

Ammoniak-Kaskadenkälteanlage mit Kompressions- und Absorptionsstufe

Teil I – Probleme der Tiefkälteerzeugung

Lutz Richter,
Institut für Luft- und Kältechnik gGmbH
Dresden,

Sebastian Zürich,
AGO AG

Steigende Energiekosten, die Umweltproblematik und die begrenzte Verfügbarkeit fossiler Energieträger führen bei Verbrauchern zur verstärkten Bereitschaft regenerativer Energien wie Solar- oder Abwärme zu nutzen. Der Gesetzgeber unterstützt dieses Handeln durch Verordnungen und Förderungen. Der Trend zu einer rationellen Nutzung von Energie und der damit verbundenen Einsparung von Primärenergie führt auch zur verstärkten Kälteerzeugung mittels der Antriebsenergien Solar- oder Abwärme in Absorptionskältemaschinen. Aus Abwärme oder nieder temperierter Wärme, die sonst nicht genutzt würde, wird mit Absorptionskältemaschinen Kälteenergie erzeugt. Der Beitrag wird in der kommenden Ausgabe der KKA fortgesetzt.

Waren vor ca. zehn Jahren nur wenige Unternehmen auf dem Gebiet der Absorptionskälteertechnik aktiv, stieg deren Zahl seit 2000 stark an. Insbesondere der kleine Kälteleistungsbereich, erst definiert für Anlagen < 200 kW dann für < 30 kW, war und ist Ziel der Entwicklungsanstrengungen. Tabelle 1 verdeutlicht diesen Sachverhalt. Vor 1996 waren fast ausschließlich nur Absorptionskälteanlagen größerer Leistung aus Übersee, USA und Japan auf dem Markt bekannt. Dieses Bild wandelte sich grundlegend. Insbesondere Aktivitäten in Deutschland, Holland und Spanien forcierten die Entwicklung von Sorptionskälteanlagen und ihrer praktischen Anwendung innerhalb des Bereichs der solaren Kühlung bzw. der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung. Und seit kürzerem versuchen auch asiatische Firmen aus China und Indien sich auf dem europäischen Markt zu platzieren. Jedoch liegen über Zuverlässigkeit, Service und Betrieb dieser Anlagen noch keine verlässlichen Daten und Aussagen vor.

Bei der Errichtung neuer Kälteanlagen sind die Energieeffizienz der Anlage und die Umweltverträglichkeit des Kältemittels die zwei wichtigsten übergeordneten Anforderungen. Hinsichtlich des Ozonabbaupotentials (ODP) und des Treibhauspotentials (GWP) von Kältemitteln wurden in den letzten Jahren gesetzliche Regelungen getroffen, die zukünftig weiter konkretisiert werden. Durch investive Zuschüsse oder Darlehen, die sowohl vom Bund als auch von den Ländern vergeben werden, werden innovative und umweltfreundliche Techniken gefördert.

Beispielsweise verjibt das BMU für Demonstrationsvorhaben im Bereich Energie- und Umweltechnik Darlehen in Höhe von maximal 70 % der förderfähigen Kosten. Zusätzlich ist sogar ein Zuschuss von bis zu 30 % möglich. Über das KfW-Umweltprogramm werden Darlehen bis zu 75 % der förderfähigen Kosten gewährt. Auch das ERP-Umwelt- und Energiesparprogramm unterstützt innovative Techniken durch Darlehen, die in den ersten fünf Jahren tilgungsfrei sind. Im Land Sachsen werden zudem Zuschüsse für Modell- und Demonstrationsvorhaben vergeben, wobei bei der maximale Fördersatz für die förderfähigen Kosten 100 % betragen kann und eine Anteil- oder Festbetragsfinanzierung erfolgt. Die Förderung ist eingebunden in den „Immissions- und Klimaschutz einschließlich der Nutzung der regenerativen Energien“ unter „Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz“. Dort wird insbesondere die Errichtung von Anlagen zur Kälteerzeugung und der Kraft-Wärme-Kopplung erwähnt.

