

Ammoniak-Kaskadenkälteanlage mit Kompressions- und Absorptionsstufe

Teil 2 – Untersuchungsergebnisse

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

Sebastian Zürich,
AGO AG

Der Vermessung der Versuchsanlage lag folgendes Untersuchungs- und Messprogramm zu Grunde:

- Leistungsvermessung der Kaskadenkälteanlage (Ermittlung Q_0 ; ζ ; COP_{ges}) bei Variation t_{Kz} , $t_{H/A,e}$ und $t_{KWA,e}$
- Ermittlung der Elektroenergieeinsparung bei Verwendung einer Kaskadenkälteanlage gegenüber einer Kompressionskälteanlage (Vorversuch: zur Vergleichbarkeit Vermessung der Kompressionskälteanlage bei einstufiger TK-Erzeugung),
- Untersuchung des Betriebes und Ermittlung des Pumpenwirkungsgrades der Lösungsmittelpumpe,
- Untersuchung des Verhaltens des Mitteldrucks in Abhängigkeit der äußeren Randbedingungen,
- Untersuchung eines abgestimmten Regelverhaltens der TEV in Kompressions- und Absorptionskreislauf,
- Untersuchung des praktischen Einsatzes von Kupfer innerhalb von R723-Anlagen.

In Bild 7 werden die Kälteleistung und die Kälteleistungszahl der Kompressionsstufe in Abhängigkeit der Verdampfungstemperatur dargestellt. Zum Vergleich wurde auch die Kälteleistungszahl der einstufigen TK-Erzeugung eingezeichnet. Die Luftaustrittstemperatur aus dem TK-Verdampfer lag allgemein 6 K über der Verdampfungstemperatur.

Aus Bild 7 ist ersichtlich, dass trotz der nicht aufeinander abgestimmten Wärmeeübertragflächen in der Kaskadenanlage, wodurch einerseits der Mitteldruck zu hoch war und somit nicht im optimalen Bereich lag

Der Trend zu einer rationalen 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 an die Umwelt gegeben oder nicht genutzt würde, wird mit Absorptionskältemaschinen Kälteenergie erzeugt. Nach einer grundlegenden Einführung in die Thematik wurden in Teil 1 dieses Beitrags (KKA 1/08) vor allem die Probleme bei der Tiefkälteerzeugung behandelt. Im Folgenden geht es vor allem um die Untersuchungs- und Messergebnisse sowie eine entsprechende Bewertung.

und andererseits das Wärmeverhältnis der Absorptionsstufe durch den verwendeten Lösungswärmeübertrager kleiner als erreichbar war, erhebliche Leistungsabweichungen und folglich Energieeinsparungen erreicht wurden. Mit Bild 8 wird dargestellt, dass die Kälteleistung der Kaskadenanlage selbstverständlich von der TK-Verdampfungstemperatur aber auch etwas von der Kühlwassereintrittstemperatur abhängig ist. 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.

Die Messergebnisse mit dem Kältemittel R723 in der Kompressionsstufe können wie folgt zusammengefasst werden. Die Gesamtfunktion der Kaskade wurde nachgewiesen. Die Abstimmung der Hauptkomponenten der Kaskade sind wie erwartet optimierungsbedürftig (Ursache: Nutzung vorhandener Bauteile). Im Vergleich zur TK-Erzeugung mit Kompressionskälteanlagen wurden trotz der Verwendung vorhandener Bauteile, die nicht dem optimalen Ausgangspunkt entsprechen, erheblich bessere COP erreicht. Das An- und Abfahrverhalten der Kaskadenstufen muss aufeinander abgestimmt sein. Der kritische Grenzwert für die Verdichtungsdrucktemperatur von $t_{K,e} < 130 \text{ °C}$ wurde zur TK-Erzeugung innerhalb der Kompressions-Absorptions-Kas-

