

## **Kühlung mit dem Kältemittel Wasser am Beispiel eines geschlossenen Adsorptionskälteprozesses**

Zur Verwirklichung eines Kälteprozesses mit dem Kältemittel Wasser sind, wie in allen Kältemaschinen üblich, ein Verdampfer ein Verdichter und ein Kondensator erforderlich (Bild 1).

### **Verdampfer**

Im Verdampfer findet die Phasenumwandlung vom flüssigen in den dampfförmigen Aggregatzustand des Kältemittels statt. Die für diese Zustandsänderung benötigte Energie (Wärme) wird dem im Kältekreis fließenden Medium entnommen.

Eine Erhöhung der Verdampfungstemperatur oder eine Senkung des Verdampfer-Systemdrucks beschleunigt den Phasenübergang. Unter der Voraussetzung, daß der vom Verdichter geförderte Wasserdampfstrom konstant gehalten werden kann, läßt sich eine Steigerung der Kälteleistung durch z.B. eine Erhöhung der Verdampfungstemperatur erzielen (Bild 2).

### **Kondensator**

Die Kälteprozesse sind thermodynamische Kreisprozesse, linkslaufender CARNOT-Prozeß, bei welchen die Verdampfung und die Kondensation des Kältemittels aufeinanderfolgend oder gleichzeitig (jedoch örtlich getrennt) stattfinden. Eine Verflüssigung des Wasserdampfes auf einem höheren Temperaturniveau als das der Verdampfung ist durch den höher herrschenden Systemdruck im Kondensator möglich.

Das anfallende Kondensat wird über eine Leitung mit einer geeigneten Differenzdruckhalteeinrichtung in den Verdampfer geführt.

## **Verdichter**

Der Verdichter stellt diejenige Einheit einer Kältemaschine dar, in welcher die notwendige Energie zur Durchführung des Kältekreisprozesses zugeführt wird.

## **Kristalle mit besonderen Eigenschaften**

Bestimmte Stoffe haben die Eigenschaft, Moleküle anderer Stoffe zu binden. Ein solcher Vorgang wird als Sorption bezeichnet. In der Technik sind die Molekularsiebe und die Silica Gele diejenige Stoffe, die in den unterschiedlichen Sorptionsverfahren am häufigsten verwendet werden.

Molekularsiebe haben eine charakteristische Kristallstruktur, bestehend aus Metall-Aluminosilikate (Bild 4). Eine Vielzahl winziger Hohlräume im Kristallgitter sind über Kanäle untereinander verbunden. Die Öffnungen zu diesen Hohlräumen haben exakt definierte, gleich große Durchmesser. Bei einigen Kristalltypen beträgt das Gesamtvolumen dieser Hohlräume bis zu 50% des makroskopischen Volumens.

Silica Gel ist eine amorphe synthetische Form von Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ). Im Gegensatz zu den Molekularsieben sind die Porenöffnungen im Silica Gel nicht von einheitlicher Größe. Die Angaben hierfür beziehen sich eher auf eine Porengrößenordnung (Bild 5).

Durch eine Variation des Herstellungsverfahrens lassen sich Molekularsiebe und Silica Gele mit unterschiedlichen Porenstrukturen und damit auch unterschiedlichen Adsorptionseigenschaften herstellen.

Molekularsiebe und Silica Gele weisen eine hohe spezifische innere Oberfläche von bis zu  $1000 \text{ m}^2/\text{g}$  auf. Die Hohlräume sind im Normalzustand mit Wassermolekülen gefüllt. Spezielle, zum

Ladungsausgleich notwendige Kationen erzeugen im Kristallgitter sehr starke elektrische Felder, die die polaren Wassermoleküle anziehen (adsorbieren).

Durch Zufuhr von Wärme auf einem, dem Kristalltyp entsprechend hohen Temperaturniveau lassen sich die Wassermoleküle aus den Kristallhohlräumen ausdampfen (desorbieren). Der energetische Aufwand ist hierzu wegen der stärkeren Bindung im Hohlraum rund 30% größer als für eine entsprechende Menge Wasser außerhalb der Hohlräume. Diese Wärme wird bei der Anlagerung (Adsorption von Wasser) in die kristallinen Hohlräume wieder frei und trägt zur Erwärmung des Kristalls bei. Bei der Realisierung des Kälteprozesses wird diese Wärme als Abwärme bezeichnet und wird über einen Rückkühlaggregat der Umgebung abgegeben.

### **Thermodynamik des Adsorptionsprozesses**

Bei allen Sorptionsprozessen bezeichnet man den aufsaugenden Stoff als Sorbens, den eindringenden als Sorbat. Temperatur und Druck bestimmen einen Gleichgewichtszustand, bei dem das Sorbat im Sorbens einen genauen Beladungswert hat.

Das thermodynamische Verhalten verschiedener Sorbensen liegt in Diagrammen vor, in denen der (logarithmierte) Wasserdampf-Partialdruck in Abhängigkeit von (dem Kehrwert) der Temperatur dargestellt ist. Zustände des Sorbens, in denen der adsorbierte Wasseranteil konstant ist, ergeben in den Diagrammen nahezu gerade Linien, die als Isosteren bezeichnet werden.

Eine Adsorption findet statt, wenn die Temperatur bei gleichbleibendem Systemdruck sinkt, der Druck bei gleichbleibender Temperatur steigt oder die Senkung der Temperatur und der Anstieg des Systemdrucks gleichzeitig stattfinden. Durch Zu- bzw. Abfuhr von Wärme werden Systemdruck und -Temperatur in der Praxis gleichzeitig beeinflusst.

Die Regeneration des Sorbens, die Desorption, erfolgt durch Zufuhr von Wärme und läuft bei steigender Temperatur und sinkendem Druck ab (Bild 6).

### **Prinzipfunktion einer Adsorptionskältemaschine**

Bild 7 stellt den Adsorptionsvorgang dar. Ventil A öffnet und das regenerierte Sorbens saugt intensiv Wasserdampf vom Verdampferbehälter ein. Die Verdampfung, die zum größten Teil an der mit dünnen Wasserfilm berieselten Rohrbündel-Verdampferwärmetauscher stattfindet, entzieht dem Kältekreis Wärme und kühlt den fließenden Kälte-träger ab (Kaltwassersatz-Bereitstellung). Die Abwärme, die während des Adsorptionsvorganges freigesetzt wird, wird über ein Rückkühlaggregat an die Umgebung abgegeben. Ventil B bleibt während der Adsorption geschlossen.

