

BIOMASSE-HEIZKRAFTWERKE MIT KRAFT-WÄRME-KÄLTE-KOPPLUNG (KWKK)

*Vortrag / Artikel / Poster:
10. Europäische Biomassekonferenz, Würzburg 6/1998
OTTI-Tagung, Kloster Banz 11/1999*



*Dipl.-Ing. Jens Kötting, Dipl.-Ing. (FH) Peter Ganter
IGEU Cramer, Ganter, Kötting GbR mbH
Fichtenstraße 2, 82061 Neuried
Tel.: 0 89 / 7 59 83 - 34 Fax: 0 89 / 7 59 83 - 39*

1 Einführung [i]

In den letzten Jahren ist eine wachsende Anzahl von Biomasseheiz- und heizkraftwerken zur Wärme- und Stromerzeugung in Betrieb gegangen. Die produzierte Wärme wird über Nah- bzw. Fernwärmenetze den Endverbrauchern, Raumheizung oder industrielle Prozesse, zur Verfügung gestellt. Heizwerke erreichen dabei, je nach Standort, typischerweise nur etwa 2.000 Vollastbetriebsstunden pro Jahr und Heizkraftwerke sind gezwungen, die Überschußwärme über Kondensatoren zu verichten. Mit der Nutzung dieser Wärme in Sorptionskälteanlagen zur Kälteerzeugung und zur Raumklimatisierung werden zum einen höhere Vollastbetriebsstunden erreicht, zum anderen können teilweise größere Leistungen installiert werden. Beides führt zu einer verbesserten Wirtschaftlichkeit der Gesamtanlage.

Im folgenden werden eine technische Beschreibung von Sorptionskreisläufen, die mit Wärme aus mit biogenen Brennstoffen befeuerten Anlagen betrieben werden, und eine Betrachtung der Kälteerzeugungskosten gegeben.

2 Wärmebedarf / Jahresganglinie

In Abb. 1 wird eine typische Jahresganglinie eines Nahwärmenetzes gezeigt. Während der Sommermonate fällt, je nach Tageszeit, der Heizenergiebedarf, die Rohrleitungsverluste einschließend, auf etwa 10...30 % der Leistungsspitze ab. Der Heizwärmebedarf kann in den Sommermonaten wesentlich gesteigert werden, wenn Wärme für die Versorgung von Sorptionskältemaschinen zur Verfügung gestellt wird. Dadurch

werden neben höheren jährlichen Volllaststunden der Biomasseanlage auch eine konstante Betriebsweise bei gleichbleibender Leistungsabnahme und somit eine Reduzierung des thermischen Verschleisses der Anlage erreicht.

