

Steigerung der Energieeffizienz bayerischer MVA durch Fernkältenutzung: Machbarkeitsstudie über alle bayerischen MVA

Bernhard Hartleitner
Andreas Utz
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Rommel

Auftraggeber

Bayerisches Landesamt für
Umwelt



Impressum

Alle Rechte (insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung) sind vorbehalten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Kein Teil der bifa-Texte darf in irgendeiner Form ohne Genehmigung der Herausgeber reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Herausgeber
bifa Umweltinstitut GmbH
Am Mittleren Moos 46
86167 Augsburg

Verfasser
Bernhard Hartleitner
Andreas Utz
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Rommel

Auftraggeber
Bayerisches Landesamt für Umwelt

Gestaltung
Sonja Grazia D'Introno

Druck
EDUCON GmbH

1. Auflage 2009
© bifa Umweltinstitut

Steigerung der Energieeffizienz bayerischer MVA durch Fernkältenutzung: Machbarkeitsstudie über alle bayerischen MVA

Bernhard Hartleitner

Andreas Utz

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Rommel

Auftraggeber

Bayerisches Landesamt für
Umwelt



INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	III
TABELLENVERZEICHNIS	IV
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	IV
1 ZIEL UND HINTERGRUND DER UNTERSUCHUNG	1
2 ENERGIEERZEUGUNG IN MVA	2
2.1 Alleinige Stromerzeugung.....	2
2.2 Kraft-Wärme-Kopplung	3
2.3 Möglichkeiten der Effizienzsteigerung von KWK durch Kälteerzeugung.....	5
3 KÄLTE-, KÜHL- UND KLIMATISIERUNGSBEDARF.....	7
3.1 Nahrungsmittel.....	7
3.2 Klimakälte	8
4 VORAUSSETZUNGEN UND MÖGLICHKEITEN DER KÄLTETECHNIK	10
4.1 Kälteerzeugung.....	10
4.1.1 Kompressionskältemaschinen.....	11
4.1.2 Dampfstrahlkältemaschinen	11
4.1.3 Absorptionskältemaschinen	12
4.1.4 Adsorptionskältemaschinen	15
4.1.5 Einsatz von Zeolithen bei Adsorberanlagen	16
4.1.6 DEC-Anlagen	17
4.2 Wirkungsgrade und wirtschaftliche Rahmenparameter der Kälteerzeugung.....	18
4.3 Kältespeicher.....	23
4.3.1 Eisspeicher	23
4.3.2 Adsorptionsspeicher.....	24
4.4 Mobiler Kältetransport	24
5 THERMISCH BETRIEBENE KÄLTEERZEUGUNG IN DER PRAXIS	25
5.1 Kältenetze	25
5.1.1 Voraussetzungen.....	25
5.1.2 Beispiele	26

5.2	Kälte aus Fernwärme.....	28
5.2.1	Umsetzung.....	28
5.2.2	Hindernisse.....	29
5.3	Nutzung bestehender Leitungssysteme.....	30
5.4	Ökologische Parameter.....	31
6	BEISPIELHAFTE ANALYSE EINER FIKTIVEN MVA.....	33
6.1	Definition einer fiktiven MVA und ihrer Umgebung.....	33
6.2	Analyse der ökonomischen Faktoren und Wirtschaftlichkeitsberechnung.....	36
6.3	Mögliche Maßnahmen zur Effizienzsteigerung.....	42
6.4	Beispiel für die Realisierung eines Nahkältenetzes an der MVA Wärmestadt.....	43
7	FAZIT.....	47
8	LITERATURVERZEICHNIS.....	51
9	ANHANG.....	53
9.1	Entwicklung der Strompreise 1/2002–5/2009.....	54
9.2	Anbieter von Absorptions- und Adsorptionskälteanlagen.....	56
9.3	Anlagenbeispiel für eine SE/SL-DL-H ₂ O/LiBr-Absorptionsanlage (AbKM).....	60
9.4	Datenblatt eines Delta-T-max-Absorbers (mehrstufiger LithiumBromid-Absorber) mit Antriebstemperatur 95/55 °C des Anbieters GasKlima GmbH.....	61

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Primärenergiebedarf Kälteerzeugung BRD (DKV 2002).....	7
Abbildung 3-2: Beispiel für gekühlte Gebäudeflächen anhand der Situation der Stadt Münster/Kreis Steinfurth (Probst 2008).....	9
Abbildung 4-1: Vereinfachtes Schema einer Dampfstrahlkältemaschine	11
Abbildung 4-2: Schema einer LiBr-AbKM (BHKW Infozentrum).....	12
Abbildung 4-3: LiBr-AbKM bei der Fa. Sachs in Schweinfurt, die mit Wärme des Gemeinschaftskraftwerks betrieben wird.....	15
Abbildung 4-4: Schema einer Adsorptionskälteanlage	16
Abbildung 4-5: Funktionsschema einer DEC Anlage (Kroitel 2007).....	18
Abbildung 4-6: Vergleich von mechanisch und thermisch angetriebenen Kältemaschinen	19
Abbildung 4-7: COP in Abhängigkeit von der Antriebs- und der Rückkühltemperatur (YAZAKI ENERGY)	19
Abbildung 4-8: Kälteleistung in Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen (gasklima/YAZAKI 2007)	20
Abbildung 4-9: COP in Abhängigkeit vom Lastzustand (gasklima/YAZAKI 2007).....	20
Abbildung 4-10: Spezifische Anlagen-Investitionskosten [Euro/kW] (Meißner 2007)	22
Abbildung 4-11: Beispiel Lastprofil einer KM und Eisspeicher (Hilliweg, Sponsel 2003).....	23
Abbildung 6-1: Vereinfachtes Dampfschema MVA Wärmestadt.....	34
Abbildung 6-2: Lageplan Wärmestadt.....	35
Abbildung 6-3: Kältegestehungskosten in Abhängigkeit von Abschreibungszeitraum und Zinssatz.....	39
Abbildung 6-4: Kältegestehungskosten in Abhängigkeit von den Betriebsstunden	40
Abbildung 6-5: Einfluss der Wärmekosten auf den Vergleich AbKM und KoKM bei 500 Betriebsstunden.....	40
Abbildung 6-6: Einfluss des Strompreises auf den Vergleich AbKM und KoKM.....	41
Abbildung 6-7: Abhängigkeit der Kältekosten vom COP bei der AKM in €/MWh	41
Abbildung 6-8: Abhängigkeit der Kältekosten vom COP bei der KoKM in €/MWh.....	42
Abbildung A-9-1: Entscheidungsdiagramm für die Systemauswahl (BINE 2004).....	53

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Verdampfertemperaturen für bestimmte Anwendungen	7
Tabelle 3-2: Übersicht typischer Kälteverbraucher	8
Tabelle 4-1: Leistungsdaten einer SE/DL-Absorptionskältemaschine	14
Tabelle 4-2: Übersicht über die verfügbaren Technologien bei Sorptionskältemaschinen	21
Tabelle 4-3: Spezifische Investitionskosten von Kältemaschinen	21
Tabelle 4-4: Spezifische Kosten für Kältemaschinen mit Rückkühlwerk, ohne Verrohrung	22
Tabelle 5-1: Beispielhafte Gegenüberstellung des Bedarfs an elektrischer Energie von KoKM und AbKM	32
Tabelle 6-1: Spezifische Kosten für Kälte am Beispiel MVA Wärmestadt.....	37
Tabelle 6-2: Kennzahlen für die Kälteerzeugung und Energiekosten für das Nahkältenetz Wärmestadt.....	44
Tabelle 6-3: Spezifische Kältegestehungskosten für das Beispiel MVA Wärmestadt	45
Tabelle 7-1: Voraussetzungen an den bayerischen MVA-Standorten für Kälte aus Wärme und geschätztes kurzfristiges Potenzial	49

Abkürzungsverzeichnis

AKM	Sorptionskältemaschine
AbKM	Absorptionskältemaschine
AdKM	Adsorptionskältemaschine
COP	Coefficient of Performance
FW	Fernwärme
KoKM	Kompressionskältemaschine
BHKW	Blockheizkraftwerk
KM	Kältemaschine
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKK	Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung
LiBr	Lithiumbromid
MHKW	Müllheizkraftwerk
MKW	Müllkraftwerk
MVA	Müllverbrennungsanlage

1 Ziel und Hintergrund der Untersuchung

Bereits heute werden angesichts der stetig steigenden Energiepreise die Auswirkungen eines nachlassenden Angebots an fossilen Ressourcen erkennbar. Gleichzeitig trägt der weltweit noch immer steigende Einsatz fossiler Ressourcen zu einer Erhöhung des CO₂-Ausstoßes und damit zur Verschärfung der Klimaproblematik bei. Angesichts dessen gilt es neben einem sparsameren Umgang mit Energie sämtliche Möglichkeiten einer Steigerung der Effizienz über alle Bereiche der Energieerzeugung und des Energieverbrauchs auszuloten.

In Bayern erbringt die Abfallwirtschaft durch die Nutzung des Heizwertes der Abfälle in MVA einen nicht zu vernachlässigenden Beitrag zur Energieversorgung. Dabei liegt der Anteil der dort in MVA erzeugten Energie deutlich über dem Bundesdurchschnitt.

Bei der Müllverbrennung steht die Beseitigung und Inertisierung des Mülls im Vordergrund. Zugleich ist man heute auch bestrebt, in sogenannten Waste-to-Energy-Anlagen den Heizwert des Mülls möglichst effektiv als Dampf, Strom und Wärme in Nutzenergie umzuwandeln.

Mit der von MVA in Strom- und Fernwärmenetze eingespeisten Energie werden fossile Energieträger substituiert und somit CO₂-Emissionen vermieden. Während die in der Vergangenheit verstärkt ausgebauten Fernwärmenetze bei Abfallverbrennungsanlagen zu einer verbesserten Energieausnutzung in der kalten Jahreszeit geführt haben, kann in der warmen Jahreszeit das Angebot an Wärme oftmals nur unzureichend genutzt werden. In den Sommermonaten nimmt der Absatz an Fernwärme deutlich ab, womit oftmals der energetische Wirkungsgrad der MVA sinkt.

Die Kälteerzeugung aus Wärme bietet einen guten Ansatz zur ökologisch sinnvollen Nutzung der Wärme, wenn auf effiziente Weise mit Strom erzeugte Kälte substituiert werden kann. Zugleich kann über die Bereitstellung von Sorptionskälte aus Wärme den zunehmenden Problemen von Lastspitzen im Stromnetz durch den deutlich steigenden Einsatz von Klimageräten entgegengewirkt werden.

Eine Übersicht über die Möglichkeiten bayerischer MVA zur Kälteproduktion soll die Voraussetzung zur Einleitung effektiver Maßnahmen schaffen, die zu einer Steigerung der energetischen Effizienz von MVA beitragen. Dies beinhaltet auch die Darstellung des Sachstandes über die verfügbaren Technologien zur zentralen und dezentralen Kälteerzeugung sowie des Transports von Kälte.

2 Energieerzeugung in MVA

Zentrales Element der Energieproduktion aus Müll bildet die Dampferzeugung im Müllheizkessel. Der Dampf wird in Turbinen verstromt und/oder als Prozessdampf bereitgestellt und zur Erzeugung von Heißwasser für Fernwärme genutzt.

Die Frischdampfparameter in Müllheizkesseln liegen unter denen konventionell gefeuerter Dampfkessel bei heute üblichen rund 400–420 °C und 40–70 bar. Höhere Parameter, die eine effizientere Verstromung ermöglichen, würden zu erhöhten Korrosionsraten an Kesselbauteilen, in erster Linie an den Überhitzerelementen, führen. Zwar werden bei einzelnen Anlagen neuester Generation wie in Amsterdam höhere Parameter berichtet, jedoch ist der Gewinn im Verstromungswirkungsgrad mit erheblichem technischem Mehraufwand an Material und Wartung verbunden.

Bei der Nutzung der Energie gibt es verschiedene Anlagenfahrweisen (z. B. strom- oder wärmegeführt), die von der Priorisierung der Nutzenergieform und von der installierten Technik abhängig sind.

2.1 Alleinige Stromerzeugung

Legt man auf eine effektive Stromerzeugung Wert bzw. wird nur Strom erzeugt, dann kommen üblicherweise Kondensationsturbinen zum Einsatz, da sich damit niedrige Kondensationstemperaturen und somit höhere Verstromungswirkungsgrade erzielen lassen. Die Spanne zwischen höchster und niedrigster Prozesstemperatur ist für eine effektive Verstromung von höchster Bedeutung und bestimmt den Carnot-Wirkungsgrad des Prozesses.

$$\eta_c = 1 - \frac{T_U}{T_O}$$

T_U : untere Prozesstemperatur [K]

T_O : obere Prozesstemperatur [K]

Die niedrigste Temperatur T_U wird dabei maßgeblich von den Umgebungsbedingungen wie der Temperatur der Luft (bei Luftkühlung) oder, falls vorhanden, der Verfügbarkeit und Temperatur sowie der zulässigen Aufheizung des Kühlwassers begrenzt. Die obere Prozesstemperatur T_O wird durch die Korrosionsproblematik im Kessel begrenzt.

Der überhitzte Dampf wird in der Turbine bis zur zulässigen Endnässe auf Kondensationsdruck entspannt. Der Abdampf der Turbine muss im Kondensator verflüssigt und die freigesetzte Kondensationswärme abgeführt werden. Je nach Art der Kühlung liegt das Temperaturniveau im Kondensator bei 50–60 °C (trockene Luftkühlung) oder darunter (Nasskühlturm, Wasserkühlung). Eine Nutzung dieses Temperaturniveaus ist bislang nur in Niedertemperaturnetzen im Nahwärmebereich zum Kraftwerk oder im direkten Umfeld der MVA, beispielsweise zur Gewächshausbeheizung, möglich.

Die Nutzung der Kondensationswärme über ein Fernwärmenetz, der Wärmetransport mittels mobiler Speicher wie auch die Nutzung in Sorptionskälteanlagen sind aufgrund der niedrigen Temperatur aus technischer und wirtschaftlicher Sicht mittelfristig nicht realisierbar.

2.2 Kraft-Wärme-Kopplung

Durch die gleichzeitige Produktion von Strom und Nutzwärme kann der Energiegehalt des Brennstoffs bei fossil befeuerten KWK-Anlagen unter sehr günstigen Voraussetzungen bis zu maximal 90 % ausgenutzt werden. Auch bei MVA können durch KWK hohe Wirkungsgrade mit einem entsprechend hohen Beitrag zur CO₂-Einsparung erzielt werden.

Bei gleichzeitiger Bereitstellung von Strom und Nutzwärme wird der erzeugte Dampf bis zu einem gewissen Grad entspannt, dabei Strom erzeugt und der Dampf auf der verbleibenden Druck- und Temperaturstufe einer weiteren Nutzung zugeführt. Für die Auskopplung des Dampfes zur Wärmeabgabe existieren vielfältige technische Ausführungsformen. Die technische Konzeption richtet sich dabei daran aus,

- wie die wirtschaftliche Bedeutung der Strom- bzw. der Wärmeerzeugung gewertet und gegeneinander gewichtet wird,
- wie die technischen Anforderungen vonseiten der Wärmeabnehmer (bzw. Dampfabnehmer) definiert sind (hier vor allem Druck u. Temperatur),
- welche Lastverläufe bei der Abnahme bestehen (z. B. kurzfristige Bedarfsschwankungen, deutliche saisonale Schwankungen, langfristige Lieferverträge etc.)
- etc.

Grundsätzlich lassen sich die beiden Grundvarianten der Verstromung über Entnahme-Kondensations-turbinen und über Gegendruckturbinen unterscheiden. Bei der Entnahme-Kondensationsturbine kann Dampf aus der Turbine entnommen und somit Dampf oder Nutzwärme bereitgestellt werden. Bei der Gegendruckturbine erfolgt die Entspannung nur bis zum gewünschten Temperaturniveau, auf dem Wärme bereitgestellt werden soll. Im Gegensatz zum Kondensationsbetrieb liegt hier hinter der Turbine noch Überdruck bzw. Dampf an, der an entsprechende Abnehmer geliefert wird. Bei einer relativ konstanten Abnahme großer Mengen von Dampf wird bevorzugt mit Gegendruckturbinen gearbeitet. In beiden Fällen der Dampfabnahme handelt es sich um Nutzung von Wärme und nicht von Abwärme, da die Auskopplung von Wärme mit mehr oder weniger großen Verlusten bei der Stromproduktion einhergeht.

Bei der Kraft-Wärme-Kopplung kann die Energieerzeugung neben einem Volllastbetrieb auch stromgeführt (z. B. Mittellast und Spitzenlast des Stromtarifs) oder wärmegeführt erfolgen. Bei einer wärmegeführten Betriebsweise wird die Last des Kraftwerks dem Wärmebedarf angepasst. Dabei können hohe Wärmenutzungsgrade erzielt werden, allerdings wird der Strom nicht in den wirtschaftlich optimalen Verhältnissen erzeugt. Das Verhältnis zwischen elektrischer und Heizleistung liegt in einem Bereich von 0,4 bis 1,7. Dieser Zusammenhang wird auch über die Stromkennzahl σ definiert.

$$\sigma = \frac{P_{el}}{Q_{nutz}}$$

Die Güte von Dampfkraftanlagen mit Wärmeauskopplung drückt die Stromverlustziffer ϑ aus. Sie ist das Maß für den Verlust elektrischer Leistung zugunsten von Nutzwärme. Als Vergleich wird die elektrische Leistung im reinen Kondensationsbetrieb herangezogen.

$$\vartheta = \frac{(P_{Turb.kond.} - P_{Turb.anzapf.})}{Q_{anzapf.}}$$

Die Verlustziffern liegen je nach installierter Technik und Anlagenfahrweise bei Werten von 0,1 bis 0,21.

Das heißt, dass bei einer Stromverlustziffer von 0,21 und einer Auskopplung von 1 MW Wärme die elektrische Leistung um 210 kW reduziert wird.

Fernwärme

Müllverbrennungsanlagen werden im Dauerbetrieb gefahren und weisen eine sehr komplexe Lastregelung auf. Deshalb ist der Grundlastbetrieb kennzeichnend für Müllverbrennungsanlagen. Zumeist ist es üblich, die bei der Verbrennung anfallende Wärme über eine Teilverstromung zur Grundlastdeckung ins Fernwärmenetz einzuspeisen. So sind MVA oft ein fester Bestandteil eines Fernwärmenetzes und zumeist auch einer der Hauptwärmelieferanten.

Zu Beginn der Fernwärmeerschließung wurden hauptsächlich Dampfnetze installiert. Erst später wurde vermehrt auf Heißwasser mit 70–130 °C Vorlauftemperatur umgestellt. Heute wird daran gearbeitet, Dampfnetze rückzubauen und durch energieeffizientere Heißwasserleitungen zu ersetzen. Eine Ausnahme ist die direkte Abgabe von Dampf an Industrie- oder Gewerbebetriebe mit sehr hohem Bedarf im näheren Umfeld der MVA oder des Kraftwerks. Der Rückbau von Dampfnetzen erhöht die Energieeffizienz durch die Reduzierung von Verlusten in deutlichem Maße. Beim Betrieb von Heißwasserleitungen ist man bestrebt, die Vorlauftemperatur auf das notwendige Minimum zu reduzieren, d. h. in den Sommermonaten wird in vielen Netzen die Temperatur deutlich abgesenkt. So werden Heißwasser-netze z. B. im Winter mit etwa 130 °C und im Sommer mit 90 °C bis zu Temperaturen von lediglich 70 °C betrieben.

In der Münchner Innenstadt wird beispielsweise derzeit noch ein Dampfnetz mit 180 °C betrieben, die Umstellung auf ein konventionelles Heißwassernetz ist im Gange und wird laut Stadtwerke München bis 2016 abgeschlossen sein. Gleichzeitig entfallen aber auch Abnehmer, die in ihren Prozessen auf die Verwendung von Dampf angewiesen sind.

Vor allem in Dampfnetzen ist die Nutzung von Wärme für die Kälteerzeugung seit Langem etabliert. Die hohen Temperaturen und das bestehende Know-how bei der Nutzung von Dampf in industriellen und gewerblichen Prozessen ebneten der Anwendung von Absorptionskälte bereits früh den Weg.

In den 1960er und -70er Jahren wurden die Fernwärmenetze in Städten stark ausgebaut. Jedoch wurden vielerorts Neubaugebiete als Insellösungen versorgt. Heute wird verstärkt daran gearbeitet, derartige Insellösungen zu einem Verbundnetz zusammenzuführen und damit den Gesamtbetrieb

effizienter zu gestalten, indem die Wärmebereitstellung besser koordiniert werden kann und Ausfall- und Reservekapazitäten günstiger ausgelegt werden können.

Der Preis für Fernwärme setzt sich üblicherweise aus den drei Komponenten Arbeits-, Grund- und Messpreis zusammen. Der Arbeitspreis ist der Preis für die tatsächlich abgenommene Wärmemenge in Cent je kWh bzw. Euro je MWh und liegt zwischen 15 und 60 €/MWh. Der Grundpreis richtet sich nach der bestellten Anschlussleistung in Euro je kW und Jahr und beträgt 7 bis 65 €/kW Anschlussleistung und Jahr. Der Messpreis ist ein fixer Betrag, der jährlich oder monatlich für den Zähler und die Abrechnung der Wärme zu entrichten ist. Bei einem durchschnittlichen Mehrfamilienhaus entfallen etwa 70 % der Kosten auf den Arbeitspreis, 28 % auf den Grundpreis und 2 % auf den Messpreis.

2.3 Möglichkeiten der Effizienzsteigerung von KWK durch Kälteerzeugung

Im Gegensatz zu thermischen Wärmekraftwerken, die nur auf Stromproduktion ausgelegt sind, wird bei KWK-Anlagen durch die gleichzeitige Abgabe von Strom und Wärme ein deutlich höherer Nutzungsgrad für die eingesetzte Energie erreicht. Optimal ausgelegte Kraftwerke können heute einen Gesamtwirkungsgrad von bis zu 90 % erreichen. Müllverbrennungsanlagen erreichen aufgrund der an den Brennstoff Abfall angepassten Betriebsparameter (Dampfdruck und -temperaturen), der aufwendigen Technik für die Abgasreinigung, der eingeschränkten Leistungsregelung etc. niedrigere Gesamtnettowirkungsgrade.

Trotzdem können heutige MVA relativ hohe Wirkungsgrade aufweisen; so wird z. B. für die MVA Amsterdam bereits ein elektrischer Nettowirkungsgrad von 30 % angegeben (Wandschneider 2007), gegenüber typischen Werten von 18 bis 22 % (Wandschneider 2007) die in modernen Anlagen erzielt werden. Der durchschnittliche elektrische Bruttowirkungsgrad liegt in Deutschland derzeit bei 13 % (UBA 2006). Ganz entscheidend für den Gesamtwirkungsgrad ist jedoch die gleichzeitige Nutzung von Wärme durch Kraft-Wärme-Kopplung. Durch KWK kann an anderer Stelle erheblich Brennstoff eingespart werden, wenn Abnehmer der Wärme zur Verfügung stehen, die z. B. über ein Fernwärmenetz versorgt werden.

Hier nun wirkt sich die brennstoffbedingte grundlastbezogene Fahrweise von MVA in der Regel ungünstig auf die erzielbaren Wirkungsgrade aus, da bei Abgabe von Fernwärme im Sommer der Absatz an Wärme sehr deutlich zurückgeht. Da die Abfallverbrennung die Entsorgungssicherheit für Abfälle gewährleisten muss, kann eine MVA jedoch kaum ihren Betrieb (in fossilen Kraftwerken würde man von Feuerungsleistung sprechen) an den Fernwärmeabsatz anpassen. Die erzeugte Wärme (Dampf) wird in MVA mit KWK-Betrieb zwar weiterhin verstromt, allerdings unter den aufgrund der dargestellten Rahmenbedingungen deutlich niederen elektrischen Nettowirkungsgraden. Die Effizienz der Verstromung nimmt dabei bei KWK-betriebenen Anlagen umso mehr ab, wie diese auf die Auskopplung von Fernwärme hin optimiert wurden. Bei niedriger Netzauslastung im Sommer fallen große Mengen Wärme an, die an die Umgebung abgegeben werden müssen.

Für eine Effizienzsteigerung von MVA mit KWK-Betrieb gilt es deshalb, eine möglichst hohe Auslastung der Wärmeabgabe zu erzielen, was insbesondere bei Fernwärmenetzen mit starken saisonalen Bedarfsschwankungen eine Herausforderung darstellt. Die Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) kann hier zu einer besseren Netzauslastung und damit zum Gesamtwirkungsgrad beitragen, indem für die Bereitstellung von Kälte zusätzliche Wärme als Nutzenergie eingesetzt wird. Dabei gibt es zwei grundlegende Varianten: Einmal kann die Wärme an der MVA direkt für die Erzeugung von Kälte genutzt und die

Kälte zu den Verbrauchern transportiert werden, was jedoch ein eigenes Leitungsnetz erfordert und eine hohe Anschlussdichte von Kälteabnehmern voraussetzt. Dies ist nur sehr selten und dann vornehmlich in Großstädten der Fall, wobei gleichzeitig sehr genau auf die Wirtschaftlichkeit eines solchen Netzes zu achten ist.

Die zweite, häufiger anzutreffende Variante nutzt das vorhandene Fernwärmenetz, um die für den Betrieb der Kältemaschine erforderliche Wärme zum Kälteabnehmer zu transportieren. Dadurch, dass auf eine bestehende und im Betrieb befindliche Infrastruktur zurückgegriffen wird, ist die Realisierung der Kälteerzeugung direkt beim Abnehmer weniger von äußeren Faktoren abhängig.