Die Desorption (Bild 8) verläuft bei geschlossenem Ventil A. Über das offene Ventil B strömt der ausgetriebene Wasserdampf in den Kondensator. Dort verflüssigt er und fließt in den Verdampfer zurück. Während der Desorption wird dem Sorbens kontinuierlich Wärme zugeführt und vom Kondensator - abgeführt.

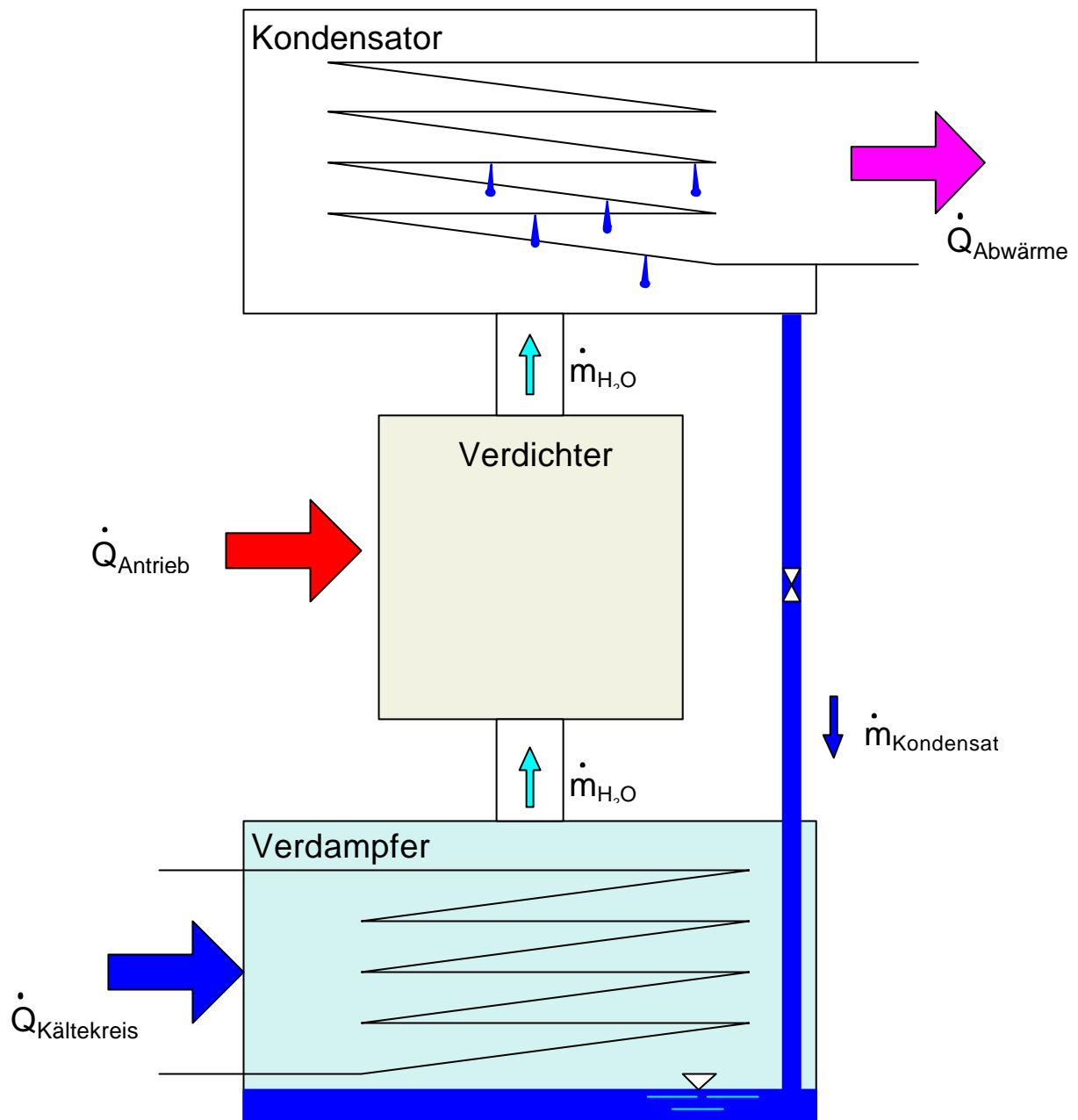
Im Behälter mit dem festen Sorbens findet die Adsorption und die Desorption abwechselnd statt. Um einen quasikontinuierlichen Betrieb der Maschine zu ermöglichen, sind die Sorbens-Behälter zweifach vorgesehen (Bild 9). Sorbensbehälter, Verdampfer und Kondensator bilden ein geschlossenes System, welches von der Umgebung evakuiert ist. Je nach verwendetem Sorbenstyp herrscht ein Systemunterdruck in der Größenordnung von 1 bis 10 kPa (10 bis 100 mbar).

Sorptionsmaschinen haben keine oder nur wenige bewegliche Teile (z.B. Pumpen) und sind somit extrem verschleißarm. Die Steuerung der Sorptionsmaschine erfolgt über elektrisch oder pneumatisch betriebene Ventile.

