Peter Noeres

Thermische Kälteerzeugung mit Dampfstrahlkälte-maschinen

Konzepte und Erfahrungen

Der Beitrag gibt einen Überblick über die im Rahmen des BMWi-Verbundprojekt »Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung mit Dampfstrahlkältemaschinen« (Fkz. 0327205D, [18]) durchgeführten Untersuchungen. Im benannten Verbundprojekt wurden u.a. Möglichkeiten zur Weiterentwicklung des Dampfstrahlkälteprozesses für Anwendungen mit starken Laständerungen sowie hohe Anforderungen an die Regelgüte untersucht. Zur Zeit laufen im Rahmen eines vom BMWA geförderten Projektes weitere Arbeiten zur Errichtung einer Kältecontaineranlage mit Dampfstrahltechnik (Verbundprojekt Fkz. 0327205E).

Thermal Driven Chilled water generation based on Steam Jet Ejector Chillers – Concepts and Experiences

The following report is based on the studies within the joint research project „Combined Heat, Cold, and Power Production with Steam Jet Ejector Chiller", funded by the German Ministry of Economy and Technology. Within the project the possibilities of further development, for applications with large changes in demand and high requests for control quality were studied. At the moment further tasks for the erection of a container plant with steam jet ejector technique are running (joint project 0327205E, funded by the BMWA).

Keywords: steam jet ejector chiller technique; thermally driven chillers; combined heat, cold, and power cycle; jet compressor

Dr.-Ing. P. Noeres Fraunhofer UMSICHT, Oberhausen
Vortrag, gehalten beim DKV-Bezirksverein in Berlin (2005)

Bisherige Anwendungen

An vielen Industriestandorten wird zur Wärme- und Stromerzeugung das Konzept der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) genutzt. Mit diesen Verfahren kann effizient die geforderte Energieversorgung ermöglicht werden. Neben dem Wärme- und Strombedarf existiert oftmals auch der Bedarf an Kälte für Produktion, Nebenanlagen u. Verwaltung. Dieser Bedarf wird in der Regel mit elektrisch betriebenen Kompressionskältemaschinen abgedeckt. Neben dieser üblichen Form der Kälteversorgung kann auch mit Hilfe von thermischen Kältemaschinen mit Abwärme oder Nutzwärme aus KWK-Anlagen Kälte bereitgestellt werden. Es wird in diesem Fall auch von einer Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) gesprochen.

Zu den Vorteilen, Möglichkeiten und sich anbietenden technischen Verfahren der KWKK wird an verschiedenen Stellen berichtet, z.B. in [3 bis 7]. Argumente, die für eine thermische Kälteerzeugung sprechen sind u.a. die Reduktion der Energiekosten durch Nutzung von Abwärme oder Nutzwärme aus KWK-Anlagen, die bessere Ausnutzung vorhandener Energiesysteme sowie die Möglichkeiten zur Primärenergieeinsparung.

Zur Umsetzung einer auf der Nutzung thermischer Energie basierenden Kälteversorgung können die unterschiedlichsten Konzepte zur Anwendung kommen, z.B. Absorptionskältemaschinen mit den Arbeitsstoffpaaren Wasser-LiBr für die Kaltwassererzeugung sowie das Arbeitsstoffpaar Ammoniak-Wasser für tiefere Verdampfertemperaturen. Daneben werden auch weitere Verfahren wie die offenen Sorptionsprozesse (z.B. das DEC-Verfahren) sowie Adsorptionskältemaschinen mit Wasser-Silicagel als Arbeitsstoffpaar genutzt.

Ein bisher selten verwendetes thermisches Kälteverfahren ist der Dampfstrahlkälteprozess. Dieser Prozess wird fast ausschließlich in verfahrenstechnischen Prozessen zur Produktkühlung und Vakuumerzeugung eingesetzt. Daneben werden Strahlverdichter auch zur Brüdenverdichtung im Rahmen einer Wärmerückgewinnung genutzt. Bei diesen Anwendungen handelt es sich in der Regel um kontinuierlich ablaufende Prozesse, bei denen auf verfügbare Dampfsysteme zurückgegriffen werden kann und die Versorgungssicherheit eine maßgebliche Rolle spielt. Die bekannten Anwendungen entsprechen nicht den Anforderungen in der Klimatechnik. Bisher werden auch überwiegend nur für den Einzelfall konzipierte Anlagen gefertigt.

Dampfstrahlverdichter werden schon seit langem in der Verfahrenstechnik zum Fördern und Verdichten von Medien eingesetzt. Auch für Kühlzwecke, insbesondere für den Einsatz mit dem Kältemittel Wasser ist ihre Anwendung schon seit langem bekannt. Das Verfahren wird nach [14] zuerst 1884 als Patentanmeldung erwähnt. Eine erste brauchbare Maschine wurde 1910 von *Leblanc* konstruiert. Erste Anwendungen für chemische Industrie und auf Kriegsschiffen zur Munitionskühlung schlossen sich an.