Ein Ziel dieser vielfältigen Förderungen ist die kälteerzeugungsbedingten Emissionen und den Energieverbrauch zu senken. Dazu werden die Technologien unterstützt, die sich am Marktanstieg befinden und bei denen infolge des Prototypcharakters und der Einzelherstellung eine Anschubfinanzierung hilfreich ist, um über eine gesteigerte Nachfrage eine Kostenreduktion zu erreichen. Eine dieser Technologien ist die Kompressions-Absorptions-Kaskadenkälteanlage zur Tiefkälteerzeugung.

Probleme der Tiefkälteerzeugung | Bei der Erzeugung von Tiefkälte im Bereich von unter -15 °C werden üblicherweise Kompressionskälteanlagen mit den chemischen Kältemittelgemischen R404A, R407C und R507A eingesetzt. Diese Kältemittel wurden aufgrund des FCKW-Verbotes eingeführt und besitzen kein Ozonabbaupotential (ODP). Sie haben aber noch einen Einfluss auf den Treibhauseffekt.

Beispielsweise besitzt R404A einen GWP100-Wert von 3260 (R507A 3300; R407C 1530; R134a 1300). Das bedeutet, 1 kg des Kältemittels R404A verursacht bei Leckage einen Treibhauseffekt wie 3260 kg CO₂. Und mehr als 1 kg Kältemittel im Jahr emittieren alle Kälteanlagen über rd. 60 kWh₀ Kälteleistung, wenn man eine mittlere jährliche Leckagerate von 5 % der Füllmenge einer Kälteanlage und eine spezifische Anlagenfüllmenge von 300 bis 400 g/kW₀ ansetzt. Jedoch sieht die Realität noch härter aus. Das deutsche Amt für Umweltschutz [Vortrag von W.Adebar, Ministerium für Umwelt + Verkehr Stuttgart] spricht bei stationären Anlagen von „dicht“, wenn diese jährlich weniger als 10 % ihrer Füllmenge an die Umwelt verlieren. Bei mobilen Anlagen (Autoklimaanlage, fahrbare Kühlmöbel) gilt eine Leckagerate von 35 % als „dicht“. Die Statistik zeigt, dass 53 % aller Anlagen diese Kriterien erfüllen, jedoch 7 % aller Anlage eine Leckagerate von über 50 % aufweisen. In Europa wird angestrebt, dass ab 2008 Autos nicht mehr als 140 g CO₂ je km emittieren. Gegenwärtig liegt für europäische Hersteller der durchschnittliche Wert bei

Tabelle 1: Markt- und Entwicklungsaktivitäten auf dem Gebiet der Sorptionskältetechnik

(X = Markangebot / Prototypen / Felderprobungsanlagen kleiner Leistung)

Hersteller	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
< 100 kW												
Wegra / EAW (ILK)	Deutschland											X
ABB (ILK)	Deutschland											
Colibri	Holland											X
Absotech	Deutschland											
Borsig / Matthes / Siemens	Deutschland											
Robur	Italien											X
Broad	China											X
AGO (ILK)	Deutschland											X
Phoenix / SK Sonnenklima	Deutschland											X
Sortec	Deutschland											
Solarfrost / Conergy	Deutschland											
Abakus	Deutschland											
Rotartica	Spanien											X
Climatewell	Schweden											X
Thermax	Indien											X
Yazaki (York)	Japan											X
Uni Stutgart / Partner	Deutschland											
HfT Stutgart / Partner	Deutschland											
Arsenal	Österreich											
Solid	Österreich											
Soltem	Deutschland											
> 200 kW												
Entropie	Deutschland											
York	USA / Japan											
Trane	USA											
Carrier	USA											

65 g; Das bedeutet, dass 1 kg/Jahresleckage von R404A aus einer kleinen 60 kW-Kälteanlage einer Autoleistung von rd. 19.800 km entspricht. 2 kg sind bereits eine Erdumrundung. Daran kann abgesehen werden, welche Umweltgefährdung durch die chemischen Kältemittel besteht. Nach Kuipers

