

Markus Haider
Gerd Luedeking

Auslegung und Wirtschaftlichkeit von KWKK-Anlagen

Teil 1

Der Aufsatz erklärt den Ansatz des Anlagenplaners und des Projektentwicklers bei der Auslegung von modernen KWKK-Anlagen für Industrie, Gewerbe und Gebäudekomplexe. Für Anwendungsbereiche mit elektrischen Leistungen zwischen 100 kW und 40 MW werden die technischen und ökonomischen Kriterien diskutiert. Schwerpunkt ist die Absorptionskältetechnik.

Technical design and economic analysis of tri-generation systems

The paper explains basics, criteria and the necessary approach for the design of modern decentralized trigeneration systems for industry and for buildings. Technical and economical features of plants in the range between 100kW and 40MW are discussed. A special attention is given to absorption chilling systems.

Keywords: Cogeneration, trigeneration, gas engines, gas turbines, absorption refrigeration, economic analysis

1 Einleitung

Energieintensive Industriebetriebe, Krankenhäuser sowie Groß-Gebäudekomplexe haben hinsichtlich Ihrer Energiebedarfsstruktur gemeinsam, dass der Endenergiebedarf durch eine Kombination aus Strom, Warmwasser, Dampf, und Kälte dargestellt werden kann.

Das Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) ist schon seit langem bekannt und findet auch schon seit langem Anwendung. Im Zuge der letzten fünfzehn Jahre erfuhr die KWK in Europa durch die Absorptionskältemaschine eine sehr sinnvolle Erweiterung zur Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK). Gesetzliche Änderungen, Förderungen, die Möglichkeiten des liberalisierten Energiemarktes, technologische Fortschritte sowohl im Wärmekraftmaschinen- als auch im Kältemaschinen-Bereich, sowie moderne Implementierungskonzepte (Contracting, ...) ergeben heute für den Endkunden eine Vielzahl von möglichen Ansätzen zur Optimierung seiner Energieversorgung. Der vorliegende Aufsatz erklärt für Anwendungsbereiche mit elektrischen Leistungen zwischen 100 kW und 40 MW den Ansatz des Anlagenplaners und/oder Projektentwicklers unter Berücksichtigung von technischen und ökonomischen Kriterien.

Zusätzlich zu den technischen Erläuterungen mit dem Schwerpunkt Absorptionskältetechnik soll auch erläutert werden, welche Kriterien zutreffen müssen, damit eine dezentrale Energieerzeugungsanlage auf dem freien Energiemarkt gegenüber herkömmlichen zentralen Konzepten wirtschaftlich sein kann.

2 Übersicht marktreifer Technologien zur dezentralen Erzeugung von Kraft, Wärme und Kälte

2.1 Wärmekraftmaschinen für KWK und KWKK

Die für den oben angegebenen Leistungsbereich, aus Sicht der Autoren für die Zeit bis ca. 2010 wirtschaftlich einsatzfähigen Technologien für industrielle Abnehmer oder große Dienstleistungsstandorte sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

2.1.1 Kolbenmotoren

Eine Analyse der Fachpublikationen der letzten Jahre könnte den fälschlichen Eindruck erwecken, dass der Markt durch Brennstoffzellen, Stirlingmotoren und Biomasse-Vergaser dominiert wird.

Gasmotoren (GM) sind nach wie vor das unangefochtene Arbeitspferd der dezentralen Energieerzeugung. Der Weltmarkt für Gasmotoren belief sich im Jahre 2003 auf eine neu installierte Leistung von ca. 2800 MW_{el} p.a., die 2003 in Deutschland installierte BHKW-Leistung liegt in der Größenordnung zweier Kernkraftwerksblöcke (ca. 2000 MW_{el}) [2]. Gasmotoren haben als Vorteile hohe Wirkungsgrade und gutes Teillastverhalten. Nachteilig sind die relativ hohen Wartungskosten sowie die Tatsache, dass die Hälfte der Abwärme auf relativ niedrigem Temperaturniveau anfällt.

2.1.2 Gasturbinen

Konventionelle Gasturbinen (GT) werden mit Leistungen von ca. 500 kW bis 250 MW angeboten. Im hier betrachteten Leistungsbereich, wo sowohl GT, als auch GM zum Einsatz kommen können, zeichnen sich GT vor allem durch das höhere Temperaturniveau der Abwärme aus.

