

Klimakälteerzeugung aus Wärme

Sorptionstechnik

Richard Krottil

Fachhochschule Burgenland GmbH, Steinamangerstraße 21, A-7423 Pinkafeld,
Tel.: +43(0)5/7705-4122, richard.krottil@fh-burgenland.at, www.fh-burgenland.at

Kurzfassung: Die beste Methode Energie einzusparen besteht darin weniger zu verbrauchen. Die Zunahme des Energieverbrauchs auf unserer Erde korreliert jedoch sehr stark mit dem Bevölkerungs- und dem Wirtschaftswachstum. Dieser Anstieg des Weltenergieverbrauchs kann durch Maßnahmen, wie die Effizienzsteigerung von Energiebereitstellungs-, -verteilungs- und -abgabesystemen, ein wenig kompensiert, aber nicht verhindert werden. Um einen Rückgang des Energieverbrauchs auf unserer Erde zu erzielen bedarf es einer grundlegenden Veränderung des Wirtschaftssystems und eines nachhaltigeren Umgangs des Menschen mit unserer Umwelt.

Zur Reduktion des Weltprimärenergieverbrauchs und des CO₂ – Ausstoßes bedarf es des Einsatzes neuer Technologien, welche vor allem dort interessant sind, wo große Energieumwandlungsverluste auftreten. Ein Beitrag dazu wäre der Einsatz von Sorptionstechnologie für die Raumluftkonditionierung, da diese in Mitteleuropa 50 % der gesamten Endenergie verbraucht. Die Sorptionstechnik, die als Antriebsenergie die minderwertige Energieform Wärme benötigt, stellt eine Alternative zur konventionellen Klimakälteerzeugung dar.

Für einen eventuellen technisch und wirtschaftlich sinnvollen Antrieb von Sorptionsanlagen kommen Wärmequellen wie Abwärme aus technologischen Prozessen, Wärme aus Kraft-Wärme-Kopplung (Fernheizkraftwerken FHKW, Blockheizkraftwerken BHKW), Solarwärme und Geothermie in Frage. Dabei werden natürliche Kältemittel eingesetzt, die ein hohes Substitutionspotential von Treibhausgasen besitzen. Die Sorptionstechnologie wird somit einem modernen energie- und umweltpolitischen Denken gerecht.

Im vorliegenden Beitrag werden Sorptionsprozesse zur Bereitstellung von Klimakälte vorgestellt, deren Austreibertemperaturen sich in einem Bereich von ca. 50 °C bis 130 °C bewegen und in Verbindung mit einem Heißwassersystem zum Einsatz kommen. Es werden deren Funktion, Marktsituation, spezifischen Investitionskosten und deren Vor- und Nachteile aufgezeigt und an Hand von Beispielen soll die Einbindung von Sorptionsanlagen zur Klimakälteversorgung dargestellt werden.

Durch die Einbindung von Sorptionsanlagen in Heißwassersysteme zur Bereitstellung von Kälte und Klimakälte ergibt sich eine höhere Auslastung von Nah- und Fernwärmesystemen sowie der in das Netz einspeisenden Wärmeerzeugeranlagen (Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen KWK-Anlagen). Vor allem in den Sommermonaten wo die Auslastung solcher Systeme hauptsächlich durch die Bereitstellung von Brauchwasser alleine gegeben ist, ist der Bedarf an Kühlung sehr groß.

Auf Grund der zeitlichen Kohärenz von Kühlbedarf und solarem Angebot bietet es sich auch an Solarwärme in den Sommermonaten für den Antrieb von Sorptionsanlagen zu nutzen.

Keywords: Klimakälte, Sorptionstechnik, Marktsituation, Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung

1 Einleitung

1.1 Kältebereitstellung

Die konventionelle Kältebereitstellung besteht meist darin, dass ein Kompressionsprozess die benötigte Kälte aufbringt. Dabei werden in der Kältetechnik Kompressionskälteanlagen, auf Grund ihrer niedrigen Investitionskosten und ihres hohen EER (Energy Efficiency Ratio), bevorzugt gegenüber den Sorptionskälteanlagen eingesetzt. Der Unterschied zwischen einem Kompressions- und Sorptionsprozess besteht darin, dass an Stelle der mechanischen Verdichtung des Kältemittels eine "thermische Verdichtung" des Stoffpaares Kälte-/Lösungsmittel tritt.

Für die Kältebereitstellung kann man je nach Energieeinsatz folgende Einteilung treffen:

- strombetriebene Anlagen
- gasbetriebene Anlagen
- thermisch betriebene Anlagen

Die Abbildung 1 gibt einen Überblick über die unterschiedlichen Kältebereitstellungsverfahren je nach Energieeinsatz. Darin sind neben der konventionellen Kompressionstechnologie, wozu die strombetriebene Kompressionskältemaschine, Splittergeräte und WP/Klima-Kompaktgeräte sowie die gasmotorbetriebene Kompressionskältemaschine zählen, auch die alternativen thermisch betriebenen Sorptionsmaschinen aufgezeigt, die in weiterer Folge behandelt werden.

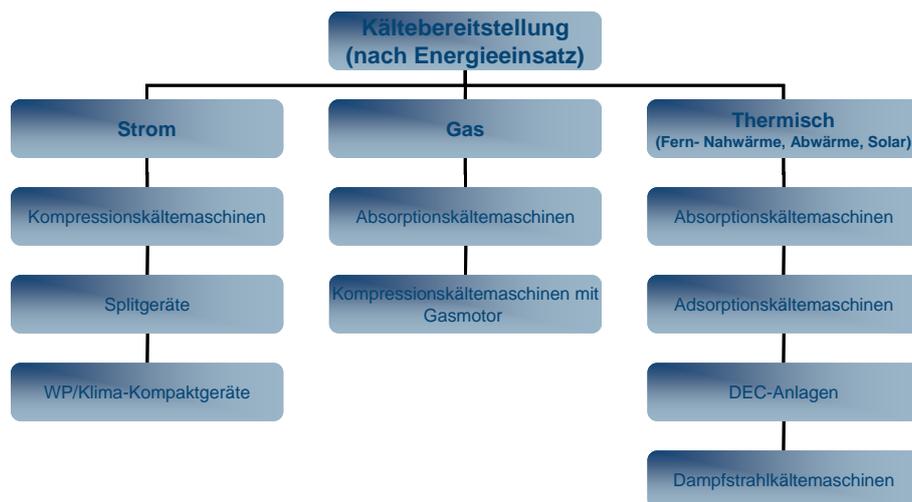


Abbildung 1: Kältebereitstellung nach Energieeinsatz [1]

1.2 Marktsituation

Auf dem Markt befindet sich eine Vielzahl von Kältebereitstellungsanlagen. Im nach folgenden soll auf die am Markt zur Verfügung stehenden gasbetriebenen und thermisch betriebenen Kältebereitstellungsanlagen, welche für die Klimatisierung eingesetzt werden, eingegangen werden (siehe auch Abbildung 1).

