

Möglichkeiten und Grenzen der Fernwärme-Kälte-Kopplung

Von Peter Noeres, Daniel Hölder, Wilhelm Althaus, Oberhausen, Dieter Czyzewski, Berlin, und Heinz Grosa, Weißwasser *)

Die Fernwärme-Kälte-Kopplung (FWKK) stellt eine besondere Form der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) dar, bei der bestehende Fernwärmesysteme zur Kälteerzeugung genutzt werden. Da Fernwärmesysteme vor allem in Innenstädten mit hohem Gewerbeanteil bestehen und diese im Sommer nur zu einem Bruchteil genutzt werden, kann die Fernwärme-Kälte-Kopplung einen Beitrag zur Gewährleistung einer weitergehenden Nutzung der Fernwärme leisten. Die Autoren stellen die Ergebnisse des BMBF-Verbundprojektes »Fernwärme-Kälte-Kopplung« vor und zeigt Möglichkeiten zur sinnvollen Nutzung der FWKK auf.

Summary of the report

Possibilities and limits of cold generation with district heat

The request for better inner climate in office and administrative buildings as well as in the service sector yields in an increasing interest in room air conditioning in Germany. Particularly the rising inner thermal loads (EDP, illumination) as well as the often very light construction with large window areas and rising insulation standards are the reasons for this development.

In Germany cold generation for air conditioning tasks is mostly done by using compression chillers. These need electric energy to run their mechanical compressor. Besides that there is also the possibility to produce climate cold by heat-driven refrigerating processes. Particularly single-effect H₂O/LiBr absorption chillers as well as alternative thermal refrigerating processes fall in this category.

Thermal refrigerating processes use thermal energy for the generation of cold. This energy is often available as industrial waste heat, district heating, solar energy or from the combustion of fossil fuels. Within the context of combined district heating and cooling, the use of district heating for heat-driven refrigerating processes is of advantage for the air condi-

tioning of buildings in summer since district heating systems in municipal areas are well extended for the supply of heat and are hardly used in summer. Unlike the relatively even current power load curve the heat demand has a »summer recess« and leaves CHP without heat customers in summer. Besides, larger district heating customers from the service sector, who also represent potential climate cold customers for the most part, are frequently located in the downtown area.

In this report combined district heating and cooling is defined as the production of cold by the use of heat-driven refrigeration processes that acquire the thermal energy needed for the generation of cold from district heating and CHP plants, respectively. Combined district heating and cooling must be understood as part of the concept of combined heat, cold and power for which the heat required for the generation of cold comes from CHP processes. For Combined district heating and cooling the heat may additionally come from waste heat or from peak boilers (the latter preferably only to a small extent). The district heating can be provided both in form of hot water and in form of low pressure steam. However, the emphasis in this report lies on the examination of hot water systems for they represent a greater portion of district heating systems and do expectedly cause the essential problems for their realization. In this report the thermal processes are examined for an operation of heat at a low temperature level (temperatures of 60 to 100 °C). This temperature level corresponds to the supply conditions prevailing in German district heating systems in summer.

The disadvantages listed in *table 1* are the main reason that, till now, CHP and CHCP really has reached only a small

portion of its possible potential (in 1998 approx. 385 MW compared to a potential of 3 to 3.5 GW cold, of which approx. 185 MW from 109 CHP plants and approx. 200 MW from 55 CHCP plants (data according to AGFW and VDEW for 1998)).

Due to the above stated realization problems the possibilities of more favorable CHP designs shall therefore be presented within the context of this research project. For this it is advisable to make use of products already available on the market since faster realization and lowered costs for chillers were to be expected for them. The cooperative project should be seen understood as an additional project to the BMBF-cooperation project for the development of a new, double-effect absorption refrigeration process on the basis of the working pair H₂O/LiBr.

Particularly economically and technically optimal approaches have to be developed for the expansion of the application range of the CHP process. Here has to be taken into account, that only by contemplating all system components, i.e. under consideration of air conditioning, chiller process, district heating distribution and -production, optimal solutions can be found for the CHP process. For optimization purposes the available standard technologies offer many starting-points and scopes for development, respectively, that increase the economical and technical chance for success. Besides the investment costs attention shall be directed at the running costs, that occur with nearly all heat-driven refrigerating processes at the recooling system. The examinations take into account all of the currently available heat-driven refrigerating processes for low driving temperatures on the market. Furthermore, possibilities for further development of H₂O/LiBr absorption chillers were examined in detail as well as possible applications for cold storage within the context of CHP.

Technical planning basics for the realization of CHP projects are compiled within the context of an interface project. On the one hand this includes the coefficients for the determination of cold demand and the correct calculation of a cold supply, as well as guidelines for the development of suitable cold supply concepts on the other hand. For the latter the results from the integrated pilot project shall be considered as well. Other examination topics are the ranges of application for small district cooling networks as well as for the combined district heating and cooling and the generally essential administrative aspects for the cold water supply, respectively.

*) Dipl.-Ing. P. Noeres, Dipl.-Ing. D. Hölder, Leiter Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung, Dr.-Ing. W. Althaus, Bereichsleiter Energietechnik, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik Umsicht, Oberhausen. Dipl.-Ing. D. Czyzewski, PEF Planungsbüro Energie und Fernwärme, Berlin. Dipl.-Ing. H. Grosa, Stadtwerke Weißwasser, Weißwasser.

Table 1. Pros and cons of combined heating and cooling by DH-systems

Tafel 1. Vor- und Nachteile der FWKK

Vorteile	Nachteile
Umweltfreundliche/natürliche Kältemittel (H ₂ O, NH ₃) anstelle von FKW, H-FCKW und FCKW	Abgesenkte Vorlauftemperaturen in Fernwärmenetzen im Sommer verursachen erhöhten anlagentechnischen Aufwand mit zusätzlichen Kosten
Einsparung von Primärenergie bei Einsatz von KWK-Anlagen und Abwärme zur Fernwärmeerzeugung	Geringe Auskühlung des Fernheizwassers (oftmals kleiner 10 K) bei der Kälteerzeugung verursacht hydraulische Engpässe im Fernwärmesystem
Bessere Auslastung von Fernwärmesystemen und KWK-Anlagen im Sommer	Anhebung der Fernwärmeverlauftemperatur verursacht zusätzliche Wärmeverluste und eventuell Stromeinbußen bei der KWK. Der Kosteneffekt für ein Gesamtnetz ist oftmals nur schwer einzuschätzen.
Reduktion des Spitzenstrombedarfs für Einzelobjekte	Rücklauftemperaturen < 70 °C für den Auslegungsfall sind mit H ₂ O/LiBr-AKM nicht möglich.
Kälte als Dienstleistung -> höherer Versorgungskomfort und Versorgungssicherheit	wenig Betriebserfahrungen mit AKM und anderen thermischen Kälteprozessen im Fernwärmeverbund
Neues Geschäftsfelder für Energiedienstleister, stärkere Kundenbindung	

By integrating a pilot project into the cooperative project a realization and verification of the results from the main project shall furthermore take place. A fast realization of the research results is moreover made possible by embedding manufacturers and operators. The cold generation for an indoor ice skating facility planned within the context of the pilot project represents a demonstration project for the combined district heating and cooling for low temperature applications.