Dr. techn. Dipl.-Ing. M. Haider, Essert (ehemals GWE, jetzt GE Energy, Belfort, France); Dipl.-Ing. G. Luedeking, GWE, Freiburg i. Br.

Tabelle 1: Übersicht über Wärmekraftmaschinen

KWK/KWKK Technologie	Leistungsbereich aktuell (bis 40 MWel)	Zur Zeit realisierbare elektrische Wirkungsgrade im Leistungsbereich	Zukünftig realisierbare Wirkungsgrade	Temperaturniveau der Abwärme	Verhältnis elektrische Leistung zu Wärmeleistung	Maximal möglicher COP in AKM
Betrachteter Leistungsbereich: 0,1 bis 40 MW						
Dampfkreislauf mit DT	ab 0,1	10–ca. 30 %		sehr flexibel 60–400 °C	sehr flexibel	1,3
Gas-Ottomotor	0,1–7,7	26–44 %	bis zu 46 %	250 °C (~ 50 %) 100 °C (~ 50 %)	~ 1,0	1
Dieselmotor (Heizöl)	0,1–17	28–46 %	bis zu 48 %	250 °C (~ 50 %) 100 °C (~ 50 %)	~ 1,2	1
Gas-Heizöl-Zündstrahlmotor	0,03–16,6	35–45 %	bis zu 48 %	250 °C (~ 50 %) 100 °C (~ 50 %)	~ 1,2	1
Gasturbine	ab 0,03	20–40 %	bis zu 43 %	450 °C–600 °C	~ 0,8	1,3
Brennstoffzelle*	bis 0,32	bis 48 %	bis zu 65 %	400–600 °C	~ 1,0	1,3

*) tendenzielle Angaben für MCFC oder SOFC Anlagen

Überall dort, wo Prozesswärme bei relativ hohem Temperaturniveau nötig ist, bzw. dort, wo überwiegend oder ausschließlich Prozessdampf benötigt wird, können sich KWK-Anlagen auf GT-Basis als die technisch und wirtschaftlich sinnvollste Lösung erweisen. Aus der Erfahrung der Autoren ist es bei heutigen Rahmenbedingungen schwierig, für Anlagen mit elektrischer Leistung unter 5 MW eine wirtschaftliche Lösung zu finden.

2.1.3 Mikro-Gasturbinen

Mikro-Gasturbinen (MT) sind seit einigen Jahren auf dem Markt und werden im Leistungsbereich von ca. 30–300 kW angeboten. Der wesentliche Unterschied zu den konventionellen GT liegt einerseits in der Leistungsregelung, die durch einen Gleichstromgenerator mit elektronischer Drehstromerzeugung erfolgt, in den relativ niedrigen Brennkammerdrücken, sowie in der standardmäßigen Anordnung eines Abgas-Luft-Wärmetauschers (Rekuperators). Im Vergleich zu konventionellen GT haben MT ein wesentlich günstigeres Teillastverhalten, da aufgrund der elektronischen Frequenzregelung die Drehzahl in der Teillast abgesenkt werden kann.

Im Vergleich zu Gasmotoren haben MT ein höheres Abwärme-Temperaturniveau, niedrigere Emissionen, niedrigere Wartungskosten, höhere Verfügbarkeit, jedoch wesentlich geringeren Wirkungsgrad. MT zeichnen sich durch im Vergleich zu GM geringeren Gewicht und Volumen aus, was sich auch in den Investitionskosten niederschlagen sollte.

Abgesehen von Nischen-Anwendungen (z.B. Dampferzeugung hinter einer 200 kWel-Anlage) ist es der zur Zeit auf dem Markt befindlichen MT-Generation nicht gelungen, sich gegenüber Gasmotoren durchzusetzen. Neuere Veröffentlichungen wie z.B. [14] zeigen aber, dass die Entwicklungstätigkeit am MT-Sektor rege weitergeführt wird und in wenigen Jahren Produkte einer zweiten, wesentlich verbesserten Generation am Markt eingeführt werden.

