Wärmepumpe entspricht von der Funktionsweise her einer Kältemaschine. Der Unterschied ist, dass bei einer Wärmepumpe die kondensatorseitig anfallende Wärme zur Heizung und Warmwasseraufbereitung genutzt wird (siehe auch Kapitel 5.4.1 und 5.4.2), während bei einer Kältemaschine zur Kühlung eines Mediums verdampferseitig Wärme abgeführt wird.

Bei einer Kältemaschine beruht die „Kälteleistung“ auf der Fähigkeit eines Mediums (des Kältemittels), Wärme an einer Stelle im Kältemittelkreislauf aufzunehmen und – an anderer Stelle – Wärme wieder 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.

2.5.2 Ablauf und Schema des Kältemittelkreislaufs

Bei seinem Kreislauf durch die Kälteanlage erfährt das Kältemittel folgende Zustandsänderungen:

1. *Verdampfung* → 2. *Verdichtung* → 3. *Kondensation* → 4. *Expansion*

Um verschiedenen Stellen des Kältemittelkreislaufs den jeweiligen Wärmeinhalt des Kältemittels zuordnen zu können, sind bestimmte Punkte des Schemas in Abbildung 2.5 mit den Ziffern 1, 2, 3, 4 bezeichnet. An diesen Punkten hat das Kältemittel – in gleicher Reihenfolge – jeweils die *spezifische Enthalpie* (den Wärmeinhalt) h_1 , h_2 , h_3 und h_4 . Daneben gibt es noch die Punkte 1' unmittelbar vor dem Verdichter und 3' unmittelbar vor dem Expansionsventil.

Punkt 1: Das gesamte Kältemittel ist soeben verdampft. Es hat die der Kälteleistung entsprechende Wärmemenge (Q_0) aus dem Verdampfer aufgenommen.

Punkt 1': Das bereits zu Gas verdampfte Kältemittel ist jetzt so kalt, dass es noch mehr Wärme aus der Umgebung aufnimmt; sein Wärmeinhalt ist erneut gestiegen. Das Kältemittel ist saugseitig überhitzt.

Punkt 2: Im Kompressor wurde das Gas verdichtet. Sein Wärmeinhalt (h_2) hat sich um die Verdichtungswärme (q_{verd}) vergrößert ($h_2 = h_1' + q_{\text{verd}}$).

Punkt 3: Das Gas wurde kondensiert. Im Kondensator hat es dabei die Verdichtungswärme und die Verdampfungswärme abgegeben. Das Kältemittel ist jetzt flüssig; wegen seines hohen Drucks kann es nicht siedeln.

2 Der Kältemittelkreislauf

Punkt 3': Das flüssige Kältemittel hat nochmals eine geringe Wärmemenge an die Umgebung abgegeben; im flüssigen Zustand ist es jetzt unterkühlt.

Punkt 4: Der Druck des Kältemittels wurde verringert. Dadurch hat es sich auf die Verdampfungstemperatur abgekühlt und ist jetzt flüssig. Beim Einströmen in den Verdampfer siedet das Kältemittel unter Wärmeaufnahme und verdampft zu Gas; dann wird es erneut vom Kompressor angesaugt.