Bei den gasbetriebenen Kältebereitstellungsanlagen unterscheidet man zwischen gasmotorbetriebenen Kompressionskälteanlagen und gasbetriebenen Absorptionskälteanlagen. Zu den thermisch betriebenen Sorptionskälteanlagen zählen sämtliche heißwasser- und dampfbetriebenen Sorptionskälteanlagen. Die nachfolgende Tabelle 1 soll einen Überblick über die auf dem Markt zur Verfügung stehenden Kältebereitstellungsanlagen geben. Im Vergleich dazu sind auch die elektrisch betriebenen Kompressionskälteanlagen angegeben, worunter man Scroll-, Schrauben-, Kolben- und Turboverdichterkälteanlagen versteht.

Tabelle 1: Auf dem Markt zur Verfügung stehende Kältebereitstellungsanlagen (lt. Firmendaten)

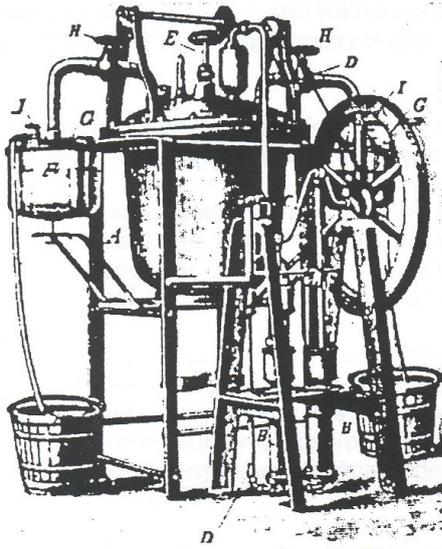
Kältebereitstellungsanlagen (Klimatisierung)	Abkürzung	Nennkälteleistung [kW]		EER	
		von	bis	von	bis
elektrischbetriebene Kompressionskältemaschine	elektr. KKM	5	8500	1,5	8
gasbetriebene Absorptionskältemaschine	gasb. AbKM	16	7000	0,6	1,3
gasmotorbetriebene Kompressionskältemaschine	gasm. KKM	3	7300	1	2,5
thermischbetriebene Sorptionskältemaschine	therm. SKM	5	6000	0,4	1,25

Die hohen EER`s der elektrischbetriebenen Kompressionskältemaschinen werden durch Turbokälteverdichter, die ab einer Nennkälteleistung von ca. 1 MW eingesetzt werden, erreicht. Durch die höheren EER`s der Kompressionskältemaschinen gegenüber den Sorptionskältemaschinen ergeben sich bei den Sorptionsanlagen auch höhere Rückkühllleistungen, welche durch größere Rückkühlanlagen abgeführt werden müssen.

1.3 Geschichte

Die ersten praktisch eingesetzten Absorptions-Kälteanlagen waren Vakuum-Kältemaschinen mit H_2O als Kältemittel und mit H_2SO_4 als Absorptionsmittel. Der Schotte JOHN LESLIE konstruierte 1810 die ersten Absorptions-Kälteapparaturen dieser Art. Eine solche Kältemaschine zeigt Abbildung 2.

1850 wurde die Maschine von EDMOND CARRE durch die Entwicklung einer leistungsfähigeren Luftpumpe wesentlich verbessert. Diese periodischen Absorptions-Kältemaschinen fanden eine große Beliebtheit in den Pariser Cafehäusern. Das Problem bei diesen Maschinen war das Material, da es außer Blei kein genügend widerstandsfähiges Material gegen den Angriff der Schwefelsäure gab.



Das mit konzentrierter Schwefelsäure gefüllte Absorptionsgefäß A saugt abwechselnd über die Ventile Haus den Glasgefäßen F Wasserdampf ab, so dass das in diesen Gefäßen befindliche Wasser gefriert. In der luftdicht abschließenden Platte G befindet sich noch ein Absperrhahn J, über den aus dem am Boden stehenden Eimer die Wasserfüllung ergänzt werden kann. Ein Rührwerksantrieb sorgt für die ständige Bewegung der Säure zwecks besserer Absorption. Das Vakuum in der Apparatur wird durch die handbetriebene Luftpumpe aufrechterhalten, deren Kolben in den Zylindern B durch den Kurbelantrieb C bewegt werden. Die Luft aus dem Absorptionsgefäß wird über die Leitung D entfernt. (Entlehnt aus Lehnert: Moderne Kältetechnik: Leipzig 1905)

Abbildung 2: Vakuum-Kältemaschine für Eisbereitung [2]

Ein entscheidender Fortschritt in der Entwicklung der Absorptionsmaschinen gelang FERDINAND CARRE (Bruder von E. Carre), der das Stoffpaar NH_3 (als Kältemittel) und H_2O (als Absorptionsmittel) für eine kontinuierlich arbeitende Maschine einführte. F. Carre verwendete schon damals zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit einen Temperaturwechsler im Lösungs- und Kältekreislauf. Dies ist bemerkenswert, wenn man bedenkt, dass die thermischen Eigenschaften des Arbeitsstoffpaares $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ nur teilweise bekannt waren. Die Kälteanlagen von F. Carre fanden eine große Anwendung. 1877 wurden beispielsweise Schiffe, die Fleisch von Argentinien nach Frankreich brachten, damit ausgerüstet.

Auf der Weltausstellung 1878 in Paris produzierte AUGUSTIN MOUCHOT mit einer periodisch arbeitenden Absorptionkältemaschine der Brüder Carré einen Eisblock mit Hilfe von Sonnenenergie.

AUGUST OSENBRÜCK führte als erster die Verwertung von Abdampf für die Kälteerzeugung in die von ihm so benannten Abdampf-Absorptionsmaschinen ein. Um die Jahrhundertwende waren diese Maschinen vor allem in Brauereien im Einsatz.

Nach der Jahrhundertwende verloren die Absorptionsmaschinen, zumindest in Deutschland und im übrigen Kontinentaleuropa, langsam an Bedeutung.

Das ist vor allem auf die rasche und günstige Entwicklung der mit NH_3 als Kältemittel arbeitenden Kompressionsmaschine zurückzuführen. Diese wurde von C. LINDE gleich von Anfang an zu großer Vollkommenheit sowohl in konstruktiver und betrieblicher Hinsicht, als auch im Hinblick auf ihre Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit entwickelt.

1.4 Begriffe

Unter dem Begriff Sorption versteht man die Ab- und Adsorption. Der Begriff der Adsorption ist semantisch dem der Absorption durchaus ähnlich, und daher soll an dieser Stelle auf die grundlegenden Unterschiede zwischen beiden Prozessen hingewiesen werden. In Abbildung 3 sind Adsorption und Absorption gegenübergestellt.