2.1.4 Neuere Technologien wie Brennstoffzellen, Stirlingmotoren, Spezialdampfprozesse

In diesem Aufsatz wird gezielt auf marktreife Technologien für den industriellen Sektor eingegangen. Technologien wie ORC oder Dampfmotor sind aufgrund des niedrigen Wirkungsgrades bewusst nicht angeführt. Brennstoffzellen haben ein sehr hohes Potenzial; es ist jedoch zu beachten, dass in den meisten Veröffentlichungen der letzten Jahre der Industrialisierungs-Zeitplan zu optimistisch eingeschätzt wurde. Stationäre Brennstoffzellen sind 2004 um einen Faktor zwischen 2,5 und 20 teurer als Blockheizkraftwerke [1]. Der Stirlingmotor hat die attraktive Eigenschaft, dass er für ein sehr breites Band von Wärme-

quellen (einschließlich Biomasse und Sonnenenergie) eingesetzt werden kann. Allerdings werden Stirlingmotoren nur für relativ niedrige Leistungsgrößen angeboten und befinden sich trotz des interessanten Potenziales noch im Entwicklungsstadium. Hauptproblempunkte sind bereits seit vielen Jahren Dichtungen und Teillastwirkungsgrade.

2.1.5 Teillastverhalten

Tabelle 2 gibt einen Überblick über das Teillastverhalten von GM, GT und MT.

Konventionelle Gasturbinen haben relativ ungünstige Teillast-Wirkungsgrade und sollten daher vor allem für Volllastbetrieb in Erwägung gezogen werden. Im Gegensatz zu Gasturbinen haben Kolbenmotoren und Mikroturbinen ein relativ gutes Teillastverhalten.

2.2 Kältemaschinen

Tabelle 3 gibt eine Übersicht über die Kerndaten der zur Zeit gängigsten zur Kaltwasser- und Prozesskälte-Erzeugung eingesetzten Kältemaschinentypen. (Kompressionskältemaschine = KKM, Absorptionskältemaschinen = AKM)

Laut [7] nehmen Kältemaschinen zur Kaltwassererzeugung mehr als 95 % des in Deutschland installierten Parks

Tabelle 2: Teillastverhalten von Wärmekraftmaschinen

	GT	GM	MT
Stabile Mindestlast	ca. 50 %	ca. 30 %	ca. 30 %
Wirkungsgradverhältnis η_{50}/η_{100}	ca. 70 %	ca. 95 %	ca. 95 %

Tabelle 3: Leistungsmerkmale und Einsatzgrenzen von Kältemaschinen

Kältemaschinenübersicht		Einstufige (SE) AKM mit H ₂ O(LiBr)	Zweistufige (DE) AKM mit H ₂ O(LiBr)	Einstufige AKM mit NH ₃ (H ₂ O)	Turbo-KKM	Schrauben-KKM	Schrauben-KKM
Kältemittel		H ₂ O	H ₂ O	NH ₃ (R717)	R134a	R134a	NH ₃ (R717)
T_Kaltwasser_aus	°C, min/max	+ 5 / + 25	+ 5 / + 25	- 50 / + 5	+ 4 / + 18	+ 4 / + 13	- 50 / + 5
Anwendungsgebiet		Kalt-Wasser	Kalt-Wasser	Prozesskälte	Kalt-Wasser	Kalt-Wasser	Prozesskälte
T_Kühlw_ein	°C, min/max	16 / 45	16 / 45	nv	18 / 40	18 / 65	nv
T_Heiz_ein (Austreiber)	°C, min/max	75 / 140	140 / 170	nv	-	-	-
Minimallast	%	10 %	10 %	10 %	10-30 %	10-30 %	10-30 %
COP_100 %	-	0,65-0,75	0,8-1,2	0,35-0,65	5-7	4,5-5,5	1,2-6
COP_50 % / COP_100 %	-	1-1,1	1	1-1,1	0,7-1	0,7	0,7
Anfahrzeit, Kaltstart (min)	min	12 h	12 h	nv	2-10 min	2-10 min	nv
Anfahrzeit, Warmstart	min	5-30 min	5-30 min	nv	2-10 min	2-10 min	nv
Investitionskosten	€ / kW	250-300	300-350	> 500	130-160	100-140	> 210

