

Solare Kühlung mit Ammoniak/Wasser-Absorptionskälteanlagen

Lutz Richter und Mathias Safarik, Dresden

Die Bedeutung gekoppelter Energieverbundsysteme steigt. Die Ressourcen an fossilen Energieträgern nehmen ab, die Energiekosten zu. Die sommerliche Überlastung der Stromversorgungsnetze infolge der sommerlichen Strombedarfsspitzen durch die Kälteerzeugung wird immer evidenter. Auswege aus der Problematik sind die solare Kälteerzeugung und die Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung. Kernstücke dieser Energieverbundanlagen sind Sorptionskälteanlagen in Form der Ad-, Ab- und Resorptionskälteanlage.

Vergleich der Arbeitsstoffpaare

Die Suche nach neuen Arbeitsstoffen für Absorptionskälteanlagen in den letzten 20 Jahren brachte keine besseren Arbeitsstoffe als die weiterhin traditionellen und verwendeten Ammoniak/Wasser und Wasser/Lithiumbromid. Gegenwärtige Entwicklungen und Neuerungen beziehen sich daher hauptsächlich auf die Kreisprozessgestaltung mehrstufiger Anlagen, die Entwicklung von Anlagen kleiner Leistung, die Miniaturisierung kompakter Anlagen, die Optimierung von Bauteilkomponenten und die Untersuchung der Auswirkungen von unbedenklichen Additiven und Korrosionsinhibitoren.

In Tabelle 1 werden die Arbeitsstoffpaare $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ und $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ verglichen. Aus energetischen und Akzeptanzgründen ist im Klimakältebereich dem Arbeitsstoff Wasser/Lithiumbromid der Vorzug zu geben. Für Nutzttemperaturen unter 0°C und in kompakten, kleinen Anlagen $< 5 \text{ kW}$ besitzt das Arbeitsstoffpaar Ammoniak/Wasser Vorteile.

Im Bild 1 sind für $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ und $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ die erforderlichen Heizmedienaustrittstemperaturen in Abhängigkeit der Kälte-

trägeraustrittstemperatur dargestellt. Die Randbedingungen für Kondensations-, Absorptions-, Generator- und Verdampfungstemperatur sowie Absorptionswirkungsgrad und Temperaturdifferenz am Lösungswärmeübertrager sind im Bild angegeben. Als maximal zulässige spezifische Umlaufmenge der reichen Lösung wurde $\mu_{\text{rL}} = 16$ angenommen. Da bedingt durch eine notwendige Rieselstärke bei $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ -Riesel-filmabsorbieren der spezifische Lösungsumlauf von 16 oft überschritten wird, ist für Wasser/Lithiumbromid auch der Graph für $\mu_{\text{rL}} = 30$ eingezeichnet. Bei Auslegungsbedingungen $\mu_{\text{rL}} < 16$ kann bei $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ die erforderliche Heizmedienaustrittstemperatur zu Erreichung einer gleichen Kältenutztemperatur um ca. 7K tiefer als bei $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ liegen. Dies liegt in der Möglichkeit der Verwendung von Plattenwärmeübertragern als Austreiber mit Gegenströmung von Lösung und Heizwasser und folglich sich überschneidender Temperaturbänder bei $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ begründet. Durch Erhöhung der spezifischen Lösungsumlaufmenge auf ca. 30 und der Akzeptanz eines geringfügig schlechteren Wärmeverhältnisses kann dies jedoch bei Wasser/Lithiumbromid ausgeglichen werden.

Prototypen von $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ -Absorptionskälteanlagen

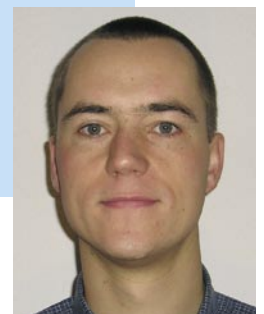
Auf dem Gebiet der Wasser/Lithiumbromid-Absorptionskälteanlagen wurden in letzten Jahren neben den Anlagen traditioneller Hersteller auch viele Anlagen neuer Hersteller wie der Firma EAW/Wegra bzw. der Firma Broad installiert. Bei Ammoniak/Wasser-Absorptionskälteanlagen ist die Anzahl installierter Anlagen erheblich geringer, obwohl auch auf diesem Gebiet in den letzten Jahren Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten unternommen wurden. Hier überwiegen derzeit direkt befeuerte Absorptionsanlagen kleiner Leistung der Firma Robur sowie größere Anlagen mit unterschiedlicher Beheizung der Firma Colibri. Tabelle 2 enthält Angaben zu drei Prototypanlagen der letzten Jahre des Ins-