Die bereits Mitte des 19. Jahrhunderts realisierte Sorptionstechnik macht es möglich, aus Wärme Kälte zu erzeugen. Absorptionskältemaschinen (AbKM) sind seit Langem im industriellen Einsatz bekannt, vor allem die mit Gas befeuerten AbKM haben eine breite Anwendung gefunden. In den USA und Japan erreichen mit Gas befeuerte Absorptionskältemaschinen große Marktanteile. Sie nutzen im Sommer freie Kapazitäten des Gasnetzes und reduzieren so die Spitzenlasten des Stromnetzes. Mit dem hohen Temperaturniveau der Gasfeuerung sind Kälteleistungen bis zum 1,2-Fachen der eingesetzten Wärmeleistung erreichbar. (BINE 2004)

Bei den herkömmlichen Anwendungen von AbKM bewegen sich die Temperaturen des Antriebsmediums in einem Bereich, der zumeist über den Temperaturen von Heißwassernetzen im Sommer oder anderen günstigen Wärmequellen liegt. Deshalb wuchs in den letzten Jahren das Interesse an wärmegetriebenen Kühl- und Entfeuchtungsverfahren, die Wärme auf einem niedrigen Temperaturniveau wie z. B. Fernwärme, Abwärme, etc. für die Klimatisierung nutzen. Die technologischen Entwicklungen bei Sorptionskältemaschinen (AKM) haben nun in den letzten Jahren neue Techniken hervorgebracht, die einen Betrieb auch bei niedrigeren Antriebstemperaturen ermöglichen.

Im Rahmen von Pilotvorhaben und Demonstrationsprojekten wurden etliche Anlagen realisiert. Zum Einsatz kamen sowohl geschlossene Systeme wie Ad- und Absorptionskältemaschinen als auch offene Kühl- und Entfeuchtungsverfahren wie die sorptionsgestützte Klimatisierung. (BINE 2004)

Die aktuellen Bemühungen zur Steigerung des Fernwärmeabsatzes für AKM zur Klimatisierung oder Erzeugung von Fernkälte können auch als Reaktion auf die Ausweitung des Kältemarktes durch eine kontinuierlich steigende Nachfrage gedeutet werden. Der stetig steigende Kühlbedarf ist z. B. auf steigende Komfortbedürfnisse, gestalterische Aspekte wie z. B. vollflächige Glasfassaden an Gebäuden oder zunehmende Wärmelasten z. B. durch EDV-Technik bedingt.

Die Erzeugung von Kälte oder eine Klimatisierung durch den Einsatz von Wärme aus MVA stellen deshalb aus heutiger Sicht Ansatzpunkte zur Erhöhung des Wärmeabsatzes im Sommer und damit zur Steigerung der Energieeffizienz dar.

3 Kälte-, Kühl- und Klimatisierungsbedarf

Der Klimatisierungs- und Kältebedarf in Deutschland ist in den letzten Jahren stark angestiegen. Bereits 1999 wurden in Deutschland insgesamt 77.000 GWh/a zur technischen Erzeugung von Kälte aufgewendet. $\frac{6}{7}$ der Energie wurden dabei durch Strom bereitgestellt. Der Primärenergiebedarf belief sich entsprechend dem deutschen Strommix auf rund 165.000 GWh/a. Damit hatte der Energieeinsatz einen Anteil von 14 % am gesamtdeutschen Endenergieverbrauch an Strom und 5,8 % des Primärenergieverbrauchs. (DKV 2002)

Der weitaus größte Verbraucher von Kälte ist mit rund zwei Dritteln der Bereich Lebensmittel, danach folgen der Bereich Klimatisierung mit einem Anteil von rund einem Viertel und Anwendungen in der Industrie. Eine detaillierte Aufschlüsselung des Primärenergiebedarfs für Kälteerzeugung aus dem Jahr 2002 findet sich in Abbildung 3-1.

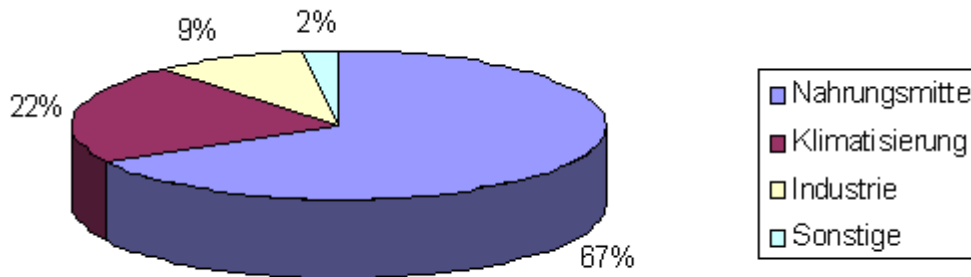


Abbildung 3-1: Primärenergiebedarf Kälteerzeugung BRD (DKV 2002)

3.1 Nahrungsmittel

Der enorme Bedarf an Kälte im Bereich Lebensmittel setzt sich aus vielfältigen Abnehmern zusammen. Ob bei der Herstellung von Lebensmitteln wie z. B. Back- oder Fleischwaren, bei deren Transport oder an der Kühltheke im Supermarkt – Kälte ist zur Aufrechterhaltung der heutigen Versorgung mit Lebensmitteln unabdingbar. Die industrielle Erzeugung von Kälte ist dabei notwendige Voraussetzung für eine qualitativ und quantitativ hochwertige Lebensmittelversorgung.

Je nach Lebensmittelart sind bei der Herstellung, Lagerung und beim Transport unterschiedliche Kälte- bzw. Kühltemperaturen erforderlich, die unterschiedliche Anforderungen an die Kühltechnik und damit das eingesetzte Kühlverfahren stellen. Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. zeigt typische Temperaturen der Kälteanwendungen:

Tabelle 3-1: Verdampfertemperaturen für bestimmte Anwendungen

T Lagerung in °C	T Verdampfer in °C	Anwendung
+1 bis -10	-5 bis -15	Frischprodukte
-12 bis -18	-20 bis -30	Tiefkühlkost
-20 bis -22	-35 bis -40	Eiscreme

Der oben genannte Anteil von rund $\frac{2}{3}$ des gesamten Kältebedarfs in Deutschland, der für den Bereich Nahrungsmittel eingesetzt wird, kann in folgende Teilbereiche untergliedert werden (Jakobs 2006):

51 % Nahrungsmittel-Erzeugung

24 % Haushaltskälte

18 % Nahrungsmittel-Lagerung

7 % Transportkälte

Vor allem die Bereiche Nahrungsmittelerzeugung und Nahrungsmittellagerung können für die Anwendung von thermisch betriebenen Kältemaschinen als Ziel dienen, weil hier in der Regel ein höherer Bedarf an Kälte besteht und vor allem auch hohe Betriebsstunden der Kältemaschinen erzielt werden.

Für einige Gewerbe mit hohem Kälteverbrauch werden in Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. typische Kennzahlen des spezifischen Verbrauchs angegeben. Diese beziehen sich mit Ausnahme der Bäckereien auf das jeweilige Produkt (DKV, 2002).

Tabelle 3-2: Übersicht typischer Kälteverbraucher

Kälteabnehmer	Kältebedarf	Einheit	Kommentar
Bäckerei	35	MWh/a	Bundesdurchschnitt Bäckerei
Brauerei	10 bis 12	kWh/Hektoliter	
Fruchtsafthersteller	1,2	kWh/Hektoliter	
Milchviehbetriebe	2	kWh/Hektoliter	
Schlachthöfe	15	kWh/Schwein	1 Kalb entspricht 0,94 Schweinen, 1 Rind entspricht 2,52 Schweinen

(Statusbericht des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins, Nr. 22, 2002)

3.2 Klimakälte

Die Klimatisierung von Gebäuden ist nach der Nahrungsmittelbranche der zweitgrößte Verbraucher an Primärenergie in der Kältetechnik.

Studien sagen eine immense Steigerung des Energieeinsatzes für Klimatisierung voraus, so wurde in EU-Veröffentlichungen für die ersten beiden Jahrzehnte des neuen Jahrhunderts von einer Vervielfachung des Bedarfs an Kühlung und Klimatisierung für öffentliche Gebäude ausgegangen. (Henning 2004)

In Deutschland werden pro Jahr ca. 1000 Gebäude mit Vollklimaanlagen ausgestattet. Dies entspricht einer jährlich installierten Kälteleistung von 500 MWh. (Schönberg 1998) Die Installationen von Klima- und Kältemaschinen liegen im Bereich von Büro- u. Verwaltungsgebäuden, Handel (z. B. Einkaufszentren oder Krankenhäusern, Hotels etc.).

Die Ausprägung der Kühlung und Klimatisierung von Gebäuden ist je nach Art der Nutzung sehr unterschiedlich; im Handel kann eine Klimatisierung bereits als Voraussetzung in der Infrastruktur betrachtet werden. Abbildung 3-2 gibt am Beispiel der Stadt Münster einen Eindruck von der Verteilung der Gebäudeflächen und deren Ausstattung mit Klimatisierung.

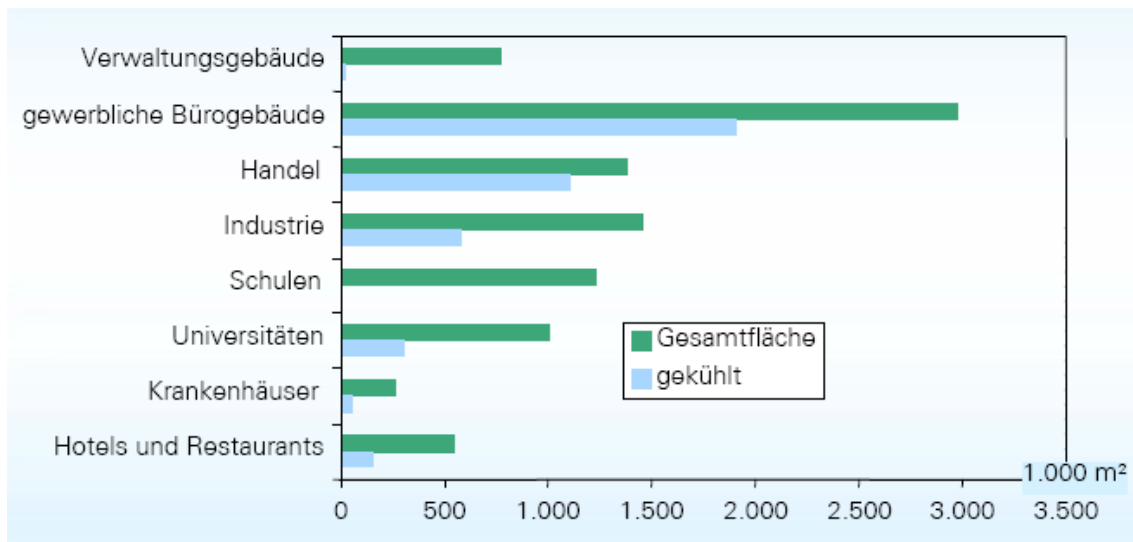


Abbildung 3-2: Beispiel für gekühlte Gebäudeflächen anhand der Situation der Stadt Münster/Kreis Steinfurth (Probst 2008)

Ziel der Klimatisierung von Gebäuden ist die Abfuhr unerwünschter innerer und äußerer Wärmelasten. Je nach Gebäudenutzung und Architektur unterschieden sich diese erheblich. In Produktionsbetrieben ist überwiegend die innere Wärmelast abzuführen, welche in den Prozessen als Abwärme z. B. von elektrischen oder hydraulischen Antrieben anfällt. Aufgrund der typischen Gestaltung von Produktionshallen mit kleinen Fensterflächen spielt hier die äußere Wärmelast eine untergeordnete Rolle.

Da Hingegen nimmt bei Bürogebäuden meist die äußere Wärmelast, vor allem bedingt durch die direkte Sonneneinstrahlung, für den Kühlbedarf eine entscheidende Rolle ein. Aber auch die inneren Wärmelasten durch den Betrieb der technischen Ausstattung wie PC, Server etc. und die Wärmelast durch die Beschäftigten können eine nicht zu vernachlässigende innere Wärmelast bedingen.

Laut Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie liegt der Kühlbedarf von Verwaltungsgebäuden zwischen 30 und 70 W/m². Für etwa 70 % der Verwaltungsgebäude lässt sich der Kühlbedarf auf einen Bereich von 40–50 W/m² eingrenzen. Die allgemein übliche Praxis, Bürogebäude mit großzügiger Verglasung zu versehen, verursacht bei hoher Sonneneinstrahlung große Lastspitzen. So führt beispielsweise die Erhöhung der Fensterfläche von 40 auf 60 % zu einem Anstieg um 15–20 W/m² der maximalen mittleren Kühllast. Der Energieverbrauch bei der Kühlung von Läden und Einkaufszentren kann überschlägig mit rund 40 kWh/m²·a angesetzt werden (Fisch 2008). Ein Einkaufszentrum mit 10.000 m² Fläche weist so einen Klimatisierungsbedarf von jährlich 400 MWh auf.

Die Vollbenutzungsstunden einer Klimaanlage variieren stark je nach Art und Nutzung des Gebäudes. Die Spannweite reicht dabei von 300 h/a für Bürogebäude bis 1700 h/a für Maschinenhallen (DKV, 2002).

Die exakte Bestimmung des Klimatisierungs- und Kältebedarfs kann immer nur anhand der konkreten Gebäude- und Infrastrukturdaten ermittelt werden. Für die Ermittlung der Kühllasten existieren detaillierte Vorgehensweisen, die z. B. in der VDI-Richtlinie 2078 standardisiert wurden.

4 Voraussetzungen und Möglichkeiten der Kältetechnik

Das folgende Kapitel soll einen Überblick über die verfügbaren und eingesetzten Technologien zur Kälteerzeugung geben. Es wird jeweils auf die unterschiedlichen Funktionsprinzipien von verschiedenen Kältemaschinen und von Kältespeichern und deren spezifischen Eigenschaften eingegangen.

4.1 Kälteerzeugung

Die aufgeführten Kältemaschinentypen unterscheiden sich hinsichtlich der Verfahren, des Antriebs und des zur Verfügung gestellten Temperaturniveaus des Kältebedarfs (Klimakälte > 6 °C, Kühlung oder Prozesskälte < 0 °C). Tieftemperaturen, wie sie für Spezialanwendungen in der Verfahrenstechnik benötigt werden, erfordern eigene Erzeugungsanlagen, die in Bezug auf die Verwendung von Wärme als Antriebsenergie nicht relevant sind.

Kältemaschinen transferieren Wärme von einem niedrigen Temperaturniveau auf das Niveau der Umgebung. Dazu werden unterschiedliche physikalische Effekte benutzt. Bei den meisten Kältemaschinen wird die Verdampfungsenthalpie des Arbeitsmittels dazu benutzt, der Umgebung Wärme zu entziehen und dadurch Kälte zu erzeugen. Die technische Umsetzung erfolgt durch Kompressions- und Sorptionskältemaschinen.

Daneben wird auch die Temperaturänderung von Gasen bei Kompression oder Expansion in der Kältetechnik genutzt. Dieser Effekt wird in der Kaltluft- und der Gaskältemaschine angewendet. Beide Systeme kommen jedoch nur für Spezialanwendungen zum Einsatz und sollen im Folgenden nicht weiter betrachtet werden.

Die Kennzahl, mit der die Antriebsenergie (elektrische oder mechanische Energie oder Wärme) in Kälte umgesetzt wird (was zusammen mit den Rahmenbedingungen Aufschluss über den Wirkungsgrad gibt), wird als „Leistungsziffer“ bzw. als „COP“ (Coefficient of Performance) bezeichnet.

Die Definition erfolgt über das Verhältnis der Kälteleistung zur aufgenommenen Leistung:

$$COP = \frac{\text{Kälteleistung}}{\text{aufgenommene Leistung}}$$

Der COP wird sehr stark von der Spreizung der Verdampfungs- und Kondensationstemperatur bestimmt. Die Verdampfungstemperatur wird in erster Linie durch den Einsatzzweck vorgegeben (Kühlung oder Gefrierkälte), die Kondensationstemperatur vor allem von der Art der Rückkühlung bzw. den bei der Rückkühlung erzielbaren Temperaturen. Auch das eingesetzte Kältemittel nimmt Einfluss auf den COP.

4.1.1 Kompressionskältemaschinen

Die meisten Klimageräte und Kühlschränke arbeiten als Kompressionskältemaschinen (KoKM). Zum Antrieb der Kältemaschine beziehungsweise des Verdichters ist mechanische Arbeit notwendig. Der Antrieb erfolgt in den meisten Fällen mittels Elektromotor.

Das flüssige Kältemittel verdampft im Verdampfer und entzieht der Umgebung Wärme. Anschließend wird das Kältemittel mechanisch verdichtet und im Kondensator verflüssigt, wobei Energie an die Umgebung als Wärme abgegeben wird. Die Kompression erfolgt bei kleinen Anlagen durch Kolbenmaschinen. Moderne größere Anlagen im Bereich $> 100 \text{ kW}_{\text{el}}$ arbeiten mit Zentrifugalverdichtern, wobei durch technologische Entwicklungen Effizienzsteigerungen gegenüber früheren Kompressionskälteanlagen von bis zu 25 % erzielt wurden.

Der COP ist bei Kompressionskältemaschinen in der Regel größer als 1 und liegt je nach Größe und Qualität der KM bei Werten von 1 bis 4. In Ausnahmefällen kann auch ein COP bis 8 erreicht werden.

Als Kältemittel stehen verschiedenste chemische Verbindungen, zumeist auf Kohlenwasserstoffbasis, zur Verfügung. Damit ist diese Technologie über weite Temperaturbereiche einsetzbar und stellt sozusagen die Standardlösung in der Kältetechnik dar.

4.1.2 Dampfstrahlkältemaschinen

Eine Möglichkeit zur Kälteerzeugung aus Wärme mit Wasser als Kältemittel bietet die Dampfstrahlkältemaschine. Voraussetzung für den Betrieb einer derartigen Anlage sind ausreichende Mengen Dampf mit Temperaturen ab 140 °C und eine gute Möglichkeit zur Rückkühlung.

Der mit einem Dampfstrahl betriebene Verdichter erzeugt einen starken Unterdruck, wodurch das in den Verdampfer eingedüste Wasser mit 16 °C sofort verdampft. Der Dampf wird vom Verdichter angesogen und zusammen mit dem Treibdampf kondensiert. Durch die Verdampfung wird das Wasser im Verdampfer ausgekühlt. Weitere, nicht in Abbildung 4-1 dargestellte Kreisläufe sorgen für die Rückführung von Kondensat in den Kessel zur Dampferzeugung und in den Kältemittelkreislauf.

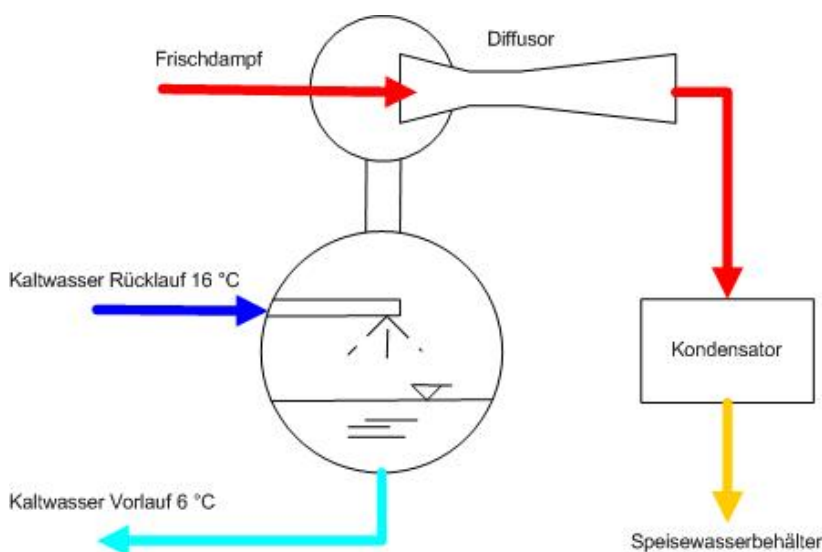


Abbildung 4-1: Vereinfachtes Schema einer Dampfstrahlkältemaschine

Der Strahlverdichter selbst besitzt keine bewegten Teile und ist somit weitgehend verschleißresistent. Da für den Betrieb der Anlage Dampf notwendig ist, ist der Einsatzbereich beschränkt. Neben Anwendungen in verfahrenstechnischen Anlagen, in denen ohnehin Dampf vorhanden ist, kann die Dampfkältemaschine bei entsprechend hohen Temperaturen auch mit Fernwärmedampf betrieben werden. Der COP liegt je nach Betriebsbedingungen in einem Bereich von 0,5 bis 2 (Internetquelle: www.bine.info).

4.1.3 Absorptionskältemaschinen

In den Anfängen der Kältetechnik Mitte bis Ende des 19. Jahrhunderts nahmen Absorptionskältemaschinen (AbKM) eine Vorreiterrolle ein, bevor Kompressionskältemaschinen aufgrund der technischen Entwicklungen und der Steigerungen der Wirkungsgrade ihren Siegeszug antraten. Absorptionskältemaschinen haben statt eines mechanischen einen thermischen Verdichter, d. h. sie werden mit thermischer Energie (Wärme) angetrieben. In der Vergangenheit wurden die Aggregate direkt durch eine Gasfeuerung (bekannt ist z. B. der mit Gas betriebene Campingkühlschrank) oder indirekt über Dampf angetrieben.

Der Betrieb von Absorptionskältemaschinen erfolgt üblicherweise mit den Stoffpaarungen Ammoniak/Wasser oder Wasser/Lithiumbromid als Kälte- bzw. Lösungsmittel. Während Erstere hauptsächlich für industrielle Prozesse Anwendung findet und bis -60 °C einsetzbar ist, wird Letztere wegen der begrenzten Verdampfer Temperatur zur Kühlung und vor allem zur Klimatisierung verwendet.

Abbildung 4-2 zeigt das Funktionsprinzip einer LiBr-Absorptionskältemaschine. Das dampfförmige Kältemittel gelangt nach dem Verdampfer in den Absorber. Dort löst es sich unter Wärmeabgabe im Lösungsmittel (Lithiumbromidlösung). Die Lösung wird über eine Pumpe zum Austreiber befördert. Unter Wärmeaufnahme dampft das Kältemittel aus der Lösung aus und wird im Kondensator verflüssigt. Die kältemittelarme Lösung gelangt zurück zum Absorber. Als Antriebsenergie kann eine beliebige Wärmequelle mit ausreichender Temperatur verwendet werden. Zum Antrieb der Pumpe ist elektrische Hilfsenergie nötig.

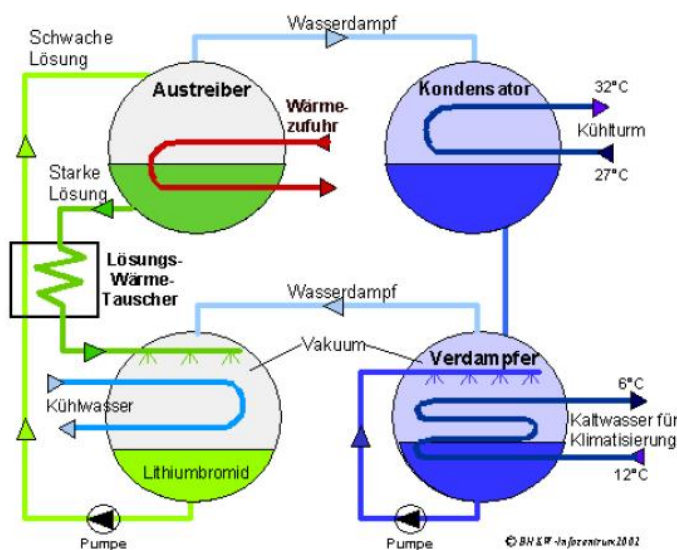


Abbildung 4-2: Schema einer LiBr-Absorptionskältemaschine (BHKW Infozentrum)

Bei AbKM mit dem Stoffpaar Lithiumbromid/Wasser stellt Wasser das Kältemittel dar. Dadurch ist die niedrigste Kaltwasseraustrittstemperatur auf ca. 5 °C begrenzt. Die Eintrittstemperatur des Heizmediums (Heißwasser, Wasserdampf) für den Austreiber kann zwischen 80 °C und 180 °C liegen. Die Anlagen werden daher oft eingesetzt, wenn Wärme im Bereich von 80 bis 120 °C zur Verfügung steht. Neben den indirekt mit Heißwasser oder Dampf beheizten Austreibern werden auch direkt mit Öl oder Gas beheizte LiBr-Absorptionskälteanlagen angeboten. Der COP liegt bei einstufigen AbKM bei Nennbedingungen (Heiztemperatur: 120 °C; Kühlwassertemperatur: 29 °C) zwischen 0,6 und 0,75. Bei zwei-stufigen AbKM liegt er zwischen 1,0 bis 1,3. (Simader 2005)

Soll Gefrierkälte (< 0 °C) erzeugt werden, kommen AbKM zum Einsatz, die mit der Ammoniak/Wasser-Stoffpaarung betrieben werden und ein Temperaturniveau der Antriebswärme von deutlich über 90 °C (in der Regel bei 120–130 °C) erfordern.

Ammoniak-Wasser-Absorptionskälteanlagen werden traditionell in der Gefriertrocknung und in der chemischen Industrie eingesetzt. Die Anlagen sind vorwiegend als Einzelanlagen kundenspezifisch konzipiert und die Kälteleistungen liegen meist im MW-Bereich. In der Ammoniak-Wasser-Absorptionskälteanlage ist Ammoniak das Kälte- und Wasser das Lösungsmittel. Der Vorteil dieser Kombination ist der Einsatz von in der Technik gängiger Medien, die sehr preiswert sind. Der COP der Anlagen ist abhängig von der Verdampfungstemperatur und liegt im Bereich von 0,65 (Verdampfungstemperatur = 0 °C) und 0,3 (Verdampfungstemperatur = -50 °C)

Einsatzbereiche von industriellen Absorptionskältemaschinen sind z. B.

- Lebensmittel- und Getränkeindustrie
- Großbäckereien, Frittierfabriken
- Milchkühlung
- Gefrier- und Kühllagerung
- Fischverarbeitungszentren
- Chemische Industrie

Mehrstufige AbKM können in größerem Maße an die Anforderungen von Wärmequelle und Kältebedarf angepasst werden, als das bei einstufigen Absorbern möglich ist. Mit mehreren Stufen ist entweder ein höherer COP oder eine Verringerung der notwendigen Antriebstemperatur erreichbar.