TU Eindhoven) zeigt eine Abschätzung der Kältemittelverluste von kommerziellen 404A-Kälteanlagen, dass bis ins Jahr 2015 mit jährlichen treibhausrelevanten Emissionen zwischen umgerechnet 500.000 und 0.000.000 t CO₂ (je nach Szenario) alleine aus den R404A-Anlagen zu rechnen ist. Bei einer Fahrleistung eines Kraftfahrzeuges von 12.000 km im Jahr (2 t CO₂ je Jahr) entspricht diese Angabe einer Fahrzeugarmada von 250.000 bis 1,5 Mio. Stück. Das hohe WFP der verwendeten Kältemittel ist Problem Nr. 1 der Tiefkälteerzeugung. Im

Gegensatz zu den chemischen Kältemitteln besitzen natürliche Kältemittel kein Umweltverschmutzungspotential, weil sie Bestandteil der Umwelt sind. Es ist anzunehmen, dass in Zukunft vor allem natürliche Kältemittel verwendet werden müssen. Der tatsächliche Beitrag einer Kältemaschine am Treibhauseffekt resultiert aus dem direkten Anteil des Kältemittels (GWP) und dem indirekten Anteil des Energieverbrauchs. Dieser Wert ist eine Bewertungsgröße in kg CO₂-Äquivalent und wird TEWI (Total Equivalent Warming Impact) genannt. Um den indirekten TEWI-Anteil gering zu halten, müssen auch die mit natürlichen Kältemitteln arbeitenden Kälteanlagen einen hohen COP aufweisen und dem neuesten technischen Stand entsprechen. Eine Verringerung des Treibhauseffektes kann nur durch das Betreiben innovativer An-

lagen mit natürlichen Kältemittel und geringem Energieverbrauch erreicht werden. Und gerade bei der TK-Erzeugung (t₀ < -20 °C) sind die Leistungszahlen der Kompressionskälteanlagen sehr ungünstig (siehe Bild 1). Dieser damit verbundene hohe Elektroenergiebedarf und die energiebedingten CO₂-Emissionen stellen Problem Nr. 2 der TK-Erzeugung dar: Problem Nr. 3 ist daran gekoppelt und mit dem hohen Primärenergieverbrauch (Ressourcenvergeudung) der Kompressionskälteerzeugung zu benennen. Problem 1 kann durch die Verwendung natürlicher Kältemittel vermieden werden. Doch natürliche Kältemittel wie R717 oder R723 können zur TK-Erzeugung nur mit zweistufigen Kälteanlagen eingesetzt werden, da bei der einstufigen Kälteerzeugung die Verdichtungsdrucktemperaturen des Verdichters bei tiefen Verdampfungstem-

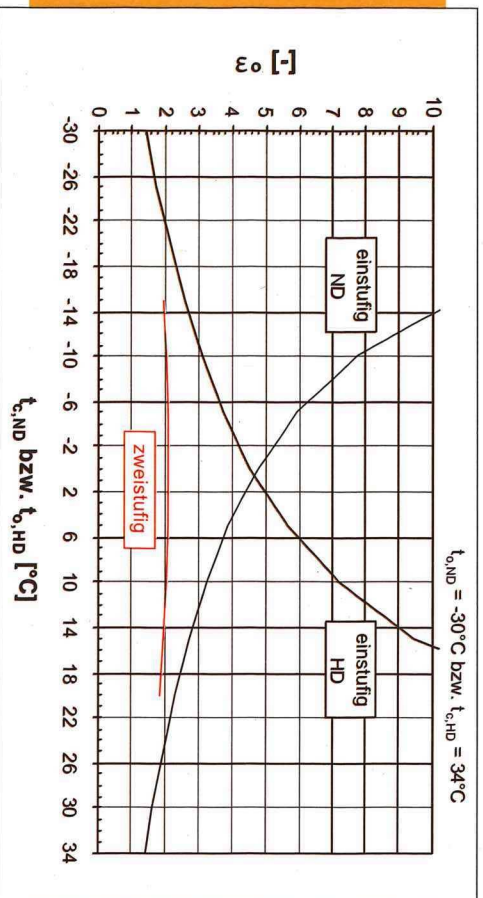


Bild 1: Leistungszahl der ein- und zweistufigen Kompressionskälteerzeugung mit R407C in Abhängigkeit der Verdampfungstemperatur bei 34 °C Kondensations-temperatur bzw. der Kondensations-temperatur bei -30 °C Verdampfungstemperatur