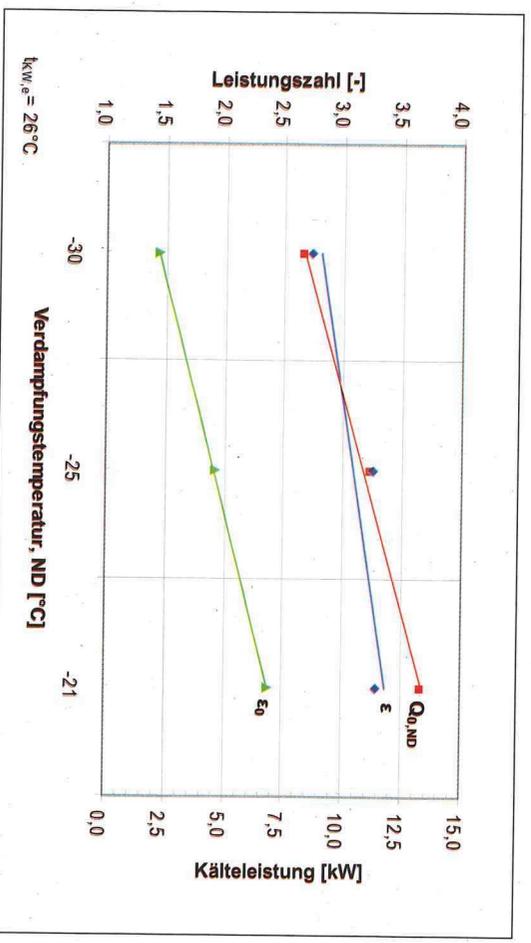


Bild 7: Kälteleistung und Kälteleistungszahl der Kompressionsstufe in Kaskadenschaltung und einstufiger Kreisprozessgestaltung in Abhängigkeit der Verdampfungstemperatur

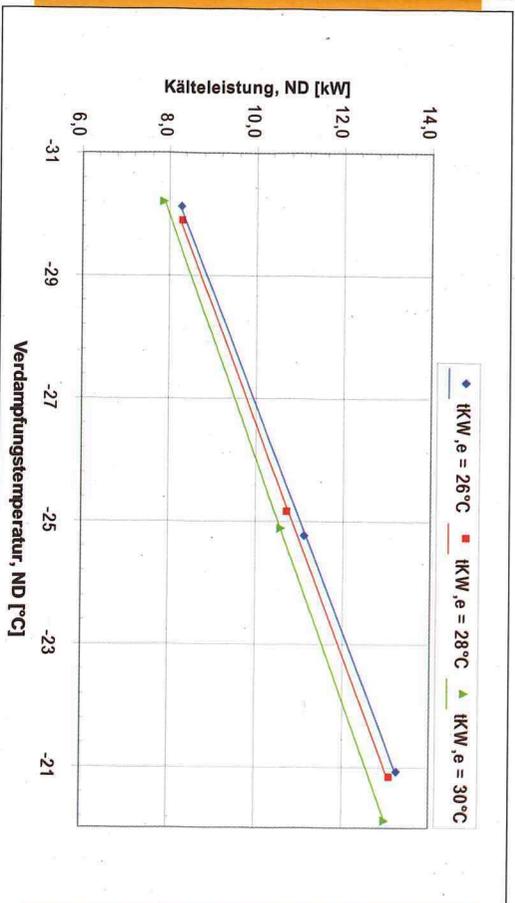


Bild 8: Kälteleistung in Abhängigkeit der Verdampfungs- und Kühlwassereintrittstemperaturen

