

Anwendungsmöglichkeiten und Einsatzgrenzen von

# Lithiumbromid/Wasser-Absorptionskältemaschinen\*

Klaus Hartmann, München

*Die in den letzten Jahren stark veränderte Energiesituation läßt vermuten, daß elektrische Energie nicht mehr im gewünschten Maße zur Verfügung stehen wird. Es ist daher erforderlich, bei jedem Anwendungsfall vorurteilslos zu prüfen, ob das Ziel nicht auch ohne Inanspruchnahme von Elektrizität erreicht werden kann. Für Klimaanlageanlagen bieten sich dafür Wasser/Lithiumbromid-Absorptionskältemaschinen an.*

Sicherlich zu Unrecht steht die Absorptionskältemaschine in dem Ruf, die Energie schlecht zu verwerten. Auf den ersten Blick scheinen ihre Kritiker recht zu haben. Um 1 kW Kälte zu erzeugen, müssen bei einer LiBr-Absorptionsmaschine in Standardausführung etwa 1,5 kW Wärme aufgewendet werden. Mit Doppel-Effekt-Generator 1,0 kW und bei direkter Feuerung mittels Gas oder Öl 0,75 kW. Bei Kompressionskälteanlagen ist hingegen nur eine äquivalente Wärmemenge von ca. 0,25 kW in Form von elektrischem Strom zur Verfügung zu stellen.

\* Als Vortrag gehalten auf der Deutschen Kälte- und Klimatagung 1997 vom 19.-21. 11. 1997 in Hamburg.

Nur zu leicht wird allerdings bei dieser Gegenüberstellung vergessen, daß die verschiedenen Energieformen durchaus nicht gleichwertig sind. Es ist physikalisch bedingt, daß die hochwertige elektrische Energie mit besserem Wirkungsgrad in andere Energieformen umgesetzt werden kann als z. B. die Wärme. Die Kompressionskältemaschine bezieht für ihren Elektromotor hochwertige elektrische Energie aus dem Netz, wobei die Umsetzung bei der Arbeitsmaschine Elektromotor selbstverständlich mit günstigen Wirkungsgraden erfolgen kann. Die elektrische Energie muß jedoch meistens erst mit Hilfe von thermodynamischen Prozessen, die keineswegs so wirtschaftlich ablaufen, erzeugt werden.

## Entwicklung der Absorptionskältemaschine

Die ältesten Absorptionskältemaschinen wurden nicht für die Klima-, sondern für die Kältetechnik entwickelt. Bereits um die Jahrhundertwende baute man Absorptionsmaschinen, die mit dem Stoffpaar Ammoniak-Wasser arbeiteten. In der Kältetechnik hat dieses Arbeitsmittel noch immer seinen Platz, und solche Anlagen werden heute beispielsweise zur Gefrier- und Trocknung eingesetzt. Es handelt sich dabei um baulich große Anlagen, bei denen eine Reihe von Wärmetauschern, Rektifikationssäulen usw. zusammenarbeiten. Teilweise werden diese Anlagen sogar im Freien aufgestellt, z. B. in chemischen Fabriken. Abgesehen davon, daß bei diesen Anlagen Ammoniak verwendet wird, sind sie vor allem aus räumlichen Gründen in der Klimatechnik selten einzusetzen. Im Klimatemperaturbereich sind sie außerdem auch nicht mehr konkurrenz-

zum Autor

Ing. (grad.)  
Klaus Hartmann,  
Direktor Quality  
und Training,  
Carrier GmbH,  
Unterschleißheim



fähig. Bei der Entwicklung von Absorptionskältemaschinen für die Klimatechnik mußten deshalb andere Wege beschritten werden.

Als Carrier im Jahre 1945 die erste Lithiumbromid-Absorptionskältemaschine vorstellen konnte, war die Fachwelt besonders von den geringen Abmessungen überrascht; eine derartige Leistungsdichte war bis dahin unerreicht. Bereits bei der ersten Lithiumbromid-Absorptionskältemaschine wurden die unter niedrigem Druck stehenden Apparateile (Verdampfer und Absorber) und die unter höherem Druck arbeitenden Elemente (Generator und Verflüssiger) in je einen gemeinsamen Kessel zusammengefaßt.

Es sei hier erwähnt, daß der absolute Druck im Verdampfer und im Absorber bei etwa 8 mbar (absolut) liegt; im Austreiber und Verflüssiger hingegen beträgt der absolute Druck ungefähr 80 bis 100 mbar (absolut). Mit anderen Worten: der Druck liegt im Verdampfer bei ca.  $\frac{1}{100}$  Atmo-

sphäre, während im Verflüssiger Drücke von etwa  $1/_{10}$  Atmosphäre auftreten.