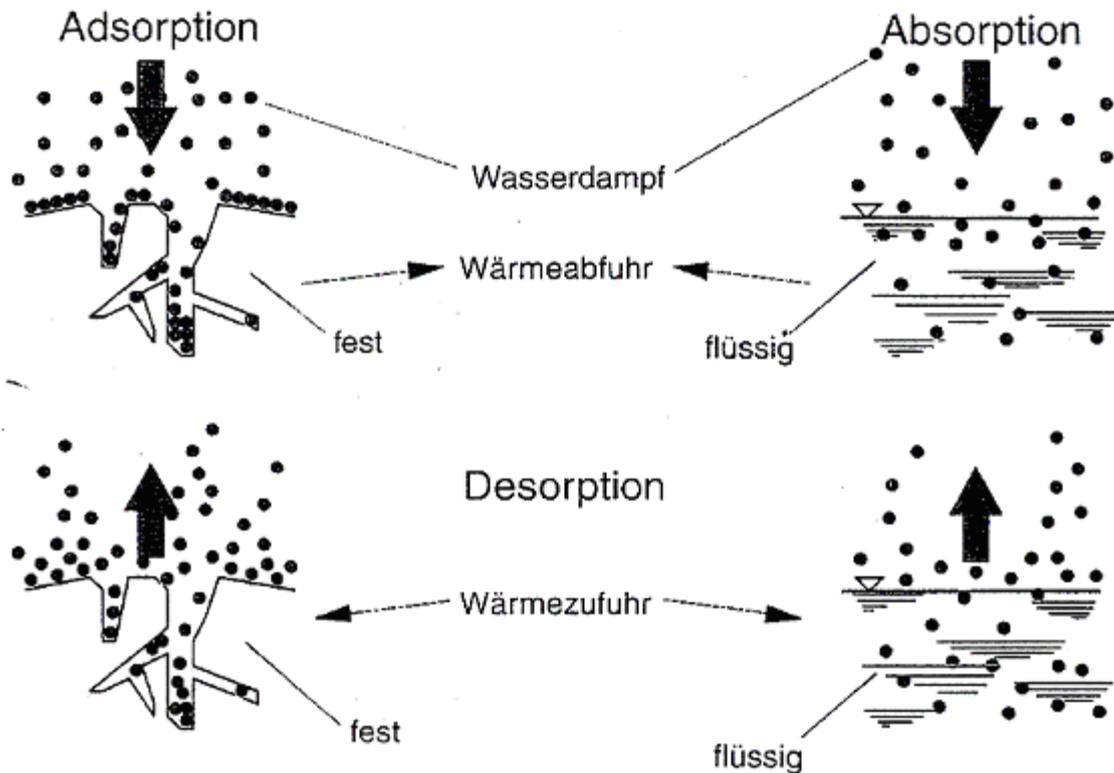


Abbildung 3: Sorptionsmechanismen

- **Absorption**
Unter Absorption wird die Einbindung von Molekülen eines gasförmigen Stoffes in eine Flüssigkeit verstanden. Dabei gehen beide Stoffe in eine homogene flüssige Phase über. Dieser Prozess ist – wie auch die Adsorption – exotherm.
- **Adsorption**
Bei der Adsorption werden Moleküle aus einer flüssigen oder gasförmigen Phase unter Wärmeabgabe an die Oberfläche des Feststoffes gebunden. Adsorbierte Moleküle und Feststoff bilden dabei eine inhomogene feste Phase.
- **Desorption**
Die Umkehrung von Ab- und Adsorption ist die Desorption. Dabei werden unter Wärmezufuhr die ab- bzw. adsorbierten Dampfmoleküle ausgetrieben. Die Desorption kann beim Adsorptionsprozess auf mehrere Arten erfolgen. Wobei die Gasphasen-Adsorption für die energetische Anwendung eingesetzt wird.

2 Thermodynamik der Sorptionstechnik

2.1 Arbeitsstoffe

Beim Absorptionsprozess wird neben dem Kältemittel (Kältemittelkreislauf) noch ein zweiter Stoff, das Absorptions- oder Lösungsmittel (Lösungsmittelkreislauf) benötigt, von dem das Kältemittel absorbiert wird. Beide zusammen bilden sie ein binäres Gemisch, das Arbeitsstoffpaar.

Die Eignung eines Stoffpaares für den Absorptionsprozess wird damit nicht nur durch die Eigenschaften des Kältemittels, sondern auch durch die des Absorptionsmittels und vor allem durch das Verhalten beider Stoffe zueinander und miteinander bestimmt. Daher muss ein Arbeitsstoffpaar in der Absorptionskältemaschine eine Reihe von teilweise widersprüchlichen Eigenschaften besitzen, wie zum Beispiel hohe Lösungsaffinität, Verhältnis der Dampfdrücke, Chemische Stabilität, niedere Viskosität, keine festen Phasen, hohe Verdampfungswärme, ungiftig, unbrennbar und umweltfreundlich. Trotz umfangreicher und zahlreicher Untersuchungen haben sich bis heute noch keine Arbeitsstoffpaare gefunden, die alle angeführten Bedingungen erfüllen. Die einzige Möglichkeit besteht darin, einen Kompromiss bei der Auswahl der Arbeitsstoffpaare einzugehen. Die Stoffpaare, die sich in der Praxis wirtschaftlich durchgesetzt und in ihren speziellen Einsatzgebieten bewährt haben, sind die Arbeitsstoffpaare Ammoniak/Wasser und Wasser/Lithiumbromid.

Wie beim Absorptionsprozess wird auch beim Adsorptionsprozess neben dem Kältemittel ein Sorptionsmittel (Adsorbens) benötigt. Der einzige Unterschied liegt darin, dass das Adsorptionsmittel aus einem festen Stoff besteht. Die Voraussetzungen für einen optimalen Betrieb einer Adsorptionsanlage sind die physikalischen, chemischen sowie die ökonomischen und ökologischen Eigenschaften der verwendeten Stoffpaare. Teilweise sind diese Eigenschaften zueinander widersprüchlich, so dass es kein „optimales“ Stoffpaar gibt. Der geschlossene Adsorptionsprozess arbeitet mit den Stoffpaaren Wasser/Zeolith und Wasser/Silicagel und findet seine Anwendung hauptsächlich in der Klimakälte. Das Stoffpaar Wasser/Zeolith wird für Raumheizung, Warmwasserbereitung, Lebensmittel- und Getränkekühlung sowie für Raum- und Fahrzeugklimatisierung im kleinen Leistungsbereich eingesetzt. Für die Bereitstellung von Kaltwasser ist das erste genannte Stoffpaar von größerer Bedeutung. Der offene Adsorptionsprozess arbeitet mit dem Sorptionsmittel Silicagel (Kieselgel), Lithiumchlorid (LiCl) oder Alomosilikat (SiO_2 – gehört zur Gruppe des Kieselgels) und hat seine Anwendung in der Sorptionsgestützten Klimatisierung (SGK). Betrachtet man die eingesetzten Kältemittel bzw. Lösungsmittel in der Sorptionstechnologie, so stellen diese Arbeitsstoffpaare keine globalen Umweltbelastungen dar (Ozonschicht-Abbaupotential (ODP) = Null, Treibhauspotential (GWP) = Null).

2.2 Prozesse

2.2.1 Absorptionsprozess

Der Absorptionskälteprozess gehört zur Gruppe der kontinuierlich arbeitenden Sorptionskälteprozesse. Als Absorptionsmittel (Absorbens) kommen flüssige Stoffe zum Einsatz. Die auf dem Markt befindlichen Anlagen arbeiten hauptsächlich mit den Stoffpaaren Wasser/Lithiumbromid und Ammoniak/Wasser, je nachdem ob die Kaltwassersätze zur Klimakälte ($T > 0$) oder zur Kälteerzeugung ($T < 0$) eingesetzt werden. Die einstufige Wasser / Lithiumbromid – Absorptionskälteanlage wird auf Grund ihrer Stoffpaarung, Wasser als Kältemittel und Lithiumbromid als Lösungsmittel, in der Klimatechnik eingesetzt.