Die durch die Energiepreisssteigerung der letzten Jahre gesteigerten Bemühungen um den Ausbau von Kraft-Wärme-Kopplung und eine effiziente Nutzung der Wärme haben umfangreiche Entwicklungsarbeiten an AbKM mit niedrigeren Antriebstemperaturen ausgelöst.

So sind mittlerweile warmwasserbetriebene Absorptionskältemaschinen am Markt verfügbar, die mit Heißwassertemperaturen von 80 °C in Betriebsbereiche vordringen, die eine wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit ermöglichen. Eine solche speziell für Fernwärme-Applikationen entwickelte moderne H₂O/LiBr-Anlage kommt im Betriebspunkt mit niedrigeren Vorlauftemperaturen, wie sie im Sommer in Fernwärmenetzen häufig anzutreffen sind (80–100 °C), zurecht. Eine hohe Auskühlung des

Heizmediums ermöglicht eine niedrige Rücklauftemperatur und damit optimale Nutzung des Wärmeangebots. Die erwähnte Entwicklung stellt eine Kombination einer zweistufigen Kälteanlage (Double-Lift-Prozess) mit einer Standard-Single-Effect-Anlage dar. Die sogenannte SE/DL-Anlage (SE/DL = single effect/double lift) kann mit Warmwasser unter 100 °C betrieben werden und weist Temperaturspreizungen von 30 bis 40 K auf.

Die SE/DL-Bauart wurde speziell für die Kälteversorgung über Fern- und Nahwärmenetze entwickelt. DL steht für eine zweimalige Zuführung von Heizenergie für eine Kälteenergienutzung. Während bei Standardabsorptionskälteanlagen das Heizwasser nur um ca. 10 °C abgekühlt wird, können SE/DL-Anlagen Vorlauftemperaturen von 85 bis 100°C bis ca. 30 °C abkühlen, wodurch niedrigere Rücklauftemperaturen von 65 bis 50 °C erreicht werden.

In Tabelle 4-1 sind die Leistungsdaten einer mehrstufigen SE/DL-Kältemaschine, wie sie am Münchener Flughafen zur Kälteerzeugung verwendet wird, dargestellt. Gut ersichtlich ist die große Spreizung bis auf eine minimale untere Austrittstemperatur von 60 °C.

Tabelle 4-1: Leistungsdaten einer SE/DL-Absorptionskältemaschine

Kälteleistung:	2.5 MW (max. 3 MW)
Kaltwassereintritt:	14 °C
Kaltwasseraustritt:	6 °C
Massenstrom Kaltwasser:	max. 325 t/h
Generatorleistung:	ca. 3,7 MW
Heißwassereintritt:	max. 130°C
Heißwasseraustritt:	60°C bis 65°C
Massenstrom Heißwasser:	max. 115 t/h
Kondensatorleistung:	ca. 6,7 MW
Kühlwassereintritt:	27 °C
Kühlwasseraustritt:	35 °C
Massenstrom Kühlwasser	max. 720 t/h

(Rögelein und Partner Ingenieure)

Die bauliche Situation der Installation einer Absorptionskältemaschine findet sich in der folgenden Abbildung:



Abbildung 4-3: LiBr-Absorptionskältemaschine bei der Fa. Sachs in Schweinfurt, die mit Wärme des Gemeinschaftskraftwerks betrieben wird¹

Die Anbieter verschiedener Systeme der Sorptionskälte finden sich im Anhang.

4.1.4 Adsorptionskältemaschinen

Adsorptionskältemaschinen arbeiten nach dem Prinzip der thermochemischen Energiespeicherung. Energie wird hauptsächlich über die Bindungsenthalpie des Arbeitsmittels (Wasser) an das Adsorptionsmittel und über die Kondensationswärme des Wassers freigesetzt bzw. aufgenommen.

Eine Adsorptionskältemaschine besteht aus zwei mit Sorptionsmittel gefüllten Arbeitskammern, einem Verdampfer und einem Kondensator. Als Adsorptionsmittel werden meist Silicagel oder Zeolithe, als Kältemittel Wasser verwendet. In Abbildung 4-4 ist der Schnitt durch eine Maschine schematisch dargestellt. Der Prozess ist diskontinuierlich und läuft folgendermaßen ab:

1. Das an das Adsorptionsmittel angelagerte Wasser wird im zweiten Wärmeüberträger (WÜ 2) unter Wärmezufuhr ausgetrieben und verdampft.
2. Der Wasserdampf wird im Kondensator verflüssigt und die Wärme wird an das Kühlwasser abgeführt.
3. Das Kondensat wird in den Verdampfer eingesprüht und verdampft bei Unterdruck. Dabei wird dem Kaltwasser Wärme entzogen und somit die gewünschte Kühltemperatur für den Vorlauf der Klimaanlage erzielt.

¹ Typ: YORK Millennium Absorption Chiller; Single Effect; 600 kW Kälteleistung

4. Im WÜ 1 wird der Wasserdampf adsorbiert und die entstehende Wärme wird an das Kühlwasser abgeführt.

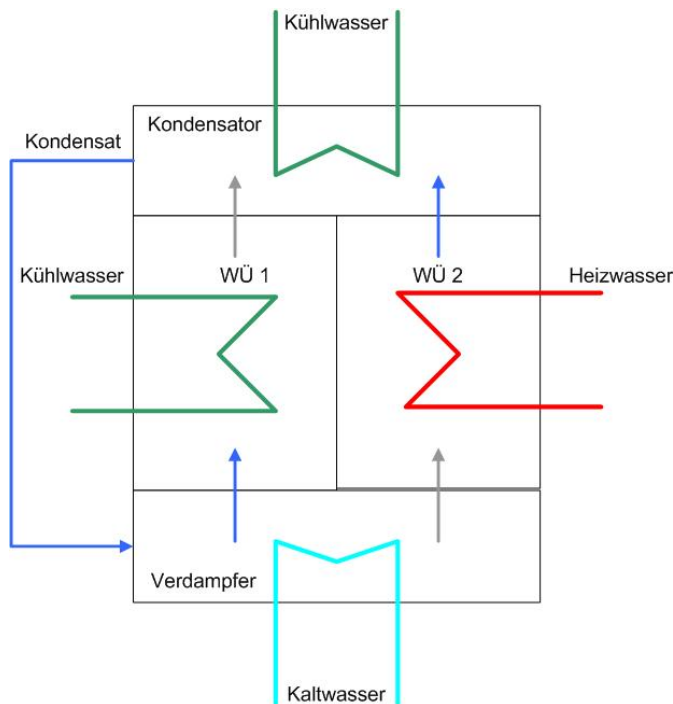


Abbildung 4-4: Schema einer Adsorptionskälteanlage

Durch Umlenken des Heiz- und Kühlwasserkreislaufs zwischen den Wärmeüberträgern 1 und 2 werden die Funktionen am Ende jedes Zyklus vertauscht und der Prozess beginnt von Neuem. Dadurch findet ein quasikontinuierlicher Betrieb statt (Gassel 1999). Die AdKM teilt die prinzipiellen Nachteile mit der AbKM.

Die Anwendung von AdKM befindet sich noch in den Anfängen. Die Auswahl an Anbietern ist sehr begrenzt, sodass neben diversen Versuchsanlagen nur zwei japanische Hersteller die AdKM in Serie fertigen. Laut Herstellerangaben reicht zum Betrieb einer Silicagel/Wasser-AdKM eine Temperatur von 55 bis 95 °C. Bei einer fernwärmebetriebenen AdKM in Kassel hat sich jedoch gezeigt, dass Temperaturen unter 90 °C für einen stabilen Betrieb Probleme verursachen. (vgl. Schreyer, Tanner; 2008).

Die Adsorptionskältemaschine kann aufgrund ihres Wirkungsprinzips dann sehr nutzbringend eingesetzt werden, wenn bei der Kühlung gleichzeitig eine Entfeuchtung der Luft stattfinden soll.

4.1.5 Einsatz von Zeolithen bei Adsorberanlagen

Wasser und Zeolithe werden in einem geschlossenen Adsorptionszyklus zur Erzeugung von Kälte genutzt. Zum Antrieb wird Wärme benötigt.

Das kristalline Mineral Zeolith hat die Eigenschaft, Wasserdampf anzusaugen (zu adsorbieren), in seine poröse Struktur einzubinden und dabei Wärme hoher Temperatur abzugeben.

Erfolgt ein solcher Prozess in luftleeren Behältern, geschieht das Ansaugen des Dampfes von einer Wasseroberfläche im Verdampferbehälter mit solcher Heftigkeit, dass sich aufgrund der hohen Verdampfungskälte der Rest des Wassers stark abkühlt und zu Eis gefriert. Dieses Eis kann zum Kühlen und Klimatisieren genutzt werden, während gleichzeitig die im Zeolith frei werdende Wärme für Heizzwecke verwendet werden kann. Befindet sich zusätzlich zwischen den beiden Behältern ein Ventil, kann die Kälte- bzw. Wärmeerzeugung unbegrenzt lange ohne Energieverlust unterbrochen werden.

Der erste Teilprozess dieser Energiewandlung läuft so lange, bis der Zeolithen mit Wasser gesättigt ist. Anschließend erfolgt in einem zweiten Teilprozess durch Wärmezufuhr zum Zeolithen eine Umkehrung: Das Wasser wird dampfförmig aus dem Zeolithen ausgeheizt (desorbiert) und verflüssigt sich im Verdampferbehälter.

Eine nahezu kontinuierliche Kälteerzeugung wird dann erreicht, wenn zwei oder mehrere Sorptionsaggregate phasenversetzt betrieben werden. Wird dieses Aggregat für Heiz- und Kühlzwecke verwendet, so beträgt der Gesamtnutzen 160 %, bestehend aus 130 % Nutzwärme und 30 % (Nutz-)Kälte. Dafür müssen lediglich 100 % Antriebswärme aufgewendet werden. Selbst bei elektrischem Antrieb können also mit einem Sorptionsaggregat Energieverbrauch und CO₂-Emission reduziert werden. (Zeotech 2009)

Üblicherweise werden Adsorptionsanlagen auf Zeolithbasis bei Temperaturen von 150 – 250 °C betrieben und hierzu in der Regel elektrisch beheizt.

Fernwärme stellt für den Betrieb von Zeolith-Adsorberanlagen mit einer Temperatur von 120 °C nicht das geeignete Temperaturniveau zur Verfügung, bei der solche Anlagen wirtschaftlich betrieben werden könnten. Bei Austreibertemperaturen von 120°C und darunter sind andere Medien, wie sie bei der Absorptionstechnik zum Einsatz kommen, geeigneter. Zum Betrieb von Zeolithanlagen mittels Wärme aus Wärmenetzen sind großflächige Wärmetauscher erforderlich, um die entsprechende Energie einzubringen. Diese schränken die Wirtschaftlichkeit solcher Anlagen stark ein.

Die Kälteerzeugung mittels Zeolithen besitzt ihre Stärken dort, wo eine Speicherung der Kälte oder ein Transport gewünscht sind. Solche Systeme sind bei der Getränke- oder dem Lebensmitteltransport im Einsatz, da dort auch kurzfristig große Mengen Kälte abgerufen werden können. Üblicherweise werden Kältetemperaturen von 0 °C bereitgestellt.

4.1.6 DEC-Anlagen

DEC-Anlagen, „Dessicant and Evaporative Cooling“ (= trocknende und verdunstende Kühlung), ermöglichen im Sommer die Entfeuchtung und Kühlung der Luft, ohne dass dazu eine Kältemaschine im eigentlichen Sinn benötigt wird. Im Winter kann der Sorptionsrotor als zusätzliche Wärmerückgewinnung mit Feuchteübertragung genutzt werden.

Zur Regeneration des sogenannten Sorptionsrotors ist Wärme auf einem Temperaturniveau von mindestens 55 °C erforderlich. Je nach Sorptionsmaterial können auch höhere Temperaturen bis zu 100 °C für die Regeneration des Sorptionsrades erforderlich sein. Mit diesen Anlagen kann die zu klimatisierende Luft auf 16 bis 18 °C abgekühlt werden.

In einigen Pilot- und Demonstrationsanlagen werden derzeit Betriebserfahrungen mit dieser Technologie, vor allem im Bereich solarer Kühlung, gesammelt.

Funktionsbeschreibung:

Zur Klimatisierung wird die warme, feuchte Außenluft angesaugt und durch das Sorptionsrad geleitet. Das Sorptionsrad nimmt einen Teil der Luftfeuchte auf, wodurch sich die Luft zunächst erwärmt. Im regenerativen Rotationswärmetauscher wird die entfeuchtete Luft wieder abgekühlt. Durch die nachfolgende Befeuchtung kühlt sich die Luft auf die gewünschte Temperatur ab und wird dem zu klimatisierenden Raum zugeführt.

Abluft aus dem klimatisierten Raum ist wärmer als die Zuluft. Sie wird in der Anlage adiabatisch befeuchtet und kühlt sich ab. Die abgekühlte Luft wird in den regenerativen Rotationswärmetauscher geleitet und nimmt dadurch Wärme aus der Zuluft auf. Anschließend erfolgt eine Erhitzung auf die benötigte Temperatur. Die erhitzte Abluft wird dem Sorptionsrad als Regenerationsluft zugeleitet. Nach dem Sorptionsrad wird die Luft über den Abluftventilator in die Umgebung abgegeben (siehe Abbildung 4-5).

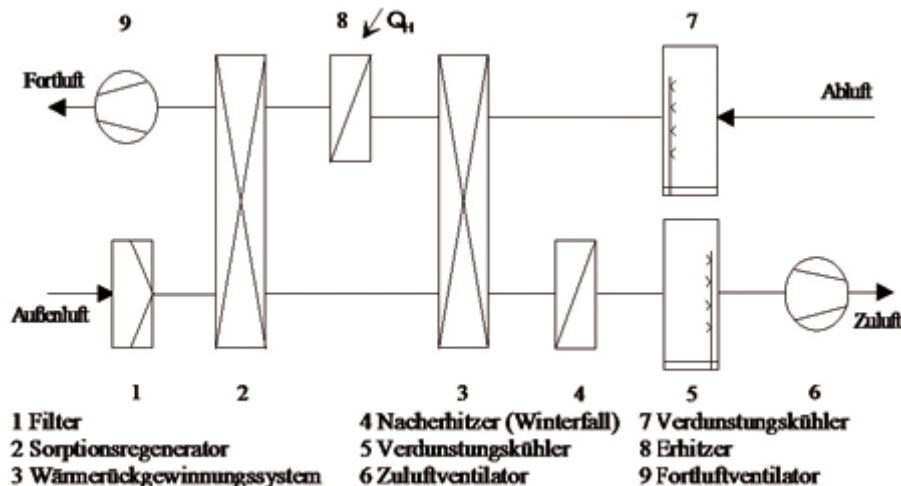


Abbildung 4-5: Funktionsschema einer DEC Anlage (Kroitel 2007)

4.2 Wirkungsgrade und wirtschaftliche Rahmenparameter der Kälteerzeugung

Abbildung 4-6 gibt einen Vergleich zwischen den beiden technischen Systemen Kompressionskältemaschine (KoKM) und AbKM und dem COP. Übliche COP-Werte von Absorptionskältemaschinen liegen mit 0,6–0,75 nominal deutlich unter dem von Kompressionskältemaschinen mit 1–3. Bei einem Vergleich des COP von Absorptionskälteanlagen und dem von Kompressionskälteanlagen muss jedoch die unterschiedliche Wertigkeit der in den Prozess eingebrachten Energien berücksichtigt werden. Der COP bezieht sich bei Kompressionskältemaschinen auf die aufgewendete elektrische Energie, bei Absorptionskälteanlagen auf die eingebrachte Wärme. Werden die Antriebsenergien jeweils auf Primärenergie bezogen, relativiert sich der Unterschied: So kann in Deutschland elektrische Energie überschlägig mit einem Faktor von 2,6 als Primärenergie abgeschätzt werden. Das heißt, für einen abschätzenden Vergleich kann die elektrische Antriebsenergie mit einem Faktor von 2,6 dem Wärmeinput in eine AKM gegenübergestellt werden, wobei die Verluste bei der Bereitstellung der Wärme nicht berücksichtigt sind. Eine nähere Erläuterung hierzu findet sich in Abschnitt 5.3.

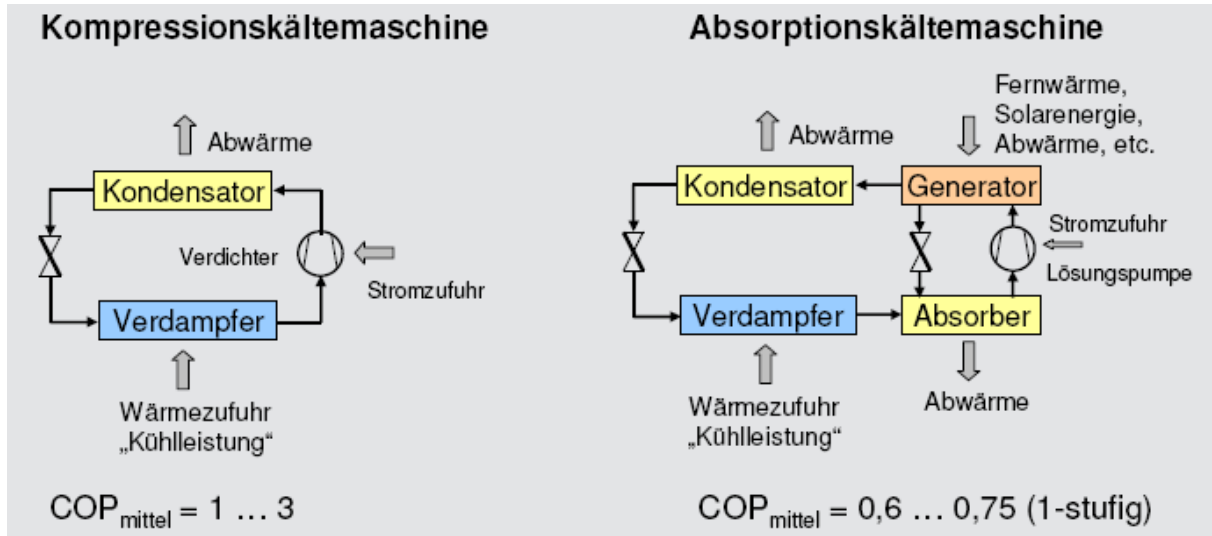


Abbildung 4-6: Vergleich von mechanisch und thermisch angetriebenen Kältemaschinen

Im Gegensatz zu Kompressionskältemaschinen, bei denen die Antriebsenergie fast immer über elektrische Antriebe mit nahezu festem Wirkungsgrad bereitgestellt wird, hat bei Sorptionsmaschinen das Temperaturniveau der thermischen Antriebsenergie einen deutlichen Einfluss auf den erzielbaren Wirkungsgrad. Abbildung 4-7 zeigt ein anlagenspezifisches Beispiel für die Abhängigkeit des COP von Heizwassertemperatur und Rückkühltemperatur. Bei geringeren Rückkühltemperaturen kann auch mit relativ niedrigeren Heizwassertemperaturen bereits ein vergleichsweise hoher Wirkungsgrad erzielt werden. Hierfür ist jedoch bei hohen Umgebungstemperaturen eine aufwendige Rückkühlung erforderlich.

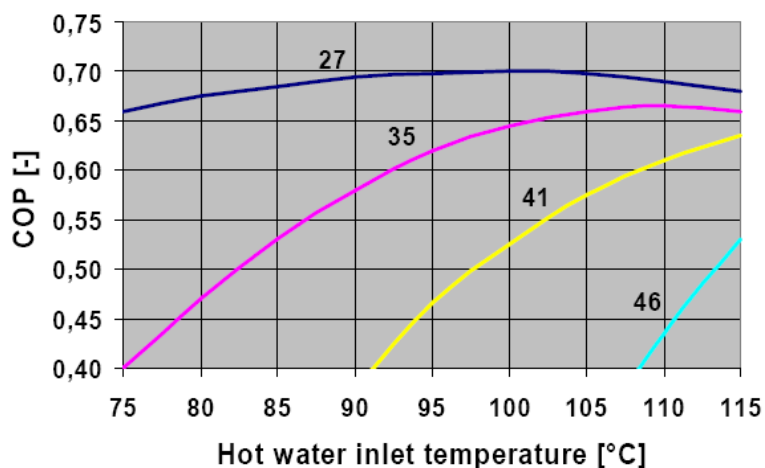


Abbildung 4-7: COP in Abhängigkeit von der Antriebs- und der Rückkühltemperatur (YAZAKI ENERGY)

Abbildung 4-8 zeigt beispielhaft für eine heißwasserbetriebene Absorptionskältemaschine den Verlauf der abgegebenen Kälteleistung (kW) bei sinkender Heizwassertemperatur. Wie daraus ersichtlich wird, hat bei einer wärmegetriebenen Kältemaschine neben der Rückkühltemperatur das Temperaturniveau

des Heizwasserzulaufs einen entscheidenden Einfluss auf die abgegebene Kälteleistung (und damit den COP).

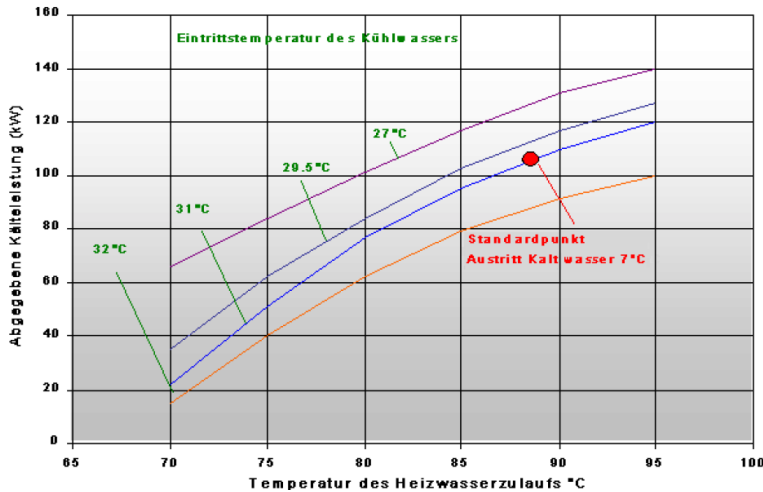


Abbildung 4-8: Kälteleistung in Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen (gasklima/YAZAKI 2007)

Werden Absorptionsmaschinen unterhalb einer gewissen Teillast betrieben, nimmt der COP extrem ab. Dies bedeutet, dass die Absorptionskältemaschinen nur zu einem gewissen Bereich in Teillast gefahren werden können. In dem in Abbildung 4-9 wiedergegebenen Beispiel sollte die AbKM nicht unter 50 % Auslastung betrieben werden.

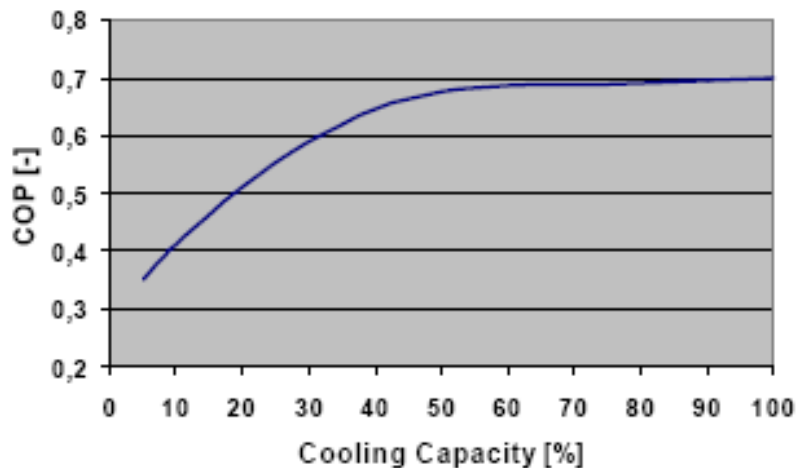


Abbildung 4-9: COP in Abhängigkeit vom Lastzustand (gasklima/YAZAKI 2007)

In Tabelle 4-2 soll eine Übersicht technischer Details der gängigsten Adsorptions- und Absorptionskältemaschinentypen gegeben werden, auf die in den Kapiteln 4.1.3 und 4.1.4 eingegangen wurde.

Tabelle 4-2: Übersicht über die verfügbaren Technologien bei Sorptionskältemaschinen

Art	Kälteleistung	Kühl-/Gefriertemperatur	Antriebswärme	COP
	[kW]	[°C]	[°C]	[-]
1-stufig LiBr/H ₂ O	100–5.000	> 5 (> 0)*	80–100	0,6–0,8
2-stufig LiBr/H ₂ O	200–3.500	> 6 (> 5)*	135–200	0,9–1,3
SE/SL-DL LiBr/H ₂ O	400–10.000	> 6 (0)*	80–100	0,4–0,75
H ₂ O/NH ₃	100–10.000	> -60	100–180	0,25–0,6
H ₂ O/Silicagel	50–500	> 9 (>3)*	55–95	0,5–0,7
DEC	16–300	> 16	70–90 (50)*	0,9–1,5
* Sonderanfertigung				

(Simader, Rakos (2005) im Abgleich mit Herstellerangaben)

Die Kosten der Kälteerzeugung hängen im Wesentlichen von den Investitionskosten und den Kosten für den Bezug der Antriebsenergie ab. Bezüglich der Investitionskosten weisen Absorptions- und Adsorptionskältemaschinen verglichen mit Kompressionskältemaschinen deutlich höhere spezifische Kennwerte auf. Die spezifischen Investitionskosten für Kältemaschinen variieren aufgrund des unterschiedlichen apparativen Aufwands und der eingesetzten Technik stark. Anhaltswerte für die Verhältnisse bei den Modulpreisen von Kältemaschinen werden in Tabelle 4-3 wiedergegeben.