kade nicht erreicht. Die Ölrückführung im Kompressionskreis mit R723 ist zwar gewährleistet, ein Ölabscheider wäre jedoch in Bezug zur Menge des Ölumlaufs günstig. Bei R723 sind wie bei R717 zur Tropfenfreiheit vor dem Verdichter etwas höhere Überhitzungen erforderlich als bei den chemischen Kältemitteln. Die Verwendung von Kupferwerkstoffen in R723-Anlagen ist unter Laborbedingungen bzw. in Anlagen ohne häufigeren Umbau möglich (Einhaltung des Grenzwertes der Kältemittelrestfeuchte im Kreislauf von < 400 ppm). Jedoch kann unter Praxisbedingungen der Grenzwert nur schwer gewährleistet werden, daher wird der Einsatz von Kupfer trotz positiver Laboruntersuchungen mit R723 nur mit den chemischen Kältemitteln als praktikabel angesehen. Bei R723 wird die Verwendung von Stahl vorgeschlagen. Durch mehrmaligen, dem Untersuchungsprogramm und der Testphase geschuldeten Umbau der Kompressionsstufe stieg der Feuchtegehalt in den Kupferrohren über den Grenzwert an und Leitungen sowie Lamellenwärmeübertrager korrodierten. Dieser nicht reparable Totalausfall verhin-derte weitere Messreihen mit R723. Die Verwendung eines anderen Kältemittels in der Kompressionsstufe war erforderlich. R410A schied durch die hohe Drucklage bei Umgebungstemperatur aus der weiteren Betrachtung aus. R134a wegen der Druck-

lage im Vakuumbereich bei tiefen Temperaturen. So wurde R407C und R404A für die weiteren Untersuchungen herangezogen. R407C besitzt ein relativ großes Temperaturband bei Verdampfung und Kondensation, wie Tabelle 2 zu entnehmen ist. Das Temperaturband ist im Kondensator sehr ungünstig, da infolge der kleineren mittleren Temperaturdifferenz der Kondensator mehr als doppelt so groß sein müsste. R407C führt zu höheren Druckverlusten, wodurch die Leitungsdimensionierung insbesondere der Leitungsdimensionierung erheblich größer erfolgen muss. Die gemessenen Druckverluste zwischen Kältemittelsammler und TEV in der ND-Stufe für die Kältemittel bei gleicher Konfiguration sind im Bild 9 dargestellt. Die höheren Druckverluste in der Kondensatleitung können dort zur Dampfbildung führen und die Blasenfreiheit vor dem TEV beeinträchtigen. Hinsichtlich der Lösemittelpumpe bestehen noch Optimierungspotentiale. Vollstrom, Drucksprung und Pumpenwirkungsgang wurden in Abhängigkeit der Frequenz für einen ausgewählten Betriebspunkt (Kühlwassereintrittstemperatur 26 °C, Heizwassereintritt 95 °C) ermittelt. Die Pumpe erreichte im Betriebspunkt einen Pumpenwirkungsgrad von nur 22 %, der mit sinkender Drehzahl (Frequenz) bspw. bei 44 Hz auf 20 % und bei 36 Hz auf 18 % fällt.

| Kältemittel | $t_{o,a}$ [°C] | $\Delta t_{m,0}$ [K] | $\Delta t_{m,c}$ [K] | $t_{c,a}$ [°C] |
|-------------|----------------|----------------------|----------------------|----------------|
| R723 | -30,0 | 7,2 | 7,0 | 10,0 |
| R407C | -35,4 | 10,2 | 3,1 | 4,0 |
| R404A | -30,5 | 6,8 | 7,5 | 9,5 |

Tabelle 2: Auswirkung Temperaturband der Kältemittel ($t_{o,a} = -30$ °C; $t_{c,a} = 10$ °C)



Die Technik im Herzen der Kälte
Innovativ Professionell

NEUE HOMEPAGE VON CARLY



- technische Unterlagen
- Dokumente
- Zertifikate
- alles auch zum Download
- in 5 Sprachen

www.de.carly-sa.fr

NEU NEU NEU NEU NEU



Auslegungssoftware
CARLYSOFT
Auslegungshilfe für alle
Komponenten,
einfachstes Handling,
on und offline nutzbar

www.de.carly-sa.fr/carlysoft/

komplettes
Produktsortiment
auch bei Ihrem Großhändler
kurzfristig verfügbar

Neue Anschrift

CARLY GmbH

Büro und Lager
Steigerstraße 5
67811 Dielkirchen
Tel.: 06361 459104
Fax: 06361 459109
Carly-Deutschland@t-online.de