Derzeit liegt der Einsatzbereich der DSKM nach Angaben von Herstellern hauptsächlich in der Industrie zur Erzeugung von Prozesskälte. Die DSKM wird insbesondere in der Zellstoffindustrie, Lebensmittelindustrie, chemischen Industrie und Stahlindustrie eingesetzt. Darüber hinaus sind Anwendungen zur industriellen Erzeugung von Eis, die Klimatisierung von Industrieeinheiten, sowie zur Meerwasserentsalzung bekannt geworden. Grundsätzlich findet die DSKM ihre Anwendung überall dort, wo günstig Heizdampf zur Verfügung steht und auch die Rückkühlung kein Problem darstellt. Nach Angaben aus [27], mit Angaben aus einer Referenzliste eines Herstellers wurden in

© KI Luft- und Kältetechnik 11/2006

Kälte · Luft · Klimatechnik

INGENIEURWISSEN IN FORSCHUNG UND PRAXIS

Entdecken Sie weitere interessante Artikel und News zum Thema auf ki-portal.de!

Hier klicken & informieren!

den Jahren von 1975 bis 1994 über achtzig Anlagen zur Erzeugung von Kälte/Prozesswärme mit Hilfe der Strahlverdichtertechnik gebaut und in Betrieb genommen, entsprechend einer installierten Gesamtleistung von 313 MW_{th}. Die Tab. 1 gibt einen Überblick über das Spektrum der DSKM und ihrer Anwendung in der Industrie.

Für das Verfahren wurden von den Herstellerfirmen und weiteren Systemanbietern bisher nach Kenntnisstand des Autors keine Standardbaureihen angeboten bzw. entwickelt. Vielmehr handelt es sich um speziell für diese technische Aufgabe geplante und gebaute Kälteprozesse. In der Klimatechnik ist die Dampfstrahlkältetechnik bisher zur Kaltwassererzeugung kaum bekannt geworden, obwohl durchaus auch in diesem Sektor sinnvolle Einsatzmöglichkeiten bestehen können. Im Grunde stellt der Dampfstrahlkälteprozess einen einfachen und zuverlässigen Prozess dar, der durchaus auch mit mechanischen Kälteprozessen verglichen werden kann. Der Einsatz des Arbeitsmediums Wasser ist ebenfalls in den meisten Einsatzfällen von Vorteil.

Tabelle 1: Leistungsspektrum verschiedener DSKMs und deren Einsatz in der Industrie (mit Angaben aus [27])

Industriezweig	Kälteleistung in kW_{th}	Endtemperaturen in °C	Kaltwassermenge in m^3/h
Zellstoffindustrie	407 – 3.721	4 – 19,5	13 – 200
Lebensmittelindustrie	262 – 5.232	15 – 55	4 – 750
Chemische Industrie	40 – 58.140	5 – 98	2,5 – 2.800
Stahlindustrie	6 – 1.500	5 – 25	1 – 40
Klimatisierung	280 – 18.140	6 – 10	40 – 1.560
Sonstige Industrie	29 – 21.350	0 – 95	1 – 1.207

Thermische Kälteerzeugung mit Dampfstrahlkältemaschinen

Eine detaillierte Beschreibung in der Literatur ist z.B. in [8, 9] zu finden. Weitere Veröffentlichungen sind z.B. zur Bemessung von Strahlerverdichtern, Energieverbrauch sowie zur Auslegung für beliebige Medien in der Fachliteratur zu finden (weitere Informationen auch in [10 bis 17]).

Bei einer Dampfstrahlkältemaschine handelt es sich um einen konventionellen Kaltdampfprozess, bei dem der mechanische Verdichter einer Kompressionskältemaschine durch einen Dampfstrahlverdichter ersetzt wird. Zur Verdichtung wird ein Treibmedium als Hilfsmedium benötigt. Daher kann prinzipiell von einer Trennung des Prozesses von den sekundären Systemen (Kühlwasser, Kaltwasser, Heizkreislauf/Dampfsysteme) abgesehen werden. Anstelle von Wärmetauschern können Mischkondensatoren und Entspanner (Flashverdampfer) zum Einsatz kommen. Steht ein Dampfnetz mit ausreichenden Dampfdrücken zur Verfügung, so kann dieser Dampf direkt zur Kälteerzeugung genutzt werden. Ansonsten muss über einen Dampferzeuger erst der erforderliche Treibdampf erzeugt werden. Eine schematische Darstellung eines von der Umgebung abgeschlossenen Dampfstrahlkälteprozesses ist in Bild 1 zu finden.

Der Dampfstrahlverdichter V1 saugt Kaltdampf aus dem Wärmetauscher W1 und erzeugt einen Förderstrom, der aus dem Kaltdampfstrom und Treibstrom besteht. Der Förderstrom passiert den Wärmetauscher W2 und wird dort unter Abgabe der Kondensationswärme kondensiert. Anschließend wird der Förderstrom entsprechend seinen Mischungsanteilen Treibstrom/Kaltdampf wieder aufgeteilt. Der Teilstrom zur Treibdampferzeugung wird mit Hilfe der Pumpe P1 zu dem Wärmetauscher W3 gefördert. Dort wird durch Wärmezugabe wieder Treibdampf erzeugt. Der zweite Teilstrom wird über eine Drossel entspannt und gelangt in den Wärmetauscher W1. Dort wird durch Verdampfung Wärme aus dem zu kühlenden Medium aufgenommen. Der entstehende Kaltdampf wird anschließend vom Dampfstrahlverdichter wieder angesaugt.