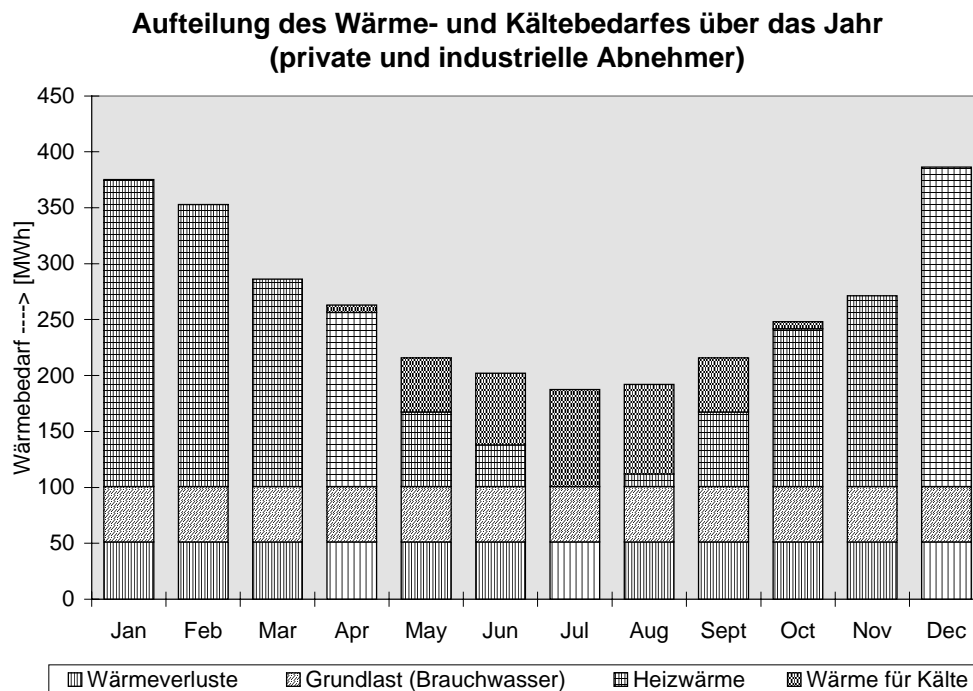


Abb. 1: Typische Jahresganglinie eines Biomasseheizwerkes

In Biomasseheizkraftwerken verringert die Installation von Sorptionskälteanlagen die maximal mögliche elektrische Stromerzeugung, trägt aber zu einer Vergleichmäßigung der Kraft-Wärme-Kopplung bei.

3 Kälteerzeugung für Raumklimatisierung und Prozeßkälte

3.1 Kompressionskältemaschine

Im allgemeinen wird Kälte für Industrieprozesse oder Raumklimatisierung über den Entzug von Wärme aus einem Kühlmittel erzeugt. Die Wärme versorgt den Niederdruckteil der Kältemaschine und dient zur Verdampfung der flüssigen Arbeitsmittellösung. In Kompressionskältemaschinen (z.B. Schraubenkompressoren) wird der Kältemitteldampf mit Hilfe einer mechanischen Verdichtung auf ein höheres Druckniveau angehoben. Verursacht durch den hohen Druck wird der Kältemitteldampf im Kondensatorteil der Kältemaschine bei höheren Temperaturen als im Verdampfer verflüssigt. Die durch die Kondensation freigesetzte Wärme des Kältemitteldampfes muß mit Hilfe eines Kühlturmes in die Umgebung niedergeschlagen werden. Kompressorkältemaschinen werden mit Elektro- oder mit Gas- / Dieselmotoren betrieben. Als Kältemittel wurden in der Vergangenheit hauptsächlich fluorierte Kohlenwasser-

stoffe (FCKW) eingesetzt. Um die Umweltverschmutzung und die Ozonzerstörung zu reduzieren, sollen teilhalogenierte Kohlenwasserstoffe (HFKW) und alternative Kältemittel wie Propan / Butan, Ammoniak, Kohlendioxid, Wasser die traditionellen Arbeitsmittel substituieren.

Die Leistungsziffer der Kältemaschine (COP), d.h. das Verhältnis von Kälteleistung zu aufgewandter mechanischer Leistung beschreibt die energetische Effizienz des Systems. Die Leistungsziffer ist, eine bestimmte Qualität der technischen Ausrüstung vorausgesetzt, dabei hauptsächlich eine Funktion des Temperaturhubes zwischen bereitgestellter Nutzkälte am Verdampfer und der freigesetzten Abwärme am Kondensator. Eingesetzt als naßgekühlte Kaltwassersätze erreichen Kompressionskältemaschinen in typischen Anwendungen der Raumklimatisierung (12/6 °C) Leistungsziffern von etwa 5, bei Tiefkühlkälte mit -25 °C werden Leistungsziffern im Bereich von 2 bis 3 erreicht.

3.2 Absorptionskältetechnik

3.2.1 Prinzipien und Standardanlagen

Der Absorptionskreislauf ist ähnlich mit denen konventioneller Dampfkreisläufe. Gegenüber der mechanischen Kompression werden für die Druckerhöhung zwischen Verdampfer und Kondensator zwei Wärmetauscher – Absorber und Generator – eingesetzt. Diese werden über einen Lösungsmittelkreislauf, der eine Pumpe enthält, miteinander verbunden (s. Abb. 2)

Anstatt der mechanischen Kompression wird bei Absorptionskaltwassersätzen der Kältemitteldampf in einem flüssigen oder festen Sorbens im Absorber absorbiert und im Generator bei höherer Temperatur unter Einsatz der Antriebswärme wieder aus der Lösung ausgetrieben. Ähnlich wie bei der Kondensation wird die Absorption des Kältemitteldampfes im Absorber mit der Abgabe von Wärme begleitet. In flüssigen Sorptionskreisläufen wird das Arbeitsmittel, Kältemittel und Sorbens, kontinuierlich mittels Wärmeinput in den Wärmetauscher des Generators regeneriert. Ein rekupe-rativer Wärmetauscher im Lösungsmittelkreislauf dient der Leistungssteigerung.

