

# Kälte durch Wärme: Energieeffiziente Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung

## Rückschlüsse für den Anlagenbau aus dem Feldtest Absorptionskältetechnik (FAKS)

*Im Juli 2018 endete ein fünfjähriger Feldtest zur Marktfähigkeit einer neuen Generation von Absorptionskälteanlagen. Die Ergebnisse dieses Feldtests sind im folgenden Artikel aus Sicht des Anlagenbaus zusammengefasst.*



Dipl.-Ing. M.Eng.  
Stefan Tuschy,  
technischer Referent,  
BTGA e.V.



Dipl.-Ing. (FH)  
Clemens Schickel,  
technischer Referent,  
BTGA e.V.

Rund 40 Prozent des deutschen Endenergieverbrauchs und damit auch der CO<sub>2</sub>-Emissionen entfallen auf die Wärme- und Kältebereitstellung. Der weitaus größte Teil der Energie wird für das Heizen und Kühlen von Gebäuden benötigt – und der Kältebedarf steigt weiter an. In früheren Jahren wurde die Klimatisierung von Gebäuden oft nur als eine Steigerung des Komforts betrachtet. Heute kommt sie immer häufiger zum Einsatz: Die Arbeitsschutzanforderungen nehmen zu und neue Baukonzepte haben einen unvermeidbaren Kältebedarf, da die Gebäudehüllen immer dichter werden. Ebenso müssen immer mehr Technikräume, Rechenzentren, Produktionsstätten und landwirtschaftliche Bereiche aufgrund der hohen technischen Ausstattung oder auch der hygienischen Anforderungen gekühlt werden.

Zunehmend werden energieeffizientere Anlagen gefordert, um trotz steigendem

Kühlbedarf den CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu vermindern und den Klimaschutz zu stärken. Diese Forderung kann beispielsweise durch eine vollständig neue Anlagentechnik erfüllt werden. Eine andere Möglichkeit besteht darin, bereits existierende Verfahren in neuen Einsatzgebieten zu verwenden und diese effizienter zu gestalten, beispielsweise die Verbindung von Absorptions-Kälteanlagen mit der Kraft-Wärme-Koppelung. Eine solche Verbindung ist ein Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung-System (KWKK-System). Hier werden bis dahin ungenutzte Abwärmepotenziale aus dem KWK-Prozess genutzt. Auch ist eine stärkere Auslastung der Fernwärmenetze möglich, vor allem zu Schwachlastzeiten im Sommer – also zu Zeiten, in denen meist nur Wärme für die Trinkwassererwärmung benötigt wird. Die zusätzliche Wärmeanforderung durch Absorptions-Kälte-Anlagen-Systeme (AKA-Systeme) führt dazu, dass Fernwärmenetze besser ausgelastet sind und damit die Wirkungsgrade der Erzeugung und Verteilung der Fernwärme verbessert werden.

### Feldtest Absorptionskältetechnik

Um diese Potenziale zu erforschen und nutzbar zu machen, unterstützte der BTGA als Feldtestpartner ein durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im Rahmen des 6. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung gefördertes Projekt (Förderkennzeichen: 03ET1171d). Dieser Feldtest Absorptionskältetechnik (FAKS) erstreckte sich über einen Zeitraum von fünf Jahren. In dieser Zeit wurde die Marktfähigkeit einer neuen Generation von Absorptionskälteanlagen untersucht, die in einem vorgeschalteten Forschungsvorhaben im Labor des Instituts für Energietechnik der TU Berlin entwickelt und dort im Testbetrieb untersucht wurden. Während der Projektlaufzeit wurden die Anlagen im realen Betrieb unter saisonal schwankender Last

und unterschiedlichen Betriebszuständen gefahren, überwacht und modifiziert. Neben dem BTGA waren als Feldtestpartner auch der AGFW, die TU Dresden und das von der TU Berlin beauftragte ILK Dresden eingebunden. Durch die TU-Berlin wurde eine wissenschaftliche Begleitung (Monitoring) sichergestellt, insbesondere im Hinblick auf die Betriebssicherheit und die Langzeitverfügbarkeit. Außerdem wurden unterschiedliche Varianten des Systemaufbaus (Wärmeversorgung, Rückkühlung), verschiedene Betriebsführungskonzepte (Antriebstemperaturen, Kalt- und Kühlwassertemperaturen) und wechselnde Regelstrategien betrachtet, insbesondere in der Kombination mit weiteren Kälteanlagen.