Bei der Konstruktion, dem Bau und der Wartung von Absorptionskältemaschinen ist es daher ein Hauptfordernis, die Dichtheit des Systems sicherzustellen, um Lufteinbrüche zu verhindern. Die erste LiBr-Absorptionskältemaschine konnte in dieser Hinsicht noch nicht als Optimum gelten. In realistischer Einschätzung der damaligen technischen Möglichkeiten wurden jedoch die Werkstoffe so gewählt, daß diese Maschinen durchaus erfolgreich waren und sich ihren Markt sichern konnten.

Gegen die Korrosion wurden dem Lithiumbromid Inhibitoren beigegeben; daran hat sich bis heute nichts geändert, obwohl man mittlerweile zu anderen Chemikalien übergegangen ist. Bei den ersten Maschinen wurde das vom Verbraucher kommende Kaltwasser als Kältemittel benutzt und im Inneren des unter hohem Vakuum stehenden unteren Kessels versprüht. Das nicht verdampfte Wasser wurde in einer Fangschale aufgefangen und wieder zum Verbraucher gepumpt.

Die Verwendung des Klima-Wassers als Kältemittel ist wärmetechnisch günstig zu nennen, da ein Wärmeübergang (der zwischen Kältemittel und Kälte Träger) wegfällt. Andererseits werden hohe Anforderungen an die Dichtheit des gesamten Kaltwassersystems gestellt. Interessanterweise war der für die Entlüftungsanlage notwendige Motor stärker als der für die Lösungspumpe. Wegen der Dichtheit ging man bald dazu über, Kaltwasser und Kältemittel voneinander zu trennen. Damit kann das Kaltwassernetz des Verbrauchers in der üblichen Weise ausgeführt werden, und es sind von dieser Seite her keine Lufteinbrüche zu befürchten.

Um die Abhängigkeit gegenüber Luft einbrüchen aus dem Kaltwassernetz zu vermeiden, wurde also ein Wärmeaustauscher Kältemittel/Kaltwasser eingeführt. Es wurde die Funktionsweise erreicht, die auch heute noch gültig ist, wenn auch bei moderneren Maschinen die Wärmeaustauscher äußerlich anders aussehen und weiter optimiert sind.

### Energiewertigkeit der LiBr-Absorptionskältemaschine

Die Kompressionskältemaschine bezieht mit Hilfe ihres Elektromotors hochwertige elektrische Leistung aus dem Netz, wobei die Umsetzung wie bei der Arbeitsmaschine Elektromotor selbstverständlich mit günstigen Wirkungsgraden erfolgen kann. Die elektrische Energie andererseits muß jedoch meistens erst mit Hilfe von thermodynamischen Prozessen erzeugt werden, die keineswegs so wirtschaftlich ablaufen.

Weitaus die meiste Energie wird in der Bundesrepublik aus thermischen Kraftwerken mit Hilfe von fossilen Brennstoffen erzeugt. Die Kesselwirkungsgrade betragen hierbei oft mehr als 90 %. Auch die Turbinenwirkungsgrade liegen, sofern die Maschinengröße nicht zu klein ist, günstig; jedoch läßt sich das physikalische Gesetz nicht aus der Welt schaffen, daß nicht die gesamte Wärmemenge, die im Heizwert des Brennstoffes enthalten ist, ausgenutzt werden kann. Man setzt Wärme bei einer höheren Temperatur frei und muß Wärme bei einer niedriger gelegenen Temperatur abführen. Es gelingt nur, einen Teil der im Brennstoff enthaltenen Energie nutzbar zu machen.

Der bestmögliche Wirkungsgrad einer Umsetzung könnte im idealen Carnot-Prozeß erreicht werden:

$$\epsilon_c = \frac{T_o}{T - T_o}$$

Bei einer Frischdampf temperatur von 510 °C, die nur bei hochwertigen Industriekraftwerken oder bei EVU's erreicht werden dürfte, und bei einer Verflüssigungstemperatur von 38 °C, die im Sommer einen realistischen Wert darstellt, erhält man folgende Leistungsziffer nach

Carnot:

$$\epsilon_c = 0,66$$

Auch bei einem vollkommenen Prozeß zwischen diesen Temperaturen kann die Umsetzung also nicht mit einem besseren Wirkungsgrad erfolgen. Mögliche Werte liegen eher in der Größenordnung von 0,4. Wird zum Carnot-Wirkungsgrad von 0,66 noch ein Kesselwirkungsgrad von 0,9, ein Turbinenwirkungsgrad von 0,85 sowie ein Generatorwirkungsgrad von 0,95 dazuge-rechnet, so ermittelt sich der Gesamt-Wirkungsgrad zu 0,478.