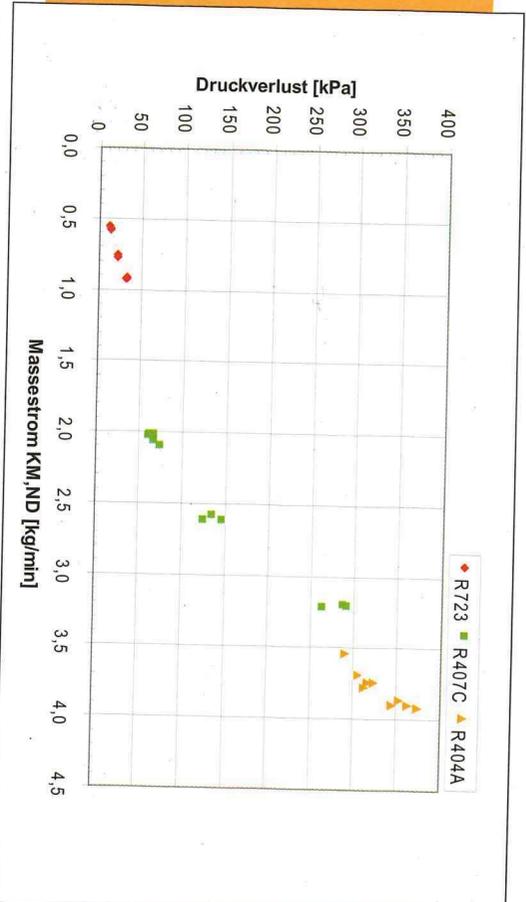


Bild 9: Gemessene Druckverluste zwischen Kältemittelsammler und TEV in der ND-Stufe für die Kältemittel in Abhängigkeit des Kältemittelmassenstroms

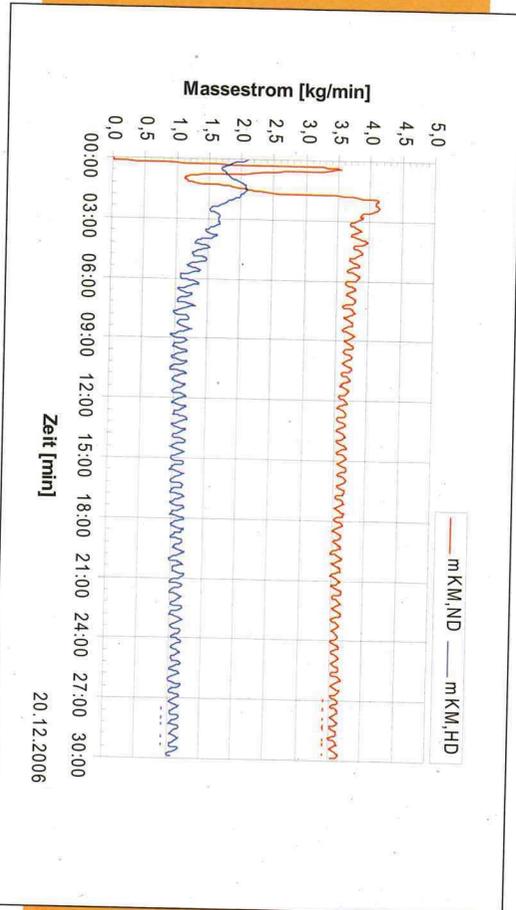


Bild 10: Zeitlicher Verlauf der Kältemittelmassenströme in der ND- und HD-Stufe während des Anfahrens der Anlage