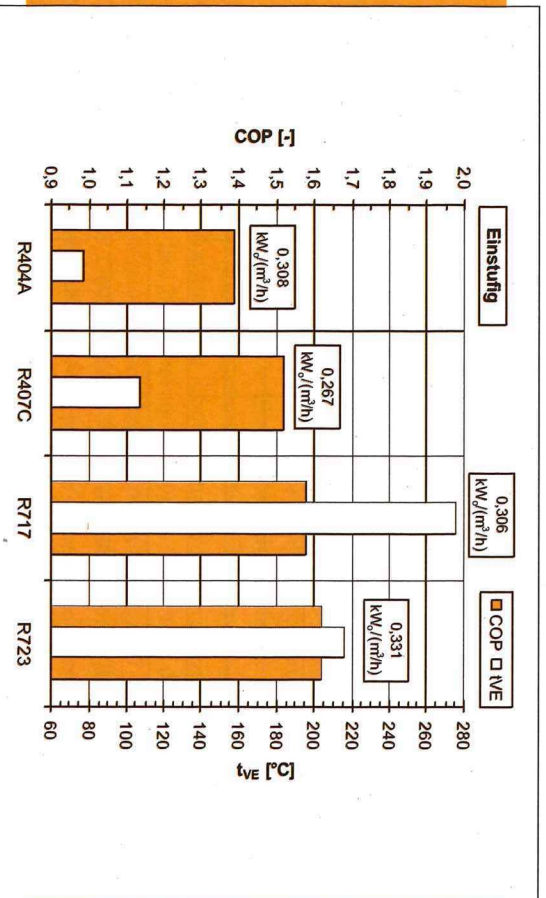


Bild 2: Leistungszahl und Verdichtungsendtemperatur für Kompressionskälteerzeugung mit unterschiedlichen Kältemitteln

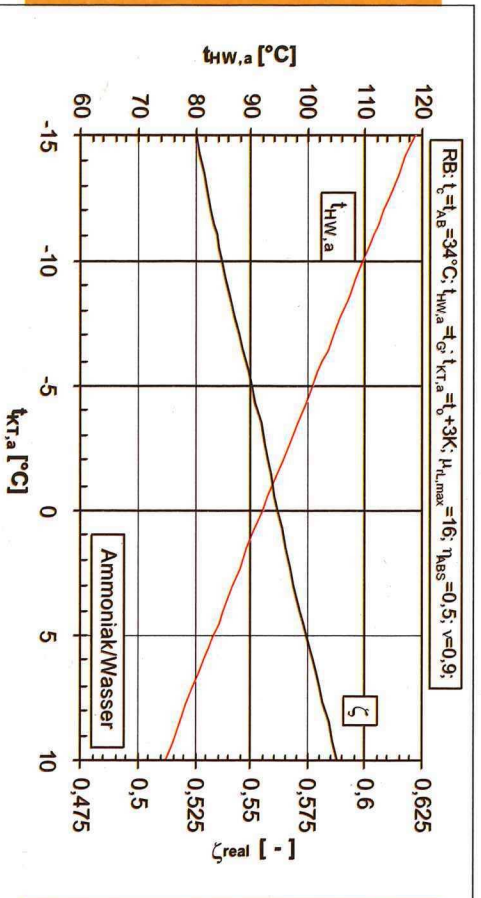


Bild 3: Abhängigkeit der minimal erforderlichen Heizmedianaustrittstemperatur von der Kälteerzeugertrittstemperatur für einen Ammoniak-Wasser-Absorptionskreisprozess

