

## 2 Verdichterkältemaschinen

Verdichterkältemaschinen zählen zu den Kaldampfmaschinen. Sie nutzen den Phasenwechsel flüssig – gasförmig. Anstatt Verdichterkältemaschine ist auch die Bezeichnung Kompressionskältemaschine gebräuchlich. Der Antrieb erfolgt mechanisch und in vielen Fällen über einen Elektromotor. Aufgrund der hohen Effizienz, der vergleichsweise einfachen Realisierbarkeit, der großen erreichbaren Leistungsdichte, der Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Temperaturbedingungen und hohen Betriebssicherheit haben Verdichterkältemaschinen mit Abstand die größte Verbreitung von allen Kältemaschinen gefunden.

### 2.1 Der ideale Vergleichsprozess für die Kältemaschine

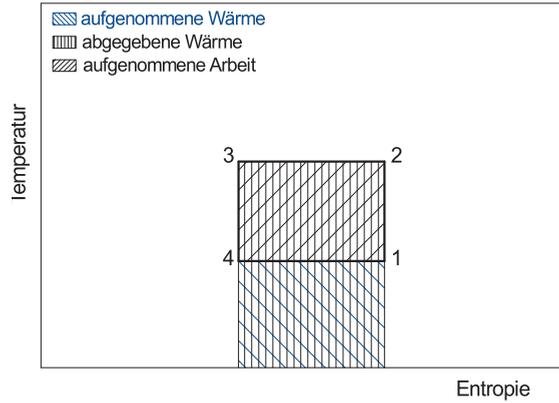
Der Carnot-Prozess wird als idealer Vergleichsprozess für eine durch Arbeitsaufnahme angetriebene Kältemaschine verwendet.<sup>1)</sup>

Der Carnot-Prozess besteht aus vier Zustandsänderungen, die nacheinander durchlaufen werden:

- 1 nach 2: isentrope (konstante Entropie = reversibel und adiabat, d. h. verlustfrei umkehrbar und wärmedicht) Verdichtung
- 2 nach 3: isotherme (konstante Temperatur) Wärmeabgabe
- 3 nach 4: isentrope Entspannung
- 4 nach 1: isotherme Wärmeaufnahme

Der Prozess ist im  $T,s$ -Diagramm, Bild 2.1, dargestellt. Die Entropie kann als eine Hilfsgröße aufgefasst werden (s. Anhang A1). Eine positive Entropiedifferenz zwischen Endzustand und Anfangszustand multipliziert mit der vorliegenden absoluten Temperatur ergeben die dem Prozess zugeführte Wärme. Entsprechend ergeben negative Entropiedifferenzen eine abzuführende Wärme. Die zu- oder abzuführende Wärme ist somit als Fläche dem  $T,s$ -Diagramm zu entnehmen. Werden die Beträge der beiden Flächen subtrahiert, ergibt sich eine von den einzelnen Zustandspunkten 1 bis 4 linksläufig umschlossene Fläche, deren Größe die vom Prozess aufgenommene Arbeit charakterisiert.

<sup>1)</sup> Nachfolgend wird keine begriffliche Unterscheidung zwischen der Kältemaschine und der Wärmepumpe vorgenommen, da kein prinzipieller Unterschied besteht, sondern nur die Wärmeströme unterschiedlich genutzt werden.

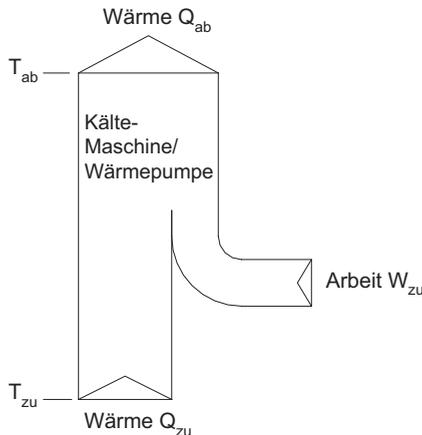


**Bild 2.1:** Idealer Vergleichsprozess der Kältemaschine im T,s-Diagramm

In der Kältetechnik bzw. in der Wärmepumpentechnik wird zumeist mit Energiebeträgen gerechnet und die Wirkrichtungen durch das Vorzeichen in den Bilanzgleichungen berücksichtigt. Die allgemeine Konvention ist, dass die einem Bilanzgebiet zugeführten Dinge ein positives und die abgeführten ein negatives Vorzeichen erhalten. Entsprechend Bild 2.1 ergibt sich folglich die Energiebilanz

$$Q_{ab} = W_{zu} + Q_{zu} \quad (2.1)$$

Im folgenden Energieflussdiagramm (Sankey-Diagramm), Bild 2.2, ist dieser Zusammenhang veranschaulicht.



**Bild 2.2:** Energieflussdiagramm des Kältemaschinenprozesses

Bei einem stationären Betrieb kann die Energiebilanz mit den Leistungen formuliert werden:

$$\dot{Q}_{ab} = P_{zu} + \dot{Q}_{zu} \quad (2.2)$$

Effizienzkenngröße für die Nutzung als Kältemaschine:

$$\varepsilon_{K,Carnot} = \frac{\dot{Q}_{zu}}{P_{zu}} = \frac{Q_{zu}}{W_{zu}} = \frac{Q_{zu}}{Q_{ab} - Q_{zu}} = \frac{m \cdot \Delta s \cdot T_1}{m \cdot \Delta s \cdot (T_2 - T_1)} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} \quad (2.3)$$

Diese Effizienzkenngröße hängt somit nur von den Temperaturen ab. Sie wird als Carnot-Kälteleistungszahl bezeichnet. Im englischen Sprachgebrauch wird im Allgemeinen für die Leistungszahl die Bezeichnung *COP* (engl. Coefficient Of Performance) verwendet. In die Normung wurde die Bezeichnung *EER* (engl. Energy Efficiency Ratio) eingeführt.

Effizienzkenngröße für die Nutzung als Wärmepumpe:

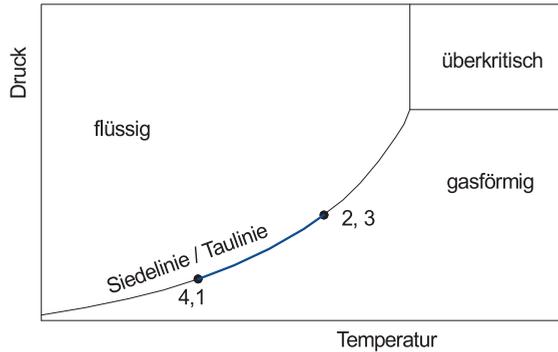
$$\varepsilon_{WP,Carnot} = \frac{\dot{Q}_{ab}}{P_{zu}} = \frac{Q_{ab}}{W_{zu}} = \frac{Q_{ab}}{Q_{ab} - Q_{zu}} = \frac{m \cdot \Delta s \cdot T_2}{m \cdot \Delta s \cdot (T_2 - T_1)} = \frac{T_2}{T_2 - T_1} \quad (2.4)$$

Die Effizienz hängt ebenfalls nur von den Temperaturen ab. Sie wird als Carnot-Heizleistungszahl (auch Carnot-Heizzahl oder Carnot-Leistungszahl der Wärmepumpe) bezeichnet. In der Normung wurde die Bezeichnung *COP* zur Unterscheidung zum *EER* eingeführt.