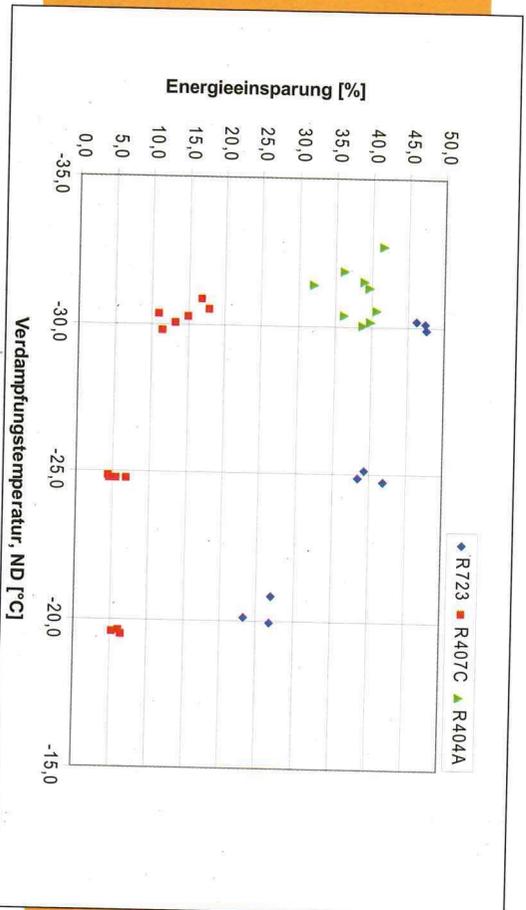


Bild 11: Elektroenergieeinsparung für die verschiedenen Kältemittel ($t_{HW,e} = 95\text{ °C}$ und $t_{KW,e} = 26\text{ °C}$)

Die weiteren Messergebnisse mit R407C und R404A können wie folgt zusammengefasst werden. R404A ist im Vergleich zu R407C geeigneter für den Einsatz in der Kaskade. Gegenüber R723 und unter Vernachlässigung des kältemittelbedingten Druckverlustes können mit R404A ähnliche Kälteleistungen und Leistungszahlen nachgewiesen werden. Die größten Energieeinsparungen werden jedoch bei Verwendung des natürlichen Kältemittels R723 erzielt. Die großen Druckverluste in Verbindung mit R404A führten zu Dampfblasen in der Kondensateitung, die Verwendung eines Nachkühlers wäre erforderlich.

Das Anfahren der Kaskadenkälteanlage mit Kompressions- und Absorptionsstufe mit zwei thermostatischen Expansionsventilen kann gut aufeinander abgestimmt werden. Bild 10 zeigt das Anfahrverhalten der Kaskadenkälteanlage im zeitlichen Verlauf der Kältemittelmassenströme in der ND- und HD-Stufe. Es ist ersichtlich, dass sich nach kurzer Zeit die Kältemittelmassenströme einregeln und sich ein kontinuierlicher Betrieb einstellt. Damit verbunden ist auch, dass die Kondensationswärme der ND-Stufe stetig durch die Verdampfung der HD-Stufe abgeführt wird und ein Überschreiten des zulässigen Hochdrucks und folglich das Ansprechen des Hochdruckwächters der ND-Stufe vermieden wird.

Optimierbar in der Absorptionsstufe sind die Kältemittelverteilung im Verdampfer und die Gestaltung der Nachverdampfung. Die Kältemittelverteilung in Plattenwärmeübertragern, die als Verdampfer arbeiten, ist ein bekanntes und noch nicht optimal gelöstes Problem. Bei kleinen Anlagen kann zur trockenen Verdampfung ein Rohrplattenwärmeübertrager mit unterer Einspritzung verwendet werden. Ein Verdampfer dieses Typs erzielte in der Versuchsanlage des ILK bessere Ergebnisse als der Plattenwärmeübertrager.