Im Rahmen des Feldtests untersuchte der BTGA, ob die in den Projektphasen „Planen“, „Errichten“ und „Betreiben“ eingebundenen Personen aufgrund ihrer Qualifikation und der Berufserfahrung in der Lage sind, die ihnen jeweils zugeordneten Aufgaben in zufriedenstellender Qualität auszuführen. Es galt also herauszufinden, ob sie den bestmöglichen Rahmen für einen optimalen Betrieb der Absorptionsanlagen bei den Feldtestpartnern ermöglichen können. In der Folge wurden die Inhalte von Fort- und Weiterbildungsangeboten für die Akteure und ein möglicher Bedarf an Ergänzungen im Normenwerk untersucht. Außerdem konnten aus dem Verlauf der Installationsarbeiten der Anlagen Hinweise zur Optimierung der Konstruktion der Absorptionskälteanlagen gegeben werden.

Ein wichtiges Einsatzgebiet der weiterentwickelten Absorptionstechnologie ist die Kälteversorgung von bestehenden Gebäuden. Das bedeutet, dass die Absorber über vorhandene, zumeist nicht veränderbare Wege in bereits bestehende Technikzentralen gebracht werden müssen. Dabei spielen sowohl das Gewicht der Hauptkomponenten als auch deren Abmaße eine zentrale Rolle.



Im Juli 2018 wurde der Feldtest abgeschlossen.

**Anlagenkonzeption und -aufbau**

Die im Projekt zum Einsatz gekommenen Absorptionskälteanlagen (Abbildung 6) konnten mit Kältemodulen in zwei Leistungsklassen zu 50 kW und 160 kW ausgewählt werden – mittlerweile gibt es eine dritte Leistungsklasse mit 500 kW. Als Arbeitsstoffe werden Wasser als Kältemittel und eine Lithiumbromid-Lösung als Absorptionsmittel verwendet. In der Tabelle sind die Leistungsdaten der eingesetzten Absorptionskälteanlagen aufgeführt.

In insgesamt 16 Feldtestliegenschaften wurden 25 Absorptionskälteanlagen mit einer Kälteleistung von 2,26 MW betrieben. Unter den Feldtestliegenschaften waren sowohl Industriebetriebe und Objekte von Immobilienbetreibern als auch Handelsunternehmen. Die erste Inbetriebnahme im Rahmen des Projekts erfolgte im April 2014. Während der Projektlaufzeit konnten bis Mai 2018 fast 10 GWh Kälte erzeugt werden.

Als Antriebsenergie wurden in den Liegenschaften zwölfmal Fernwärme, dreimal Abwärme aus einer KWK-Anlage und einmal Abwärme aus einer solarthermischen Anlage genutzt. Abbildung 1 zeigt die Aufteilung der Kälteerzeuger in den Feldtest-Liegenschaften nach der Kältenutzung.

Eine besondere Herausforderung der Planung von Absorptionskälteanlagen ist deren Anpassung an die zumeist vorgegebenen Anforderungen an die Kaltwassertemperatur und an das Temperaturniveau des Fernwärmeverlaufs und -rücklaufs. Unter Einbeziehung

Tabelle: Leistungsdaten der im Feldtest eingesetzten Absorptionskälteanlagen

Beschreibung	Einheit	Biene	Hummel	Hornisse
Kälteleistung	kW	50	160	500
Nominalpunkt	COP	0,80		
T <sub>min</sub> (Heiz/-Kaltwasser)	°C	55,0/5,0		
T <sub>max</sub> (Kühlwasser)	°C	55,0		
L*H*B	m	1,80/1,65/0,80	1,99/2,22/1,03	3,70/3,30/1,75
Gewicht	kg	870	1.860	9.000

der möglichen Rückkühltemperaturen ergeben sich für jeden Einsatzfall individuelle Leistungsdaten des Absorbers. Dazu hat der Hersteller der Absorptionsanlage ein Nomogramm erstellt (Abbildung 2), mit dem die zu erwartende Kälteleistung geschätzt werden kann. Eine genauere Untersuchung und Planung des Einzelfalls kann diese Arbeitshilfe jedoch nicht ersetzen.