Das Schema eines einstufigen Absorptionskälteprozesses ist in der Abbildung 4 dargestellt. Daraus geht hervor, dass die Anlage sich in 2 Abschnitte unterteilen lässt. Der 1. Abschnitt besteht aus Absorber, Austreiber, Pumpe, Drossel und Gegenstromwärmetauscher und wird oft als thermischer Verdichter bezeichnet. Hier findet der Lösungsmittelumlauf statt. Das Kältemittel wird absorbiert und ausgetrieben. Der 2. Abschnitt ist mit einem Verflüssiger, Verdampfer und einer Drossel ausgestattet, wo das Kältemittel verflüssigt und unter Aufnahme von Wärme aus dem zu kühlenden System (Kälteleistung) verdampft. Der Verflüssiger und Austreiber arbeitet bei hohem Druck, während der Verdampfer und Absorber unter niedrigem Druck stehen.

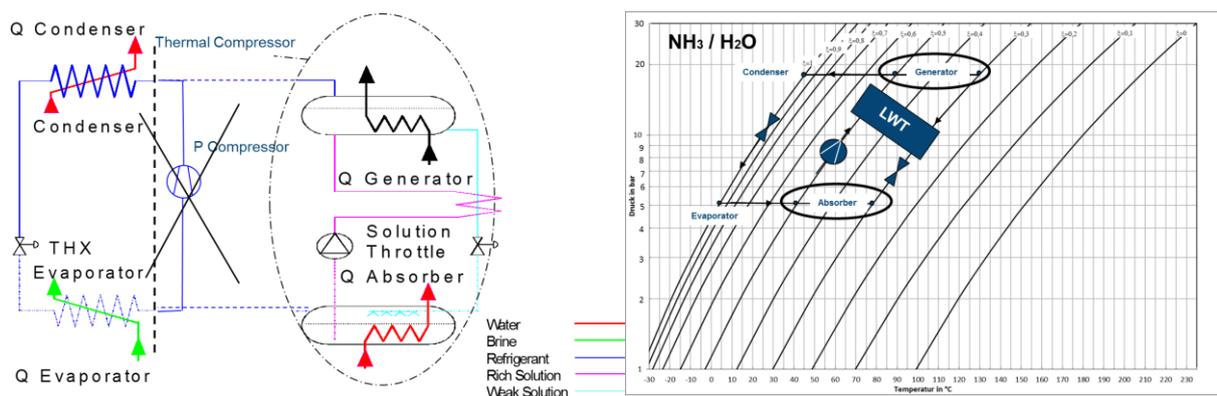


Abbildung 4: Schema eines einstufigen Absorptionskälteprozesses und log p-T-Diagramm

Die arme Lösung (Lösungsmittel) gelangt in den Absorber. Dort wird der aus dem Verdampfer kommende Kältemitteldampf absorbiert, wobei die frei werdende Absorptionsenthalpie (Lösungsenthalpie) abgeführt werden muss. Es ist zu beachten, dass die Absorptionsfähigkeit mit sinkender Temperatur zunimmt, d.h. die Temperatur im Absorber ist möglichst tief zu wählen. Absorber und Verflüssiger werden daher vielfach kühlwasserseitig hinter einander geschaltet. Durch die Aufnahme des Kältemittels wird aus der armen Lösung die reiche Lösung. Diese Lösung wird durch eine Pumpe von dem niederen Absorberdruck auf den hohen Austreiberdruck gebracht. Im Generator wird aus der reichen Lösung durch Wärmezufuhr das Kältemittel ausgetrieben. Dabei nimmt das Lösungsvermögen des Lösungsmittels ab. Der zwischen Absorber und Austreiber eingeschaltete Gegenstromwärmetauscher trägt zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens bei, indem der Wärmebedarf des Austreibers verringert wird und gleichzeitig die abzuführende Wärme aus dem Absorber sinkt. Der ausgetriebene Kältemitteldampf verlässt den Generator und gelangt in den Verflüssiger.

Dort wird das Kältemittel durch Wärmeabfuhr verflüssigt, in einer nachgeschalteten Drossel auf Verdampfungsdruck gebracht und anschließend im Verdampfer unter Aufnahme der Kälteleistung verdampft.

2.2.2 Adsorptionsprozess

Der Adsorptionskälteprozess gehört zur Gruppe der periodisch arbeitenden Sorptionskälteprozesse. Im Vergleich zur Absorption, welche flüssige Absorptionsmittel verwendet, erfolgt die Adsorption des verdampfenden Kältemittels (Adsorbat) durch einen festen Stoff (Adsorbens). Im Bereich der Klimatechnik kommen die Stoffpaarungen Wasser/Zeolith und Wasser/Silicagel zum Einsatz. Das Letztgenannte findet vor allem im größeren Leistungsbereich seine Anwendung (40-500 kW_{Kälte}). Der Aufbau und die Funktion des Adsorptionskälteprozesses soll anhand der Abbildung 5 erklärt werden.

Der Adsorptionskälteprozess besteht im Wesentlichen aus 4 Kammern. Die beiden rechten Kammern sind mit einem festen Sorptionsmittel gefüllt. In den beiden linken Kammern befinden sich der Kondensator und der Verdampfer.

Auf Grund des herrschenden Unterdruckes kommt es schon bei sehr niedrigen Temperaturen zur Verdampfung des Kältemittels. Der Kältemitteldampf gelangt durch ein Ventil in die linke untere Kammer (Adsorber) wo er vom festen Sorptionsmittel (Adsorbens) adsorbiert wird. Die dabei frei werdende Adsorptionenthalpie wird durch ein Kühlwassersystem abgeführt. Zum gleichen Zeitpunkt kommt es in der oberen rechten Kammer zur Austreibung (Desorption) des mit Wasser gesättigten Adsorbens. Dazu wird über einen Heißwasserkreislauf Niedertemperaturwärme zugeführt. Das so entstandene Desorpt wird im Verflüssiger durch Abgabe seiner Kondensationsenthalpie heruntergekühlt und verflüssigt. Das Kältemittel wird anschließend in den Verdampfer zurückgeleitet. Nach Ablauf des beschriebenen Zyklus, mit einer Dauer von ca. 10 Minuten, vertauschen Adsorber und Desorber ihre Funktion und der Prozess kann wieder von vorne beginnen. Durch diesen diskontinuierlichen Betrieb kommt es zu einer periodischen Bereitstellung von Kälte. Dem kann entgegengewirkt werden, indem man zwei Aggregate gegenphasig arbeiten lässt oder das produzierte Kaltwasser zwischenspeichert (Pufferspeicher).