Das Betriebsverhalten eines Verdichters liegt dann über die Geometrie fest. An-

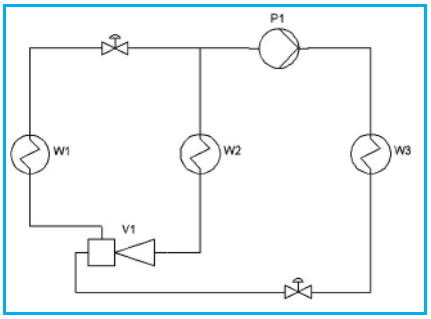

Bild 1: Geschlossener Kältekreislauf einer DSKM. V1 – Verdichter, W1, W2 – Verdampfer, W3 – Kondensator

sätze zur Berechnung sind in der Literatur zu finden (z.B. in [1]). Je nach Hersteller sind auch etwas voneinander abweichende Geometrien für die Mischkammer und auch zum Diffusor selbst üblich. Der engste Querschnitt sowie die Laval-düse sind entsprechend der Betriebsbedingungen und dem geforderten Saugmassenstrom auszulegen. Die Länge des Diffusors wird ebenfalls über geometrische Betrachtungen aus dem engsten Querschnitt, dem Austrittsquerschnitt und einem optimalen Verjüngungswinkel für den jeweiligen Auslegungsfall berechnet.

In Bild 2 sind die Verläufe von Druck und Strömungsgeschwindigkeit in einem Strahlverdichter vereinfacht dargestellt. Durch Impulsaustauschvorgänge wird im Bereich der Fangdüse der Saugstrom beschleunigt, der Treibstrom entsprechend abgebremst. Beide Ströme vermischen sich bei diesem Prozess zu dem sogenannten Mischdampf, in dem ebenfalls noch sehr hohe Strömungsgeschwindigkeiten herrschen. In einem Überschalldiffusor werden die hohen Strömungsgeschwindigkeiten des Mischdampfes durch Strömungsverzögerung zur Druckerhöhung genutzt. Dieser Vorgang stellt den eigentlichen Verdichtungsvorgang dar, bei dem es im Bereich des engsten Querschnittes zu einem senkrechten Verdichtungsstoß kommt. Dampfstrahlverdichter können sowohl für unterkritische als auch für überkritische Strömungsbedingungen eingesetzt werden. Für typische Betriebsbedingungen, das heißt einem Verdichtungsverhältnis sowie Expansionsverhältnis (p_2/p_0 bzw. p_1/p_0) größer 1,71 herrschen überkritische Strömungsbedingungen sowohl in der Treibdüse als auch im Diffusor vor. Beim Abbremsen der Strömung im Diffusor wird ein senkrechter Verdichtungsstoß im Bereich bzw. kurz hinter dem engsten

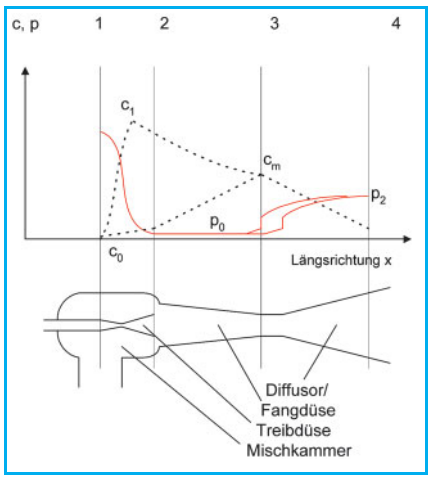

Bild 2: Strahlverdichter (nach [26])

Querschnitt ausgelöst, bei dem die Strömung schlagartig von überkritische in unterkritische Zustände wechselt, wobei gleichzeitig die Temperatur und der Druck ansteigen (Bild 2).

Das Leistungsverhalten von Dampfstrahlkältemaschinen unterscheidet sich von dem anderer thermischer Kälteanlagen. Bild 3 gibt für einen Strahlverdichter eine Darstellung entsprechend Herstellerangaben wieder, wobei der Saugmassenstrom gegen Verdampfer- und Kondensatordruck aufgetragen wird. Der Saugmassenstrom wird bis zu einem Grenzgegendruck p_2* nur vom Verdampferdruck p_0 festgelegt. Die Leistungskurve verläuft horizontal, bei Drücken $p_2 < p_2$*, für Kondensatordrücke p_2 größer p_2* bricht die Saugleistung relativ schnell zusammen. Diese Betriebsbedingungen sollten vermieden werden, da der Strahlverdichter kaum mehr stabil betrieben werden dadurch „umkippen" kann. Übersteigt der Kondensatordruck p_2 einen gewissen Grenzgegendruck p*, so schlägt die Strömung um und es kommt zu einer Rückströmung aus dem Kondensator in den Verdampfer. Dieser Effekt kann sich im Sekunden- bis Minutenbereich wiederholen. Ähnlich wie bei Turboverdichtern tritt ein sogenanntes Pumpen ein. Solche Betriebszustände sind für einen Anlagenbetrieb in jedem Fall zu vermeiden. Es entsteht kein Geräteschaden, allerdings geht unnötig Kälteleistung verloren.

