

Schlüsselwörter: Kälte aus Wärme · Absorptionskältemaschine · Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) · Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) · Wärmenutzungskonzept

Bei der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) wird die bei der Stromerzeugung entstehende Abwärme von Turbinen oder Motoren u.a. in Fernwärmenetzen genutzt. Durch den Einsatz thermisch angetriebener Kältemaschinen kann die Auslastung dieser Netze im Sommer und damit die Wirtschaftlichkeit der KWK-Anlage erhöht werden. Damit können im Vergleich zur getrennten Erzeugung von Strom, Wärme und Kälte höhere Jahresnutzungsgrade erzielt werden.

### Absorption Chillers – Examples of Use

Keywords: Chill from Heat · Absorption Chiller · Combined Heat and Power (CHP) · Combined Heat · Power and Chill · Heat Utilisation Concept

In the combined heat and power generation (CHP), any waste heat generated by turbines and engines during the power generation is being utilized, e.g. in district heating grids. By using thermally driven chiller systems, the capacity utilization of these grids and with it the CHP's profitability can be enhanced. By this method, compared to the separate generation of electricity, heat and refrigeration, the annual use efficiency is increased.

### Autoren



Dipl.-Ing. Volkmar Schäfer,



Dipl.-Ing. Bernhard Negele,  
eta Energieberatung,  
Pfaffenhofen

# Absorptionskältemaschinen – Anwendungsbeispiele

## Einleitung

In den Sommermonaten sind die Wärmenetze von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (KWK) überwiegend schwach ausgelastet. Im gleichen Zeitraum wird in vielen Zweckbauten Kälte für Klimatisierungsaufgaben und in der Industrie für Kälteprozesse benötigt. Mit dem Einsatz thermisch angetriebener Kältemaschinen kann die Auslastung und damit die Wirtschaftlichkeit von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen erhöht werden. Die Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) kann sowohl im dezentralen Verbund mit Blockheizkraftwerken und Gasturbinen als auch angebunden an Fernwärmenetze mit Heizkraftwerken bzw. Abwärmenutzung (Fernwärme-Kälte-Kopplung) realisiert werden. [1]

Geeignete KWKK-Konzepte erfordern vorab eine Kältebedarfserhebung, die Prüfung der technischen Möglichkeiten zur Kälteversorgung sowie eine fundierte Wirtschaftlichkeitsuntersuchung. Wichtig ist eine gründliche Planung, die das System und die betrieblichen Wechselwirkungen berücksichtigt. Oft scheitern Projekte am falschen Anlagenkonzept oder an ungeeigneten Auslegungsparametern.

Investoren in KWKK-Systeme sind gleichermaßen in der Industrie wie im Dienstleistungssektor anzutreffen. Auch per Contracting (mit Anlagenbauunternehmen oder Versorgungsunternehmen) können KWKK-Lösungen realisiert werden.

## Kraft-Wärme-Kopplung

Im Sinne der Energieeinsparung, der Ressourcenschonung und einer Umweltentlastung sollte die heutige Art der Energieerzeugung überdacht werden. Ein wichtiges Beispiel für eine Steigerung der Nutzungsgrade ist die gekoppelte, also kombinierte Erzeugung von Strom und Wärme.

Bei der Kraft-Wärme-Kopplung wird die bei der Stromerzeugung entstehende Abwärme der Turbinen oder Motoren als z.B. Fernwärme genutzt. Durch die prinzipbedingt bessere Ausnutzung der zur Energieerzeugung eingesetzten Brennstoffe werden im Vergleich zur getrennten Erzeugung von Strom und Wärme deutlich höhere Jahresnutzungsgrade erzielt. Somit lassen sich Energieverbrauch sowie Umweltbelastung senken. Die sogenannten Heizkraftwerke

sind daher ausgesprochen ökonomisch und umweltfreundlich. Für die Kraft-Wärme-Kopplung eröffnen sich daher viele interessante Einsatzgebiete.

Die Effizienz des KWK-Prozesses sowie auch das Verhältnis zwischen Strom- und Wärmeausbeute hängt hauptsächlich von der Anlagenart, der Anlagengröße und dem Temperaturniveau der ausgekoppelten Wärme ab. So bedeutet die Auskopplung einer hohen Temperatur eine Verringerung der Stromproduktion, da beispielsweise bei der Dampfturbine die Enthalpiedifferenz des Dampfes nicht vollständig zur Stromproduktion ausgenutzt werden kann.

Man unterscheidet zwischen strom- und wärmegeführten KWK-Anlagen nach der Priorität, die jeder der beiden Energieformen zugemessen wird – stromgeführte Anlagen optimieren den Stromertrag, wärmegeführte Anlagen den Wärmeertrag, jeweils zu Lasten der anderen Energieform.

Die erzeugte Wärme wird als heißes Wasser oder Dampf über Rohrleitungen zu den Verbrauchern transportiert (Industrie, Gewerbe, öffentliche und private Liegenschaften etc.) und dort für die Raumheizung, für die Warmwasserbereitung oder für gewerbliche/industrielle Zwecke verwendet.

Eine bisher kaum genutzte Möglichkeit ist die Erzeugung von Druckluft in einem kombinierten Prozess mit z.B. gleichzeitiger Wärmeerzeugung. So lassen sich anstelle eines Generators prinzipiell auch Kompressoren zur Druckluftherzeugung betreiben.