**Verlauf und Erkenntnisse des Forschungsvorhabens**

Im Rahmen der Fachplanung durch die vom Auftraggeber individuell beauftragten Ingenieurbüros mussten die Einsatzmöglichkeiten und auch die Einsatzgrenzen der durch die TU Berlin weiterentwickelten Absorptionskälteanlagen erkannt werden. Von entscheidender Bedeutung für die Gestaltung des Systems war das Festlegen der Projektziele.

Gegenüber der Kälteerzeugung mit Kompressionskälteanlagen verfügen Absorptionskälteanlagen neben einem Kalt- und einem Kühlwasserkreislauf zusätzlich über

einen Heißwasserkreislauf. Somit kann ein Ziel die Optimierung der Kühl- oder der Kaltwassertemperaturen als Führungsgröße sein. Möglich ist jedoch auch die Wahl der Heißwasser-Rücklaufemperatur als maßgebenden Wert, um zu erreichen, dass das Heißwasser möglichst stark auskühlt und sich damit die an den Fernwärmeeerzeuger abgegebene Rücklaufemperatur verringert. Werden im Projekt mehrere Kälteerzeuger vorgesehen, sind deren hydraulische Verschaltung und deren Betriebsweise festzulegen, beispielsweise um die Grundlast- oder Spitzenlast abzudecken. Einen besonderen Reiz für die Planung der Anlagen und deren Verschaltung bietet die Möglichkeit, die Absorptionsanlage sowohl als Kälteanlage für den Sommerbetrieb als auch zur Wärmeversorgung im Winterbetrieb einzusetzen – hier in der Funktion einer Wärmepumpe. Diese Option wurde in einer Liegenschaft umgesetzt.

Abweichend von den Annahmen zu Projektbeginn, stellte sich in der Planungsphase zu den einzelnen Liegenschaften ein sehr unterschiedlicher Stand des Vorwissens der Fachplaner heraus. In der Planungsphase der Anlagen sind verschiedene Fehlerarten aufgetreten. Diese wurden in folgende Fehlergruppen kategorisiert:

- Dimensionierung allgemein (Speicher, Pumpe, Ventile, Wärmeübertrager, Rohrleitung, etc.),
- hydraulisches Konzept,
- regelungstechnische Vorgaben,
- Effizienzkriterien (Sollwerte, Betriebszeiten, Systemtemperaturen, etc.).

Die am häufigsten beobachteten Fehler im Bereich der Planung waren mit sieben Nennungen die fehlende Freie Kühlung, mit fünf Nennungen die grundsätzlich falsche Dimensionierung und mit ebenfalls fünf Nennungen die zu geringe Kaltwassertemperaturspreizung. Vorrangig bei Anlagen, die in ein bestehendes System integriert werden mussten, waren teilweise nur ungenügende Angaben zu den Bestandsanlagen in den Ausschreibungen und

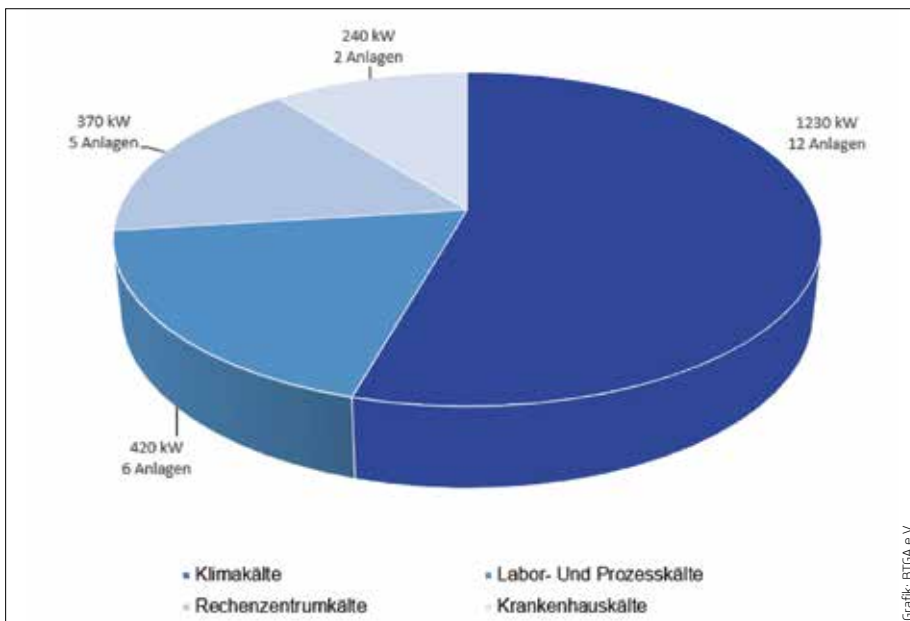


Abbildung 1: Anlagenverteilung innerhalb der Feldtestliegenschaften nach Leistung in kW