von KWKK-Anlagen ein, wobei das Marktpotenzial für KWKK in Deutschland auf ca. 10–15 % der installierten Klimakältekapazität von ca. 20 GW geschätzt wird. Die untenstehende Betrachtung ist aus Platzgründen und auch aufgrund der überragenden Bedeutung vor allem auf Kaltwasser-Kältemaschinen zugeschnitten. Kaltwassernetze für Klima- und Lüftungsanlagen werden typischerweise mit Vorlauf-Temperaturen von 5 bis 7 °C und Rücklauf-temperaturen von 10 bis 12 °C betrieben. Des weiteren liegt die Feuchtkugelttemperatur in Mitteleuropa typischerweise im Bereich von 21–22 °C, sodass Kaltwassernetze typischerweise unter folgenden Parametern betrieben werden:

Kaltwasser-Vor- und Rücklauftemperaturen: 6/12 °C

Kühlwasser-Vor- und Rücklauftemperaturen: 30/36 °C

Ein kurzer Blick auf Tabelle 3 macht klar, dass alle sechs Maschinentypen für die typischen Anwendungszwecke in Betracht kommen. Aufgrund der höheren Investitionskosten sowie der sicherheitstechnischen Komplikationen werden NH₃-Maschinen vor allem im Prozesskältebereich eingesetzt.

2.2.1 Kompressionskältemaschinen

Kompressionskältemaschinen basieren auf dem bewährten Kaltdampfkompressionsprozess. Neben der Kältetechnik kommen Kaltdampfkompressionsmaschinen auch in der Wärmepumpentechnologie zum Einsatz. Der wichtigste Leistungsparameter ist die sogenannte Leistungsziffer (englisch COP = coefficient of performance). Die zum Teil erheblichen Unterschiede der am Markt angebotenen Maschinen beruhen im Wesentlichen auf Unterschieden in der Verdichter- und der Wärmetauscher-

Technologie. Des weiteren muss bei Vergleichen vor allem das Teillastverhalten betrachtet werden. Für größere Kältezentralen empfiehlt es sich, zeitintegrierte COP's zu vergleichen, und zwar sowohl unter der Annahme konstanter Kühlwasser-Vorlauftemperatur als auch unter der Annahme sinkender Kühlwassertemperatur nach ARI 550.

2.2.2 Absorptionskältemaschinen

Absorptionskältemaschinen (AKM) sind das Herz einer jeden Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungsanlage. In den USA und in Asien werden in zunehmendem Maße direktgefeuerte AKM zur Klimatisierung eingesetzt, um die aufgrund massiven Einsatzes von KKM entstehende Strom-Spitze abzumindern. In Europa liegt der Anwendungsschwerpunkt für AKM in der KWKK, also in der Kälterzeugung durch Abwärme-Nutzung. Obwohl in den letzten Jahren bemerkenswerte Fortschritte in der Entwicklung von mehrstufigen Anlagen gemacht wurden [5, 6, 10, 11], liegt der Anwendungsschwerpunkt aus wirtschaftlichen Gründen zur Zeit und auch in der absehbaren Zukunft im Einsatz von einstufigen AKM mit dem Kältemittel Wasser und dem Absorbens Lithiumbromid (LiBr). In Bild 1 sind ein typischer Aufbau sowie das Fließ-Schema einer solchen einstufigen H₂O(LiBr)-AKM dargestellt. In Bild 2 sind die Zustandspunkte sowohl im log p - x als auch im log p - (1/T) Diagramm dar-

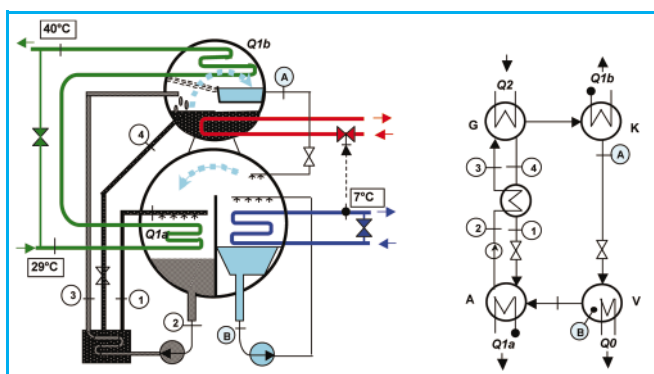


Bild 1: Aufbau und Schalt-schema einer einstufigen H₂O(LiBr)-AKM [9, 11]