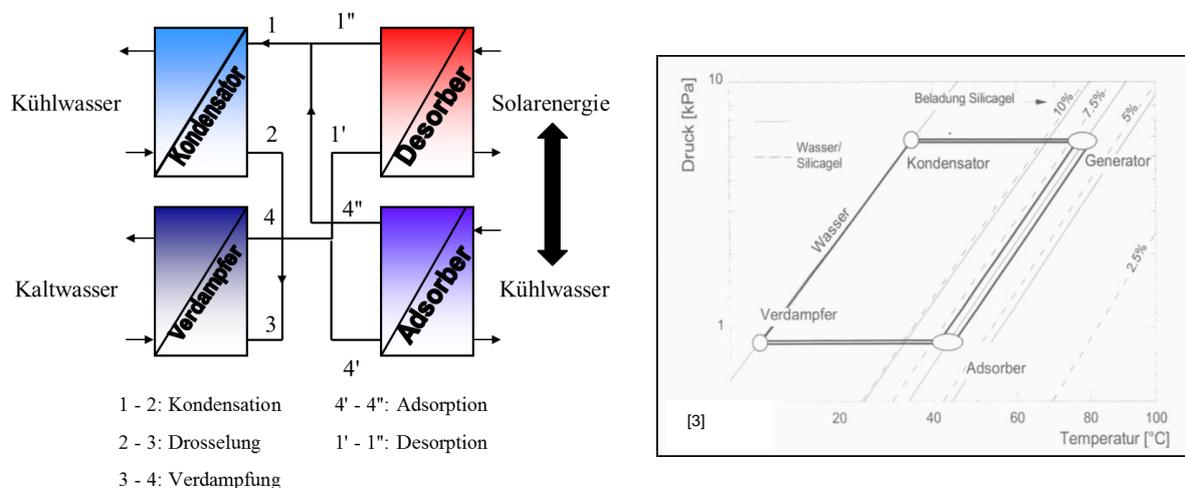


Abbildung 5: Schema eines Adsorptionskälteprozesses mit Isosterendiagramm

2.2.3 DEC-Prozess (Desiccant and Evaporative Cooling)

Die Raumkonditionierung erfolgt normalerweise durch eine konventionelle Klimaanlage in Verbindung mit einer Kälteanlage zur Bereitstellung eines Kaltwassersatzes, welcher die gemeinsame Funktion des Kühlens und Entfeuchtens durch Taupunktunterschreitung an gekühlten Oberflächen übernimmt. Diese Art der Klimatisierung benötigt aber niedrige Verdampfungstemperaturen der Kältemaschine, wodurch es zu einem erhöhten Energieaufwand kommt. Eine Alternative zu dieser konventionellen Technik stellt die DEC – Anlage (Desiccant and Evaporative Cooling – Anlage) dar. Die DEC-Anlage ist ein offener Adsorptionsprozess und wird zur sorptiven Entfeuchtung und adiabaten Befeuchtung (Kühlung) von Luft eingesetzt. Die Trennung der beiden Verfahrensschritte Entfeuchtung und Kühlung macht die Notwendigkeit eines Kaltwassersatzes mit Rückkühlwerk, wie es bei einer konventionellen Klimaanlage der Fall ist, überflüssig. Es sind zwei Arten von DEC-Anlagen zu unterscheiden, die eine mit rotierendem Adsorptionsrad und die andere mit stationärer Adsorptionsspeichermasse. Das Funktionsprinzip eines DEC-Prozesses ist aus der Abbildung 6 zu entnehmen.

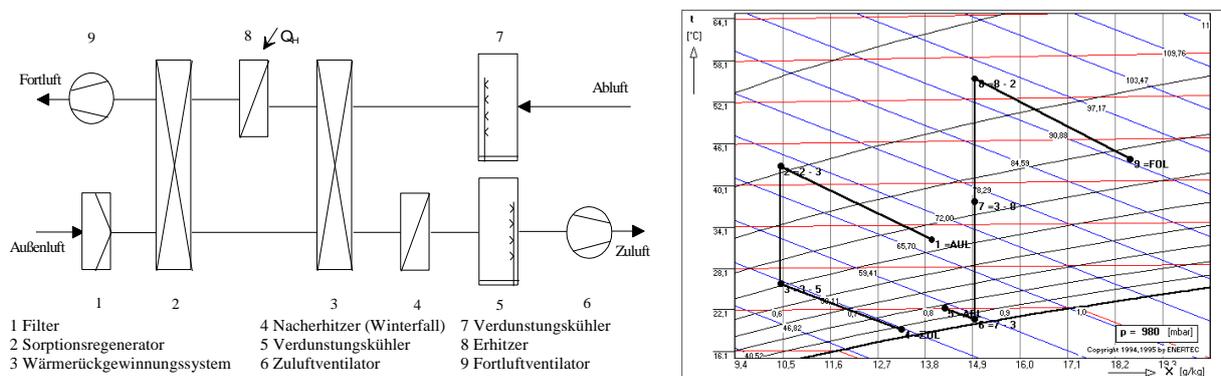


Abbildung 6: Funktionsprinzip eines DEC-Prozesses mit h-x-Diagramm

Die angesaugte, gefilterte Außenluft (1) wird im Sorptionsregenerator (2) entfeuchtet. Die kontinuierliche Entfeuchtung des Luftstromes durch den Sorptionsregenerator bewirkt eine Freisetzung der Kondensationswärme (Adsorption), wodurch es zu einer Erwärmung der Luft kommt. Die getrocknete warme Luft gelangt anschließend in ein Wärmerückgewinnungssystem (3), wo ihre Wärme an die Abluftseite abgegeben wird und sich dabei abkühlt. Für die Funktionserfüllung im Winter ist ein Nacherhitzer (4) vorgesehen. Die weitere Kühlung auf das Niveau der Zulufttemperatur erfolgt in einem geregelten Verdunstungskühler (5). Je nach Außenluftzustand ergibt sich durch die Wirksamkeit der Verdunstungskühlung eine Temperaturabsenkung. Der Zuluftventilator (6) bewirkt eine Erwärmung des Zuluftstromes, welche bei der Ermittlung der Zulufttemperatur zu berücksichtigen ist. Für den im Gegenstrom zur Zuluft geführten Regenerationsluftstrom wird in der Regel die Abluft verwendet. Diese wird zunächst durch einen Verdunstungskühler (7) befeuchtet und abgekühlt. Sie durchströmt anschließend das Wärmerückgewinnungssystem und sorgt dabei für die zuvor besprochene Vorkühlung der Zuluft. Die Abluft wird anschließend in einem Erhitzer (8) auf ein Temperaturniveau gebracht, das die Regeneration des Sorptionsregenerators (Desorption) gewährleistet. Der Fortluftventilator (9) befördert die feuchtkühle Fortluft ins Freie.

2.2.4 Dampfstrahlkälteprozess

Der Dampfstrahlkälteprozess arbeitet nach dem Kompressionsverfahren. Der Prozess besteht aus einem Wärme-Kraftprozess (Rechtsprozess) und einem Kälteprozess (Linksprozess). In Abbildung 7 ist das Schema eines Dampfstrahlkälteprozesses zu sehen.

