

3. Absorptionskreisprozesse (AKP)

3.1. Arbeitsmittel für Absorptionskreisprozesse

Wie für die Kältemittel der Kompressionskreisprozesse gibt es auch für die Arbeitsmittelgemische (teilweise konkurrierende) Anforderungen, die jedoch mit denen der Kompressionsprozesse weitgehend übereinstimmen.

Anforderungen für Arbeitsmittel in KWP

Thermodynamische Anforderungen	äußere Anforderungen
<ul style="list-style-type: none"> Lage des Flüssig-Dampf-Gleichgewichts Hohe volumetrische Kälteleistung (d.h. hohe spezifische Kälteleistung bei kompakter Verdichterbauart) $q_v = \frac{\Delta^{LV}h}{v''}$ gute Transporteigenschaften <ul style="list-style-type: none"> - niedrige dynamische Viskosität - hohe Wärmeleitfähigkeit Thermisch stabil inert gegenüber Kältemaschinenöl, aber mischbar in flüssiger Phase 	<ul style="list-style-type: none"> Ungiftig Nicht brennbar oder explosiv Umweltverträglich (Ozonschädigung, Treibhauseffekt) gute Werkstoffverträglichkeit, (nicht korrosiv, nicht reaktiv) <p>É Keine Halogenkohlenwasserstoffe (Flour-Chlor-KW)</p> <p>ó z.Zt. nur noch FKW zulässig</p>
Bezeichnung von Kältemitteln: Refrigerant (C-1) (H+1) (Flour) Rest Chlor	
É R 134a (Tetraflourethan) $C_2H_2F_4$	É Wasser H_2O
É Propan, Butan C_3H_8, C_4H_{10}	É Ammoniak NH_3
	É Kohlendioxid CO_2

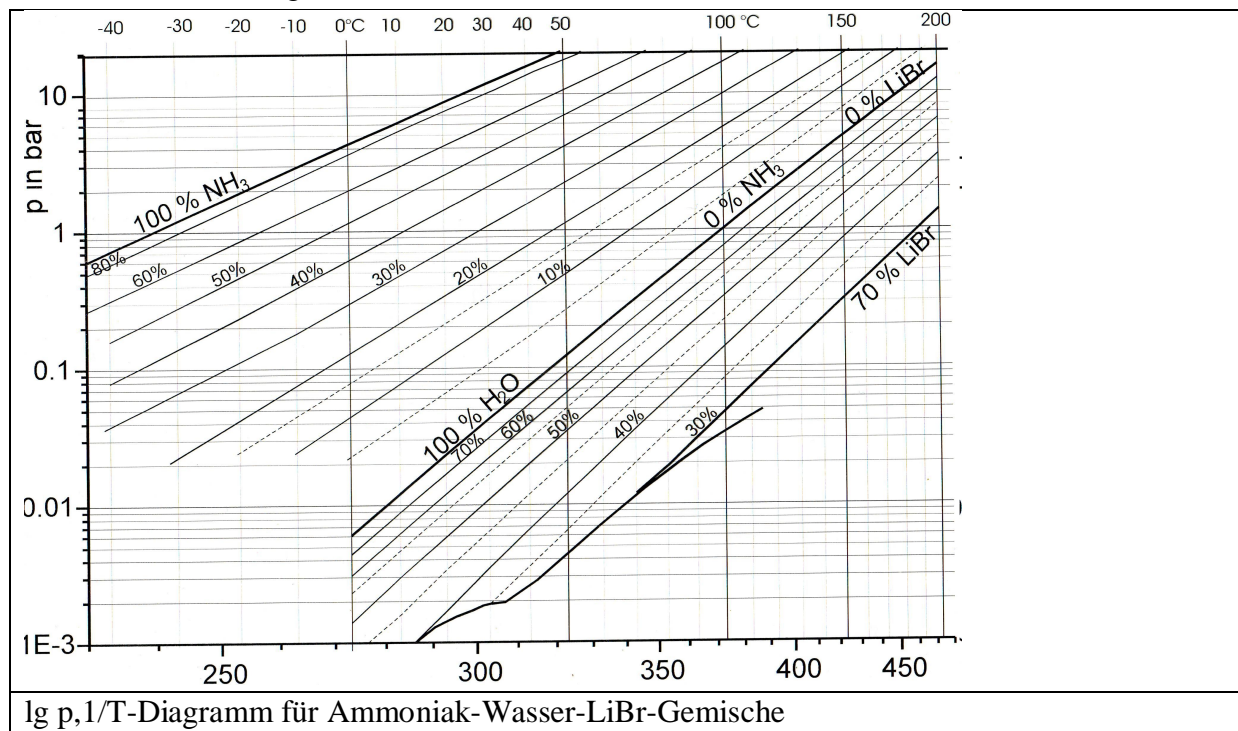
Die thermodynamischen Anforderungen erweitern sich für Absorptionskreisprozesse durch die Verwendung von Gemischen um die Punkte:

- hoher Siedepunktsabstand zw. Arbeits- und Lösungsmittel (möglichst > 200 K) und ein daraus resultierendes breites Lösungsfeld
- vollständige Mischbarkeit im ganzen Konzentrationsbereich, keine Kristallisation

Auch für die AKP gibt es keine šperfektenö Arbeitsmittelgemische, die einzigen im kommerziell in großem Maßstab verwendeten Arbeitsmittelgemische sind Wasser-LiBr und Ammoniak-Wasser, die jeweils spezifische Vor- und Nachteile haben.

	Wasser als Arbeitsmittel	Ammoniak als Arbeitsmittel
	ungiftig, umweltverträglich	giftig
Temperaturbereich	über 0 °C	bis 670 °C
Druckbereich	8- 50 mbar (Klimakälte) bis 2 bar (Wärmepumpen)	0,3 ó 30 bar
Verdampfungs- enthalpie	$\Delta^{LV}h_{10^\circ C} = 2480 \text{ kJ/kg}$	$\Delta^{LV}h_{10^\circ C} = 1230 \text{ kJ/kg}$
mögliche Lösungsmittel	LiBr, NaOH, $CaCl_2$, H_2SO_4 , $Ca(NO_3)_2$	H_2O , Wasser-Salz-Mischungen

Das Bild veranschaulicht die unterschiedlichen Temperatur- und Druckbereiche, in denen die beiden Arbeitsmittelgemische arbeiten.



Darüber hinaus sind zahlreiche andere Arbeitsmittelgemische untersucht worden

É organische Arbeitsmittel:

- ◆ Methanol $\Delta^{LV}h_{10^\circ\text{C}} = 1100 \text{ KJ/kg}$
- ◆ Trifluorethanol (TFE) $\Delta^{LV}h_{10^\circ\text{C}} = 380 \text{ KJ/kg}$

É mit Lösungsmittel:

Tetraethylglycoldimethylether (E181), N-Methylpyrrolidon

Probleme bei organischen Arbeitsmitteln bereitet insbesondere die Zersetzlichkeit bei hohen Temperaturen.

É in jüngster Zeit wurden auch Ionische Flüssigkeiten (flüssige Salze) als Arbeitsmittel untersucht, hier zeichnen sich hohe Viskositäten der Stoffe als besonderes Problem ab

Zur Charakterisierung der Zusammensetzung des Arbeitsmittelgemisches soll im Weiteren der Massenanteil Arbeitsmittel verwendet werden $\xi = \xi_{AM} = m_{AM}/m_{ges.}$, wobei Index AM zur Vereinfachung weggelassen wird. Für reinen Arbeitsmitteldampf gilt dann $\xi_D = 1$ und für die Lösungsströme gilt $\xi_{rL} > \xi_{aL}$. Insbesondere für Salzlösungen ist zu beachten, dass manchmal auch die Salzanteile angegeben werden, die sich mit $1 - \xi_{Salz} = \xi_w$ in Wasseranteile umrechnen lassen.