## Technik der Kraft-Wärme-Kopplung [2]

Für die energetische Nutzung von Biomasse stehen ein Vielzahl von Verfahren zur Verfügung. Ein wesentliches Kriterium für die Technik ist die gewünschte Leistung; nicht jede Technik eignet sich für jeden Leistungsbereich. Besonders für dezentrale Nutzungen werden Techniken mit einer elektrischen Leistung von einigen 100 kW gewünscht.

Zur Stromerzeugung aus Holz und anderer Biomasse kommen Verfahren mit Verbrennung, Vergasung und Pyrolyse sowie den verschiedenen nachgeschalteten Prozessen in Frage. Tabelle 1 zeigt Leistungsbereich, Wirkungsgrad und Stand der Technik der wichtigsten Verfahren zur Stromerzeugung aus Holz.



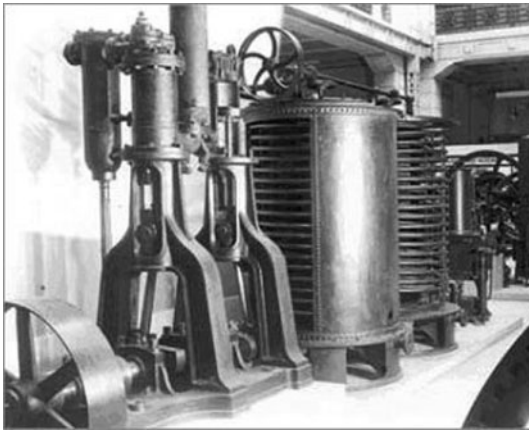
**KI** Kälte · Luft ·  
**Klimatechnik**  
INGENIEURWISSEN IN FORSCHUNG UND PRAXIS



Entdecken Sie weitere interessante  
Artikel und News zum Thema auf  
[ki-portal.de](http://ki-portal.de)!

**Hier klicken & informieren!**





Eine der ersten Linde-Kältemaschinen, die 1877 bei der Dreherischen Brauerei in Triest aufgestellt wurde und bis 1908 arbeitete, steht heute im Technischen Museum in Wien (Quelle: Linde)

Bei Anlagen mit Dampfmotor und Dampfturbine bestehen im Bereich der Biomasse-nutzung langjährige Erfahrungen. Die Technologie des Dampfschraubenmotors befindet sich derzeit im frühen Demonstrationsstadium.

Anlagen mit ORC Prozess wurden in letzten Jahren mehrfach realisiert, zeichnen sich durch eine einfache Anlagenbetriebsweise aus, stellen den Stand der Technik dar, wei-

sen jedoch derzeit noch hohe spezifische Investitionskosten auf.

Der Stirlingmotor stellt eine interessante Alternative im kleinen Leistungsbereich (< 150 kW<sub>el</sub>) dar. Erste Pilotanlagen mit einer elektrischen Leistung bis 75 kW<sub>el</sub> wurden bereits realisiert, jedoch muss die Anpassung des Erhitzerwärmeübertragers an Holzbrennstoffe sowie die Integration in die Holzfeuerung noch weiterentwickelt werden.

Die Festbettvergasung für mittlere Leistungen und die Wirbelschichtvergasung für Großanlagen weisen Vorteile in Bezug auf den erreichbaren Wirkungsgrad auf, wobei jedoch noch Erfahrungen und Entwicklungen bei der Gasreinigung und in der Abstimmung des Gesamtsystems aus Vergaser, Gasreinigung und Motor oder Gasturbine erforderlich sind.

Die Stromerzeugung aus Biomasse weist in der Regel höhere spezifische Investitionskosten als vergleichbare fossile Anwendungen auf und muss daher bezüglich der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen (Einspeisetarife, Förderungen, Brennstoffkosten, etc.) genau geprüft werden.

Die Preise variieren sehr stark in Abhängigkeit von der gewählten Technik und insbesondere von der gewählten Leistung; Während beispielsweise eine Komplettanlage mit ORC bei 300 kW in Deutschland ca. 7300 €/kW kostet, reduzieren sich die Kosten für eine 1800 kW große Anlage auf 3800 €/kW; ein komplettes Biomasse-Heizkraftwerk mit einer 5000 kW großen Dampfturbine liegt bei über 3000 €/kW. [eta]

**Tabelle 1: Leistungsbereich, Wirkungsgrad und Stand der Technik der wichtigsten Verfahren zur Stromerzeugung aus Holz. [2]**