1 Allgemeines

Der Wunsch nach besserem Innenraumklima in Büro- und Verwaltungsgebäuden sowie im Dienstleistungsbereich sorgt für ein zunehmendes Interesse an der Raumklimatisierung in Deutschland. Insbesondere die steigenden inneren Wärmelasten (EDV, Beleuchtung) sowie die oftmals sehr leichte Bauweise mit großen Fensterflächen und steigende Wärmedämmungsstandards sind die Gründe für diese Entwicklung.

Die Kälteerzeugung für Klimatisierungsaufgaben erfolgt in Deutschland meistens mit Kompressionskältemaschinen (KKM). Diese benötigen zum Antrieb ihres mechanischen Verdichters elektrische Energie. Daneben besteht auch die Möglichkeit, über thermische Kälteprozesse Klimakälte zu erzeugen. Hierunter fallen insbesondere einstufige H₂O/LiBr-Absorptionskältemaschinen (H₂O/LiBr-AKM) sowie weitere thermische Kälteprozesse.

Thermische Kälteprozesse nutzen thermische Energie zur Kälteerzeugung.

Diese Energie steht als industrielle Abwärme, Fernwärme, Solarenergie oder durch Verbrennung fossiler Brennstoffe oftmals zur Verfügung. Die Nutzung der Fernwärme für den thermischen Antrieb von Kälteprozessen im Rahmen einer Fernwärme-Kälte-Kopplung (FWKK) bietet sich gerade im Sommer zur Klimatisierung von Gebäuden an, da Fernwärmesysteme in Stadtgebieten für die Wärmeversorgung oftmals gut ausgebaut sind und im Sommer kaum genutzt werden. Im Gegensatz zum relativ gleichmäßigen Stromlastgang hat der Wärmebedarf ein »Sommerloch«, so daß bei der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) im Sommer der Wärmeabnehmer fehlt. Zudem sind im Innenstadtbereich auch oft größere Fernwärmekunden aus dem Dienstleistungssektor vorhanden, die auch meistens potentielle Klimakältekunden darstellen.

Unter FWKK wird die Erzeugung von Kälte mit thermischen Kälteprozessen, die die zur Kälteerzeugung benötigte thermische Energie über ein Fernwärmesystem beziehen, definiert. Die FWKK ist als ein Teilbegriff der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) zu verstehen, bei der die für die Kälteerzeugung benötigte Wärme aus KWK-Prozessen stammt. Bei der FWKK kann die Wärme zusätzlich aus Abwärme oder auch aus Spitzenkesseln (letzteres möglichst zu einem geringen Anteil) stammen. Die Fernwärme kann sowohl als Heißwasser als auch in Form von ND-Dampf zur Verfügung gestellt werden. Schwerpunktmäßig werden allerdings hier die Heißwassersysteme untersucht, da diese den größeren Anteil an den Fernwärmesystemen darstellen und bei ihnen auch mit den größeren Problemen bei der Um-

setzung zu rechnen ist. Die thermischen Prozesse werden unter Maßgabe eines Betriebes von Wärme auf niedrigem Temperaturniveau (Temperaturen von 60 bis 100 °C) untersucht. Dieses Temperaturniveau entspricht den in deutschen Fernwärmesystemen im Sommer vorherrschenden Versorgungsbedingungen. Die Argumente für und gegen die FWKK sind in *Tafel 1* dargestellt.

Die in *Tafel 1* genannten Nachteile sind der Hauptgrund, daß bisher die FWKK bzw. KWKK nur einen kleinen Teil des möglichen Potentials wirklich erreicht hat (1998 rd. 385 MW gegenüber einem Potential von 3 bis 3,5 GW Kälte, davon rd. 185 MW in 109 Anlagen mit FWKK und rd. 200 MW in 55 Anlagen der KWKK ([4;1] und Angaben des VDEW für 1998).

Aufgrund der Umsetzungsprobleme sollten im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes Fernwärme-Kälte-Kopplung (FKZ 0326988 A-C) die Möglichkeiten der günstigeren Gestaltung der FWKK dargestellt werden. Das Verbundprojekt selbst gliederte sich in drei Teilprojekte, dem Kernprojekt »Entwicklung von Betriebsstrategien zur Optimierung der Fernwärme-Kälte-Kopplung«, einem Schnittstellenprojekt zur Förderung der Umsetzung der FWKK in die Praxis sowie dem Pilotprojekt Weißwasser.

Bei der Untersuchung der FWKK sollte auf am Markt verfügbare Produkte zurückgegriffen werden, da mit diesen eine schnellere Umsetzung und niedrigere Kosten für die Kältemaschine zu erwarten ist. Das Verbundprojekt ist als ein Ergänzungsprojekt zum BMBF-Verbundprojekt zur Entwicklung eines neuen, zweistufigen Absorptionskälteprozesses auf Basis des Arbeitsstoffpaares H₂O/LiBr zu verstehen.

2 Betriebsstrategien zur Optimierung der FWKK mit H₂O/LiBr-AKM

Zur Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten der FWKK müssen technisch und wirtschaftlich optimale Ansätze entwickelt werden. Dabei ist zu beachten, daß nur bei Betrachtung aller Systemkomponenten, d.h. unter Berücksichtigung von Klimatechnik, Kälteprozeß, Fernwärmeverteilung und -erzeugung optimale Lösungsansätze zur FWKK gefunden werden können. Die vorhandenen Standardtechnologien bieten für die Optimierung viele Ansatzpunkte, die im Kernprojekt zur Betriebsoptimierung untersucht wurden. Neben den Investitionskosten müssen auch die Betriebskosten beachtet werden, die insbesondere auf der Rückkühlseite anfallen. Bei den Un-

tersuchungen werden die zur Zeit am Markt verfügbaren thermischen Kälteprozesse für niedrige Antriebstemperaturen berücksichtigt. Ferner werden auch die Weiterentwicklungsmöglichkeiten für H₂O/LiBr-AKM detailliert untersucht sowie die Einsatzmöglichkeiten von Kältespeichern im Rahmen der FWKK betrachtet.