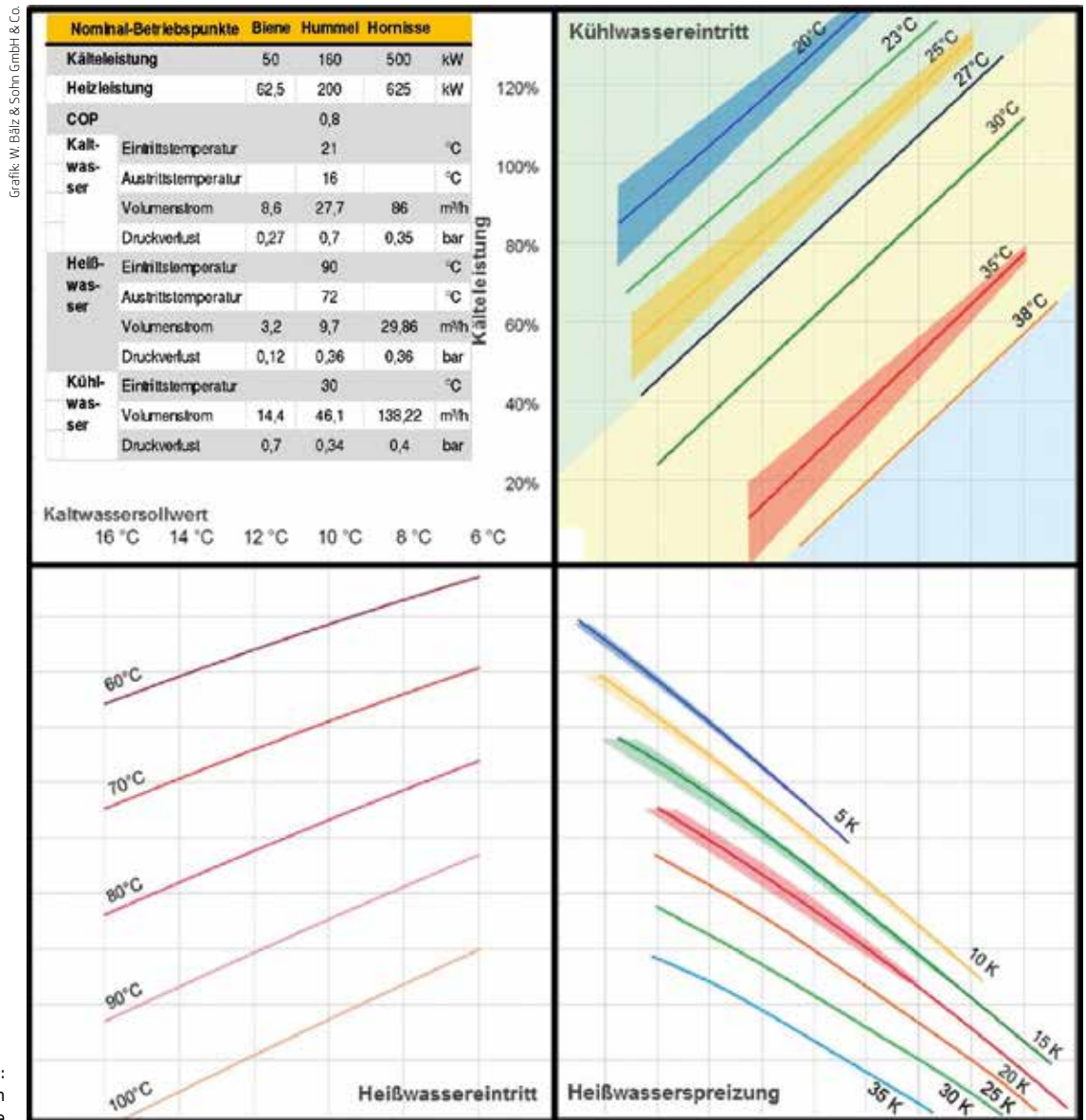


Abbildung 2:  
Nomogramm  
als Auslegungshilfe

Ausführungsunterlagen enthalten. Die genaue Lage der Anschlusspunkte und die Leitungsverläufe bestehender Anlagen waren nicht immer ausreichend berücksichtigt. Daher wurden teilweise im Rahmen der Montagevorbereitung und der Installationsarbeiten Änderungen der Leitungsführung gegenüber der Ausführungsplanung notwendig.

Im Verlauf des Feldtests ergab sich, dass die TU Berlin in über 50 Prozent der Fälle Hinweise zur Konzeptplanung geben konnte. Den eingebundenen Planern wurden die maßgeblichen und individuellen Hintergründe des Systemaufbaus für den jeweiligen Anwendungsfall vermittelt, häufig in Abgrenzung zur Kompressionskältetechnik. Diese grobe Konzeptplanung wurde den Planern zum Erstellen der Ausführungsplanung überlassen. Dem zunächst verfolgten An-

satz, den Planern die Ausarbeitungen vollständig zu überlassen und zu einem späteren Zeitpunkt lediglich korrigierend zu wirken, hat sich als nicht realisierbar herausgestellt. Dazu boten die zeitlichen Abläufe zwischen Planung, Vergabe und Ausführung keinen ausreichenden Rahmen.

Die Planungsvorgaben wurden von den ausführenden Unternehmen im Rahmen des Feldtests überwiegend fehlerfrei umgesetzt. In Einzelfällen, bei denen aufgrund der Einbindung in bestehende Anlagen Anpassungen der Leitungsführung vorgenommen werden mussten, erfolgten diese im Verlauf der Montagearbeiten durch die Monteure in Absprache mit den beteiligten Gewerken und den Betreibern.

Während der Ausführungsphase stellte sich bei den ausführenden Unternehmen überwiegend ein fundierter Kenntnis-