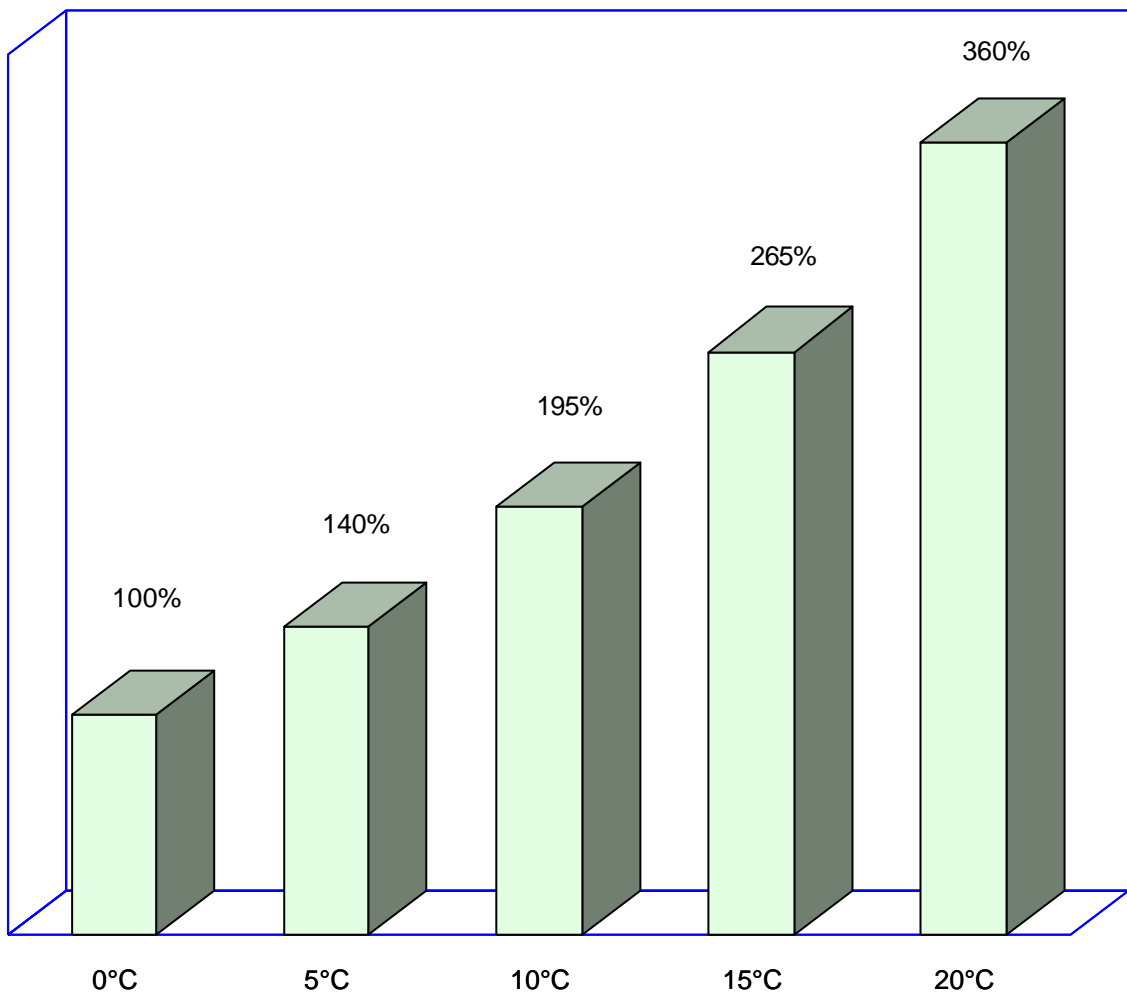
## **Systemlösungen mit Niedertemperatur-Adsorptionskältemaschinen**

Sorptionskältemaschinen benötigen zum überwiegenden Teil thermische Antriebsenergie. Diese kann in Form von warmem Wasser mit Nutzung unterschiedlicher Wärmequellen bereitgestellt werden. Durch den Einsatz des Silica Gels als Sorbens ist die Herstellung von Adsorptionskältemaschinen, die bereits mit 60°C-Wärme getrieben werden, möglich. Zur Steigerung des Wirkungsgrades einer Adsorptionskältemaschine sind zum einen eine Anhebung des Kältekreis-Temperaturniveaus zum anderen eine Senkung des Kühlkreis-Temperaturniveaus von besonderer Bedeutung (Bild 10).

Bild 11 stellt einige Möglichkeiten zur Nutzung von Niedertemperaturwärme für die Raumkonditionierung und Raumklimatisierung dar. Ein Wärmepumpenbetrieb ist ebenfalls möglich (Bild 12). Voraussetzung dafür sind großzügig dimensionierte Raumheizflächen, die bei geringen Übertemperaturen die Nennleistung erreichen.



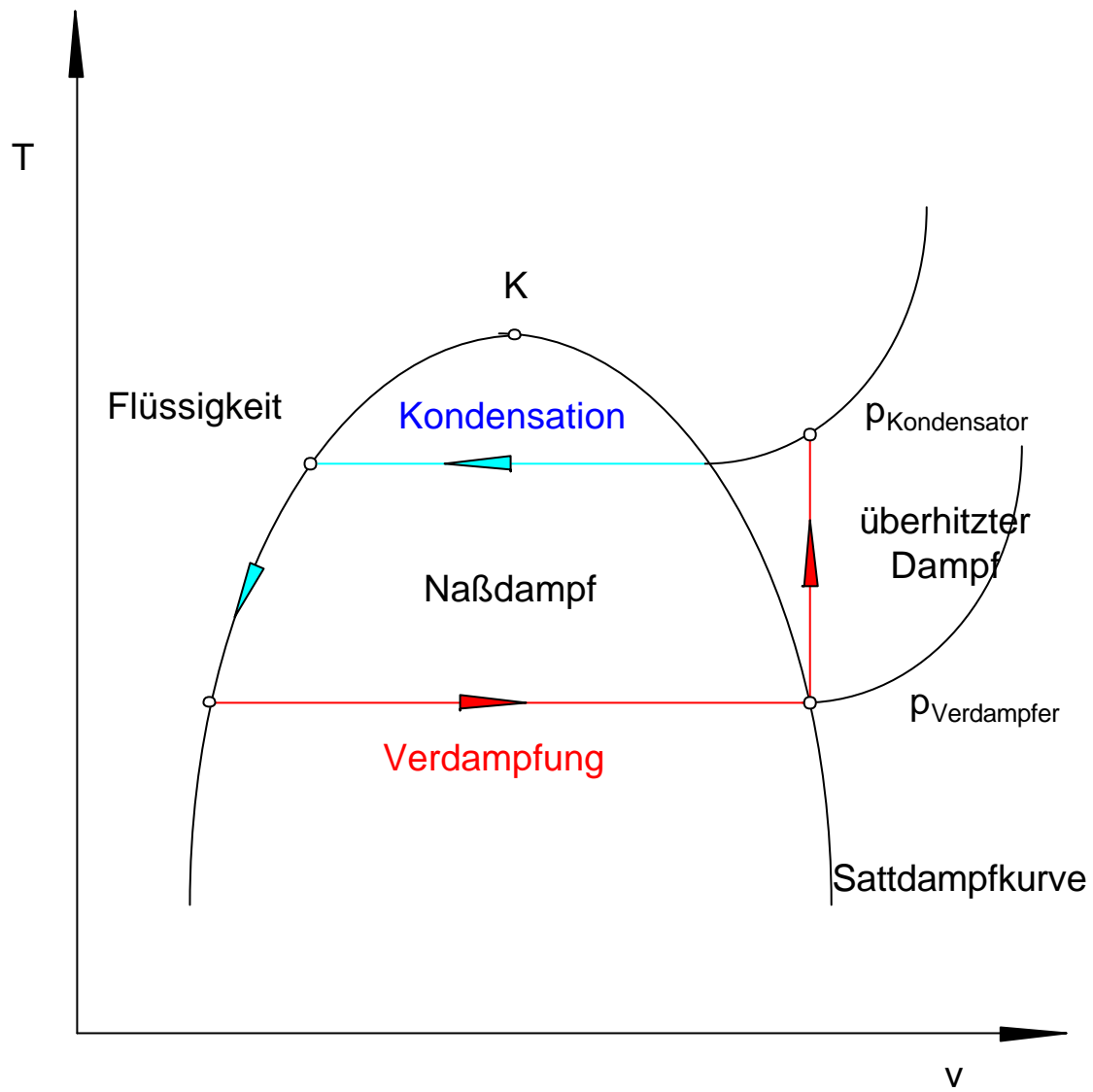
**Bild 1**  
**Prinzipaufbau einer Kältemaschine mit dem Kältemittel Wasser**