peraturen zu hoch wären (Problem Nr. 4) Verdichthersteller geben als maximale Druckstuzentemperatur 130 °C an und die Verdichtungsendtemperatur liegt ca. 30 bis 40 K über der Druckstuzentemperatur. Im Bild 2 werden Leistungszahlen und die berechneten Verdichtungsendtemperaturen der einstufigen Kompressionskälteerzeugung unterschiedlicher Kältemittel verglichen (Randbedingungen: $t_0 = -30 \text{ °C} / \Delta t_{0,HD} = 5 \text{ K}$; $t_c = 34 \text{ °C} / \Delta t_{0,K} = 2 \text{ K}$; $\eta_{is} = 0,55$). Die Zahlenangabe in $\text{kW}_0 / (\text{m}^3/\text{h})$ bedeutet, wie viel Kälteleistung je Kältemittelvolumenstrom bei Ansaugzustand des Verdichters erzeugt werden kann, und bestimmt die Größe des Verdichters. Bei R723 könnte ein Verdichter mit dem kleinsten Fördervolumenstrom gewählt werden. Bei den Bedingungen der ND-Kaskadenstufe ($t_c = 0 \text{ °C}$) besitzt R400A mit $0,452 \text{ kW}_0 / (\text{m}^3/\text{h})$ den besten Wert. Die spezifische Kälteleistung von R723 beträgt hier $0,387 \text{ kW}_0 / (\text{m}^3/\text{h})$. Die Tiefkälteerzeugung könnte auch einstufig mittels Absorptionskältekreislauf erfolgen, jedoch bestehen hier Begrenzungen. Tiefe Verdampfungstemperaturen erfordern hohe Heizmedientemperaturen (Bild 3), die oft in der Abwärme nicht vorhanden sind. Zudem bedingen hohe Heizmedientemperaturen einen höheren Rektifikationsaufwand in Ammoniak-Wasser-Absorptionskälteanlagen und schlechtere Wärmeverhältnisse. Um nieder temperierte Abwärme zur TK-Erzeugung nutzen zu können, wäre eine aufwendige und teure Double Lift-Schaltung des Absorptionskälteprozesses notwendig. Hier liegt Problem Nr. 5.

Gegenstand eines BMWi-Projektes war der Aufbau einer Versuchsanlage, die durch Kopplung eines Absorptions- mit einem Kompressionskälteprozess nieder temperierte Abwärme zur Kälteerzeugung für tiefere Nutzwertniveaus nutzt. Durch die Kopplung von Kompressions- und Absorptionskältekreislauf kann der Primärenergiebedarf zur Kälteerzeugung tieferer Temperaturen gesenkt und eine wirtschaftliche Anlagenlösung geschaffen werden. Einstufige wassergekühlte Kompressionskältemaschinen besitzen für eine Verdampfungstemperatur von -30 °C mit offener, feuchter Rückkühlung im Auslegungspunkt nur eine Leistungszahl von rd. 1,5, zweistufige Kompressionsmaschinen rd. 2,0. Das Bild 1 zeigt den Leistungsverlauf eines R407C-Kompressionskälteprozesses in Abhängigkeit der Kondensations- bzw. Verdampfungstemperatur. Für die ND-Kur-