Diese Veröffentlichung geht nur auf die speziellen Möglichkeiten zur Betriebsoptimierung bei H₂O/LiBr-AKM ein. Über die Möglichkeiten der FWKK mit anderen Kälteprozessen und den Einsatz von Kältespeichern wird detailliert in [2;3] berichtet.

Bei der FWKK können Heißwassersysteme und Systeme mit ND-Dampf unterschieden werden. Heizwassersysteme sind das bevorzugte Fernwärmesystem, dennoch bestehen in Deutschland noch Dampfnetze. Nach einer Mitgliederbefragung der AGFW [4] werden über 65 % der über die FWKK installierten Kälteleistung bisher mit dampfbetriebenen H₂O/LiBr-AKM realisiert. Dies ist darauf zurückzuführen, daß bei der FWKK auf ND-Dampfbasis keine größeren technischen Probleme zu erwarten sind. Es ist lediglich bei hohen Dampfdrücken und Dampftemperaturen eine Dampfumformung erforderlich. Weiterhin ist auf eine ausreichende Auskühlung des Kondensates zu achten (Kondensattemperatur kleiner 100 °C). Hierzu wird von einigen Herstellern ein Kältemaschineninterner Kondensatkühler angeboten. Da die erforderliche Kälteleistung in den meisten Objekten 20 bis 40 % des Wärmeanschlußwertes beträgt, sind keine hydraulischen Engpässe in bestehenden Dampfanschlußleitungen zu erwarten. Hingegen sind bei der FWKK auf Basis von Heizwassernetzen folgende technische Probleme zu berücksichtigen:

- Der Fernwärmeanschluß ist meistens auf den Winterbetrieb ausgelegt, so daß bei maximalem Volumenstrom im Sommer bei niedriger Temperaturspreizung eine geringere Wärmeleistung für die Kältemaschine zur Verfügung steht.
- Die Auskühlung der Fernwärme durch eine AKM ist sehr gering. Sie ist durch eine minimal erzielbare Rücklauftemperatur von 70 °C für den Auslegungsfall (27/33 °C Kühlwasser, 6/12 °C Kaltwasser) bestimmt. Gleichzeitig sind die Vorlauftemperaturen der Fernwärme im Sommer häufig kleiner 80 °C.

Zur Lösung der technischen Probleme sowie zur Senkung der Betriebs- und Investitionskosten wird eine Erhöhung der Auskühlung der Fernwärme, eine Steigerung der FW-Transportkapazität, die Erhöhung der Kälteleistung und die Steigerung des COP angestrebt. Diese Pro-

blemstellungen können durch anlagen- und betriebstechnische Konzepte gelöst werden.

1. Anlagentechnische Lösungsansätze:

- Einsatz von Single-Effect/Double-Lift (SE/DL) AKM sowie anderer thermische Kälteverfahren (DEC-Verfahren oder Wasser-Silicagel-Adsorptionskältemaschine)
- Einsatz von KKM als Spitzenlast-Kältemaschinen
- Einsatz von Kaltwasserspeichern
- Einsatz zusätzlicher Netzpumpen für die Fernwärme

2. Betriebstechnische Lösungskonzepte:

- Regelung des Fernwärmemassenstromes
- Anpassung der Kaltwasservorlauftemperatur entsprechend dem tatsächlichen Klimakältebedarf im Jahresverlauf. Insbesondere bei Teillast können so niedrigere Fernwärmerücklauftemperaturen erreicht werden.
- Flexible Fahrweise der Fernwärmavorlauftemperatur entsprechend der Außentemperatur oder Feuchtkugelmperatur.
- Bei Spitzenlast eine gewisse Lastunterdeckung akzeptieren. Diese tritt nur selten auf. Oftmals können kurzzeitige Temperaturerhöhungen im Gebäude akzeptiert werden.

Anlagentechnische Lösungskonzepte

Durch die anlagentechnischen Lösungskonzepte zur FWKK sollen zum einen die technischen Rahmenbedingungen für eine sinnvolle Anlagengestaltung geschaffen werden, zum anderen sind sie auch unter dem Gesichtspunkt der Kostensenkung zu sehen. Mit einstufigen H₂O/LiBr-AKM sind Rücklauftemperaturen von 70 °C bei unveränderten Kalt- und Kühlwassertemperaturen bei Nennlastbetrieb kaum zu unterschreiten. Der Einsatz von SE/DL-AKM ermöglicht hingegen Rücklauftemperaturen unter 70 °C. Ebenso können Wasser-Silicagel-ADKM unter diesen Bedingungen noch eingesetzt werden. Mit beiden Prozessen kann die Übertragungskapazität einer FW-Leitung erhöht werden. Bei beiden Prozessen ist allerdings auch mit deutlich schlechteren COP-Werten zu rechnen. Zudem sind diese Prozesse teurer als Standard H₂O/LiBr-AKM.

Durch den Einsatz von Spitzenlast-KKM, mit einem Anteil von z.B. 50 % an der gesamten Kälteerzeugleistung, kann das Investitionsvolumen für die Gesamtanlage gesenkt werden. Die Kühltürme können um rd. 25 % kleiner ausgeführt werden, die umgewälzte Kühlwassermenge kann bei geeigneter Ausle-

gung sogar halbiert werden. Trotzdem wird der überwiegende Anteil der Jahreskältearbeit über die AKM erbracht. Zusätzlich dient die Spitzenlastmaschine auch der Kältebesicherung. Mit der Aufteilung der Kälteleistung sind weiterhin auch betriebstechnische Vorteile, insbesondere bei Schwachlastbetrieb, verbunden.

Der Einsatz von Kältespeichern kann ebenfalls zur Senkung der Investitionskosten für Kältemaschine und Rückkühlung herangezogen werden. Weitere Vorteile ergeben sich im Betrieb durch geringere Laufzeiten für Hilfsaggregate und Kältemaschine. Problematisch hingegen ist der große Platzbedarf für die Speicher aufgrund der geringen Speicherdichte von Kaltwasser. Optimal sind Einsatzbedingungen bei denen bauseits ein Wasserspeicher aus Sicherheitsgründen erforderlich ist. Wassertanks für Sprinkleranlagen können beispielsweise auch als Kaltwasserspeicher genutzt werden.

In *Bild 1* ist ein Beispiel für eine Fernwärmeübergabestation mit Netzpumpe im Rücklauf dargestellt. Mit dieser hydraulischen Schaltung kann eine Volumenstromerhöhung im Spitzenlastfall durchgeführt werden. Die in *Bild 1* dargestellte Pumpe wird von den Herstellern bei Heizmediumtemperaturen größer 120 °C meistens gefordert. Sie stellt bei diesen Betriebsbedingungen eine Beimischpumpe zur Senkung der Fernwärmavorlauftemperatur dar. Durch Vergrößerung dieser Pumpe bzw. durch Änderung der Betriebsweise kann somit schon eine Erhöhung der Kälteleistung ohne zusätzliche Investitionskosten realisiert werden.