3.2. Absorptionswärmepumpe/ Kältemaschine

3.2.1. Funktionsprinzip, Kennzahlen

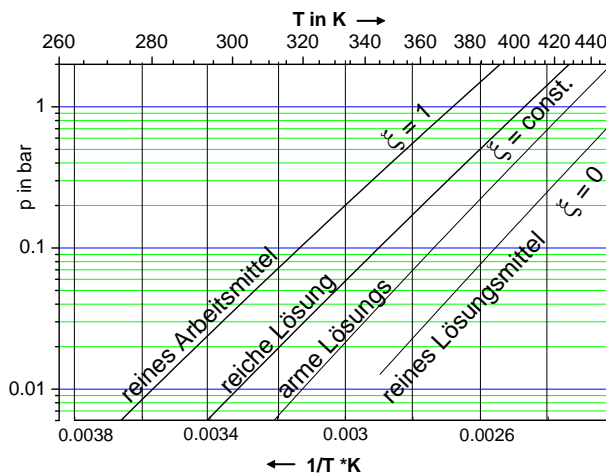
Kältemaschine	Wärmepumpe
$T_o < T_u \quad T_M \approx T_u$	$T_o \approx T_u \quad T_M > T_u$
Kältezah: (Wärmeverhältnis) $\varepsilon_{AKM} = \frac{N}{A} = \frac{\dot{Q}_{Verd}}{\dot{Q}_{Des}} \quad \varepsilon_{AKMtheor} \approx 1$	Wärmeverhältnis $\varepsilon_{WP} = \frac{N}{A} = \frac{\dot{Q}_{Abs} + \dot{Q}_{Kond}}{\dot{Q}_{Des}} \quad \varepsilon_{AWPtheor} \approx 2$
<p>Zu den theoretischen ε-Werten kommt man mit der groben Vereinfachung, dass in jedem Apparat die gleiche Wärme ($\Delta^{LV}h$ beim Verdampfen bzw. Kondensieren des AM) umgesetzt wird. Dabei wird die Lösungswärme $\Delta^M h$ und die fühlbare Wärme zum aufheizen und Abkühlen der Lösung vernachlässigt.</p>	
Energiebilanz: $Q_{Des} + Q_{Verd} = Q_{Abs} + Q_{Kond}$ Bei Kennzeichnung der Wärmen durch die Temperaturen, bei denen sie zu- oder abgeführt werden und mit der Vereinfachung $T_{QAbs} = T_{QKond} = T_M$ $Q_H + Q_0 = Q_M$	
Exergiebilanz (im theoretischen, reversiblen Fall $\Delta E_v = 0$): $\frac{T_H - T_U}{T_H} Q_H + \frac{T_o - T_U}{T_o} Q_0 = \frac{T_M - T_U}{T_M} Q_M + \Delta E_v$ $\tau_H Q_H + \tau_o Q_0 = \tau_M (Q_0 + Q_H) \quad \text{für } \Delta E_v = 0$	
$\tau_M \approx 0$ wegen $T_M \approx T_u$	$\tau_o \approx 0$ wegen $T_o \approx T_u$
$\varepsilon_{AKM} = \frac{\dot{Q}_{Verd}}{\dot{Q}_{Des}} = \frac{\tau_H}{-\tau_o} = \frac{T_H - T_U}{T_H} \frac{T_o}{T_U - T_o}$	$\varepsilon_{WP} = \frac{\dot{Q}_{Abs} + \dot{Q}_{Kond}}{\dot{Q}_{Des}} = \frac{\tau_H}{\tau_M} = \frac{T_H - T_U}{T_H} \frac{T_M}{T_M - T_U}$
$\varepsilon_{AKM} = \eta_c \varepsilon_{KM}$	$\varepsilon_{AWP} = \eta_c \varepsilon_{WP}$

Auf der Basis von reversiblen Carnot-Prozessen lassen sich Absorptionswärmepumpe und -kältemaschine also auch als gekoppelte Dis- und Synproportionierungsprozesse (arbeitsleistender und arbeitsverbrauchender Prozess) darstellen, die über die Energiebilanzen und die vom arbeitsleistenden Disproportionierungsprozess zur Verfügung gestellte Arbeit miteinander gekoppelt sind. Es zeigt sich, dass bei ähnlichen in jedem Apparat umgesetzten Wärmemengen die Temperaturniveaus der Wärmezufuhr und Wärmeabgabe nicht unabhängig voneinander sein können. Diese Tatsache wird auch bei der Darstellung der Absorptionskreisprozesse im $\lg p, 1/T$ -Diagramm deutlich.

3.2.2. Darstellung im Dampfdruckdiagramm

Bei der Darstellung im $\lg p, 1/T$ -Diagramm werden die Dampfdrucklinien der Stoffe näherungsweise zu Geraden, deren Anstieg durch die Verdampfungsenthalpie der Stoffe bestimmt wird. Für ein Arbeitsmittelgemisch aus zwei flüssigen Komponenten spannt sich das für die Zustandsänderungen zur Verfügung stehende Lösungsfeld zwischen Dampfdruckkurve des Arbeitsmittels und des Lösungsmittels auf, Linien konstanter Gemischkonzentration liegen zwischen den beiden Geraden.

Salze, die im Arbeitsmittelgemisch gelöst sind, haben keinen eigenen Dampfdruck, allerdings besitzen sie bei hohen Konzentrationen meist einen Bereich, in dem keine zusätzliches Salz mehr gelöst werden kann – die so genannte Lösungsgrenze. An diesem Punkt führen auch geringe Temperaturabsenkungen zu Auskristallisation des Salzes und damit zur Störung des Prozessablaufes. Die arme Lösung sollte deshalb stets eine ausreichende niedrigere Salzkonzentration gegenüber der Lösungsgrenze haben.



ξ_D – Konzentration des Arbeitsmittels im Dampf, bei der Verwendung von Lösungsmitteln ohne eigenen Dampfdruck z. B. LiBr gilt $\xi_D = 1$

ξ_{aL} – Konzentration des Arbeitsmittels in der arbeitsmittelarmen Lösung

ξ_{rL} – Konzentration des Arbeitsmittels in der arbeitsmittelreichen Lösung

Für die Darstellung des Prozesses im Dampfdruckdiagramm sind zunächst oberes und unteres Druckniveau einzutragen. Der Verdampfungs- und Kondensationsvorgang stellen sich im Diagramm als Punkte auf der Arbeitsmittelgeraden bei der zugehörigen Gleichgewichtstemperatur des reinen Arbeitsmittels dar.

Verdampfung – Zustandspunkt 1;

Endpunkt der Kondensation: Zustandspunkt 9

Darüber hinaus lässt sich im Diagramm der

Endpunkt der Absorption – Gleichgewichtszustand von reicher Lösung, niedrigem Druck und erreichbarer Absorptionsendtemperatur (Zustand 2) sowie der

Endpunkt der Desorption - Gleichgewichtszustand von armer Lösung, hohem Druck und erreichbarer Desorptionsendtemperatur (Zustand 5)

darstellen.

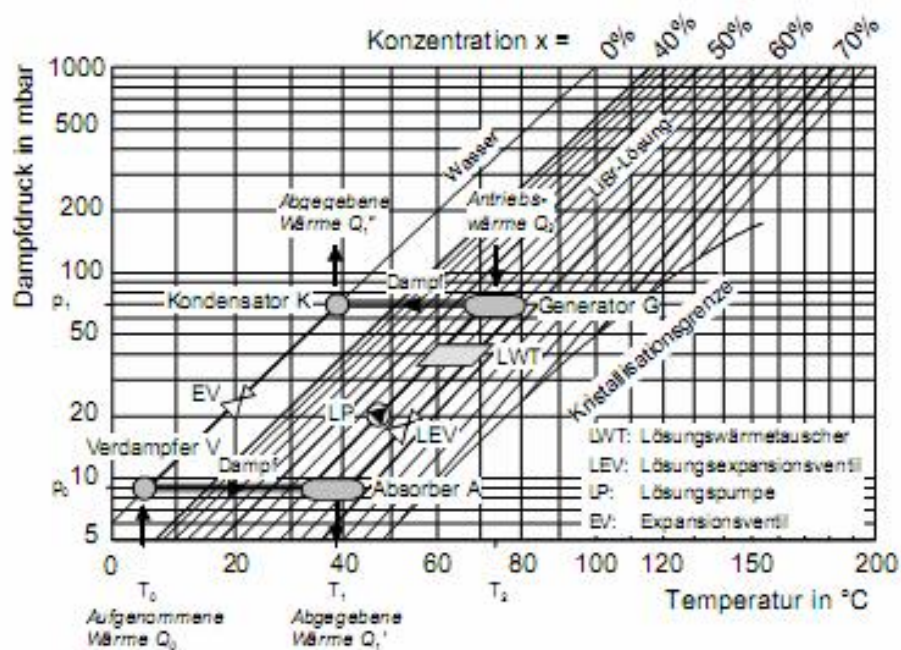
Die Druckerhöhung der reichen Lösung (2 ó 4) nach dem Absorber erfolgt eigentlich bei nahezu konstanter Temperatur und der Eintritt in den Desorber erfolgt stark unterkühlt, der Übersichtlichkeit halber wird diese Zustandsänderung jedoch entlang der Linie konstanter Konzentration angegeben. Der Schnittpunkt mit der Isobare p_H gibt dabei gleichzeitig die Temperatur an, bei der die Lösung im Desorber zu Sieden beginnt.