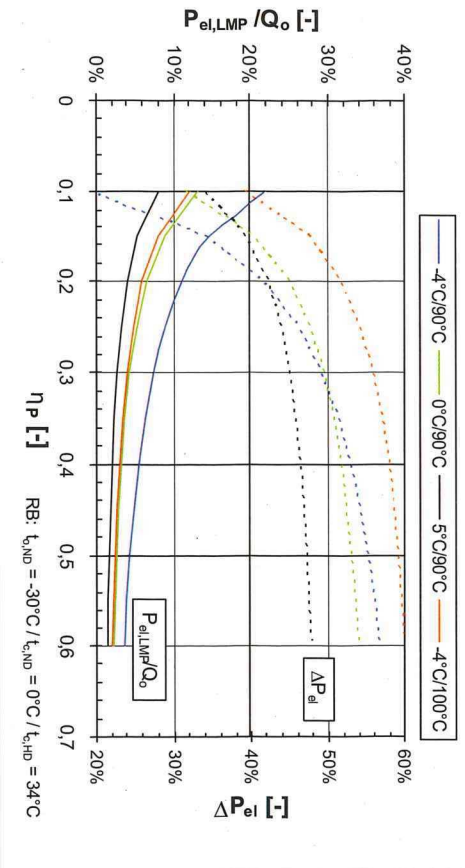


Abbildung 4: Spezifischer elektrischer Leistungsbedarf der LMP und Elektroenergieinsparung in Abhängigkeit des Pumpenwirkungsgrades für unterschiedliche Randbedingungen $t_{c,HD}$ und t_e

mit $t_{c,HD} = -30\text{ °C}$ stellt die Abszisse die Kondensationsstemperatur, für die HD-Kurve mit $t_{c,ND} = 34\text{ °C}$ die Verdampfungsstemperatur dar. Im Grenzfall mit $t_{c,ND} = 34\text{ °C}$ für ND und $t_{c,HD} = -30\text{ °C}$ für HD besitzen beide Kurven die gleiche Leistungszahl.

Durch die Verwendung der Kompressionskälteerzeugung nur als ND-Stufe einer Kaskadenanlage könnte der Elektroenergie- und folglich der Primärenergiebedarf um rund 70 % gegenüber der ausschließlichen Kompressionskälteerzeugung reduziert werden. Die Absorptionsstufe kann mit Heiztemperaturen von 95 bis 100 °C betrieben werden und erreicht ein Wärmeverhältnis von rund 0,6.

Zielstellung des Einsatzes | Die Zielstellungen für den Einsatz von Kompressions-Absorptions-Kaskadenkälteanlagen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Reduzierung des Primärenergieverbrauchs und Einsparung von Betriebskosten bei der Tiefkälteerzeugung gegenüber konventioneller Kompressionskälteerzeugung,
- Nutzung von nieder temperierter Abwärme zur TK-Erzeugung,
- Einsatz natürlicher Kältemittel bei der TK-Erzeugung,
- Erweiterung des Anwendungsbereiches von AKM auf die Tiefkälteerzeugung ohne aufwändige Double-Lift Schaltung,
- Kostenreduktion sowie Reduzierung von Baugröße und Masse gegenüber zweistufigen Absorptionskälteanlagen,
- Verbesserung der Anwendungsmöglichkeit der trockenen Rückkühlung (luftgekühlte AKA-Variante möglich).

Um die Kaskadenkälteanlage abschließlich mit einem natürlichen Kältemittel zu betreiben, wird der Kompressionskreislauf für das Kältemittel R723 ausgelegt.

Beste Produkte mit höchstem Sicherheitsstandard*



* DIN EN ISO 9001 : 2000
 * C E 0045 gemäß DGR97 /73/EG
 * DVGW-DIN 4753-11
 * geprüft nach allen relevanten europäischen Zertifizierungen

Wer sich für DK entscheidet, entscheidet sich für mehr Effizienz.



Die bessere Lösung, wenn es um **Wärmehückgewinnung und Kaltwasserbereitung** geht.

DK Kälteanlagen GmbH
 Holtefeldstraße 30 • 48282 Emsdetten • Telefon: 0 25 72 / 93 14 - 0 • Telefax: 0 25 72 / 93 14 - 20
 Internet: www.dk-kaelteanlagen.de • E-Mail: info@dk-kaelteanlagen.de