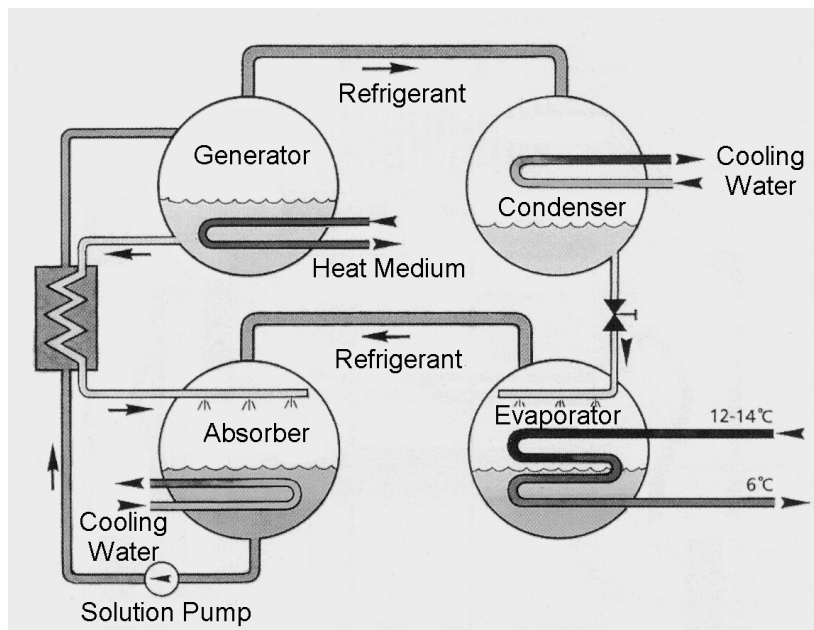


Abb. 2: Funktionsschema des einstufigen Absorptionskältekreislaufes (Single-Effect)

Analog zu Kompressionskältemaschinen, wird die Leistungsziffer COP der Absorptionskälteanlage definiert als Verhältnis von Nutzkälte Q_0 zu Antriebswärme Q_2 .

$$COP = \frac{Q_0}{Q_2} = \frac{\text{Nutzkälte}}{\text{Antriebswärme}}$$

Bei der Absorptionskälteanlage beruht die Funktion des thermischen Kompressors auf der Siedepunkterhöhung des Arbeitsmittelgemisches gegenüber dem reinen Kältemittel. Daher sind die physikalischen Eigenschaften des verwendeten Sorptionsmittels ausschlaggebend für ihre Eignung in einem Niedertemperatur-Sorptionskreislauf. Für einen bestimmten Einsatzfall, d.h. vorgegebene Kalt- und Kühlwassertemperaturen, ergibt sich die Prozeßtemperatur im Austreiber (Generator) des Sorptionskreislaufes aus den Gleichgewichtsdaten des verwendeten Sorptionsmittels. Diese interne Prozeßtemperatur zuzüglich der treibenden Temperaturdifferenz für die Wärmeübertragung vom Wärmeträger auf den internen Prozeß ist maßgebend für die benötigte Temperatur zum Antrieb des Sorptionskreislaufes. Absorptionskälteanlagen mit dem Kälte- / Arbeitsmittelgemisch Wasser/wässrige Lithiumbromidlösung sind kommerziell erhältlich. Für die Kälteerzeugung mit Nutzkälte unter 0 °C (Minimum -60 °C) wird Ammoniak als Kältemittel eingesetzt. Für die Raumklimatisierung werden Wasser- / Lithiumbromid-Anlagen favorisiert. Letztere erfordern geringere technische Anforderungen und erlauben niedrigere spezifische Investitionskosten, da bei Ammoniak / Wasser wegen der auftretenden hohen Drücke eine massive Bauweise und

eine Rektifikation erforderlich sind. Typische Daten von Standard-Absorptionsanlagen sind in Tab. I (Ammoniak / Wasser) und (Wasser / LiBr) aufgeführt.