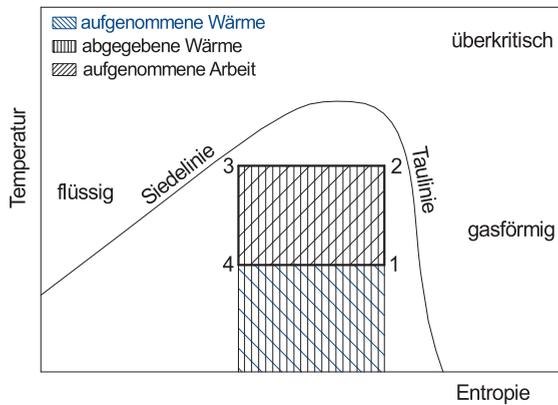
Ferner ergibt sich der Zusammenhang:

$$\varepsilon_{WP,Carnot} = \frac{Q_{ab}}{W_{zu}} = \frac{W_{zu} + Q_{zu}}{W_{zu}} = 1 + \frac{Q_{zu}}{Q_{ab} - Q_{zu}} = 1 + \varepsilon_{K,Carnot} \quad (2.5)$$

Der Carnot-Prozess verlangt konstante Temperaturen bei der Wärmezufuhr und bei der Wärmeabfuhr. Konstante Temperaturen ergeben sich bei der Verdampfung und Kondensation eines reinen Stoffs (bzw. auch eines azeotropen Stoffgemischs) bei konstantem Druck, entsprechend des durch die Dampfdruckkurve gegebenen Zusammenhangs zwischen Dampfdruck und Temperatur. Damit besteht zumindest theoretisch die Möglichkeit, den Carnot-Prozess innerhalb des Nassdampfgebiets (s. Bilder 2.3 und 2.4) eines Stoffs ablaufen zu lassen. Damit liegen Phasenwechsel des Stoffs vor. Die Effizienz dieses Prozesses bleibt dabei theoretisch betrachtet unabhängig vom gewählten Stoff. Es ist auch unerheblich, wie groß die Entropieänderungen sind (d. h. die Breite des Prozesses im  $T,s$ -Diagramm) und wie nahe die Prozessgrenzen an der Siedelinie oder der Taulinie liegen.



**Bild 2.3:** Idealer Vergleichsprozess im p,t-Phasendiagramm



**Bild 2.4:** Idealer Vergleichsprozess der Kältemaschine innerhalb des Nassdampfgebiets des T,s-Diagramms

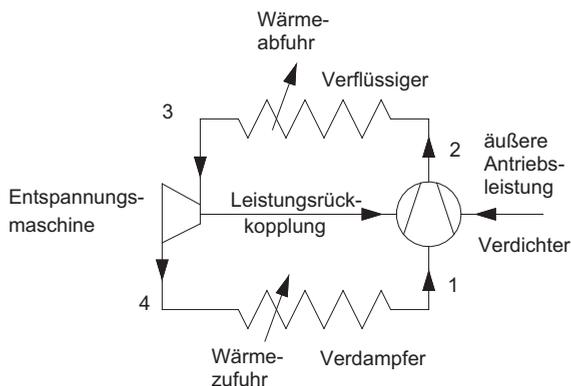
Die Realisierung des Prozesses könnte wie in Bild 2.5 dargestellt erfolgen. Es ist ein Verdichter notwendig, der reversibel und adiabat (= isentrop) ein Zweiphasengemisch verdichtet. Der Verdichter fördert im Weiteren den Stoff bei konstantem Druck in einen Verflüssiger, in dem sich zumindest ein Teil des Stoffs weiter verflüssigt. Anschließend wird der Stoff arbeitsleistend isentrop entspannt. Bei einer solchen Entspannung wird die im verdichteten Stoff enthaltene potenzielle Energie genutzt und in Arbeit umgewandelt, die innerhalb des Prozesses wiederum mit zum Antrieb des Verdichters genutzt wird. Damit ist die gesamte vom Verdichter aufgenommene Arbeit

$$W_V = W_{zu} + W_E \quad (2.6)$$

Von außen über die Systemgrenze muss daher nur die Arbeit des Carnot-Prozesses  $W_{zu}$  zugeführt werden.

Nach der Entspannung wird der Stoff aufgrund der Wärmezufuhr zumindest teilweise verdampft. Der Verdichter saugt den Stoff wieder an und der Prozessablauf schließt sich („Kreisprozess“).

Die Bezeichnung „Kreisprozess“ kann dahingehend interpretiert werden, dass der Stoff innerhalb des Systems entweder umlaufend oder periodisch abwechselnd bestimmte Zustände durchläuft. Die Masse des Stoffs im System ändert sich nicht, somit ist das System geschlossen (s. Anhang A1). Allgemein wird demnach für Carnot-Prozesse vorausgesetzt, dass die Prozesse geschlossen sind und die enthaltenen Stoffe nur insofern spezifiziert sind, dass eine isotherme Wärmeaufnahme und Wärmeabgabe sowie isentrope Zustandsänderungen möglich sein müssen. Die Phasenänderungen Verdampfen und Verflüssigen ermöglichen in technisch einfacher Umsetzung die isothermen Zustandsänderungen. Erfährt der Stoff hingegen keine Phasenänderung, der Stoff bleibt beispielsweise gasförmig, müssen mit geeigneten Prozessführungen dennoch isotherme Zustandsänderungen herbeigeführt werden, wenn die nach dem Carnot-Prozess maximal mögliche Effizienz erreicht werden soll. So liegt beispielsweise der in Kapitel 7 angegebene Stirling-Prozess manchen Kaltgasmaschinen zugrunde. Die technische Realisierung solcher Maschinen ist vergleichsweise aufwendig.



**Bild 2.5:** Schematischer Aufbau einer Carnot-Kältemaschine

## 2.2 Prozesse mit Verdichtung im Gasgebiet und isenthalper Entspannung

Aus den folgenden beiden Gründen sind Änderungen des Prozessablaufs gegenüber dem Carnot-Prozess zweckmäßig:

1. Verdichter, die im Nassdampfgebiet arbeiten, laufen Gefahr, durch Ansammlung von (inkompressibler) Flüssigkeit in den Verdichtungsräumen Schaden zu nehmen (sogenannte Flüssigkeitsschläge).

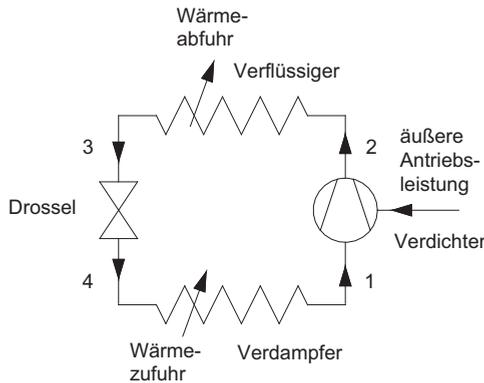
## 2 Verdichterkältemaschinen

2. Die Entspannung mittels Maschinen sowie die Leistungsrückführung zum Verdichter sind aufwendig.

Es werden daher eine Verdichtung außerhalb des Nassdampfgebiets im Gasgebiet und eine Entspannung mittels Drosselung vorgesehen.

Vergleichsrechnungen zeigen, dass die mögliche Arbeitsleistung bei der Entspannung für den bei Kältemaschinen und Wärmepumpen üblichen Nutz-Temperaturbereich von etwa  $-50^{\circ}\text{C}$  bis  $+50^{\circ}\text{C}$  und üblichen Kältemitteln nur etwa 10% der aufzubringenden Verdichterantriebsleistung beträgt. Die Druckreduzierung mittels einer einfachen Drosselung führt daher zu einer in vielen Fällen hinnehmbaren Abnahme der Effizienz. Sie ist kostengünstig zu realisieren und bietet zudem aufgrund der Unabhängigkeit des Betriebs von dem Verdichter (keine Leistungsrückführung erforderlich) die Möglichkeit, regelnd auf den Massenstrom im Prozess einwirken zu können. Es sei hier angemerkt, dass bei großen Anlagen gelegentlich Entspannungsmaschinen eingesetzt werden. Auch bei der Verwendung des Kältemittels Kohlendioxid werden Systeme zur arbeitsleistenden Entspannung vorgeschlagen, da durch eine solche Maßnahme eine Effizienzsteigerung erwartet werden kann, die dieses Kältemittel in manchen Anwendungen erst konkurrenzfähig machen würde (s. Kapitel 2.8). Die Arbeitsleistung muss außerdem nicht unbedingt mit einer Maschine (d. h. mechanisch bewegten Komponenten) erfolgen. Auch die Nutzung des Druckgefälles beispielsweise mittels Ejektoren ist möglich und wird heute auch verwirklicht (s. Kapitel 4).