E-T 117/043

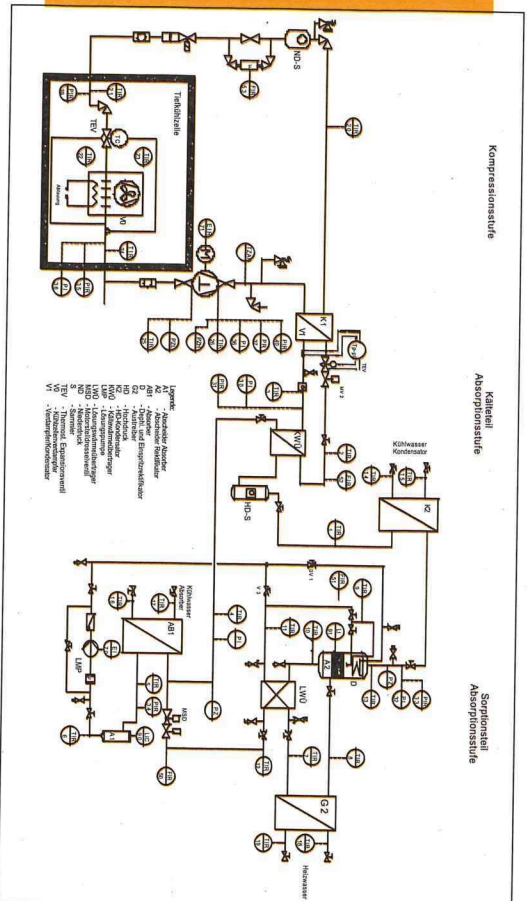


Bild 5: Schaltschema der Kompressions-Absorptions-Kaskadenkälteanlage

Vorteile des Kältemittels R723, welches ein Gemisch aus 60 Massen-% Ammoniak und 40 Massen-% Dimethylether ist, sind:

- kein Umweltschädigungspotential,
- höhere Leistungszahl,
- bessere Öllöslichkeit und -rückführung,
- Reduzierung der Verdichtungsdrucktemperatur gegenüber von R717,
- Möglichkeit der Verwendung von Kupferwerkstoffen im Kältekreis bei Einhaltung eines Feuchtegehaltes von < 400 ppm und folglich Senkung der Anlagenkosten.

Das Ziel der erheblichen Senkung des Elektroenergieverbrauchs ist mit Ammoniak-Wasser-Absorptionskälteanlagen nur zu erreichen, wenn der Wirkungsgrad der Lösungsmittelpumpe ausreichend hoch ist. Insbesondere bei Pumpen für kleine Volumenströme, wie in der Versuchsanlage, sind die Pumpenwirkungsgrade für das Fördermedium wässriger Ammoniaklösung kleiner als von den Herstellern angegeben. Messungen ergaben für unterschiedliche Pumpen Werte zwischen 0,15 und 0,3.

Die Auswirkung des Pumpenwirkungsgrades auf den spezifischen Elektroenergieverbrauch der Pumpe und die mögliche Elektroenergieeinsparung einer Kaskadenkälteanlage sind im Bild 4 dargestellt. Die verschiedenen Kurven gelten für unterschiedliche Verdampfungs- und Generator- endtemperaturen. Arbeitet beispielsweise die Kaskadenanlage in der Absorptionsstufe mit einer Verdampfungsdrucktemperatur von 0 °C und einer Generator-temperatur von 90 °C, beträgt bei einem Pumpenwirkungsgrad von 0,2 der spezifische Elektroenergieverbrauch 6,5 % (d.h. 65 W_{el} je 1 kW Kälteleistung). Das bedeutet, dass durch die Kaskadenanlage nur 45 % Elektroenergie gegenüber der

einstufigen Kompressionsteilfahlerzeugung eingespart werden. Aus Bild 4 wird abgeleitet, dass der Pumpenwirkungsgrad über 0,2 liegen sollte.