Üblicherweise wird der Strahlverdichter auf einen Auslegungsgegendruck p_2 ausgelegt, der etwas geringer als der zugehörige Grenzgegendruck des gewählten Strahlverdichters ist. Unter diesen Bedingungen wird der Strahlverdichter unter optimalen Bedingungen betrieben. Der Grenzgegendruck selber wird vom Treibdampfdruck p_1 bestimmt, in geringerem Umfang auch von p_0 beeinflusst. In erster Näherung kann im Bereich des Auslegungspunktes ein proportionaler Zusammenhang zwischen p_2* und p_1 angenommen werden. Insbesondere bei Kondensatordrücken, die kleiner als der Auslegungskondensatordruck sind, kann dieses Leistungsverhalten zur Reduktion von p_1 herangezogen werden, wodurch der Treibdampfbedarf an die tatsächlich erforderliche Verdichtungsarbeit angepasst werden kann (Bild 3).

Das Betriebsverhalten kann den vier Gleichungen in erster Näherung erfasst werden. Der spezifische Treibdampfbedarf für den Auslegungspunkt bn kann z.B. nach [14] in Abhängigkeit von den isentropen Enthalpiedifferenzen für Expansion und Kompression und einem Gütegrad λ beschrieben werden. Übliche Werte für λ liegen zwischen von 0,6 – 0,7.

Die Darstellung der Leistungsdaten in Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen für die Größen Kälteleistung und Wärmeverhältnis (COP) sind beispielhaft für eine zweistufige[1] DSKM entsprechend dem Anlagenkonzept bei der Papierfabrik Köhler in Bild 4 (COP aufgetragen gegen T_0, Bild 5 (Kälteleistung in Abhängigkeit von T_0) und Bild 6 (COP_n aufgetragen gegen T_1, mit T_2 als Parameter für $T_0 = 6°C$) zu finden. Die Berechnungen gelten für einen Gesamtgütegrad $l = 0{,}59$ und Betrieb aller Strahlverdichter (LS = 100 %) und einer Abkühlung des Kaltwassers von 16 auf 8°C für den Nennbetriebsfall. Bei dem gewählten Konzept wird der Kälteträger direkt in einem Flashverdampfer gekühlt. Auf dem Kondensator ist eine hydraulische Trennung zwischen Kühlwasser- und Kondensatorsystem vorgesehen.

Wie Bild 4 zeigt, hängt der COP stark vom Kondensatorgegendruck und damit von der Kühlwassertemperatur ab, die Kälteleistung wird hingegen deutlich

$$\frac{\dot{m}_{1,n}}{\dot{m}_{0,n}} = b_n = fkt(\Delta h_1/\Delta h_2, \lambda) \approx \frac{1}{\sqrt{\lambda \cdot \frac{\Delta h_1}{\Delta h_2} - 1}}. \quad (1)$$

$$COP = 1/b \cdot \left(\frac{\Delta h_v|_{T=T_0} - c_p \cdot (T_2 - T_0)}{\Delta h_v|T =_{T1} + c_p \cdot (T_1 - T_2)} \right). \quad (2)$$

$$b \sim \frac{p_2}{p_0} \cdot \frac{p_{0,n}}{p_{2,n}} \cdot b_n. \quad (3)$$

$$\dot{m}_0 \sim p_0. \quad (4)$$

[1] zweistufig – hiermit ist die Abkühlung des Wärmeträgers in zwei Stufen gemeint, dadurch, dass im Prinzip zwei DSKM-Kälteprozesse in Reihe geschaltet werden.

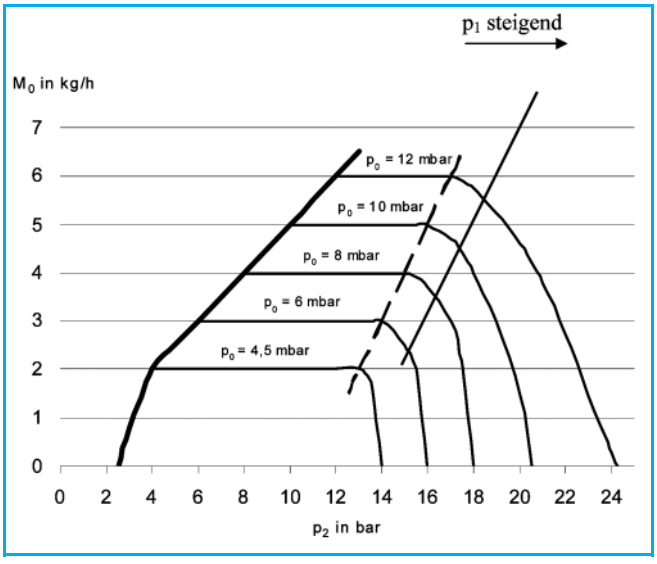

Bild 3: Leistungscharakteristik von Strahlverdichtern: Saugmassenstrom eines Strahlverdichters in Abh. von Saugdruck und Kondensatordruck, Arbeitsmedium Wasser (Brüdenverdichter 85 bv 2, z.B. nach [26])