Tabelle 4-3: Spezifische Investitionskosten von Kältemaschinen

Anlagentyp	Modulpreis in €/kW
LiBr-Absorptionskältemaschine (einstufig)	80 bis 150
NH ₃ Absorptionskältemaschine (einstufig)	500 bis 1.300
Adsorptionskältemaschine	400 bis 1.500
DEC-Anlage	350 bis 700
Dampfstrahlkältemaschine	65 bis 200
Kompressionskältemaschine	80 bis 130

(BINE Fachinformationsdienst: KWKK, Fachinformationszentrum Karlsruhe, 2/1998)

Die Investitionskosten von AbKM und AdKM hängen in niederen Leistungsbereichen sehr stark von der Größe der Anlage ab. Wie Abbildung 4-10 zeigt, steigen die spezifischen Investitionskosten für AKM unter 50–100 kW Kälteleistung stark an.

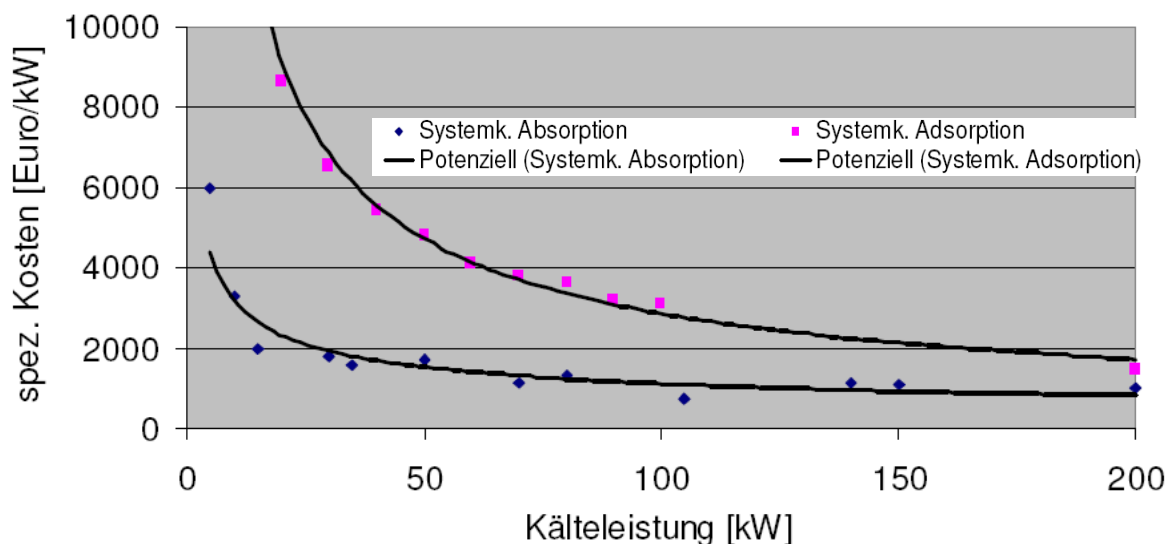


Abbildung 4-10: Spezifische Anlagen-Investitionskosten [Euro/kW] (Meißner 2007)

Bei den spezifischen Investitionskosten sind jedoch nicht nur die reinen Aggregatekosten zu berücksichtigen, sondern auch die Kosten für die Rückkühleinheiten, die bei AbKM einen höheren Aufwand erfordern. In der folgenden Tabelle dürften die Unterschiede in den Investitionskosten KoKM und AbKM zwar tendenziell zu hoch angesetzt sein, in jedem Fall ist jedoch mit beträchtlich höheren Investitionskosten für AbKM zu rechnen.

Tabelle 4-4: Spezifische Kosten für Kältemaschinen mit Rückkühlwerk, ohne Verrohrung

	0 - 250 kW	250 - 500 kW	500 - 1000 kW	1000 - 3000 kW	3000 - 9000 kW
Scroll	480,00 €/kW	---	---	---	---
Hubkolben	300,00 €/kW	280,00 €/kW	240,00 €/kW	220,00 €/kW	160,00 €/kW
Schraube ab 125 kW	265,00 €/kW	250,00 €/kW	210,00 €/kW	175,00 €/kW	160,00 €/kW
Turbo	---	---	---	195,00 €/kW	145,00 €/kW
Absorber	2.000,00 €/kW	1.500,00 €/kW	1.400,00 €/kW	1.340,00 €/kW	1.400,00 €/kW

(Probst J. 2008 im Rahmen der Coolregion Münster)

4.3 Kältespeicher

Mit Kältespeichern lassen sich Fernkältesysteme erheblich flexibler betreiben. So kann z. B. der Betrieb der Kältemaschine vergleichmäßig oder stärker in Nachtzeiten verlagert werden. Die elektrischen Lastspitzen in der Hochlastzeit werden verringert oder massiv abgebaut. Über die Nutzung von Niedertarifen in der Nacht ist die Reduktion der verbrauchsgebundenen Kosten möglich. Gleichzeitig kann sich die elektrische Anschlussleistung reduzieren. Die Kältemaschinen können kleiner dimensioniert werden und arbeiten am Auslegungspunkt mit besseren Wirkungs- und Nutzungsgraden. Für Systeme mit Kältespeicher sind die Investitionskosten oftmals geringer als für Systeme, die die Spitzenlast mit schwach ausgelasteten Kompressionskältemaschinen decken. Kleinspeicher sind in großer Vielfalt auf dem Markt. Die Kältespeicher können in bestehenden Systemen nachgerüstet werden und stellen in der Regel keine hohen Anforderungen an die Technik im Bestand. In Zeiten ohne Spitzenlast erhöht ein Speicher die Versorgungssicherheit, da er kurzzeitig eine Notversorgung gewährleisten kann. (BINE 2005)

Die Integration von Kältespeichern kann insbesondere bei einem Betrieb von heißwasserbetriebenen Kältemaschinen von Vorteil sein: Die Speicher können nachts und in Schwachlastzeiten beladen werden. Steigt der Kühlbedarf, kann der Speicher entladen werden und stellt die erforderliche Spitzenlast bereit. Die Kältemaschine kann dadurch kleiner dimensioniert werden. Es ist ein kontinuierlicherer Betrieb der Kältemaschine und damit eine gleichmäßigere Auslastung des Fernwärmenetzes und eine Reduzierung der Anschlussleistung für die Wärmeversorgung möglich. In Abbildung 4-11 ist beispielhaft das Lastprofil einer Klimaanlage mit integriertem Speicher abgebildet. Der Speicher wird nachts von der Kältemaschine beladen, tagsüber deckt er die Spitzenlast ab.

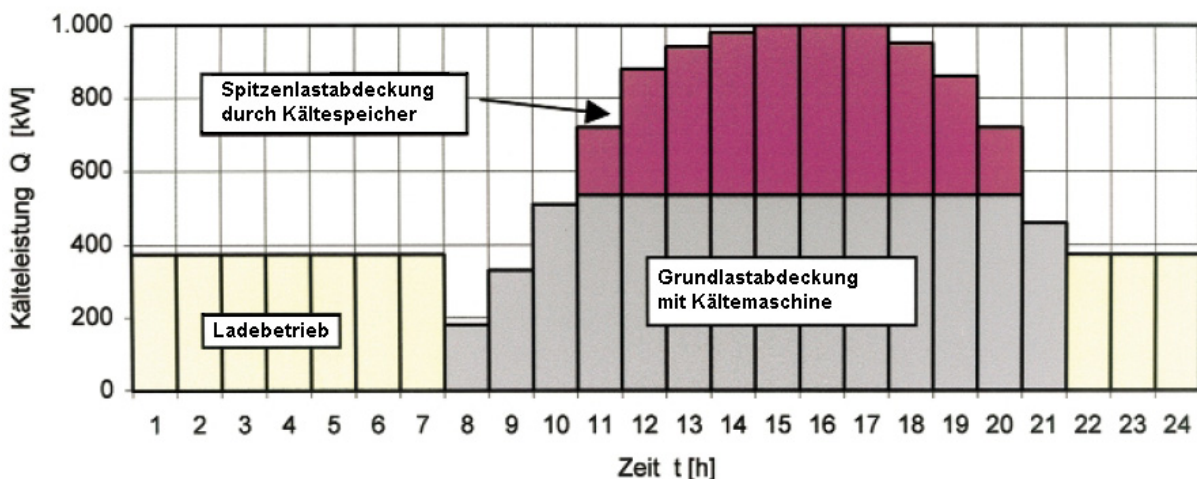


Abbildung 4-11: Beispiel Lastprofil einer KM und Eisspeicher (Hilliweg, Sponsel 2003)

4.3.1 Eisspeicher

Um für Spitzenlasten nicht die volle Leistung mit KM bereitstellen zu müssen, werden vielerorts bereits Eisspeichersysteme eingesetzt, vor allem in Kombination mit KoKM. Bei KoKM ergeben sich Vorteile bzw. ökonomische Einsparungen vor allem aus der Reduzierung von Stromlastspitzen.

4.3.2 Adsorptionsspeicher

Eine Sonderform der Kältespeicher stellt der Adsorptionsspeicher dar. Dieser ist eigentlich ein Wärmespeicher, der sowohl zu Klimatisierung und zu Kühlzwecken als auch zur Beheizung eingesetzt werden kann. Der Speicher arbeitet nach dem gleichen Prinzip wie die AdKM (vgl. Punkt 4.1.4), der thermochemischen Energiespeicherung. Das Speichermedium wird zum Laden von heißer, trockener Luft mit 100–200 °C durchströmt. Zum Entladen benötigt man feuchte Luft mit einer Temperatur von 20–25 °C. Diese verlässt den Speicher warm und trocken. Idealerweise eignet sich ein derartiger Speicher zur Raumklimatisierung. Ein Speicher dieser Art ist seit mehreren Jahren in München in Betrieb. Die Beladung erfolgt in Schwachlastzeiten mittels Fernwärme bei 130 °C. Mit der gespeicherten Wärme wird ein Schulgebäude beheizt und ein angrenzender Jazzclub klimatisiert.

Für die Heizanwendung kann während der Adsorption die Adsorptionswärme und während der Desorption u. U. die Kondensationswärme genutzt werden. Für die Raumklimatisierung, die auf der Luftentfeuchtung beruht, kann nur während der Adsorption Nutzkälte bereitgestellt werden. (Hauer 2000)

Die Amortisationszeit ist stark von den unterschiedlichen Preisen für Fernwärme in Schwachlastzeiten und den erzielten Speicherzyklen abhängig. Beim installierten Speicher wird von 150 Heiz- und 100 Kühlzyklen gesprochen. Damit ergibt sich unter den dortigen Bedingungen eine Amortisationszeit von 6–7 Jahren.

4.4 Mobiler Kältetransport

Mittels mobiler Kältespeicher ist ein nicht leitungsgebundener Kältetransport realisierbar. Zeolithspeicher ermöglichen aufgrund der großen Speicherdichte einen mobilen Transport von Kälte. In jüngerer Zeit werden in verschiedenen Vorhaben auch die Möglichkeiten des Kältetransports mit Eis- oder Eisbreispeichern (Ice Slurry) untersucht. Der mobile Kältetransport stellt ebenso wie der mobile Wärmetransport noch keine am Markt etablierte Technik dar, über den Pilotbetrieb hinaus findet noch keine großtechnische Anwendung statt.

Bei einem mobilen Transport sind die Baumaßnahmen für die Containerstellplätze und Übergabestationen relativ gering, in Folge entstehen Emissionen durch den Transport der Container, die mit der Menge der gelieferten Wärme, also der Anzahl der Containerlieferungen, korrelieren.

Andererseits können durch das relativ geringe Investitionsvolumen kleinere Wärmequellen erschlossen werden, was ökologische wie ökonomische Vorteile bietet. Für die großen Wärmeerzeuger MVA nimmt der mobile Kältetransport eine untergeordnete Rolle ein, da nahezu alle MVA in ein Fernwärmenetz einspeisen und damit über Möglichkeiten der Verteilung ihrer Energie verfügen.

5 Thermisch betriebene Kälteerzeugung in der Praxis

Grundsätzlich können für MVA zwei Möglichkeiten zur Nutzung ihrer Wärme für die Erzeugung von Kälte unterschieden werden:

- die Installation einer zentralen Kälteerzeugereinheit, die mit Wärme aus der MVA Kälte erzeugt und diese über Kälteleitungen (Kältenetz) den Verbrauchern zur Verfügung stellt, und
- die Versorgung des Kälteverbrauchers mit thermischer Antriebsenergie über das Fernwärmenetz.

Daneben ist eine Kombination dieser beiden Systeme denkbar, z. B. die Versorgung einer zentralen Kälteerzeugungsanlage mit Wärme über eine Fernwärmeleitung (ggf. auch mit höherer Temperatur). Im Folgenden sollen Möglichkeiten, die sich den MVA hinsichtlich der Nutzung von Wärme für die Erzeugung von Kälte bieten, näher durchleuchtet werden.

5.1 Kältenetze

Der stark steigende Einsatz von Kälte motiviert Stadtwerke, verstärkt über technische und ökonomische Zukunftsstrategien für das Produkt „Kälte“ in ihren kommunalen Versorgungsnetzen nachzudenken.

5.1.1 Voraussetzungen

Klimakälte kann nicht immer am Ort des Bedarfs erzeugt und bereitgestellt werden, weil die erforderlichen Funktionsflächen nicht vorhanden sind oder weil der Lärmschutz dies verbietet. Auch die Möglichkeiten zur Optimierung der Erzeugung von Kälte an einer zentralen Anlage und zur Nutzung von Wärme aus Kraft-Wärme-Kopplung führen zu Überlegungen, zentral erzeugte Kälte über eigene Netze an Verbraucher abzusetzen. Zur Übertragung von Klimakälte in Form von Kaltwasser von einer Kältezentrale zu den Abnehmern mit Anlagen zur Klimatisierung oder Kühlung sind Fernkälteleitungen erforderlich.

Die Verteilung von Kälte über ein eigenes Leitungsnetz, ähnlich dem der Fernwärme, hat den Vorteil, dass für den Verbraucher Installation, Betrieb, Wartung und Bedienung der Kältemaschinen und der notwendigen Peripheriegeräte entfallen. Neben dem Raumgewinn durch das Wegfallen von Kältemaschine und Rückkühleinheiten können auch ästhetische Gründe den Aufbau von Fernkältenetzen bedingen. So wird z. B. die Realisierung des Fernkältenetzes in Paris u. a. damit begründet, dass aufgrund der Entscheidung der städtischen Verwaltung zum Erhalt des Stadtbildes Dachaufbauten und damit die erforderlichen Kühltürme kaum Chancen auf Genehmigung gehabt hätten (Schmid 2008).

Da mit der Größe der Kältemaschine deren Effektivität steigt, kann eine zentrale Erzeugung von Kälte energetische Vorteile erbringen. Gleichzeitig können in Kältenetze Speicher zum Ausgleich von Lastschwankungen optimal integriert, und somit die Effizienz des Gesamtsystems gesteigert werden. Kältenetze mit einer größeren Zahl von Abnehmern bieten den Vorteil, dass eine Vergleichmäßigung der Lastspitzen eintritt.

Den Vorteilen einer effizienten Erzeugung von Kälte stehen die Kosten für den Bau und Unterhalt von Kaltwasserleitungen gegenüber. Die Betriebskosten von Kältenetzen sind nämlich weniger von den Betriebskosten geprägt als von den Kosten für den Bau der Leitungen. Die Kosten für den Bau von Kalt-

wasserleitungssystemen hängen vor allem von der bisherigen Überbauung der Leitungstrasse und dem Leitungsquerschnitt ab. In Anlehnung an die spezifischen Baukosten von Nahwärmeleitungstrassen können für Leitungsquerschnitte im Bereich von 50–200 mm Nennweite Baukosten von 600–2.300 €/m veranschlagt werden.

Die WienEnergieFernwärme beziffert die Kosten für Kaltwassernetze gar mit 3.000 bis 4.000 Euro pro Laufmeter (umweltschutz.co.at 2006).

Aufgrund der hohen Investitionskosten für ein Kältenetz ist es für den wirtschaftlichen Betrieb von großer Bedeutung, eine möglichst hohe Auslastung zu erzielen. Bei der Klimatisierung von Gebäuden ist eine begrenzte saisonale Auslastung mit weniger als 500 Jahresbetriebsstunden (vgl. 3.2) üblich. Daher ist eine hohe Auslastung nur dann möglich, wenn Abnehmer mit ganzjährigem Kältebedarf, beispielsweise Abnehmer von Prozesskälte zur Kühlung von Lebensmitteln oder zur ganzjährigen Klimatisierung (Krankenhäuser), angeschlossen werden können.

Die Realisation von Kältenetzen ist wie bei Fernwärmenetzen davon abhängig, ob eine ausreichend hohe Anschluss- und Leistungsdichte vorliegt. Im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie zur Energieeffizienz bayerischer MVA durch Fernkälte konnte im Umfeld der MVA keine entsprechend hohe Bedarfsdichte ermittelt werden, die den Betrieb von eigenen umfangreicheren Fernkältenetzen zur Verteilung von Kälte rechtfertigen. Keiner der Betreiber der 15 befragten MVA und/oder der für die Verteilung zuständigen Stadtwerke sah Potenziale für die Realisierung eines Fernkältenetzes.

Allerdings existieren durchaus vom Umfang und bezogen auf die räumliche Ausdehnung begrenzte Nahkältenetze, bei denen eine überschaubare Anzahl von verschiedenen Unternehmen und Gebäuden von einer zentralen Station aus beliefert werden. Diese werden oft noch konventionell mit Kompressionskältemaschinen betrieben. So realisieren die Stadtwerke München in der Münchner Innenstadt mehrere Projekte für strombetriebene Nahkältenetze, die mit freier Kühlung ausgeführt werden.

Interessant können Kältenetze für den Absatz von Wärme aus MVA dann werden, wenn im unmittelbaren Umfeld der Verbrennungsanlage große Abnehmer vorhanden sind, die eine Neuinvestition in die Kühl- und Kältetechnik vornehmen. Ein möglicher Rahmen wäre z. B. die Ansiedlung eines Industrie- und Gewerbegebiets mit Großabnehmern, bei dem die Infrastruktur für ein Kältenetz bereits bei der Erschließung günstig bereitgestellt werden kann, sodass die Unternehmen auf eigene Investitionen in die Kälteerzeugung verzichten können.

5.1.2 Beispiele

Vorreiter in Sachen Fernkälte sind die Städte Paris, Amsterdam, Barcelona, sowie die skandinavischen Metropolen Oslo, Helsinki und Stockholm. Dort wurde zum Teil bereits seit Anfang der 80er-Jahre auf diesem Gebiet geforscht und realisiert. Den Hintergrund bildete der hohe Strombedarf an Sommermittagen, der durch Klimaanlage verursacht wurde. Zugleich litten die auf den Absatz von Wärme konzipierten Kraftwerke bei hohen Außentemperaturen unter der fehlenden Wärmeabnahme, da aufgrund der Überlastung der Kühler die Leistung gedrosselt werden musste. Daraus entstand der Ansatz, mit der Erzeugung von Kälte aus Wärme durch Sorptionstechnik beiden Problematiken gleichzeitig zu begegnen. Die Kälte wird dabei entweder zentral im Kraftwerk aus Wärme erzeugt und in Kaltwassernetzen verteilt oder bei Nutzung der vorhandenen Fernwärmenetze dezentral beim Verbraucher erzeugt.

Auch in Deutschland und Österreich werden in einigen Städten seit längerer Zeit Kältenetze zur Klimatisierung betrieben. Einige davon werden mit Wärme aus Heizkraftwerken betrieben, andere mit zentralen KoKM oder mit freier Kühlung über Grund- oder Flusswasser.

Chemnitz

Die Stadtwerke Chemnitz unterhalten seit längerer Zeit ein 4,3 Kilometer langes Kältenetz zur Klimatisierung. Die Erzeugung der Kälte erfolgt einmal über eine zentrale AbKM mit Prozesswärme aus dem Chemnitzer Heizkraftwerk, welche zur Abdeckung der Grundlast eingesetzt wird und den weitaus überwiegenden Teil der Gesamtkühlleistung bewältigt. Daneben werden zur Abdeckung von Spitzenlasten KoKM eingesetzt.

Das Leitungsnetz wird mit Temperaturen von 5 °C im Vorlauf und 13 °C im Rücklauf betrieben. 18 Übergabestationen versorgen Kaufhäuser, Bürogebäude, die Oper, die Universität und das Museum. In Chemnitz wurden in den letzten Jahren viele weitere Bürogebäude und Einkaufspassagen im Zuge der Innenstadtbebauung mit moderner Klimatechnik ausgerüstet und an das Fernkältenetz angeschlossen. Um dem Bedarfsanstieg gerecht zu werden, entschied man sich für den Einsatz eines Großkältespeichers. Die nachts oder in Schwachlastzeiten zur Verfügung stehende Leistung der nicht genutzten Kältemaschinen wird zur Beladung des Speichers verwendet und kann zur Spitzenlastdeckung abgerufen werden. Der Chemnitzer Kältespeicher besitzt eine Kapazität von 3.500 Kubikmetern. Damit können zusätzlich zur bestehenden Kälteleistung fünf Megawatt Kälteleistung über rund sieben Stunden hinweg abgerufen werden. (Stadtwerke Chemnitz AG)

Gera

In Gera wird mit 140 °C heißem Fernwärmedampf 6 °C kaltes Wasser zur Gebäudeklimatisierung erzeugt. Die Anlage wurde 1998 als Modellprojekt der Energieversorgung Gera GmbH (EGG) und des Fraunhofer Instituts in Betrieb genommen.

Derzeit nutzen mehrere Bürogebäude, ein Kinokomplex, das Stadtmuseum und das Kultur- und Kongresszentrum die Klimatisierung mittels Fernkälte. In der Kältestation sind zwei Kältemaschinen untergebracht: eine Dampfstrahlkältemaschine und eine Kompressionskältemaschine, die in Spitzenlastzeiten zugeschaltet wird. Beide zusammen haben eine Kälteleistung von 1,2 Megawatt. Die bereitgestellte Kälteleistung wird über ein Kaltwassernetz verteilt. Eine Erweiterung des Kältenetzes durch einen Kältespeicher ähnlich wie in Chemnitz wird überlegt. (Energieversorgung Gera GmbH 2008)

BMW München

Die SWM haben gemeinsam mit der BMW Group eine Fernkälteversorgung realisiert, die kaltes Grundwasser aus U-Bahn-Dükern als Kühlmittel nutzt. Mit der bereitgestellten Kälte wird das seit April 2004 in Betrieb befindliche Forschungs- und Innovationszentrum (FIZ) der BMW Group klimatisiert. Das Fernkältenetz funktioniert, indem Grundwasser als Wärmesenke benutzt und in einem geschlossenen Kreislauf zur Kühlung verwendet wird. In 182 unterirdischen Bauwerken, sogenannten Dükern, wird das anströmende Grundwasser gesammelt und unter den U-Bahn-Anlagen hindurchgeleitet. Aus acht dieser Düker im Bereich von U-Bahnhöfen sowie aus je zwei in konventioneller Bauweise errichtenden Brunnenanlagen wird das etwa 11-13 °C kalte Grundwasser entnommen und über eine circa 4,6 Kilometer lange Rohrleitung in das BMW FIZ transportiert. Nach dem „Kühleinsatz“ wird das auf etwa 17 °C erwärmte Wasser wieder in die Düker und somit in den Grundwasserkreislauf zurückgespeist. (Stadtwerke München)

Flughafen München: zentrale Fernwärme-/Fernkälteerzeugung

Für die Klimatisierung des Münchener Flughafens ist eine zentrale Fernwärme- und Fernkälteerzeugung installiert. Die Verteilung der Kälte wird mittels Fernkältenetz mit Temperaturen im Volauf von 6 °C und im Rücklauf von 14 °C bewerkstelligt. Die Grundlast an Kälte stellen zwei Single-Effect-AbKM mit je 1,8 MW und eine SE/DL-AbKM mit einer Kälteleistung von 3,0 MW zur Verfügung. Lastspitzen werden über KoKM und Speicher abgedeckt.

Das 130 °C heiße Wasser zum Antrieb der AbKM und zur Gebäudeheizung wird aus der Motorkühlung des BHKW, bestehend aus sieben Gas-Diesel-Aggregaten, bereitgestellt. (Rögelein und Partner Ingenieure)

Wien

In Wien befindet sich derzeit ein Fernkältenetz im Aufbau. Die Kälte wird an einer zentralen AbKM in der thermischen Abfallbehandlungsanlage Spittelau erzeugt und über ein Kältenetz verteilt.

Rund 20 bis 25 Millionen Euro pro Jahr will die WienEnergieFernwärme in den kommenden zehn Jahren in den Aufbau eines Fernkältenetzes investieren. In dieser Zeit sollen so rund 100 MW an Kälteleistung bereitgestellt werden können. Das gesamtösterreichische Fernkältepotenzial wird mit etwa 200–300 MW beziffert.

Die Vor- und Rücklauftemperaturen im Netz betragen 6 bzw. 16 °C. Es werden derzeit die ersten Großprojekte mit Fernkälte ausgestattet, beispielsweise der Gebäudekomplex „TownTown“. Die dort geplante Leistung beläuft sich auf rund 10 MW. Etwa zwei Drittel des Kühlungsbedarfs in TownTown lassen sich damit decken, den Rest decken konventionelle Klimaanlage. Weiterhin sollen das Allgemeine Krankenhaus und das Immobilienprojekt „Skyline“ angeschlossen werden. (umweltschutz.co.at 2006)

5.2 Kälte aus Fernwärme

5.2.1 Umsetzung

Wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, sind Anschlussdichte und -leistung nur selten so hoch, dass eine Versorgung über ein Kältenetz wirtschaftlich darstellbar ist.

Daneben besteht jedoch noch die Möglichkeit, Wärme aus der MVA über das bestehende Fernwärmenetz zum Kunden zu transportieren und dort für die Erzeugung von Kälte zu nutzen.

Für die dezentrale Erzeugung von Kälte mittels thermisch angetriebener Klima- bzw. Kältemaschinen stehen umfangreiche Fernwärmenetze zur Verfügung. Zwölf der 15 bayerischen MVA beliefern direkt oder indirekt städtische Fernwärmenetze mit Wärme, womit die Voraussetzungen dafür gegeben sind, dass Wärme aus der MVA für die Erzeugung von Kälte abgesetzt werden kann.