zu den Autoren

**Dipl.-Ing.
Lutz Richter,**
wissenschaftlicher
Mitarbeiter,
Institut für Luft-
und Kältetechnik
gGmbH, Dresden



**Dr.-Ing.
Mathias Safarik,**
wissenschaftlicher
Mitarbeiter,
Institut für Luft-
und Kältetechnik
gGmbH,



tituts für Luft- und Kältetechnik Dresden (ILK). Die kleinen Anlagen werden solarthermisch angetrieben, die größere wird mit der Abwärme einer BHKW-Anlage beheizt. Mit allen drei Anlagen konnte der energetisch und ökologisch sinnvolle Einsatz von Ammoniak/Wasser-Absorptionskälteanlagen in Verbindung mit solarthermischen bzw. mit Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen nachgewiesen werden.

Varianten der Kreisprozessgestaltung von $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ -Absorptionskälteanlagen

Innerhalb von Sorptionskälteanlagen sind unterschiedliche Stufigkeiten, „Effekt“- bzw. „Lift“-Stufigkeit, im Lösungs- und Kälteteil möglich. Dadurch lassen sich Sorptionskälteanlagen optimal an die Abwärmebedingungen anpassen. Bild 2 ver-

	NH ₃ /H ₂ O	H ₂ O/LiBr
Druck	Arbeitsbereich im Überdruckgebiet bei 34 °C 1312,2 kPa (a) Druckdifferenz 814,9 kPa	Arbeitsbereich im Vakuumgebiet bei 34 °C 5,32 kPa (a) Druckdifferenz 4,5 kPa
Nutzkälte	auch unter 0 °C möglich	nur im Klimakältebereich über 0 °C möglich
Wärmeverhältnis	bedingt durch notwendige Dephlegmation ca. 25 % schlechter als bei H ₂ O/LiBr einstufig ca. 0,6	höheres Wärmeverhältnis, keine Dephlegmation und Rektifikation notwendig einstufig ca. 0,75
Strombedarf	für Lösungsmittelpumpe 2,5...6,0 % der Kälteleistung	für Lösungsmittelpumpe < 1,0 % der Kälteleistung
Korrosion	<ul style="list-style-type: none"> Verwendung Schwarzstahl möglich Kupfer- und Messing- Werkstoffe nicht verwendbar 	<ul style="list-style-type: none"> Verwendung Schwarzstahl möglich höhere Korrosionsgefahr durch Lithiumbromid Korrosionsinhibierung erforderlich Aluminium- Werkstoffe nicht verwendbar
Heizmedientemperatur	<ul style="list-style-type: none"> bei hohen Heizmedientemperaturen erhöhter Aufwand für Dephlegmation/Rektifikation geringfügig geringere Heizmedientemperaturen erforderlich 	<ul style="list-style-type: none"> bei hohen Heizmedientemperaturen Kristallisationsgefahr bei höheren Heizmedientemperaturen „Double Effekt“-Schaltung möglich mit Wärmeverhältnis > 1,0
apparativer Aufwand	<ul style="list-style-type: none"> Einsatz von Plattenwärmeübertragern bzw. kompakten Apparaten für die Wärme- und Stoffübertragung möglich erhöhter Aufwand für Dephlegmation/Rektifikation des Kältemittels Problem der Wasserrückführung aus Verdampfer bei überludetem Betrieb bzw. bei trockner Verdampfung und ungünstigen Bedingungen Problem geeigneter Lösungsmittelpumpen für kleine Anlagen 	<ul style="list-style-type: none"> Einsatz kompakter Apparate durch geringe maximale mögliche Druckverluste und infolge hoher Dampfstromströme bei Wasser erschwert einfacher Apparatenaufbau infolge Wegfall Dephlegmation und Rektifikation möglich Aufwand betreffs Inertgasproblem Möglichkeit eines kostengünstigeren Aufbaus infolge Behälterbauweise und des ungefährlichen Arbeitsstoffpaares gegeben
besondere Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> Ammoniak giftig, brennbar erhöhte Anforderungen an die Sicherheit entsprechend VBG 20 erforderlich 	<ul style="list-style-type: none"> ungiftiges Arbeitsstoffpaar höhere Verdampfungsenthalpie des Kältemittels
Schlussfolgerung	Einsatz im Normal- und Tiefkältebereich unter 0°C sowie in Kleinanlagen	Einsatz im Klimakältebereich über 0°C