Das Schema der Kältemaschine mit Drossel als Entspannungsorgan ist in Bild 2.6 dargestellt.



**Bild 2.6:** Schematischer Aufbau einer einstufigen Verdichterkältemaschine

Bei einer Drosselung (s. Bild 2.7) wird über die Systemgrenze keine Arbeit nach außen abgegeben. Die Arbeitsleistung verbleibt im System. Ist die Drosselstelle thermisch isoliert (= wärme-gedämmt), ergibt sich mit dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik (s. Anhang A1):

$$U_{3 \rightarrow 4} = W_{3 \rightarrow 4} + Q_{3 \rightarrow 4} \quad (2.7)$$

### 3 Absorptionskältemaschinen und Adsorptionskältemaschinen

Als übergeordnete Bezeichnung für Absorptions- und Adsorptionskältemaschinen wurde der Begriff Sorptionskältemaschinen eingeführt [11]. Zur Sorption zählt beispielsweise auch die Chemisorption, die beispielsweise bei Metallhydrid-Kältemaschinen zur Anwendung kommen kann. Im Folgenden wird jedoch einschränkend der Begriff Sorption als übergeordneter Begriff für die Absorption und für die Adsorption verwendet. Als problematisch wird gelegentlich der Begriff *Sorption* in Verbindung mit dem Begriff *Kältemaschine* angesehen, da zur Verwirklichung der Prozesse nicht unbedingt mechanisch bewegte Komponenten, d. h. „Maschinen“, notwendig sind.

Absorptions- und Adsorptionskältemaschinen sind Kaltdampfmaschinen. Die Kälteerzeugung erfolgt durch den Phasenwechsel flüssig zu gasförmig. Das Absaugen des verdampften Kältemittels und die Druckerhöhung erfolgt bei Sorptionskältemaschinen nicht wie bei der Verdichterkältemaschine durch einen Verdichter, dem mechanische Energie zugeführt werden muss: Bei Absorptions- und Adsorptionskältemaschinen wird mindestens ein weiterer Stoff, das Sorptionsmittel bzw. Sorbens, eingesetzt, der die Aufgabe des Absaugens des Kältemittels aus dem Verdampfer übernimmt. Das Sorptionsmittel ist bei Adsorptionskältemaschinen ein Feststoff und bei Absorptionskältemaschinen eine Flüssigkeit. Das nach der Kälteerzeugung verdampfte gasförmige Kältemittel, auch als Sorptiv bezeichnet (s. auch Kapitel 3.11.1), und das Sorptionsmittel üben Anziehungskräfte aufeinander aus (Affinität). Diese Kräfte bewirken, dass das Kältemittel an der Phasengrenze des Sorptionsmittels kondensiert und aufgrund physikalischer Kräfte mehr oder weniger stark gebunden werden kann. Diese Bindungskräfte bewirken, dass gegenüber dem Dampfdruckzustand des Kältemittels die Kondensation bei höheren Temperaturen bzw. auch bei niedrigeren Dampfdrücken stattfindet. In Sorptionskältemaschinen findet die Sorption üblicherweise bei etwa dem gleichen Druck statt, bei dem auch die Verdampfung des Kältemittels im Verdampfer erfolgt. Infolgedessen findet die mit der Sorption einhergehende Kondensation des Kältemittels bei höheren Temperaturen als die Verdampfungstemperatur im Verdampfer statt. Die Umwandlung von der Dampfphase zur Flüssigphase geht zudem mit einer deutlichen Reduzierung des spezifischen Volumens des Kältemittels um etwa 2 bis 5 Größenordnungen einher (abhängig vom Kältemittel und Verdampfungsdruck). Dies bewirkt, dass das Kältemittel vom Sorptionsmittel fortlaufend „angesaugt“ und somit der Verdampfungsvorgang im Verdampfer aufrechterhalten wird. Dieses Ansaugen des Kältemittels ist mit dem Saugvorgang eines Kältemittelverdichters vergleichbar. Das Sorptionsmittel kann nur in begrenztem Umfang Kältemittel aufnehmen: Ist die Sättigung erreicht, kann das Kältemittel-Sorptionsmittel-Gemisch entweder entsorgt oder stofflich regeneriert werden. Sind das Sorptionsmittel und das Kältemittel eine chemische Bindung eingegangen, kann die Entsorgung zweckmäßig sein. Sind die Bindungskräfte zwischen Sorptionsmittel und Kältemittel hingegen schwach, weil sie auf physikalischen Kräften beruhen, ist eine stoffliche Regeneration mit physikalischen Verfahren möglich. Bei Sorptionskältemaschinen erfolgt die stoffliche Regeneration meist durch eine thermische Stofftrennung: Durch Wärmezufuhr wird bei hoher Temperatur das Kältemittel wieder aus dem Lösungsmittel ausgetrieben, d. h. ausgedampft. Dieser Vorgang heißt Desorption (bei der Chemisorption heißt das Austreiben Exsorption). Der Antrieb der Sorptionskältemaschinen erfolgt demnach im Wesentlichen mit thermischer Energie.

Bei festen Sorptionsmitteln erfolgen die Adsorption oder die Absorption sowie die Desorption ortsfest beispielsweise in einem Behälter und somit zeitlich periodisch (periodische Sorptionskältemaschine). Bei flüssigen bzw. fließfähigen Sorptionsmitteln ist hingegen ein kontinuierlicher Umlauf des Sorptionsmittels möglich, sodass jeweils die Sorption und die Desorption an räumlich unterschiedlichen Orten stattfinden können.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Adsorption bzw. die Absorption dazu benötigt wird, um Kältemitteldampf zu entfernen, sodass flüssiges Kältemittel bei einer gewünschten Temperatur verdampfen kann. Der thermische Antrieb ist nur dann notwendig, wenn auch eine stoffliche Regenerierung des Gemischs aus Kältemittel und Sorptionsmittel gewünscht wird.

Sorptionsvorgänge kommen häufig in der Natur vor und die sich dabei abspielenden thermischen Effekte wurden bereits früh beobachtet.

Die Temperaturerhöhung von porösen Mineralien, wie Zeolith („kochender Stein“, abgeleitet aus dem Griechischen) bei der Aufnahme von Wasser ist seit Langem bekannt. Tatsächlich wird heute für **Adsorptionskältemaschinen** das Stoffpaar Wasser-Zeolith (an erster Stelle wird das Kältemittel genannt und an zweiter Stelle das Lösungsmittel bzw. das Sorbens) eingesetzt. Ein anderes häufig verwendetes Stoffpaar ist Wasser-Silikagel.