Tab. I: Auslegungsdaten von Ammoniak- / Wasser-Absorptionskälteanlagen (Kühlwasser 27/35 °C)

Ammoniak / Wasser	Nutzkälte Temperatur T_0		
	0°C	-20°C	-40°C
Single-Effect Antriebswärme T_2	110°C	140°C	175°C
COP	0.62..0.66	0.45..0.56	0.32..0.44
Double-Lift Antriebswärme T_2	78°C	95°C	112°C
COP	0.37	0.32	0.27

Für die Ammoniak- / Wasser- Kälteanlagen ist ein großer Bereich der Leistungsziffer erkennbar. Das resultiert aus den verschiedenen Anlagenkonzepten, die entweder nach einer kompakten Anlagenkonstruktion, die niedrigere Investitions-, Transport- und Installationskosten erlaubt, oder einer maximalen Leistung und niedrigen Betriebskosten optimiert werden. Die spezifischen Investitionskosten liegen für Ammoniak- / Wasser-Kälteanlagen in einem Bereich zwischen 500 und 1.000 €/kW installierter Kälteleistung.

Tab. II: Auslegungsdaten von Wasser- / LiBr-Absorptionskälteanlagen (Kühlwasser 27/35 °C)

Wasser / LiBr	SE/DL	SE	DE	
Antriebswärme T_2	Heißw. 80...100°C	Heißwasser o. Dampf 80...120°C	175°C	Gas direkt bef.
ΔT Heißwasser	>30 K	10...20 K	10...20 K	
COP	0.5...0.65	0.7...0.75	1.2	1.0

Standard-Wasser- / LiBr-Kälteanlagen sind für Antriebswärme von etwa 120 °C (Heißwasser oder Dampf) ausgelegt. Für diese Bedingungen werden spezifische Investitionskosten von etwa 150 bis 100 €/kW installierter Kälteleistung im Bereich von 500 bis 1.000 kW Leistung erreicht. Dementsprechend steigen bei Niedertemperaturanwendungen, z.B. Warmwasser 90/80 °C, die Gestehungskosten für LiBr-Kälteanlagen auf etwa 150 bis 200 €/kW durch die größere Dimensionierung der Anlagen.

3.2.2 Mehrstufige Sorptionskreisläufe für Niedertemperatur-Antriebswärme

Wie bereits oben erwähnt, ist die minimale benötigte Antriebstemperatur zum Betrieb des Sorptionskreislaufs durch die thermo-physikalischen Stoffdaten der verwendeten Kälte- / Sorptionsmittelmischung festgelegt. Niedrigere Antriebstemperaturen, die zum Betrieb der einstufigen Kreisläufe nicht mehr ausreichen, können nur in mehrstufigen Sorptionsanlagen genutzt werden.[ii][iii]. Mit dem Einbau zusätzlicher Anlagenkomponenten, d.h. Wärmetauscher, kann der Temperaturhub zwischen Kälteerzeugung und Kühlturm schrittweise angepaßt werden. Auf Kosten einer reduzierten Leistungsziffer können so auch niedrigere Antriebstemperaturen genutzt werden.

Zweistufige Kälteanlagen zur Nutzung von Niedertemperaturwärme (Double-Lift-Prozeß) sind sowohl für Raumklimatisierung als auch für Tiefkühlkälte erhältlich. Für den Einsatz in Fernwärmenetzen mit begrenzten Wasserdurchflüssen wurde eine Kombination einer Standard-Single-Effect- mit einer Double-Lift-Anlage entwickelt und getestet. Die sogenannte SE/DL-Anlage kann mit Warmwasser unter 100 °C betrieben werden und weist Temperaturspreizungen von 30 bis 40 K auf [iv]. Für die Leistungsklasse von 500 bis 1.000 kW können Investitionskosten von etwa 300 €/kW erwartet werden.