Betriebstechnische Lösungskonzepte

Durch die Variation der Betriebsbedingungen können sowohl die Betriebskosten als auch die erzielbare Rücklauf-temperatur sowie die Kälteleistung beeinflusst werden. Zur Gewährleistung einer möglichst niedrigen Fernwärmerücklauftemperatur wird bei Standard-AKM der Fernwärmemassenstrom über ein Regelventil gedrosselt. Die ursprüngliche Aufgabe dieses Regelventiles ist eine Leistungsregulierung für die AKM. Für den Auslegungsfall wird die geforderte Rücklauftemperatur erreicht. Im Teillastbetrieb können jedoch auch wesentlich niedrigere Rücklauftemperaturen erzielt werden.

In *Bild 2* wird das Ergebnis einer Simulationsrechnung dargestellt, das den Einfluß einer Fernwärmemengenregelung auf die Leistung einer AKM wie-

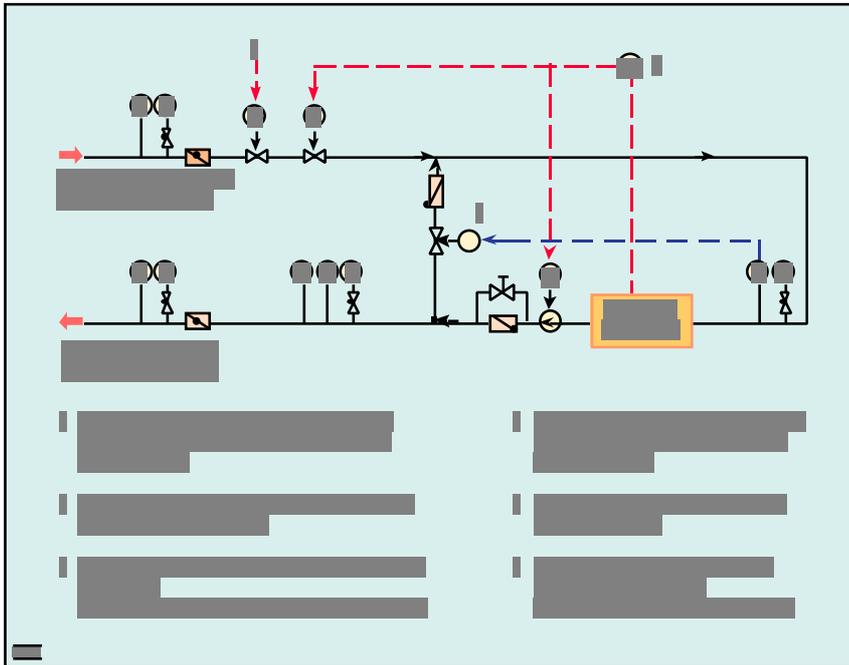


Figure 1. Connection of a absorption chiller to a DH system

Bild 1. Anbindung einer AKM an die Fernwärme

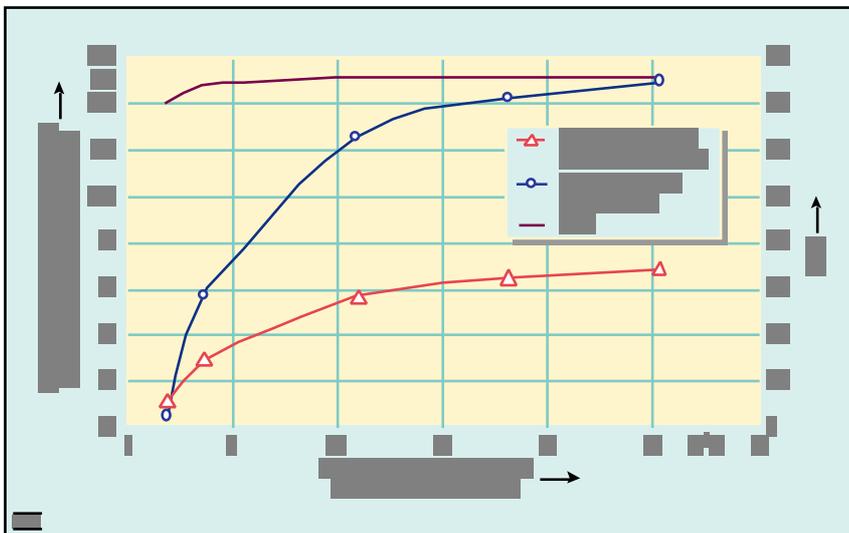


Figure 2. Control of DH water flow for a $H_2O/LiBr$ -absorption chiller

Bild 2. Fernwärmemengenregelung bei einer $H_2O/LiBr$ -AKM

dergibt. Als Fernwärmeverlauftemperatur werden $90\text{ }^\circ\text{C}$ angesetzt. Die Kälteleistung beträgt für einen Nennauslegungsfall von $90/80\text{ }^\circ\text{C}$ rd. 115 kW , bei einem Fernwärmeevolumenstrom von $13\text{ m}^3/\text{h}$. Durch Drosselung auf einen Volumenstrom von $6,5\text{ m}^3/\text{h}$ kann die Rücklauftemperatur auf $70\text{ }^\circ\text{C}$ abgesenkt werden. Die Kälteleistung sinkt hierbei um rd. 20% . Der COP bleibt hingegen nahezu

konstant. Der Einfluß der Betriebstemperaturen auf die übertragbare Kälteleistung ist in *Tafel 2* dargestellt.

Entsprechend diesem Modell können auch Rücklauftemperaturen bis rd. $55\text{ }^\circ\text{C}$ erzielt werden. Dann liegt die Kälteleistung jedoch nur noch bei rd. 60 kW (Auslegung auf $110\text{ }^\circ\text{C}$ mit einer Nennkälteleistung von 207 kW). Diese niedrigen Temperaturen sind in der Praxis in [5] durch Messungen nachgewie-

sen worden. Kühlwasser-, Kaltwasser- und Antriebstemperaturen haben ebenfalls einen wesentlichen Einfluß auf die Kälteleistung und die erzielbare Rücklauftemperatur. Der Einfluß auf den COP ist gering.