Auch die Mischung von Wasser mit beispielsweise schwefliger Säure führt zu einer Temperaturerhöhung. Alle flüssigen Stoffpaare, die sich in der Flüssigphase zumindest in gewissen Verhältnissen homogen mischen lassen, haben eine Affinität zueinander und können als Kälte-/Lösungsmittel-Paar infrage kommen. Beim Mischen von homogen mischbaren Stoffen wird die sogenannte „Lösungswärme“ freigesetzt. Homogene Mischungen sind durch ihr klares Aussehen gekennzeichnet. Beispiele sind Wasser-Salzlösungen, Wasser-Schwefelsäure, Wasser-Natronlauge, Ammoniak-Wasser, Benzin-Mineralöl und Alkohol-Wasser usw. Hingegen ergibt die Mischung aus Wasser und beispielsweise Mineralöl eine milchig aussehende Mischung. Die Affinität dieser beiden Stoffe zueinander ist gering und dieses Stoffpaar kann nicht für Sorptionskältemaschine Verwendung finden. Es haben sich bisher bei **Absorptionskältemaschinen** nur die beiden Stoffpaare Wasser-Lithiumbromid (eine wässrige Salzlösung) und Ammoniak-Wasser bewährt und auch weitgehend durchgesetzt.

Die Wärmeabgabe der Sorptionskältemaschinen, die zu einem bei der Sorption des verdampften Kältemittels und zum anderen bei Maschinen mit regenerativer Trennung des Kältemittels und des Sorbens durch eine Verflüssigung des Kältemittels entsteht, lässt sich für Wärmepumpen zwecke nutzen. (Die Bezeichnung Sorptionskältemaschine schließt Wärmepumpenanwendungen mit ein.)

Der Einsatz von Sorptionskältemaschinen wird heute vor allem dann erwogen, wenn thermische Energie zum Antrieb kostengünstig zur Verfügung steht. Von besonderem Interesse sind hier die Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) und die sogenannte solare Klimatisierung. Auch wenn ein geräuscharmer Betrieb gefordert ist, z. B. für Hotelzimmer und Campingfahrzeuge, sind Sorptionskältemaschinen, die völlig ohne mechanischen Antrieb auskommen können, von Interesse. In den Sommermonaten kann es aufgrund des hohen Leistungsbedarfs für Raumklimageräte Engpässe bei der elektrischen Energieversorgung geben. Thermisch angetriebene Verfahren können hier eine Entlastung bringen. Falls Erdgas zum Antrieb zur Verfügung steht, konkurrieren Sorptionskältemaschinen und Sorptionswärmepumpe mit Systemen, die mit thermischen Kraftmaschinen oder Brennstoffzellen angetrieben werden.

Bekannt wurde die Absorptionskältemaschine 1850 durch die Brüder Carré. Zu dieser Zeit hatten Sorptionskältemaschinen gegenüber den Verdichterkältemaschinen den Vorteil, dass keine teuren und unzuverlässigen Verdichter eingesetzt werden mussten. Auch die Bereitstellung von mechanischer Antriebsenergie war zu dieser Zeit im Vergleich zur Bereitstellung von thermischer Antriebsenergie sehr aufwendig, ineffizient und somit teuer. Die fachliche Durchdringung und viele Neuerungen gehen auf die Arbeiten von E. Altenkirch anfangs des 20. Jahrhunderts zurück [1]. W. Niebergall hat die wesentlichen Erkenntnisse in den 1950er-Jahren zusammengetragen und durch eigene Arbeiten ergänzt [11]. Absorptionskältemaschinen ohne mechanischen Antrieb und mit druckausgleichendem Gas wurden von B. v. Platen und C. Munters in den 1920er-Jahren entwickelt und zur Serienreife gebracht. Weniger bekannt ist, dass A. Einstein und L. Szilard von den 1920er-Jahren bis Anfang der 1930er-Jahre (in Berlin, vor ihrer Emigration in die USA) Absorptionskältemaschinen entwickelten. Die Arbeiten führten zu Patenten, die vermarktet wurden, sowie neuen Konzepten von Flüssigkeitspumpen, die heute vielfach eingesetzt werden. Die von A. Einstein und L. Szilard vorgeschlagenen Absorptionskältemaschinen werden thermodynamisch und technisch als anspruchsvoll eingeschätzt, da zwei und auch mehr als zwei phasenwechselnde Stoffe verwendet werden. Über Realisierungen ist bisher wenig bekannt geworden.

Zu beachten sind die in Kapitel 3.11.1 definierten Begriffe. Es hat sich im Zusammenhang mit der Absorptionskältemaschine eingebürgert, die Mischung aus Kältemittel und Lösungsmittel als Lösung zu bezeichnen. Der Begriff Konzentration wird für Massenanteile und nicht wie thermodynamisch üblich für volumenbezogene Größen verwendet [68].

## 3.1 Kontinuierliche Absorptionskältemaschinen

Die Apparate und Rohrleitungen der kontinuierlichen Absorptionskältemaschine werden von Kältemittel und Lösungsmittel ohne Umkehrung der Strömungsrichtung durchströmt.

### 3.1.1 Stoffpaare

Heute werden im Wesentlichen nur die beiden Arbeitsstoffpaare verwendet:

- Wasser und wässrige Lithiumbromidlösung (abgekürzt Wasser-Lithiumbromid,  $\text{H}_2\text{O}$ -LiBr) für den Klimatisierungs-Temperaturbereich und die Bereitstellung von Kaltwasser,
- Ammoniak-Wasser ( $\text{NH}_3$ - $\text{H}_2\text{O}$ ) im Nutz-Temperaturbereich von  $-80^\circ\text{C}$  bis etwa  $+80^\circ\text{C}$  (auch Wärmepumpen).

In beiden Fällen handelt es sich um Absorptionskältemaschinen, d. h., die Absorption des Kältemittels durch das Lösungsmittel findet in der flüssigen Phase statt. Die Verwendbarkeit dieser beiden Stoffpaare ist jeweils beschränkt:

- Wasser gefriert bei  $0^\circ\text{C}$ . Bei einer Verdampfungstemperatur von  $5^\circ\text{C}$  beträgt der Dampfdruck von Wasser lediglich  $p_d = 8,7$  mbar.
- Ammoniak ist brennbar und giftig, die Anwendungsmöglichkeiten sind füllmengenabhängig reglementiert.

Eine weitere Beschränkung ergibt sich aus der Stabilität der Stoffe:

- Die Korrosivität von Wasser-Lithiumbromid nimmt mit zunehmender Temperatur zu.
- Ammoniak kann sich bei einer Temperatur von oberhalb 200 °C zersetzen.

Es werden daher für beide Stoffpaare Prozesstemperaturen von höchstens 180 °C angestrebt. Aufgrund dieser Temperaturbeschränkung sind sowohl das Effizienzpotenzial als auch die Nutzbarkeit als Hochtemperaturwärmepumpe beschränkt.

Es gab zahlreiche Untersuchungen von weiteren Stoffpaaren für die Absorptionskältetechnik. Dass diese Bemühungen bisher erfolglos blieben, liegt vor allem an den grundsätzlichen energetischen und anlagentechnischen Beschränkungen der Sorptionskältemaschinen, weshalb sie nicht so vielfältig einsetzbar sind wie mechanisch bzw. elektrisch angetriebene Kältemaschinen. Diese Beschränkungen führen darüber hinaus dazu, dass die Stoffpaare hinsichtlich der erreichbaren Wärmeverhältnisse kritisch bewertet werden müssen. Die Wärmeverhältnisse hängen von den realisierbaren Konzentrationsbereichen der homogenen Kältemittel-Lösungsmittel-Mischung, der Wärmeübertragungseigenschaften, dem Abstand der Dampfdrücke des Kälte- und des Lösungsmittels zueinander sowie der Viskosität des flüssigen Kältemittel-Lösungsmittel-Gemischs ab. Des Weiteren hängt die Akzeptanz auch von der möglichen Toxizität, Brennbarkeit und Korrosivität, den Umwelteigenschaften und nicht zuletzt von der Verfügbarkeit und dem Preis ab. Als alternative *Kältemittel* wurden die auch in Verdichterkältemaschinen eingesetzten Kältemittel, Amine und Alkohole vorgeschlagen. Als alternative *Lösungsmittel* wurden Säuren, Laugen, Kohlenwasserstoffe, Glykole und ionische Flüssigkeiten vorgeschlagen.