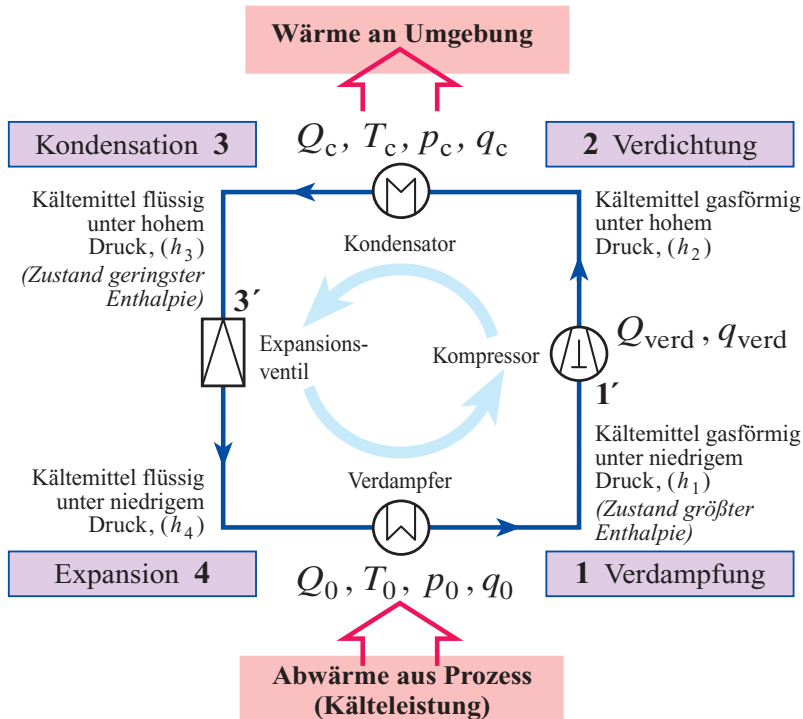


Abbildung 2.5: Ausführlicheres Schema des Kältemittelkreislaufs

Wie wir gesehen haben, siedet die Kältemittelflüssigkeit beim Einströmen in den Verdampfer unter Wärmeaufnahme, was einer „Kälteerzeugung“ gleichkommt. Demnach ist der Kältemittelmassenstrom mit folgender Gleichung zu beschreiben:

$$\dot{m}_K = \frac{\dot{Q}_0}{(h_1 - h_3')} \quad (2.7)$$

Die im Kondensator abgeführte Wärmemenge ist:

$$q_c = q_0 + W \quad (2.8)$$

Schließlich ist die für die Verdichtung aufzubringende Energie:

$$W = Q_c - Q_0 \quad (2.9)$$

2. Die Lärmbelastung sinkt bei Verringerung der Drehzahl erheblich. Zusätzlich wird das Ventilatorgeräusch als weniger unangenehm wahrgenommen, da das ständige An- und Abschalten wegfällt.

Die in diesem Kapitel erläuterten Sachverhalte lassen sich auch auf möglicherweise eingesetzte Pumpen für wassergekühlte Kondensatoren anwenden.

5.3.3 Elektronische Expansionsventile

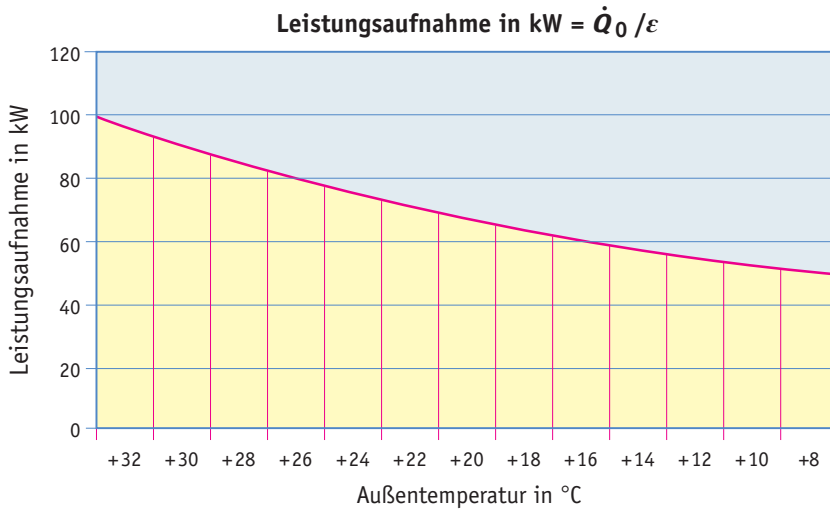
Die Energieeinsparmöglichkeiten bei elektronischen Expansionsventilen (EEV) resultieren hauptsächlich aus zwei Effekten. Erstens benötigen elektronische Expansionsventile bauartbedingt eine kleinere Überhitzung (siehe dazu Kapitel 7.6) und sind weniger träge als thermostatische Expansionsventile. Die zur Überhitzung des Kältemittels benötigte Verdampferoberfläche verkleinert sich dadurch und es steht mehr Fläche für die eigentliche Verdampfung zur Verfügung, die ja für die Leistung eines Verdampfers hauptsächlich ausschlaggebend ist. Zudem können sie schneller auf Lastschwankungen reagieren. Als Konsequenz steigt die Verdampfungstemperatur, die Verdichterlaufzeit sinkt und der EER/COP verbessert sich (vgl. Kapitel 5.3.1). Ganz nebenbei ergeben sich dadurch positive Effekte auf Luftkühler wie verringerte Abtauchzeiten, geringere Entfeuchtung etc. (vgl. Kapitel 5.3.2.1).