Bei dieser Rechnung wurde vom Carnot-Wirkungsgrad, also von einem idealen Arbeitsmittel ausgegangen. Realistischere Werte ausgeführter Anlagen kann man den Herstellerkatalogen der Turbinenbauer entnehmen. Beispielsweise wird dort als spezifischer Wärmeverbrauch eines Turbosatzes, bestehend aus einer Kondensationsturbine von von 40 MW, die bei einem Frischdampfdruck von 90 bar und einer Frischdampf temperatur von 510 °C arbeitet, deren Kondensator über Kühlwasser von 25 °C verfügt und einen Kondensator-druck von 0,66 bar aufrechterhalten kann, ein spezifischer Wärmeverbrauch des Turbosatzes von 2,66 kW/kW angegeben. Der Gesamtwirkungsgrad errechnet sich damit zu 0,376.

Die erzeugte elektrische Energie muß anschließend hochtransformiert, durch Überland-Hochspannungsleitungen geleitet und wieder heruntergespannt werden, wofür noch 10 % Verlust angenommen werden soll. Der Gesamt-Wirkungsgrad von der Erzeugung des Stromes bis zu den Klemmen des Verbrauchers beträgt somit:  $0,376 \times 0,9 = 0,338$ .

In Abb. 1 sind die wichtigsten Vergleichsdaten der drei verschiedenen Ausführungsformen heute üblicher Absorptionskältemaschinen zusammengestellt.

Type	Wärmequelle	Wärmeniveau	Nominal-Lstg. (kW)	spez. Verbrauch (kW/kW)
Standard	Dampf	98 kPa	250–5500	1,5
	Heißwasser	132°C		
Doppel-Effekt	Dampf	790 kPa	300–4000	1,0
Direktbefeuert	Öl	–	100–4000	0,75
	Gas			

Abb. 1 Vergleichsdaten verschiedener Ausführungsformen üblicher LiBr-Absorptionsmaschinen

Hinsichtlich Energiewertigkeits-Vergleichen ist lediglich die letzte Spalte interessant. Für eine gut ausgelegte Kompressionskältemaschine werden etwa 0,25 kW Auftriebsleistung pro 1 kW Kälteleistung benötigt. Gemäß Aufstellung schneiden Absorptionskältemaschinen also relativ schlecht ab; doch wenn der Gesamtwirkungsgrad bis zu den Klemmen des Verbrauchers von  $\frac{1}{3}$  berücksichtigt wird, ändert sich das Bild erheblich, und es sind zumindest die direktgefeuerten Maschinen annähernd äquivalent.

Wie man sieht, rücken beim korrekten Vergleich die Gesamt-Wirkungsgrade beider Verfahren wesentlich näher zusammen, wenn auch die Kompressionskälteanlage noch ein leichtes Plus behält. Die besseren Teillast-Wirkungsgrade bei Absorptionskältemaschinen nivellieren diese Unterschiede noch weit mehr. Andererseits hat die Absorptionskältemaschine der Kompressionskältemaschine sogar einiges voraus.

Kann die Kompressionskälteanlage nur mit hochwertiger Energie betrieben werden (der Strom ist nur dann wirtschaftlich zu erzeugen, wenn hohe Energiegefälle zur Verfügung stehen; bei Direktantrieb mittels Kraftmaschinen, wie Diesel- oder Gasmotoren oder Dampfturbinen, gilt sinngemäß das gleiche), so gibt sich die Absorptionskältemaschine durchaus mit Abfallwärme nicht zu tiefer Temperatur zufrieden. Es ist z. B. sehr sinnvoll, mittels thermischer Kraftwerke (Dampf- oder Gasturbine) Strom zu erzeugen und die auf einem noch verwertbaren Niveau gehaltene Wärme in Form von Heizdampf oder Heißwasser auszunutzen. Hierfür sind die Absorptionskältemaschinen hervorragend geeignet. Sie können bei Heißwasser ein Temperaturgefälle von 150–135 °C und etwa 110 °C Rücklauftemperatur verarbeiten. Falls Dampf zur Verfügung steht, genügt ein Frischdampfdruck von 1 bar Überdruck.

Sowohl der in den meisten Großstädten von Heizkraftwerken angebotene Ferndampf, als auch Heißwasser sind für Absorptionsmaschinen gut geeignet, und es werden auch bereits einige Absorptionsmaschinen über die Heizkraftwerke versorgt. Sogar niedrigere Dampfdrücke von 0,5 bar oder darunter können verwendet werden, allerdings müssen die Maschinen dann überdimensioniert werden.

Auf die Unzulässigkeit eines Vergleiches der Leistungsziffern zwischen Kompressionskälteanlage und Absorptionskältemaschine wird u. a. auch im Plankschen Handbuch der Kältetechnik hingewiesen. Ähnliche Mißverständnisse treten auf,

wenn der Kühlwasserverbrauch von Absorptionskältemaschinen mit dem Kühlwasserverbrauch von Kompressionskälteanlagen verglichen wird. Auch hierbei darf nicht vergessen werden, daß die thermischen, und erst recht die thermonuklearen, Kraftwerke sehr viel Kühlwasser benötigen, da ja die Abwärme über das Kühlwasser an die Umgebung abgeführt werden muß. Man verwendet dafür entweder Flußwasser oder Kühltürme, in seltenen Fällen auch luftgekühlte Verflüssiger.