Die Drosselung der armen Lösung hat ein Absinken der zur Konzentration gehörigen Siedetemperatur und damit eine Teilverdampfung der Lösung zur Folge. Auch hier wird die Zustandsänderung entlang der Linie gleiche Konzentration eingetragen. Der Schnittpunkt mit der Isobaren gibt an, ab welcher Temperatur die arme Lösung zur Absorption des Arbeitsmitteldampfes fähig ist.

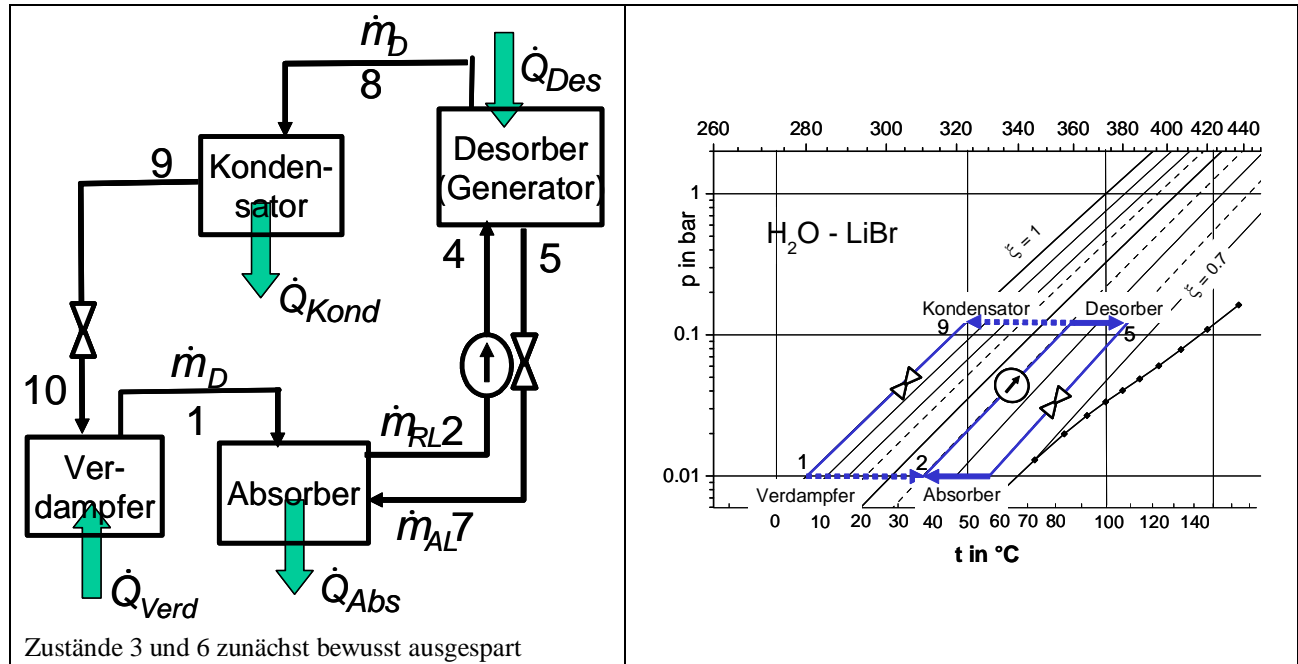
Absorption und Desorption finden also stets in einem Temperaturbereich statt.

Alle Gleichgewichtstemperaturen sind über die notwendigen minimalen Temperaturdifferenzen der Wärmeübertragung mit den äußeren Wärmequellen- und senken verbunden. Größere Temperaturdifferenzen als die minimal geforderten können toleriert werden und führen zu einer Verringerung der notwendigen Wärmeübertragerfläche.

Arbeitsmitteltemperatur	Wärmequelle bzw. -senke	Kältemaschine	Wärmepumpe
$T_V = T_1 \leq T_0 - \Delta T_{\min W\ddot{U}}$	T_0	gewünschte Kältetemperatur	Umgebungstemperatur
$T_{Kond} = T_9 \geq T_{KW} + \Delta T_{\min W\ddot{U}}$	T_{KW}	verfügbare minimale Kühlwassertemperatur	Heizungsrücklauf- temperatur
$T_{Abs,End} = T_2 \geq T_{KW} + \Delta T_{\min W\ddot{U}}$			
$T_{Des,End} = T_8, T_5 \leq T_H - \Delta T_{\min W\ddot{U}}$	T_H	Zur Verfügung stehende Heizmitteltemperatur im Desorber	



3.2.3. Massen- und Energiebilanz am Beispiel einer LiBr-H₂O- KM



Um die Anzahl der Unbekannten im Prozess zu vermindern und eine leistungsunabhängige Auslegung des Prozesses zu ermöglichen, werden Energie- und Massenbilanzen jeweils auf den Massenstrom Arbeitsmittel bezogen.

Die Masse an Lösung, die pro Masse Dampf für die Absorption benötigt wird, hängt von der gewünschten Konzentrationsänderung der Lösung ab und kann über eine Massenbilanz, z.B. um den Absorber, ermittelt werden. Dabei ist sowohl die Gesamtmassen- als auch die Komponentenbilanz (z.B. reines Arbeitsmittel) heranzuziehen

$$\dot{m}_{AL} + \dot{m}_D = \dot{m}_{RL} \quad \text{und} \quad \xi_{AL} \dot{m}_{AL} + \xi_D \dot{m}_D = \xi_{RL} \dot{m}_{RL}$$

Daraus folgt

$$\xi_{AL} (\dot{m}_{RL} - \dot{m}_D) + \xi_D \dot{m}_D = \xi_{RL} \dot{m}_{RL}$$

Die pro Masse Dampf umlaufende Lösungsmenge, der sog. spezifische Lösungsumlauf f , der entscheidenden Einfluss auf die Effektivität der Wärmepumpe hat, ergibt sich damit zu:

$$f = \frac{\dot{m}_{RL}}{\dot{m}_D} = \frac{\xi_D - \xi_{AL}}{\xi_{RL} - \xi_{AL}} \quad \text{und für } \xi_D = 1 \quad f = \frac{\dot{m}_{RL}}{\dot{m}_D} = \frac{1 - \xi_{AL}}{\xi_{RL} - \xi_{AL}}$$

Über die Gesamtbilanz lässt sich auch der Umlauf an armer Lösung pro kg Dampf angeben

$$\dot{m}_{AL} = \dot{m}_{RL} - \dot{m}_D \quad | : \dot{m}_D \quad \text{führt zu} \quad \frac{\dot{m}_{AL}}{\dot{m}_D} = f - 1$$

Die Energiebilanzen um die Einzelapparate liefern die jeweils zu- bzw abzuführenden Wärmemengen in Abhängigkeit von den spezifischen Enthalpien der Stoffströme und dem Lösungsumlauf und werden hier für ein Arbeitsmittelgemisch angegeben, in dem das Lösungsmittel keinen eigenen Dampfdruck hat und im Desorber deshalb reiner AM-Dampf ausgetrieben wird.