Da diese Alternativen bisher keine Verbreitung gefunden haben, werden sie im Folgenden nicht weiter berücksichtigt.

#### 3.1.2 Standardschaltung der kontinuierlichen Absorptionskältemaschine

In Bild 3.1 ist das Prozessschema einer einstufigen kontinuierlichen Absorptionskältemaschine dargestellt und die Apparate bezeichnet. Dieses Prozessschema wird auch als Grundschialtung oder als Standardschaltung bezeichnet. Die Anordnung der Apparate in einem  $p,t$ -Feld soll der Veranschaulichung dienen. Die Darstellung des Prozessablaufs im  $h,\xi$ -Diagramm wird in Kapitel 3.2.3 erläutert.

Diese Standardschaltung ist die Basis der Schaltung für das Stoffpaar  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ . Bei Kältemitteln mit niedrigen Verdampfungsdrücken und folglich niedrigen Dampfdrücken kann kein Flüssigkeitsnachkühler realisiert werden, er entfällt. Dies trifft für das Stoffpaar  $\text{H}_2\text{O-LiBr}$  zu (s. Kapitel 3.2.5).



### 3.1.3 Funktionsbeschreibung

#### Kocher

Im Kocher (eine andere Bezeichnung ist Austreiber) wird durch die Zufuhr von thermischer Energie auf hohem Temperaturniveau, die durch das Heizmedium bereitgestellt wird, dampfförmiges Kältemittel aus der flüssigen Lösung ausgetrieben. Fortlaufend wird dem Austreiber eine an Kältemittel reiche Lösung, die im Absorber gebildet wird, zugeführt. In der im Austreiber siedenden Lösung ist eine vertikal nach oben hin abnehmende Temperatur erwünscht. Im oberen Bereich, wo der Kältemitteldampf aus dem Austreiber austritt, soll die Temperatur etwa der Temperatur der hier eintretenden reichen Lösung entsprechen. Damit können die bei einer Mischung von Stoffströmen mit unterschiedlicher Temperatur einhergehenden energetischen Verluste gering gehalten werden. Im unteren Bereich sollte die Temperatur hoch sein, damit möglichst viel Kältemittel aus der Lösung ausgetrieben werden kann. Hier ist entsprechend auch der Heizwärmestrom zuzuführen.

Aufgrund des Mischungsverhaltens von Kältemittel und Lösungsmittel kann nur ein Teil des Kältemittels aus der Lösung ausdampfen. Falls Salzlösungen, wie beispielsweise  $\text{H}_2\text{O}$ -LiBr, verwendet werden, muss darauf geachtet werden, dass das Lösungsmittel noch ausreichend Kältemittel enthält, damit es nicht zu einem Auskristallisieren von Salz kommen kann (vor allem beim späteren Abkühlen der an Kältemittel armen Lösung). Die nach der Ausdampfung des Kältemittels zurückbleibende, an Kältemittel arme Lösung wird dem Absorber zugeführt.

Bei Stoffpaaren mit nahe beieinanderliegenden Dampfdruckkurven, wie es bei  $\text{NH}_3$ - $\text{H}_2\text{O}$  der Fall ist, befindet sich in dem den Kocher verlassenden Kältemitteldampf ( $\text{NH}_3$ ) auch Lösungsmittel ( $\text{H}_2\text{O}$ ), und zwar umso mehr, je höher die Temperatur im oberen Bereich des Kochers ist. Dies hat Nachteile auf die Effizienz und das Betriebsverhalten. In Kapitel 3.2.4 und 3.3.2 sind die Möglichkeiten zur Vermeidung dieser Nachteile angegeben.

#### Abscheider

Das aus dem Kocher verdampfte Kältemittel strömt durch einen Abscheider, der verhindern soll, dass Tröpfchen aus der siedenden Lösung mitgerissen werden.

#### Verflüssiger

Das Kältemittel strömt vom Abscheider zum Verflüssiger und wird unter Wärmeabgabe verflüssigt sowie evtl. auch unterkühlt. Die Verflüssigungstemperatur bestimmt den Druck sowohl im Verflüssiger als auch im Austreiber.

#### Kältemittelentspannung

Das verflüssigte Kältemittel wird auf Verdampfungsdruck entspannt, wozu die üblichen Drosselorgane wie Expansionsventile, Schwimmerventile, Kapillarrohre o. Ä. verwendet werden. Bei Wasser als Kältemittel beträgt die Druckdifferenz zwischen Verflüssiger und Verdampfer weniger als 0,1 bar, sodass einfache Strömungswiderstände in der Leitung (Rohrverengungen etc.) und/oder die Überwindung von Höhendifferenzen zur Entspannung ausreichend sein können.

#### Verdampfer

Im Verdampfer verdampft das Kältemittel durch Wärmezufuhr von außen, d. h. aufgrund der hier stattfindenden Kälterzeugung. Falls das Kältemittel keine größeren Anteile an Lösungs-

mittel enthält (z. B. Stoffpaar Wasser-Lithiumbromid), können eine vollständige Verdampfung sowie auch eine Überhitzung des Kältemittels erfolgen. Wird bei dem Stoffpaar Ammoniak-Wasser keine Aufkonzentrierung des Kältemittels nach dem Austreiber vorgesehen, ist damit zu rechnen, dass zum Ende der Verdampfung noch flüssiges Kältemittel-Lösungsmittel-Gemisch vorhanden ist. Es muss dafür gesorgt werden, dass diese Flüssigkeit aus dem Verdampfer ausströmen kann (beispielsweise mittels der räumlichen Anordnung des Ablaufs und der Apparate zueinander).

Es können zusätzliche Pumpen zur Beaufschlagung der Wärmeübertragerflächen mit flüssigem Kältemittel vorgesehen werden, damit der Wärmeübergang verbessert wird.

### **Absorber**

Der Druck im Absorber entspricht etwa dem Verdampfungsdruck. Das verdampfte Kältemittel wird im Absorber mit der an Kältemittel armen Lösung, die im Austreiber gebildet wird, gemischt. Durch den Mischungsvorgang, welcher beispielsweise durch ein Versprühen der armen Lösung begünstigt wird, entstehen große Phasengrenzflächen zwischen der flüssigen Lösung und dem Kältemitteldampf. Zum Versprühen kann der Druckunterschied der armen Lösung zwischen dem Austreiber und dem Absorber genutzt werden. Bei großen Anlagen werden zusätzliche Pumpen für den Lösungsumlauf vorgesehen. Das Versprühen begünstigt den Absorptionsvorgang und somit das Absaugen des Kältemittels aus dem Verdampfer. Je niedriger die Temperatur des Absorbers ist, umso mehr Kältemittel kann die Lösung aufnehmen. Üblicherweise wird die Absorbentemperatur ähnlich hoch wie die Verflüssigungstemperatur gewählt.

### **Lösungsventil**

Die aus dem Kocher zum Absorber strömende an Kältemittel arme Lösung muss auf den Druck im Absorber entspannt werden, wozu ein Lösungsventil (oder ein ähnliche Entspannungsorgan wie bei der Kältemittelentspannung) Verwendung findet.

### **Lösungspumpe**

Die an Kältemittel reiche Lösung wird mittels einer Lösungspumpe wieder auf den Druck des Austreibers gebracht. Bei kleinen Druckdifferenzen zwischen dem Verflüssiger und dem Verdampfer kann eine Dampfblasenpumpe (Diffusionspumpe) ausreichend sein.