Da bei den Absorptionskältemaschinen die Wärmeenergie dazu benutzt wird, Wärme vom Verdampfer wegzutransportieren, muß das Kühlwasser selbstverständlich nicht nur die Verdampferwärme, sondern zusätzlich die hineingesteckte Wärmeenergie abführen. Dafür braucht diese Wärmemenge jedoch nicht im Kraftwerk entfernt zu werden, so daß die Umweltbelastung in diesem Fall nicht größer ist als wenn die Brennstoffwärme im Kraftwerk in elektrische Energie verwandelt worden wäre.

Der Betreiber einer Absorptionskältemaschine muß sich mit der höheren Abwärme abfinden. Zur Linderung des Problems trägt allerdings bei, daß die Absorptionskälteanlagen mit größerer Temperaturspreizung des Kühlwassers betrieben werden und die Kühltürme daher mit größeren Temperaturgefällen arbeiten können.

### Einsatzgebiete

Die Frage nach dem wirtschaftlichen Einsatz einer Absorptionsmaschine wird wie bei allen anderen Kältemaschinenarten von einer gründlichen Analyse des jeweiligen Bedarfsfalls bestimmt. Grundsätzlich kann man davon ausgehen, daß Absorptionsmaschinen dann vorteilhaft eingesetzt werden, wenn die Installations- und Betriebskosten günstig sind. Z. B. ist dies der Fall, wenn vorhandener Dampf aus einem Kraft- oder Fernheizwerk preisgünstig bezogen werden kann und dadurch kostspielige Anschaffungen von Generatoren oder Trafo-Stationen entfallen, wie sie für elektrisch betriebene Kältemaschinen notwendig sind. Oftmals ist selbst die Erweiterung von bestehenden Kraftstationen teurer als der Betrieb einer Absorptionsmaschine.

### Abwärme

Günstige Betriebskosten sind erreichbar, wenn Abwärme aus Industrieprozessen oder anderen Wärmeerzeugungsanlagen zum Betrieb einer Absorptionskältemaschine genutzt werden kann. Typische Einsatzgebiete mit Überschußwärme im Sommer sind u. a.:

- Krankenhäuser,
- Druckereien,
- verschiedene Industriebetriebe.

### Abgasnutzung

In der chemischen und petrochemischen Industrie ist ein breites Anwendungsfeld für die Absorptionsmaschine vorhanden bzw. könnte sie dort preiswert ausgenutzt werden. Beispiele gibt es bereits bei folgenden Prozessen:

- Flüssiggas-Verflüssigung oder -Kühlung,
- Schwefelsäure-Alkylierungsgeräte,
- Abgasbehandlung bzw. -kühlung,
- Abgasverwertung,
- Überkopf-Verflüssiger.

### Blockheizkraftwerke

Blockheizkraftwerke in Verbindung mit Absorptionskältemaschinen erfüllen die berechtigten Forderungen nach umweltfreundlichen und energetisch optimalen Systemlösungen. Beim integrierten Energiemanagement sind keine Strategien gefragt, die sich lediglich am Kältebedarf orientieren, sondern globale Konzepte müssen die Energieprofile von Kälte, Wärme und Strom in wettbewerbs- und bedarfsgerechter Weise ganzjährig abdecken können. Die kundenspezifischen Tarife und Voraussetzungen sind dabei zu berücksichtigen.

Je nach Gebäudetyp und Lastprofil des Kältebedarfs können noch bessere Leistungszahlen bzw. kürzere Amortisationszeiten erreicht werden, wenn zusätzlich noch eine Eisspeicheranlage integriert wird, die billige Nachtstromtarife zur Bunkerung von Kälteleistung ausnutzt. Die Entscheidung für ein Blockheizkraftwerk ist jedoch nicht nur von Betriebskostenüberlegungen abhängig. Beim neuen Großflughafen München II beispielsweise stand die unbedingte Notwendigkeit gesicherter Verfügbarkeit elektrischer Energie im Vordergrund. Dementsprechend wurde auch die Kältezentrale konzipiert. Die Abwärme der Gasmotoren des Blockheizkraftwerks nutzt man in zwei Absorptionskältemaschinen zur Abdeckung der Grundlast des Kältebedarfs im Flughafenkomplex. Reicht die Kälteleistung nicht mehr aus, stehen drei Turbokältemaschinen für die Spitzenlast abrufbereit in Reserve.