© KI Luft- und Kältetechnik 11/2006

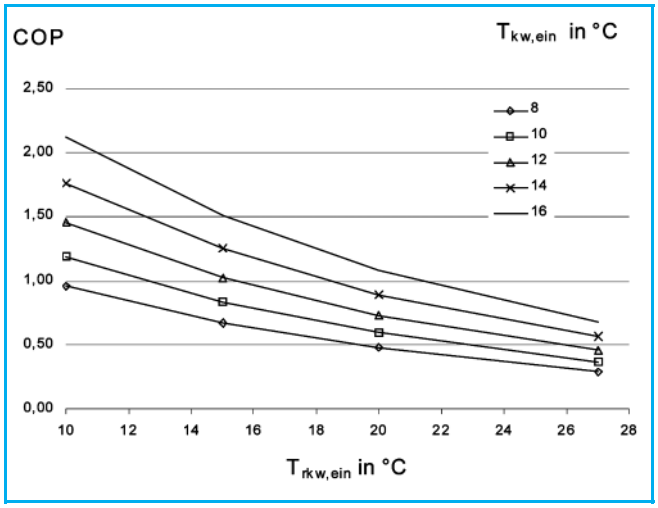

Bild 4: COP einer zweistufigen DSKM (p_1 = 7,16 bar, LS = 100 %)

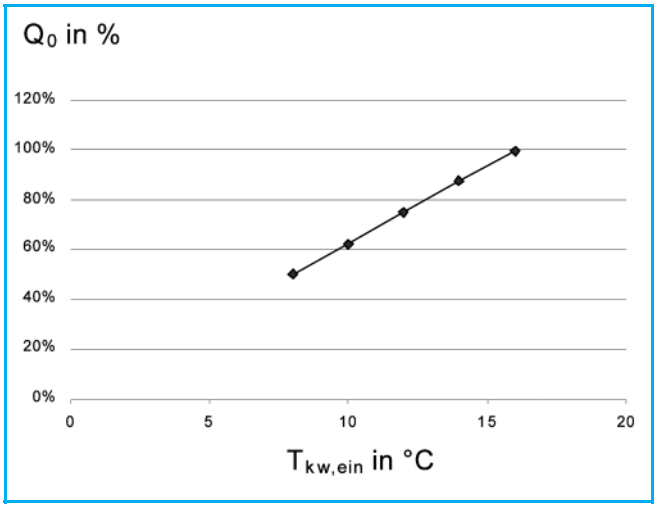

Bild 5: Kälteleistung einer zweistufigen DSKM, (LS = 100 %)

von der Kaltwasseraustrittstemperatur beeinflusst (Bild 5). Mit steigender Kaltwassertemperatur steigt der COP, ebenso mit fallender Kondensationstemperatur. Auch höhere Treibdampfdrücke haben einen positiven Einfluss auf den COP. Demgegenüber verändert sich die Kälteleistung bei veränderten Kondensationstemperaturen und Treibdampfparametern bei stabilem Betrieb kaum. Der Einfluss der Treibdampftemperatur bzw. des Treibdampfdruckes ist in Bild 6 berechnet. Bei konstanten Kondensatordruckbedingungen steigt der COP für den Auslegungsfall von 0,3 bei einer Sattdampftemperatur von 100°C auf bis zu 0,7 bei = 200°C an.

Regelungskonzepte

Zum Betrieb einer Dampfstrahlkältemaschine sind im wesentlichen zwei Größen zu regeln, die Leistung sowie der Treibdampfdruck[2]. Bzgl. der Leistungsregelung werden in [18] die verschiedenen Regelungsarten hinsichtlich ihrer Effizienz miteinander verglichen. Prinzipiell stehen vier verschiedene Konzepte zur Leistungsanpassung zur Verfügung:

1. Zu- und Abschalten von Strahlverdichtern, Leistungsteilung z.B. in 1/3, 2/3 (3 Leistungsstufen) oder 1/7, 2/7 und 4/7 (7 Stufen).
2. Bypassregelung.
3. Selbstregulierung bzw. Drosselregelung (Leistungsanpassung über sich ändernde Verdampfertemperaturen bzw. Saugdrücke).
4. Düsennadelregelung.

Bis auf die Düsennadelregelung sind die anderen Verfahren auch von konventionellen Kälteprozessen gut bekannt. Im begrenzten Umfang kann durch Anpassung des engsten Querschnitts in der Treibdüse durch eine Düsennadel die Kälteleistung angepasst werden. Allerdings befindet man sich hierbei im Bereich der Kennlinie des Strahlverdichters jenseits des stabilen Punktes. Die Regelung ist sehr empfindlich gegenüber dem eingestellten Treibdampfmassenstrom, sie ist daher nur im entsprechendem Regelungsaufwand realisierbar. Der eigentliche Verwendungszweck der Düsennadelregelung ist die Treibdampfregelung, insbesondere nach [20] bei niedrigen Expansionsverhältnissen (Verhältnis Treibdampfdruck zu Saugdruck).