Zweitens spielt beim EEV der Differenzdruck zwischen Verdampfungs- und Verflüssigungsdruck keine Rolle. Deshalb kann, wenn die Außentemperatur es zulässt, die Verflüssigungstemperatur herabgesetzt werden. Thermostatische Expansionsventile (TEV) besitzen aufgrund ihrer komplizierten Mechanik (siehe Kapitel 7.3 bis 7.5) nur einen begrenzten Bereich, innerhalb dessen die Größe des Ringspalts reguliert werden kann, durch welchen das Kältemittel hindurchtritt. Ist das TEV maximal geöffnet und sinkt nun der Verflüssigungsdruck ab, so sinkt auch der Kältemittelmassenstrom und damit die Kälteleistung. EEV sind durch ihren externen, elektronisch angetriebenen Stellantrieb nicht so stark in der Öffnungsweite begrenzt, sodass auch sehr geringe Verflüssigungsdrücke realisiert werden können.

Durch den niedrigen Kondensationsdruck sinkt die erforderliche Verdichterleistung (also die Stromaufnahme des Verdichters) und die Verdampferleistung steigt an. So verkürzt sich auch die zur Kühlung erforderliche Anlagenlaufzeit und der Systemwirkungsgrad im Teillastbetrieb einer luftgekühlten Kältemaschine kann sich – bei den bei uns häufig auftretenden Temperaturen von ca. +5 °C bis ca. +20 °C – um bis zu ca. 25 % erhöhen.

Die Verwendung von EEV kann also energetisch enorme Vorteile bringen, die mit thermisch geregelten Expansionsventilen so nicht erreichbar sind. (Zur Auswirkung der Kondensations-temperatur auf den Energieverbrauch siehe auch Kapitel 5.3.1.)

5.3.4 Leistungsaufnahme in Abhängigkeit zur Außentemperatur



Mittlere Außentemperaturen im Zeitraum von 2001 bis 2010 in °C

Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jahr
-0,4	+1,4	+4,3	+9,0	+13,2	+16,5	+18,6	+17,7	+13,7	+9,4	+5,2	+0,8	+9,2

Abbildung 5.5 Das Diagramm konkretisiert den reduzierten Stromverbrauch einer Kältemaschine unter Berücksichtigung der jeweiligen Außentemperatur und der damit verbundenen Leistungsaufnahme nach dem Prinzip der temperaturabhängigen variablen Kondensation

Die Leistung einer Kältemaschine ist abhängig von der Kondensationstemperatur und der Verdampfungstemperatur. Dabei werden die Kälteleistung und die zu deren Erzeugung notwendige elektrische Leistung zueinander in eine Relation gebracht; dies wird mit dem Begriff *Leistungszahl* ausgedrückt. Je größer die spezifische Leistungszahl (ϵ) für eine Kältemaschine ist, umso effizienter arbeitet sie (siehe Kapitel 6.1).

5.3.5 Economizer/Booster

Eine mittlerweile gängige Methode zur Verbesserung der Kälteleistung von Schraubenverdichtern ist der Economizer-Betrieb (siehe Abbildung 5.6).

Dabei macht man sich die Tatsache zunutze, dass die Verdichtung kontinuierlich entlang des Schraubenprofils erfolgt. Der saugseitige Volumenstrom des Verdichters ist durch seine geometrischen Eigenschaften am Eintritt und seine Drehzahl festgelegt. Der mögliche Kältemittel-massenstrom und damit die Kälteleistung werden somit wesentlich vom Verdampfungsdruck bestimmt. Bereits in geringer Entfernung von der Saugseite des Schraubenprofils liegt der mögliche Massenstrom jedoch über demjenigen an der Saugseite. Dies macht man sich zunutze, indem an dieser Stelle zusätzliches gasförmiges Kältemittel in das Schraubenprofil geleitet wird. Das Druck- und Temperaturniveau des Kältemittels am sog. Eco-Anschluss muss also oberhalb