Die Regelung der Rückkühlwassertemperaturen kann in Abhängigkeit der Feuchtkugeltemperatur T_f erfolgen. Feuchtkugeltemperaturen von 21 bis $22\text{ }^\circ\text{C}$, die normalerweise für die Auslegung von Rückkühlwerken in Deutschland gewählt werden, treten nur wenige Stunden im Jahr auf. Im Hochsommer können in Innenstädten allerdings kurzfristig auch Werte bis $25\text{ }^\circ\text{C}$ erreicht werden. Für diese Randbedingungen sind die Klimasysteme nicht mehr ausgelegt, so daß ein Anstieg der Innenraumtemperaturen akzeptiert wird. Bei einer Differenz von rd. 4 K zwischen Kühlwassertemperatur und T_f kann entsprechend dem tatsächlichen Gang von T_f die Kühlwassertemperatur gesenkt werden, wodurch die Kälteleistung eines Moduls entsprechend den Tabellenangaben gesteigert werden kann. Dies ist insbesondere für Kälteerzeugungskonzepten, bei denen eine AKM als Grundlastkältemaschine konzipiert wird, von Vorteil, da der Grundlastanteil der AKM hierdurch vergrößert wird.

Eine Kaltwassertemperaturregelung zwischen 6 bis $10\text{ }^\circ\text{C}$ wird z.B. im Kaltwassernetz City Nord in Hamburg eingesetzt [7]. Für eine vollständige Entfeuchtung reichen $10\text{ }^\circ\text{C}$ nicht mehr aus. Für eine Luftkühlung ist diese Vorlauftemperatur jedoch ausreichend. Durch eine kurzzeitige Erhöhung der Fernwärmeverlauftemperatur kann die Kälteleistung einer $H_2O/LiBr$ -AKM deutlich erhöht werden. Analog zum Fernwärmenezbetrieb im Winter, wo die Vorlauftemperatur auch über die Außentemperatur geregelt wird, ist auch bei der FWKK eine gleitende Fernwärmeverlauftemperatur in Abhängigkeit der Außentemperatur denkbar.

Eine Erhöhung der Fernwärmeverlauftemperatur im Sommer verursacht höhere Wärmeverluste und eventuell eine Stromminderleistung bei der Auskopplung aus KWK-Anlagen. Andererseits sind auch Sekundäreffekte zu berücksichtigen. Von der Stadtwerke Hannover AG wurde der Einfluß einer Temperaturerhöhung von 70 auf $90\text{ }^\circ\text{C}$ in der Hochsommerzeit zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit der FWKK untersucht. Die zusätzlichen Betriebskosten durch erhöhten Brennstoffbedarf und erhöhte Wärmeverluste wurden durch die Einsparung an Pumpstrom mehr als kompensiert [8]. Zusätzlich wird der

Table 2. Influence of operating temperatures on the transportable chiller capacity

Tafel 2. Einfluß der Betriebstemperaturen auf die übertragbare Kälteleistung

Einfluß auf Kälteleistung (bezogen auf Q_n) ¹⁾	Vorteile (+)/Nachteile (-)
Erhöhung $T_{FW,VL}$ + 1,6 %/K	- Erhöhung der Wärmeverluste - Erhöhung der Stromeinbuße und der Rücklauftemperatur + teilw. Einsparung von Pumpstromaufwendungen + kleinere Auslegung der AKM
Senkung T_K + 3,7 %/K	- größere Auslegung der Kühltürme - höherer Hilfsenergiebedarf der Ventilatoren bei Spitzenlast + kleinere Auslegung der AKM + Senkung von $T_{FW,RL}$ + Erhöhung des COP
Erhöhung $T_{o,VL}$ + 2 %/K	+ kleinere Auslegung der AKM + höherer COP, Senkung von $T_{FW,RL}$ - Inkaufnahme einer Lastunterdeckung bei Spitzenbedarf

¹⁾ Auslegungspunkt: 90/80 °C, 27/32 °C, 6/12 °C

Strombedarf für die Kälteerzeugung durch die thermische Kälteerzeugung stark reduziert sowie der Stromleistungsbezug gesenkt. Diese freigestellten Kapazitäten können an anderer Stelle eventuell sinnvoller genutzt werden.

Als Fazit läßt sich feststellen, daß zur Bewertung der FWKK immer eine Einzelfallbetrachtung erforderlich ist. In Bezug auf die Kosten sind zum heutigen Zeitpunkt selbst bei optimierten Betriebsbedingungen relativ günstige Strom- und Fernwärmepreise erforderlich, um die FWKK wirtschaftlich dar-

stellen zu können. Insbesondere der Stromleistungspreis hat eine hohe Bedeutung bei den Wirtschaftlichkeitsberechnungen. Trotzdem hat die FWKK ihre Berechtigung. Die Investitionskostendifferenz zwischen der herkömmlichen Kälteerzeugung und der FWKK ist meistens kleiner als $\pm 10\%$ und liegt somit im Bereich der Planungsunsicherheiten. Insbesondere wenn Verfahren wie das DEC-Verfahren (offener Sorptionsprozeß) eingesetzt werden können, sind mit Hilfe der FWKK sogar Investitionskosteneinsparungen möglich.

Table 3. Contents of the planning folder for combined district heating/cooling systems

Tafel 3. Inhalte Planungsmappe FWKK

Teil	Titel	Inhalte
A	Allgemeine Erläuterungen	Grundsätze der Planung, Ausführung, Inbetriebnahme/Abnahme, (Übersicht über Anzeige- und Genehmigungserfordernisse, Grundlagenermittlung/Vorplanung/Detailplanung, Ausführungs- und Genehmigungsplanung, Risikoabsicherung bei Planung, Bau und Betrieb)
B	Verfahren zur Kälteerzeugung	Anlagentechnik und Auslegung von AKM, KKM, ADKM, peripheren Einrichtungen, Anlagenanbieter, Anlagenschaltungen, technische Kennziffern
C	Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungsanlagen	Varianten, Einsatzstrategien, Anlagenkonzepte und Restriktionen, ausgewählte Beispiele
D	Kälteverteilungseinrichtungen	Bilanzgrenzen und Gliederung von Kälteverteilungseinrichtungen, Kälteträgerwahl, Anlagentechnik und Investitionskosten, Umwälzpumpen, Übergabe und Anschlußstationen, Druckhaltung und Netzausgleich, Verlegung
E	Betriebstechnische und wirtschaftliche Grundlagen	Voraussetzung für die Kostenberechnung, Kostenberechnung (kapitalgebundene und verbrauchsgebundene Kosten, Betriebskosten, sonstige Kosten), Bewertung der Abwärmenutzung, Besonderheiten bei der Nutzung von KWKK-Anlagen
F	Kältespeicherung	Kältespeicher, Eisspeicher, Auslegung, Hydraulische Einbindung, Kosten und Wirtschaftlichkeit
G	Fernwärmeeinbindung	Auslegung von Anschlußstation und -leitung, direkte und indirekte Anbindung, Anschlußkosten und Netzhydraulik
H	Potentialerfassung	Ist-Situation der Energieversorgung, Energiekosten, Randbedingungen (Standortverhältnisse, Bestandsaufnahme Anlagentechnik, Kältenutzungsanforderungen), Energiequellen und Abwärmepotentiale, Eigentums- und Betreiberverhältnisse, Entwicklungen, Hinweise zu Aufstellungs- und Betriebsbedingungen, Bilanzierung der Energieströme
Anhang	Auswertung der Arbeiten zum Pilotprojekt Weißwasser	FWKK für Tieftemperaturanwendungen Technisch und administrative Anforderungen für NH ₃