### **Temperaturwechsler**

Zwischen Absorber und Austreiber ist ein als Temperaturwechsler bezeichneter Gegenstromwärmeübertrager geschaltet. Mit diesem Wärmeübertrager wird die kühle aus dem Absorber tretende an Kältemittel reiche Lösung im Gegenstrom mit der heißen aus dem Austreiber kommenden an Kältemittel armen Lösung vorgewärmt. Damit gelingt eine erhebliche Einsparung an Heizwärmezufuhr, da es der energetisch günstigste Fall ist, wenn die im Austreiber zugeführte Wärme nur zum Ausdampfen des Kältemittels aus der reichen Lösung und nicht auch zu deren Erwärmung benötigt wird. Außerdem sinken entsprechend der Vorwärmung der reichen Lösung im Temperaturwechsler die Temperatur der armen Lösung und somit auch der Kühlleistungsbedarf des Absorbers. Alle bekannten kontinuierlichen Absorptionskältemaschinen sind mit einem Temperaturwechsler ausgestattet.

#### **Flüssigkeitsnachkühler (kurz: Nachkühler)**

Nach dem Verdampfer kann ein sogenannter Flüssigkeitsnachkühler angeordnet sein (s. Bild 3.1). Er dient der weiteren Kühlung des verflüssigten Kältemittels vor der Entspannung, wodurch sich die Verdampfungsenthalpie vergrößert. Im Gegenstrom wird dazu das noch kühle aus dem Verdampfer strömende Kältemittel genutzt.

Aus energetischer Sicht ist zumeist die Verwendung des Flüssigkeitsnachkühlers bei der  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ -Absorptionskältemaschine vorteilhaft. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass bei der Verdichterkältemaschine dieser als innerer Wärmeübertrager oder Sauggaserhitzer bezeichnete Wärmeübertrager eine Erhöhung der Sauggastemperatur des Verdichters bewirkt und somit die Verdichterantriebsleistung zur Verdichtung und Förderung eines gegebenen Kältemittelmassenstroms vergrößert. Der energetische Nutzen des Flüssigkeitsnachkühlers hängt von der molaren Masse des Kältemittels ab. Kältemittel mit einem Isentropenexponenten von etwa  $\kappa < 1,18$  sind günstig, weshalb Ammoniak mit einem Isentropenexponenten von näherungsweise  $\kappa = 1,3$  als ungünstig anzusehen ist (s. dazu Kapitel 2). Ferner führen große Isentropenexponenten zu hohen Verdichtungsendtemperaturen, weshalb bei Verdichterkältemaschinen mit Ammoniak als Kältemittel die Verwendung eines Flüssigkeitsnachkühlers unüblich ist. Bei Absorptionskältemaschinen wird hingegen nicht wie bei der Verdichterkältemaschine ein Sauggasvolumen durch mechanische Arbeitszufuhr angesaugt, verdichtet und ausgeschoben, weshalb sich hier auch kein mechanischer Mehraufwand für eine Verdichtung ergeben kann. Lediglich die abzuführende Wärme wird erhöht. Die Vergrößerung der Verdampfungsenthalpie mittels Flüssigkeitsnachkühler stellt daher einen energetischen Nutzen dar.

Zu beachten ist, dass auch nach dem Flüssigkeitsnachkühler das verdampfte Kältemittel noch eine flüssige Phase enthalten kann.

Bei sehr niedrigen Verdampfungsdrücken lässt sich ein Flüssigkeitsnachkühler technisch nicht realisieren und ist daher grundsätzlich bei Absorptionskältemaschinen mit Wasser als Kältemittel auch nicht vorhanden.

#### **„Thermischer Verdichter“**

Das Teilsystem, bestehend aus Austreiber, Temperaturwechsler, Lösungsventil und Absorber, wird gelegentlich auch als „Thermischer Verdichter“ bezeichnet: An den Schnittstellen zum restlichen System, bestehend aus Verflüssiger, Entspannungsorgan, Verdampfer und falls vorhanden Flüssigkeitsnachkühler, könnte auch ein mechanischer Verdichter eingebunden sein und den Kältemittelstrom aufrechterhalten.

## **3.2 Thermodynamische Grundlagen der Sorptionskältemaschinen**

### **3.2.1 Energiebilanz und thermodynamischer Vergleichsprozess**

Energetische Betrachtungen von Sorptionskältemaschinen umfassen im Wesentlichen die auftretenden Wärmeströme. Je nach Prozessausführung muss ein betragsmäßig relativ kleiner Teil

mechanische Energie zugeführt werden. Es gibt auch Sorptionskältemaschinen, die keinerlei Zufuhr von mechanischer Energie bedürfen.

Es mag verwundern, dass Sorptionskältemaschinen allgemein den thermischen Maschinen zugerechnet werden, auch wenn keine mechanischen Energieströme (Arbeit) über die Bilanzgrenze der Maschine zugeführt werden. Die zum Antrieb der Maschine aufgenommene thermische Energie wird jedoch teilweise maschinenintern in mechanische Arbeit umgewandelt, die der Arbeitsverrichtung eines mechanischen Verdichters entspricht.

Im Folgenden werden zeitlich unveränderliche Wärmeströme betrachtet, wie sie bei kontinuierlich arbeitenden Maschinen auftreten. Die Wärmeströme sind (s. Bild 3.1):

$\dot{Q}_H$	auch mit $\dot{Q}_K$ , $\dot{Q}_{zu}$ und $\dot{Q}_T$ bezeichneter Heizwärmestrom zur Trennung des Sorptionsmittels und des Kältemittels durch Verdampfung des Kältemittels aus der Lösung
$\dot{Q}_c$	Verflüssigungswärmestrom
$\dot{Q}_A$	Absorptionswärmestrom aufgrund Kondensation des Kältemittels und Mischung des Kältemittels mit dem Sorptionsmittel
$\dot{Q}_0$	Verdampfungswärmestrom

Die Summe aus  $\dot{Q}_c$  und  $\dot{Q}_A$  wird auch als  $\dot{Q}_{ab}$  bezeichnet.

Bei periodisch arbeitenden Sorptionskältemaschinen werden die zeitlich veränderlichen Wärmeströme über eine Zyklusdauer gemittelt.

Die Energiebilanz ergibt (im Folgenden wird *ausschließlich* mit den Beträgen gerechnet!):

$$\dot{Q}_H + \dot{Q}_0 = \dot{Q}_c + \dot{Q}_A \quad (3.1)$$

Die energetische Effizienzbewertung, welche allgemein das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand angibt, wird als Wärmeverhältnis  $\zeta$  bezeichnet. Für die Kältemaschine ist

$$\zeta = \frac{\dot{Q}_0}{\dot{Q}_H} \quad (3.2)$$

und für die Wärmepumpe

$$\zeta_{WP} = \frac{\dot{Q}_c + \dot{Q}_A}{\dot{Q}_H} \quad (3.3)$$

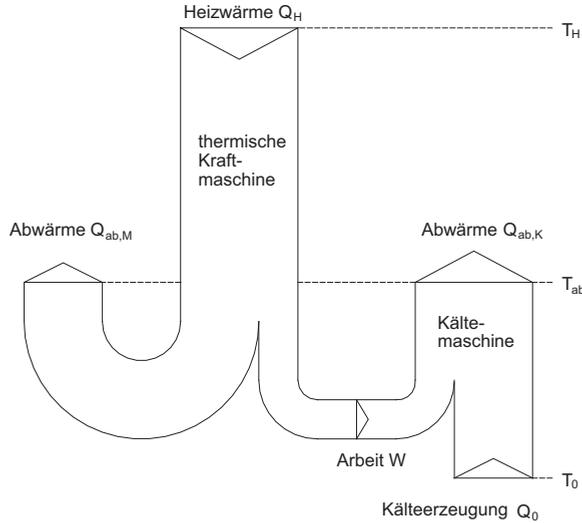
Mit Gleichung (3.1) ergibt sich

$$\zeta_{WP} = \frac{\dot{Q}_H + \dot{Q}_0}{\dot{Q}_H} = 1 + \zeta \quad (3.4)$$

### 3 Absorptionskältemaschinen und Adsorptionskältemaschinen

Diese Wärmeverhältnisse gelten allgemein für alle thermisch angetriebenen Kältemaschinen bzw. Wärmepumpen.