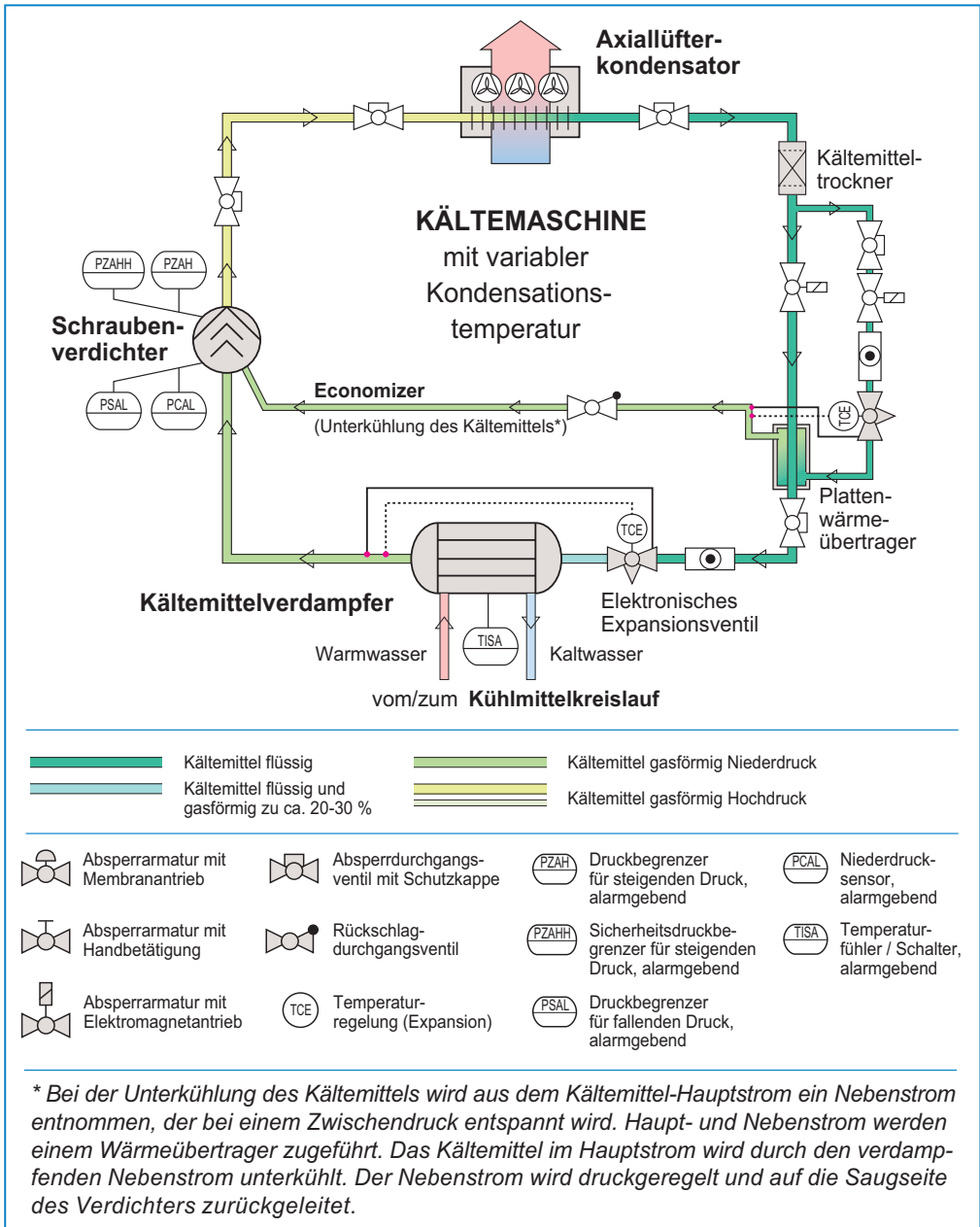


Abbildung 5.6 Kältemaschine mit Schraubenverdichter und Economizer (ECO)/Schema

des Druck-/Temperaturniveaus im Verdampfer sein. Um nun dennoch den gesamten zusätzlichen Massenstrom zur Erzeugung zusätzlicher Kälteleistung nutzen zu können, zweigt man aus der Flüssigkeitsleitung der Kältemaschine einen kleinen Nebenstrom ab und leitet diesen über ein Expansionsventil in einen Wärmeübertrager und von dort zum Eco-Anschluss des Verdichters