**Absorptionsmaschine als Wärmepumpe**

**1. Einstufiger Generator**

Eine spezielle Anwendung der Lithiumbromid-Absorptionskältemaschine ist der Einsatz als Wärmepumpe. Hier gelten besondere Anforderungen, und jeder Bedarfsfall sollte sinnvollerweise speziell nachgerechnet werden. Je nach vorhandenem Temperaturgefälle können Heizwasservorlauftemperaturen von mehr als 70 °C erzielt werden.

**2. Direktgefeuerter Generator**

Erheblich bessere Wirkungsgrade können bei den Absorptionsmaschinen mit direktgefeuerten Generator erreicht werden. Je nach Temperatur der Heiz- bzw. Kühlmedien ist die wirtschaftliche Betriebsweise entsprechend unterschiedlich, und generelle Zahlenangaben sind daher unzuverlässig.

**3. Antrieb durch Solarwärme**

Lithiumbromid-Absorptionskältemaschinen sind auch schon erfolgreich in Solaranlagen eingesetzt worden. Es muß jedoch beachtet werden, daß bei Warmwassertemperaturen von üblicherweise 85 °C Eintritt bzw. 80 °C Austritt die Kälteleistung auf mehr als ein Drittel gegenüber den normalen Heizwassertemperaturen zurückgeht. Die Maschinen werden also vergleichsweise groß und damit relativ teuer, und die erhöhten Aufwendungen für den Kapitaldienst beeinflussen dementsprechend die Wirtschaftlichkeitsberechnungen.

**Einsatzgrenzen von LiBr-Absorptionskältemaschinen**

Die tiefste Kaltwassereintrittstemperatur, für die Lithiumbromid-Absorptionskältemaschinen ausgelegt werden können, beträgt 4,5 °C. Der Grund dafür liegt im verwendeten Kältemittel, dem Wasser, das bei 0 °C gefriert. Die Verdampfungstemperatur muß folglich höher sein, und die Kaltwassertemperatur liegt naturgemäß noch darüber.

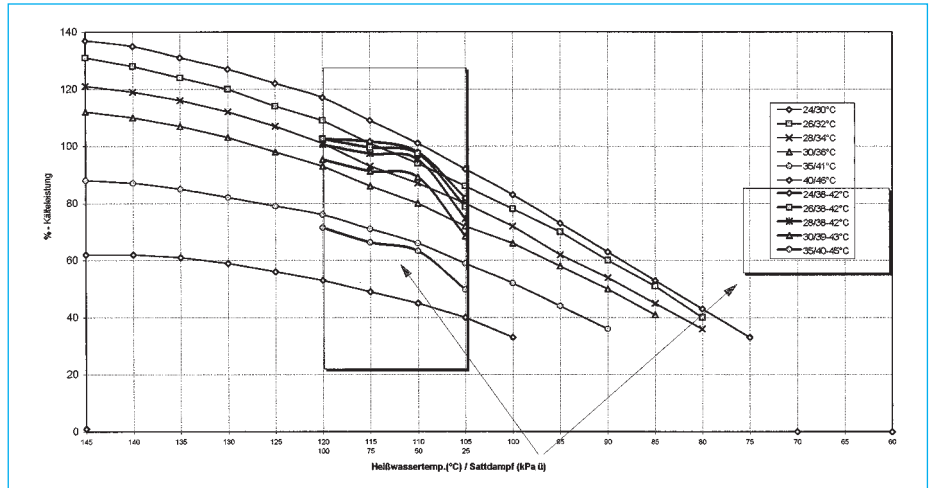


Abb. 2 Prozentuale Leistungsänderung bei unterschiedlichen Heiß- bzw. Kühlwassertemperaturen

Die höchste Kühlwassereintrittstemperatur sollte 35 °C nicht überschreiten, ein Wert also, der bei Kühlturbetrieb in unseren Breitengraden so gut wie nie vorkommen dürfte. Die Einsatzgrenzen bei den Heizmedien werden von den Wärmetauscherflächen im Generator bestimmt. Im Dampftrieb beginnt eine mögliche Auslegung bei Atmosphärendruck. Normale einstufige Generatoren können bis maximal 1 bar bzw. 100 kPa Überdruck betrieben werden; bei den zweistufigen Generatoren, den sogenannten Doppelfektmaschinen, beträgt der höchste zulässige Vordruck etwa 8 bar.

Mit Heißwasser angetriebene Lithiumbromid-Absorptionsmaschinen sind in einem breiteren Spektrum einsetzbar. Die ökonomischste Betriebsweise liegt etwa zwischen 100 bis 130 °C. Wegen zu großer und damit teurer Heizflächen ist eine Maschinenauslegung unter 85 °C Heißwasservorlauf meistens nicht sinnvoll. Das Zusammenspiel zwischen Kälteleistung, Kühlwassereintritts- und Heizmitteltemperatu-

ren bzw. -drücken ist in Abb. 2 übersichtlich aufgezeichnet.