Tabelle 1 Vergleich der Arbeitsstoffpaare NH₃/H₂O und H₂O/LiBr in Absorptionskälteanlagen

und dem Heizmedium. Diese bestimmen die inneren Temperaturen. Bild 3 gibt zur Abschätzung die Kälteleistungsänderungen in Abhängigkeit der inneren Kreisprozessstemperaturen an. In erster Näherung kann die Differenz zwischen innerer und äußerer Temperatur auch bei Leistungsänderung als konstant angenommen werden. Steigt beispielsweise die Kühlwassertemperatur um 1 K bei einer Generatortemperatur von 80 °C, sinkt die Kälteleistung durch den Einfluss auf den Kondensator um 7% und den Einfluss auf den Absorber um 8%, gesamt also um 15%.

In Bild 4 ist für die Aschaffener Absorptionskälteanlage die Abhängigkeit der Kälteleistung und des Wärmeverhältnisses von der Heizwassereintrittstemperatur für 23 °C Kühlwassereintritts- und -1,5 °C Soleaustrittstemperatur dargestellt.

Aus Bild 5 können unterschiedliche Schaltungsvarianten von Absorptionskälteanlagen entnommen werden. Der Übersichtlichkeit halber wurden unendlich große Lösungsumlaufmengen angenommen, so dass die Konzentrationslinien für arme und reiche Lösung zusammenfallen. Wie bei H₂O/LiBr-Anlagen sind bei NH₃/H₂O Lift- und Effekt-Stufigkeiten möglich. Durch eine doppelte Austreibung beispielsweise auf zwei Druckniveaus in G1/2 und G1/3 kann die Heizmedientemperatur gesenkt werden. Eine herkömmliche Double Effect-Schaltung mit Nutzung der Kondensationswärme aus dem Hochdruckkondensator C2 im Niedertemperaturgenerator G1/1 würde jedoch bei NH₃ zu einem zu hohen Hochdruck pc,2 führen. Es ist jedoch eine Double Effect-Schaltung unter Integration eines Resorptionskreislaufs in der Niederdruckstufe, im Bild 5 als DE-RES bezeichnet, möglich. Bei dieser Schaltung wird die reiche Lösung des Absorbers A0, die das im Verdampfer verdampfte Kältemittel absorbiert hat, auf den Druck po,-1 entspannt, bei dem das Kältemittel durch Wärmeaufnahme (Kälteerzeugung) erneut aus der Lösung ausgetrieben wird. Zur Vervollständigung des Kreislaufs ist ein weiterer Absorber A-1 erforderlich. Es ist ersichtlich, dass auch für diesen Double Effect-Kreisprozess höhere Heizmedientemperaturen notwendig sind, G1/4 im Vergleich zu G1/1. Diese Schaltung kann zum Beispiel zur Anpassung einer NH₃/H₂O-Absorptionskälteanlage an die Abwärmebedingungen einer

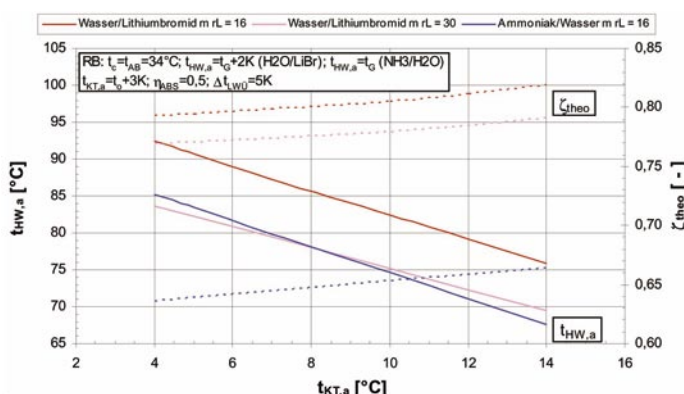


Bild 1 Vergleich der notwendigen Heizwassereintrittstemperatur und des Wärmeverhältnisses in Abhängigkeit der Kälteerzeugertemperatur für die Arbeitsstoffpaare NH₃/H₂O und H₂O/LiBr in Absorptionskälteanlagen