ters. Auf der Sekundärseite des Wärmeübertragers wird die Hauptflüssigkeitsleitung der Kältemaschine angeschlossen. Das Kältemittel im Hauptstrom wird unterkühlt und die zusätzliche Unterkühlung steht im Verdampfer vollständig als zusätzliche Kälteleistung zur Verfügung. Als positiver Nebeneffekt wird die Blasenfreiheit des Kältemittels vor dem Expansionsventil sichergestellt.

Ein ähnliches Prinzip ist im Tiefkühlbereich mit Hubkolbenverdichtern anzutreffen und wird dort als Booster-Betrieb bezeichnet. Aufgrund der geringen Verdampfungstemperaturen und damit geringen Dichten des Kältemittels würden oftmals unverhältnismäßig große Verdichter benötigt, um den geforderten Kältemittelmassenstrom sicherzustellen. Zudem können die hohe Druckdifferenz zwischen Niederdruck- und Hochdruckseite sowie der geringe Kältemittelmassenstrom in hohen Verdichterendtemperaturen und unzureichender Motorkühlung resultieren. Um Abhilfe zu schaffen, macht es Sinn, das Kältemittel zunächst mit einem kleineren Verdichter auf einen Zwischendruck zu verdichten. Das zwischenverdichtete Kältemittel hat nun eine höhere Dichte als auf der Saugseite, und es genügt ein weiterer Verdichter, der ggf. deutlich kleiner sein kann als der erste, um das Kältemittel auf Kondensationsdruck zu bringen. Die Summe der Volumenströme der einzelnen Verdichter kann durch diese Maßnahme geringer ausfallen als der Volumenstrom eines einzelnen Verdichters, obwohl der Massenstrom gleich ist.

Um nun zu hohen Verdichterendtemperaturen entgegenzuwirken, kann flüssiges Kältemittel aus der Flüssigkeitsleitung abgezweigt und über ein E-Ventil zur Kühlung in die Leitung zwischen den beiden Verdichterstufen eingespritzt werden, siehe Abbildung 5.7.

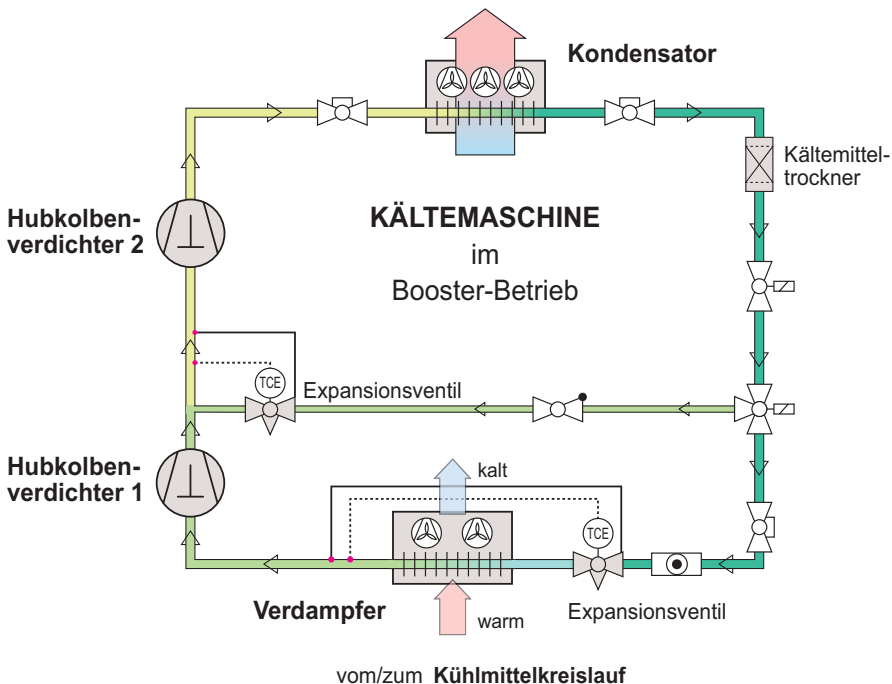


Abbildung 5.7 Booster-Betrieb einer Kältemaschine im Tiefkühlbereich, Zeichenerklärung siehe Abbildung 5.6