**Bild 2**

**Kälteleistungen als Funktion der Verdampfungstemperatur**

Quelle: Dr.-Ing. J Paul, Wasser als Kältemittel, Ki Luft- und Kältetechnik 5/1994

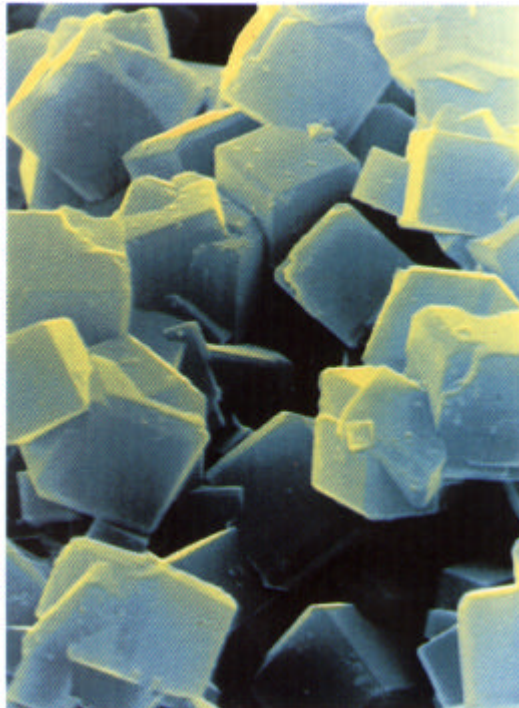


**Bild 3**  
**Wasser- und Wasserdampfzustandsänderungen während des Kältekreisprozesses**  
**linkslaufender CARNOT-Prozeß**