Thermischer Prozess	Arbeits-Maschine	Leistungsbereich MW <sub>el</sub>	η <sub>el</sub> %	η <sub>ges</sub> %	Stand	Potenzial
Verbrennung	Dampfmotor	0,02–2	8–20	< 80	bewährte Technik	η <sub>el</sub> gering, Kosten hoch
	Dampfturbine Holz einstufig	0,5–2	10–18	< 80	bewährte Technik	η <sub>el</sub> gering, Kosten hoch
	Dampfturbine Holz mehrstufig	... 50	– 30	< 80	bewährte Technik	η <sub>el</sub> mittel, Kosten mittel
	Dampfturbine fossil	... 1.000	– 43	< 80	bewährte Technik	η <sub>el</sub> höher, Kosten tief, Einsatz Holz begrenzt
	Dampfschraubenmotor	0,5–2	10–15	< 80	Demo-Anlage	η <sub>el</sub> gering, Kosten hoch
	ORC	0,3–2	10–15	< 90	bewährte Technik	einfache Betriebsweise, Kosten hoch
	Stirlingmotor	0,001–0,15	7–10	< 80	Pilotanlagen 30 kW <sub>el</sub> , 75 kW <sub>el</sub>	η <sub>el</sub> hoch, Kosten mittel, hohe Marktchancen
	Heißluftturbine Biomassefeuerung	0,09–0,1	– 20	< 80	Pilotanlage	η <sub>el</sub> hoch, Kosten mittel, hohe Marktchancen
	geschlossene Gasturbine	0,1–> 10	Ziel 20–30		Konzept	geringe Marktchance
Vergasung	Motor (Festbettvergasen)	0,05–1	20–25	< 75	Pilotanlagen	η <sub>el</sub> höher, Alternative für mittlere Anlagen
	Gasmotor/-turbine (Festbettvergasen)	1–25	20–30	< 80	Demo-Anlage 2 MW <sub>el</sub>	η <sub>el</sub> höher, vielversprechende Alternative für Großanlagen
	Kombiprozess mit Gas- und Dampfturbine (Wirbelschicht)	5–25	Pilotanlage: 37 Zielwert: 47	< 80	Demo-Anlage 6 MW <sub>el</sub>	η <sub>el</sub> hoch, vielversprechende Alternative für Großanlagen
	Brennstoffzelle	0,01–> 10	Ziel > 50		Konzept	

Quelle: Arbeitsgemeinschaft QM Holzheizwerke: Band 4 – Planungshandbuch; 2004 u. eigene Erhebungen

### Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung [3]

Von Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung spricht man, wenn die Anlage zusätzlich Kälte erzeugen kann. Die Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung ist eine Erweiterung der Kraft-Wärme-Kopplung: Die von einer KWK-Anlage erzeugte und im Winter zur Raumheizung genutzte Wärme, wird im Sommer zum Betrieb einer Absorptionskältemaschine für z.B. die Klimatisierung verwendet. Dadurch kann die Zahl der jährlichen Betriebsstunden der KWK-Anlage deutlich gesteigert und deren Wirtschaftlichkeit entsprechend verbessert werden.

Physikalisch ist Kälte per Definition keine Größe, sondern nur die Abwesenheit von Wärme. Die Vorgänge in einer Kältemaschine „erzeugen“ aufgrund des Energieerhaltungssatzes zwar keine Kälte oder vernichten thermische Energie, sie erreichen jedoch durch die Wärmeübertragung aus dem System heraus eine relative Kühlung, wobei hierfür jedoch Energie höherer Ordnung aufgewendet werden muss, da man gegen den Temperaturgradienten arbeitet.

Bewährt haben sich dabei Techniken wie z.B. das plötzliche Dekomprimieren (gebräuchlicher ist hier der Ausdruck „Entspannen“) eines unter Druck verflüssigten Gases wie Ammoniak („Verdampfungskälte“) oder das Auflösen eines Salzes in einer Flüssigkeit („Lösungskälte“).

Eine Kältemaschine setzt einen thermodynamischen Kreisprozess um, bei dem Wär-

me von Stoffen niedriger Temperatur auf solche hoher Temperatur gefördert wird. Dies kann zur Kühlung genutzt werden. Für den Betrieb der Kältemaschine ist extern aufzubringende Antriebsenergie in Form von mechanischer Arbeit und/oder Wärme unerlässlich. Kältemaschinen, die Temperaturen unter 3 Kelvin erreichen, gibt es seit fast einhundert Jahren; einen Überblick über die heute verfügbaren Techniken gibt Tabelle 2.

Wie aus Tabelle 2 ersichtlich, gibt es für die Kompression und die Expansion unterschiedliche technische Ansätze, die jede ihre Vor- und Nachteile hat. Grundsätzlich unterscheidet man:

- Die **Kompressionskältemaschine** ist mit einem mechanischen Kompressor und einem Drosselorgan ausgerüstet. Als Kompressoren kommen hauptsächlich und in der Reihenfolge steigender Kälteleistung Rollkolben, Scrollkompressor, Hubkolbenverdichter, Schraubenverdichter und Turboverdichter zum Einsatz. Gängige Kältemittel sind z.B. Ammoniak (NH<sub>3</sub>), Kohlenwasserstoffe (z.B. Propylen, Isobutan) und auch Fluorkohlenwasserstoffe (FKW), wie z.B. R134a, R507, R407c sowie wieder zunehmend auch Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>). Für industrielle Kälteanlagen mit großer Leistung ist Ammoniak als natürliches Kältemittel weit verbreitet. Im Bereich der Gewerkekälte und der Klimatisierung werden

meist FKW eingesetzt, die allerdings wegen ihres erheblichen Treibhauseffektes (GWP = Global warming potential) Gegenstand einer politischen Diskussion sind, die eine Einschränkung ihrer Verwendung zum Ziel hat. Allerdings berücksichtigt das GWP nur die Kältemittel und nicht die CO<sub>2</sub>-Bilanz des Gesamtprozesses wie der TEWI (Total Equivalent Warming Impact), der zusätzlich den Anlagenbetrieb bewertet. Die früher üblichen Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FKW) sind wegen ihrer ozonzerstörenden Wirkung (ODP = Ozone depletion potential) in der EU bereits stark eingeschränkt und insbesondere für Neuanlagen nicht mehr zugelassen.