gestellt. Das Kältemittel ist Wasser. Im Verdampfer sowie im Verflüssiger liegt reines Wasser vor (Arbeitspunkte A und B). Bei einer Kaltwasser-Austritts-temperatur von 6 °C sowie Kühlwasser-Ein- bzw. Austritts-Temperaturen von 30 bzw. 36 °C ergibt sich unter der Annahme von effektiven Temperaturspreizungen von ca. 3 °C mit der Dampfdruck-Kurve reinen Wassers ein Druckniveau von $p_1 \sim 6$. mbar (3 °C) im Verdampfer, sowie ein Druck von $p_2 \sim 80$. mbar (~ 41 °C) im Kondensator.

Die Besonderheit der AKM im Vergleich zur KKM liegt in der Verdichtung des aus dem Verdampfer austretenden Kältemittel-Dampfes. Anstatt eines Dampf-Verdichters wie in der Kaltampf- Kompressions-Kältemaschine wird der Dampf in einem dreistufigen Prozess unter zweimaliger Änderung des Aggregatzustandes (Absorption- Erwärmung- Verdampfung) auf höheren Druck gebracht:

a) In einem Absorber, der auf gleichem Druckniveau wie der Verdampfer liegt, wird der Kalt-Wasserdampf in einer versprühten starken Lösung des Salzes LiBr (Zustandspunkt (ZP) 1) absorbiert und gleichzeitig gekühlt. Durch die Vermischung der starken Salzlösung mit dem aus dem Verdampfer angesaugten Wasserdampf ergibt sich eine Lösung geringerer Konzentration (schwache Lösung, ZP2). Das Niederdruckniveau p_1 (~ 6 . mbar) im unteren Behälter wird einerseits über die Konzentration von LiBr sowie andererseits über die Lösungstemperatur eingestellt (Dampfdruckgleichung von *Clausius-Clapeyron*). Die Lösungstempera-

tur ergibt sich aus der Eintrittstemperatur des Kühlwassers und liegt bei ca. 35 °C. Die Salzkonzentration der schwachen Lösung im Absorber liegt typischerweise bei ca. 59 % Gewichts-Anteil. *Bemerkung: in Bild 2 werden die Zustandsänderungen zwischen 1 und 2 vereinfacht dargestellt, um eine leicht verständliche Übereinstimmung der Darstellungen in den beiden Zustandsdiagrammen zu erzielen. Der interessierte Leser wird auf [7] verwiesen.*

b) Mittels der Lösungsmittelpumpe wird die schwache Lösung durch einen Gegenstrom-Wärmetauscher auf den Druck p_2 gebracht und in den sogenannten Austreiber oder Generator geleitet (ZP3).

c) Im Austreiber ist das höhere Druckniveau p_2 erreicht, jedoch muss das Kältemittel H₂O aus der Lösung ausgedampft werden. Dies geschieht unter Wärmezufuhr. Aufgrund des höheren Druckes p_2 ist zum Austreiben eine Wärmequelle mit höherer Temperatur notwendig, wobei sich die notwendige Austreibertemperatur aus der Kombination Druck/Konzentration ergibt. Diese Temperatur-Anforderung erhöht sich noch durch die Tatsache, dass aufgrund der Verdampfung des Wassers aus der Lösung die Salzkonzentration in der Lösung ansteigt (starke Lösung, ca. 64 % LiBr) und dadurch die Sättigungstemperatur noch einmal ansteigt. Typisch nötige Lösungs-Temperaturen und Konzentrationen im Austreiber liegen bei ca. 100 °C und 64 % LiBr (ZP4).

Der aus dem Austreiber entweichende Dampf besteht aus reinem H₂O und hat die dem Druck p_2 entsprechende Sättigungstemperatur. Im Kondensator wird der Wasserdampf kondensiert (ZP A). Das Kondensat wird im unteren Behälter auf den Druck p_1 entspannt und gemeinsam mit dem Rezirkulat (ZP B) auf die Kaltwasser-Rohre versprüht und partiell verdampft. Das anfallende und rezirkulierte Kondensat (ZP B) nimmt die dem Druck p_1 entsprechende Sättigungstemperatur an.