Im Rechtsprozess wird Treibdampf erzeugt. Dazu wird in einem Kessel durch Wärmezufuhr Kältemittel bei hohem Druck und hoher Temperatur verdampft. Dieser Treibdampf wird dem Dampfstrahlapparat zugeführt und saugt dort den im Verdampfer entstandenen Kältemiteldampf bei niedrigem Druck und niedriger Temperatur ab. Im Strahlapparat kommt es zu einer Vermischung zwischen Treibdampf und Saugdampf. Dieser Mischdampf wird in einem nachgeschalteten Diffusor auf Mitteldruck gebracht. Dieser Mitteldruck muss so hoch liegen, dass im anschließenden Kondensator eine Verflüssigung des Mischdampfes unter Wärmeabgabe an die Umgebung möglich ist.

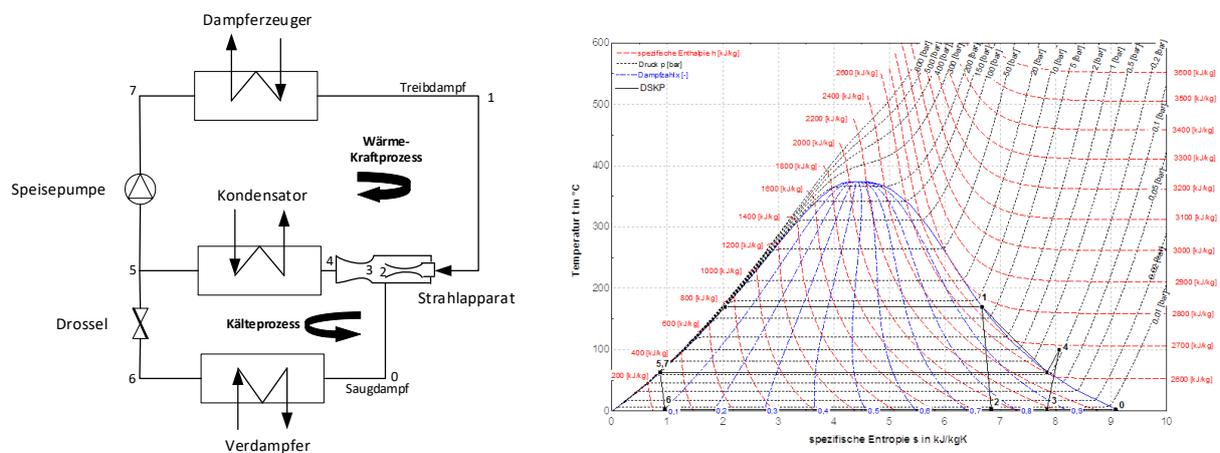


Abbildung 7: Schema eines Dampfstrahlkälteprozesses und T-s-Diagramm

Nach dem Kondensator wird ein Teil des Kondensats gedrosselt und dem Verdampfer zugeführt. Dort kommt es durch Aufnahme von Wärme zur Verdampfung des Kältemittels (Saugdampf). Das restliche Kondensat wird mittels einer Pumpe auf Kesseldruck gebracht und erneut dem Heizkessel zugeführt.

Beide Kreisläufe werden mit dem gleichen Medium betrieben, vorzugsweise Wasser, vereinzelt auch mit Propan. Der Strahlapparat setzt sehr große Dampfmassen um. Dies bedeutet für den Dampfstrahlprozess, dass er mit sehr niedrigem Verdampfungsdruck (7-12 mbar) arbeitet.

Eine Weiterentwicklung des Dampfstrahlkälteprozesses stellt der SETE-Prozess dar. Der SETE-Prozess (Solare elektrische und thermische Energiebereitstellung) beruht auf einem patentierten Verfahren [4] sowie einer kompakten Energiebereitstellungsanlage, die Objekte mit Strom, Wärme und Kälte versorgt. Dabei wird das Arbeitsmedium durch Anbindung eines Sonnenkollektors verdampft und der Frischdampf wird sowohl einem Dampfschraubenmotor zur Stromerzeugung als auch einem Strahlverdichter zur Wärme- und Kälteerzeugung bereitgestellt. Die Wärmequelle Dampf kann nicht nur solarthermisch erzeugt werden, sondern in Form von Abdampf oder auch von einem Biomasseheizwerk zur Verfügung gestellt werden. Daher ergibt sich ein breites Anwendungsgebiet für den neuartigen SETE-Prozess [5].

3 Anwendung

3.1 Spezifische Investitionskosten

Um einen Überblick über die Investitionskosten von Sorptionskältemaschinen zu bekommen, sind in Abbildung 8 die spezifischen Investitionskosten der verschiedenen Sorptionskältemaschinen in Abhängigkeit von der Kältenennleistung, in einem Bereich von 10 kW bis 1000 kW, dargestellt. Die im Diagramm angegebenen Kosten sind als Richtwerte zu verstehen und stützen sich auf Herstellerdaten. Im Vergleich dazu sind auch die spezifischen Investitionskosten von elektrischbetriebenen Kompressionskältemaschinen (elektbetr. KKM), welche die niedrigsten Kosten ergeben, dargestellt.

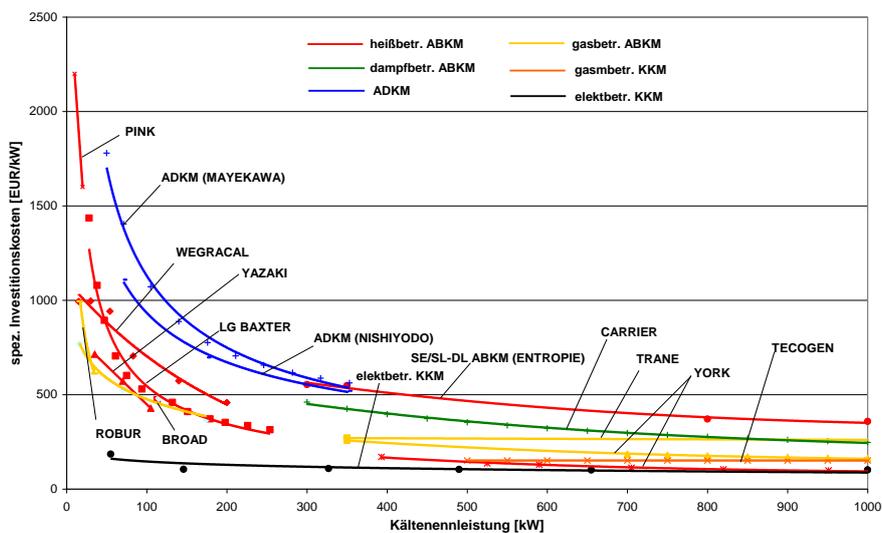


Abbildung 8: Spezifische Investitionskosten von Sorptionskältemaschinen (lt. Hersteller)

Aus der Abbildung 8 ist zu erkennen, dass die heißwasserbetriebenen Absorptionskältemaschinen (heißbetr. ABKM) im kleinen Leistungsbereich (ca. unter 300 kW_{Kälte}) erheblich hohe spezifische Investitionskosten ergeben. Auch die Adsorptionskältemaschinen (ADKM), die nur im unteren Leistungsbereich erhältlich sind, weisen hohe spezifische Investitionskosten auf. Die zweistufige SE/SL-DL- Absorptionskältemaschinen (SE/SL-DL-ABKM) werden laut Hersteller nur mehr ab einer Kälteleistung von 500 kW konzipiert, da sonst die Herstellungskosten zu hoch wären. Die heißwasserbetriebenen Absorptionskältemaschinen weisen im höheren Leistungsbereich (ab ca. 400 kW_{Kälte}) bei den Sorptionskältemaschinen die niedrigsten spezifischen Investitionskosten auf, gefolgt von den gasbetriebenen (gasbetr.) und den dampfbetriebenen Absorptionskältemaschinen (dampfbetr. ABKM). Die gasmotorbetriebenen Kompressionskältemaschinen bewegen sich mit ihren spezifischen Investitionskosten zwischen den heißwasser- und gasbetriebenen Absorptionskältemaschinen.