- Die **Absorptionskältemaschine** verfügt zusätzlich über einen Lösungsmittelkreis und einen Kältemittelkreis. Das Arbeitsmittel besteht aus zwei Komponenten, einem Lösungsmittel und dem Kältemittel. Das Kältemittel muss im Lösungsmittel vollständig löslich sein. Technisch verbreitet sind Absorptionskältemaschinen mit Wasser als Kältemittel und einer wässrigen Lithiumbromid (LiBr)-Lösung als Lösungsmittel. Durch Vakuumbetrieb sind Verdampfungstemperaturen des Wassers bis ca. 3 °C erreichbar. Tiefere Temperaturen bis – 50 °C können Absorptionskältemaschinen erreichen, die NH<sub>3</sub> als Kältemittel und Wasser als Lösungsmittel einsetzen.

**Tabelle 2: Kältemaschinen: Übersicht über die heute verfügbare Techniken (eta)**

	Kompressionskälteanlage KKA	Absorptionskälteanlage AKA mit NH <sub>3</sub>	Absorptionskälteanlage AKA mit LiBr	Adsorptionskälteanlage AdKA	DEC <sup>1)</sup> -Anlage
physikalischer Kühlungs-Effekt	Verdampfen des Kältemittels (Kaldampfprozess)				Verdunsten des Kältemittels
Verdichtungsprinzip	mechanische Verdichtung	thermisch, Absorptionslösungskreislauf		thermisch, Adsorption von Wasserdampf	sorptive Entfeuchtung
Antriebsenergie	Elektroenergie	Wärmeenergie 85 ... 120 ... 180 °C	Wärmeenergie 85 ... 180 °C	Wärmeenergie 55 ... 95 °C	Wärmeenergie 50 ... 100 °C
Kältemittel	chlorierte oder chlorfreie Kohlenwasserstoffe	Wasser mit NH <sub>3</sub> als Absorptionsmittel	Wasser mit LiBr als Absorptionsmittel	Wasser mit Feststoff als Adsorptionsmittel (SILICA-Gel)	Wasser
spezifischer Primärenergieverbrauch <sup>2)</sup>	1,3 ... 1,65	0,6 ... 1,0	0,6 ... 1,0	0,4 ... 0,6	0,3
Leistungszahl / COP <sup>3)</sup>	3 ... 5	0,3 ... 0,55 ... 0,7	(1-st) 0,6 ... 0,75 (2-st) 1,0 ... 1,3	0,4 ... 0,6	0,5 ... 0,7 je nach Luftzustand
Kältetemperatur	– 50 ... 15 °C	-50 ... – 10 ... 5 °C	5 ... 15 °C	6 ... 15 °C	4 ... 8 K Entfeuchtung
Kälteleistung	50 ... 5000 kW	150 ... 1100 ... 5500 kW	15 ... 400 ... 5000 kW	50 ... 450 kW	20 ... 350 kW
spezif. Modulpreis	75 ... 125 €/kW	400 ... 600 ... 1800 €/kW	100 ... 220 ... 1000 €/kW	250 ... 350 €/kW	325 ... 675 €/kW

<sup>1)</sup> desiccative and evaporative cooling (Kühlung durch Trocknung und Verdunstung / "sorptive Kühlung")

<sup>2)</sup> Kältemenge zur primärenergetisch bewerteten, eingesetzten thermischen bzw. elektrischen Energie

<sup>3)</sup> coefficient of performance

Quellen: Mattes, York, colibri, HKW-Infozentrum, HLH 09/2001, ZAE, Internet, eta

- Die **Adsorptionskältemaschine** arbeitet mit einem festen Lösungsmittel, dem „Adsorbens“, an dem das Kältemittel ad- bzw. desorbiert wird. Dem Prozess wird Wärme bei der Desorption zugeführt und bei der Adsorption entnommen. Da das Adsorbens nicht in einem Kreislauf umgewälzt werden kann, kann der Prozess nur diskontinuierlich ablaufen, indem zwischen Ad- und Desorption zyklisch gewechselt wird.

Der wesentliche Unterschied zwischen Kompressions- und Sorptionskältemaschinen ist der, dass bei ersteren die Primärenergie vollständig als mechanische Arbeit, bei letzteren dagegen in Form von Wärme zugeführt wird. Letztere benötigen mechanische Arbeit lediglich zur Überwindung der internen Druckdifferenzen bzw. -verluste, insbesondere für das Expansionsventil.

Der Wirkungsgrad wird für Kompressionskältemaschinen gewöhnlich auf die elektrische Antriebsenergie bezogen, womit sich im Vergleich zu Sorptionskältemaschinen deutlich günstigere Werte ergeben. Ein Vergleich dieser Art ist jedoch unzulässig, da mechanische bzw. elektrische Antriebsenergie in der Natur nicht verfügbar ist, sondern aus fossilen oder regenerativen Quellen mit Verlusten erzeugt (umgewandelt) werden muss, was sich auch im Energiepreis niederschlägt.