In einer AKM finden also parallel zwei Kreisprozesse statt:

- der Kreisprozess des Kältemittels Wassers durchläuft in der vereinfachten Betrachtung gemäß Bild 2 sechs Zustandspunkte
- der Kreisprozess der Absorberlösung durchläuft vier Zustandspunkte und hat sämtliche vier Punkte mit dem Kältemittel gemein

Eine AKM mit Kältemittel Wasser ist eine unter starkem Unterdruck betriebene Anlage. Zum Vergleich sollen hier nur zwei Punkte aus der Dampfdruckkurve von NH₃ und von H₂O hervorgehoben werden: Für eine Verdampfertemperatur von 3 °C sind bei H₂O $p = 6$. mbar und bei NH₃ $p = 4,1$ bar notwendig. Aus diesen Angaben wird klar ersichtlich, dass bei NH₃ noch Reserven für Druck- und Temperaturabsenkung vorhanden sind, während Wasser als Kältemittel bei 3 °C an der absoluten Anwendungsgrenze liegt. In einer einstufigen AKM werden sinnvollerweise die beiden jeweils auf einem Druckniveau befindlichen Anlagenteile zusammengefasst,

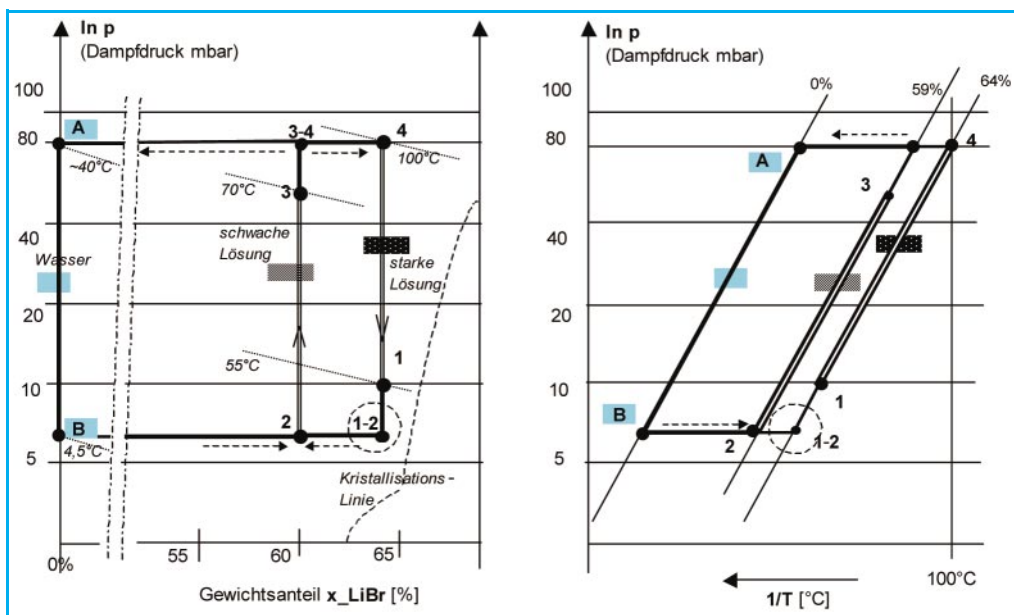


Bild 2: Kreisprozess einer einstufigen H₂O(LiBr) AKM im log p-x und im log p-(1/T)-Diagramm

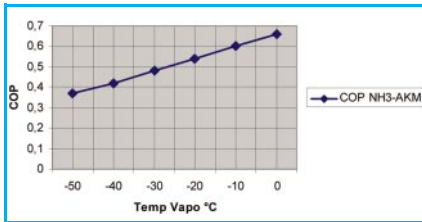
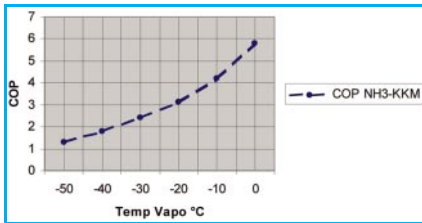


Bild 3: COP Verläufe von Schrauben-KKM und von einstufigen AKM als Funktion der Verdampfungstemperatur

wodurch sich die Konstruktion gemäß Bild 1 ergibt.