stand bezüglich des Vorwissens im Bereich der Anlagenhydraulik heraus. Die dennoch in der Ausführungsphase aufgetretenen Fehler und Auffälligkeiten wurden wie folgt kategorisiert:

- falscher Einbau (Sensoren, Rohrleitungsanschlüsse, etc.),
- falsche Produkt-/Materialauswahl (qualitative Unzulänglichkeiten),
- effizienzrelevante Fehler (Wärmebrücken, Fühlermontage, etc.),
- sonstige Ausführungsfehler.

Die häufigsten Fehlerquellen während der Ausführung waren in jeweils vier aufgetretenen Fällen nicht korrekt ausgewählte Ventile (falscher KVS-Wert) und der nicht fachgerechte Einbau von Bauteilen – falsch eingebaute Sensoren und vertauschte Rohrleitungsanschlüsse. Zurückzuführen waren



diese Fehler unter anderem auf fehlende technische Datenblätter des Herstellers der AKA-Anlage zu Beginn des Projekts.

Hinzu kamen diverse konstruktionsbedingte Besonderheiten, mit denen sich die ausführenden Unternehmen gerade zu Beginn des Projektes auseinanderzusetzen hatten. So wurde festgestellt, dass die wasserseitigen Anschlüsse der ersten AKA-Anlagen aufgrund ihrer Bauart nur mit erheblichem zusätzlichem Aufwand abgedichtet werden konnten (DN 80 mit lediglich 3 Gewindegängen – Abbildung 3). Neben dem Abdichten mit Hanf und dem Einkleben der Anschlüsse mit spezieller Dichtmasse wurden auch individuell gefertigte Anschlussstutzen mit Losflansch als Sonderbauteile hergestellt und eingesetzt (Abbildung 4). Es zeigte sich außerdem, dass der Abstand der Gewindebohrungen in der Anschlussplatte der AKA zu gering war (Abbildung 5). Teilweise lagen die fertig montierten Flanschanschlüsse unmittelbar aufeinander, sodass eine korrekte, spannungsfreie Montage der Anschlussflanche nicht möglich war.