Bezieht man diese Verluste ein, so sind die Wirkungsgrade von Sorptionskältemaschinen auch wertmäßig vergleichbar, wenn nicht sogar besser.

### Kältemarkt [1]

Die KWKK ist für die industrielle Kühlung und die Klimatisierung einsetzbar. Investoren in KWKK-Systeme sind gleichermaßen in der Industrie wie im Dienstleistungssektor anzutreffen. Auch per Contracting (mit Anlagenbauunternehmen oder Versorgungsunternehmen) können KWKK-Lösungen realisiert werden.

Anfang der 90er Jahre wurden Anlagen zur Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) in nur wenigen Objekten eingesetzt. Denn mit Standard-Absorptionskälteanlagen wurde eine nur ungenügende Auskühlung der Fernwärmenetze erreicht.

Heute werden für die thermisch angetriebene Kälteerzeugung überwiegend Absorptionskältemaschinen (AKM) eingesetzt. Die Installationszahlen von AKM konnten in Deutschland im Zeitraum 1993–95 stark zulegen. Die insgesamt installierte Absorptionsleistung betrug 1995 bereits 660 MWth. Dabei handelt es sich überwiegend um einstufige Wasser-LiBr-AKM – bis 1995 wurden in Deutschland lediglich 36 zweistufige Wasser-LiBr-AKM installiert sowie 12 ein-

stufige Wasser-NH<sub>3</sub>-AKM (von insgesamt 520 Aggregaten).

### Wärmenutzungs-Konzept

Grundlegende Voraussetzung für einen wirtschaftlichen und damit erfolgreichen Betrieb von Biomasse-KWK-Anlagen ist eine ganzjährig hohe Auslastung.

Während der Strom als hochwertige Energieform i.d.R. in das öffentliche Netz gespeist wird und somit immer eine entsprechende Anwendung findet, benötigt man für die im KWK-Prozess erzeugte Wärme ein individuelles Wärmenutzungs-Konzept. Je nach Temperaturbereich lässt sich Wärme zur Raumheizung, zu Trocknungszwecken, in der Fischzucht, bei Gewächshäusern, in wärmeintensiven gewerblichen Prozessen aber auch zur Kälteerzeugung nutzen. Die Kälte wird hierbei über wärmebetriebene Kältemaschinen erzeugt und kann zur Klimatisierung oder Prozesskälteanwendungen genutzt werden. Natürlich könnten Absorptionskältemaschinen auch direkt mit Wärme aus einem Biomasse-Kessel, also nicht aus der Abwärme einer Arbeitsmaschine, versorgt werden. Eine Stromerzeugung würde dann hierbei entfallen.

Sehr entscheidend für eine Verbesserung der Nutzungsgrade ist die energetisch richtige Betriebsweise und der zweckmäßige Einsatz der vorhandenen Energietechniken. Bei allen energietechnischen Vorgängen ist ein oft erheblicher Teil des Energieaufwandes nicht von der Belastung abhängig, sondern wird nur durch die Größe und Art der Anlage oder Maschine bestimmt. Daher sinkt der spezifische Verbrauch mit steigender Belastung. Eine möglichst hohe Auslastung der Geräte- und Anlagenkapazität sowie das Vermeiden von Leerbetriebs- und Pausenzeiten können den Nutzungsgrad entscheidend verbessern.

Wichtig ist auch eine Anpassung der installierten Geräteleistungen an den tatsächlichen Bedarf. Überdimensionierung führt nicht nur zu unnötig hohen Investitionskosten, sondern auch zu erhöhtem Energieverbrauch. Nur ein detailliertes Wärmenutzungskonzept schafft die Basis für die bedarfsangepasste Dimensionierung und den optimalen Betrieb der KWK-Anlage.

Im Rahmen eines Wärmenutzungskonzeptes werden neben den infrastrukturellen Gegebenheiten insbesondere die Abnehmerstrukturen erfasst und bewertet.

Sofern noch kein Wärmenetz vorhanden ist, ist der Anschluss von Wärmeabnehmern unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten sehr sorgfältig zu prüfen.

Vorteilhaft sind insbesondere Anschlüsse von Liegenschaften mit hohem und mög-

lichst gleichmäßigem Wärmebedarf (z.B. Krankenhäuser, Pflegeheime, Hallenbäder), zumal hier auch nur wenige Ansprech- und Verhandlungspartner zu berücksichtigen sind.

Insbesondere wenn die bisher eingesetzten konventionellen Kessel ersetzt werden müssen ergeben sich hier gute Bedingungen für eine zukünftige Versorgung durch die geplante KWK-Anlage. Bei Schulzentren ist zu beachten, dass der Wärmebedarf im Sommer stark zurückgeht und in den Ferienwochen sogar eingestellt werden kann. Wegen der hohen Ansprüche der Energieeinsparverordnung (EnEV) und der damit verbundenen Wärmedämmung der Gebäude verbrauchen Neubauten relativ wenig Wärme. Darüber hinaus ergibt sich ein ausgeprägt saisonaler Wärmeverbrauch mit Wärmespitzen im Winter und annähernd verbrauchsfreien Monaten im Sommer. Deshalb ist von einer ausschließlichen Versorgung von Neubaugebieten eher abzuraten.