Die Kurvenschar zeigt konstante Kühlwasserein- und -austrittstemperaturverläufe in Verbindung zu der Heißwassereintrittstemperatur (Spreizung ca. 10 K) bei Standard-Baugrößen einstufiger LiBr-Absorptionskältemaschinen. Die prozentuale Kälteleistung (Ordinate) gibt Auskunft über die Minderungen der Kapazität z. B. bei der Absenkung der Heißwassertemperatur oder der Anhebung der Kühlwassertemperatur.

Nun ergeben alle Standard-Maschinenvarianten mit niedriger Heißwassertemperatur eine beträchtliche Einbuße an Kälteleistung und eine Verschlechterung des Wärmeverhältnisses (Kälteleistung/Heizleistung). Es ist auch anlagentechnisch ungünstig, nach der Generatorleistung auszuliegen und damit eine überdimensionierte Apparategruppe Verdampfer/Absorber zuordnen zu wollen. Einer Anpassung der heiztechnischen Seite sollte, wenn möglich, auch eine Anpassung der Kälte-

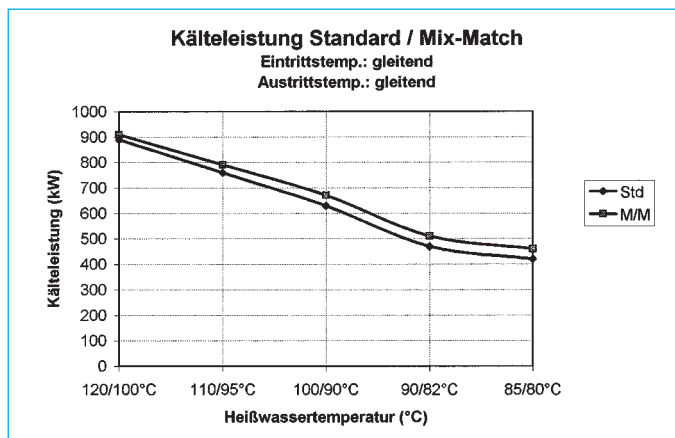


Abb. 3 Kälteleistung in Abhängigkeit der Heißwassertemperaturen



Abb. 4 Wärmeverhältnis in Abhängigkeit der Heißwassertemperaturen

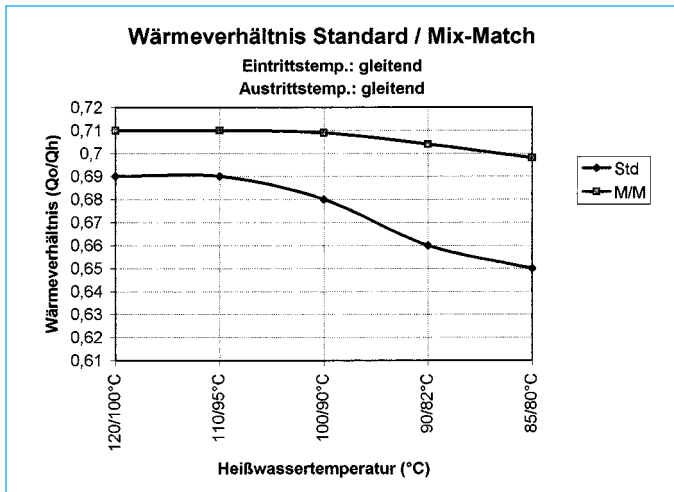


Abb. 5 Kälteleistung bei konstantem Heißwasserrücklauf von 80 °C

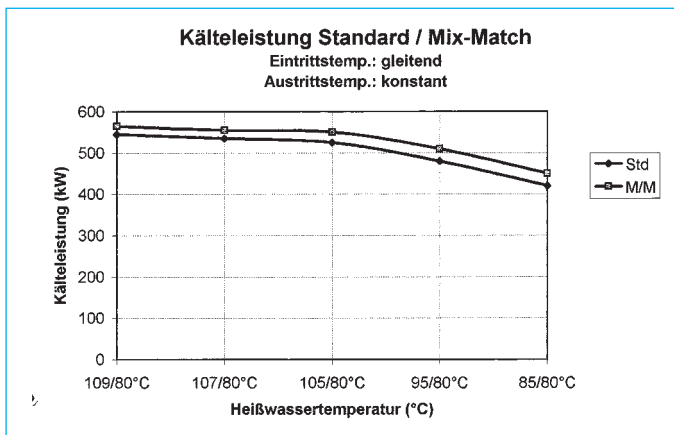
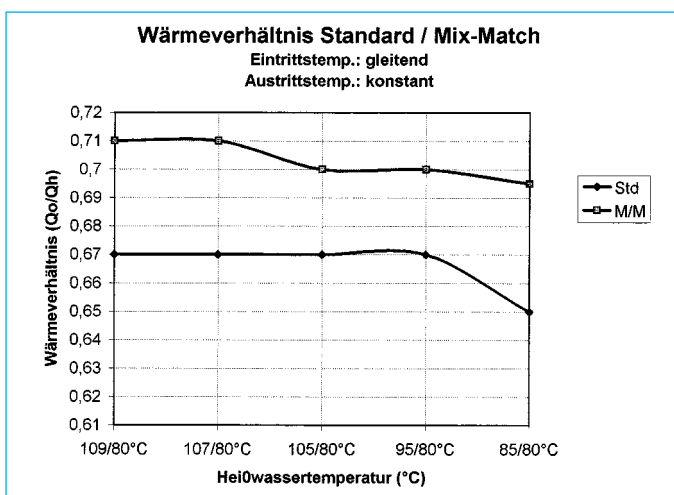