3 Schnittstellenprojekt

Im Schnittstellenprojekt sollte eine Grundlage für die Durchführung von Projekten zur FWKK für alle Beteiligten (Planer, Betreiber und Lieferanten) geschaffen werden. Hierzu gehören zum einen die Bestimmung von Kennzahlen zur Berechnung des Kältebedarfes und somit zur richtigen Auslegung einer Kälteversorgung, zum anderen Leitlinien zur Entwicklung geeigneter Kälteversorgungskonzepte. Zu letzterem sollen auch die Ergebnisse aus dem im Verbundprojekt integrierten Pilotprojekt mit herangezogen werden. Die Ergebnisse wurden in Form einer Planungsmappe für den planenden Ingenieur und den Betreiber ausgearbeitet und zusammengestellt (Tafel 3). Beginnend mit der Potentialerhebung werden bis zur detaillierten Planung der Vorzugsvariante alle Projektschritte erläutert und mit den für die Bearbeitung erforderlichen Hilfsmitteln hinterlegt.

Bild 3 zeigt die Möglichkeiten zur Bereitstellung von Kälte aus Fernwärme sowie ausgewählte Einsatzbereiche für die Kälteversorgung. Ausgangspunkt sind die Varianten der Fernwärmeerzeugung. Eine effektive und somit kostengünstige Bereitstellung der Fernwärme ist notwendig, um den Gesamtprozeß der FWKK konkurrenzfähig gestalten zu können. Der dargestellte Absorptionskälteprozeß ist das derzeit am häufigsten eingesetzte Verfahren als Alternative zur herkömmlichen Kompressionskälteerzeugung. Die Kälteerzeugung kann sowohl zentral als auch dezentral erfolgen. Eine zentrale Erzeugung erfordert den Aufbau eines Kältenetzes zur Versorgung der Abnehmer. Analog zur Wärmeerzeugung kann auch bei der Kältebereitstellung eine Aufteilung in Grund- und Spitzenlast sinnvoll sein. Zur Spitzenlastabdeckung wird dabei im allgemeinen auf die elektrische Kälteerzeugung zurückgegriffen.

In Gesprächen mit Anlagenherstellern und Betreibern wurden technische und wirtschaftliche Daten zum Einsatz der fernwärmebetriebenen Absorptionskälteanlagen zusammengetragen und analysiert. Ausgeführte und geplante fernwärmebetriebene Kälteanlagen sind erfaßt und in die Untersuchungen einbezogen worden.

4 Pilotprojekt Weißwasser

Im Rahmen des Pilotprojektes Weißwasser wurde für einen Eissportkomplex eine innovative und energiesparende Möglichkeit zur Energieversor-

gung gesucht. Der Eissportkomplex wird bereits durch die Stadtwerke Weißwasser mit Fernwärme für die Raumwärmeversorgung und Brauchwasserbereitung (1,15 MW) versorgt. Hierbei sollte auch die Kälteversorgung für die Kühlung der Eisflächen im Rahmen einer FWKK enthalten sein. Bisher ist die Anlage noch nicht vollständig errichtet worden. Das Projekt ist aufgrund genehmigungstechnischer und planungstechnischer Schwierigkeiten bei der Errichtung der H₂O/NH₃-AKM noch nicht abgeschlossen.

Der wesentliche Aufgabenteil des Pilotprojektes Weißwasser ist die Analyse des in Weißwasser angedachten Fernwärme-Kälteverbundes. Vorrangige Ziele sind die Erprobung wissenschaftlich-technischer Erkenntnisse aus dem Verbundprojekt sowie Erfahrungen aus Konzeption, Planung und Realisierung zu erhalten. Die Erfahrungen aus diesem Pilotprojekt sind hierbei besonders für Projekte interessant, bei denen eine FWKK für Temperaturen unter 0 °C angedacht wird.

Der Eissportkomplex Weißwasser verfügt über 3 Trainings- und Wettkampfeisportflächen. Bei der erfolgten Teilsanierung der Kälteanlagen-technik wurden die bestehenden Kolbenverdichteraggregate beibehalten. Diese werden auch weiterhin zur Spitzenlastdeckung eingesetzt. Die thermische Kältemaschine wird hingegen zur Grundlastkälteversorgung konzipiert. Aufgrund des niedrigen Temperaturniveaus für die Kühlung der Eislaufflächen sind H₂O/NH₃-Absorber zur Realisierung der FWKK erforderlich. Mit diesen ist eine Kälteerzeugung auf einem Temperaturniveau von -6 bis -20 °C möglich. Die H₂O/NH₃-AKM soll hierbei in einen bestehenden NH₃-Kreislauf des Eislaufkomplexes über Wärmetauscher eingebunden werden.

Die Anbindung an die Fernwärmeversorgung erfolgt über eine KMR-Trasse. Die Wärme für die Kälteerzeugung wird in den beiden schon errichteten BHKW-Modulen erzeugt. Ausle-

gungsgemäß ist eine Fernwärmevorlauftemperatur von 140 °C zur Kälteerzeugung erforderlich, so daß Wärme aus dem Abgaswärmetauscher zur Kälteerzeugung genutzt wird. Hierbei wird über die Abgaswärmetauscher eine ausreichende Vorlauftemperatur gewährleistet. Die Motorabwärme auf einem Temperaturniveau von 90 °C, die gegebenenfalls bei Teillast der AKM bis auf maximal 114 °C durch Nutzung der Abgaswärme erhöht werden kann, wird hauptsächlich von Wärmeverbrauchern im Eissportkomplex genutzt. Die für den Kälteprozeß nicht benötigte bzw. nicht nutzbare Heizenergie aus den BHKW-Modulen wird über Plattenwärmeübertrager ins Fernwärmenetz der Stadtwerke Weißwasser eingespeist. Von Juni bis Anfang September ruht der Eislaufbetrieb. In dieser Zeit deckt die BHKW-Anlage den Grundlastbedarf des Fernwärmenetzes Weißwasser.