Generell kann man die Aussage treffen, dass bei gleicher Kälteleistung mit zunehmender Heißwassereintritts- und Kaltwasseraustrittstemperatur sowie abnehmender Kühlwassereintrittstemperatur die Investitionskosten der Sorptionskältemaschinen abnehmen.

3.2 Vor- und Nachteile

Einer der großen Vorteile von Sorptionsanlagen zur Kältebereitstellung gegenüber konventioneller Technik liegt darin, dass Abwärme aus technologischen Prozessen und Wärme aus Kopplungsprozessen (BHKW, FHKW) sowie Solarwärme und Geothermie genutzt werden kann, die verwendeten Stoffpaare (Kältemittel/ Lösungsmittel) keine Umweltbelastung darstellen, sich niedrigere Wartungskosten gegenüber Kompressionskälteanlagen ergeben, sowie die Betriebskosten niedriger als bei einer konventionellen Anlage sein können.

Um den Primärenergienutzungsgrad zu erhöhen, stellt der Einsatz von Gas als direkte Antriebsquelle zur Kältebereitstellung (gasmotorbetriebene Kompressionskälteanlagen und gasbetriebene Absorptionsanlagen) eine Alternative zur konventionellen Kompressionstechnologie dar. Zudem kommt es dadurch auch zur Entlastung der Stromnetze in Spitzenlastzeiten (vorwiegend im Sommer).

Nachteile liegen im großen Platzbedarf, im hohen Gewicht sowie in den hohen Rückkühlleistungen solcher Anlagen. Auch die Investitionskosten sind höher als bei Kompressionskälteanlagen. Diese hohen Investitionskosten können nur durch niedrige verbrauchsgebundenen Kosten kompensiert werden, d.h. die Antriebsenergie muss günstig zur Verfügung stehen. Eine Ausnahme im Bezug auf die Investitionskosten bilden DEC-Anlagen. Sofern nicht zu hohe Luftvolumendurchsätze gefordert sind, ergeben sich niedrigere Investitionskosten im Vergleich zur konventionellen Technik (Kaltwassersatz in Verbindung mit einer Vollklimaanlage). Bei DEC-Anlagen können jedoch eventuell bei hohen Außenluftfeuchten und hohen Temperaturen die geforderten Raumlufzustände nicht mehr eingehalten werden.

3.3 Beispiele

Nachfolgend werden an Hand von zwei Kühlkonzepten die Möglichkeiten der Einbindung unterschiedlicher Kältebereitstellungsverfahren aufgezeigt.

3.3.1 KWKK-Anlage - Fernwärmeeinbindung

Durch die Einbindung von Sorptionsanlagen in Heißwassersysteme zur Bereitstellung von Kälte und Klimakälte ergibt sich eine höhere Auslastung von Nah- und Fernwärmesystemen sowie der in das Netz einspeisenden Wärmeerzeugeranlagen (Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen KWK-Anlagen). Vor allem in den Sommermonaten wo die Auslastung solcher Systeme hauptsächlich durch die Bereitstellung von Brauchwasser alleine gegeben ist, ist der Bedarf an Kühlung sehr groß.

Für die Bereitstellung von Klimakälte aus Nah- und Fernwärme, muss die Wärmeübergabestation und die Hauszentrale beim Wärme(Klimakälte-)kunden adaptiert werden. Darüber soll die Abbildung 9 Aufschluss geben, worin verschiedene mögliche Schaltungsvarianten für die Einbindung von Sorptionsanlagen, welche für die Klimakälteerzeugung relevant sind, in das Wärmenetz aufgezeigt werden. Nach dem Wärmetauscher der Hauszentrale kommt es zu einer Verteilung der Wärme für die Bereitstellung von Brauchwasser, Heiz- und Antriebswärme für die Sorptionsanlagen.

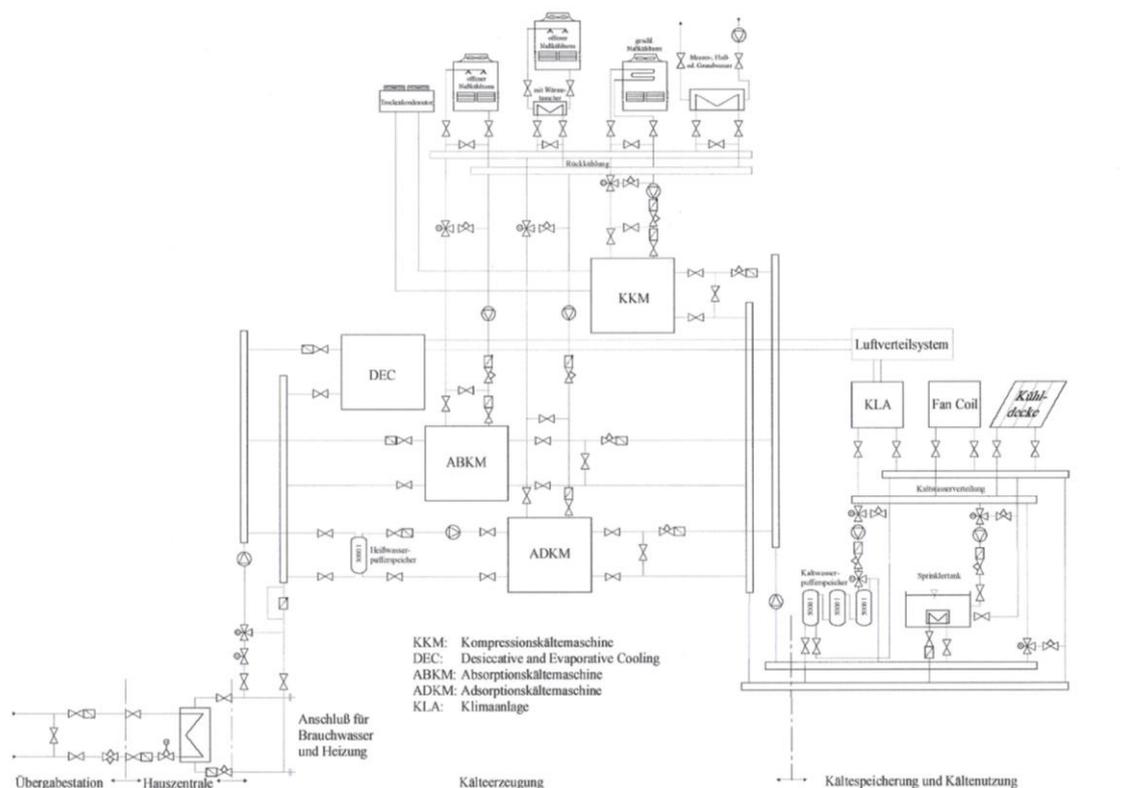


Abbildung 9: Technische Einbindung von Sorptionsanlagen in ein Fernwärmesystem [6]