Absorber:

$$\dot{m}_D h_{D,1} + \dot{m}_{AL} h_{AL,7} = \dot{m}_{RL} h_{RL,2} + \dot{Q}_{Abs}$$

$$\dot{Q}_{Abs} = \dot{m}_D h_{D,1} + \dot{m}_{AL} h_{AL,7} - \dot{m}_{RL} h_{RL,2}$$

$$q_{Abs} = \frac{\dot{Q}_{Abs}}{\dot{m}_D} = h_{D,1} + (f-1) h_{AL,7} - f h_{RL,2} \quad \text{oder} \quad q_{Abs} = h_D - h_{AL} + f(h_{AL} - h_{RL})$$

Lösungspumpe

$$dh = \int v dp = w_t \quad dh \approx 0 \quad h_4 \approx h_2$$

Desorber:

$$h_{RL,4} \dot{m}_{RL} + \dot{Q}_{Des} = h_{D,8} \dot{m}_D + h_{AL,5} \dot{m}_{AL}$$

$$q_{Des} = \frac{\dot{Q}_{Des}}{\dot{m}_D} = h_{D,8} + (f-1) h_{AL,5} - f h_{RL,4}$$

Das ausgetriebene Arbeitsmittel verlässt den Desorber im überhitzten Zustand (8), der Dampf wird im Kondensator zunächst abgekühlt, ehe er bei konstanter Temperatur kondensiert.

Kondensator:

$$h_{D,8} \dot{m}_D = \dot{Q}_{Kond} + h_{K,9} \dot{m}_{K=D}$$

$$\dot{Q}_{Kond} = \dot{m}_D (h_{D,8} - h_{K,9})$$

$$q_{Kond} = \frac{\dot{Q}_{Kond}}{\dot{m}_D} = (h_{D,8} - h_{K,9})$$

Arbeitsmitteldrossel:

$$dh = 0 \quad h_9 = h_{10}$$

Das flüssige Kondensat verdampft während des Drosselprozesses teilweise, im Zustand 10 liegt Nassdampf vor.

Verdampfer:

$$h_{ND,10} \dot{m}_D + \dot{Q}_{Verd} = h_{D,1} \dot{m}_D$$

$$\dot{Q}_0 = \dot{Q}_{Verd} = \dot{m}_D (h_1 - h_{10})$$

$$q_{Verd} = \frac{\dot{Q}_{Verd}}{\dot{m}_D} = (h_{D,1} - h_{ND,10})$$

Der aus dem Verdampfer austretende Dampf ist Sattdampf beim Druck p_0 .

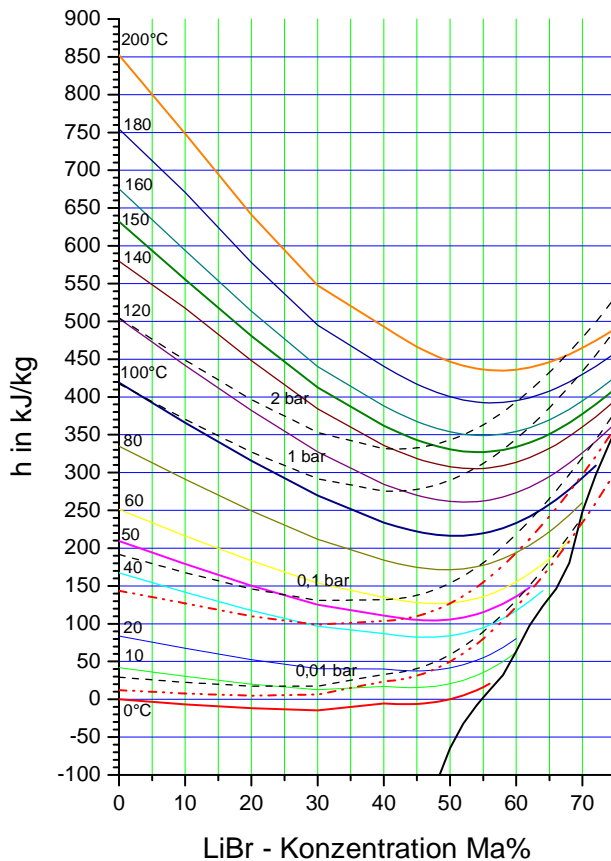
Gesamtenergiebilanz:

$$\dot{Q}_{Des} + \dot{Q}_{Verd} + (P_p) = \dot{Q}_{Abs} + \dot{Q}_{Kond}$$

Die spezifischen Enthalpien für Dampf und Lösung müssen mit Zustandsgleichungen berechnet oder z.B. aus einem h, ξ -Diagramm entnommen werden.

3.2.4. h, ξ -Diagramm

Die Enthalpien von Arbeitsmittel und AM-LM-Gemisch können entweder anhand von Zustandsgleichungen in Abhängigkeit von Druck, Temperatur und Konzentration berechnet oder aus einem Diagramm abgelesen werden. Für Wasser als Arbeitsmittel können die Dampf- und Kondensatzustände aus der WD-Tafel entnommen werden.



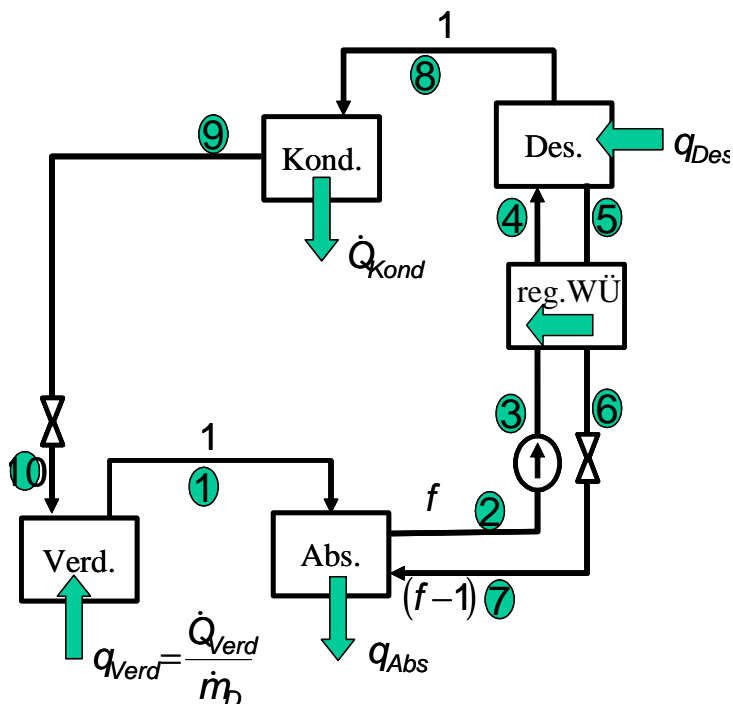
Die Krümmung der Isothermen ist ein Hinweis auf die Auftretende Mischungsenthalpie im System, die dazu führt, dass bei der adiabatisch durchgeführten Mischung zweier Lösungen mit gleicher Temperatur aber unterschiedlicher Konzentration eine Temperaturerhöhung eintritt.

Die Isobaren haben stets einen steileren Anstieg als die Isothermen (links vom Minimum der Isothermen negatives Vorzeichen des Anstiegs). Bei konstantem Druck führt eine Erhöhung der Salz-Konzentration damit auch immer zur Erhöhung der Siedetemperatur der Lösung.

Unterhalb des jeweiligen GG-Zustandes befindet sich die Lösung im unterkühlten Zustand, ihre Enthalpie kann dennoch aus dem Diagramm abgelesen werden.

h, ξ -Diagramm für LiBr-Wasser-Lösungen

3.2.5. Verbesserungsmöglichkeiten Regenerativer Lösungswärmeübertrager



Der reg. Lösungswärmeübertrager zwischen Absorber und Desorber führt dazu, dass die Energie der heißen Lösung für die Vorwärmung der kalten Lösung ausgenutzt werden kann. Er ist für einen effektiven Betrieb von Wärmepumpen und Kältemaschinen in der Regel unverzichtbar, weil der Lösungsumlauf ein Vielfaches der Arbeitsmittelumlaufes beträgt. Da der Massenstrom der armen Lösung kleiner ist als der der reichen, kühlt sich die arme Lösung stärker ab und die minimale Temperaturdifferenz stellt sich am

škalten Endeō (absorberseitig) des Wärmeübertragers ein. Zwangsläufig ergibt sich damit am šwarmen Endeō des WÜ eine Lösungstemperatur T_4 , die deutlich unter der Desorptionsendtemperatur liegt. Falls großes Augenmerk auf die energetische Effizienz gelegt werden soll, ist eine regenerative Nutzung der Wärme des Arbeitsmitteldampfes 8 zur weiteren Erhöhung der Lösungseintrittstemperatur möglich.