Ein Überblick über die technischen Daten und das Verfahren ist in *Tafel 4* und *Bild 4* dargestellt.

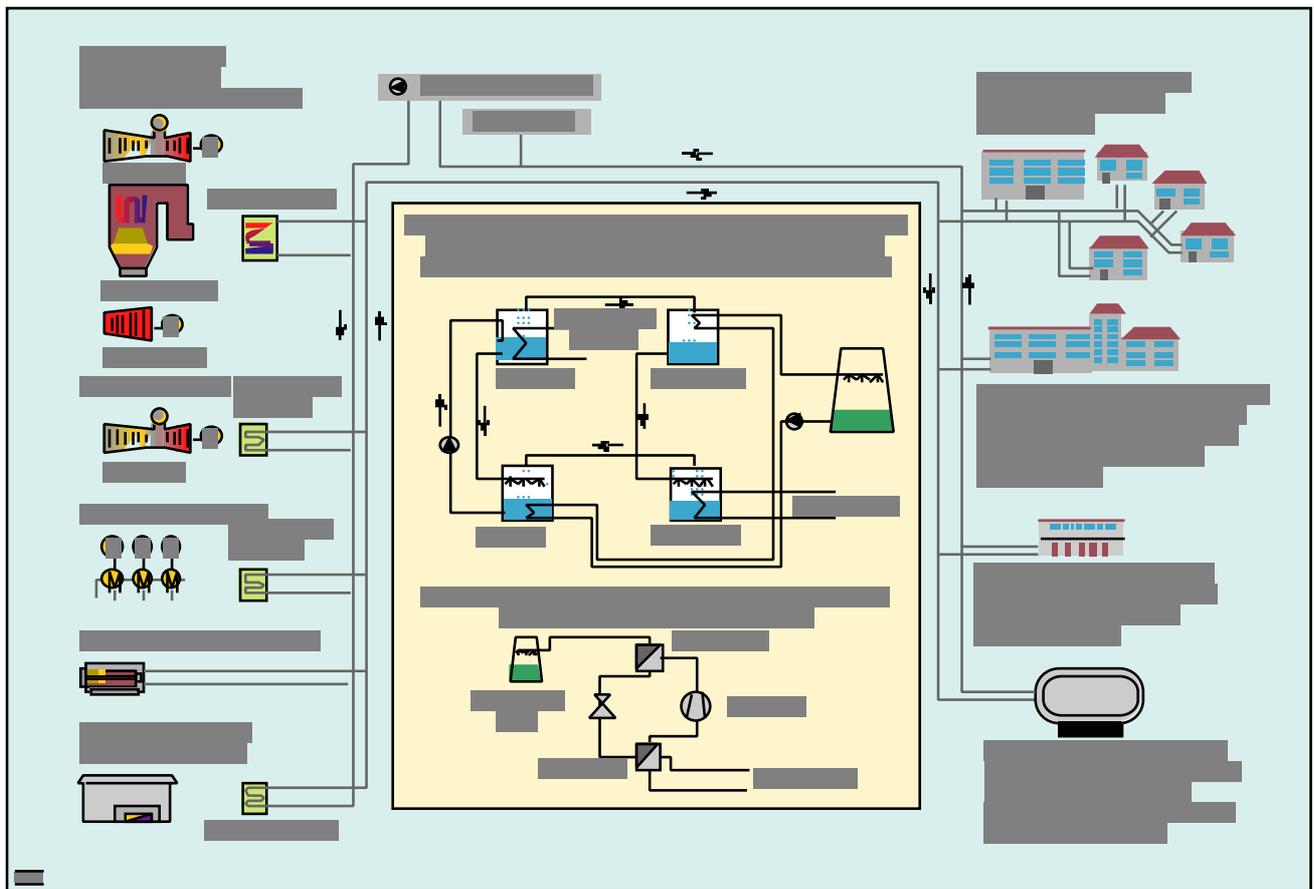


Figure 3. Possibilities to produce chilled water by district heat

Bild 3. Möglichkeiten zur Bereitstellung Kälte aus Fernwärme

Table 4. Technical data to the combined district heating and cold supply concept in Weißwasser

Tafel 4. Technische Daten zur FWKK am Standort Weißwasser

Kälteprozeß	Einstufige H ₂ O/-NH ₃ -AKM
Wärmeverhältnis	rd. 0,5
Kälteleistung	380 kW
Antriebswärmebedarf	rd. 760 kW Antriebsleistungsbedarf
Fernwärmemetemperaturen (Auslegung; Vorlauf, Rücklauf)	140 °C/120 °C
Anbindung NH ₃ -Kreislauf/Fernwärme	Zwischenträgerkreislauf (NH ₃) + Platten-WT direkte Einbindung in Kühlkreislauf der BHKW
BHKW	
Anzahl	2
Antriebsenergie thermische Leistung	Erdgas 1 507 kW
elektrische Leistung	1 290 kW

5 Zusammenfassung

Während der dreijährigen Laufzeit des Verbundprojektes wurde eine umfassende Betrachtung der Umsetzungsmöglichkeiten der FWKK mit Standardtechnologien durchgeführt. Im Kernprojekt wurden Entwicklung- und Optimierungsmöglichkeiten beim Betrieb von FWKK-Anlagen, ein-

möglichst umfassende Umsetzung des Konzeptes der FWKK in die Praxis zu ermöglichen und eventuelle Bedenken gegenüber dieser Technik zu entkräften.

Während des noch nicht abgeschlossenen Pilotprojekts soll am Beispiel der FWKK in einem Eissportkomplex auch die Umsetzungsmöglichkeit im Bereich der Kühlung unter 0 °C aufgezeigt

stufige H₂O/LiBr-AKM, alternative thermische Kälteverfahren, Möglichkeiten der Kältespeicherung und wirtschaftliche, ökologische und technische Aspekte untersucht.

Im Rahmen des Schnittstellenprojektes wurden umfangreiche Planungsunterlagen für Planer, potentielle Betreiber und Kunden zusammengestellt. Ziel war es dabei, eine

werden. Diese Anwendung steht auch als Beispiel für den Bereich der Lebensmittelkühlung. Die Kühlung unter 0 °C stellt eine Ergänzung zur reinen Klimakälteversorgung für die FWKK dar.

Sicherlich wird im Zuge von liberalisierten Energiemärkten der Preisdruck bei den einzelnen Energiesparten immer größer. Auch die FWKK ist hiervon betroffen und muß sich insbesondere gegenüber den oftmals aufgrund geringerer Investitionskosten und Wasserkosten bevorzugten luftgekühlten KKM behaupten. Rein ökologische Argumente für die FWKK oder die Möglichkeit, Primärenergie einzusparen, überzeugen in dieser Situation nur selten. Um so mehr ist eine optimierte Auslegung mit passendem Gesamtversorgungskonzept eine Grundvoraussetzung für die weitere Nutzung der FWKK in der Zukunft.