In den meisten Fällen wird die Kälteleistung durch Ein- und Ausschalten des Dampfstrahlverdichters reguliert. Nachfolgend werden die charakteristischen Eigenschaften der verschiedenen regelungstechnischen Ansätze tabellarisch beschrieben. Unter diesen Bedingungen werden bei der taktenden Betriebsweise sogar bessere Wärmeverhältnisse erzielt als für den Auslegungsfall. Mit Hilfe der Bypassregelung kann die ganze Leistungsbreite kontinuierlich abgefahren werden. Bei dieser Regelung verschlechtert sich allerdings der COP. Die Selbstregelung, bei der die Verdampfertemperatur allmählich zu niedrigen Temperaturen wandert, besitzt einen geringfügig besseren Wirkungsgrad als die Bypassregelung. Eine Übersicht über die verschiedenen Verfahren wird in Tab. 2 vorgestellt.

Durch die Treibdampfregelung kann der Dampfbedarf bei niedrigen Kühlwassertemperaturen angepasst werden. Zur Treibdampfregelung gibt es zwei Verfahren, die Drosselregelung für den Treibdampf sowie die schon genannte Düsennadelregelung. Während bei der

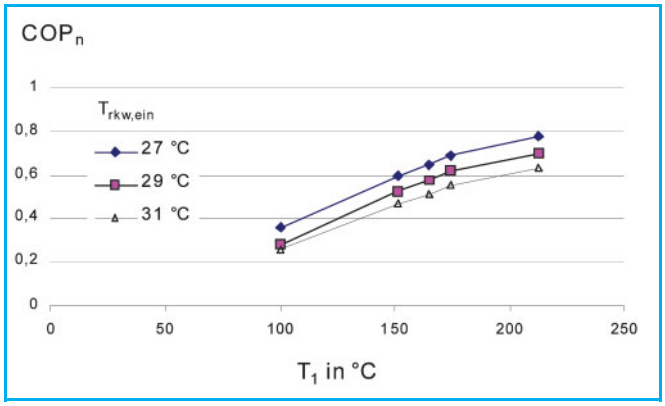

Bild 6: COP im Nennbetriebsfall in Abhängigkeit vom Treibdampfdruck (T_{kw} = 16/8°C)

[2] Anmerkung: Daneben sind je nach Anlagenkonzept weitere Größen wie Füllstände bzw. Nachspeisesysteme, Hilfssysteme wie Entlüftung zu regeln.

Tabelle 2: Übersicht über die verschiedenen Arten der Leistungsregelung

	Zu- und Abschalten	Bypassregelung	Drosselregelung im Saugstutzen	Absenkung der Kaltwasseraustrittstemperatur	Düsennadelregelung
Regelbereich	0 – 100 %	0 – 100 %	50 – 100 %	50 – 100 %	85 – 100 %
Effizienz	bei Teillast zunehmend auf absinkender Kondensatordrücke	bei Teillast unterproportional abnehmend	bei Teillast unterproportional abnehmend	abnehmend	abnehmend
Eigenschaften	nicht stetig regelbar Dampfbedarf ist proportional der Strahleranzahl	stetige Regelmöglichkeit Dampfbedarf leicht über Drosselregelung abnehmend	stetige Regelmöglichkeit Dampfbedarf leicht über Drosselregelung abnehmend	Selbstregulierung Dampfverbrauch nahezu konstant	nur eingeschränkte Regelungsmöglichkeit

Drosselregelung der Vordruck und damit der Durchsatz als eigentliche Stellgröße vor der Treibdüse verändert wird und die Düse an sich unverändert bleibt, wird bei der Düsennadelregelung der Düsenquerschnitt verändert, der Vordruck bleibt unverändert. Durch die Drosselung des Treibmitteldruckes wird der Grenzgegendruck am Ende des Strahlverdichters verkleinert, was jedoch auf den Saugstrom kaum Einfluss hat, solange der tatsächlich anliegende Kondensatorgegendruck kleiner als der Grenzgegendruck bleibt.

Beispiele für realisierte Anlagen

Es sind nur wenige Berichte zu durchgeführten Projekten in der Fachliteratur zu finden. Bisher sind zwei Demonstrationsanlagen unter Mitwirkung von Fraunhofer UMSICHT realisiert worden. Wesentliche Kenndaten sind in der Tab. 3 zusammengefügt. In Dänemark wurde entsprechend Angaben des DTI und Angaben in [20] in den neunziger Jahren ebenfalls eine Demonstrationsanlage mit einer 200 kW-Dampfstrahlkältemaschine errichtet. Bei dieser Anlage wird anstelle eines Mischkondensators ein Verdunstungsverflüssiger verwendet. Zu einer weiteren Anlage bei der Müllverwertung Borsigstrasse GmbH, Hamburg ist bisher nach Kenntnis des Autors keine Veröffentlichung erschienen. Nach Angaben des Betreibers hat die Anlage eine Kälteleistung von 280 kW_{th} zur Erzeugung von Kaltwasser auf einem Temperaturniveau von 6°C. In [21] wird eine Dampfstrahlkältemaschine mit einer Kälteleistung von 28 MW_{th} zur Kühlung von Kühlwasser auf eine Temperatur von 20°C vorgestellt. Die Kältemaschine selber wird mit Seewasser rückgekühlt.