4 Wirtschaftlichkeit

Folgende Varianten wurden vergleichend betrachtet:

Variante	Arbeitsmittel	VL/RL	COP	Kälteart	Preis [€]
SE	H ₂ O/LiBr	90/80	0,75	Raumklim.	75.000
SE/DL	H ₂ O/LiBr	90/60	0,6	Raumklim.	125.000
DL	NH ₃ /H ₂ O	95/85	0,6	Tiefkühlkälte	500.000
SE oder DE	H ₂ O/LiBr	160/150	1,2	Raumklim.	112.500
SE	NH ₃ /H ₂ O	140/130	0,56	Tiefkühlkälte	250.000
KKM	-	-	5	Raumklim.	50.000
KKM	-	-	2,5	Tiefkühlkälte	125.000

Für die Raumklimatisierung werden 500 und für die Tiefkühlkälte (-20 °C) 2.500 Volllaststunden erreicht. Das entspricht einer gesamten Kältemenge von 250 MWh bei der Raumklimatisierung und von 1.250 MWh für Tiefkühlkälte.

Die wesentlichen wirtschaftlichen Rahmendaten und Annahmen sind in nachfolgender Tab. III zusammengestellt.

Tab. III: Rahmendaten für die Kalkulation

Komponente	Einheit	Preis
Leistungspreis Strom	€/kW	125
Arbeitspreis Strom	€/kWh	0,07
Frisch- (Stadt-) wasser	€/m ³	1,00
Abwasser	€/m ³	1,25
Biomasse (feucht)	€/t	30
Stromeinspeisungsgesetz	€/kWh	0,075
Zins für Finanzierung	%	7,00

Die Investitionskosten schließen die Gestehungskosten für die Kältemaschine, die Rückkühlung und die periphere Anlagentechnik ein. Die Betriebskosten enthalten die Stromkosten der Netzpumpen für das Wärmenetz und die Kühlwasserpumpen, den Wasserverbrauch der Rückkühlung und die Antriebswärme der Kältemaschine. Bei der Nutzung von Wärme aus Biomasseheizwerken werden zusätzliche Kosten wie Brennstoffkosten und Bedienungsaufwand berücksichtigt. Bei der Nutzung von Wärme aus Biomasseheizkraftwerken wird ein Gleichgewichtspreis der Wärmegestehung berechnet, der sich aus den Mindererträgen bei der Stromerzeugung mit erhöhter Wärmeabgabe an der Dampfturbine ergibt.

Die spezifischen Kosten für die Kälteerzeugung der verschiedenen Anlagen sind in Abb. 3 dargestellt. Auf Grund der niedrigen Brennstoffkosten führt die Installation einer SE-Anlage (Wasser/LiBr) für Anwendungen in der Raumklimatisierung zu niedrigeren spezifischen Kosten als bei Einsatz einer Kompressorkältemaschine. Entfällt beim Einsatz der Kompressorkältemaschine der Leistungspreis für Strom in den Sommermonaten, wird der Betrieb der KKM konkurrenzfähig (120 €/MWh).

Auf Grund der höheren Komplexität und der höheren Investitionskosten werden für die Kälteerzeugung mit SE/DL-Anlagen höhere spezifische Kosten erwartet. Dennoch kann der Einsatz einer SE/DL-Anlage in Fällen mit begrenzten Wasserdurchflüssen im Netz die Installation von Rohren mit größeren Durchmessern vermeiden.

Für die Erzeugung von Tieftemperaturkälte (-20 °C) kommen nur Ammoniak-/Wasser-Anlagen zum Einsatz. Auf Grund der höheren Investitionskosten für die Double-Lift-Anlagen führen diese Anlagen zu höheren spezifischen Kältegestehungskosten. Single-Effect-Anlagen mit Ammoniak/Wasser sind aber eine konkurrenzfähige Alternative zu elektrisch angetriebenen Kompressionskältemaschinen.