Die Adsorptionskältemaschine benötigt im Gegensatz zur DEC-Anlage und Absorptionskältemaschine einen Heißwasserpufferspeicher. Dies ist auf die diskontinuierliche Arbeitsweise des Adsorptionsprozesses zurückzuführen. Es ist ein Heißwasserspeicher von mindestens 3000 l erforderlich. Damit die Auskühlung (Spreizung) des Heißwassers bzw. der Fernwärme möglichst hoch ist, besteht auch die Möglichkeit, sofern eine große Brauchwasserabnahme vorliegt, den Heißwasserkreislauf für den Antrieb von Sorptionsanlagen und für die Brauchwasserbereitstellung seriell zu schalten. Als Alternative zur sorptiven Klimakälteerzeugung ist in Abbildung 9 auch die Schaltung einer Kompressionskälteanlage aufgezeigt. Um Lastschwankungen des Klimakältebedarfs auszugleichen und mit kleiner dimensionierten Klimakälteanlagen das Auslangen zu finden, ist es von Vorteil eine Kaltwasserspeicherung vorzunehmen. Dazu gibt es die Möglichkeit der Kaltwasserpufferspeicherung bzw. der Speicherung des Kaltwassers in einem Sprinklertank, sofern einer vorhanden bzw. in Planung ist. Je nach Art der Kältedienstleistung besteht die Möglichkeit nach der Kaltwasserverteilung mit dem erzeugten Kaltwasser auf eine Klimaanlage, FanCoil oder Kühldecke zu fahren. Eine Ausnahme bildet die DEC-Anlage, welche eine integrierte Klimaanlage darstellt und somit mit der konditionierten Luft direkt in ein Luftverteilsystem eingespeist werden kann. Je nach Sorptionsanlage gibt es verschiedene Varianten der Wärmerückkühlung. Die DEC-Anlage besitzt eine integrierte Rückkühlung und kommt somit ohne Kühlturm aus. Für eine Adsorptionsanlage kommt ein geschlossener Nasskühlturm bzw. ein offener Nasskühlturm mit Wärmetauscher auf Grund der Verschmutzungsgefahr in Frage. Bei der Absorptionsanlage findet man, sofern das Wasser nicht allzu sehr verschmutzt ist, mit einem offenen Nasskühlturm das Auslangen. Die Effizienz der Kältebereitstellung wird besonders begünstigt,

DEC-Anlage (Desiccant Evaporative Cooling – Anlage), vorgesehen, welche als Antriebsenergie Wärme (Sonnenenergie) benötigt und im Gegensatz zu konventionellen Vollklimaanlagen ohne Kaltwassersatz und Rückkühlturm betrieben wird. Damit können wiederum Investitionskosten eingespart werden. Ein weiterer Vorteil der DEC – Anlage liegt darin, dass in der Übergangszeit die Anlage mit freier Kühlung und im Winter im Wärmerückgewinnungsmodus für latente und sensible Wärme betrieben werden kann. Damit ist eine Einsparung von Betriebskosten gegeben. Als Wärmequelle für die DEC-Anlage dient ein Speicher, welcher von einer Solaranlage - deren Kollektoren an der Dachsüdseite des Gebäudes montiert sind - und von einem Gasbrennwertkessel gespeist wird. Dabei dient der Kessel zur Abdeckung der Spitzenlast bzw. als Wärmebereitsteller in der Zeit wo keine solaren Gewinne verbucht werden können. Der Speicher dient wiederum dazu, dass die Dimensionierung der Solar-/Kesselanlage klein gehalten werden kann. Für die Unterrichtsräume und die Mediathek wird auf Grund der Personenanzahl und der vorhanden Speichermassen keine Klimatisierung vorgesehen.

4 Schlusswort

Es gibt eine Vielzahl von Kältebereitungsverfahren. Neben der konventionellen Kältebereitstellung durch Kompressionsprozesse, gibt es die Alternative der Sorptionstechnologie, die durch den Einsatz von natürlichen Arbeitsstoffen ein hohes Substitutionspotential von Treibhausgasen aufweist und somit auch einem modernen energie- und umweltpolitischen Denken gerecht wird.

Zum Antrieb werden dabei anstatt reiner Exergie in Form von elektrischem Strom Wärmequellen wie Wärme aus Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungs-Anlagen (FHKW, BHKW), Solarwärme und Geothermie sowie Abwärme aus technologischen Prozessen verwendet.

Durch die Einbindung von Sorptionsanlagen in Heißwassersysteme zur Bereitstellung von Kälte und Klimakälte ergibt sich eine höhere Auslastung von Nah- und Fernwärmesystemen sowie der in das Netz einspeisenden Wärmeerzeugeranlagen (Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen KWK-Anlagen). Vor allem in den Sommermonaten wo die Auslastung solcher Systeme hauptsächlich durch die Bereitstellung von Brauchwasser alleine gegeben ist, ist der Bedarf an Kühlung sehr groß. Auf Grund der zeitlichen Kohärenz von Kühlbedarf und solarem Angebot bietet es sich auch an Solarwärme in den Sommermonaten für den Antrieb von Sorptionsanlagen zu nutzen.

[1] Krottil, R., 2007: Trends in der Gebäudetechnik – Innovative Heiz- und Kühlkonzepte, Vortrag am Planer-Kolloquium „Haustechnik“, November 2007, Dresden

[2] Niebergall, W., 1950: Beitrag zur Geschichte der Absorptions-Kälteanlagen, Allgemeine Wärmetechnik, Dissen Teutoburger Wald (Deutschland), Jahrgang 1, S. 139 – 143

[3] Schweigler, C., 1998: Konzepte zur Erzeugung von Klimakälte aus Niedertemperaturwärme, 33. Sitzung des AGFW-Forschungsbeirats, 3. Dezember 1998 in Frankfurt/Main

[4] R. Krottil, Ch. Pinter, „Verfahren und Anlage zur gekoppelten solarthermischen Strom-, Wärme- und Kälteerzeugung“, Österreich Patent AT507218B1, 05.01.2009.

[5] Krottil, R., Pinter, Ch.: Solare elektrische und thermische Energiebereitstellung „SETE - Prozess“, 15. Symposium Energieinnovation – Neue Energie für unser bewegtes Europa, TU Graz, 14.-16. Februar 2018

- [6] Krottil, R., 2001: Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung im Fernwärmesystem Graz, Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Graz
- [7] Krottil, R., 2006: Intelligente Klimakälteerzeugung aus Wärme, Posterpräsentation, WORLD SUSTAINABLE ENERGY DAYS 2006 RENEWABLE HEATING & COOLING, März 2006, Wels