Tabelle 3: Verfahrensdaten zu realisierten Dampfstrahlkälteanlagen [28, 24]

	Kältezentrale Brückenstraße Gera	Kältezentrale Werk Oberkirch, Papierfabrik August Köhler AG
Kälteleistung	600 kW_{th}	1000 kW_{th}
Saugdampfstrom	900 kg/h	1440 kg/h
Rückkühlleistung	1760 kW_{th}	3150 kW_{th}
Antriebsleistung Dampf	1160 kW_{th}	2150 kW
Dampfmassenstrom	1650 kg/h	2945 kg/h
Dampfdruck/Dampftemperatur	3 – 5 bar(ü), 143°C	2,2 bar(ü), 124°C
Auslegungsdruck	180°C	2,2 bar(ü), Sattdampf
	3 bar(ü), Sattdampf	
Kaltwassertemperatur	6/12°C	9/15°C
Verdampferdruck	9 mbar/11,4 mbar(abs)	11,4 mbar/13,1 mbar(abs)
Kühlwassertemperatur	25/30°C	28/35°C
Kondensatordruck	46/52 mbar(abs)	42,4/62 mbar(abs)
Feuchtkugeltemperatur für Nennfall	21°C	24°C
Konzept	zweistufige Abkühlung des Kaltwassers, offene Bauweise zum KW-Netz und Dampfnetz, Entkopplung vom RKW-Kreis über Platten-WT	zweistufige Abkühlung des Kaltwassers, offene Bauweise zum KW-Netz und Dampfnetz, Entkopplung vom RKW-Kreis über Platten-WT
COP_n	0,55	0,48
im Jahresmittel	0,8 – 0,9	
Gewicht, Abmessungen (H × L × T, Maße in m)	8 t (Betriebsgewicht) 4,2 × 8,5 × 1,2	ca. 31 t (Betriebsgewicht) 7,5 × 8 × 3
Konzept	Leistungsteilung auf 6 Strahler mit 9 Leistungsstufen, redundantes Anlagenkonzept für 50 % der Leistung	Leistungsteilung auf 3 Strahler mit 3 Leistungsstufen, Kaltwasservorlaufregelung über Beimischregelung

Die beiden Anlagen in Gera und Oberkirch werden nachfolgend kurz dargestellt. Für weitergehende Informationen wird auf [22, 23, 28] für die Anlage in Gera und [24] für die Anlage bei der Papierfabrik August Köhler AG verwiesen. Im Rahmen von Vorprojekten wurde für die Anlagen in Gera und Oberkirch verschiedene Konzepte für eine Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung untersucht. Wesentliche Argumente für die Wahl der Dampfstrahlkältetech-

© KI Luft- und Kältetechnik 11/2006

nik an den jeweiligen Standorten waren:

a) Pilotprojekt Gera:
- Gutes Teillastverhalten, unter Zugrundelegung einer ganzjährigen Kältegrundlast
- höchste Versorgungssicherheit zur Gewährleistung der vertraglichen Versorgungspflichten, d.h. Möglichkeiten zur Vorhaltung vertretbarer Redundanzen
- Betrieb mit dem eigenen Betriebspersonal
- Ausnutzung des vorliegenden Dampfversorgungssystems inkl. vorhandener Infrastruktur
- zukunftssicheres Konzept, insb. bzgl. Kältemittel und Anlagensysteme

b) Pilotprojekt Oberkirch:
- Möglichkeit der direkten Anbindung an das werkseigene Kaltwassersystem
- hohe Anforderungen an die Ansprechgeschwindigkeit und Ausregelgeschwindigkeit bzgl. der Regelgröße Kaltwasservorlauftemperatur, Regelgrößenabweichung kleiner $\pm$ 0,5 K
- Möglichkeit des Betriebs mit eigenen Fachkräften
- Kältemittel Wasser

Abkürzungen/Formelzeichen

b	spezifischer Treibdampfbedarf [–]
BMWA	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
DSKM	Dampfstrahlkältemaschine
AKM	Absorptionskältemaschine
DTI	Danish Technological Institute
Fkz	Förderkennzeichen
KKM	Kompressionskältemaschine
KWKK	Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung
KM	Kältemaschine
m	Massenstrom
Q	Wärmestrom
LS	Leistungsstufe [%]
COP	Coefficient of Performance (Leistungszahl, Wärmeverhältnis = Kälteleistung/Antrieb)
COP_n	COP-Wert unter Nennbetriebsbedingungen
DEC	Desiccative and Evaporative Cooling
BHKW	Blockheizkraftwerk
T_1, T_2, T_0	Temperaturniveau Heizmedium, Kondensator, Verdampfer
p_1, p_2, p_0	Treibdampfdruck, Kondensatordruck, Verdampferdruck
p_2*	Grenzgegendruck
l	Gütegrad [–]
h	spez. Enthalpie

Literatur

[1] Bine Projektinfo 10/02. Neue Anwendungen der Dampfstrahlkältemaschine. ISSN 0937-8367. Fachinformationszentrum Karlsruhe, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen. 2002

[2] Fraunhofer UMSICHT, Oberhausen, Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt, Köln. Solare Kälteerzeugung mit Parabolrinnenkollektoren und Dampfstrahlkältemaschinen. Abschlussbericht zu Projekt Nr. 261 206 01, 2002, http://www.ag-solar.de/de/themen/projekt.asp?hc=9&ID=519