Abb. 6 Wärmeverhältnis bei konstantem Heißwasserrücklauf von 80 °C



seite folgen. Der aufwendigste Teil der LiBr-Absorptionsmaschine ist nun einmal die Verdampfer/Absorber-Gruppe.

Nachfolgend wird die Möglichkeit der Anpassung beider Baugruppen, sogenannte Mix-Match-Kombinationen, untersucht. Für die Standard-Baureihe bei Carrier stehen im Leistungsbereich von 300 kW bis 2100 kW insgesamt 37 Kombinationen zur Verfügung. Bis auf die Kaltwasserein- und -austrittstemperaturen (12 auf 6 °C) sowie die Kühlwassereintrittstemperatur (27 °C) sind alle weiteren Untersuchungs-Parameter variabel.

Abb. 3 und 4 zeigen den Einfluß auf Kälteleistung und Wärmeverhältnis, wenn die Heißwassertemperatur von den Normalbedingungen = 120/100 °C auf 85/80 °C abgesenkt wird. Im Ergebnis ist erkennbar, daß die Kälteleistung auf etwa 50 % absinkt. Das Wärmeverhältnis jedoch zeigt bei der Mix-Match-Ausführung erheblich bessere Ergebnisse als die Standard-Lösung.

Mit den beiden Abb. 5 und 6 soll verdeutlicht werden, welche maximalen Spreizungen möglich sind, wenn die Heißwasserrücklauf- bzw. Austrittstemperatur bei 80 °C konstant gehalten wird.

Die maximale Temperaturspreizung liegt hier bereits bei fast 30 K. Die Kälteleistung variiert lediglich um ca. 15 %. Auch hier wird der besondere positive Einfluß auf das Wärmeverhältnis der Mix-Match-Kombination deutlich erkennbar.

Kraft-Wärme-Kopplungen mit Absorptions-Kälteerzeugung werden bei Einbeziehung der Ölkühler-Abwärme in der Mix-Match-Ausführung noch effizienter.

Abschließend soll noch untersucht werden, welche niedrigstmögliche Heißwasseraustrittstemperatur erreicht werden kann.

Aus diesen Kurvenscharen wird deutlich, daß die Standardsysteme sehr früh ihre Grenzen aufzeigen. Vielleicht könnten feinere Nachrechnungen eine Austrittstemperatur von minimal 75 °C ermöglichen, doch belegt auch dieser Vergleich die Überlegenheit der Mix-Match-Konzeption mit Heißwasseraustrittstemperaturen bis 68 °C.

Wie erwähnt, ist die enge Beziehung von Heißwasser- zur Kühlwasseraustrittstemperatur bei allen Projekten mit der Absorptionstechnik zu berücksichtigen. Tiefe Heißwasseraustrittstemperaturen lassen auch nur relativ niedrige Kühlwasseraustrittstemperaturen zu. Aufgrund der physikalischen Gesetzmäßigkeiten bei der

Abb. 7 Kälteleistung bei konstantem Heißwasservorlauf von 85 °C

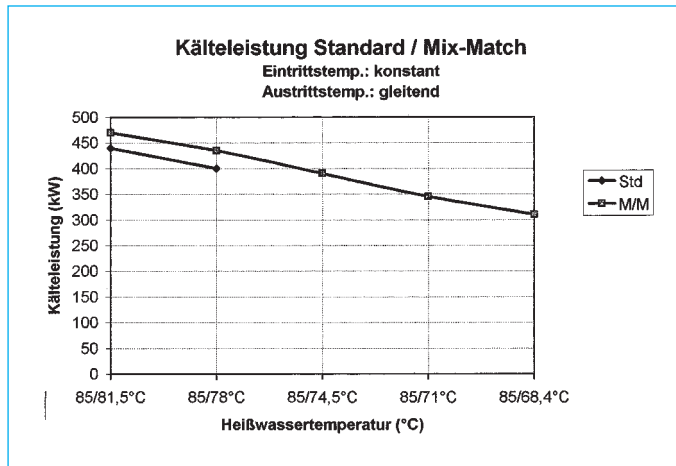
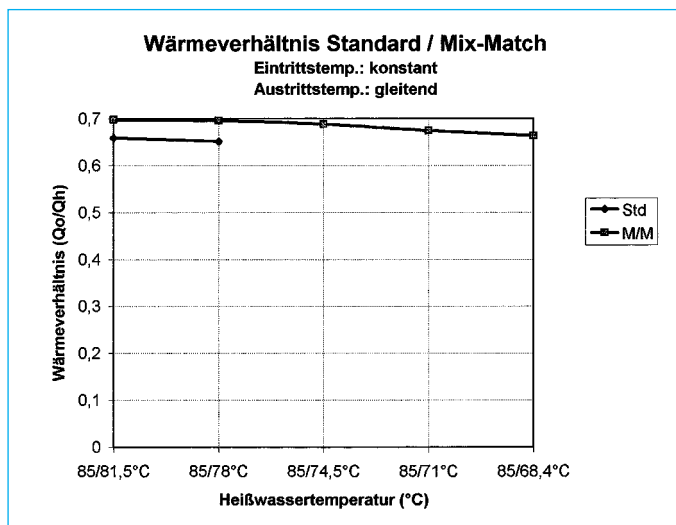