Anlagen zur Erzeugung von Kühl- und Klimakälte, die über die aus dem Fernwärmenetz bezogene Energie betrieben werden, sind bereits an mehreren Standorten in Bayern installiert.

Mittlerweile liegen vielfältige positive Betriebserfahrungen mit solchen Anlagen vor. Beispielsweise wird in Schweinfurt mit Wärme aus dem Gemeinschaftskraftwerk eine Absorptionskälteanlage am Standort der ZF Sachs betrieben und für die Gebäudekühlung genutzt.

Allerdings wurden bei der Befragung der 15 MVA auch einzelne Negativbeispiele genannt, bei denen Anlagen zurückgebaut wurden, da im Betrieb Probleme auftraten. Diese werden jedoch von Experten-seite auf ungenügende Planung und Auslegung oder auf ungünstige Betriebsbedingungen zurückgeführt.

5.2.2 Hindernisse

Eingeschränkt wird die fernwärmegebundene Erzeugung von Kälte dadurch, dass die Bestrebungen der Netzbetreiber dahin gehen, die Netztemperaturen im Sommer möglichst gering zu halten, um so die Leitungsverluste im Fernwärmenetz zu minimieren. Somit können konventionelle AbKM mit den vielerorts angestrebten Temperaturen im Sommer von unter 90 °C (teils sogar maximal 70 °C) im Vorlauf kaum mehr betrieben werden.

Ganz deutlich wirkt sich das Temperaturniveau auch beim Ersatz bestehender Dampfleitungen durch Heißwasserleitungen auf die Installation von thermisch angetriebenen Kältemaschinen aus. So wurden beispielsweise in München mit der Umstellung des innerstädtischen Dampfnetzes auf Heißwasser AbKM mit insgesamt etwa 5 MW installierter Leistung abgebaut und durch KoKM ersetzt.

Die Hindernisse bei der Umsetzung von Kälte aus Fernwärme stehen zu einem großen Teil in direktem Zusammenhang mit den Nachteilen wärmegetriebener Kältemaschinen. Bei der Kälteerzeugung aus Fernwärme sind der höhere Platzbedarf einer Absorptionskältemaschine und deren aufwendigere Rückkühleinheit im Vergleich zu einer konventionellen Kompressionskälteanlage zu berücksichtigen. Insbesondere sind dabei das Platzangebot zur Aufstellung der AKM im betroffenen Gebäude und auch die Tragfähigkeit der Baukonstruktion zur Aufnahme der Traglasten zu berücksichtigen.

Ein weiteres Problem ist die antriebsseitig geringe Spreizung von AKM. Bei einer Fernwärmetemperatur von 100 °C beträgt der Rücklauf bei einer einfachen LiBr-Anlage (vgl. Kap. 4.1.3) nur etwa 80 °C. Dies bedingt bei der geforderten Leitung eine entsprechend hohe Durchflussmenge, auf die die Fernwärmeleitung ausgelegt sein muss. Bei der Entnahme aus Netzverzweigungen oder Hausanschlüssen mit zu geringer Kapazität können daher Erweiterungsmaßnahmen erforderlich werden, die sich sogar auf größere Teile des Netzes beziehen können.

Von großem Einfluss auf die Umsetzbarkeit eines höheren Wärmeabsatzes außerhalb der MVA ist die Organisationsstruktur zwischen Wärmeerzeuger und Endkunde. Oftmals ist der Betreiber der MVA nicht Netzbetreiber und steht somit nicht mit den Endkunden in Kontakt. In diesen Fällen kann es für die MVA schwierig sein, auf die Steigerung des Wärmeabsatzes größeren Einfluss zu nehmen.

Darüber hinaus sind vielerorts die Stadtwerke zugleich Anbieter von Strom und Erdgas, womit Fernwärme mit diesen Energieträgern konkurriert. Der Energieversorger hat oftmals kein Interesse daran, günstig Fernwärme zur Kälteerzeugung bereitzustellen, wenn alternativ Strom für KoKM abgesetzt werden kann.

Von den Teilnehmern eines Expertenworkshops am Umweltbundesamt wurde die Situation wie folgt beschrieben: „In der Praxis stellen sich eine Vielzahl von Problemen im Zusammenhang mit der Einbindung von MVA als „Müllheizkraftwerk“ in die allgemeine Energieversorgung (für Betriebe und/oder private Haushalte). Für Deutschland wurde das Problem gesehen, dass oft Energie aus der MVA nicht abgenommen wird, da konkurrierende Energieerzeuger vorhanden sind. Ein weiteres Hindernis der Abnahme von Wärme aus MVA liegt darin, dass in vielen Fällen kein Fernwärmenetz existiert oder bei

mehreren Einspeisern das Fernwärmenetz zu klein ist. Problematisch können hier die möglicherweise unterschiedlichen Interessen des Betreibers des Fernwärmenetzes und der MVA sein." (UBA 2006)

Anders stellt sich die Situation dar, wenn die MVA ein integraler Bestandteil der lokalen Energieversorgung ist und/oder das Fernwärmenetz extra für die MVA gelegt wurde. Hierfür gibt es bei den bayerischen MVA ebenso Beispiele wie dafür, dass das Wärmenetz vom Zweckverband betrieben wird. Hier liegt es im Handlungsbereich des Zweckverbands, an einer gezielten Vermarktung der Wärme zu arbeiten und auch gezielt Akquise für den Absatz von Kälte zu betreiben. In einzelnen Fällen wurde vonseiten der MVA bzw. des Zweckverbands so in der Vergangenheit ein umfangreicheres Know-how bzgl. der Erzeugung von Kälte aufgebaut, welches nun auch dem Kunden zur Verfügung gestellt wird. Damit lassen sich Probleme durch falsche oder mangelhafte Planung, die wiederum zu einem negativen Image führen, stark einschränken.

Haben die MVA oder der Zweckverband direkten Einfluss auf den Absatz der Fernwärme, können auch finanzielle Instrumente genutzt werden, um z. B. Fernwärme in Schwachlastzeiten für die Kälteerzeugung attraktiv zu machen.

5.3 Nutzung bestehender Leitungssysteme

Die Errichtung der Infrastrukturen für die Nutzung leitungsgebundener Kälte ist wie die Errichtung von Fernwärmenetzen mit erheblichen Kosten verbunden. Die Realisation von Kältenetzen könnte bei Vorhandensein geeigneter nutzbarer Leitungen mitunter unter deutlich günstigeren wirtschaftlichen Rahmenbedingungen stattfinden.

Denkbar wäre die Möglichkeit der Nutzung bereits vorhandener Pipelinesysteme, z. B. aus der Erdölindustrie oder nicht mehr genutzter Militärfunkinfrastruktur.

Im Rahmen der mit diesem Bericht dokumentierten Untersuchung konnten in Bayern keine Standorte an MVA identifiziert werden, bei welchen eine entsprechende Nutzung vorhandener Pipelines möglich wäre. Eingeschränkt wird die Nutzung von Pipelines dadurch, dass diese in der Regel kein Netzsystem mit Vor- und Rücklauf darstellen, sondern der vorgesehene Medientransport nur in Richtung des Abnehmers erfolgt. Der erforderliche zweite Leitungsstrang ist in der Regel nicht vorhanden. Daneben sind die Anforderungen im Pipelinesystem bezüglich der Isolierung der Leitungen geringer. Bei Kälteleitungen weisen die Vorlaufleitungen mit Temperaturen des transportierten Mediums von gebräuchlichen 6 °C einen Isolationsgrad auf, der ähnlich oder gleich dem von Fernwärmeleitungen ist.

Von größerer Bedeutung als die Nutzung vorhandener Pipelinesysteme könnte die zielgerichtete Beachtung von Trassenbautätigkeiten hinsichtlich der Erweiterung um Leitungen für Fernwärme oder Fernkälte transport sein. Üblicherweise erfolgen der Transport und Verteilung von Elektrizität, Wärme, Kälte, Öl, Gas, Wasser und Abwasser weitgehend in separaten Netzen. Diese Infrastruktur bedarf laufend großer Investitionen für Sanierung und Erweiterung. Hier besteht ein großes Potenzial für die effizientere Nutzung der zur Verfügung stehenden Ressourcen. Durch die Verbindung und Zusammenlegung dieser Leitungssysteme könnten Bau- und Unterhaltskosten reduziert werden.

5.4 Ökologische Parameter

Die Kälteerzeugung hat einen nicht unerheblichen Anteil am gesamtdeutschen Energieverbrauch (vgl. Kap. 3). Insbesondere der Anteil von rund 14 % am Verbrauch elektrischer Energie ist enorm.

In der Senkung des Verbrauchs elektrischer Energie werden vielfach große Potenziale gesehen und deshalb wird allgemein auf die Möglichkeiten bei der Nutzung von Abwärme zur Bereitstellung von Kälte hingewiesen. Insbesondere hatte z. B. ein Kolloquium für Kunststoffverarbeiter das Thema „Nutzung von Abwärme zur Kälteerzeugung“ (Franzke 2007). Dabei wird auch auf die Kostenvorteile Bezug genommen, „(...) insbesondere die Möglichkeit, sonst ungenutzte (und billige) Abwärme zur Kälteerzeugung zu verwenden, lässt die Absorptionskältetechnik zu einer über die Betriebskosten attraktiven Alternative zu den „üblichen“ Kälteerzeugungsverfahren werden“ (Treffpunkt Kälte 2009). Zumeist wird jedoch mehr oder weniger direkt auf die Potenziale zur Reduzierung des Primärenergieeinsatzes durch die Erzeugung von Kälte mittels thermisch getriebener Kältemaschinen hingewiesen (z. B. BINE 2006; Deutscher Bundestag 2009).

Diese Potenziale bieten sich dann, wenn durch den Einsatz von AKM Strom für den Betrieb von Kompressionskältemaschinen substituiert wird, der sonst in konventionellen Kraftwerken erzeugt werden müsste. Die Substitution von Strom aus fossil befeuerten Kraftwerken bietet das Potenzial einer direkten Reduzierung des CO₂-Ausstoßes. Die WienEnergie (2008) beschreibt diesen Sachverhalt so: „Kompressionskältemaschinen, die mit Strom angetrieben werden, sind in der Kälteerzeugung sehr effizient, bringen jedoch das Problem mit sich, dass selbst in einem Wasserkraftland wie Österreich bei steigendem Verbrauch Strom zusätzlich in kalorischen Kraftwerken erzeugt werden muss, was zu einem höheren Verbrauch an fossilen Brennstoffen führt und damit auch zu wesentlich höheren Emissionen.“

Die Nutzung von Absorptionsanlagen zur Kälteerzeugung wird unter dem Gesichtspunkt ökologischer Vorteile vor allem im Zusammenhang mit Kraft-Wärme-Kopplung und der dabei anfallenden Abwärme propagiert.

Um jedoch die ökologische Wertigkeit der thermisch angetriebenen Kälteerzeugung beurteilen zu können, ist es wichtig, die Herkunft der Wärme und die Umweltwirkungen bei deren Erzeugung näher zu untersuchen. Die Verwendung von Abwärme suggeriert hier generell, dass Wärme zum Einsatz kommt, deren Verwendung mit keinerlei Nachteil für die Umwelt verbunden ist. So z. B. auch für das Fernwärmenetz Chemnitz: „Die Verantwortlichen in Chemnitz sind mit dem erweiterten Netz sehr zufrieden: Im ersten Betriebsjahr erfolgte die Kälteerzeugung ausschließlich aus Abwärme.“ (Mack 2009) Auch im Zusammenhang der Kälteerzeugung aus Wärme von Müllverbrennungsanlagen wird zumeist von Abwärme gesprochen - wie z. B. für das Fernkältenetz in Wien: „Es wird also reine Abwärme für die Produktion von Fernkälte genutzt“ (WienEnergie 2008) - ohne dass auf die ökologischen Kosten der Abwärmeerzeugung eingegangen wird.

Wie in Abschnitt 2.2 dargestellt, ist jedoch die Auskopplung von Wärme an einer MVA mit Kraft-Wärme-Kopplung mit einem Verlust bei der Stromerzeugung verbunden, die mit der Stromverlustziffer dargestellt wird. Die Nutzung von Wärme und damit die Substitution von Strom zur Erzeugung von Kälte sind insofern nicht ohne Weiteres mit einem ökologischen Gewinn verbunden.

Deshalb sollen die nachfolgenden Ausführungen die ökologischen Faktoren im Zusammenhang mit der Bereitstellung von Kälte durch fernwärmegetriebene Aggregate aufzeigen. Von Bedeutung ist immer die einzelfallbezogene Diskussion effizienterer Methoden zur Erzeugung, aber auch zur sinnvollen Anwendung von Fernwärme für die Kälteerzeugung. In die Betrachtung muss dabei auch der Rahmen der Vermeidung maschinell erzeugter Kompressionskälte aufgenommen werden.

Im Folgenden wird ein beispielhafter Vergleich der energetischen Bilanz einer fernwärmegetriebenen Absorptionskältemaschine mit einer strombetriebenen Kompressionskältemaschine dargestellt. Dieser kann bei einer MVA mit einem im Sommer schlecht ausgelasteten Fernwärmenetz überschlüssig über die Bilanz der elektrischen Energien geführt werden. Die ausgekoppelte Wärme führt zwar zu einem Verlust bei der Stromerzeugung, eine weitere Nutzung der Wärme ist im Sommer jedoch nicht möglich, da keine potenziellen Abnehmer vorhanden sind. Das heißt, die Auskopplung der Wärme ist in der Energiebilanz allein mit der Erzeugung einer gleichen Menge an Strom an anderer Stelle gegenzurechnen.

Betrachtet werden der Betrieb einer KoKM und einer AbKM, welche jeweils 1 MWh Kälte bereitstellen. Bei einem COP von 4 für die KoKM müssen für 1 MWh Kälte 0,25 MWh an Strom aufgewendet werden. Die thermische Energie für den Antrieb der AbKM muss nicht angerechnet werden. Die Stromverlustziffer (vgl. Kap. 2.2) der MVA beträgt 0,13; damit wird bei einer Auskopplung von Wärme für den Antrieb der AbKM die Produktion von 0,13 MWh an elektrischer Energie an anderer Stelle erforderlich. Die Hilfsenergie für den Antrieb von Pumpen und Ventilatoren beträgt rund 3 % der thermischen Antriebsleistung einer AbKM.

Es wird Kaltwasser mit einer Temperatur von 10 °C mit einer einstufigen warmwasserbetriebenen AbKM bereitgestellt. Die Vorlauftemperatur des Warmwassers beträgt 90 °C. Die Kühlturmleistung beträgt 2,4 MW.

Tabelle 5-1: Beispielhafte Gegenüberstellung des Bedarfs an elektrischer Energie von KoKM und AbKM

	KoKM	AbKM	Einheit
COP	4	0,75	(-)
Elektrische Energie für 1 MWh Kälte	0,25		MWh
Bedarf thermische Energie		1,33	MWh
Anrechenbare thermische Energie für 1 MWh Kälte		0	MWh
Verlust an elektrischer Energie ²	(-)	0,17	MWh (Strom)
Hilfsenergie ³	(-)	0,03	MWh (Strom)
Gesamt	0,25	0,20	

In Tabelle 5-1 zeigt sich unter den angenommenen Bedingungen ein Vorteil für die Erzeugung von Kälte aus Wärme.

² Stromverlustziffer zur Erzeugung thermischer Energie: 0,15

³ Hilfsenergie zum Betrieb der AKM: 2,5 % der Antriebsleistung

Jedoch variieren je nach eingesetzter Technik die dargestellten Parameter und können so zu einem größeren Vorteil führen oder den Vorteil auch aufheben. Beim Einsatz von fernwärmegetriebenen Sorptionskältemaschinen ist es deshalb von Bedeutung, dass für den Betrieb ein möglichst geringer Bedarf an elektrischer Hilfsenergie besteht. Gleichzeitig ist der Einsatz von Sorptionskälte besonders dort relevant, wo die Wärmeauskopplung an der MVA mit niederen Stromverlustziffern verbunden ist.

In besonderem Maße könnte die Nutzung „reiner Abwärme“ den ökologischen Vorteil von thermisch getriebenen Kältemaschinen erhöhen, bei der MVA wäre dies z. B. die Nutzung von zumindest einem Teil der Kondensationsabwärme. Theoretisch wäre dies z. B. bei einer Absenkung der Rücklauf-temperatur im Fernwärmenetz durch eine entsprechende Temperaturspreizung an der AKM unter die Kondensationstemperatur und die Aufheizung an der MVA durch Kondensationsabwärme möglich. Denkbar wäre bei einem entsprechenden Kühlbedarf im Umfeld einer MVA, dass über ein Nahwärmenetz Kondensationsabwärme (die ggf. zum Teil mit ausgekoppelter Wärme auf ein höheres Temperaturniveau gebracht wird) an eine AKM mit einer sehr niederen Vorlauf-temperatur geliefert wird.

6 Beispielhafte Analyse einer fiktiven MVA

Die Landschaft der Energieerzeugungssysteme und der Energieabnehmerstruktur an den bayerischen MVA stellt sich sehr heterogen dar. Aufgrund der sehr individuellen Strukturen können allgemein übertragbare Aussagen zur Wirtschaftlichkeit und technischen Machbarkeit nicht gegeben werden.

Um allerdings eine Einschätzung über die Machbarkeit der Fernkälte- und Klimakälteerzeugung zu geben, sollen anhand einer fiktiven MVA die Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung und Fernkältenutzung aufgezeigt werden. Hierzu sollen typische Rahmenbedingungen festgelegt und Szenarien entworfen werden, welche beispielhaft berechnet und dargestellt werden. Die Szenarien sind dabei nicht an konkrete Anlagen angelehnt, sondern versuchen die Ausprägungen verschiedener Anlagenkonzepte zu berücksichtigen.

6.1 Definition einer fiktiven MVA und ihrer Umgebung

MHKW Wärmestadt in Bayern

Die Anlage besitzt zwei Ofenlinien für Haus und Sperrmüll, in denen pro Jahr 240.000 t mit einem mittleren Heizwert von 11.000 kJ/kg verbrannt werden. Daraus werden im Mittel 75 t/h Dampf mit den Parametern 400 °C, 40 bar produziert. Mit einer durchschnittlichen Betriebsdauer von 7.500 h werden so pro Jahr 560.000 t Dampf erzeugt. Die Verstromung erfolgt in zwei baugleichen Entnahmekondensationsturbinen mit je 11 MW Nennleistung. Zur Wärmeauskopplung erfolgt eine Dampfen-nahme bei 4 bar. Die Wärme wird über Heizkondensatoren (HEIKO) dem Fernwärmenetz mit maximal 145 °C zur Verfügung gestellt. Der Abdampf der Turbinen wird bei einer Temperatur von 60 °C in Luftkondensatoren (LUKO) kondensiert. Bei Kondensationsbetrieb leisten die Turbinen im Mittel je 9 MW. Bei maximaler Dampfen-nahme reduziert sich die Leistung auf je 5 MW. Über die HEIKO können in diesem Fall maximal 50 MW abgeführt werden. Das vereinfachte Dampfschema der Anlage ist in Abbildung 6-1 dargestellt.

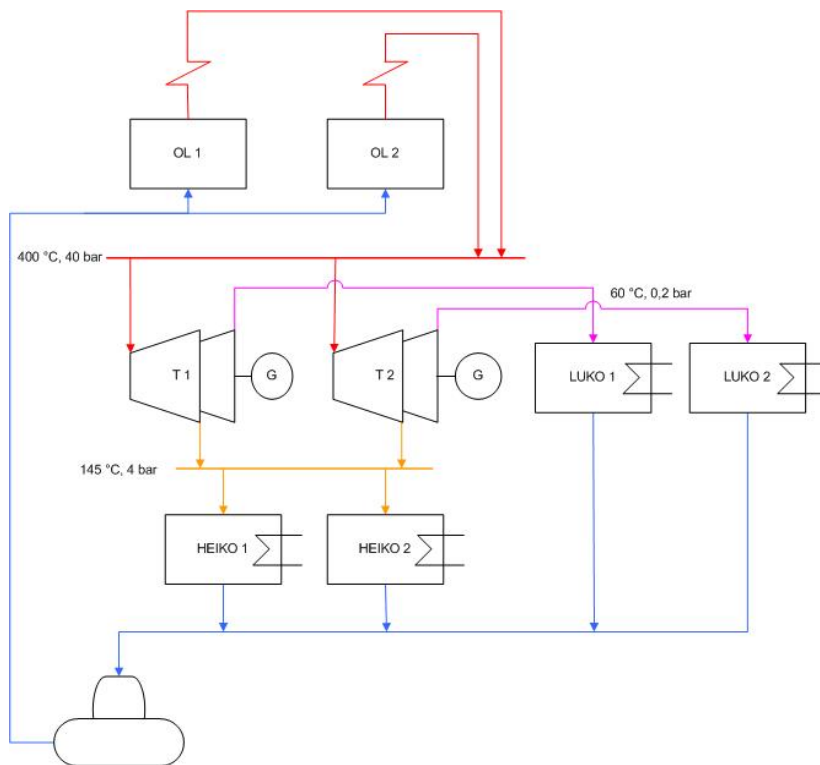


Abbildung 6-1: Vereinfachtes Dampfschema MVA Wärmestadt

Die MVA liegt am Stadtrand, ca. 5 km von der Ortsmitte entfernt. Das Fernwärmenetz im Innenstadtbereich gehört den Stadtwerken und wird von diesen betrieben.

Der nordöstliche Teil des Netzes mit den Anschlüssen eines Einkaufszentrums sowie mehrerer kleiner und mittelständischer Unternehmen wird vom Zweckverband betrieben, der für diese Anschlüsse die Kundenbetreuung und Akquise übernimmt. Das Netz wird im Winter mit einer garantierten Temperatur von 130 °C betrieben, im Sommer wird die Temperatur auf 80 °C reduziert, um Leitungsverluste zu minimieren.

An das Wärmenetz sind neben zahlreichen Hausanschlüssen Produktionsbetriebe und das städtische Krankenhaus an die Fernwärme angeschlossen. Zur Redundanz und Spitzenlastdeckung ist das HKW Stadtmitte ins Fernwärmenetz integriert. Der Lageplan von Wärmestadt ist in Abbildung 6-2 dargestellt.

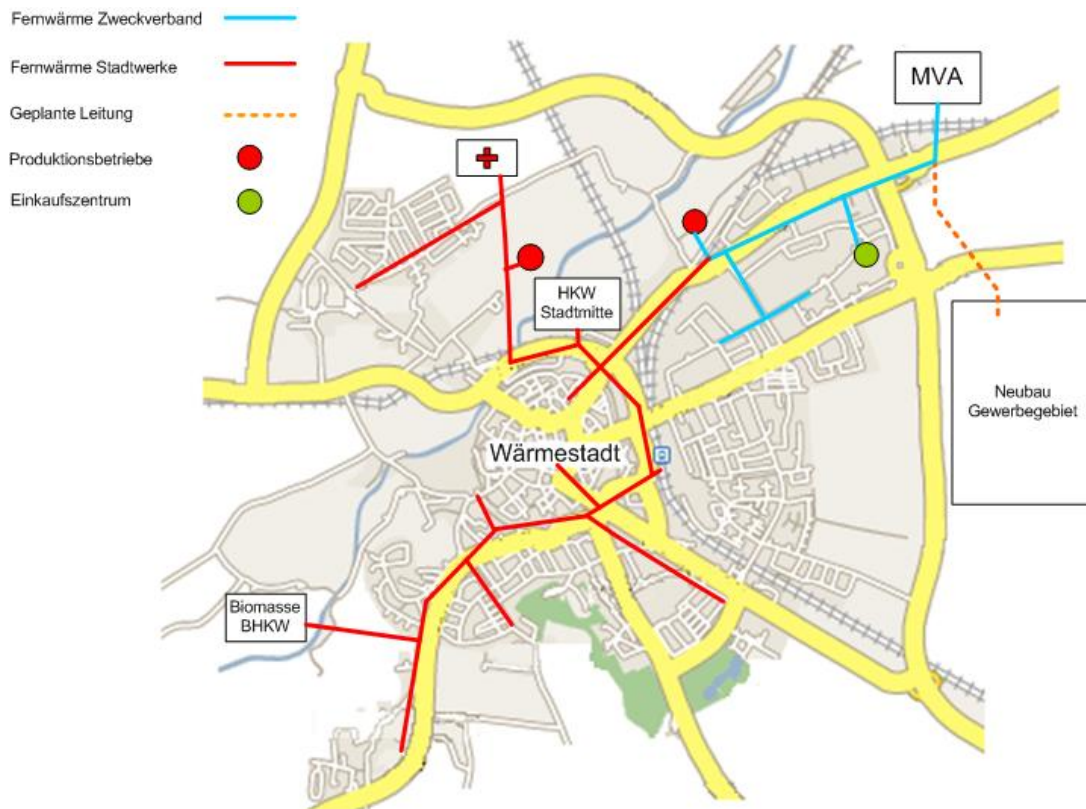


Abbildung 6-2: Lageplan Wärmestadt

Aufgrund aktueller Gesetzgebung und wirtschaftlicher Rahmenbedingungen haben sich 2008 gravierende Änderungen für die Fernwärmeversorgung ergeben:

- Im Zuge der KWK-Förderung hat ein Großabnehmer beschlossen, sein vorhandenes Notstromaggregat zum Gasturbinen-BHKW umzubauen und somit Strom und Wärme selbst zu erzeugen. Die Turbine leistet 3 MW elektrisch. 6 MW können an Prozesswärme ausgekoppelt werden.
- Das im Zuge der EEG-Gesetzgebung errichtete Biomasseheizwerk der Stadtwerke speist seit November 2007 ins Fernwärmenetz ein. Die Feuerleistung beträgt 8 MW.

Diese Änderungen führen dazu, dass im Sommer die Grundlastversorgung des Fernwärmenetzes durch das Biomasseheizwerk sichergestellt wird. Lediglich im Winter und in der Übergangszeit wird noch Wärme von der MVA abgenommen, während vorher die MVA die Grundlast an Wärme einspeiste.