Alternativ ist es möglich – ganz ähnlich wie im Economizer-Betrieb bei Schraubenverdichtern – durch einen zusätzlichen Wärmeübertrager die Flüssigkeitsleitung zu unterkühlen. Das aus dem Wärmeübertrager austretende verdampfte Kältemittel wird danach dem Mitteldruckniveau zugeleitet und dient dort der Abkühlung des vorverdichteten Kältemittels, siehe Abbildung 5.8.

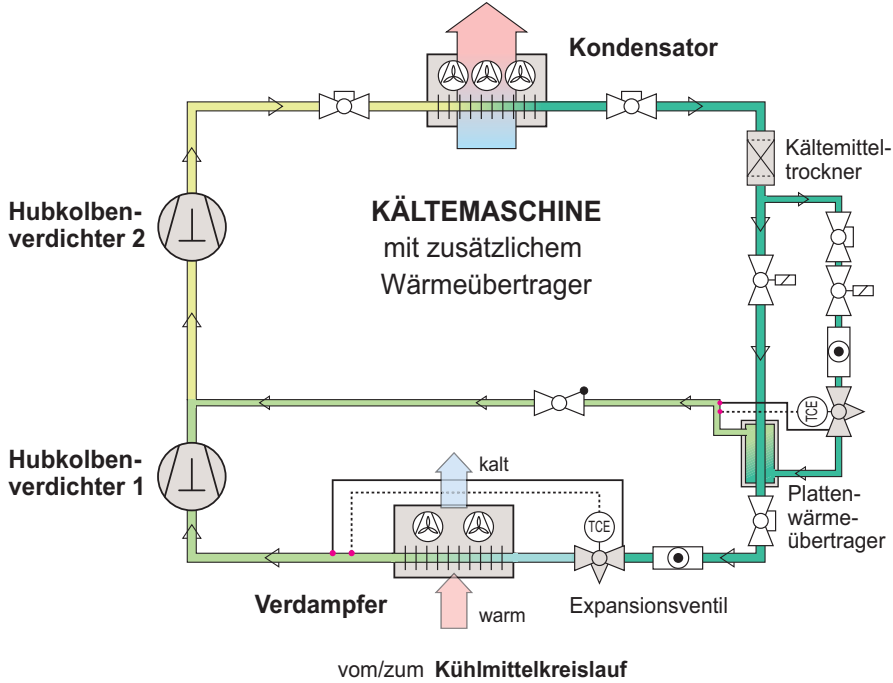


Abbildung 5.8 Booster-Kältemaschine mit zusätzlicher Unterkuhlung der Flüssigkeitsleitung, Zeichenerklärung siehe Abbildung 5.6

5.3.6 Freie Kühlung/Winterentlastung

Kältemaschinen benötigen für den Antrieb der Verdichter elektrischen Strom, was mit Kosten und Umweltbelastungen verbunden ist.

Bei ganzjährig arbeitenden Flüssigkeitskühlern ist eine interessante Maßnahme, die sog. *Freie Kühlung* oder *Winterentlastung*, zur Minderung des Energieverbrauchs möglich. Sie ist – sowohl ökologisch als auch ökonomisch – mancher Wärmerückgewinnung als Energiesparmaßnahme überlegen, weil sich damit die Betriebskosten einer Kälteanlage enorm senken lassen. Erreicht wird die Winterentlastung durch eine technische Anlagenkomponente, die *freie Kühlung* oder *Trockenkühlung* genannt wird.

5.3.6.1 Auslegung der Trockenkühler

Eine Wärmeabfuhr (= Kühlung), bei der ein Kältemittelverdichter mitarbeitet, nennt man „aktive Kühlung“. Erfolgt die Wärmeabfuhr direkt, weil eine ausreichende Temperaturdifferenz ΔT zur Umgebung vorhanden ist, dann spricht man von „passiver Kühlung“.

Nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik strömt Wärme immer vom höheren zum niedrigeren Temperaturpotenzial (siehe Kapitel 1.14). Das gilt auch für das zu kühlende Wasser aus der Produktion, das „Kaltwasser“. Voraussetzung für die Energieeinsparung durch die Winterentlastung ist also eine Lufttemperatur, die niedriger ist als die des zu kühlenden Kaltwassers. Führt man das Kaltwasser durch einen großflächigen Lamellenwärmeübertrager zur Übertragung von Wärme zwischen dem Kaltwasser und der Umgebungsluft, so stellt sich ein Wärmestrom in Richtung der Luft ein (wenn diese eine niedrigere Temperatur als das Wasser hat). Dieser Wärmestrom verursacht die Kühlwirkung, d. h., dadurch wird das Kaltwasser gekühlt. Der Betrieb des Kältekompressors ist dafür nicht mehr erforderlich. Die Antriebsenergie des Kompressors wird somit eingespart.

Mit steigender Temperaturdifferenz ΔT zwischen dem zu kühlenden Wasser und der Luft erhöht sich die Kälteleistung \dot{Q}_0 eines Trockenkühlers.

Umgekehrt gilt: Geht die Temperaturdifferenz gegen null, so sinkt auch die Kälteleistung gegen null. Der Trockenkühler ist also in seiner Wirkung von der Lufttemperatur abhängig. Bei der Konstruktion und Auslegung ist deshalb äußerste Sorgfalt erforderlich. Die dafür erforderlichen meteorologischen Daten des Aufstellungsorts können entsprechenden Tabellenwerken entnommen werden, beispielsweise der DIN 4710 „Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumlufttechnischen Anlagen in Deutschland“ oder den Statistiken der lokalen Wetterämter.

Technischer Aufbau des Trockenkühlers

Ein Trockenkühler besteht aus einem Wärmeübertrager-Rohrbündel, das von Luft durchströmt wird. Um die Kühloberfläche (A) des aus Kupfer bestehenden Wärmeübertrager – und somit auch die Kälteleistung – zu erhöhen, sind Aluminiumlamellen aufgespresst. Der Luftstrom wird durch einen oder mehrere elektrisch angetriebene Ventilatoren (Lüfter) erzeugt (siehe Abbildung 5.9).

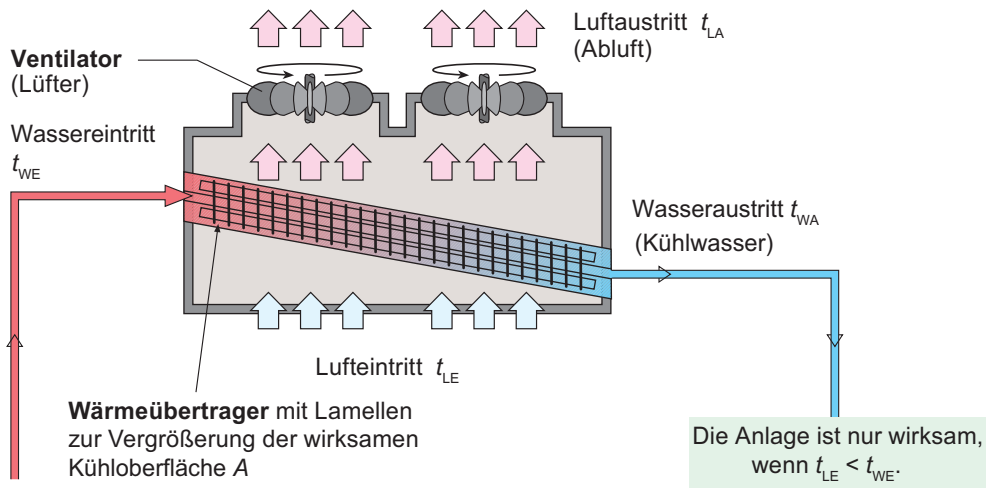


Abbildung 5.9 Das Prinzip der freien Kühlung (Trockenkühler)