Aus thermodynamischer Sicht lässt sich die Sorptionskältemaschine als eine Verdichterkältemaschine („Arbeitsmaschine“), die von einer thermischen Kraftmaschine („Motor“) angetrieben wird, auffassen (s. Bild 3.2).



**Bild 3.2:** Modellvorstellung für die Sorptionskältemaschine: Kopplung einer thermischen Kraftmaschine mit einer Verdichterkältemaschine

Die Energieumwandlung einer thermischen Kraftmaschine ist den Gesetzmäßigkeiten unterworfen, die sich aus dem Ersten und Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik ergeben (s. Anhang A1). So kann bei der Sorptionskältemaschine maschinenintern nur dann die notwendige Antriebsarbeit  $W$  gewonnen werden, wenn die Heizenergie bei höherer Temperatur  $T_H$  zugeführt wird als die Temperatur  $T_{ab}$ , bei welcher der Prozess Wärme abgibt. Im thermodynamischen Idealfall unterliegt der thermische Antrieb den Begrenzungen des Carnot-Prozesses, für dessen thermischen Wirkungsgrad gilt:

$$\eta_{\text{Carnot}} = \frac{P}{\dot{Q}_H} = \frac{W}{Q_H} = \frac{T_H - T_{ab}}{T_H} \quad (3.5)$$

Innerhalb der Sorptionskältemaschine wird die gewonnene Arbeit  $W$  prozessintern genutzt, um Kälteleistung bei einer tiefen Temperatur  $T_0$  zu erzeugen. Für den thermodynamischen Idealfall ist die Leistungszahl der Verdichterkältemaschine

$$\varepsilon_{\text{Carnot}} = \frac{\dot{Q}_0}{P} = \frac{Q_0}{W} = \frac{T_0}{T_{ab} - T_0} \quad (3.6)$$

# 6 Kühltürme (Verdunstungskühlanlagen)

## 6.1 Zweck

Kühltürme zählen zu den Rückkühlwerken, deren Aufgabe allgemein die Abfuhr von Prozesswärme an die Umgebung ist, s. beispielsweise [111], [112], [113]. Im Kühlturm findet eine Wärme- und Stoffübertragung zwischen Wasser und Umgebungsluft statt, die zur Abkühlung des Wassers genutzt wird. Diese Abkühlung wird dadurch bewirkt, dass eine gewisse Menge Wasser verdunstet. Dabei ist weniger entscheidend, welche Temperatur die Luft am Eintritt des Kühlturms besitzt, sondern welche Menge Wasserdampf sie bis zum Sättigungszustand am Austritt aufnehmen kann. So kann beispielsweise sowohl warme ungesättigte Luft als auch kalte gesättigte Außenluft im Kühlturm genutzt werden. Aufgrund der hohen spezifischen Verdampfungsenthalpie von Wasser muss nur eine relativ geringe Menge verdunsten. Verdunsten von einer Wassermenge 0,17 %, kühlt sich das restliche Wasser um 1 K ab. Befindet sich Wasser bei zunächst 20 °C in einer thermisch isolierten Schale und verdunsten mehr als 3,4 % der Wassermenge, beginnt das restliche Wasser bereits zu gefrieren. Der Phasenübergang flüssig zu gasförmig kann durch eine Druckabsenkung oberhalb des Flüssigkeitsspiegels bewirkt werden. Dies ist insbesondere zum Erreichen tiefer Temperaturen aufwendig, da ein Vakuum erzeugt werden muss. Hierbei handelt es sich um eine Verdampfung des Wassers. Einfacher ist es, nicht den Gesamtdruck, sondern den Partialdruck des Wasserdampfs oberhalb des Flüssigkeitsspiegels dadurch zu senken, dass ungesättigte Luft zugeführt wird. Hierbei handelt es sich um eine Verdunstung.

Dem Kühlturm wird fortlaufend Luft aus der Umgebung zugeführt, die Abluft enthält aufgrund der Verdunstung eine höhere Wasserbeladung, die bis zur Sättigung der Luft reichen kann.

Das durch den Kühlturm gekühlte Wasser kann auf unterschiedliche Weise genutzt werden:

**Tabelle 6.1:** Nutzungsmöglichkeiten des durch den Kühlturm gekühlten Wassers

Bezeichnung	Erläuterung
Nasskühlung (offener Kühlturm)	Das als Kühlwasser bezeichnete Wasser zirkuliert zwischen Kühlturm und dem wärmeabgebenden Prozess. Es kann sich beispielsweise um einen Kraftwerksprozess, einen Kälteprozess, einen Produktionsprozess usw. handeln. Der durch die Verdunstung entstehende Wasserverlust wird ersetzt.  Vorteile: Kostengünstig, niedrige Kühlwassertemperatur erreichbar. Nachteil: Kühlwasser wird durch Schmutz in der Luft verunreinigt.
Verdunstungskühler (geschlossener Kühlturm)	In den Kühlturm ist ein Wärmeübertrager, beispielsweise als berippte Rohrschlange ausgeführt, integriert. Das in den Rohren strömende Medium wird von außen durch das gekühlte Wasser gekühlt.  Vorteil: Das im Wärmeübertrager strömende Medium wird nicht verunreinigt.  Nachteil: Eine Temperaturdifferenz ist zur Wärmeübertragung erforderlich und begrenzt die Abkühlung.

Bezeichnung	Erläuterung
Verdunstungsverflüssiger (geschlossener Kühlturm)	<p>Es handelt sich hier ebenfalls um einen Verdunstungskühler, wobei der integrierte Wärmeübertrager ein Verflüssiger ist.</p> <p>Vorteile gegenüber mit Luft gekühlten Verflüssigern: niedrige Temperatur des verflüssigten Kältemittels, dadurch höhere Leistungszahl und niedrigere Betriebskosten der Kältemaschine.</p> <p>Nachteile gegenüber mit Luft gekühlten Verflüssigern: höhere Investition. Eventuelle Beschwerden von Anwohnern aufgrund möglicher Schwadenbildung (Dampffahne) und störender Geräusche.</p>

Die Betriebskosten für den Wasserverbrauch und die Wasserabschlammung sowie die Hygieneinspektion sind in den letzten Jahren gestiegen. Folglich ist die Wirtschaftlichkeit bei kleinen Verdunstungsverflüssigern mit Leistungen bis 1000 kW fraglich (s. dazu auch „Kühlwassergrenzpreis“ [106]). Der Standort und die über das Jahr verteilte Nutzung sind entscheidend für die Wirtschaftlichkeit.

Anzumerken ist, dass beim sogenannten Trockenkühlturm kein Kühlwasser eingesetzt wird. Das durch einen luftbeaufschlagten, in ein turmförmiges Gehäuse integrierten Wärmeübertrager strömendes Medium wird gekühlt.