Molekularsieb Typ A



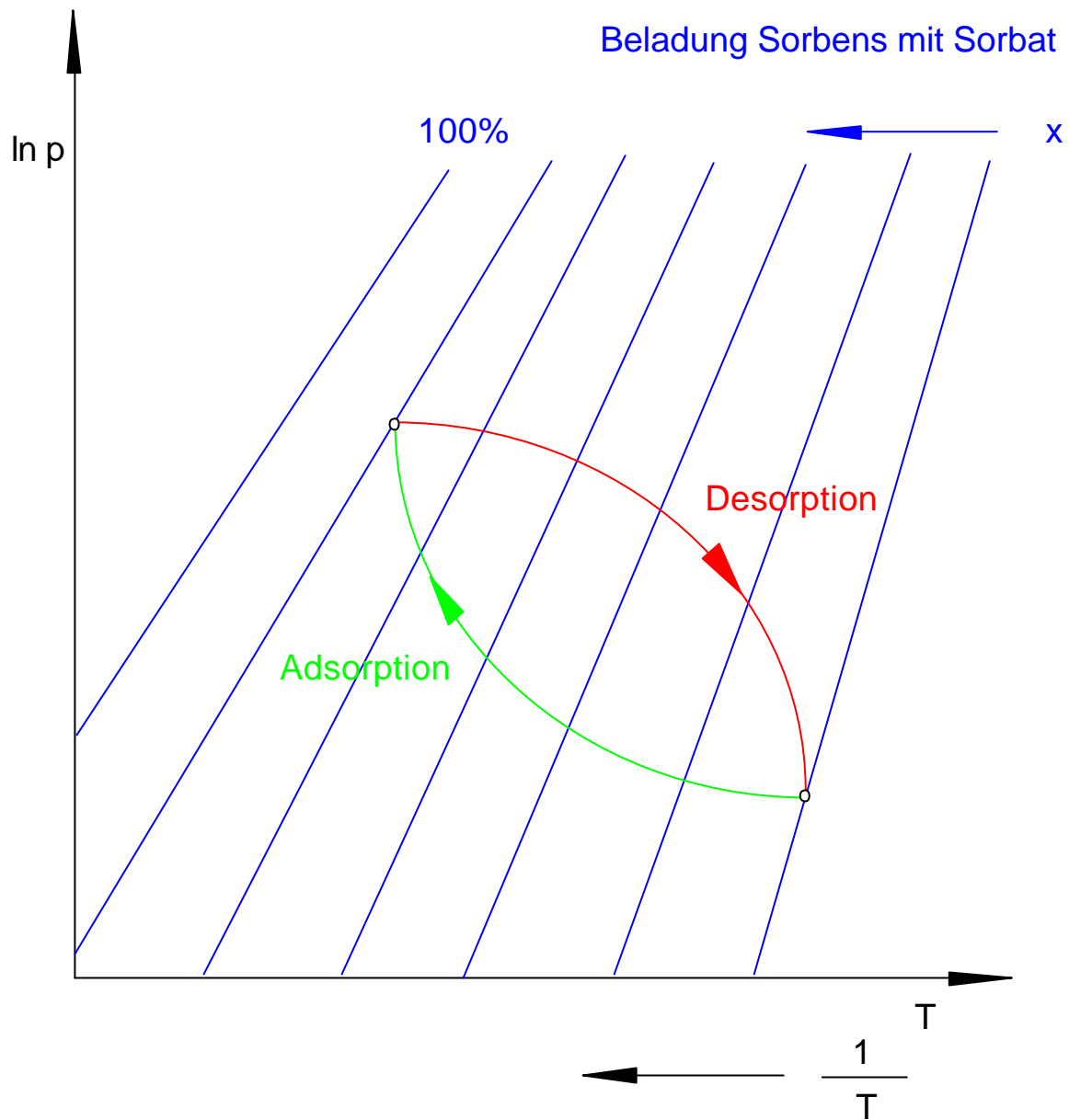
REM-Aufnahme von Molekularsieb  
Typ X

**Bild 4**  
**Kristallstrukturen von Molekularsieben**  
Quelle: Grace GmbH, Worms

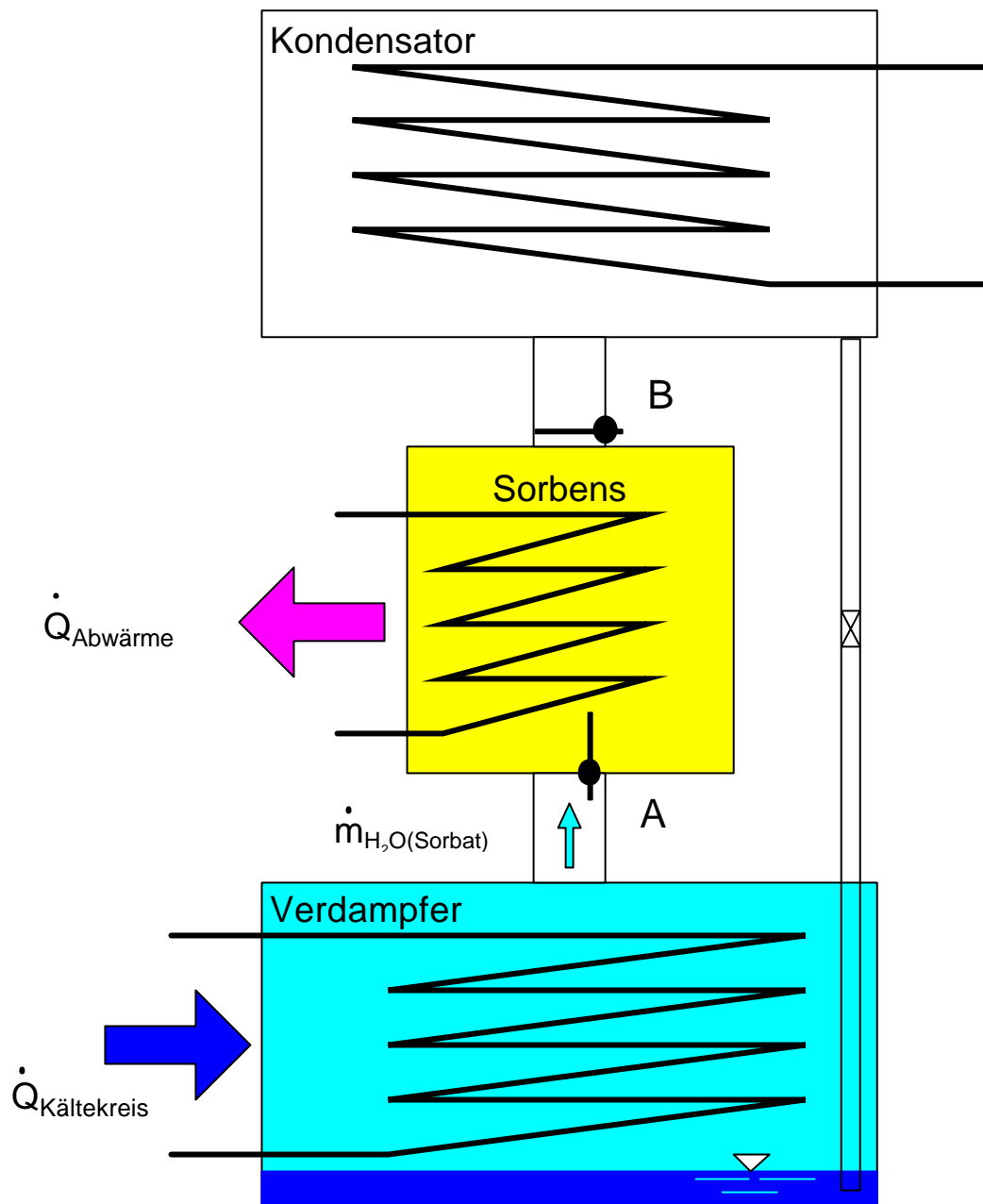


**Bild 5**  
**REM - Aufnahme eines