AKM sind mittlerweile eine reife Technologie. Eine aufwendige Regelung erlaubt dem Betreiber, die komplexen physikalischen Prozesse mit einfachen Anweisungen zu betreiben und vor allem das in der Markteinführungszeit problematische Kristallisationsrisiko sicher zu beherrschen.

Die meisten Hersteller verlangen, dass AKM mit konstantem Kühlwasser- und Kaltwasser-Massenstrom betrieben werden. Die Leistungsregelung erfolgt durch Rücklaufbeimischung von Kaltwasser und Kühlwasser und durch Drosselung des Heizmedium-Zuflusses.

2.2.3 Vergleich von AKM und KKM.

Jeder Planer einer Kälteanlage steht vor der Entscheidung zwischen AKM und KKM. Nachfolgend werden die wichtigsten Entscheidungsfaktoren aufgezählt:

- Die Investitionskosten einer AKM sind höher als die Kosten einer KKM gleicher Kapazität
- AKM bauen voluminöser und schwerer
- AKM haben keine kritischen beweglichen Teile und haben geringere Wartungskosten als KKM
- AKM haben wesentlich günstigeres Teillastverhalten als KKM. Bemerkung: Diese Bemerkung galt bis 2004. Eine seit kurzer Zeit auf dem Markt angebotene Turbo-KKM mit Magnetlagerung beansprucht sehr hohe und in der Teillast ansteigende Leistungszahlen. Wenn sich diese Aggregate in der Praxis bewähren, so wird der Einsatz von AKM für BHKW-Anlagen im Kern-Leistungsbereich von 500–1500 kW beträchtlich unter Druck kommen

Die Leistungsparameter von Kaltwassermaschinen sind in Tabelle 3 aufgeführt. In Bild 3 sind vergleichsweise die COP Verläufe von einstufigen NH₃-AKM und von NH₃-KKM über der Verdampfungstemperatur dargestellt [5].

Literatur

- [1] Gailfuss, M.: BHKW-Technologien. Vortrag im Zuge der BHKW Jahreskonferenz, Berlin (2004)

- [2] Schneider, M.: Abgasminderungstechnologien und Brennwertnutzung, Vortrag im Zuge der BHKW Jahreskonferenz Berlin (2004)
- [3] Seidel, M.: Jahresübersicht BHKW und stationäre Brennstoffzellen, BWK, 56 (2004) S. 4
- [4] Herdin, G.: Stand der BHKW Technik im Vergleich zu Brennstoffzellen und Mikrogesturbinen, GE Jenbacher (2002)
- [5] Gunter, M.: Vergleich von NH₃/H₂O Absorptionskälteanlagen mit Kompressionsanlagen in KWKK, NH₃ Symposium 29.10.2002, ILK Dresden
- [6] BINE Profiinfo II/98: KWKK Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung
- [7] Hartmann, K.: Kälteerzeugung in Absorptionsanlagen, Kälte- und Klimatechnik 9/92
- [8] Fritz, B.: KWKK: BHKW und Absorptionstechnik, KI Klima-Kälte-Heizung. 20 (1992) 22, S. 474–480
- [9] Produktkataloge und Planungsinformationen der Firmen. Carrier, York, GE Jenbacher, Jäggi-Güntner
- [10] Richter, L.: Mehrstufige Absorptionskälteanlagen in Energieverbundanlagen, KI Luft- und Kältetechnik, 39 (2003) 3, S. 131–135
- [11] Ziegler, F.: Trends in der Sorptionskältetechnik, KI Luft und Kältetechnik. 38 (2002) 3, S. 140–144
- [12] Recknagel-Sprenger (2004)
- [13] Sager, Zschernig: Der ökologische Effekt der KWKK, BWK Bd. 53 (2002) 3
- [14] Touchton, Belokon, Senkevych, Belyaev: A Novel Gas Turbine Product Line for Onsite Generation and Combined Heat and Power between 400 kW and 1.6 MW, ASME Turbo-Konferenz Wien (2004)

Schlüsselwörter

KWK
KWKK
Gasmotor
Gasturbine
Absorptionskältemaschine
Wirtschaftlichkeit