Gleichzeitig verzeichnen die Stadtwerke einen jährlich steigenden Strombedarf an heißen Sommertagen, der vor allem auf die zunehmende Zahl von Klimageräten in Geschäftsgebäuden zurückzuführen ist.

Potenziale für Wärmeabsatz:

- In Nähe der MVA (1 km) wird ein Gewerbegebiet erschlossen.
- Einkaufszentrum in 1 km Entfernung mit Anschluss an Fernwärme vorhanden, zentrale KoKM zur Klimatisierung
- Gärtnerei für Nutzung von Niedertemperaturabwärme

6.2 Analyse der ökonomischen Faktoren und Wirtschaftlichkeitsberechnung

Um die Absatzmöglichkeiten von Fernwärme zur Kälteerzeugung oder Fernkälte besser einschätzen zu können, soll die Kälteerzeugung mit Wärme aus der MVA von folgenden Standpunkten aus betrachtet werden. Einerseits erfolgt die Betrachtung aus der Perspektive des Energieerzeugers, in diesem Fall der MVA. Am konstruierten Beispiel sollen die Gesteungskosten für Kälte nachgezeichnet werden. Auf der anderen Seite soll die Position des Kälteverbrauchers dargestellt und damit aufgezeigt werden, unter welchen Rahmenbedingungen eine Umstellung der Kühlung von KoKM auf AKM sinnvoll erscheint.

Energieerzeuger

Im konstruierten Fall setzt die MVA im Sommer kaum Wärme ab. Die Turbinen werden nahezu vollständig im Kondensationsbetrieb gefahren. Als Grenzkosten für die Wärmeabgabe im Sommer soll die Ertragsminderung durch den Verlust an elektrischer Leistung durch die Auskopplung von Wärme angesetzt werden.

Vereinfacht soll eine Stromverlustsziffer von $\vartheta = 0,15$ angenommen werden (vgl. 2.2). Damit reduziert sich die Stromerzeugung pro MWh Wärme um 0,15 MWh Strom. Bei einer angenommenen Einspeisevergütung von 44 €/MWh ergibt sich für die ausgekoppelte Wärme ein Mindestpreis von 6,6 €/MWh. Es wird angenommen, dass bei der Auskopplung der Wärme aufgewandte Hilfsenergien für Pumpen etc. durch die Reduzierung des Ventilatorbetriebs am LUKO ausgeglichen werden. Im konstruierten Beispiel kann sich unter der Annahme bereits vorhandener Infrastruktur zur Wärmeauskopplung und Wärmenutzung ab dem dargestellten Preis von 6,6 €/MWh ein wirtschaftlicher Vorteil für die MVA ergeben.

Energieverbraucher

Als Referenz für die Gesteungskosten für Klimakälte dient die KoKM als die am häufigsten eingesetzte Technologie.

Bei einem Einkaufszentrum, das zur Beheizung und Brauchwassererwärmung bereits an die FW-Leitung angeschlossen ist, sind Ersatzinvestitionen bei der Klimaanlage fällig. Die Kälteerzeugung erfolgt über eine zentrale KoKM mit 1 MW Kälteleistung.

Für die Umsetzbarkeit einer AKM entscheidend sind der für die Kältemaschine zur Verfügung stehende Raum im Gebäude und die zum Betrieb zur Verfügung stehende Temperatur von mindestens 80 °C. Beides soll in der Betrachtung vorausgesetzt werden.

In Tabelle 6-1 werden eine KoKM und eine AbKM verglichen. Bedingt durch die großen Unterschiede bei den Investitionskosten für die anlagentechnische Ausstattung hängen die Gestehungskosten für Kälte neben den Kosten für die Antriebsenergien im Wesentlichen von der Abschreibungsdauer ab. Für AKM wird im Allgemeinen eine deutlich höhere Lebenserwartung bzw. Nutzungsdauer angegeben, da sie keine beweglichen Teile wie Kolben etc. aufweisen und damit sehr verschleißarm sind. Damit können die Abschreibungszeiten für AKM entsprechend höher angesetzt werden. Allerdings setzen gewerbliche Unternehmen in Wirtschaftlichkeitsvergleichen heute in der Regel deutlich kürzere Abschreibungszeiträume an.

Die Absorptionskältemaschine wird bei Antriebstemperaturen von 95 °C im Vorlauf und 75 °C im Rücklauf betrieben, die Kühlwassertemperatur beträgt im Vorlauf 7 °C, im Rücklauf 12 °C. Die elektrische Leistung für das AbKM-Aggregat (Lösemittelpumpe) beträgt 5 kW, die für den zugehörigen Kühlturm 40 kW. Der Kaltwasserstrom beträgt 126 m³/h, die Umwälzleistung an den Kühlturm 293m³/h. Die elektrische Leistung für den Kühlturm der KoKM beträgt 30 kW.

Die Investitionskosten betragen in dem berechneten Beispiel für das AbKM-Aggregat 125.000 €, für den Kühlturm 50.000 €. Die Investitionskosten für das KoKM-Aggregat werden mit 75.000 €, für den Kühlturm mit 40.000 € angesetzt.

In der folgenden Tabelle werden die Annahmen für die Betriebsparameter dargestellt, bzgl. der Finanzierung wird für beide Systeme derselbe Abschreibungszeitraum von 15 Jahren gewählt. Für die AbKM wird ein mittlerer bis guter Leistungskoeffizient von 0,8 angesetzt, bei der KoKM wird von einem COP von 3,5 ausgegangen.

Für die Fernwärmeabnahme wird kein Leistungspreis angesetzt; zu einem Teil geht hier die Argumentation von Fernwärmenetzbetreibern dahin, dass der Leistungspreis nur für die im Winter abgenommene Wärme berechnet werde.

Unter den getroffenen Annahmen bestehen gleiche Kältegestehungskosten für beide Aggregate, wenn die Wärmekosten 30 €/MWh betragen.

Tabelle 6-1: Spezifische Kosten für Kälte am Beispiel MVA Wärmestadt

Vergleich von AbKM und KoKM			
	AbKM	KoKM	Einheit
Leistung	1	1	MW
Volllaststunden	500	500	h
Kälte	500	500	MWh
Investition	175.000	115.000	€
Annuität 5 %, 15 a	16.860	11.079	€/a
COP	0,8	3,5	

Vergleich von AbKM und KoKM			
Antriebsenergie	Wärme	Strom	
Anschlussleistung	1,25	0,32	MW
Bezogene Energie	625	160	MWh
Leistungspreis		15.000	€/a
Arbeitspreis	30	70	€/MWh
Energiekosten Antr. ges.	18.750	26.200	€/a
Hilfsenergie AbKM	Strom		
Anschlussleistung	0,045		MW
Bezogene Energie	23		MWh
Grundpreis	70		€/a
Arbeitspreis	70		€/MWh
Energiekosten Hilfs. ges.	1645	0	€/a
Gestehungspreis Kälte	75	75	€/MWh

Der Preis für die erzeugte kWh Kälte hängt von der Höhe der Investitionskosten, der Abschreibungsdauer, den Betriebsstunden, den Energiekosten für die eingesetzte Fernwärme und den Kosten der elektrischen Energie ab.

In Abbildung 6-3 wird der Einfluss des Abschreibungszeitraums und des angesetzten Zinses auf die Kältegestehungskosten dargestellt.

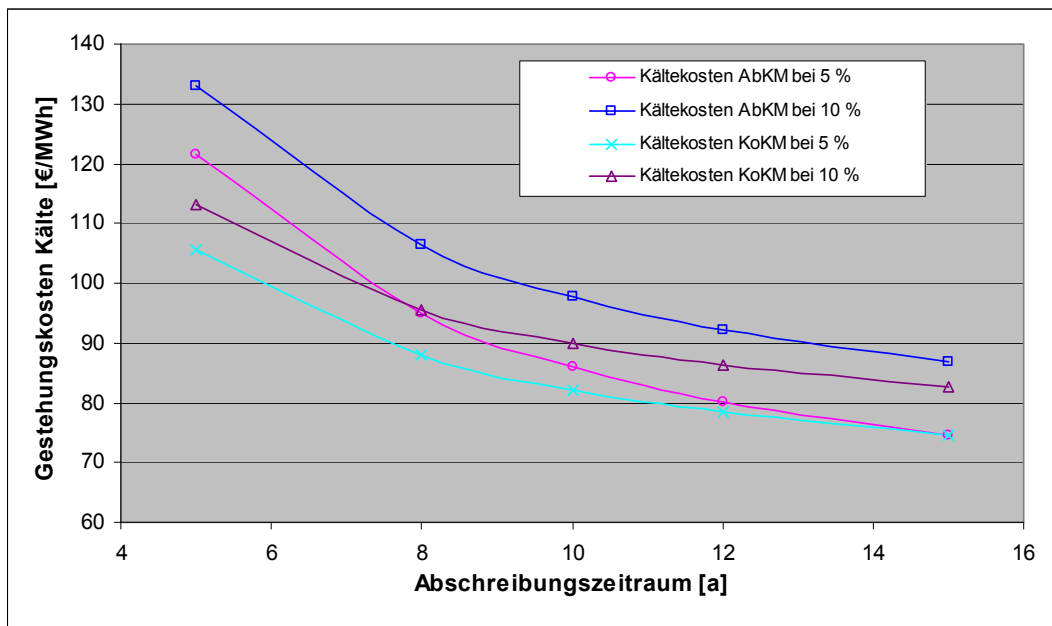


Abbildung 6-3: Kältegestehungskosten in Abhängigkeit von Abschreibungszeitraum und Zinssatz

Die Abbildung 6-3 zeigt, dass die Kältegestehungskosten bei AbKM aufgrund der deutlich höheren Investitionskosten stärker vom angesetzten Amortisationszeitraum beeinflusst werden und bei langen Amortisationszeiträumen deutlich abnehmen. Im dargestellten Beispiel liegen bei Wärmekosten von 30 €/MWh und Strompreisen von 70 €/MWh die Gestehungskosten der Kälte ab einem Abschreibungszeitraum von 15 Jahren und einem angesetzten Zinssatz von 5 % gleichauf mit denen der KoKM.

Die Abschreibungskosten führen bei der AbKM aufgrund der hohen Investitionssummen im dargestellten Beispiel bei 500 Betriebsstunden zu einem relativ hohen Sockelbetrag bei den Gestehungskosten, der in dem dargestellten Beispiel knapp 34 €/MWh bei der AbKM gegenüber 22 € pro MWh bei der KoKM beträgt. Allerdings liegt, bedingt durch den fixen Leistungspreis, der Gesamtsockelbetrag für die KoKM insgesamt deutlich höher. Der umgelegte Arbeitspreis liegt bei der KoKM pro MWh Kälte bei 22,5 €.

Die Veränderung der Betriebsstunden wirkt sich aufgrund der hohen Sockelbeträge sehr deutlich auf die Gestehungskosten aus, wie Abbildung 6-4 zeigt. Der Verlauf der Kurve überschneidet sich für das dargestellte Beispiel für die AbKM und die KoKM.

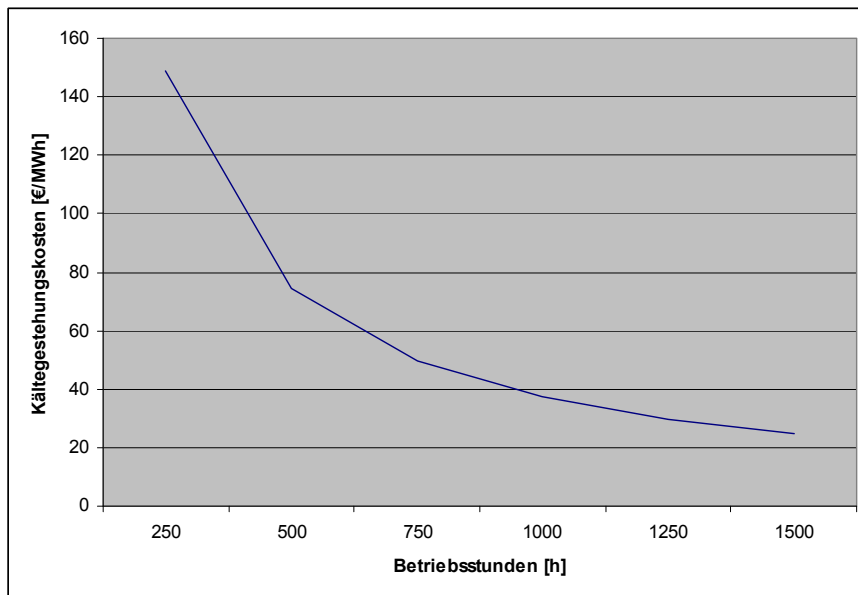


Abbildung 6-4: Kältegestehungskosten in Abhängigkeit von den Betriebsstunden

Wie sich der Preis für die bezogene Fernwärme auf den Vergleich der AbKM mit einer KoKM auswirkt, wird in Abbildung 6-5 dargestellt.

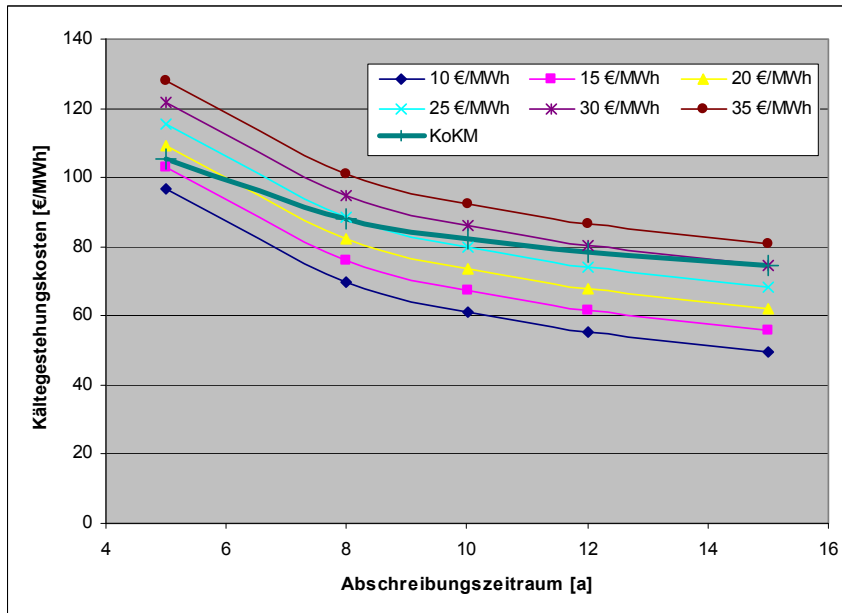


Abbildung 6-5: Einfluss der Wärmekosten auf den Vergleich AbKM und KoKM bei 500 Betriebsstunden

Für die in Abbildung 6-5 dargestellten Betriebsparameter ergibt sich das gleiche Ergebnis für die Kältegestehungskosten bei 30 €/MWh Wärme und einem Abschreibungszeitraum von 15 Jahren. Bei Wärmekosten von 25 €/MWh ist die gleiche Wirtschaftlichkeit bereits bei einem Abschreibungszeitraum von rund acht Jahren gegeben.

Wird, wie oft in der Fachliteratur angeführt, der Abschreibungszeitraum für die KoKM kürzer als der einer AbKM angesetzt, ergeben sich günstigere Bedingungen für die AbKM. Entscheidenden Einfluss auf den Wirtschaftlichkeitsvergleich nehmen die Preise für den Strombezug, aufgrund des deutlich

höheren Stromverbrauchs von KoKM wirken sich Preiserhöhungen beim Strombezug deutlich nachteilig für KoKM aus.

In Abbildung 6-6 wird für das in Tabelle 6-1 aufgezeigte Beispiel auf die Strompreisentwicklungen der vergangenen Jahre eingegangen, indem der Arbeitspreis pro MWh Strom von 50 € bis 100 € variiert wird. Dies entspricht Preissteigerungen, wie sie zwischen Januar 2002 und Juni 2008 zu verzeichnen waren (dort allerdings sogar 236 %, siehe Abbildungen zum Strompreisindex und Strompreis im Anhang).

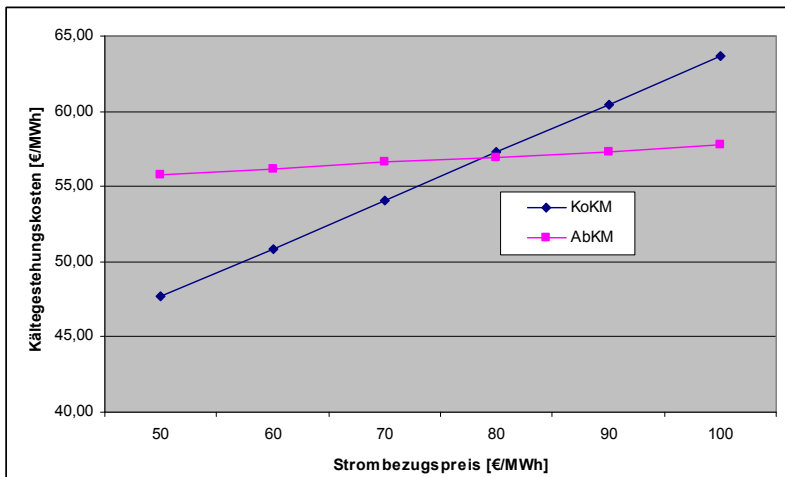


Abbildung 6-6: Einfluss des Strompreises auf den Vergleich AbKM und KoKM

Bei einer Erhöhung der Stromkosten erlangt im dargestellten Beispiel die AbKM ab Strompreisen von 80 €/MWh sehr schnell einen klaren wirtschaftlichen Vorteil.

In Abbildung 6-7 wird der Einfluss des COP bei der AbKM auf die Kältegestehungskosten dargestellt.

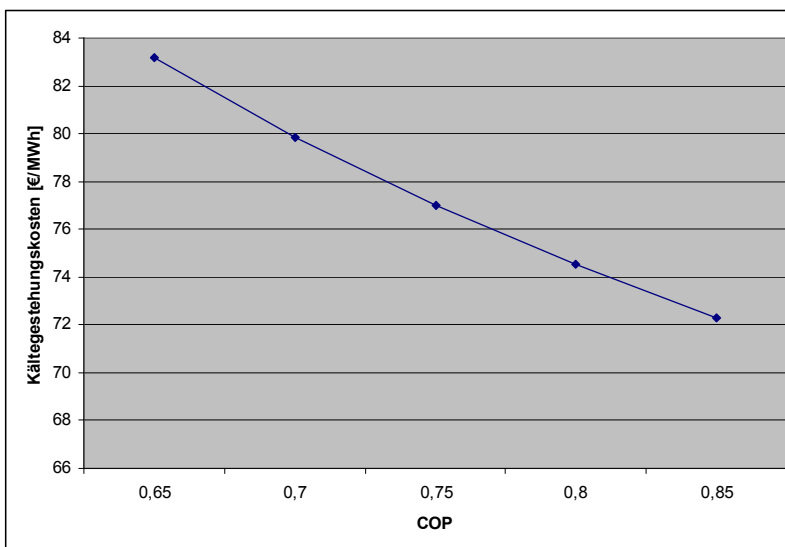


Abbildung 6-7: Abhängigkeit der Kältekosten vom COP bei der AKM in €/MWh

Für die aufgeführten Betriebsparameter ergibt sich abhängig von einem COP zwischen 0,65 und 0,85 ein Unterschied in den Kältegestehungskosten von rund 11 €/MWh.

In Abbildung 6–8 wird der Einfluss des COP bei der KoKM dargestellt.

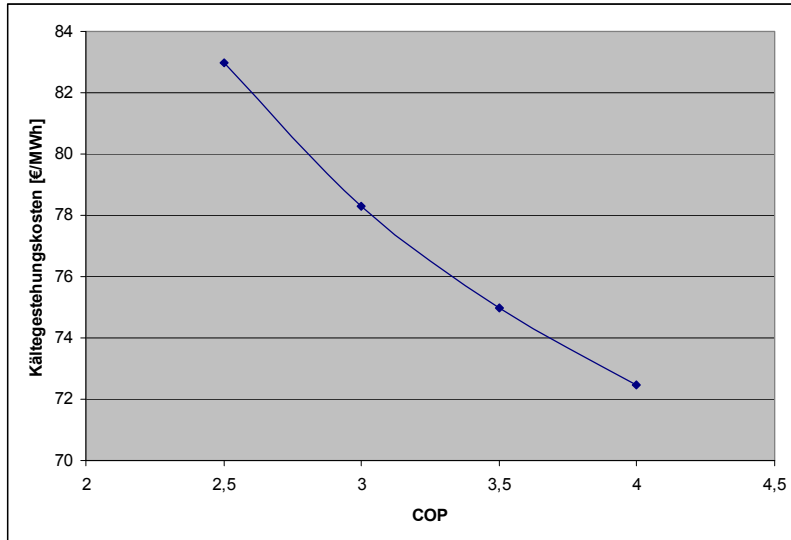


Abbildung 6–8: Abhängigkeit der Kältekosten vom COP bei der KoKM in €/MWh

Bei einer ähnlichen Änderung der Kältgestehungskosten variiert der COP bei der KoKM zwischen 2,5 und 4.

6.3 Mögliche Maßnahmen zur Effizienzsteigerung

Neubau Gewerbegebiet

In direkter Nachbarschaft zur MVA werden drei Hektar Gewerbegebiet erschlossen. Es wird diskutiert, das Gewerbegebiet an eine separate Wärmeversorgung aus dem MHKW anzuschließen. Um den Standort attraktiver zu machen, soll ganzjährig eine Vorlauftemperatur von 130 °C garantiert werden, um Prozesswärme zur Verfügung zu stellen.

Dieses Temperaturniveau ist ausreichend, um mit entsprechender Absorbertechnik –40 °C Verdampfungstemperatur zu realisieren (Double-Lift-AKM mit Ammoniak/Wasser). Damit bietet sich beispielsweise die Möglichkeit, Lagerhäuser für Tiefkühlkost zu betreiben.

Gärtnerei für Nutzung von Niedertemperaturabwärme

Neben der Wärmenutzung im Sommer birgt sich in der Nutzung der Niedertemperaturabwärme der LUKO ein großes Potenzial zur Effizienzsteigerung und Substitution fossiler Energieträger. Aufgrund der niederen Temperatur ist die Wärme nur in direkter Umgebung zu Heizzwecken nutzbar. Die Beheizung von Gewächshäusern für Warmkulturen (z. B. Gurke, Tomate) ist sehr energieintensiv, sie bietet sich jedoch als Abnehmer von Niedertemperaturwärme an. Beispiele dieser Anwendung finden sich bereits an einer bayerischen Abfallbehandlungsanlage, der MPA Burgau.

Nutzung von 55 °C Abwärme aus dem Abdampf der Turbine stellt energetisch eine sehr gute Lösung dar, da es sich um echte Abwärme handelt, die nicht mit Verlusten in der Verstromung einhergeht. Im

genannten Beispiel werden durch die Beheizung der Gewächshäuser mit Abwärme pro Jahr etwa 600.000 Liter Heizöl eingespart.

6.4 Beispiel für die Realisierung eines Nahkältenetzes an der MVA Wärmestadt

An der MVA Wärmestadt soll im Umfeld der Anlage ein Nahkältenetz mit einer Gesamtlänge von 800 m realisiert werden. Folgende Annahmen liegen der Betrachtung zugrunde:

- Die Kälteerzeugung erfolgt am Standort der MVA.
- Ein Interesse an einer gemeinsamen Lösung ist bei Industrie/Gewerbe vorhanden.
- Die Projektentwicklung erfolgt durch die technische Abteilung der MVA Wärmestadt, die notwendigen Entscheidungsunterlagen werden bereitgestellt.
- Die Abnehmer und die MVA entschieden sich für eine zentrale Kälteproduktion mittels Absorptionskälteanlage an der MVA und zur Contractinglösung, d. h. die Abnehmer zahlen die bezogene Kälte.
- Zur konservativeren Betrachtung wird eine Spitzenlastversorgung mittel KoKM angenommen. Die wirtschaftlich wahrscheinlich günstigere Lösung „Eisspeicher“ (vgl. 4.3) wird wegen des nicht geklärten Platzbedarfs ausgenommen.

An das Netz sind sechs Abnehmer angeschlossen, davon nutzen vier die Kälte für die Klimatisierung bzw. die Versorgung der Lüftungsanlagen mit einer Gesamtanschlussleistung von 1.000 kW Kälte. Zwei weitere Unternehmen nutzen die Kälte für Prozesskälte, davon ein Schlachthof mit einer Anschlussleistung von 700 kW und ein Rechenzentrum mit einer Anschlussleistung von 100 kW. Die Jahresvolllaststunden werden bei den Anlagen zur Klimatisierung auf 600 h angenommen. Der Schlachthof weist 5.000 Jahresvolllaststunden auf, das Rechenzentrum 4.000 h.

Der Anschluss an das Nahkältenetz erspart dem Kunden den Aufstellraum für die Kältemaschinen und die Rückkühleinheiten. Durch die Versorgung über das Kältenetz und die am Erzeugungsstandort bereitgestellte Redundanz an Leistung besteht eine hohe Ausfallsicherheit.

Das Kältenetz wird durch eine Absorptionskältemaschine mit 1,0 MW Kälteleistung versorgt. Für die Spitzenlast und als Redundanz für die Versorgung mit Prozesskälte stehen zwei Kompressionskältemaschinen mit je 800 kW Leistung zur Verfügung. Das Kältenetz wird mit 6 °C Kaltwasser im Vorlauf und 14 °C im Rücklauf gefahren. Es kommt ein heißwassergefeuerter Wasser-LiBr-Absorber zum Einsatz, der am Standort der MVA bei einer Temperatur von 125 °C betrieben wird. Die Investitionskosten für die Absorptionskältemaschine einschließlich der Rückkühlung belaufen sich auf 250.000 €. Die Absorptionskältemaschine wird über einen eigenen Heizkondensator über die 4,5-bar-Dampfschiene versorgt, über welche auch die Wärme an das Fernwärmenetz ausgekoppelt wird. Der Dampf wird aus der geregelten Entnahmekondensationsturbine entnommen. Die Kompressionskältemaschinen erfordern zusammen eine Investition von 200.000 € einschließlich der Rückkühlung. Die Kühltürme stehen auf einer Stahlbühne oberhalb der Kälteanlagen. Ein Winterbetrieb ist möglich. Die Kosten für die

elektrischen Installationen, sonstigen Installationen und die Steuerungstechnik belaufen sich auf 200.000 €. Eine Optimierung der Auslastung und damit des Anlagenbetriebs erfolgt durch einen Pufferspeicher mit Investitionskosten von 100.000 €.