weitporigen Silica Gels**  
**in 15.000-facher Vergrößerung**

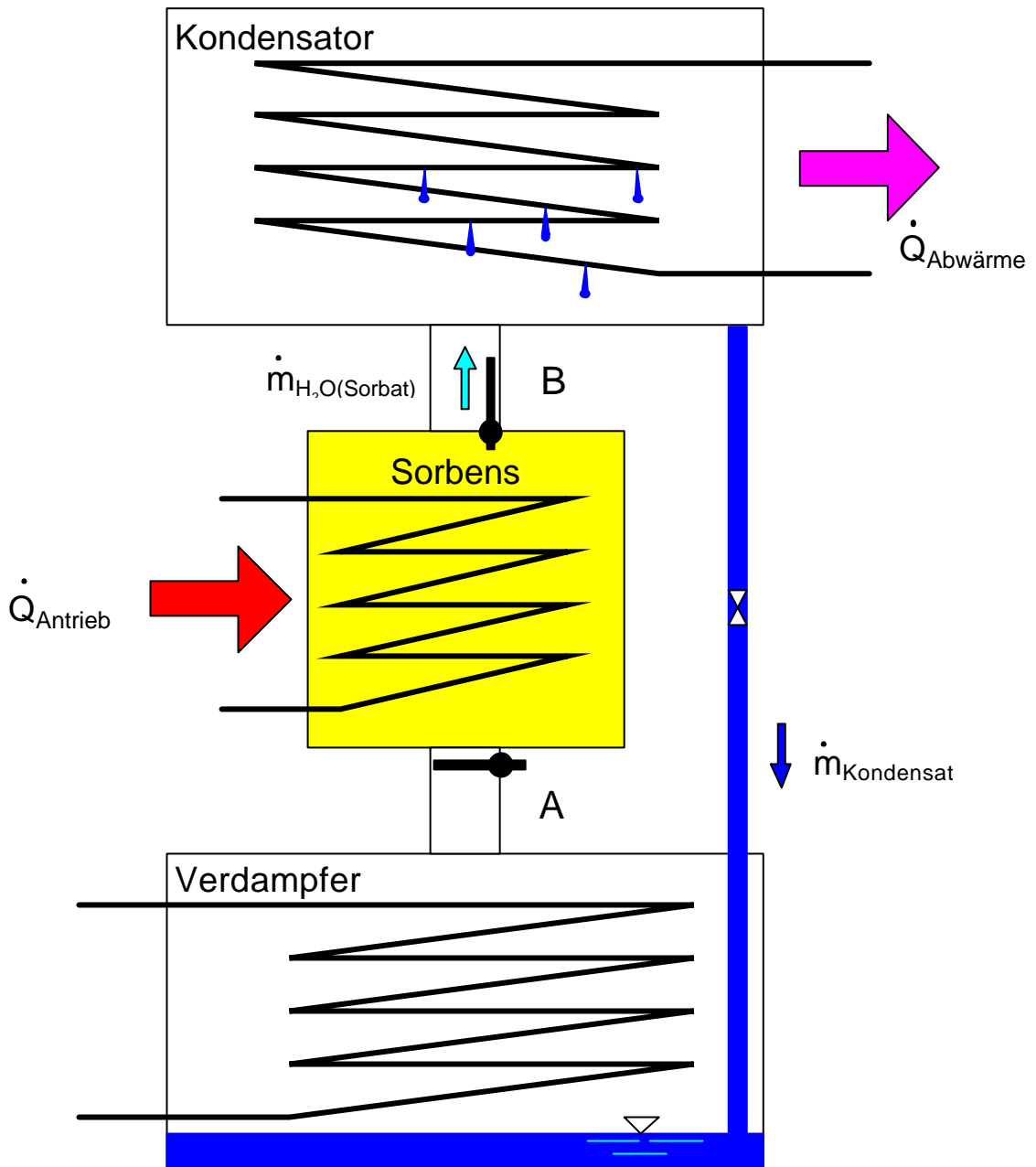
Quelle: Grace GmbH, Worms



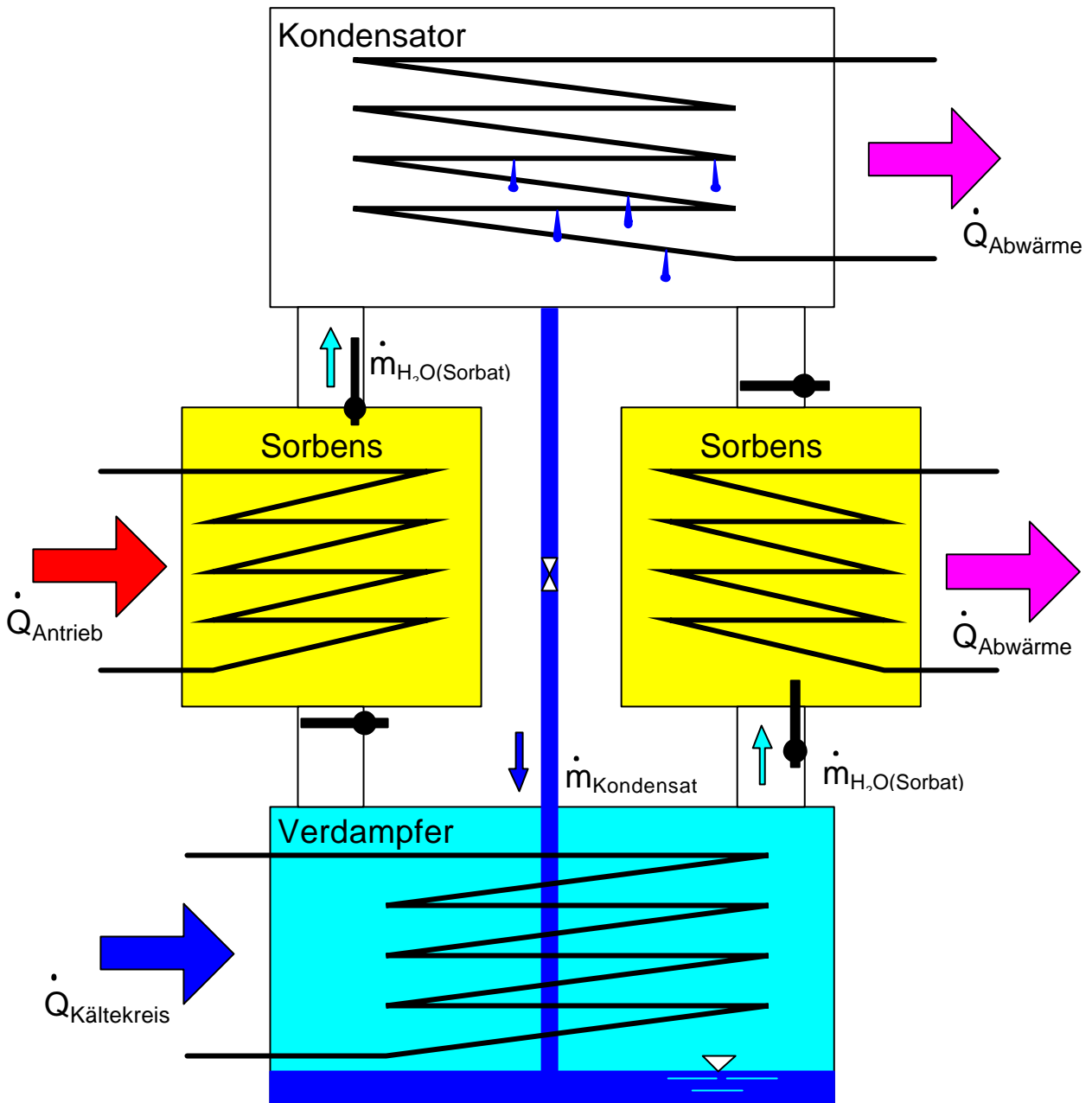
**Bild 6**  
 ***$\ln p - 1/T$  - Diagramm zur Darstellung der einzelnen Sorptionsphasen im Sorbens***