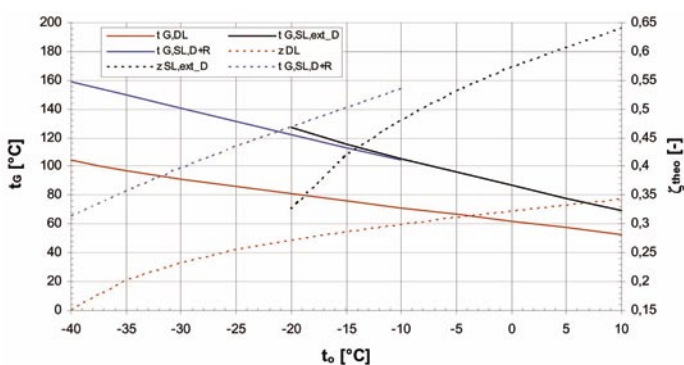


Bild 2 Vergleich der Generatortemperatur und des Wärmeverhältnisses in Abhängigkeit der Verdampfungstemperatur für das Arbeitsstoffpaar NH₃/H₂O in „Double Lift“- und „Single Lift“-Absorptionskälteanlagen mit unterschiedlicher Rektifikationsgestaltung

gleich die Heizmedientemperatur und das theoretische Wärmeverhältnis, das heißt ohne Berücksichtigung der Anlagengüte, einer „Single Lift“ und „Double Lift“ Schaltung. Die DL-Anlage benötigt auch zur Erzeugung tiefer Temperaturen nur relativ niedrige Antriebstemperaturen, erreicht jedoch nur halb so hohe Wärmeverhältnisse. Einfluss auf das Wärmeverhältnis besitzt bei NH₃/H₂O-Absorptionskälteanlagen

gen auch der Aufwand zur Dephlegmation und Rektifikation. Die Varianten des Bildes 2 umfassen zum einen externe Kühlung des Dephlegmators und keine Rektifikation, und zum anderen eine Kühlung des Dephlegmators mit reicher Lösung und eine Rektifikationssäule.

Die Kälteleistung einer Absorptionskälteanlage ist abhängig von den äußeren Medien, dem Kälteerzeuger, dem Kühlwasser

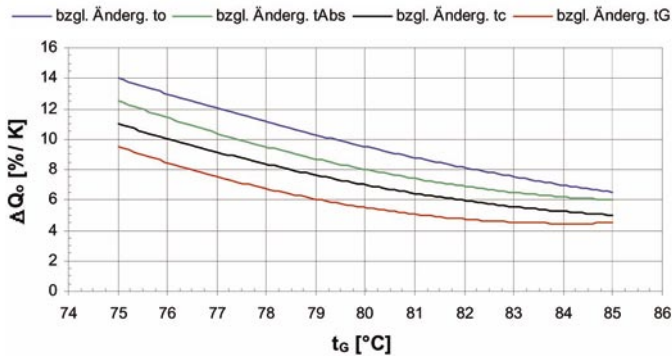


Bild 3 Prozentuale Auswirkung der Änderungen der Verdampfungs-, Absorptions-, Kondensations- oder Austrittstemperatur auf die Kälteleistung einer einstufigen NH₃/H₂O-Absorptionskälteanlage

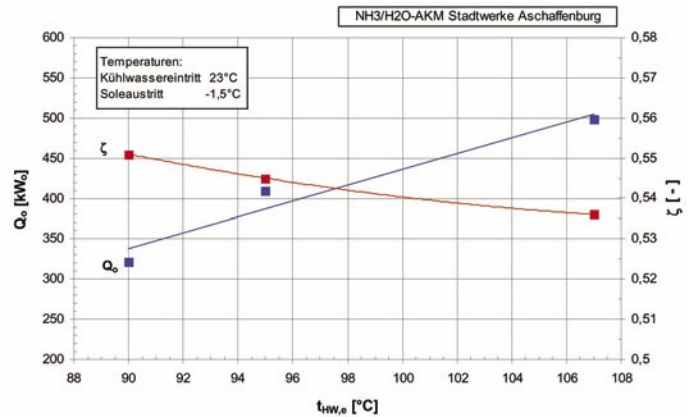


Bild 4 Kälteleistung und Wärmeverhältnis der Aschaffener NH₃/H₂O-Absorptionskälteanlage in Abhängigkeit der Heizwassereintrittstemperatur