Die Leitungstrasse für die Kälte erfolgt weitgehend im Straßenbereich. Verlegt wurde im Rücklauf eine kostengünstige PE-isolierte Stahlleitung, da aufgrund der Rücklauftemperatur von 14 °C keine besondere Dämmung gegenüber dem umgebenden Erdreich erfolgen muss. Im Vorlauf wurde eine im Fernwärmebereich eingesetzte kunststoffisolierte Standardleitung eingesetzt. Da bei Fernkälteleitungen gegenüber Fernwärmeleitungen eine nur sehr geringe Längendehnung auftritt, kann die Verlegung einfacher gestaltet werden (Kompressoren und U-Bögen reduzieren sich oder entfallen). Die Kosten für den Bau der Kälteleitungen betragen durchschnittlich 800 €/m, ein großer Teil der Trassenführung erfolgt im Straßenbereich. Bei einer Gesamtleitungslänge von 800 m fallen Investitionskosten von 640.000 € an.

Die Absorptionskältemaschinen weisen 3.000 Jahresvolllaststunden auf, die Kompressionskältemaschinen je rund 1.125.

Für das skizzierte fiktive Beispiel eines Nahkältenetzes werden in der Tabelle 6-2 die Energiekosten bei angerechneten Wärmekosten von 15 €/MWh und Stromkosten von 70 €/MW und einem Leistungspreis von 15.000 € pro MW Anschlussleistung errechnet.

Tabelle 6-2: Kennzahlen für die Kälteerzeugung und Energiekosten für das Nahkältenetz Wärmestadt

Beispiel für die Ausführung eines Nahkältenetzes			
	AbKM	KoKM	Einheit
Leistung	1	800	MW
Volllaststunden	3.000	1.125	h/a
Jährlich erzeugte Kälte	3.000	900	MWh
COP	0,85	3,5	
Betriebskosten Energie	Wärme	Strom	
Anschlussleistung	1,2	260	MW
Bezogene Energie	625	160	MWh
Leistungspreis		15.000	€/MW*a
Arbeitspreis	15	70	€/MWh
Hilfsenergie Strom	8.470		€/a
Energiekosten Gesamt	61.411	21.429	€/a

In Tabelle 6-3 wird auf Basis der dargestellten Energiekosten und der Investitionskosten der Gestehungspreis für die erzeugte Kälte errechnet. Die Gestehungskosten sind in dem dargestellten Beispiel durchaus wirtschaftlich dar. Mit Eisspeicher könnten sie noch etwas günstiger liegen.

Tabelle 6-3: Spezifische Kältegestehungskosten für das Beispiel MVA Wärmestadt

Gestehungskosten Kälte		
	AKM	Einheit
Jährlich erzeugte Kälte	3.900	MWh
Jährl. Energiekosten gesamt	82.840	€/a
Investitionen		
AKM 1 MW Kälte	250.000	€
KKM 2x 0,8 MW Kälte	200.000	€
Installationen	200.000	€
Pufferspeicher	100.000	€
Gesamtinvestitionen Erzeugung	750.000	€
Investitionen Kältenetz	640.000	€
Annuität für Erzeugung und Netz 5 %, 15 a -> 0,096	133.440	€/a
Wartung, Instandhaltung	20.000	€/a
Overhead 1 % der Investsumme	8.000	€/a
Jährliche Gesamtkosten	187.640	€/a
Gestehungspreis Kälte	63	€/MWh

Aufgrund der hohen Investitionskosten für ein Kältenetz ist es für den wirtschaftlichen Betrieb von großer Bedeutung, eine möglichst hohe Auslastung zu erzielen. Bei der Klimatisierung von Gebäuden ist eine begrenzte saisonale Auslastung mit weniger als 500 Jahresbetriebsstunden üblich. Daher ist eine hohe Auslastung nur dann möglich, wenn Abnehmer mit ganzjährigem Kältebedarf, beispielsweise Abnehmer von Prozesskälte zur Kühlung von Lebensmitteln oder zur ganzjährigen Klimatisierung (Krankenhäuser), angeschlossen werden können. In dem gezeigten Beispiel sind mit den beiden Abnehmern Schlachthof und Rechenzentrum zwei Abnehmer mit ganzjährigem Bedarf an das Netz angeschlossen, es liegen also günstige Verhältnisse vor.

Den Vorteilen einer effizienten Erzeugung von Kälte durch die zentrale Installation der Erzeugungsanlagen in dem dargestellten Beispiel stehen die Kosten für den Bau und Unterhalt von Kaltwasser-

leitungen gegenüber. Die Betriebskosten von Kältenetzen sind geprägt von den Kosten für den Bau der Leitungen; diese hängen vor allem von der bisherigen Überbauung der Leitungstrasse und dem Leitungsquerschnitt ab. In Anlehnung an die spezifischen Baukosten von Nahwärmeleitungstrassen können für Leitungsquerschnitte im Bereich von 50–200 mm Nennweite Baukosten von 600 – 2.300 €/m veranschlagt werden.

Die Vorteile des Nahkältebezugs für den Kunden sind:

- Die MVA bzw. der Betreiber des Nahkältenetzes garantiert die Lieferung von Kälte. Der Kältebezieher wird von vielen fachspezifischen und technischen Aufgaben entlastet.
- Die MVA bzw. der Betreiber des Nahkältenetzes kann aufgrund seiner Größe Spezialisten für Betrieb, Wartung und Instandhaltung einsetzen und erzielt damit einen effektiveren, sichereren und wirtschaftlicheren Betrieb.
- Mit zunehmender Anzahl der Verbraucher steigt üblicherweise der Lastausgleich, wodurch sich die zu installierende Gesamtleistung reduzieren kann.
- Die Kälteanlagen und entsprechende Rückkühleinheiten müssen nicht beim Verbraucher installiert werden; dies hat einen positiven Einfluss auf Platz- und Raumbedarf, Geräusentwicklung etc.

7 Fazit

Die Nutzung von Fernwärme für die Erzeugung von Kälte eröffnet neue Absatzmöglichkeiten für thermische Energie aus MVA. Mit der Fernwärme-Kälte können Lasttäler von Fernwärmenetzen aufgefüllt werden. Damit einher geht eine Erhöhung des Gesamtwirkungsgrades der MVA, wenn insbesondere durch eine höhere Wärmeabgabe im Sommer der Jahreswirkungsgrad gesteigert werden kann.

Der Einsatz von thermisch angetriebenen Kältemaschinen zur Kühlung und Erzeugung von Kälte bei Antriebstemperaturen über 120 °C ist seit Langem Stand der Technik und kommt in der Industrie vor allem dort zum Einsatz, wo Dampfnetze zur Verfügung stehen. Der Betrieb von warmwassergetriebenen Absorptionskältemaschinen mit Warmwasser unter 120 °C aus Fernwärmenetzen erfordert für den wirtschaftlichen Betrieb eine angepasste Technologie, die bei diesen Temperaturen noch ausreichend hohe Wirkungsgrade aufweist. Es gibt eine Reihe von Beispielen, bei denen Sorptionskältemaschinen für die Klimatisierung von Hotels, Krankenhäusern, Verwaltungsgebäuden oder auch Industriegebäuden zur Anwendung kommen. Auch in Bayern sind einzelne Anlagen erfolgreich in Betrieb.

In der Regel können Anlagen zur Erzeugung von Kälte, die mittels Fernwärme angetrieben werden, nur unter günstigen Rahmenbedingungen mit konventionellen Anlagen konkurrieren. Da es vorrangiges Ziel des Kälteanwenders ist, eine preiswerte und sichere Lösung für seine Kälteversorgung zu realisieren, die sich technisch und wirtschaftlich problemlos in die unternehmerischen Prozesse einfügt, werden bislang auch bei bestehendem Anschluss an ein Fernwärmenetz überwiegend Kompressionskälteanlagen eingesetzt.

Der früher dominierende wirtschaftliche Vorteil der konventionellen Kompressionskälte ist jedoch in den letzten Jahren aufgrund deutlicher Strompreissteigerungen deutlich gesunken und wird bei weiteren Strompreissteigerungen seinen Vorsprung verlieren. Auch der 2009 festzustellende gegenläufige Trend wird diese Entwicklung nur temporär unterbrechen.

Hinsichtlich des vorhandenen Temperaturniveaus hat die Fernwärme den Vorteil, dass sie bei konstantem Temperaturniveau zur Verfügung steht, allerdings liegen die Vorlauftemperaturen in Fernwärmenetzen im Sommer oft bei 90 °C oder sogar darunter. Für den Antrieb von bestimmten Kältemaschinen sind diese Temperaturen bereits zu niedrig oder an der unteren Grenze.

Die technische Weiterentwicklung und Optimierung von warmwassergetriebenen Kältemaschinen (Ab- und Adsorptionskältemaschinen sowie DEC-Anlagen) wird deshalb maßgeblichen Einfluss auf die weitere Verbreitung dieser Technik in Fernwärmenetzen haben. Entscheidend bei der Optimierung sind die Senkung der Betriebsparameter bei der Vorlauftemperatur, eine möglichst hohe Temperaturspreizung und eine weitere Optimierung der Wirkungsgrade.

Von enormer Bedeutung ist das Aufzeigen von technischen und wirtschaftlichen Perspektiven, d. h. die Realisierung von Sorptionsanlagen in Bereichen, wo auch unter eingegrenzten Bedingungen (z. B. niederes Temperaturniveau im FW-Netz) geeignete Techniken gefunden und eingesetzt werden, technisch effizientere Lösungen prototypisch zur Anwendung gebracht werden (z. B. Anlagen mit großer Temperaturspreizung), die Umsetzung bereits einen wirtschaftlichen oder nahezu wirtschaftlichen Betrieb aufzeigen kann,

Verbundlösungen oder ein modernes Management der Lastregelung in Abstimmung mit dem Fernwärmenetz (Smart Control) den Betrieb wirtschaftlicher gestalten können, bislang vorgetragene Um-

setzungsprobleme revidiert werden (z. B. dass die Wartung für nicht technisch orientierte Unternehmen ein Hindernis darstelle), alternative Formen der Kältebereitstellung bzw. des Vertragsverhältnisses angewendet werden (z. B. Kältebereitstellung als Dienstleistung – „Kältecontracting“).

Auf diese Weise würde eine weitere Optimierung und Anpassung der Sorptionskältetechnik an die spezifischen Eigenheiten eines Betriebs mit Fernwärme erfolgen. Vor allem aber sollten damit Referenzanlagen geschaffen werden, mit denen potenzielle Anwender von der Zuverlässigkeit und den Vorteilen dieser Technik überzeugt werden könnten. Werden solche Referenzanlagen bereits heute installiert, dann kann in naher Zukunft, wenn die Entwicklungen der Energiepreise die wirtschaftliche Konkurrenz zugunsten der Sorptionskälte verschieben werden, auf die für potenzielle Anwender wichtige Betriebspraxis verwiesen werden. Geeignete Projektansätze an bayerischen MVA-Standorten konnten identifiziert werden und werden im vertraulichen Teil dieser Studie beschrieben.

Die dargestellten technischen und wirtschaftlichen Bedingungen des Einsatzes von thermisch angetriebenen Kältemaschinen stellen die Basis für eine Steigerung der Energieeffizienz an den bayerischen Müllverbrennungsanlagen durch die Nutzung von Wärme für die Erzeugung von Kälte dar. Im Rahmen dieser Studie wurde das Potenzial für die Anwendung dieser Technik untersucht.

Die Realisation von Kältenetzen, bei denen Kälte zentral am Kraftwerk erzeugt und über eigene Kälteleitungen verteilt wird, ist wie bei Fernwärmenetzen davon abhängig, ob eine ausreichend hohe Anschluss- und Leistungsdichte vorliegt. Im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie zur Energieeffizienz bayerischer MVA durch Fernkälte konnte im Umfeld der MVA keine entsprechend hohe Bedarfsdichte ermittelt werden, die den Betrieb von eigenen umfänglicheren Netzen zur Verteilung von Kälte rechtfertigen. Untersucht wurde auch die Nutzung von vorhandenen Leitungsnetzen für einen Kälte transport, um damit das Potenzial für die Senkung der Kosten eines Kältenetzes an den Standorten der MVA abzuschätzen. Im Rahmen dieser Untersuchung konnten keine Pipelinesysteme identifiziert werden, bei denen eine entsprechende Nutzung möglich wäre.

Durchaus Potenzial besteht für räumlich eng begrenzte Nahkältenetze, wenn z. B. eine lokal hohe Dichte an Unternehmen oder Gebäuden mit hohem Kühlbedarf vorliegt. Solche Nahkältenetze werden bereits jetzt realisiert, allerdings basieren sie auf der Erzeugung von Kälte durch Kompressionskältemaschinen. Hier müssten sich zukünftig wirtschaftlich günstigere Rahmenparameter für thermisch getriebene Kältemaschinen ergeben, damit diese stärker zum Einsatz kommen. Die angesprochenen technischen Entwicklungen sollten zu solch günstigeren Bedingungen führen.

Vorteilhafter stellt sich die Situation bei der Realisierung einer Wärmeabgabe von MVA an thermisch getriebene Kältemaschinen in Fernwärmenetzen dar.

Elf der 15 bayerischen MVA sind direkt an Fernwärmenetze angeschlossen und sind direkter oder indirekter Wärmelieferant. Eine MVA ist indirekt über die Abgabe von Dampf an ein Kraftwerk an ein Fernwärmenetz angebunden, eine weitere MVA steckt in den Planungen für den Aufbau eines Fernwärmenetzes. Eine Anlage ist für die Lieferung von Prozessdampf an einen Industriekunden ausgelegt. Eine kleinere thermische Behandlungsanlage versorgt eine Gärtnerei mit Nahwärme.

Bislang werden über Fernwärmenetze bereits Absorptionskältemaschinen mit einer gesamten Leistung von knapp 15 MWh versorgt. Allerdings ist der größere Teil der genannten Leistung in Fernwärmenetze mit Dampfleitungen eingebunden, welche derzeit rückgebaut werden oder bei denen Planungen für die Umstellung auf Heißwasserbetrieb in Gange sind. Mit dem Rückbau von Dampfleitungen ist auch ein Rückbau von AbKM verbunden.

Gleichzeitig bestehen für mehrere Fernwärmenetze, die mit Heißwasser/Warmwasser betrieben werden, konkrete Bemühungen, thermisch angetriebene Kältemaschinen zum Einsatz zu bringen, um die Netzauslastung vor allem im Sommer zu erhöhen. Der kürzerfristig realisierbare Einsatz von Heißwasser/Warmwasser aus Fernwärmenetzen zur Kälteerzeugung dürfte bei rund 5-10 MW Gesamtleistung liegen. Das mittel- bis längerfristig zu realisierende Potenzial dürfte bei rund 35 MW Gesamtleistung liegen. Langfristig können sich bei geänderten Rahmenbedingungen (verbesserte Technik, höhere Kosten für elektrische Energie etc.) deutlich höhere Potenziale ergeben. Eine Übersicht über die Situation an bayerischen MVA-Standorten bzgl. des kurzfristig zu realisierenden Potenzials findet sich in der anonymisierten Tabelle 7-1.

Tabelle 7-1: Voraussetzungen an den bayerischen MVA-Standorten für Kälte aus Wärme und geschätztes kurzfristiges Potenzial

	Art der Energienutzung	Potenzial für den Ausbau von MVA-FK	Kurzfristiges Potenzial geschätzt
Anlage 1	Strom/Abwärme	gering	
Anlage 2	Strom/Fernwärme	hoch	5 MW
Anlage 3	Strom/Fernwärme	hoch	5 MW
Anlage 4	Strom/Fernwärme	hoch	5 MW
Anlage 5	Strom/FW in Planung	mittel	2 MW
Anlage 6	Strom/Fernwärme	hoch	5 MW
Anlage 7	Strom/Fernwärme/Dampf	gering	
Anlage 8	Strom / Fernwärme / Abwärme	mittel	2 MW
Anlage 9	Strom/Dampf	gering	
Anlage 10	Strom/Fernwärme	hoch	5 MW
Anlage 11	Strom/Fernwärme/Dampf	gering	
Anlage 12	Strom / Dampf	gering	
Anlage 13	Strom/Fernwärme/Dampf	gering	
Anlage 14	Strom/Fernwärme	mittel	2 MW
Anlage 15	Strom/Fernwärme	mittel	2 MW

Bei einem Drittel der Anlagen besteht ein hohes Potenzial zum kurzfristigen Ausbau der Fernkälte. Es werden dort i. d. R. bereits Projekte geprüft. Ein weiteres Drittel lässt zumindest mittelfristig bei entsprechenden Rahmenbedingungen ebenfalls Potenzial erkennen. Von enormer Wichtigkeit für den weiteren Ausbau der Kälteerzeugung an Fernwärmenetzen sind daher praktische Beispiele erfolgreicher Anwendungen von thermisch angetriebenen Kältemaschinen in Fernwärmenetzen. Insbesondere sollte diesbezüglich auch die Anwendung weiterentwickelter und optimierter Kälteaggregate vorangetrieben und deren Etablierung am Markt unterstützt werden.

Von großem Einfluss auf die Umsetzbarkeit eines höheren Wärmeabsatzes außerhalb der MVA ist die Organisationsstruktur zwischen Wärmeerzeuger und Endkunde. Wird das Wärmenetz vom Zweckverband oder vom Betreiber der MVA betrieben, liegt es in deren Handlungsbereich, an einer gezielten Vermarktung der Wärme zu arbeiten und gezielt Akquise für den Absatz von Wärme für Kälte zu betreiben. Ideal ist es, wenn bei den Betreibern der MVA Know-how bzgl. der Erzeugung von Kälte vorhanden ist, welches dem Kunden zur Verfügung gestellt wird. Damit kann dem Kunden ein zusätzlicher sehr wertvoller Service durch eine neutrale Beratung geboten werden und gleichzeitig lassen sich Probleme und negatives Image der Technik durch falsche oder mangelhafte Planung stark einschränken. Die Unterstützung potenzieller Kunden bei der Konzeptfindung und Planung mit gezieltem Know-how zur Kälteerzeugung kann für eine weitergehende Verbreitung von fernwärmegebundener Klima- und Kühlkälte enorm wichtig sein.

Stark einschränkend auf den zukünftigen Ausbau der wärmegetriebenen Kälteerzeugung können sich unterschiedliche Interessen des Betreibers des Fernwärmenetzes und der MVA auswirken. Vielerorts sind die Betreiber des Fernwärmenetzes zugleich Anbieter von Strom und Erdgas, womit Fernwärme mit diesen Energieträgern konkurriert.

Haben die MVA oder der Zweckverband Einfluss auf den Absatz der Fernwärme, können auch finanzielle Instrumente genutzt werden, um Fernwärme in Schwachlastzeiten für die Kälteerzeugung attraktiv zu machen.

8 Literaturverzeichnis

- Arnold, M. (2006): Einsatz von Fernkälte aus Grundwasserüberleitungen für ein Rechenzentrum in München; Stadtwerke München. (www.swm.de/dokumente/swm/pdf/dok/abschlussbericht-fernkaelte-dt.pdf)
- BINE (2006): Energie sparen bei der Kälteerzeugung. Basis Energie 20. BINE Informationsdienst. Hrsg.: FIZ Karlsruhe GmbH.
- BINE (2004): Klimatisieren mit Sonne und Wärme. Erprobte Verfahren zur Kältegewinnung aus Wärme. Themeninfo I/2004. BINE Informationsdienst. Hrsg.: FIZ Karlsruhe GmbH.
- BINE (2005): Kältespeicher in großen Kältenetzen. Optimierung für Fernkältenetz in Chemnitz. Projektinfo 10/2005. BINE Informationsdienst. Hrsg.: FIZ Karlsruhe GmbH.
- Bucar, G.; Schweyer, K.; Fink, C.; Riva, R., Neuhäuser, M.; Meissner, E., (2006): Dezentrale erneuerbare Energien für bestehende Fernwärmenetze. Hrsg.: Österreichisches Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. (www.baufachinformation.de/literatur.jsp?bu=08059016016)
- Burandt, B., (2004): Wasser als Kältemittel, Institut für Luft- und Kältetechnik GmbH. (www.bhks.de/almanach/2004/komplett.pdf)
- Deutscher Bundestag (2009): Energieversorgungsanlage. Strom, Wärme, Kälte: das Energiekonzept des Deutschen Bundestages. Deutscher Bundestag. Verwaltung. Referat Liegenschaften und Gebäudetechnik. Internetseite vom 02.02.09. (www.bundestag.de/bau_kunst/bauwerke/energie/index.html)
- DKV (2002): Statusbericht des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins Nr. 22; Energiebedarf für die technische Erzeugung von Kälte.
- Eicker, U. (2002): Entwicklungstendenzen solarthermischer Kühlverfahren; Hochschule für Technik Stuttgart. (www.hftstuttgart.de/Bauphysik/Forschung/ThermischeBPH/Vortraege_WS/Bilanzartikel_Symposium_2002.pdf/de)
- Ehlers, F. (2008): Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz von Waste-to-Energy Anlagen, MVA Bielefeld-Herford GmbH. (www.ecoenergy.de/go_public/freigegeben/BiFuelCycle_Waste%20to%20Energy_Mai%202007.pdf)
- Franzke, U. (2007): Kolloquium „Nutzung von Abwärme zur Kälteerzeugung“, KI Kälte Luft Klimatechnik. Internetbeitrag vom 15.10.2007. (www.ki-portal.de/news/0fee28657a1.html)
- Gasklima GmbH / YAZAKI (2007): Warmwasserbetriebene Absorptionskältemaschinen. Handbuch No. 1. Technik und Daten.
- Gassel, A. (1999): Die Adsorptionskältemaschine - Betriebserfahrungen und thermodynamische Berechnung. (www.ib-aton.de/service/fachaufs/Thd-art.pdf), (www.ib-aton.de/service/fachaufs/diss_gss/Kap-2-7.pdf)
- Jakobs, R. M. (2006): Marktentwicklung von Supermärkten. Deutsche Kälte- und Klimatagung 23/24. November 2006 in Dresden
- Probst, J. (2008): Energieeffiziente Kühlung von Bürogebäuden. Ein Überblick. Vortrag auf der Tagung energieeffiziente Kühlung von Gebäuden am 22.04.2008. Netzwerk COOLREGION – Energieeffiziente Gebäudekühlung.
- Hauer, A.; Lävemann, E. (2006): Möglichkeiten offener Sorptionsspeicher zum Heizen Klimatisieren und Entfeuchten. (www.enob.info/fileadmin/media/Publikationen/EnOB/StatusseminarThermEspeicherung_teil4)
- Hauer, A. (2001): Offene Adsorptionsspeicher mit Zeolith. Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung (ZAE). Gleisdorf Solar.
- Henning, H.-M. (2004): Solar-Assisted Air-Conditioning in Buildings. A Handbook for Planners. Springer Wien New York.