Insbesondere bei großen und gewerblichen/industriellen Wärmekunden kann ein individuelles Energiekonzept die Anschlussbedingungen des potenziellen zukünftigen Wärmekunden klären und somit seine Anschlussbereitschaft an das Fernwärmenetz fördern. Folgende Beispiele sind aus dem Projekt „Biomasse-Heizkraftwerk Pfaffenhofen“ anzuführen:

- Nach Klärung der technischen Anschlussbedingungen und gemeinschaftlichen Festlegung des bisherigen Wärmepreises wurde beim Babynahrungshersteller HIPP durch die Lieferung von Dampf aus Biomasse der völlige Ersatz fossiler Brennstoffe erreicht.
- Mit einem Energie-Einsparcontracting wurde der Energieverbrauch des Krankenhauses gesenkt und die gesamte Energieversorgung vom Biomasse-Heizkraftwerk übernommen. Jetzt profitiert das Krankenhaus von den geringeren Energiekosten und das Biomasse-Heizkraftwerk kann die eingesparten Energiemengen anderen Kunden zur Verfügung stellen.
- In der Brauerei Müllerbräu erfolgte ein grundlegender Umbau von Sudpfanne, Reinigungsanlage und Kälteversorgung. Damit wird erstmalig in Deutschland die Wärme und Kälte einer Brauerei ausschließlich auf Basis von Biomasse bereitgestellt.
- Durch die genaue Ermittlung des tatsächlichen Bedarfes konnten für die kommunalen Einrichtungen maßgeschneiderte Angebote erstellt werden. Mit dem Anschluss ihrer Liegenschaften an das Biomasse Heizkraftwerk haben

Landkreis und Stadt Pfaffenhofen das Projekt deutlich vorangebracht.

Sofern über die Verbrauchsstruktur anzuschließender Wärmeabnehmer noch keine belastbaren Informationen – z.B. aus Lastgängen und bisherigem Gas- oder Heizölverbrauch – vorliegen, muss der Wärme- und Leistungsbedarf mit Hilfe geeigneter Verfahren möglichst genau ermittelt werden. Ziel der Erhebung sind die Werte für den Jahreswärmeverbrauch und die Wärmebedarfsleistung aller Abnehmer. Auf dieser Grundlage wird die Ausgangsleistung des Heiz(kraft)werks ausgelegt. Wesentliche Parameter des Wärmebedarfs sind:

- die Spitzenlast der Wärmeleistung, der jährliche Wärmebedarf,
- das erforderliche Temperaturniveau der Nutzwärme,
- der saisonale Verlauf der Wärmelast in Form einer geordneten Jahresdauerlinie (diese stellt den nach Größe geordneten stündlichen Wärmebedarf aller Verbraucher über alle Stunden eines Jahres dar; sie besteht somit aus 8760, der Größe nach geordneten, Stundenwerten).

Bei der Ermittlung des Wärmebedarfs mehrerer Abnehmer ist zu beachten, dass deren Spitzenlasten meist nicht zeitgleich auftreten, sodass die Gesamthöchstlast geringer als die Summe der einzelnen Spitzenlasten ist. Die Leistungsabfrage wird dadurch gleichmäßiger; die maximal benötigte Leistung kann reduziert werden. Der hierfür anzusetzende Gleichzeitigkeitsfaktor beträgt – abhängig von der Anzahl der Abnehmer und deren Wärmebedarfscharakteristik – oft 70 bis 90 %.

Von entscheidender wirtschaftlicher Bedeutung sind jedoch nicht nur die Bedarfs- und Leistungswerte, sondern auch die Zeitpunkte, zu denen die Abnehmer angeschlossen werden können. Erst zu einem späteren Zeitpunkt realisierbare Anschlüsse sollten in einer mittelfristig nachfolgenden Ausbaustufe zusammengefasst werden. Optimale Voraussetzungen bieten natürlich hohe und gleichmäßige Wärmebedürfnisse sowie eine kurze Akquisitionszeit und rasche Versorgungsaufnahme. Ziel ist eine realistische, möglichst nicht zu optimistische Einschätzung der zukünftigen Entwicklungen.

Bei der Netzdimensionierung sind für die Transportleistung und Wärmebelegung des Netzes Verlustanteile und Reserven für eventuelle Neuanschlüsse zu berücksichtigen.

Die Wärmebelegung eines Nahwärmenetzes sollte als ca. 2 MWh pro Trassenmeter und Jahr betragen. Darüber hinaus kann erfahrungsgemäß mit einem wirtschaftlichen Anlagenbetrieb erst bei einer Netzbelegung

von mindestens 1 kW pro Trassenmeter gerechnet werden, an Vollbenutzungsstunden sollten mindestens 2000 Stunden erreicht werden. Aufgrund der hohen spezifischen Investitionen eines Wärmeverteilnetzes kommt der Festlegung des eingesetzten Rohrleitungssystems und des Trassenverlaufs eine hohe Bedeutung zu.