Anwendungsprojekte	TZ Köthen	TIZ Gladbeck	Wasserwerk Aschaffenburg
Betreiber	FHS Köthen	FHS Gelsenkirchen	Stadtwerke Aschaffenburg
Anlagentyp	SE/SL-NH ₃ /H ₂ O - AKM	SE/SL-NH ₃ /H ₂ O - AKM	SE/SL-NH ₃ /H ₂ O - AKM
Baujahr	1998	2000	2001
Anl.-Errichter	Fa. ABB	Fa. Stenn	Fa. ABB
Q ₀ und ζ ₀	15 kW (t ₀ = 3°C) / 0,54	20 kW (t ₀ = -6°C) / 0,53	440 kW (t ₀ = -6°C) / 0,56
Kälteerzeugertemperatur	14°C / 8°C (Klimakälte)	4°C / -2°C (Kühlagerkälte)	4,5°C / -1,5°C (Entfeuchtungskälte)
Kühlwassertemperatur	27°C / 33°C	27°C / 32°C	Absorber 17°C / 21°C Kondensator 27°C / 34°C
Heizwassertemperatur	95°C / 85°C (Solarthermieanlage)	100°C / 90°C (Solarthermieanlage)	108°C / 96°C (BHKW-Anwärme)
Anmerkungen	<ul style="list-style-type: none"> interne Rektifikation (V), Dephlegmator über reiche Lösung gekühlt Einsatz von PWÜ als Gegenströmer trockene Verdampfung im Koaxialrohr mit TEV und unterer Kältemittelbeaufschlagung Peripherie mit Wärme- und Kältespeicher Füllmenge NH₃ 10 kg 	<ul style="list-style-type: none"> keine Rektifikation, Dephlegmator über reiche Lösung gekühlt Einsatz von PWÜ mit Gegenströmung trockene Verdampfung im Rohr-Platten-WÜ mit TEV und unterer Kältemittelbeaufschlagung Füllmenge NH₃ 8,5 kg 	<ul style="list-style-type: none"> keine Rektifikation, extern gekühlter Dephlegmator Rohr-Platten-WÜ als LWÜ Einsatz von PWÜ mit Gegenströmung obere Kältemittelbeaufschlagung des Verdampfers (PWÜ) mit EEV Füllmenge NH₃ 170 kg
Betriebsergebnisse (Kälteleistung, Heizleistung und Wärmeverhältnis)		 (RB: Kälteerzeuger 3,5°C/-3,6°C; Kühlwasser 25,2°C/31,3°C; Heizwasser 94,7°C/85,3°C)	 (RB: Kälteerzeuger 6,7°C/-0,5°C; Kühlwasser Absorber 18,2°C/22,0°C und Kondensator 24,2°C/31,2°C; Heizwasser 106,8°C/92,2°C)

Tabelle 2 Prototypeinsatz von NH₃/H₂O-Absorptionskälteanlagen

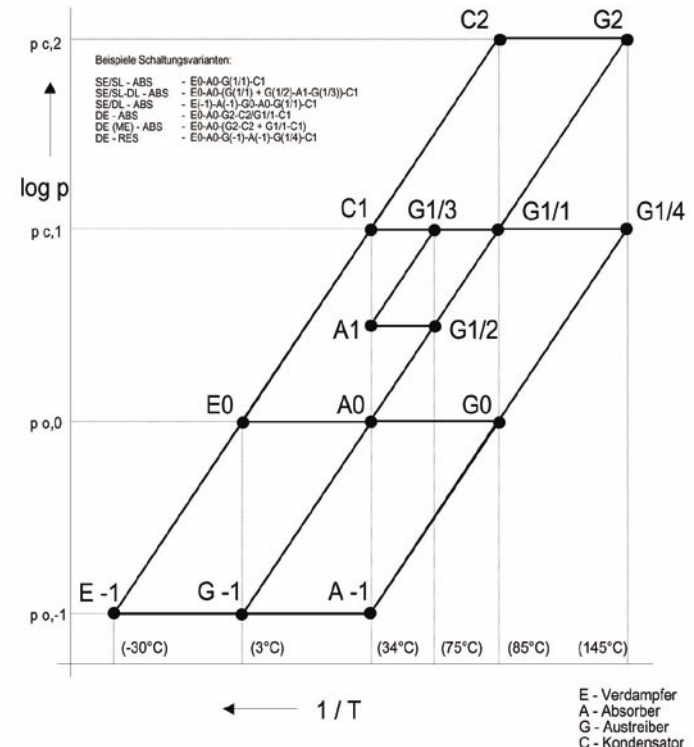


Bild 5 Schematische Darstellung unterschiedlicher Kreisprozessgestaltungen mit „Effekt“- und „Lift“-Stufigkeiten