Die Absorptionskälteanlage wurde auf einer Holzpalette angeliefert – allerdings ohne vorinstallierte Standfüße. Da aber diverse Anbauteile der Kältemaschine „Hummel“ tiefer liegen als die Aufnahmen für die Füße, konnte sie nicht ohne zusätzliche Hebewerkzeuge – oder zumindest eine Anschlagmöglichkeit für das Gewicht an der Decke – aufgestellt werden. Insbesondere bei bestehenden Gebäuden waren bei der Ein- und Unterbringung der AKA in die Technikzentralen diverse Widrigkeiten zu lösen. Aufgrund der im Zuge der Installationsarbeiten gewonnenen Erfahrungen wurden noch während der Projektlaufzeit konstruktive Veränderungen an den Absorptionskältemaschinen vorgenommen, mit denen die genannten Probleme zukünftig vermieden werden können.

Teilweise mussten auch zunächst vorhandene Komponenten demontiert und an anderer Stelle wieder installiert werden, um Platz für die neuen Komponenten und zum Betrieb der AKA zu schaffen. Hier zeigte sich der Vorteil der neuen kompakten Bauweise der Kältemaschinen vom Typ „Biene“ und „Hummel“ (Abbildung 6), da andernfalls deren Montage aufgrund der Platzverhältnisse nicht möglich gewesen wäre.

Das Befüllen und die Erstinbetriebnahme der AKA wurden durch die TU Berlin und den Hersteller der Absorptionskälteanlage durchgeführt – zumeist ohne Unterstützung der ausführenden Unternehmen. Ein Grund dafür war das bislang nicht überall vorhandene Know-how, vor allem im Umgang mit einem

LiBr-Wassergemisch. Außerdem mangelte es an den benötigten Spezialwerkzeugen, beispielsweise Vakuumpumpen, -schläuche und -verbindungen. Für die Erstinbetriebnahme und eine spätere Instandhaltung der AKA-Anlagen sollte dementsprechend ein Wissenstransfer seitens des Herstellers an die jeweiligen Instandhalter der Anlagen stattfinden. Das könnte beispielsweise über Herstellerschulungen geschehen.

Die Informationen und der Rücklauf der Installationsunternehmen konnten in Zusammenarbeit mit dem BTGA und der TU Berlin genutzt werden, um die Ausführung zu optimieren. Einige wertvolle Vorschläge konnten so aufgenommen und direkt umgesetzt werden. Mit wenigen konstruktiven Veränderungen wurden wesentliche Verbesserungen bei Transport und Montage der Kälteerzeuger erreicht. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass nur eine geringe Anzahl der in der Ausführung vorge-

fundenen Auffälligkeiten tatsächlich auf die AKA-Technologie bzw. die im Forschungsvorhaben verwendeten Absorptionskälteanlagen zurückzuführen war.

Nach der Erstinbetriebnahme wurde der reguläre Betrieb der gesamten Kälteerzeugungsanlagen durch Mitarbeiter der Betreiber verantwortet. Nach der Übergabe an die Betreiber wurden lediglich für spezielle Aufgaben Fremdunternehmen eingebunden, vor allem für die Wartung oder die Programmierung der MSR-Anlagen. Während der Betriebsphase wurden die einzelnen Liegenschaften kontinuierlich begleitet und die Anlagen einem Monitoring unterzogen, um mögliche Betriebsfehler aufzudecken und zu korrigieren.

Die von der TU Berlin weiterentwickelte AKA hat sich im Feldtest als ausreichend robust und geeignet für einen regulären Betrieb gezeigt. Insbesondere das Monitoring durch die TU Berlin hat erheblich zu einer



Abbildung 3: wasserseitige Anschlüsse der ersten AKA-Anlagen mit zu geringen Wandstärken



Abbildung 4: Anschlussstutzen als Sonderbauteil



Abbildung 5: fertig montierte Flanschanschlüsse

Optimierung des Anlagenbetriebs beigetragen. Eine Schulung des Betreibers ist zu empfehlen, um diesen für die Besonderheiten der AKA zu sensibilisieren und in die Lage zu versetzen, den jeweils effektiven Betrieb des Systems zu gewährleisten. Werden die Systeme auch ohne die intensive Betreuung im Feldtest verantwortungsvoll betrieben, steht mit der AKA ein effizientes, effektives und wartungsarmes System zur Kälteerzeugung aus Fern-, Ab- oder Umweltwärme zur Verfügung.