### Konzepte für Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung [1]

Geeignete KWKK-Konzepte erfordern vorab eine Kältebedarfserhebung, die Prüfung der technischen Möglichkeiten zur Klima- und Prozesskälteversorgung sowie eine fundierte Wirtschaftlichkeitsuntersuchung. Technisch bedingte Einschränkungen bei der Wahl der Kältesysteme ergeben sich aus den speziellen Anforderungen der Kältekunden und den Möglichkeiten vor Ort. Entscheidend sind hierbei

- das Temperaturniveau des Kältebedarfs (bei Klimakälte üblicherweise  $> 6\text{ °C}$ , bei Prozesskälte  $< 0\text{ °C}$ ),
- bei AKM: das verfügbare Heiztemperaturniveau,
- Charakteristik der Kältelast (bei industrieller Kühlung meist ganzjährige Abnahme, bei Klimatisierung ausgeprägte Sommerspitze),
- die lokal verfügbaren Energieträger sowie
- die örtlichen Aufstellungsbedingungen der Kälteanlage (verfügbare Fläche bzw. zulässige Lasten für Kältemaschine und Rückkühlwerke),
- die erreichbaren Verflüssigungstemperaturen (Trockenkühler, offener Kühlturm oder hybride Trockenkühler).

Thermische Kältemaschinen zeichnen sich durch eine hohe Sensitivität gegenüber den anliegenden Temperaturen (Antriebs-, Kühlwasser- und Rückkühl-/Kühlturmtemperatur) aus, so dass durch flexible Betriebsstrategien gepaart mit moderner Technologie erhebliche Optimierungspotenziale bei Auslegung oder Betrieb möglich sind. Unterstützt wird die Realisierung dieser Strategien durch die vielfältigen Eingriffsmöglichkeiten per moderner Gebäudesystemtechnik und den Einsatz von Kühldecken, welche mit höheren Kaltwassertemperaturen auskommen

(Fern-)Kältenetze sind bisher in der Bundesrepublik nur selten vorzufinden (z.B. in Hamburg, Chemnitz, Gera, Pfaffenhofen). Sie sind allein dort sinnvoll, wo ein räumlich begrenzter und konzentrierter Kältebedarf vorhanden ist, wie das z.B. in Dienstleistungszentren der Fall ist.

Die KWKK muss im Wettbewerb mit anderen Kältetechnologien bzw. Kälte Dienstleistungen bestehen. Für die einzelne Anwen-

dung liefert der Quervergleich eine Einschätzung zur Wirtschaftlichkeit der KWKK. Der Kältekunde sucht letztlich eine preiswerte und sichere Lösung für seine Kälteversorgung, die er mit einem Kälte Dienstleister oder mit der eigenen Anlage technisch-wirtschaftlich optimal realisieren kann.

### Auslegungs- und Optimierungsstrategien [1]

Optimale Antriebsbedingungen für die KWKK werden bei der Anbindung an eine Gasturbine mit direkter Nutzung der Abgaswärme bzw. über Dampfauskopplung erzielt.

In Verbindung mit Motor-BHKW-typischen Antriebstemperaturen von 90–95 °C leisten Wasser-LiBr-AKM nur die Hälfte ihrer Auslegungsleistung. Höhere Temperaturen von 120 °C können mit BHKWs über einen Abgaswärmetauscher erzielt werden. Bei der Anbindung an ein BHKW ist vor allem die Einhaltung maximaler Rücklauftemperaturen zu beachten. Bei Rücklauftemperaturen von mehr als 70 °C sind Anpassungen an Öl- und Ladeluftkühlung vorzusehen. Durch eine Vergrößerung des Ölkühlers kann die Rücklauftemperatur bis auf 85 °C angehoben werden. Darüber hinaus muss eine separate Ölkühlung erfolgen. Die Ladeluftkühlung sollte einen getrennten Kühlkreislauf aufweisen. Die hierbei ungenutzte Abwärme aus dem Ölkühlkreis und aus der Ladeluft beträgt ca. 15 % der gesamten thermischen Nutzleistung.

Zur Auslegung der Kühl- und Heizaggregate müssen die maximalen Kühl- und Heizlasten ermittelt werden. Um den Kältebedarf bei Neubauprojekten zu berechnen, ist eine Kühllastberechnung nach VDI 2078 bzw. eine Heizlastberechnung nach DIN EN 12831 durchzuführen. Eine Systemoptimierung und die Festlegung des Betriebsregimes ist ohne Kenntnis der zu erwartenden Tages- und Jahreslastgänge nicht möglich. KWKK wird bisher überwiegend in der Klimatisierung eingesetzt, bei der aufgrund der äußeren Wärmelasten (Sonneneinstrahlung) ausgeprägte Lastspitzen und niedrige Vollbenutzungsstunden von 500 bis 800 h/a anzutreffen sind (zum Vergleich: Raumwärme 1500–2500 h/a). Innere Wärmelasten durch Menschen und Maschinen/EDV gewinnen bei der Auslegung zunehmend an Bedeutung. Dies führt zu einer Ausweitung und Verstärkung der Kältelast.

In der Praxis scheitert die Realisierung einer KWKK oftmals am falschen Anlagenkonzept oder an ungeeigneten Auslegungsparametern, so z.B. an der starren Vorgabe einer Kaltwassertemperatur von 6 °/12 °C.