Brennstoffzelle oder eines BHKW bzw. an das Hochtemperaturniveau von Parabolrinnenkollektoren genutzt werden. Das Wärmeverhältnis kann gegenüber einstufigen Anlagen um 25 bis 35% gesteigert werden.

Um den Absorptionsprozess auch zur Tiefkälteerzeugung < -20°C ohne eine aufwendige Double Lift-Schaltung nutzen zu können, ist eine Kaskadenschaltung mit einer konventionellen Kompressionsstufe im Niederdruck und einer Absorptionsstufe im Hochdruck sinnvoll. Bild 6 zeigt das vereinfachte Schaltschema einer solchen Kaskadenkälteanlage mit stofflicher Trennung der Kreisläufe. Je nach Rückkühl-

und Heizmedientemperatur und dem daraus resultierenden Leistungsgleichgewicht der Kältestufen stellt sich ein Mitteldruck ein. Ist beispielsweise die Heizmedientemperatur hoch, sinkt der Mitteldruck und folglich das Druckverhältnis für die Kompressionsstufe und somit steigt deren Leistungszahl. 60 bis 70% der zur Kälteerzeugung notwendigen Elektroenergie lassen sich einsparen.

Bild 7 vergleicht eine luftgekühlte Kompressionskälteanlage mit einer luftgekühlten Kompressions-Absorptions-Kaskaden-

kälteanlage hinsichtlich der Leistungszahl zur Tiefkälteerzeugung mit einer Verdampfungstemperatur von -30°C. In die Leistungszahlen wurde der Elektroenergiebedarf zur trockenen Rückkühlung (10 W_{el}/kW_{RK}) und für die Lösungsmittelpumpe (50 W_{el}/kW₀) eingerechnet. Über die Summenhäufigkeit der Außenlufttemperatur (im Bild 8 für Berlin) wurde eine mittlere Jahresarbeitszahl COP_m ermittelt, deren Wert für die Kaskade 7,39 beträgt gegenüber 2,43 für eine einstufige Kompressionskälteerzeugung mit R407C. Die Elektroenergieeinsparung beträgt in diesem Fall 67%. Hauptrandbedingungen des Vergleichs sind, die Kondensations- und Ab-

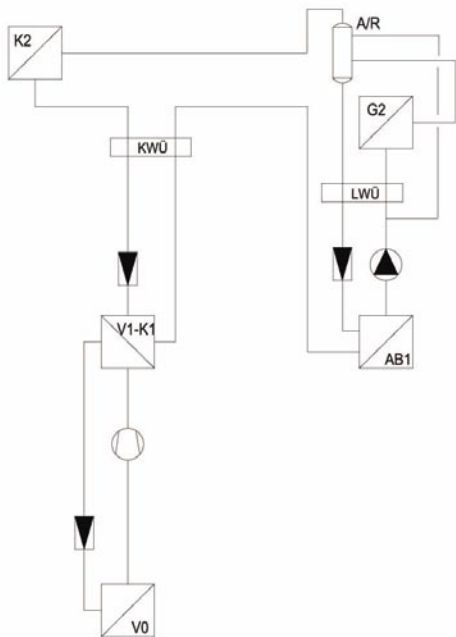


Bild 6 Vereinfachtes Schaltschema einer Kompressions-Absorptions-Kaskadenkälteanlage

sorptionstemperatur liegen 10 K über der Außenlufttemperatur, die Heizmedientemperatur beträgt im Vorlauf 100 °C und im Rücklauf 90 °C und ist über das Jahr konstant. Gegenwärtig wird im Institut für Luft- und Kältetechnik eine wassergekühlte Kompressions-Absorptions-Kaskadenkälteanlage mit 15 kW₀ Kälteleistung zur Kühlung einer Tiefkühlzelle vermessen.