Arbeitsmittelwärmeübertrager

Ebenfalls geringere Bedeutung als der reg. Lösungswärmeübertrager hat ein möglicher reg. Arbeitsmittelwärmeübertrager, in dem das warme Kondensat 9 durch den kalten AM-Dampf 11 gekühlt werden kann. Dieser reg. WÜ führt zu einer geringfügigen Erhöhung der im Verdampfer aufgenommenen Wärme, die andererseits über den Arbeitsmitteldampf im Absorber auch wieder abgegeben wird.

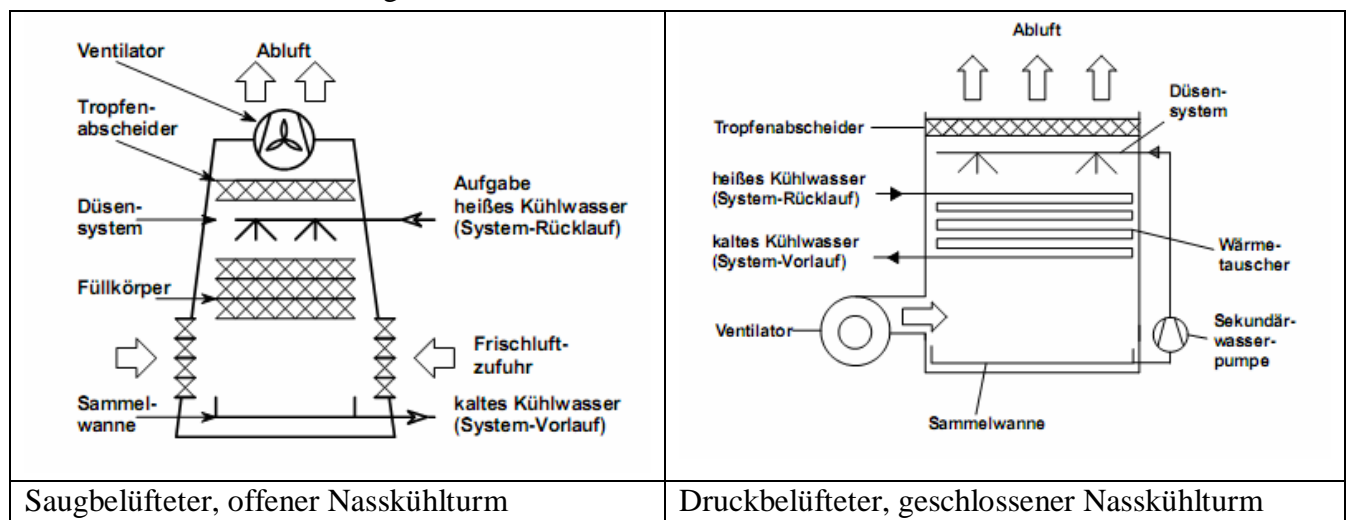
3.2.6. Rückkühlwerke

Wie am Beispiel gezeigt, spielt die erreichbare Kühlwassertemperatur eine entscheidende Rolle für die Machbarkeit und die Effizienz von Sorptionskreisprozessen. Deshalb sollen hier kurz verschiedene Rückkühlprinzipien besprochen werden.

Trockene Kühltürme, Luftwärmetauscher

In Luftwärmetauschern strömt das Kühlwasser durch berippte Rohre und wird durch einen Luftstrom, der in freier Konvektion oder ventilatorgetrieben am Rohrbündel vorbei strömt, angetrieben. Mit Hilfe solcher trockener Wärmeübertrager kann das Kühlwasser nur bis mehrere Kelvin oberhalb der Umgebungstemperatur abgekühlt werden, was für niedrige Kältetemperaturen oder bei hoher sommerlicher Umgebungstemperatur nicht ausreichend ist.

Nasskühltürme, Verdunstungskühler



In Nasskühltürmen kann das Kühlwasser bis auf die šKühlgrenztemperaturō (unterhalb Umgebungstemperatur zurückgekühlt werden.

Wasserverbrauch und die notwendige Wasseraufbereitung in Nasskühltürmen stellen einen erheblichen Kostenfaktor dar. Auch die zusätzliche elektrische Leistungsaufnahme der Lüfter ist zu berücksichtigen. Moderne leistungsgeregelte Motoren ermöglichen aber geringe Stromverbräuche.

Zur Verminderung des Wasserverbrauchs und der Vermeidung von Nebelbildung in der Abluft am Kühlturmaustritt werden auch Hybridkühltürme, eine Kombination aus Trocken- und Nasskühlturm verwendet. Solange die Außentemperatur gering ist, arbeitet der Kühlturm als Trockenkühlturm, bei steigenden Außentemperaturen wird das Kühlwasser nach der Trockenkühlung zusätzlich über eine Füllkörperschüttung verrieselt.