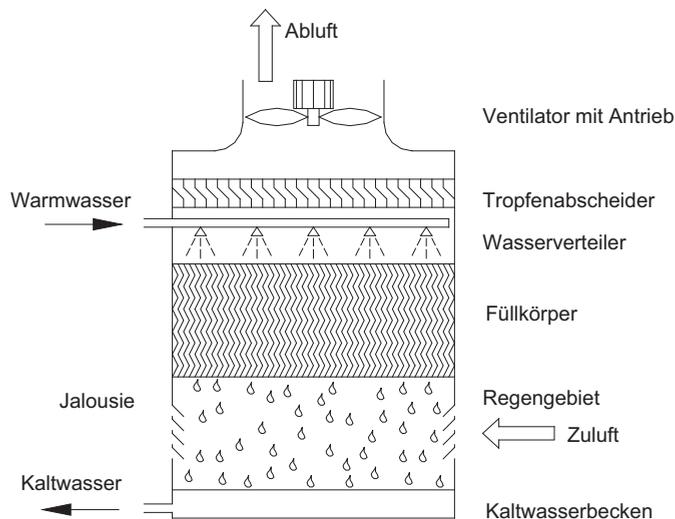
Die in der Kraftwerkstechnik verwendeten großen Naturzugkühltürme werden für kältetechnische Anwendungen kaum eingesetzt und werden deshalb hier nicht behandelt. Ausführliche Darstellungen finden sich in der Literatur [111], [112], [113].

### 6.2 Bauarten

In Bild 6.1 ist der typische Aufbau eines **offenen, saugbelüfteten Kühlturms**, der in Leistungsgrößen zwischen etwa 20 kW und 20 MW serienmäßig hergestellt wird, schematisch dargestellt. Die Luft wird über Lamellen unten angesaugt, die verhindern sollen, dass Wasser nach außen spritzt und Verunreinigungen (z. B. Laub) eindringen. Das Wasser gelangt von oben über eine gleichmäßige Verteilung, meist durch Sprühdüsen, in den Füllkörper. Füllkörper werden auch mit Rieselkörper oder Packung bezeichnet. Hier erfolgt eine intensive Mischung der Luft- und der Wasserströmung aufgrund der Gegenstromführung. Der Füllkörper besteht aus gewellten und diagonal aufeinanderliegenden Kunststofffolien und zeichnet sich durch eine große Packungsdichte aus, die als Verhältnis Oberfläche zu Volumen definiert ist. Der Tropfenabscheider verhindert, dass Wassertröpfchen mit dem Luftstrom aus dem Kühlturm ausgefragt werden. Die Strömung wird im Tropfenabscheider umgelenkt, sodass die Tröpfchen aufgrund ihrer Massenträgheit an die Wände gelangen und hier zu größeren Tropfen zusammenlaufen, die entgegen dem Luftstrom in den Füllkörper fallen können. Die Saugbelüftung erfolgt durch Strömungsmaschinen mit axialen Laufrädern. Um hohe Wirkungsgrade zu erzielen, sind die Laufräder mit möglichst großen Durchmesser ausgeführt, sodass die Geschwindigkeitsänderungen gering sind. Das gekühlte Wasser tropft in das Kaltwasserbecken und wird von dort zu dem zu kühlenden Prozess gefördert. In das Kühlwasserleitungssystem können zusätzliche Kaltwasserspeicher integriert sein, um beispielsweise zeitliche Schwankungen beim Anfall von

Abwärme auszugleichen. Die verdunstete Wassermenge beträgt etwa 0,5 bis 1,5 % des umlaufenden Kühlwassers und muss über eine Frischwasserspeisung ersetzt werden. Der Kühlturm wirkt wie ein Luftwäscher, sodass sich das Kühlwasser mit Verunreinigungen anreichert. Die Salzfracht sollte nicht größer als etwa  $3 \text{ g/m}^3$  sein (bis etwa das Vierfache der Salzfracht von Frischwasser). Dies wird durch periodisches oder kontinuierliches Abschlämmen, d. h. einem teilweisen Austausch des Kühlwassers, sichergestellt. Zum Schutz vor Korrosion und zur Vermeidung von Algenwachstum etc. werden Chemikalien zugesetzt. Das abgeschlämte Wasser ist entsprechend den Vorgaben der Klärwerke zu überwachen.

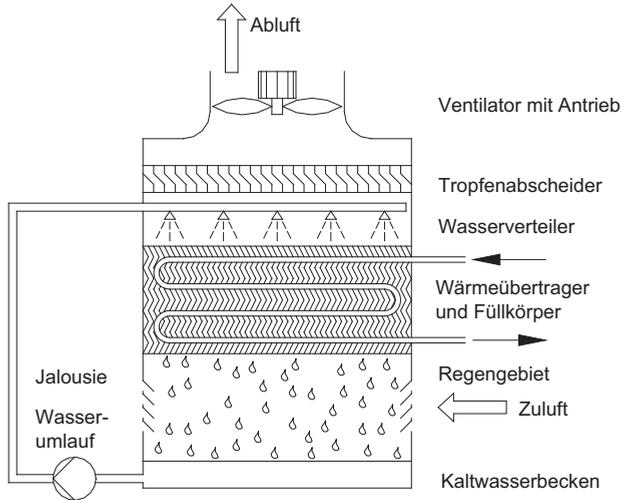
Der Gesamtwasserverbrauch beträgt etwa 2,5 bis 4,5 Liter pro Kilowattstunde abzuführende Wärme. Dabei verdunstet etwa 1,5 Liter/(kWh), etwa 0,25 Liter/(kWh) treten als Tröpfchen aus und etwa 0,85 bis 2,6 Liter/(kWh) werden abgeschlämmt, um eine unzulässige Eindickung zu vermeiden.



**Bild 6.1:** Offener saugbelüfteter Kühlturm

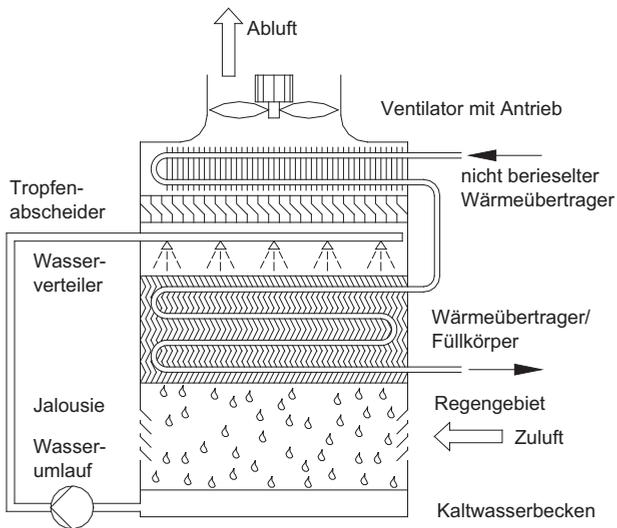
Beim **geschlossenen saugbelüfteten Kühlturm**, s. Bild 6.2, gelangt das zu kühlende Medium nicht mit der Luft in Berührung, sodass im Wärmeübertrager beispielsweise auch Kältemittel verflüssigt werden kann.

Häufig werden diese Kühltürme als Trockenkühltürme betrieben, deren Wärmeübertrager nur bei hohen Umgebungstemperaturen mit Wasser besprüht werden.



**Bild 6.2:** Geschlossener saugbelüfteter Kühlturm

Der **Hybridkühlturm** stellt eine Kombination aus Nass- und Trockenkühlturm dar und wird bevorzugt zur Vermeidung der Schwadenbildung eingesetzt. Eine mögliche Bauweise ist in Bild 6.3 schematisch dargestellt. Durch einen zusätzlichen Wärmeübertrager oberhalb der Wasserzuführung wird die feuchte Luft erwärmt, sodass die relative Feuchte der Abluft abnimmt. Beim Mischen der Abluft mit kälterer Umgebungsluft kann so die durch Taupunktunterschreitung bewirkte Nebelbildung vermieden werden.



**Bild 6.3:** Hybridkühlturm