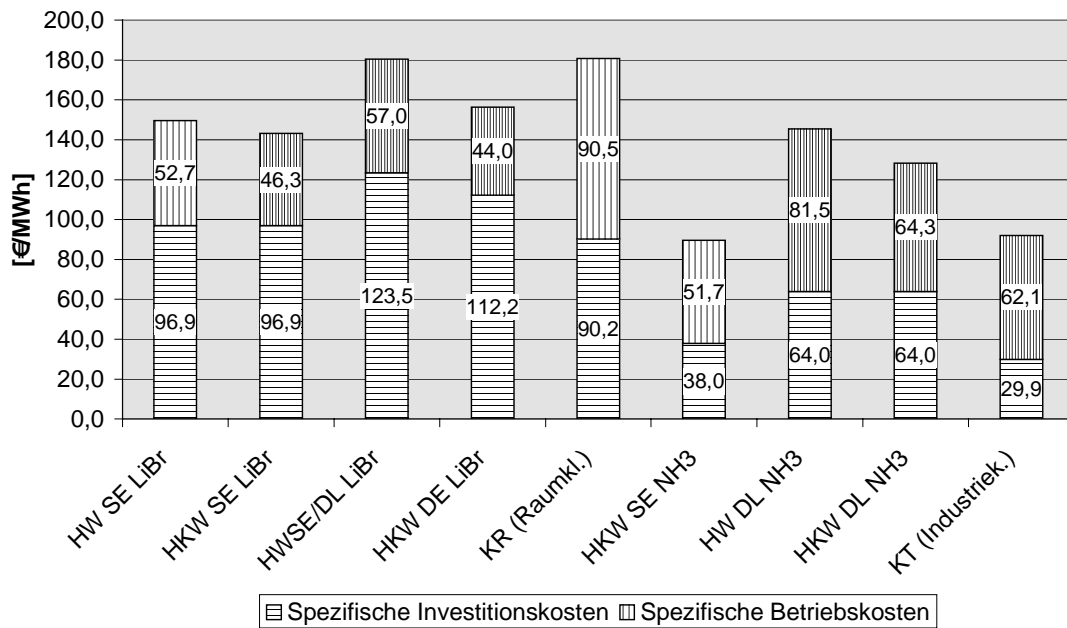


Abb. 3: Spezifische Kosten der Kälteerzeugung mit BM-HW oder BM-HKW, im Vergleich zu Kompressorkältemaschinen für Raumklimatisierung (KR) und Tiefkühlkälte (KT)

5 Zusammenfassung

Unter Berücksichtigung der oben beschriebenen Kostenbetrachtung kann festgestellt werden, daß Absorptionskältemaschinen mit der Wärme aus Biomasseheiz- und -heizkraftwerken mit wettbewerbsfähigen Kosten – im Vergleich zu konventionellen Kompressionskältemaschinen – betrieben werden können. Für Anwendungen in der Raumklimatisierung (500 Vollaststunden/a, Kühlwasser 12/6 °C) können Kältegestehungskosten von etwa 140 €/MWh mit SE-Anlagen (Wasser/LiBr) realisiert werden. Für Tieftemperaturanwendungen (-20 °C, 2.500 Vollaststunden/a) werden mit SE-Anlagen (Ammoniak/Wasser) Kältegestehungskosten von etwa 85 €/MWh erreicht.

- [i] Kötting, J., Schweigler, C. (1998): Biomasse-Heizkraftwerke mit Kraft-Wärme-KälteKopplung. 10th European Conference and Technology Exhibition "Biomass for Energy and Industry", Würzburg.
- [ii] Alefeld, G. (1983): Wärmeumwandlungssysteme; Lecture Notes; TU München, published in English by Alefeld, G. and Radermacher, R., CRC Press 1994, Boca Raton, Florida, USA.
- [iii] Ziegler, F., Alefeld, G. (1987): Coefficient of performance of multistage absorption cycles. In: Int. J. Refrig. 10, pp. 285-296.
- [iv] Schweigler, C.; Demmel, S.; Riesch, P.; Alefeld, G. (1996): A new absorption chiller to establish combined cold, heat and power generation utilizing low temperature heat. ASHRAE Transactions 102 (1) and ASHRAE Technical Data Bulletin 12 (1), Absorption/ Sorption Heat Pumps & Refrigeration Systems: 81-90.