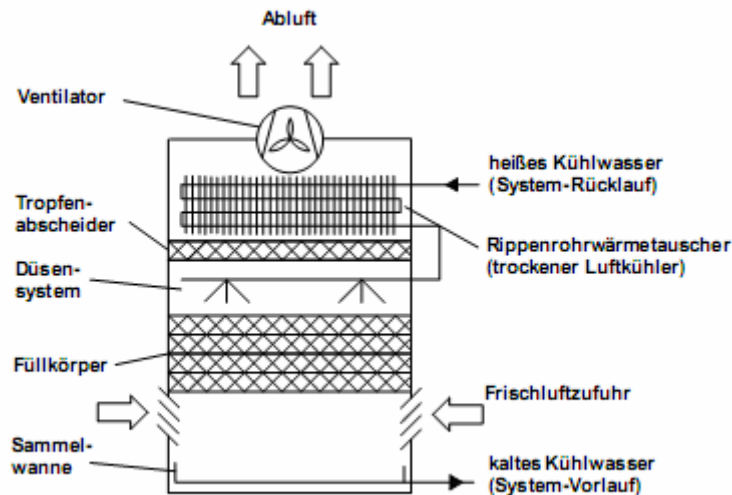


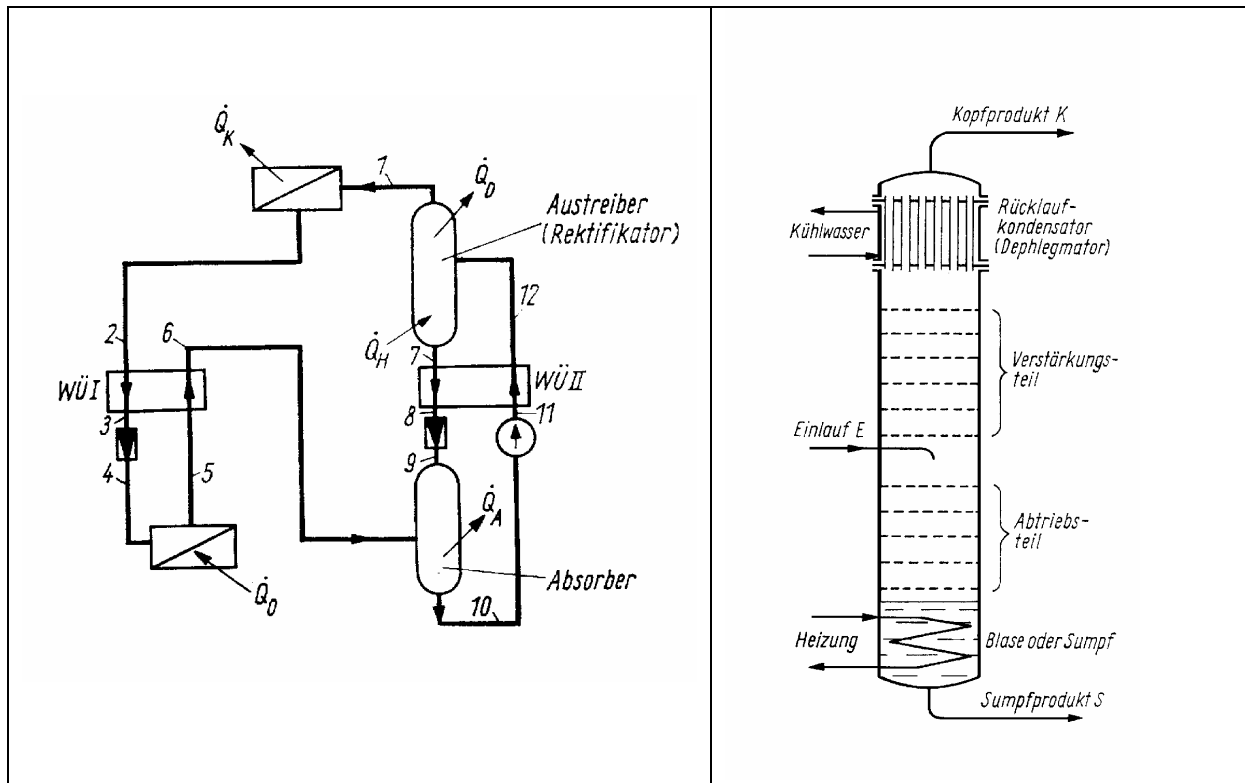
Bild: Hybridkühlturm

3.3. Kreisprozesse mit Ammoniak-Wasser

3.3.1. Wärmepumpe/Kältemaschine

Im Gegensatz zum Arbeitsmittel Wasser kann mit Ammoniak auch Kälte bei Temperaturen unter 0 °C (bis ca. -60°C) erzeugt werden. Auf Grund des relativ geringen Siedepunktsabstandes zwischen Ammoniak und Wasser wird im einfachen Desorber kein reiner Ammoniakdampf ausgetrieben(siehe h, ξ -Diagramm NH_3 -Wasser). Die mitgeführten Wasseranteile reichern sich auf Grund des höheren Siedepunktes von Wasser im Verdampfer an, die dadurch erhöhte Siedetemperatur führt dazu, dass keine Kälte mehr auf dem gewünschten Temperaturniveau erzeugt werden kann. Der Desorber muss deshalb mit einer Rektifikationskolonne ergänzt werden, die einen zusätzlichen Wärmehaufwand hervorruft und das Wärmeverhältnis des Prozesses verschlechtert.

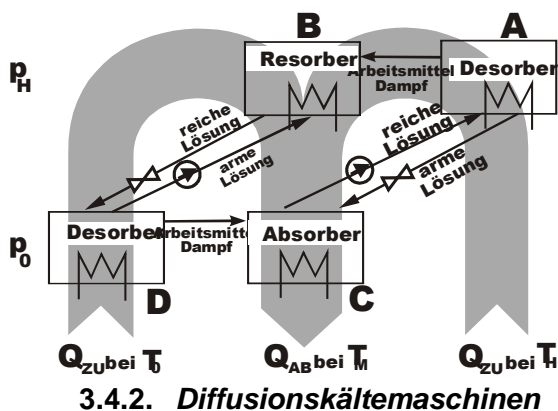
NH_3 -Wasser WP/KM haben deshalb bei gleichen Temperaturen immer ein schlechteres WV als H_2O -LiBr-Anlagen. Um das Wärmeverhältnis zu verbessern, wird hier ggf. der regenerative Arbeitsmittelwärmeübertrager eingesetzt



3.4. Spezielle Kreisprozesse

3.4.1. Resorptionswärmepumpe/Kältemaschine

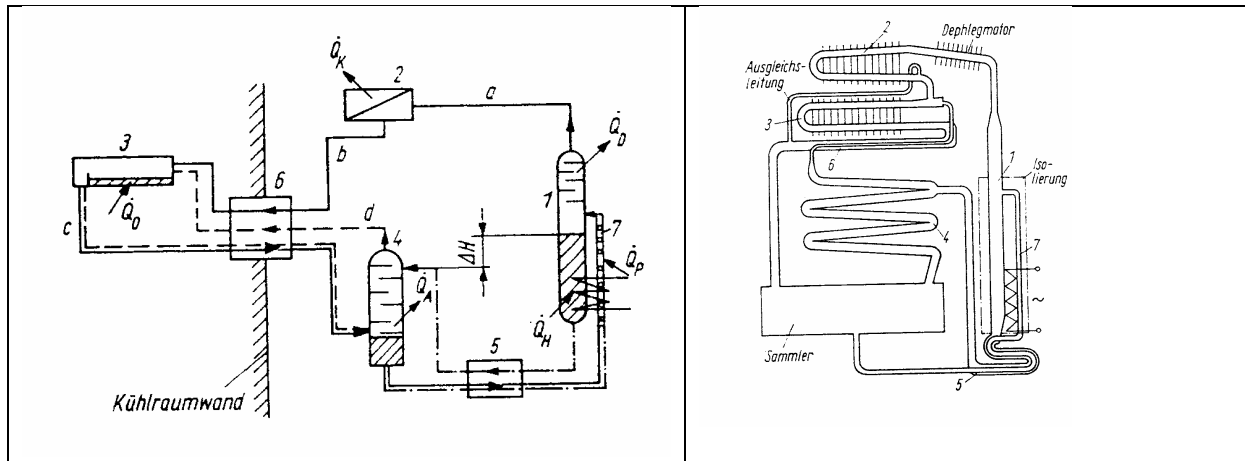
Ein anderer Ausweg um die Versauerung des Verdampfers zu vermeiden ist die Resorptionswärmepumpe. Der Arbeitsmitteldampf wird nicht kondensiert, sondern wiederum in einem zweiten Lösungskreislauf absorbiert (resorbiert) und unter Wärmeaufnahme in einem zweiten Desorber wieder desorbiert. Resorber und Desorber II weisen dann ebenfalls gleitende Temperaturniveaus auf, was bei der Anpassung an Wärmequellen/senken mit gleitenden Temperaturen von Vorteil sein kann. Der Apparatenaufwand vergrößert sich allerdings weiter, der zweite Lösungskreislauf führt zu einer weiteren Verringerung des Wärmeverhältnisses.



3.4.2. Diffusionskältemaschinen

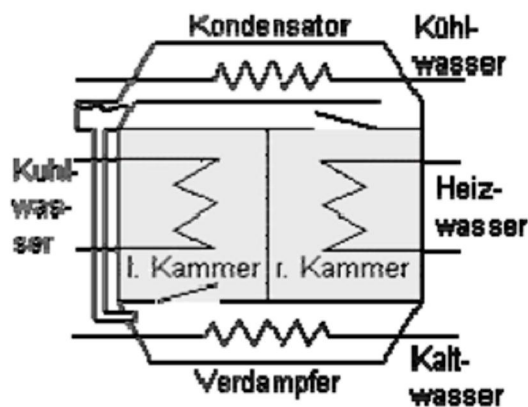
In Diffusionskältemaschinen wird die mechanische Lösungsmittelpumpe durch eine thermisch angetriebene Thermosiphonpumpe ersetzt. Da mit dieser Pumpe nur kleine Druckdifferenzen (in Größenordnung der hydrostatischen Druckdifferenz zwischen Desorber und Absorber überwunden werden kann, wird im Verdampfer-Absorber-Kreislauf zusätzlich

ein Inertgas im Kreislauf geführt, wodurch der Dampfdruck des Kältemittels auf den Partialdruck im Gemisch abgesenkt wird und damit niedrige Verdampfertemperaturen gewährleistet werden können. Durch den (molmassebedingten) Dichteunterschied sinkt das Arbeitsmittel verstärkt in den Absorber ab und wird dort wieder absorbiert. Da das Inertgas im Absorber nicht kondensiert, strömt es durch den temperaturbedingten Dichteunterschied wieder aus dem Absorber in den Verdampfer zurück.



Im Desorber muss der für NH_3 -Wasser typische Rektifikationsaufwand in Form von Zusatzwärme zugeführt werden. Im Falle der dargestellten ausgeführten Anlage genügt als Dephlegmator, für die Bereitstellung des Kolonnenrücklaufes, ein geneigtes, mit Lamellen versehenes Rohrstück.

3.4.3. Adsorptionswärmepumpe



Auch der geschlossene Adsorptionsprozess ist ein thermisch angetriebener Kaltdampfprozess, bei dem sich, im Gegensatz zum Absorptionsprozess, der Kältemitteldampf (Adsorbat) an einem festen Stoff (Adsorptionsmittel oder Adsorbens) anlagert. Beim geschlossenen Adsorptionsprozess verwendet man die Stoffpaare Wasser/Zeolith und Wasser/Silicagel, wobei Wasser/Silicagel in größeren Leistungsbereichen (40-500 kW Kälte) zur Bereitstellung von Kaltwasser eingesetzt wird.