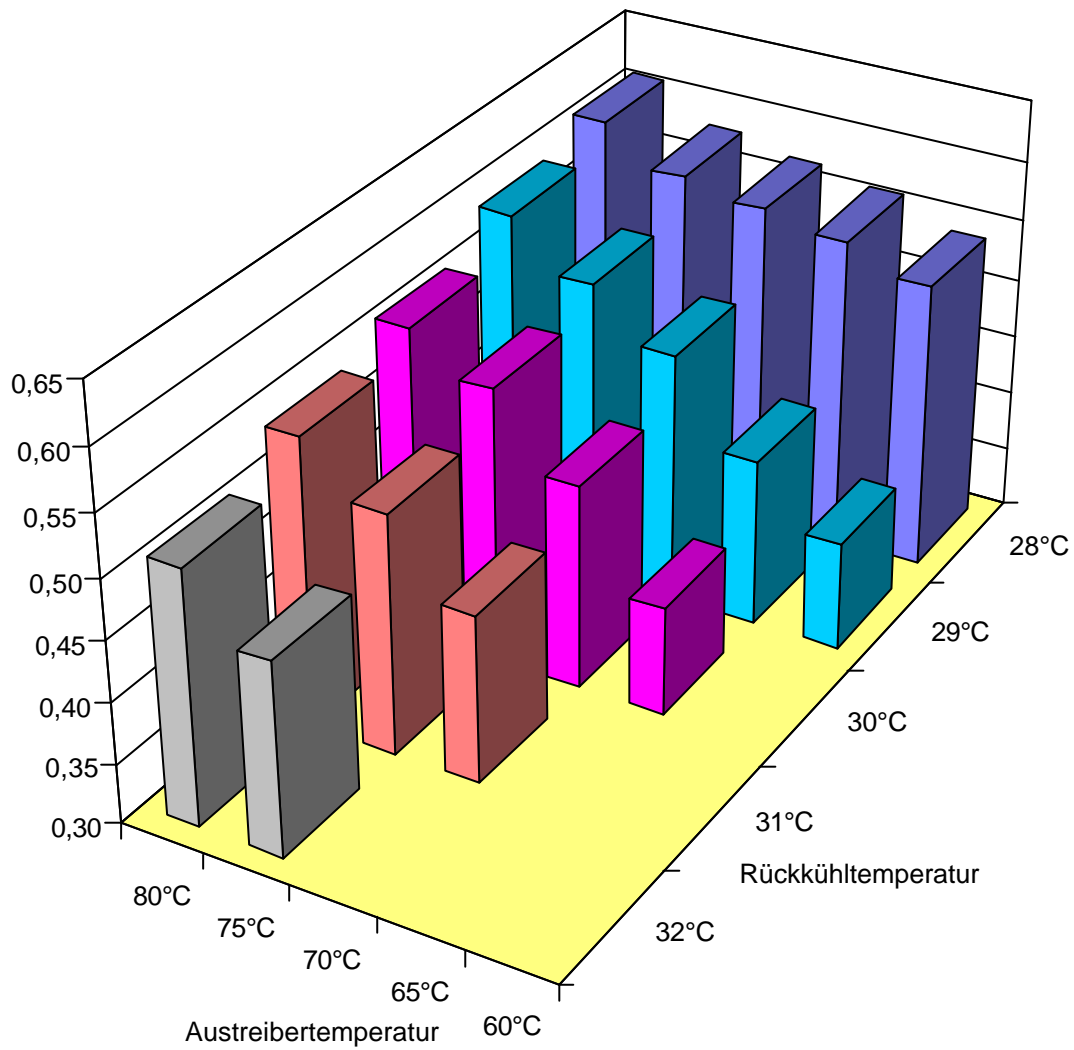
**Bild 7**  
**Adsorptionsvorgang**



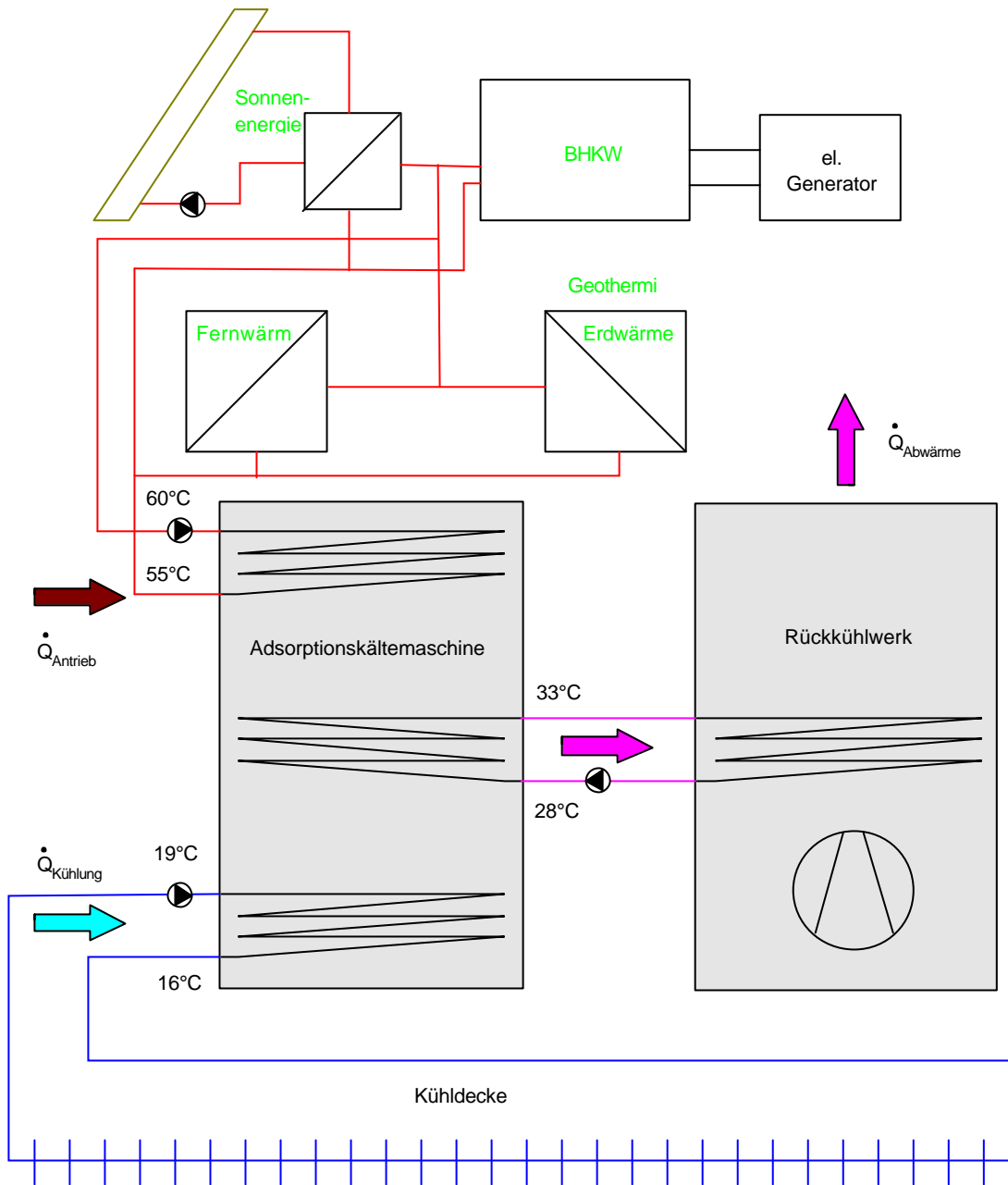
**Bild 8**  
**Desorptionsvorgang**



**Bild 9**  
**Funktionsprinzip Adsorptionskältemaschine**

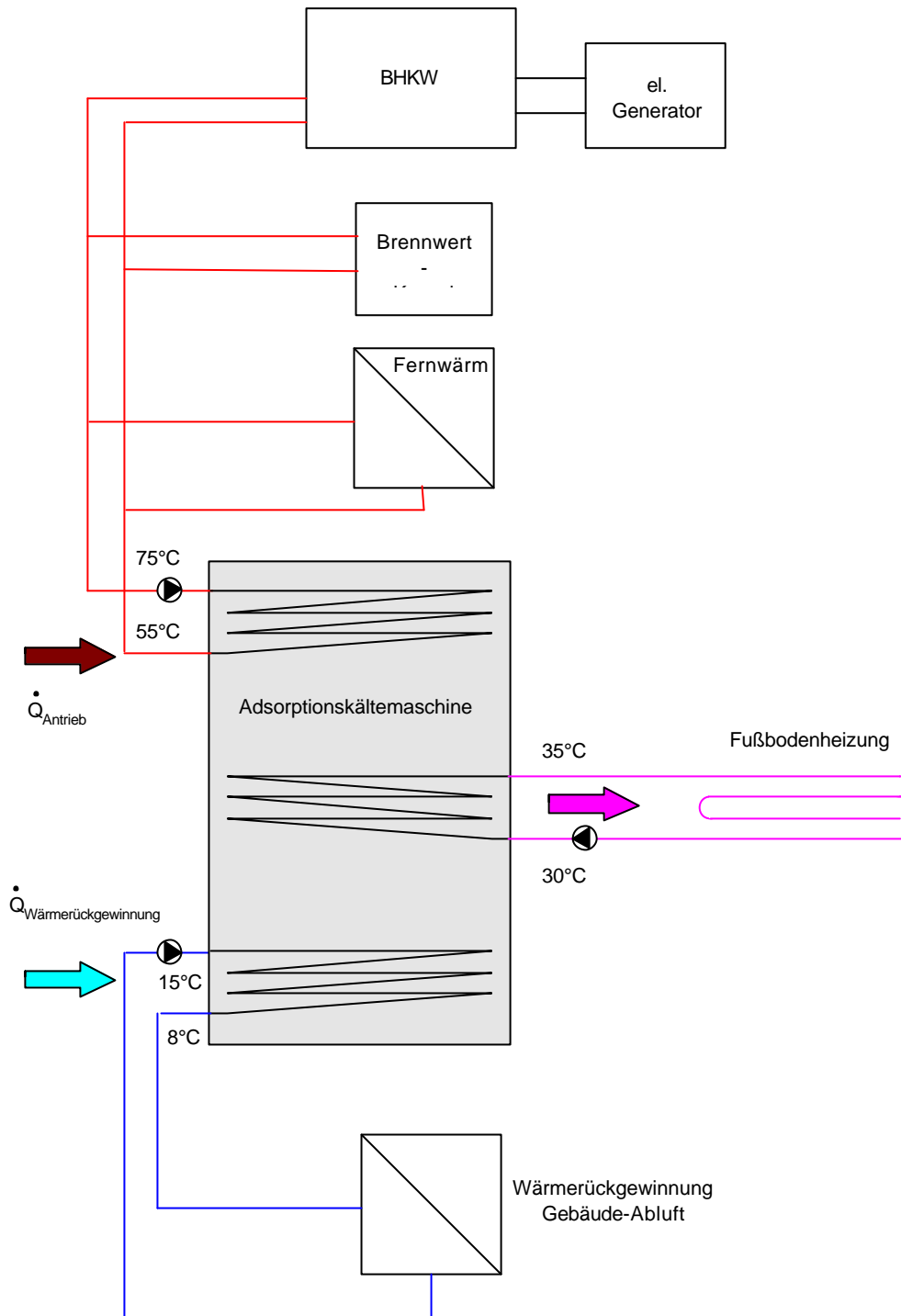


**Bild 10**  
**Kältemaschinen-Wirkungsgrade in Abhängigkeit**  
**von Austreiber- und Rückkühltemperaturen**



**Bild 11**  
**Niedertemperaturquellen zur Kältebereitstellung mit Adsorptionskältemaschinen**





**Bild 12**  
**Wärmepumpenbetrieb mit Adsorptionskältemaschinen**