Gestaltung der Kälteanlage | Bei

der Gestaltung der Kaskadenanlage wurden die Ergebnisse bisheriger Entwicklungsbemühungen berücksichtigt. Ein Entwicklungsprojekt beschäftigte sich mit der Entwicklung von Ammoniak-Kompressionskälteanlagen kleiner Leistung. Arbeitspunkte waren unter anderem der Einsatz natürlicher Kältemittel für kleine Anlagen, die Verwendung von NH₃-Bauteilen für kleine Leistungen, die Möglichkeit der Verwendung von Kupferwerkstoffen und die Verwendung des Kältemittels R723. Ein anderes Projekt beinhaltete die Entwicklung von kleinen Ammoniak-Wasser-Absorptionskälteanlagen in kompakter Bauweise. Hier lagen einige Schwerpunkte in der Skalierung der Absorptionskältetechnik in den kleinen Leistungsbereichen, dem Einsatz von Plattenwärmeübertragern in kleinen Absorptionskälteanlagen sowie der Untersuchung möglicher energieeffizienter Lösungsmittelpumpen. Diese Projekte und das dabei gesammelte Know-how wurden nun innerhalb des Kaskadenprojektes zusammgeführt. Die Kaskadenkälteanlage wurde im ILK aufgebaut und kühlt eine Tiefkühlzelle. Auslegungsbedingungen sind:

- Verdampfungsdrucktemperatur $t_{\text{ND}} = -30 \text{ °C}$ ($t_{\text{Luft,Zelle}} = -22 \text{ °C}$),
- Kondensationsdrucktemperatur $t_{\text{HD}} = 34 \text{ °C}$,
- Absorberraustrittstemperatur $t_{\text{a}} = 35 \text{ °C}$ (Kühlwasser $27 \text{ °C} / 32 \text{ °C}$),
- Generator-temperatur $t_{\text{Ga}} = 90 \text{ °C}$ (Heizwasser $100 \text{ °C} / 90 \text{ °C}$),

- Dephlegmationstemperatur Kältemitteldampf Austritt $t_{\text{D}} = 55 \text{ °C}$,
 - Lösungsumlauf maximal $\mu_{\text{rL}} = 20 / \text{Absorberwirkungsgrad}$ $\eta_{\text{Abs}} = 0,5$,
 - isentroper Verdichterrwirkungsgrad $\eta_{\text{is}} = 0,65$,
 - Kältemittel wird in der Kompressionsstufe 6 K überhitzt und 2 K unterkühlt.
- Die Kaskadenstufen sind stofflich voneinander getrennt, um Ölneintrag in die Absorptions- und Restfeuchtigkeitseintrag in die Kompressionsstufe zu vermeiden. Um die Projektkosten gering zu halten, wurden für die Kaskadenkälteanlage vorhandene Bauteile verwendet. Damit wurde in Kauf genommen, dass die Abstimmung der Bauteile in der Anlage nicht dem Optimum entspricht. Betrieb, Funktionalität, Funktionsweise und Betriebsverhalten standen innerhalb der Untersuchung im Vordergrund. Im Bild 5 ist das Schaltschema der Kompressions-Absorptions-Kaskadenkälteanlage enthalten. Bild 6 zeigt die Ansicht der aufgebauten Anlage vor der Teflkühlzelle in der Versuchshalle des Institutes.

NiD-Verdampfer in der Teflkühlzelle ist ein luftbeaufschlagter Lamellenverdampfer mit Abtauvorrichtung. Für die anderen Wärme- und Stoffübertrager wurden vollverschweißte und kassetengeschweißte Plattenwärmeübertrager verwendet. Lösungswärmeübertrager ist ein Rohrplatten-Wärmeübertrager. Der Dephlegmator wurde im Abscheider A2 integriert und besteht aus Rippenrohrspiralen. Lösungsmittelpumpe ist eine Schraubenspindelpumpe, Kompressor ein halbhermetischer Trennhaubenverdichter. In beiden Kältekreisläufen sind Kältemittelsammler und thermostatische Expansionsventile eingebaut. Die Absorptionsstufe wurde mit 11,5 kg NH₃ und 23 kg H₂O, die Kompressionsstufe mit 4 kg R723 befüllt. Nach Ausbau und Inbetriebnahme wurde die Kaskadenanlage innerhalb eines Untersuchungs- und Messprogramms vermessen und bewertet.



Bild 6: Ansicht der Kompressions-Absorptions-Kaskadenkälteanlage vor der Teflkühlzelle