Eine gründliche und fundierte Planung, die das System und die betrieblichen Wechselwirkungen der Kälteversorgung bis zum klimatisierten Raum berücksichtigt, kann die Effizienz der KWKK-Anlage wesentlich erhöhen. Eine von 6 ° auf 8 °C erhöhte Kaltwasservorlauftemperatur ermöglicht bei gleicher Kälteleistung z.B. eine Senkung der Antriebstemperatur um ca. 4 K; bei der Bauteilkühlung kann die Kaltwasservorlauftemperatur sogar bis 18 °C betragen. Zu beachten sind darüber hinaus Aufstellungsbedingungen (besonders wichtig: Schallemissionen der Kühltürme), die ggf. zu Zusatzinvestitionen und höheren Betriebskosten (Strombedarf der Kühltürmventilatoren) führen. Planungsmerkmale für KWKK-Systeme:

- Bei Anbindung einer AKM an ein Nah- oder Fernwärmenetz: Vermeidung von hydraulischen Restriktionen durch eine möglichst niedrige Rücklauftemperatur bzw. hohe Temperaturspreizung mit kältegeführter Vorlauftemperaturregelung.
- Kaltwassertemperaturen sollten dem tatsächlichen Bedarf angepasst werden. Dies erfordert u.U. niedrigere Antriebstemperaturen für die AKM.
- Ausnutzen niedrigerer Kühlwassertemperaturen (15–27 °C) in der kühleren Übergangszeit, Regelung nach der Feuchtkugeltemperatur der Umgebungsluft (unterer Grenzwert der Kühlwassertemperatur im Kühlturm).
- Ausnutzen der Möglichkeiten der Freien Kühlung (Kühlung über das Rückkühlsystem, für die jedoch eine Anhebung der Kaltwassertemperatur auf 10 °C bis 14 °C notwendig ist).
- In den kühleren Jahreszeiten wird keine Luftentfeuchtung benötigt, so dass im Regelfall Kaltwassertemperaturen > 10 °C ausreichend sind.

- Rücklauftemperaturen von 50 °C bis 60 °C sind nur mit mehrstufigen Absorptionskälteanlagen, Adsorptionskältemaschinen oder DEC-Verfahren zu erzielen.
- Bei Leistungen ab 800–1000 kW können die Investitionskosten durch eine Aufteilung der Kälteerzeuger für Grund- und Spitzenlast gesenkt werden, wobei letztere über Kaltwasserspeicher oder KKM erbracht wird.
- Eine Erhöhung der Antriebstemperatur ist möglich mit Spitzenlastkesseln oder mit einer kältegeführten Fernwärmeverlauftemperatur zur kurzzeitigen Steigerung der Kälteleistung.

Mit der KWKK können – insbesondere im Sommer – Lasttäler von Fern- oder Nahwärmenetzen aufgefüllt werden. Korrespondierend dazu werden Lastspitzen in der Stromerzeugung (Supply-Side-Planning/Management) bzw. im Strombezug (Demand-Side-Management) abgebaut. Die Klimatisierung wird – zusätzlich zur Heizung und Warmwasserbereitstellung – zum Wärmeverbraucher. Und mit den jährlichen Betriebsstunden des KWKK-Systems zur gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme wächst auch der mittlere Brennstoffnutzungsgrad. Dies kann zu verringerten Strom-, Wärme- und Kälteentstehungskosten führen.

Der betriebswirtschaftliche Vorteil von Systemen der KWKK hängt von den jeweiligen Strombezugskonditionen bzw. von den im Einzelfall anlegbaren Kältepreisen ab. Allgemeine Aussagen zur Wirtschaftlichkeit eines KWKK-Projektes können daher nur nach Prüfung aller Rahmenbedingungen getroffen werden.

Eine KWKK-Anlage lohnt sich nur dann, wenn die Gesamtkosten der Kälteerzeugung niedriger oder gleich den anlegbaren Kältekosten sind. In den meisten Anwen-

dungsfällen sind Kältemischpreise von 100 bis 150 €/MWh (Stand 2006) anlegbar. Bei der Berechnung der Betriebskosten von KWKK-Anlagen ist insbesondere auf die Kosten des Kühlturbetriebs hinzuweisen (Wasserverlust, Ventilatorantrieb), die im Einzelfall zu optimieren sind.

Zu beachten sind auch die schlechteren Leistungsziffern der AKM, die vor allem in den notwendigen Nebeneinrichtungen (z.B. Kühlturm) kostenwirksam werden und eine KWKK nur bei sehr niedrigen Wärmekosten in Höhe von 10–15 €/MWh (Stand 2007), Tiefkälte sogar eher unter 10 €/MWh, wettbewerbsfähig machen.

### Zusammenfassung

Mit den durch Biomasse-Anlagen erreichbaren Wärmepreisen und bei hoher, ganzjähriger Auslastung sind Absorptionskältemaschinen heute wirtschaftlich sehr attraktiv! Die Grundlage für ein wirtschaftliches KWKK-System liefert ein im Vorfeld der Planungen durchgeführtes Energiekonzept. Oft scheitern Projekte am falschen Anlagenkonzept oder an ungeeigneten Auslegungsparametern.

Die obigen Ausführungen sind nur als Orientierung zu verstehen; sie ersetzen auf keinen Fall die individuelle Betrachtung unter Berücksichtigung von regionalen und örtlichen Rahmenbedingungen.

### Literatur

- [1] BINE Informationsdienst: KWKK/Kraft – Wärme – Kälte -Kopplung; profi-info II/98
- [2] Arbeitsgemeinschaft QM Holzheizwerke: Band 4 – Planungshandbuch; 2004
- [3] Wikipedia: freie Internet-Enzyklopädie unter <http://de.wikipedia.org>; 2005