Zeolithe sind natürliche oder auch künstlich hergestellte, hydratisierte Alumosilikate. Sie besitzen aufgrund ihrer Hohlraumstruktur (zahlreiche Poren und Kanäle) eine hohe innere Oberfläche, die eine außergewöhnlich hohe und spezifische Ionenaustausch-, Adsorptions- und Hydratationsfähigkeit aufweist. Silicagel (auch Kieselgel genannt) ist die Bezeichnung

für amorphes Siliciumdioxid mit der Eigenschaft einer hohen Porosität und mit großer inneren Oberfläche. Dadurch eignet es sich insbesondere als Filter- und Adsorptionsmaterial. Adsorptionsprozesse zeichnen sich gegenüber Absorptionsprozessen durch mögliche niedrigere Desorptionstemperaturen aus, allerdings ist ihre Effektivität wegen des schlechteren Wärmeübergangs und fehlender Regenerationsmöglichkeiten wesentlich geringer und sie sind deutlich größer und vor allem schwerer als die Absorptionsanlagen.

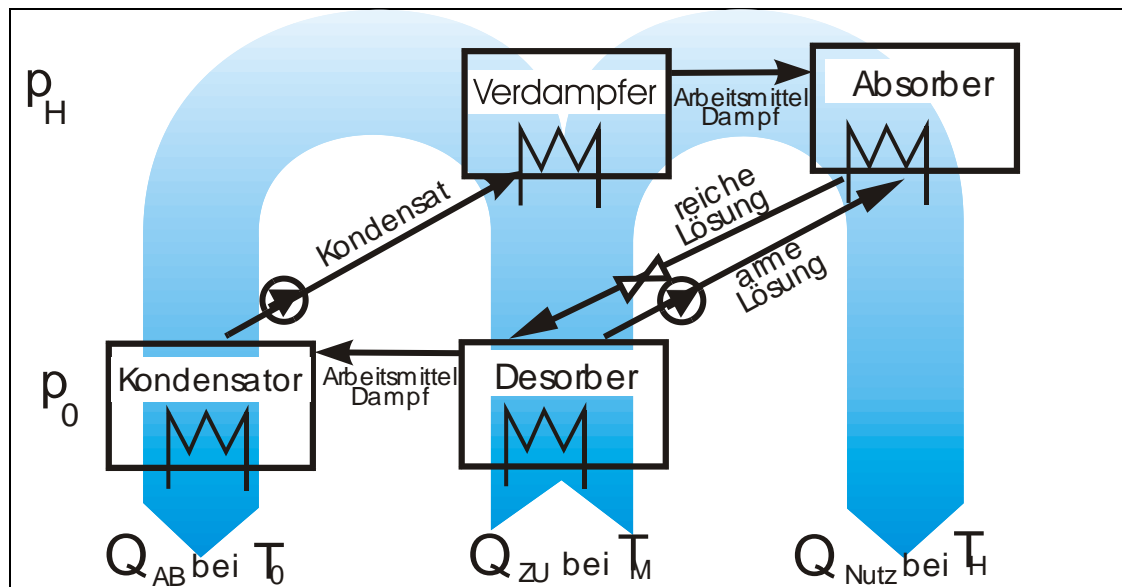
Tabelle 1: Vergleich von marktvorbereitbaren Sorptionskältemaschinen kleiner Leistung

Firma	Yazaki	EAW	Sonnenklima	Rotortica	Climatewell	SolarNext	SorTech	SJTU
Produktname	WFC-SCS / chilli® WFC 18	Wegracal SE15	suniverse 10	Solar 045	Climatewell 10	chilli® PSC10	ACS 08 / chilli® STC8	SWAC-10
Technologie	Absorption	Absorption	Absorption	Absorption	Absorption	Absorption	Adsorption	Adsorption
Arbeitsstoffpaar	H ₂ O / LiBr	H ₂ O / LiBr	H ₂ O / LiBr	H ₂ O / LiBr	H ₂ O / LiCl	NH ₃ / H ₂ O	H ₂ O / Silica gel	H ₂ O / Silica gel
Kälteleistung [kW]	17,5	15	10	4,5	10	10	7,5	10
Heizwasser-Temperatur [°C]	88 / 83	90 / 80	75 / 65	90 / 85	83 / -	85 / 78	75 / 67	85 / 79
Kühlwasser-Temperatur [°C]	31 / 35	30 / 35	27 / 35	30 / 35	30 / -	24 / 29	27 / 32	30 / 36
Kaltwasser-Temperatur [°C]	12,5 / 7	17-Nov	18 / 15	13-Okt	- / 15	12-Jun	18 / 15	15-Okt
COP	0,7	0,71	0,77	0,67	0,68	0,63	0,53	0,39
Abmessungen (BxTxH) [m x m x m]	0,60x0,80x1,94	1,75x0,76x1,75	1,13x0,80x1,96	1,09x0,76x1,15	1,20x0,80x1,60	0,80x0,60x2,20	0,79x1,06x0,94	1,80x1,20x1,40
Gewicht [kg]	420	660	550	290	875	350	260	1.600
Elektrische Leistungsaufnahme [W]	72	300	120	1.200 (inkl. Ventilator)	170	300	57	200

Marktübersicht 2008 *erneuerbare energien* | Juni 2008 64-70 U.Jakob, auch die Sonne kann kühlen

3.4.4. Der Wärmetransformator

Bei Vertauschung der Druckniveaus zwischen Absorber/Verdampfer und Desorber/Kondensator lässt sich ein AKP darstellen, mit dem ein Anteil von Abwärme, die auf einem technologisch nicht mehr nutzbaren Temperaturniveau vorliegt, auf ein höheres Niveau angehoben wird. Triebkraft dieses Prozesses stellt die Temperaturdifferenz zur Umgebung dar.



Weil hier eine Mitteltemperaturwärme auf ein hohes und ein niedriges Temperaturniveau aufgeteilt werden, nennt man diesen Prozess auch Disproportionierungsprozess. Nutzen des Wärmetransformators ist die bei hoher Temperatur freiwerdende Absorberwärme, Aufwand die durch die Abwärme aufgebrauchte Wärme für Verdampfung und Desorption auf Mitteltemperaturniveau. Das Wärmeverhältnis des Wärmetransformators ist daher

$$\varepsilon_{WT} = \frac{\dot{Q}_{Abs}}{\dot{Q}_{Des} + \dot{Q}_{Verd}}$$

und kann mit der groben Näherung, dass in allen Apparaten die gleiche Wärmemenge umgesetzt wird, mit 0,5 angegeben werden.

3.4.5. Mehrstufige Prozesse

Zur Erklärung der Effekte mehrstufiger Kreisprozesse ist es sinnvoll, Syn- und Disproportionierungsprozesse noch einmal mit Hilfe der Exergiebilanz zu vergleichen. Aus Sicht der Wärmetransformation ist der Nutzen beider Prozesse die jeweils auf das höhere Temperaturniveau angehobene Wärme Q_{Hub} . Die Qualitätsveränderung dieser Hubwärme lässt sich anhand der Differenz der Carnot-Faktoren zwischen ursprünglichem und neuem Temperaturniveau, dem Carnot-Hub $\Delta\tau_{Hub}$ beschreiben.

Als Antiebspotential in beiden Prozessen dient die Abwertung der Exergie der Antriebs bzw. Schubwärme, die auf ein niederes Temperaturniveau abgewertet wird. Aus der Sicht der Transformation kann damit das Aufwand-Nutzen-Verhältnis als Transformationsverhältnis bezeichnet und ergibt sich stets aus dem Verhältnis

$$\varepsilon_{Tr} = \frac{\dot{Q}_{Hub}}{\dot{Q}_{Schub}}$$

Mit der Exergiebilanz für den reversiblen Prozess lässt sich zeigen, dass Hub- und Schubwärme im umgekehrten Verhältnis zur Differenz der Carnot-Faktoren stehen, um die ab- bzw. aufgewertet wird $\Delta\tau_{Schub}, \Delta\tau_{Hub}$.