Es ist beabsichtigt, in naher Zukunft ein Felderprobungsprojekt zum Einsatz einer Kompressions-Absorptions-Kaskadenkälteanlage zu initiieren, um die wirtschaftlichen Auswirkungen praktisch zu untersuchen. Durch Einzelherfertigung und Einzelkomponentenbestellung liegen die Anlagenkosten derzeit natürlich über realistisch erreichbaren Kosten. Einen Vergleich der Gesamtkosten einer Kompressions- zu einer Kaskadenkälteanlage für einen Betrieb mit 6132 Vollstundenden im Jahr (Kühlung einer Tiefkühlzelle über 70 % des Jahres) in

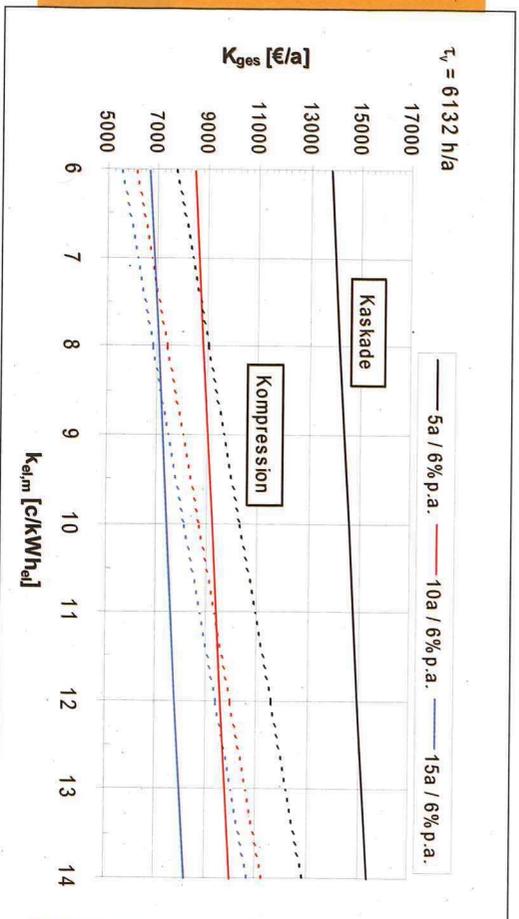


Bild 12: Gesamtkosten der Kompressions- und Kaskadenkälteanlage in Abhängigkeit eines mittleren Strompreises 6132 Volllaststunden im Jahr (70 % Jahresbetrieb)

Abhängigkeit eines mittleren Strompreises zeigt Bild 12. Die betrachtete Kälteanlage besitzt eine TK-Kälteleistung von 25 kW ($t_0 = -30 \text{ °C}$) und ist luftgekühlt. Das COP der Kompressionsstufe der Kaskade beträgt im Auslegungspunkt 5, das mittlere COP der Kaskadenkälteanlage inklusive Rückkühlenergie mit Berücksichtigung der Summenhäufigkeit der Außenlufttemperatur 10,2. Das mittlere COP einer Kompressionskälteanlage inklusive Rückkühlenergie ebenfalls mit Berücksichtigung der Summenhäufigkeit der Außenlufttemperatur wurde mit 2,4 ermittelt. Die Kostenrechnung wurde nach der Annuitätenmethode mit Zinssatz und Abschreibungszeit durchgeführt. Die spezifischen Investitionskosten bei gegenwärtiger Einzelherfertigung wurden für die Kompressionskälteanlage mit $650 \text{ €/kW}_{\text{a,TK}}$ für die Kompressionsstufe der Kaskade mit $450 \text{ €/kW}_{\text{a,TK}}$ und für die Absorptionsstufe mit $1680 \text{ €/kW}_{\text{a,TK}}$ abgeschätzt.