### Ergebnisse aus Sicht des Anlagenbaus

Die aus dem Forschungsvorhaben gewonnenen, wesentlichen Erkenntnisse sind, dass der Verbreitung der im Feldtest eingesetzten Absorptionskälteanlagen keine grundsätzlichen technischen Fragen entgegenstehen. Sowohl Fachplaner als auch ausführende Unternehmen sind in der Lage, die Anlagen auch außerhalb des begleiteten Forschungsvorhabens fachgerecht zu planen und zu errichten. Es wurden im gesamten Projektzeitraum keine grundsätzlichen Mängel vorgefunden, die ursächlich auf die Absorptionstechnik zurückgeführt werden könnten.

Zwar wurde im Rahmen des Feldtests die Konstruktion der AKA verbessert, um eine Montage gerade in bestehenden Gebäuden deutlich zu vereinfachen, dennoch handelt es sich dabei um Prozesse, die bei der Markteinführung eines neuen Produkts zu erwarten waren. Der BTGA unterstützte als Vertreter des Anlagenbaus insbesondere bei der Anlagenplanung, der Begleitung der Installation sowie der Inbetriebnahme und dem Übergang in den anschließenden Betrieb. Da die Installation der Anlagen zum Teil durch Mitgliedsunternehmen erfolgte, konnten zudem wesentliche Optimierungsvorschläge für die Montage der AKA-Anlage in den Gremien des Verbands diskutiert und erarbeitet werden.

Insbesondere im Rahmen von Modernisierungen bestehender KWK-Anlagen bietet die neue Absorptionskältetechnik ein großes Potenzial. Der wesentliche Vorteil der Kraft-Wärme-Kopplung gegenüber der getrennten Stromerzeugung liegt in Primärenergieeinsparungen durch Nutzung der bereitgestellten Wärme. Mit den weiterentwickelten Absorptionskälteanlagen kann die Wärme aus KWK-Prozessen gerade im Sommer, wenn nur wenig Wärme zu Heizzwecken benötigt

wird, für die Kälteerzeugung genutzt werden und so den Jahreswirkungsgrad der KWK positiv beeinflussen.

Für bestehende oder neu errichtete Fernwärmenetze ist der zusätzliche Wärmebedarf im Sommer, der durch die Kälteerzeugung mittels AKA-Anlagen hervorgerufen wird, ebenfalls positiv zu bewerten. Auch hier können Wirkungsgrade der Wärmezeugung verbessert und Netzverluste verringert werden.

Das bestehende Normenwerk zur Planung und Ausführung der AKA-Systeme ist umfangreich und ausreichend. Eine Schulung der ausführenden Unternehmen ist nach jetzigem Erkenntnisstand nicht von Nöten. Zur komplexen Anlagenhydraulik bietet der Endbericht des Forschungsvorhabens verschiedene Standard-Verschaltungen an, auf deren Grundlage auch Schulungen für Planer von AKA-Systemen entwickelt werden könnten.

### Ausblick

Die Ergebnisse des Feldtests lassen hoffen, dass sich zukünftig mehr Gebäudeeigentümer, Betreiber und Planer mit der Kälteerzeugung durch Einsatz von Wärme befassen. Um nicht nur energetisch, sondern auch wirtschaftlich mit der Kälteerzeugung durch Kompression konkurrieren zu können, bedarf es für die Absorptionstechnik jedoch einer Konsolidierung der Herstellungskosten. Bei steigenden Absatzzahlen und zunehmend automatisierten Produktionsprozessen bei der Herstellung der Komponenten könnte das möglich werden. Ein weiterer wichtiger Baustein bei der Verbreitung der AKA-Technik ist die Kostenentwicklung für elektrische und thermische Energie. Bleibt Strom günstig und wird Fernwärme gerade im Sommer durch steigende Preise unattraktiv, wird es die AKA-Technik im Vergleich zu Kompressionskältemaschinen schwer haben. Steht jedoch Abwärme aus anderen Prozessen – beispielsweise KWK – zur Verfügung, sollte eine Kälteerzeugung durch Einsatz von Wärme immer als Option betrachtet und näher untersucht werden. ◀

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



Foto: BTGA e.V.

Abbildung 6: Aufstellung und kompakte Montage in bestehender Zentrale