Zusammenfassung

Kernstücke von Energieverbundanlagen sind Sorptionskälteanlagen. Aus energetischen und Akzeptanzgründen ist im Klimakältebereich dem Arbeitsstoff Wasser/Lithiumbromid der Vorzug zu geben. Für Nutzttemperaturen unter 0 °C und in kompakten, kleinen Anlagen < 5 kW besitzt das Arbeitsstoffpaar Ammoniak/Wasser Vorteile. Auf dem Gebiet der Wasser/Lithiumbromid-Absorptionskälteanlagen wurden in letzten Jahren neben den Anlagen traditioneller Hersteller auch viele Anlagen neuer Hersteller installiert. Bei Ammoniak/Wasser-Absorptionskälteanlagen ist die Anzahl installierter Anlagen erheblich geringer, obwohl auch auf diesem Gebiet in den letzten Jahren Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten unternommen wurden. Das Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden errichtete den letzten Jahren drei Prototypanlagen, die vermessen wurden. Die kleinen Anlagen werden solarther-

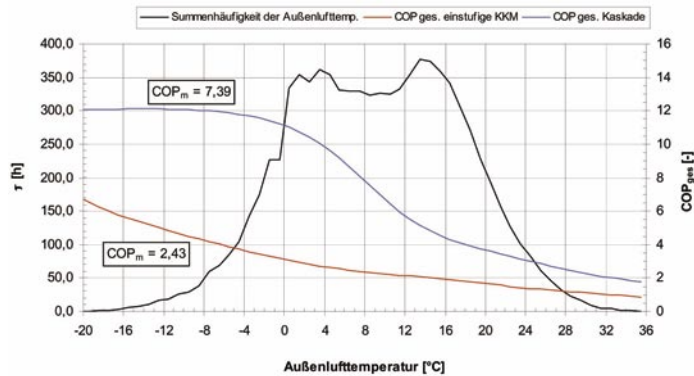


Bild 7 Vergleich einer luftgekühlten Kompressionskälteanlage mit einer luftgekühlten Kompressions-Absorptions-Kaskadenkälteanlage und Summenhäufigkeit der Außenlufttemperatur in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur

misch angetrieben, die größere wird mit der Abwärme einer BHKW-Anlage beheizt. Mit allen drei Anlagen konnte der energetisch und ökologisch sinnvolle Einsatz von Ammoniak/Wasser-Absorptionskälteanlagen in Verbindung mit solarthermischen bzw. mit Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen nachgewiesen werden. Um den mit NT-Abwärme angetriebenen Absorptionsprozess auch zur Tiefkälteerzeugung < -20 °C ohne eine aufwendige Double Lift-Schaltung nutzen zu können, wurde eine Kaskadenschaltung mit einer konventionellen Kompressionsstufe im Niederdruck und einer Absorptionsstufe im Hochdruck errichtet. Dadurch lassen sich 60 bis 70% der zur Kälteerzeugung notwendigen Elektroenergie gegenüber konventionellen Anlagen einsparen. Diese Kälteanlage wird ge-

genwärtig mit Unterstützung des Bundeswirtschaftsministeriums im ILK vermessen und erprobt. Die Arbeiten auf dem Gebiet der Ammoniak/Wasser-Absorption werden weiterhin von verschiedenen Einrichtungen vorangetrieben, wobei eine Unterstützung von Seiten der Industrie sehr hilfreich ist. Bei den Arbeiten stehen die Kaskadenkälteanlage zur Tiefkälteerzeugung mit Ab- oder Solarwärmenutzung, die Entwicklung kleiner Anlagen unter 10 kW₀, die Miniaturisierung kompakter Anlagen mit verbesserten Plattenwärmeübertrager als Wärme-/Stoffübertrager oder mit äußerst kompakten Membranabsorbentern sowie die Komponentenoptimierung beispielsweise der Lösungsmittelpumpe oder Lösungsverteilungen im Vordergrund. ■

Formelzeichen

COP; z; ζ	Wärmeverhältnis, Leistungszahl	Q	Leistung
τ	Zeit		

Indizes

A; Abs	Absorber	a	Austritt
c	Kondensator	D	Dephlegmator
DE	Double Effect	DL	Double Lift
E	Evaporator	e	Eintritt
ext	extern	G	Generator
ges	gesamt	H	Heiz
HW	Heizwasser	KT	Kälte-träger
LWÜ	Lösungswärmeübertrager	m	mittel
ME	Multi Effect	o	Verdampfung
R	Rektifikation	RES	Resorber
SE	Single Effect	SL	Single Lift
theo	theoretisch		