[3] Gietzelt, M.; Jungbluth, C.: Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungssysteme. DKV-Tagungsbericht 17 Jahrgang (1990) Deutscher Kälte und Klimatechnischer Verein, 21.–23.11.90 Band 2 (1990)

[4] Schneiderbauer, W., Kling, H.: „Wärme für Kälte – Ganzjährige KWK-Nutzung durch Absor[b]tionsanlagen". KWK Spektrum 1/96 (März), 11–15

[5] Albring, P.: Kälte aus Wärme – Kältetechnik im Energieverbund. Energieanwendung, Energie- und Umwelttechnik, 43 (1994) 7

[6] Meboldt, H.: Kälteerzeugung mit Fernwärme-Heizwasser. Fernwärme international – FWI 22 (1993) 4, S. 152 ff

[7] Noeres, P., Hoelder, D., Althaus, W.: Entwicklung von Betriebsstrategien zur Optimierung der Fernwärme-Kälte-Kopplung. Abschlussbericht BMBF-Proj. (FKZ 0326988A). Oberhausen 1999

[8] Váhl, L.: Handbuch der Kältetechnik: 5. Band Kältemaschinen. Plank, R. (HG), Springer Verlag, Berlin/Heidelberg/New York 1966

[9] Power, R.B.: Steam Jet Ejectors for Process Industries. McGraw Hill, Inc., New York, 1993

[10] Wiegand, J.: Bemessung von Dampfstrahl-Verdichtern und ihr Verhalten bei wechselhaften Betriebsbedingungen. VDI-Verlag GmbH, Berlin, VDI-Forschungsheft 401, März/April (1940)

[11] Flügel, G.: Berechnung von Strahlapparaten. VDI Forschungsheft 395, 2. Auflage. Hannover: VDI-Verlag, (1951)

[12] Bauer, B.: Auslegung von Strahlapparaten für beliebige Medien. Dissertation, Technische Hochschule Stuttgart (1965)

[13] Messing, Th.: Über den Energieverbrauch von Dampfstrahlverdichtern. Kältetechnik 6 (1954) 2, S. 38–41

[14] Plank, R.: Amerikanische Kältetechnik. 2. Bericht, VDI-Verlag, Berlin (1938)

[15] Wöhlk, W.: Die Dampfstrahl-Kälteanlage und ihre Einsatzmöglichkeit. Die Kälte 9 (1966) S. 485–494

[16] Kunz, A.: Kälte aus Abwärme – Funktionsweise und Einsatzmöglichkeiten von Dampfstrahl-Kühlanlagen. CAV (1979) April, S. 93–99

[17] Körting Hannover AG. Körting Arbeitsblätter http://www.koerting.de/service/downloads (2006)

[18] BMWi-Verbundprojekt Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung mit Dampfstrahlkältetechnik, Abschlussbericht zum Verbundvorhaben 0327205 A/C,D, Oberhausen, Ettlingen, Krefeld, 2002

[19] GEA Wiegand GmbH & Co., D-7505 Ettlingen, Einsteinstr. 9–15. Düsennadelgeregelte Strahlpumpen. Broschüre TKI 42 D

[20] Thundal, Tony AF.: Ejektorkøling: Et ejektorkolanlæg, der bruger varme som energie og vand som primært og sekundært kølemidel. VVS/WB Denmark 34.3 (1998) S. 30–34

[21] www.koerting.de: Dampfstrahl-Kälteanlage in Ägypten (Fachartikel), Mitteilung der Körting Hannover AG, Hannover, 2006

[22] „5-MW-Dampfstrahl-Kälteanlage in Gera". Ki Luft- und Kältetechnik 39 (2003) 6, S. 282–283

[23] BMWi-Verbundprojekt Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung mit Dampfstrahlkältetechnik – Pilotprojekt Gera, Abschlussbericht zum Verbundvorhaben 0327205 B, Oberhausen, Gera 2002

[24] Noeres, P., Hölder, D., Althaus, W., Harz, K.: Industrielle Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung auf Basis der Dampfstrahlkältetechnik. VDI-Berichte Nr. 1593, VDI-Verlag, Düsseldorf. Tagung Betriebliches Energiemanagement, Cottbus, 6.–7.03.2001. Industrielle Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung auf Basis der Dampfstrahlkältetechnik

[25] von Cube, H. L., Lotz, M., Kunis, J.: Lehrbuch der Kältetechnik. Band 1. 4 Auflage. Heidelberg: C. F. Müller Verlag (1997)

[26] GEA Jet Pumps GmbH, Ettlingen, online-Katalog: www.geajet.com

[27] GEA Wiegand GmbH: Vakuum- und Dampfstrahlkühlanlagen: Auszug. Technische Dokumentation (1995)

[28] Noeres, P., Hölder, D., Weise, H., Dietzmann, Th.: Betriebserfahrungen mit der Dampfstrahlkältetechnik: Kälteversorgung der Stadt Gera. Euro Heat & Power, Heft 1-2, VWEW Energieverlag GmbH, Frankfurt, 2003

Schlüsselwörter

Dampfstrahlkältetechnik
Thermische Kältemaschinen
Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung
Kältetechnik,
Strahlverdichter