Synproportionierung	Disproportionierung
Wärmepumpe / Kältemaschine	Wärmetransformator
$Q_{Hub} = Q_{Verd} = Q_0$ $Q_{Schub} = Q_{Des} = Q_H$	$Q_{Hub} = Q_{Abs} = Q_H$ $Q_{Schub} = Q_{Verd} = Q_0$
$\Delta\tau_{Hub} = \tau_M - \tau_0$ $\Delta\tau_{Schub} = \tau_H - \tau_M$	$\Delta\tau_{Hub} = \tau_H - \tau_M$ $\Delta\tau_{Schub} = \tau_M - \tau_0$
Exergiebilanz (im theoretischen, reversiblen Fall $\Delta E_v = 0$): $\frac{T_H - T_U}{T_H} Q_H + \frac{T_0 - T_U}{T_0} Q_0 = \frac{T_M - T_U}{T_M} Q_M + \Delta E_v$ $\tau_H Q_H + \tau_0 Q_0 = \tau_M Q_0 + \tau_M Q_H \quad \text{für } \Delta E_v = 0$	

$Q_H (\tau_H - \tau_M) = Q_0 (\tau_M - \tau_0)$	$Q_H (\tau_H - \tau_M) = Q_0 (\tau_M - \tau_0)$
Reversibles Transformationsverhältnis: $\frac{\dot{Q}_0}{\dot{Q}_H} = \varepsilon_{Tr,rev} = \frac{\dot{Q}_{Hub}}{\dot{Q}_{Schub}} = \frac{\Delta \tau_{Scub}}{\Delta \tau_{Hub}} = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{Q}_0}$	

Die erreichbaren Wärme- bzw. Transformationsverhältnisse sind als mit den Temperatur (bzw- Carnot-) Differenzen zwischen den einzelnen Temperaturniveaus verbunden.

Mehrstufige Kreisprozesse können nun entweder das Ziel verfolgen, das Wärmeverhältnis zu verbessern oder aber die Temperaturdifferenz, um die die Hubwärme aufgewertet wird ó den Carnot-Hub, zu vergrößern.

Wie obige Gleichung zeigt, ist die Verbesserung des Wärmeverhältnisses (double-effect) nur möglich, wenn gleichzeitig der Carnot-Schub vergrößert oder die Hubtemperaturdifferenz verringert wird.

Analog dazu kann eine Erhöhung des Carnot-Hubs (double-lift) nur auf Kosten der Verschlechterung des Transformationsverhältnisses erreicht werden.

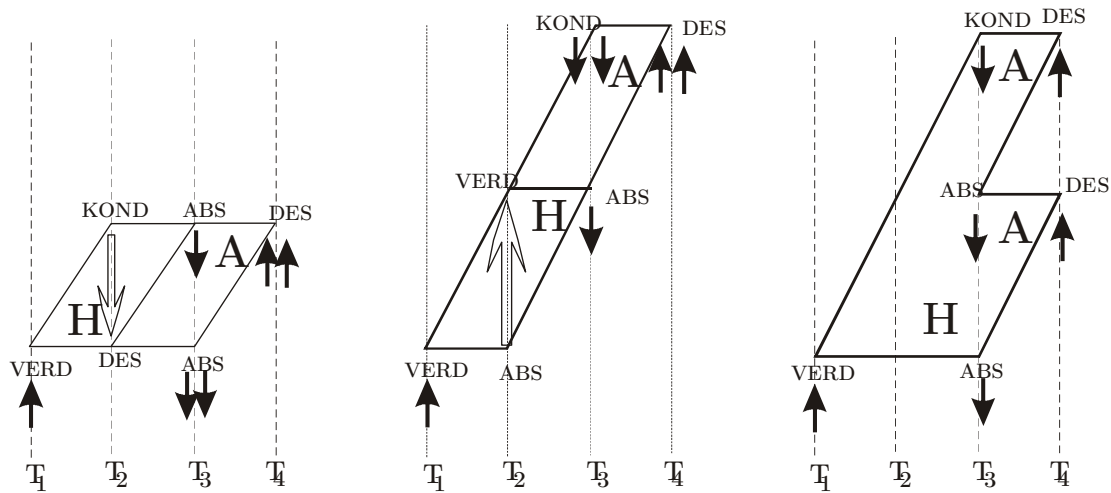
Dabei kann die Verschaltung entweder bei gleich bleibendem Druckverhältnis unter breiterer Ausnutzung des Lösungsfeldes (vornehmlich für NH₃-H₂O-Anlagen) oder durch aufsetzen einer weiteren Druckstufe (vornehmlich für -H₂O- LiBr Anlagen) erfolgen.

Bei der Zusammenschaltung zweier Absorptionskreisprozesse werden je zwei Apparate von beiden Teilstufen gemeinsam genutzt, so dass insgesamt sechs Apparate auf vier Temperaturniveaus beteiligt sind. Je zwei Apparate sind über eine regenerative Wärmeübertragung miteinander verknüpft, so dass das entsprechende Niveau keine Wärmeübertragung von oder nach außen hat.

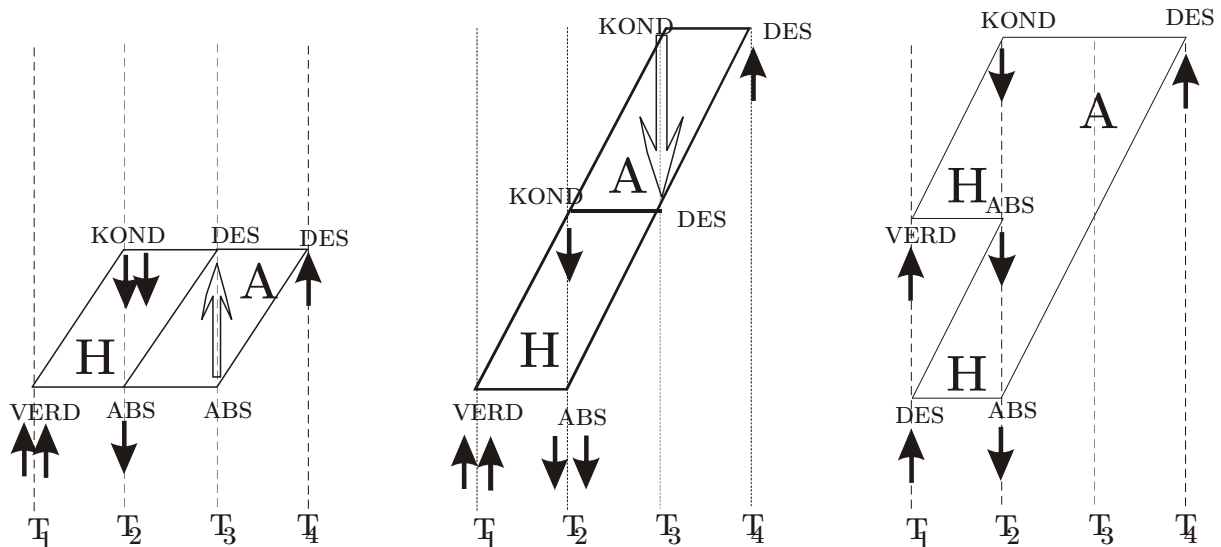
Zur Veranschaulichung der Schaltungsmöglichkeiten werden die Einzelprozesse unter Vernachlässigung der Konzentrationsdifferenzen zwischen armer und reicher Lösung als Rauten dargestellt und die Temperaturen der auf den Mitteltemperaturniveaus arbeitenden Apparaten als jeweils gleich angenommen.

Der double-Lift Effekt ergibt sich, wenn mehr Arbeitsmittel im Hochtemperaturkreislauf umläuft, ein verbessertes Wärmeverhältnis (double-Effect) entsteht, wenn mehr Arbeitsmittel im Niedertemperaturteil des mehrstufigen Prozesses umläuft.

Double Lift



Double Effekt



Zu berücksichtigen ist, dass neben den Kernapparaten auch noch weitere reg. WÜ vorzusehen sind, so dass durch Mehrstufigkeit ein erheblich höherer Material- und Kostenaufwand entsteht. Dennoch sind zweistufige H₂O-LiBr-Anlagen Standardmäßi im Einsatz und auch andere Mehrstufige Anlage wurden vereinzelt realisiert.