6 Danksagung

Das diesem Aufsatz zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministerium für Bildung und Forschung unter den Förderkennzei-

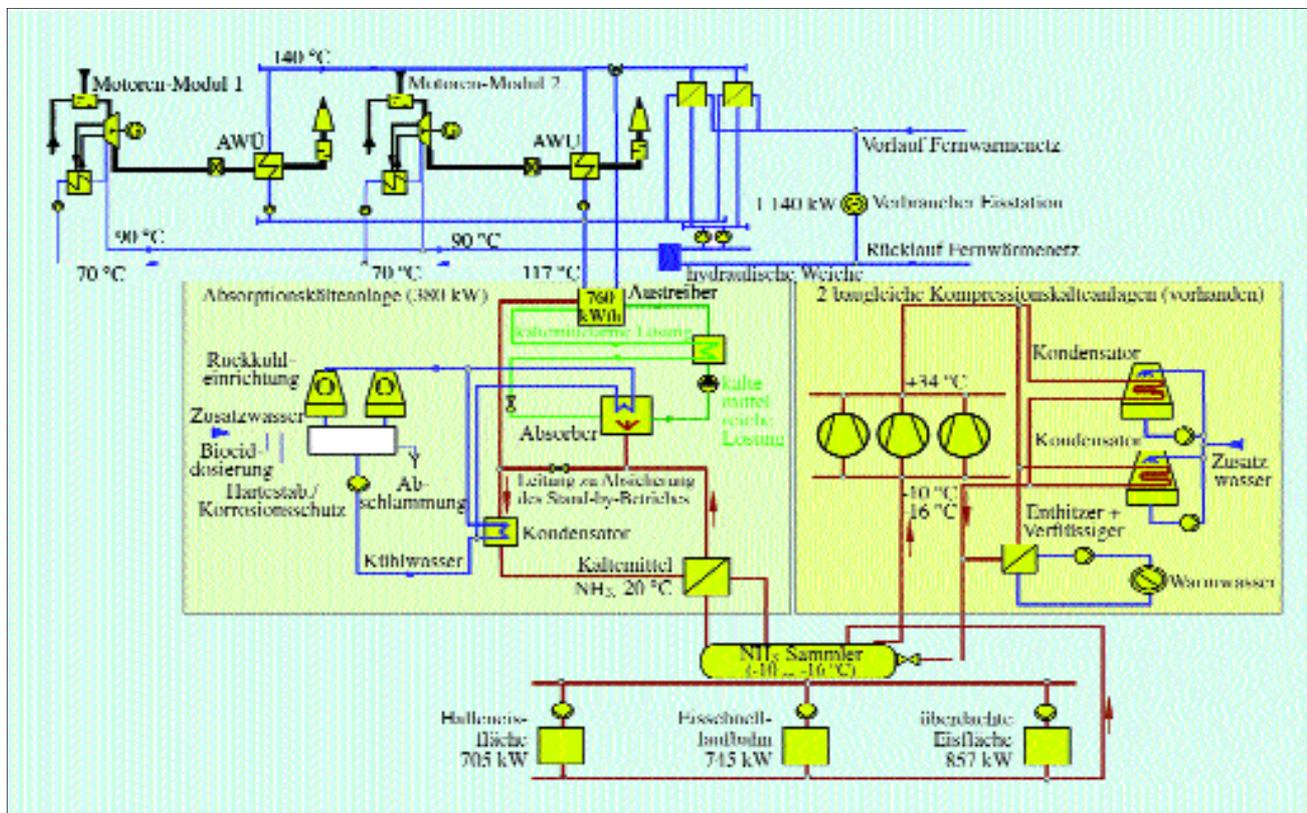


Figure 4. Process flow scheme of the combined district heating and cooling supply (demonstration project Weißwasser)

Bild 4. Verfahrensschema der KWKK (Pilotprojekt Weißwasser)

Table 5. List of abbreviations

Tafel 5. Abkürzungsverzeichnis

ADKM	Adsorptionskältemaschine
AKM	Absorptionskältemaschine
o,K	Verdampfung, Kondensation
COP	Coefficient of Performance
DEC	Desiccative and Evaporative Cooling
FWKK	Fernwärme-Kälte-Kopplung
KWKK	Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung
KKM	Kompressionskältemaschine
FW	Fernwärme
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
h	Heizung (Antriebswärme)
VL	Vorlauf
RL	Rücklauf

chen 0326988A, B, C »Verbundprojekt Fernwärme-Kälte-Kopplung« gefördert. Die Verfasser möchten sich an dieser Stelle ausdrücklich beim BMBF und dem Projektträger BEO für die finanzielle Unterstützung bedanken.

7 Schrifttum

- [1] Schönberg, I.; Noeres, P.; Althaus, W.: Kälte aus Fernwärme - Optimierung- und Entwicklungspotentiale. AGFW-Messe Leipzig, Mai 1996.
- [2] Schönberg, I.; Noeres, P.; Althaus, W.: Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung - Technologien, Kosten und Perspektiven. VDI-Tagung »Fortschrittliche Energiewandlung«. VDI-Berichte Nr. 1321, Bochum 11. bis 12. März 1997.
- [3] Noeres, P.; Hölder, D.; Althaus, W.: Entwicklung von Betriebsstrategien zur Optimierung der Fernwärme-Kälte-Kopplung. Abschlußbericht BMBF-Forschungsprojekt, FKZ 0326988A, 1999.
- [4] AGFW, Frankfurt (Main): AGFW-Statistik Kälte aus Fernwärme. Stand 1. Dezember 1998, schriftliche Mitteilung 1999.
- [5] de Wit, J.R.: Begeleidingsonderzoek toepassing absorptiekoelmachine bij GEB Rotterdam, fase 1. Instituut voor Milieu- en Energietechnologie TNO, 1993.
- [6] Keith, E.H.; Radermacher, R.; Klein, S.A.: Absorption Chillers and Heat Pumps. CRC Press Inc., 1996.
- [7] Dommann, D.; Weidling, H.: Fernkälteversorgung der Geschäftsstadt Nord in Hamburg. Fernwärme international, 1991, H. 11, S. 587.
- [8] Kollenda, C.; Kranz, M.; Rieß, J.: Kälte aus Fernwärme - Auswirkungen der Vorlauftemperatur auf das Gesamtsystem Erzeugung und Verteilung. Vortrag auf der AGFW-Messe in Leipzig Juni 1996.

(7184)