Trotz der hoch angesetzten Investitionskosten ergeben sich annehmbare Wirtschaftlichkeitspunkte. Die Wirtschaftlichkeit der Kaskadenanlage wäre nach Bild 12 bspw. bei einer Annuität von 0,103 %/a ($r = 5 \text{ a}$; $p = 6 \text{ % p.a.}$) gewährleistet, wenn der mittlere Strompreis (Arbeits- und Leistungspreis) höher als $8,5 \text{ C/kWh}_{\text{el}}$ beträgt. Höhere Annuitäten erhöhen den Grenzwert, höhere Volllaststunden senken diesen, bspw. bei 7884 h/a (90 %) auf $6,1 \text{ C/kWh}_{\text{el}}$. Sehr günstig auf die Wirtschaftlichkeit von Absorptionskälteanlagen wirkt sich z.B. bei Biogas-BHKW der zusätzliche Stromerzeugungsbonus von $2 \text{ C/kWh}_{\text{el}}$ nach dem EEG aus: Die durch die Absorptionskälteanlage genutzte BHKW-Abwärme muss über

einen Wärmemengenzähler erfasst werden. Die Wärmemenge wird dann mit der BHKW-Stromkennzahl in Elektroenergie umgerechnet, die mit dem zusätzlichen Bonus vergütet wird.

Zusammenfassung | Ergebnisse der

Untersuchung einer NH_3 -Kompressions-Absorptions-Kaskadenkälteanlage waren deren Aufbau und der erfolgreiche Testbetrieb. Es wurde nachgewiesen, dass eine erhebliche Einsparung an Elektroenergie bei der TK-Erzeugung ($> 50 \text{ %}$) gegenüber der Kompressionskälteerzeugung erzielt werden kann. Die Nutzung natürlicher Kältemittel wie R723 im Kompressionsteil auch bei kleinen Leistungen ist möglich. Aber auch R717 bzw. chemische Kältemittel sind einsetzbar. Ziel sollte jedoch die Verwendung von nicht die Umwelt schädigender Kältemittel sein. Durch eine Kaskadenanlage des vorgestellten Typs kann die Erzeugung von Tieftemperaturkälte (-30 °C) unter Nutzung von nieder temperierter Abwärme erfolgen. Damit wird das Anwendungsspektrum der Abwärmennutzung mit Absorptionskälteanlagen erweitert. Modell- und Demonstrationsprojekte mit Anwendung einer Kompressions-Absorptions-Kaskadenkälteanlage werden durch Bund und Länder gefördert.

Anwendungsgebiete für Kaskadenkälteanlagen des dargestellten Typs sind die Gefrierkälteerzeugung und Gefrierlagerung, Schlachthöfe und Fleischverarbeitungscentren, Schiffskühlung und Fischverarbeitungszentren, sind Großbäckereien, Chipfabriken, Frittierfabriken und ist die Kälteerzeugung in der Chemieindustrie.

Formelzeichen

| | |
|--------------|--------------------------------|
| a | Annuität |
| COP, ζ | Wärmeverhältnis, Leistungszahl |
| f | Frequenz |
| K | Kosten |
| P | Leistung |
| P | Druck |
| Θ | Wärmeleistung |
| t | Temperatur |
| V | Volumenstrom |
| η | Wirkungsgrad |
| μ | spez. Lösungsumlauf |

Indizes

| | |
|---------|-------------------------|
| AB; Abs | Absorber |
| a | Austritt |
| c | Kondensator |
| D | Deplegmatore |
| e | Eintritt |
| G | Generator |
| ges | gesamt |
| HD | Hochdruck |
| HW | Heizwasser |
| is | isentrop |
| KW | Kühlwasser |
| KT | Kälte-träger |
| Kz | Kühlzelle |
| LMP | Lösungsmittelpumpe |
| LWÜ | Lösungswärmeüber-trager |
| m | mittel |
| max | maximal |
| o | Verdampfung |
| p | Pumpe |
| real | real |
| rL | reiche Lösung |
| TK | Tiefkälte |
| ü | Überhitzung |