- Kleff, N. (2002): Kälteversorgung an der Universität Essen. Institut für angewandte Thermodynamik und Klimatechnik. (<http://bine2.bine.info/sitemap-404/>)
- Kolb, E. (2004): Kältetechnik. TU München (www.td.mw.tum.de/tum-td/de/lehre/fahrzeugklima/download/fohlen/F-6)
- Mack, R. (2009): Effiziente Kälte für kühle Rechner. Kältespeicher Chemnitz: erstes Betriebsjahr ausgewertet. Innovationsreport. Forum für Wissenschaft, Industrie und Wirtschaft.
- Meißner, E. (2007): Kühlung mit Fernwärme. Einsatzbereiche verschiedener Kältemaschinen. Vortrag vom 12.02.2007 (www.grazer-ea.at/cms/upload/news/esofeet/ws%20esofeet/04_kuehlung_mit_fernwaerme_ws_070212.pdf)
- Möller, O. (2009): Kälte aus (Ab) Wärme. Teil 8 "Ammoniak Absorptions-Kälteanlagen Vergleich mit Kompressionskälteanlagen". OM Treffpunkt Kälte. (www.treffpunkt-kaelte.de/kaelte/de/de_start.html?kaelte/de/html/komponenten/absorber/mattes/mattes_t3.html)
- Peetz, H. (2007): Kälte aus Wärme – Ammoniak – Wasser Absorptionskälteanlagen, AGO AG. (www.ago.ag/files/vortrag_enkon_2006__kaelte_aus_waerme_.pdf)
- Schaal, F.; Weimer, T.; Hasse, H. (2005): Einsatz gekühlter Membranabsorber in der Absorptionskältetechnik; ITT Stuttgart, MAKATEC GmbH Sindelfingen (www.itt.uni-stuttgart.de/pdfs/2005_schaal_dkv.pdf)
- Schmid, W. (2008): Fernkältenetz Paris findet immer mehr Zuspruch; Refripro – Das wichtigste aus Kälte und Klima. (www.refripro.eu/include/pdf_contenu.php?lg=de&tid_nav=0036&contenu=classique&tid_par=0058)
- Schmitz, K.W.; Schaumann, G. (2004): Kraft-Wärme-Kopplung.
- Schönberg, I.; Noeres, P. (1998): KWKK. Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung. Profi info II/98. Fachinformationszentrum Karlsruhe.
- Schreyer, K.H.; Tanner, N., (2008): Das Müllheizkraftwerk Kassel als Teil der Strom- und Fernwärmeerzeugung; ITAD Klima- und Ressourcenschutzkonferenz 2008.
- Simader, G.R.; Rakos, C. (2005): Klimatisierung, Kühlung und Klimaschutz: Technologien, Wirtschaftlichkeit und CO₂ Reduktionspotentiale, Österreichische Energieagentur. (www.energyagency.at/publ/pdf/kkk_material.pdf)
- UBA (2006): Energie aus Abfall. Ein bedeutender Beitrag zum Klimaschutz. Nutzung der Potenziale in Deutschland und Europa. Dokumentation des Workshops vom 6/7 November 2006.
- Umweltschutz.co.at (2006): Fernwärme Wien will Fernkältenetz aufbauen. Internetmagazin Umweltschutz Artikel vom 13.07.2006. (www.umweltschutz.co.at/index.cfm/id/19059)
- Urbaneck, T.; Schirmer, U.; Platzer, B., (2003): Kältespeicher – Überblick zum Stand der Technik; Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau. (www.bine.info/pdf/infoplus/KltespeicherberblickzumStandderTechnik.pdf)
- Urbaneck, T.; Schirmer, U.; Platzer, B. (2005): Absorptionskältemaschinen und Kaltwasserspeicher – eine Analyse zur Kurzzeitspeicherung (www.ki-portal.de/ai/resources/864c616da56.pdf)
- Wallisch, A. (2008): Bau und Betrieb von Fernkälte, Fernwärme Wien. ([www.energyagency.at/\(de\)/publ/pdf/bau-betrieb-fernkaelte-wallisch.pdf](http://www.energyagency.at/(de)/publ/pdf/bau-betrieb-fernkaelte-wallisch.pdf))
- Wandschneider J. (2007): Optimierungsmaßnahmen zur Steigerung des Wirkungsgrades (Beispiel AVI-Amsterdam und HR-AVI). 12. Fachtagung thermische Abfallbehandlung 2007. In: Faulstich M.; Urban A.I.; Bilitewski B. (Hrsg.): Schriftenreihe des Fachgebietes Abfalltechnik, Universität Kassel
- WienEnergie (2008): Kälte aus Wärme: Coole Technologie. (www.wienenergie.at/we/ep/programView.do?channelId=-25556&programId=13871)
- ZeoTech (2009): Grundlagen zur ZEO-TECH Adsorptionstechnik mit Zeolith und Wasser. (www.zeo-tech.de)

9 Anhang

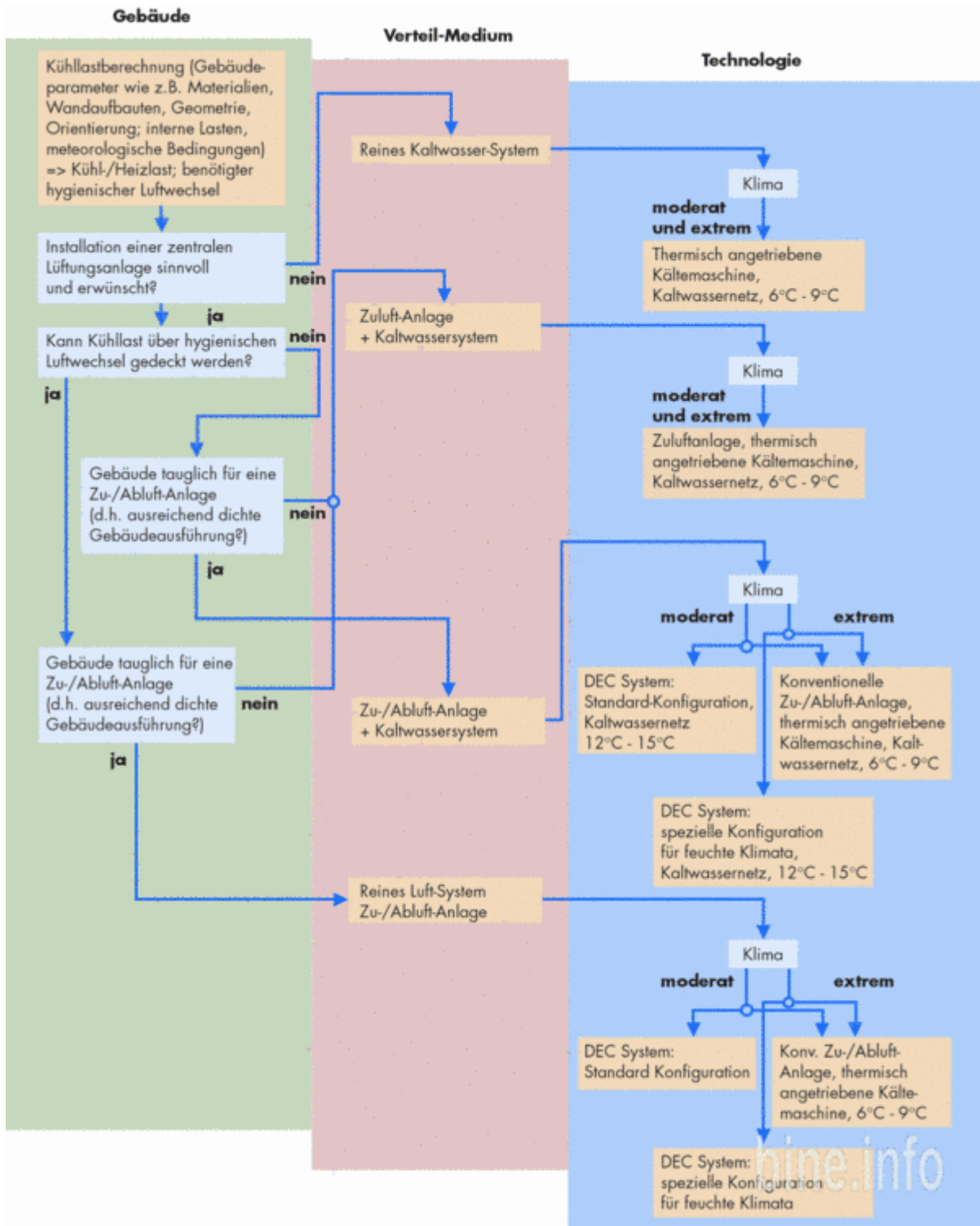
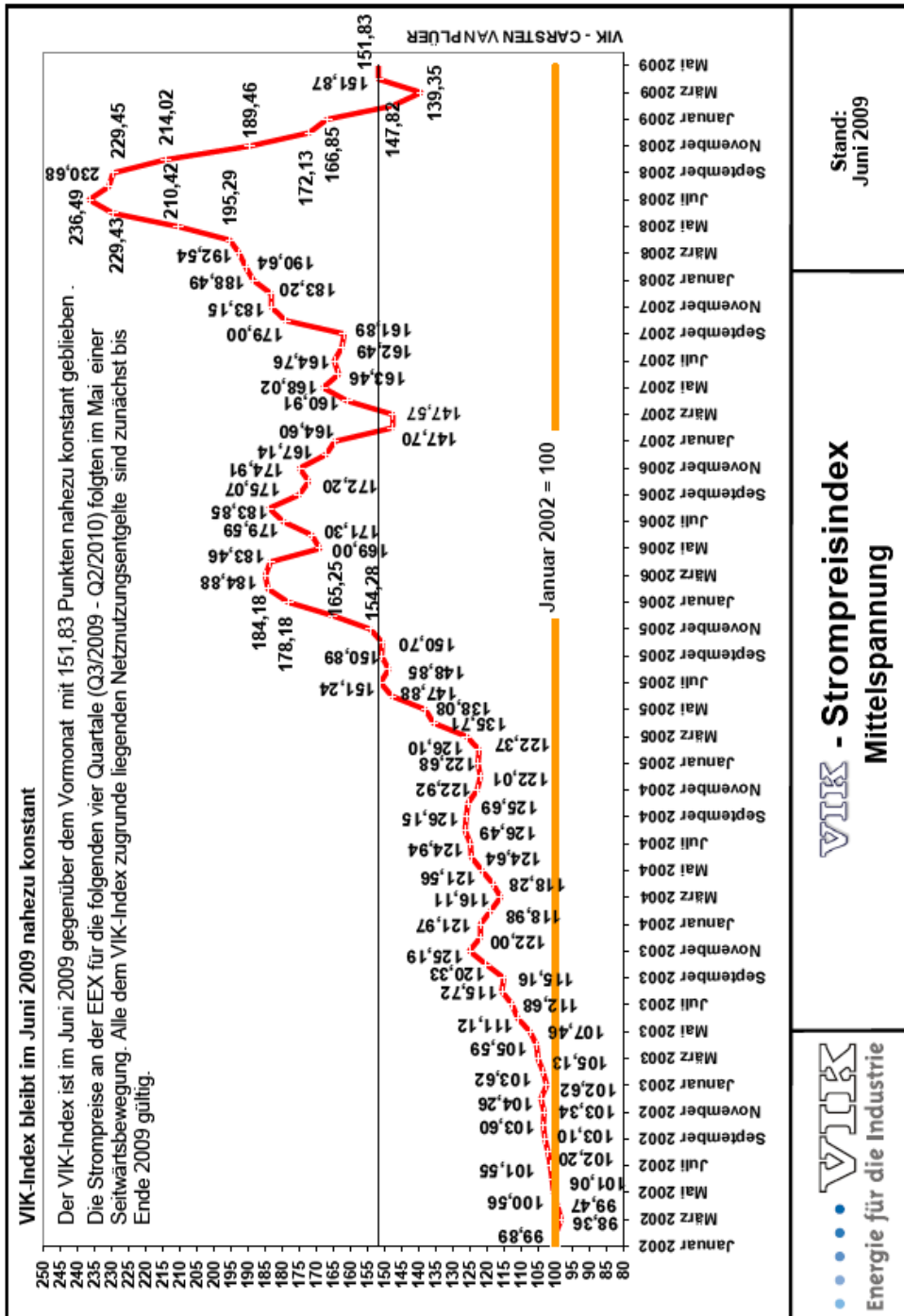
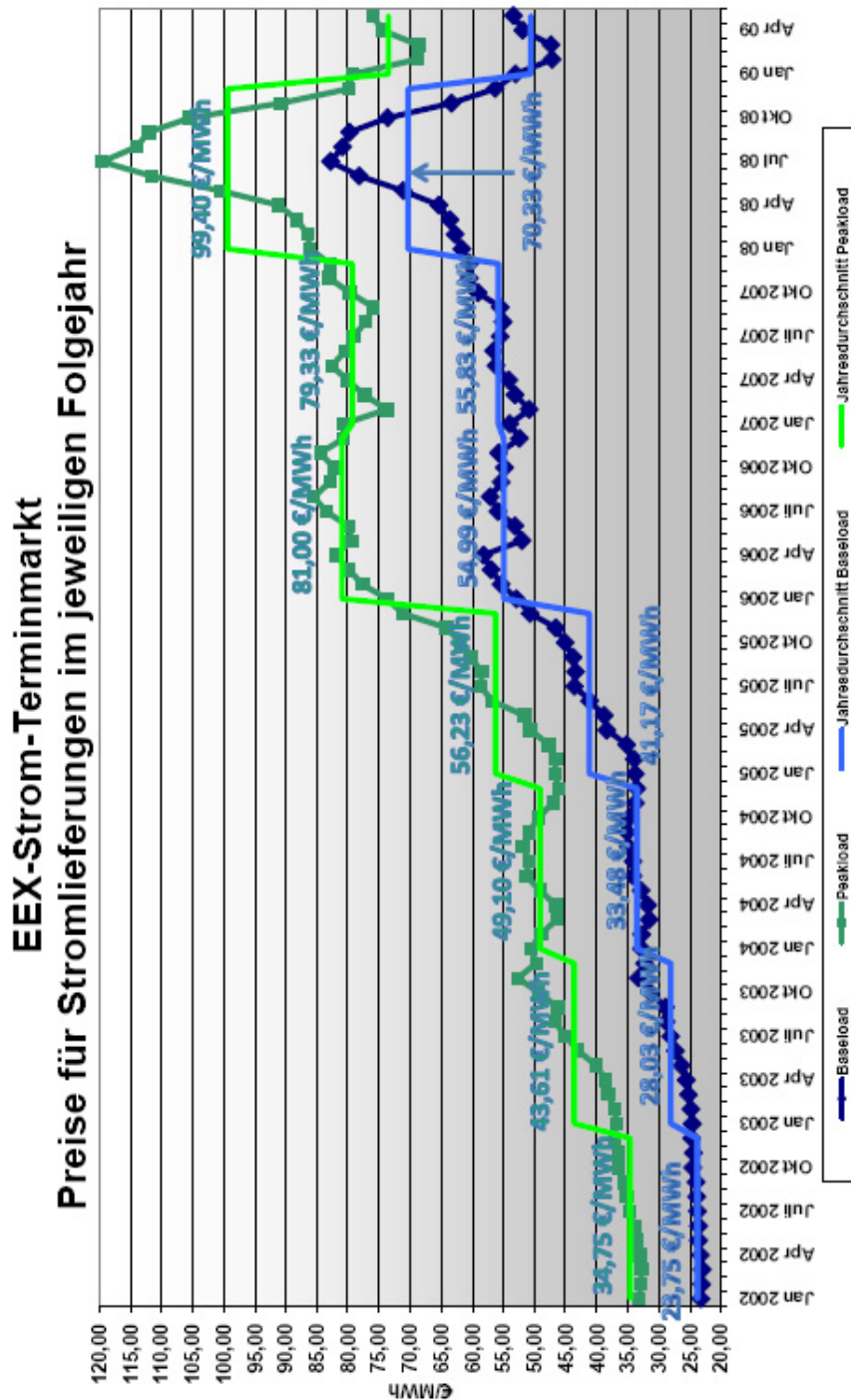


Abbildung A-9-1: Entscheidungsdiagramm für die Systemauswahl (BINE 2004)

9.1 Entwicklung der Strompreise 1/2002–5/2009



(VIK Verband der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft e. V.,
www.vik.de/fileadmin/vik/Strompreisindex/VIK_Index_Daten_Version1.pdf)



(VIK Verband der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft e. V.,
www.vik.de/fileadmin/vik/EEX/Terminmarkt.pdf)

9.2 Anbieter von Absorptions- und Adsorptionskälteanlagen

<p>ABB Energiesysteme GmbH Wolfsbankring 38 45355 Essen Telefon: +49 201 68599-0 Telefax: +49 201 8654900 www.abb.de Ansprechpartner: Manfred Förster AKM bis 1.000 kW im Temperaturbereich unter 6 Grad auf Basis des Stoffpaars NH₃-H₂O</p>	<p>AGO AG Energie + Anlagen Am Goldenen Feld 23 95326 Kulmbach Telefon: +49 9221 602-0 Telefax: +49 9221 602-149 www.ago.ag Planung, Bau und Betrieb von AbKM, NH₃/H₂O-Absorptionskälteanlagen</p>
<p>Albring Industrievertretung GmbH Schelmböhl 71 64665 Alsbach Telefon: +49 6257 641-87 Telefax: +49 6257 641-34 info@albring-gmbh.com www.albring-gmbh.de Absorptionskältegeräte und -anlagen, Wassersysteme, Kälteleistungen: 50 bis 500 kW, Nutzung von Abwärme ab 50°C</p>	<p>Aprovis Energy Systems GmbH Am Krätzenstein 103 91746 Weidenbach Telefon: +49 9826 6559-0 Telefax: +49 9826 6559-19 info@aprovis-gmbh.de www.aprovis-gmbh.de Absorptionskältegeräte und -anlagen, Wassersysteme, Kälteleistungen: 100 bis 1.500 kW</p>
<p>Axima Refrigerator GmbH Kemptener Straße 11-15 88131 Lindau/Bodensee Telefon: +49 8382 706-1 Telefax: +49 8382 706-410 info@de.axiref.com www.de.axiref.com Absorptionskältegeräte und -anlagen, Wassersysteme, Kälteleistungen: 100 bis 1.500 kW</p>	<p>Carrier GmbH & Co. KG Edisonstraße 2 85716 Unterschleißheim Telefon: +49 89 31154-0 Telefax: +49 89 31154-101 Carrier.gmbh@carrier.de www.carrier.de Absorptionskältegeräte und -anlagen, Wassersysteme, Kälteleistungen: 130 bis 5.280kW, Heizleistungen: 180 bis 5.000 kW</p>

Climatic GfKK
Gradestraße 113-119
12347 Berlin
Telefon: +49 30 6 00 99 40
Telefax: +49 30 6 06 30 10
www.gfkk.de
trohl@gfkk.de
Großkältetechnik, Kälteleistungen: 16 bis 6.000 kW,
Heizleistungen: 14 bis 4.500 kW

Colibri b.v.
Tentstraat 5A
NL-6291 6291 BC Vaals
Niederlande
Telefon: +31 43 306-6227
Telefax: +31 43 306-5797
info@colibri-by.com
www.colibri-bv.com
Absorptionskältegeräte und -anlagen für Tief-
temperaturkälte
Solesysteme, Kälteleistungen: ab 200 kW

EAW-Energieanlagenbau GmbH
Oberes Tor 106
98631 Westenfeld
Telefon: +49 36948 841-32
Telefax: +49 36948 841-52
info@eaw-energieanlagenbau.de
www.eaw-energieanlagenbau.de
Absorptionskältegeräte und -anlagen, Wasser-
systeme Kälteleistungen: 15 bis 200 kW, Heizwasser,
z.B. aus Solar-Kollektoren auf niedrigem
Temperaturniveau ab 75 °C

GasKlima GmbH
Robert-Bosch-Straße 17a
63477 Maintal
Telefon: +49 6181 48155
Telefax: +49 6181 432101
info@gasklima.de
www.gasklima.de
Absorptionskältegeräte und -anlagen, Wasser-
systeme, Kälteleistungen: 16 bis 11.630 kW, Heiz-
leistungen: 14 bis 9.300 kW

GBU mbH
Platanenallee 55
64673 Zwingenberg
Telefon: +49 6251 801-0
Telefax: +49 6251 801-180
e-mail: info@gbunet.de
http://www.gbunet.de
Adsorptionskältemaschine für die Nutzung von
Niedertemperatur-Abwärme im Temperaturbereich
von 55 - 95°C

GfKK Gesellschaft für Kältetechnik-Klimatechnik
mbH
Dieselstraße 7
50859 Köln
Telefon: +49 2234 4006-34
Telefax: +49 2234 48303
mail@gfkk.de
www.gfkk.de
Broad- und Robur Absorptionskältegeräte und -
anlagen, Wassersysteme, Kälteleistungen: 16 bis
6.000 kW, Heizleistungen: 14 bis 4.500 kW

Hitachi Europe GmbH

Am Seestern 18

40547 Dusseldorf

Telefon: +49 211 5283-0

Telefax: +49 211 5283-660

info@hitachi-eu.com.

INVEN Absorption GmbH

(vormals Entropie)

Haager Straße 2

85435 Erding

Telefon: +49 8122 9838-0

Telefax: +49 8122 9838-18

www.inven.de

info@inven.de

Absorptionskälteanlagen, Kälte: 100 bis 10.000 kW

Isocal HeizKühlsysteme GmbH

Donaustraße 12

88046 Friedrichshafen

Telefon: +49 7541 2072-40

Telefax: +49 7541 2072-44

info@isocal.de

www.isocal.de

Robur Absorptionswärmepumpen, Wassersysteme,
Kälteleistungen: 17 bis 45 kW, Heizleistungen: 23 bis
130 kW

Kühlanlagen Kremsmünster Fritz Lachmayr Ges.m.b.H.

Josef-Lederhilger-Straße 3+7A

A-4550 Kremsmünster

Telefon: +43 7583 5493-0

Telefax: +43 7583 5667

E-Mail: kuehla@aon.at

Absorptions-Kälteanlagen, Klimaanlage (Kälte-
technische Anlagen), Wärmerückgewinnungsanlagen

Mattes AG Absorptionskälte

Mirastraße 54

13509 Berlin

Telefon: +49 30 435572-0

Telefax: +49 30 435572-29

info@mattes.ag.de

www.mattes-int.com

Absorptionskältegeräte und -anlagen für Tief-
temperaturkälte

Solesysteme, Kälteleistungen: 400 bis 10.000 kW

Öko Energy Systems

Lincheshöh 13

17335 Strasburg

Telefon: +49 39 753-23110

Telefax: +49 39 753-24401

info@waermepumpe24.de

www.waermepumpe24.de

Robur Absorptionswärmepumpen

Wassersysteme, Kälteleistungen: 17 bis 45 kW, Heiz-
leistungen 23 bis 130 kW

Robur

Via Parigi 4-6

I-24040 Verdellino (BG)

Telefon: +39 35 888111

Telefax: +39 35 4821334

acortinovic@robur.it

www.robur.it

Absorptionswärmepumpen, Wassersysteme, Kälteleistungen: 17 bis 45 kW, Heizleistungen: 23 bis 130 kW

Thermax Europe Ltd.

2 Studio Court, Queensway

Bletchley, Milton Keynes

MK2 2DG, The United Kingdom

Telefon: +44 1908 378-914

Telefax: +44 1908 379-487

Dinesh Kamath - dinesh@thermax-europe.com

Giuseppe Bazzi - bazzig@thermax-europe.com

In Indien produzierte Niedrig-Temperatur (75°C – 110 °C) angetriebene Absorptionskältemaschinen

Trane Deutschland GmbH

Keniastraße 38

47269 Duisburg

Telefon: +49 203 76804-0

Telefax: +49 203 76804-200

info@trane.de

www.trane.de

Absorptionskältegeräte und –anlagen, Wassersysteme, Kälteleistungen: 350 bis 6.060kW, Heizleistungen: 280 bis 3.050 kW

Weir Entropie GmbH

Haager Straße 2

85435 Erding

Telefon: +49 8122 9838-0

Telefax: +49 8122 9838-18

info@entropie-gmbH.de

www.weirtechna.com

Absorptionskältegeräte und –anlagen, Wassersysteme, Kälteleistungen: 280 bis 10.000 kW

Yazaki Europe Ltd.

Environment and Energy Equipment Operations

Robert-Bosch-Straße 43

50769 Köln

Telefon: +49 221 59799-0

info@yazaki-airconditioning.com

Absorptionskältegeräte und –anlagen

York Deutschland GmbH

Gottlieb-Daimler-Straße 6

Donaustraße 12

68165 Mannheim

Telefon: +49 621 468-0

Telefax: +49 621 468-573

sales@de.york.dom

www.york.de

Absorptionskältegeräte und –anlagen, Wassersysteme, Kälteleistungen: 106 bis 4.850 kW, Heizleistungen: 86 bis 1.970 kW

9.3 Anlagenbeispiel für eine SE/SL-DL-H₂O/LiBr-Absorptionsanlage (AbKM)

Leistungsbereich: 300-3600 kW, Arbeitszahl: 0,4 -0,75

Anpassung an die spezifisch hydraulischen Bedingungen und niederen Vorlauftemperaturen der Fernwärme ($t_{FW,VL} = 80 - 100 \text{ °C}$), Prozess: Kombination v. einstufigem + zweistufigem Kreislauf

Hohe Auskühlung des Heizmediums ($\Delta t = 25 \text{ °K}$); dadurch niedrige Rücklauftemperatur ($t_{FW,RL} = 50 - 65 \text{ °C}$) möglich

Hersteller: Entropie GmbH (Deutschland/Frankreich), Fa. Luftkühler GmbH (Deutschland)

9.4 Datenblatt eines Delta-T-max-Absorbers (mehrstufiger LithiumBromid-Absorber) mit Antriebstemperatur 95/55 °C des Anbieters Gasklima GmbH

2AB Series

75 - 975 Tera

Cooling Capacity		10/8																							
		31/26,5																							
		95/55																							
2AB 270	300	340	375	420	470	525	600	675	750	825	900	975	2AB 270	300	340	375	420	470	525	600	675	750	825	900	975
2AB 180	210	240	270	300	330	360	400	440	480	520	560	600	2AB 180	210	240	270	300	330	360	400	440	480	520	560	600
2AB 120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	2AB 120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
2AB 90	105	120	135	150	165	180	200	215	230	245	260	275	2AB 90	105	120	135	150	165	180	200	215	230	245	260	275
2AB 60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	2AB 60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
2AB 45	55	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155	165	2AB 45	55	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155	165
2AB 30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	2AB 30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
2AB 15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	2AB 15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51
2AB 10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	2AB 10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34
2AB 5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	2AB 5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17

Note
1. Working pressure of chilled/cooling water circuits are based on 1.0MPa (100psig) and 1.4MPa (200psig) for driving
2. Power circuit
3. Cooling capacity per unit is 0.406kW/m² (1.52m²/h) for cooling water and 0.118kW/m² (0.427m²/h) for hot water.
4. Cooling factor 0.0001 m³/h²/Kcal for Absorber and Condenser, 0.0001 m³/h²/Kcal for Evaporator and Reheater.

World Energy Co.

PERFORMANCE DATA

Cooling Capacity		10/8																							
		31/26,5																							
		95/55																							
2AB 270	300	340	375	420	470	525	600	675	750	825	900	975	2AB 270	300	340	375	420	470	525	600	675	750	825	900	975
2AB 180	210	240	270	300	330	360	400	440	480	520	560	600	2AB 180	210	240	270	300	330	360	400	440	480	520	560	600
2AB 120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	2AB 120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
2AB 90	105	120	135	150	165	180	200	215	230	245	260	275	2AB 90	105	120	135	150	165	180	200	215	230	245	260	275
2AB 60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	2AB 60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
2AB 45	55	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155	165	2AB 45	55	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155	165
2AB 30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	2AB 30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
2AB 15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	2AB 15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51
2AB 10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	2AB 10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34
2AB 5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	2AB 5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17

Note
1. Working pressure of chilled/cooling water circuits are based on 1.0MPa (100psig) and 1.4MPa (200psig) for driving
2. Power circuit
3. Cooling capacity per unit is 0.406kW/m² (1.52m²/h) for cooling water and 0.118kW/m² (0.427m²/h) for hot water.
4. Cooling factor 0.0001 m³/h²/Kcal for Absorber and Condenser, 0.0001 m³/h²/Kcal for Evaporator and Reheater.

World Energy Co.

bifa Umweltinstitut GmbH

Am Mittleren Moos 46

86167 Augsburg

Tel. +49 821 7000-0

Fax. +49 821 7000-100

www.bifa.de