Abb. 8 Wärmeverhältnis bei konstantem Heißwasservorlauf von 85 °C



Rückkühlung ist eine Vergrößerung der Kühltürme sowie der Kühlwassermengen erforderlich. Die Entscheidungs-Kriterien orientieren sich demnach nicht unbedingt an niedrigen Heißwassertemperaturen, sondern auch gleichzeitig an dem erhöhten Aufwand der Rückkühltechnik.

Die Diskussion aller Kurven macht deutlich:

- Niedrige Temperaturen zwingen zu der Frage, ob nicht eine Mix-Match-Kombination sinnvoll wäre.

- Von der Fernwärmewirtschaft gewünschte Temperaturspreizungen werden mit Mix-Match-Maschinen hinsichtlich Preis-Leistungsverhältnis am ehesten erreicht.

- Absorptionskältemaschinen in Einkessel-Bauweise scheiden deshalb aus, weil sie einmal ein sehr ungünstiges Wärmeverhältnis (ca. 0,63) aufweisen und außerdem Mix-Match-Bauweise unmöglich ist.

### Zusammenfassung

Die Kälteerzeugung in Lithiumbromid-Absorptionskältemaschinen ist recht einfach: man benötigt eigentlich nur Salz, Wasser und Wärme. Viele wichtige Verbesserungen gegenüber den früheren Maschinen, wie Leistungsregelung, vollhermetische Umwälzpumpen, hermetische Entlüftungs-

einheit, komplette Kreislaufüberwachung gegenüber Kristallisation usw., trugen wesentlich zur schnellen Verbreitung dieser Kältemaschinenart bei, ebenso die verfeinerten Fabrikations- und Prüfmethode, wodurch Qualität und damit Betriebssicherheit erheblich gesteigert wurden.

Nicht erst seit der sogenannten Energiekrise ist energiepolitisch ein rationeller Einsatz der hochwertigen elektrischen Energie notwendig. Wo es möglich ist, sollte deshalb auf andere Energieformen ausgewichen werden; nicht nur für Klimaanlagen bieten sich zu diesem Zweck Absorptionsmaschinen an. Industrieunternehmen und Behörden sollten bei größeren Objekten dem sich abzeichnenden Kraftwerksdefizit Rechnung tragen. Bei der Beurteilung der Anschaffungskosten sollten nicht wie bisher der niedrigste Preis, sondern auch die Verfügbarkeit der Energie sowie deren Kosten berücksichtigt werden.

Beim Vergleich der Absorptionsmaschinen ist unbedingt der Energieverbrauch im Teillastbereich mit zu untersuchen, da das Teillastverhalten für den jährlichen Gesamtenergiebedarf sehr entscheidend ist und Kältemaschinen für Klimaanlagen selten unter Vollastbedingungen arbeiten. Den entscheidenden Ausschlag für eine größere Verbreitung der LiBr-Absorptionskältemaschinen dürfte jedoch das umweltfreundliche Kältemittel Wasser geben. Die direktbefeuerten Maschinen bieten den weiteren Vorteil, daß günstigere Leistungszahlen bei weniger CO<sub>2</sub>-Emission erzielt werden, speziell bei Erdgasbetrieb. □

#### Literatur

- [1] Hartmann, K.: Kälteerzeugung in Absorptionsanlagen; KK DIE KÄLTE und Klimatechnik, (1992), Heft 9, 10.
- [2] Hartmann, K.: Einsatzgrenzen direktbefeuertter Wasser-Lithiumbromid-Absorptionskältemaschinen; TAB Technik am Bau, (1994), Heft 1.
- [3] Fritz, B.: Mit Wärme Kälte produzieren; Ki Luft- und Kältetechnik, (1997), Heft 9.